

Resumé

I dette speciale undersøges det, hvorvidt det er muligt at konstruere et computersystem, som i realtid kan hjælpe linjedommere med at lave korrekte offsidekendelser i fodboldkampe.

Specialet tager udgangspunkt i specialet af [Larsen & Hansen] samt prototypen DommerStøtteSystem, der blev udviklet i samme forbindelse. Deres løsning krævede en ændring af offsidereglen for at kunne fungere, men dette er næppe realistisk at få gennemført på verdensplan.

At systemet skal kunne fungere under den gældende offsideregel er derfor et af de krav, en kunde kan formodes at stille til en leverandør af et sådant system. Kunden formodes også at stille en række andre krav, og disse er opstillet i dette speciale, hvorefter de er blevet analyseret fra en mulig leverandørs synsvinkel for at vurdere, om det er muligt at lave computersystem til offsidedetektering, der lever op til de stillede krav.

Denne analyse inkluderer specielt en bevægelsesanalyse af fodboldspillere for at afklare, hvorvidt positioneringsdata om en spillers underben er tilstrækkeligt til at bestemme punktet nærmest mållinjen, som er afgørende for, om en spiller kan befinde sig i offsideposition. Desuden er der foretaget en analyse af, hvordan man ud fra positioneringsdata om bolden kan beregne sig frem til, præcist hvornår en aflevering har fundet sted.

Baseret på disse analyser er der blevet fremstillet en prototype ved navn OffsideDetekteringsAssistent (ODA) til at bevise, at konceptet kan føres ud i livet.

De udførte analyser og den implementerede prototype giver indikationer om, at det kan lade sig gøre at lave et computersystem, der kan fungere som hjælp til linjedommere i offsidesituationer, og som samtidig fungerer under den nuværende offsideregel.

Abstract

Title:

*Computerized offside detection in soccer –
optimization of a referee support system*

In this master's thesis the possibility of constructing a real-time computer system to support assistant referees in making correct offside calls in soccer is investigated.

The thesis is based on the master's thesis by [Larsen & Hansen] and the prototype DommerStøtteSystem (Referee Support System) developed on the same occasion. Their solution required modification of the offside rule to function, which is unlikely to be implemented world-wide.

That the system should be operational under the current offside rule is therefore one of the requirements a customer is assumed to put on a vendor of such a system. The customer is also assumed to make a number of other requirements, and these are defined in this thesis. Thereafter the requirements are analysed from a vendor's viewpoint in order to evaluate if it is possible to construct a computer system for offside detection that fulfils these requirements.

Particularly, the analysis includes a movement analysis of soccer players to clarify whether positioning data about a player's lower legs is sufficient to determine the point on the player that is closest to the goal line. This point decides if the player is in an offside position or not. Furthermore, an analysis is carried out to determine the exact moment of a pass based on positioning data about the ball.

Based on these analyses a proof-of-concept prototype named OffsideDetectionAssistant (ODA) has been implemented.

The analyses carried out and the implemented prototype indicate that it is indeed possible to make a computer system that can aid the assistant referees in offside situations, even without requiring modifications of the current offside rule.

Forord

Arbejdet med dette speciale tog sin spæde begyndelse i april 2005 og blev afsluttet i december samme år. Specialet er udarbejdet på Ingeniørhøjskolen i Århus i forbindelse med civilingeniøruddannelsen i Teknisk Informationsteknologi med specialisering indenfor distribuerede realtidssystemer.

Udviklingen af OffsideDetekteringsAssistent havde ikke kunnet gøres uden hjælp fra kyn-dige personer indenfor forskellige emner med betydning for offside-detektering. Specialets forfatter vil derfor gerne benytte lejligheden til at takke de personer, der har ydet bistand og været med til at hæve standarden for specialet og for ODA.

Computersystemer er nødt til at basere sig på faste regler, og her har Jan Carlsen fra lovgruppen under Dansk Boldspil Unions dommerudvalg været behjælpelig med præcise fortolkninger af offsidereglen.

Martin Brask fra TV3 bidrager med informationer om kameradækning ved fodboldkampe på tv, hvilket har været nødvendigt for at kunne fastlægge den præcision, der har kunnet tillades i ODA, når målet med systemet har været, at dets kendelser ikke må kunne falsificeres af tv-billeder.

Bevægelsesanalysen af fodboldspillere med henblik på at bestemme spillernes omfang ud fra positioner på skinnerne er foretaget med hjælp fra Thomas Bull Andersen fra Center for Idræt ved Århus Universitet. Analysen er foregået med elitespillere for at give højest mulig realisme, og her har AaB været så venlige at stille fire superligaspillere til rådighed, nærmere bestemt Thomas Kortegaard, Jacob Sørensen, Michael Jakobsen og Jeppe Lund Curth. Optagelserne til bevægelsesanalysen havde ikke den håbede kvalitet, og derfor blev der lavet ekstra optagelser, hvor forfatteren til dette speciales lillebror, Frands Boe Johansen, der har erfaring fra 2. division, fungerede som medie.

Endelig er der også al mulig grund til at takke specialevejleder Peter Gorm Larsen for sin bistand i specialeskrivningen. Gert Vestergaard Larsen og Søren Thestrup Hansen, hvis speciale dette speciale bygger på, har også været behjælpelige undervejs.

I øvrigt er relevansen af et computersystem til offside-detektering kommet til syne flere gange i løbet af den periode, specialet er skrevet over. Undertegnede er AaB-tilhænger og har i efterårssæsonen 2005 observeret intet mindre end tre fejlagtige offsidekendelser i afgørende situationer i AaB's kampe, der dog heldigvis ikke alle er gået AaB imod. To gange er åbenlyst korrekte – på tv-billeder, skal det retfærdigvis nævnes – scoringer blevet annulleret, og i et tredje tilfælde er et mål blevet godkendt, selvom målscoren stod i offsideposition.

Endvidere blev et mål annulleret i en situation, der selv ikke med langsomme gengivelser fra forskellige vinkler kunne afgøres entydigt. I dette tilfælde ville ODA være på grænsen af sin ydeevne hvad angår præcision. Som om det ikke var nok, er et femte mål blevet annulleret, fordi en spiller i offsideposition efter dommerens vurdering generede målmændene ved at sparke ud efter bolden. Vurderinger af det strafbare i en offsideposition ligger dog udenfor ODA's domæne, idet formålet er at kunne give linjedommerne besked om spillere i muligt strafbar offsideposition.

En sidste kommentar skal være, at det i grunden er imponerende, hvor ofte linjedommerne har ret, når sværhedsgraden af offsidevurdering tages i betragtning.

God fornøjelse med læsningen.

Dato

Underskrift

Indholdsfortegnelse

1. Indledning.....	6
1.1. Motivation.....	6
1.2. Systemkrav.....	9
1.3. Problemformulering.....	10
1.4. Metode.....	11
1.5. Læsevejledning.....	13
1.5.1. Forudsætninger	14
1.5.2. Ordforklaring	14
2. Offsidereglen	16
2.1. Fodboldlovens § 11	16
2.2. Præcisering af § 11	17
2.2.1. Deltage aktivt i spillet	17
2.2.2. Nærmere	17
2.2.3. Bolden røres.....	18
2.3. Eksempel.....	19
3. Indledende analyse.....	20
3.1. Analyse af krav.....	20
3.1.1. Tidskrav.....	21
3.1.2. Spillere på offsidegrænsen.....	22
3.1.3. Afleveringsdetektering	23
3.1.4. Identifikation af afleverende spiller	24
3.1.5. Kommunikation til linjedommere	24
3.1.6. Positioneringsdata	25
3.1.7. Delkonklusion	26
3.2. Cairos	27
3.2.1. Teknik	27
3.2.2. Services.....	29
3.2.3. Evaluering.....	30
3.3. Analyse af DommerStøtteSystem	30
3.3.1. Tidskrav.....	30
3.3.2. Spillere på offsidegrænsen.....	31
3.3.3. Afleveringsdetektering	31
3.3.4. Identifikation af afleverende spiller	33
3.3.5. Kommunikation til linjedommere	33
3.3.6. Delkonklusion	33
4. Bevægelsesanalyse	35
4.1. Indledning	35
4.2. Spillernes omfang	40
4.3. Almindeligt løb	43
4.4. Afleverende spiller	47
4.4.1. Nærkamp om bolden	48
4.4.2. Hovedstødsduel	50
4.5. Specialtilfælde	51
4.6. Delkonklusion.....	52
5. Detektering af afleveringer	54
5.1. Klassificering af afleveringer	54
5.2. Bestemmelse af afleveringstidspunkt	57
5.3. Opnåelig præcision.....	58
5.4. Delkonklusion.....	62
6. OffsideDetekteringsAssistent.....	63
6.1. Deployment, kommunikation og data.....	63
6.1.1. ScenarioSender.....	64

6.1.2.	Visualizer	64
6.1.3.	ODA	65
6.1.4.	Kommunikationsprotokoller	65
6.1.5.	Datamodel	65
6.2.	Grundlæggende funktionalitet i ODA	67
6.3.	Designbeslutninger.....	68
6.4.	Filtermekanismen	69
6.4.1.	Filtre	72
6.4.2.	Positioneringsstrategier.....	74
6.4.3.	Konfigurationer	74
6.5.	Samtidighed.....	75
6.5.1.	Trådinteraktion	76
6.5.2.	DataThread	77
6.5.3.	OffsideDetection	78
6.5.4.	Synkronisering.....	79
6.5.5.	Events	80
6.5.6.	Timing	81
7.	Test.....	83
7.1.	Testdata	83
7.2.	Tidsmålinger	84
7.3.	Test af funktionalitet	86
7.4.	Delkonklusion.....	88
8.	Fremskridt.....	89
9.	Fremtidigt arbejde	91
9.1.	Kommunikation til linjedommerne	91
9.2.	Filtre	92
9.3.	Videre bevægelsesanalyse.....	94
9.4.	Forretningspotentiale i andre sportsgrene.....	95
10.	Relateret arbejde	97
11.	Konklusion	100
A.	Appendiks til kapitel 1.....	102
A.1.	Baggrund for systemkrav	102
A.1.1.	Ufravigelige krav.....	102
A.1.2.	Vigtige krav.....	105
A.1.3.	Ønskværdig funktionalitet.....	106
B.	Appendiks til kapitel 2.....	107
B.1.	[Carlsen]	107
B.2.	[Carlsen2]	108
B.3.	[Carlsen3]	109
C.	Appendiks til kapitel 3.....	109
C.1.	[Brask].....	109
C.2.	Beskrivelse af [Larsen & Hansen]	110
C.2.1.	Positioneringsdata	112
C.2.2.	Design.....	112
C.2.3.	Offsidetetektering	113
D.	Appendiks til kapitel 4.....	114
D.1.	Qualisys	114
D.2.	Analysesoftware	117
D.2.1.	Afstandsberegning.....	118
E.	Appendiks til kapitel 6.....	119
E.1.	Datakonvertering	119
E.2.	Bevis for korrekt programafvikling.....	122
E.3.	Testopstilling.....	125
E.4.	Brugsvejledning.....	125
F.	Litteratur.....	128

1. Indledning

1.1. Motivation.....	6
1.2. Systemkrav.....	9
1.3. Problemformulering.....	10
1.4. Metode.....	11
1.5. Læsevejledning.....	13
1.5.1. Forudsætninger	14
1.5.2. Ordforklaring	14

Dette kapitel indeholder først og fremmest en introduktion til problemstillingen behandlet i dette speciale. Derudover opstilles de krav, som et computersystem til offside-detektering skal opfylde, og i problemformulering beskrives det, hvilke af disse krav, der vil være fokus på gennem dette speciale. Endelig gives et overblik over metoden, hvorved prototypen OffsideDetekteringsAssistent (ODA) er frembragt, og hvordan ODA indgår i et run-time-system, samt en læsevejledning til at give overblik over specialets opbygning og til at introducere de vigtigste af de benyttede termer.

1.1. Motivation

Da Portugal i 2004 afholdt EM i fodbold, blev der gennemsnitligt dømt offside fem en halv gang pr. kamp, mens antallet af mål var to et halvt pr. kamp [euro2004.com]. Antallet af mål er således lavt i forhold til antallet af offsidesituationer, og da offsidesituationer ofte medfører store chancer, kan det være afgørende for kampens udfald, om dommertrioen vurderer situationerne korrekt. Ved EM-slutrunden endte 13 kampe ud af 31 med en sejr på ét mål til det ene hold, mens 10 endte uafgjort. Et enkelt mål er således ofte den eneste forskel på en sejr eller en uafgjort, og i den sidste ende kan de manglende point have betydning for, om et fodboldhold klarer sig videre i turneringen, vinder mesterskabet, rykker ned eller lignende.

På grund af de mange indtægter fra især tv-rettigheder kan en undgået nedrykning eller en kvalifikation til en europæisk klubturnering gøre en stor forskel for den pågældende klubs økonomi. Samme økonomiske præmisser gælder for de nationale fodboldforbund, som står for landsholdsfodbolden. Alene det at deltage i EM i 2004 kastede 35 millioner kroner i præmiepenge af sig til DBU, og hertil kunne lægges 9,5 millioner for en sejr og to uafgjorte kampe, mens der var yderligere 14,25 millioner, fordi Danmark gik videre til kvartfinalerne [Berendt 2004]. Danmarks præstationer var altså næsten 60 millioner kroner værd, og med en årsomsætning på omkring 240 millioner [Berendt 2003] betød EM-deltagelse en forskel på 25 % alene i præmiepenge. Derfra skal naturligvis trækkes udgifterne ved sådan en slutrunde, men omvendt er det også lettere for succesrige hold at skaffe sponsorkroner, så resultaterne spiller bestemt en stor rolle økonomisk.

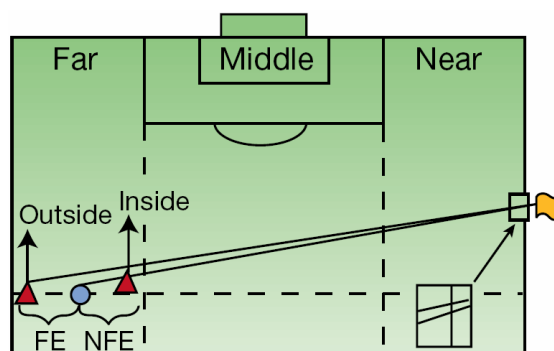
Også de retfærdighedssøgende har interesse i, at det hele går korrekt til. Fair play er et stort tema hos verdensfodboldforbundet FIFA, og bestemt også hos den klub, der går glip af store indtægter og sportslige udfordringer på grund af et mål scoret af modstanderne efter en offside, der ikke blev dømt, eller fordi de mangler et mål, der fejlagtigt blev annulleret for offside. Teknologiske hjælpemidler kunne være vejen frem mod en mere fair afvikling af kampene.

Offsidereglen vil blive gennemgået mere detaljeret i kapitel 2, men for en god ordens skyld er den herunder at finde i en stærkt forsimplet udgave baseret på [Fodboldloven]:

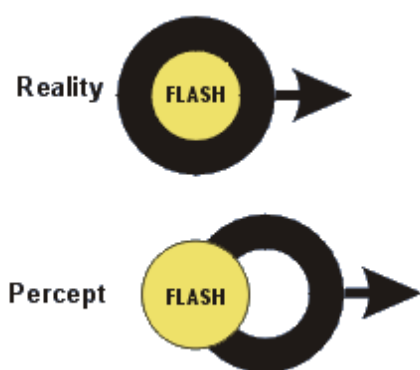
En spiller er offside, hvis han er nærmere modstandernes mål end både bolden og næstsidste modspiller, og efter dommerens skøn deltager aktivt i spillet i det øjeblik bolden røres af en medspiller.

Linjedommerne kan tage fejl

Linjedommernes opgave i forbindelse med offside er at holde sig på linje med den næstsidste forsvarsspiller for at kunne vurdere, om en modspiller står tættere på målet i det øjeblik, bolden bliver afleveret. Ofte skyldes fejlkendelser, at linjevogteren er forkert placeret. Står han ikke på linje med den næstsidste forsvarsspiller, kan vinklen snyde, idet den vinkel, hvormed der kigges, ikke er ret i forhold til sidelinjen [Oudejans et al.]. På Figur 1 dømmes den røde (trekantede) angriber længst til venstre fejlagtigt offside, fordi linjedommerens vinkel i forhold til situationen er skæv, mens den anden angriber fra linjedommerens vinkel ser ud til at være på den rigtige side af forsvarsspilleren, selvom han reelt er i offsideposition.



Figur 1 – Situation hvor linjedommerens placering er årsag til fejlagtige vurderinger. På figuren mangler en målmand, så den blå forsvarsspiller får status af næstsidste forsvarsspiller. Kilde: [Oudejans et al.].



Figur 2 – Flash-lag effect. Cirklen i bevægelse opfattes som værende længere mod højre end den blinkende cirkel, selvom de i virkeligheden er placeret over hinanden. Kilde: [Eagleman & Sejnowski].

En anden forklaring på linjedommernes fejlskøn findes i [Baldo et al.], og her er det den menneskelige opfattelsesevne, der menes at være fejlkilden. Der findes et fænomen kaldet *flash-lag effect* (glimt-forsinkelses-effekten), hvor et objekt i bevægelse opfattes som værende foran dets egentlige placering ved en kortvarig stimulus såsom blinket i Figur 2. Der findes mindst fire forskellige forklaringer på denne effekt, men fælles for dem alle er, at objekter i bevægelse og kortvarige stimuli ikke opfattes på samme tid. Overført til fodbold er de bevægelige objekter fodboldspillerne, mens den blinkende stimulus er en aflevering. [Baldo et al.] anslår forskellen mellem en spillers reelle placering og hans opfattede placering til at være mellem 2 og 64 cm. Denne forskel kan være med til at forklare skævheden i [Oudejans et al.] i fordelingen af fejlkendelser, hvor linjedommerens flag blev hævet henholdsvis ikke hævet.

For at bestemme afleveringsøjeblikket skal linjedommeren samtidig med at holde sig på linje med næstsidste forsvarsspiller følge med i spillet, nærmere bestemt holde øje med, hvornår bolden afleveres. Dette kan ifølge [Maruenda] ikke fysisk lade sig gøre, hvilket kan være en tredje årsag til fejlkendelser. Det tager mindst 160 millisekunder at flytte øjnene, og i dette tidsrum kan en gennemsnitsspiller flytte sig mere end en meter. Afstanden mellem to spillere, der løber hver sin vej, kan altså ændre sig med over to meter, mens linjedommeren flytter sine øjne¹. Figur 3 og Figur 4 illustrerer, hvor meget situationen kan ændre sig på kort tid, når forsvarerne og angriberne løber i hver sin retning. Mens linjedommeren flytter sine øjne fra boldholderen til den næstsidste forsvarsspiller (bemærk, at målmanden som regel er den bageste forsvarsspiller) kan spillerne have flyttet sig en del i forhold til hinanden.

¹ Beregnet ud fra, at en gennemsnitsspiller løber 100 meter på 14 sekunder og derfor kan flytte sig 71 cm på 100 millisekunder [Maruenda].



Figur 3 – Øjeblikket før afleveringen. Angriberen er på den rigtige side. Kilde: [Maruenda].



Figur 4 – Øjeblikket efter afleveringen. Forsvarsskæden er rykket frem, mens angriberen er løbet i modsat retning. Kilde: [Maruenda].

Linjedommernes opgave kompliceres yderligere af, at det slet ikke er sikkert, han har frit udsyn til den afleverende spiller, hvorfor det kan være svært for ham at bestemme afleveringstidspunktet. At fastslå den afleverende spiller kan i snævre tilfælde være endnu sværere, fordi situationerne kan risikere at foregå langt fra linjedommerens position på sidelinjen. For de som ikke ved det, skal det nævnes, at der til en fodboldkamp er to linjedommere, som har ansvaret for hver deres banehalvdel og står på hver deres sidelinje. Når linjedommeren har set en offsidesituation, han mener er strafbar, kan han markere med sit flag. Dommeren træffer den endelige afgørelse, og linjedommerne har således kun en vejledende funktion.

Teknisk hjælp til dommerne

FIFA's præsident, Sepp Blatter, har tidligere været meget imod brug af teknologiske hjælpemidler [McNulty], men er nu mere positiv, så længe det ikke kræver regelændringer eller underminerer dommerens autoritet [IFAB].

Ofte har det været diskuteret at bruge tv-billeder til at afgøre tvivlsomme spilsituationer (såsom offside eller om bolden har været over mållinjen) ligesom det ses i amerikansk fodbold. Hver gang er forslaget faldet til jorden, fordi man ikke ønsker stop i spillet for at dommeren kan kigge på tv-optagelser. Et system, der vil kunne afgøre den slags situationer mens de opstår, vil hjælpe dommertrioen med at komme frem til korrekte afgørelser uden at forsinke spillet og gøre tilskuerne utålmodige.

Et computerbaseret system til at opdage offside vil lette linjedommernes arbejde, men på ingen måde gøre dem overflødige. Det vil stadig være en vurderingssag, om en spiller i offsideposition er passivt eller aktivt offside, da det kan afhænge af, hvordan spilsituationen udvikler sig. Omvendt vil et sådant system give linjedommerne mere overskud til at følge med i spillet og de små frispark, spillerne laver på hinanden bag ryggen på dommeren, og dette vil igen fremme *fair play*-ånden. For at komme disse unoder til livs har det i mange år været diskuteret, om man skulle indføre en ekstra dommer – ligesom man har i håndbold – ud fra devisen, at fire øjne ser bedre end to. Det er denne opgave, linjedommeren kan tage på sig, når hans egen opgave lettes.

Computerbaseret offsidedetektering

Det er således et særdeles relevant emne, Gert Vestergaard Larsen og Søren Thestrup Hansen tog op i deres speciale "Computerbaseret offsidedetektering i fodbold - En undersøgelse af realtidskrav og definering af algoritmer" udarbejdet i 2004 på Ingeniørhøjskolen i Århus [Larsen & Hansen]. I specialet påviste de, at det er muligt for et computersystem at afgive offsidekendelser indenfor en fastsat acceptabel tidsgrænse på 1 sekund efter at bolden blev afleveret. Realtidskravet på 1 sekund blev sat for at sikre en flydende afvikling af kampene.

Til at bestemme spillernes og boldens placering på banen fandt [Larsen & Hansen] frem til, at positioneringssystemet fra det tyske firma Cairos på grund af stor præcision var det bedste. Cairos' system benytter sig af radiosendere i spillernes benskiner og i bolden, og det betyder, at spillernes placering skal findes ud fra disse data. Da specialet blev afleveret, var offsidereglen sådan af overkroppen var afgørende for, om en spiller var nærmere mållinjen end en anden. Dette kan ikke direkte udledes af skinnebenenes placering, men [Larsen & Hansen] baserer alligevel deres prototype på, at spillerne kan defineres som ét punkt. Det skal nævnes, at Cairos ikke ønskede at medvirke i specialet fra [Larsen & Hansen] og ej heller i dette speciale.

[Larsen & Hansen] efterlod en række løse ender, der skal tages hånd om, før visionen om computerbaseret offsidetektering i realtid kan føres ud i livet. Ændringen af offsidereglen er en af de løse ender, og herudover nævnes i fremtidigt arbejde i [Larsen & Hansen, s. 76] afleveringsdetektering som et væsentligt punkt til forbedring. Endvidere konkluderer [Larsen & Hansen, s. 78] at deres system kræver en regelændring for at kunne fungere, hvilket som tidligere antydte sikker ville blive svært at få igennem hos fodboldens lovgivende organisation, FIFA. De løse ender søges løst i dette speciale.

Bemærk, at der hverken her eller i [Larsen & Hansen] gøres noget forsøg på automatisk at vurdere, om en spiller deltager aktivt i spillet eller ej. Der kan let gå mere end et sekund inden det kan afgøres, om en spiller er aktivt offside, og derfor kan det umuligt nås inden for den fiktive tidsgrænse på 1 sekund. Det vil derfor stadig være op til linjedommeren at vurdere den aktiv/passive del af offsidereglen.

Læg også mærke til, at det udviklede system har til formål at støtte linjedommerne i deres beslutninger og altså kun indirekte er en hjælp til selve dommeren, som tager de endelige beslutninger. I stedet for DommerStøtteSystem vil den i dette speciale udviklede prototype derfor få det mere sigende navn OffsideDetekteringsAssistent, forkortet ODA.

1.2. Systemkrav

Uanset hvilken teknologi der anvendes i en computerbaseret offsidetekteringsassistent er der en række krav, systemet skal opfylde for at man som kunde vil investere i det med henblik på brug i fodboldkampe på højeste niveau. Kravene er delvist baseret på kapitel 2, hvor offsidereglen og relevante fortolkninger og definitioner beskrives. En nærmere forklaring af baggrunden for hvert enkelt krav findes i appendiks A.1.

Følgende krav er ufravigelige:

- Krav1* Linjedommeren skal have besked om spillere i muligt strafbar offsideposition, når bolden røres af en spiller fra samme hold. Dette skal ske indenfor 250 millisekunder efter at bolden er rørt og skal ske på en sådan måde, at han stadig kan følge med i spillet på banen.
- Krav2* Systemets vurderinger må ikke kunne falsificeres af tv-billeder efterfølgende.
- Krav3* Kommunikationen af offsidevurderinger må ikke kunne ødelægges, forfalskes eller opsnappes af uvedkommende personer.
- Krav4* Alle boldberøringer skal opfattes uden at ikke-afleveringer kategoriseres forkert. En boldberøring defineres til at ske i det øjeblik, kontakten mellem spiller og bold opstår.
- Krav5* Systemet må ikke kræve ændringer til den pr. 1. juli 2005 gældende version af fodboldloven eller de dertil hørende fortolkninger.
- Krav6* Systemet skal fungere uden at sinke spillet. Eksempelvis skal bolden kunne skiftes ud, når den forlader banen, så spillet kan sættes i gang hurtigst muligt.
- Krav7* Kun spillere og bolde på banen må have betydning for systemets vurderinger.

Udover de ufravigelige krav bør også følgende opfyldes:

- Krav8* Den afleverende spiller bør kunne identificeres korrekt i de fleste tilfælde. Når der opstår tvivlstilfælde, hvor flere spillere kan have afleveret bolden, bør linjedommeren hellere modtage en markering en gang for meget end en for lidt.
- Krav9* Linjedommerne bør ikke modtage markeringer med mindre der er chance for at en spiller i offsideposition deltager aktivt i spillet.
- Krav10* Målspark, indkast og hjørnespark bør ikke give anledning til at systemet vurderer situationen som en offsideposition.

Endvidere er følgende funktionalitet ønskværdig:

- Krav11* Kommunikationen til linjedommeren bør mindst omfatte antallet af spillere i offsideposition og bør om muligt omfatte, hvilke spillere i offsideposition, der kan risikere at være strafbare.
- Krav12* En eventuel brugergrænseflade til systemet bør kunne betjenes af dommertrioen og fjerdedommeren og kræve så lidt interaktion som muligt mens kampen forløber.
- Krav13* Systemet bør let kunne justeres i tilfælde af ændringer i fodboldloven.

De ovennævnte krav er fortrinsvis funktionelle, idet der i dette speciale fokuseres på, om det overhovedet er muligt at lave en OffsideDetekteringsAssistent. En kunde til et sådant system vil også opstille en række ikke-funktionelle krav om eksempelvis installation, vedligeholdelse og oplæring. Fodboldstadions er meget forskellige, så alt efter hvem kunden er, kan der stilles forskellige krav til installation.

FIFA kunne være en mulig kunde, som ville købe systemet til brug ved VM-slutrunder. De ville derfor kunne tænkes at kræve, at systemet kunne pilles ned efter slutrunden og sættes op ved næste slutrunde, som altid foregår i et andet land og på andre stadions.

Forestiller man sig at systemet blev solgt direkte til klubberne og derfor skulle installeres permanent på klubbens stadion, vil kravene være mere specifikke i forhold til det enkelte stadion. Antallet, størrelsen og udformningen af tilskuertribuner, eventuel løbebane omkring fodboldbanen samt afstanden fra sidelinjen til tribunerne er eksempler på parametre, der vil lægge til grund for en konkret kravspecifikation fra en sådan kunde.

Uanset hvilke ikke-funktionelle krav, OffsideDetekteringsAssistent kan tænkes at skulle opfylde, er det dog en forudsætning, at det overhovedet kan lade sig gøre at lave et system, der lever op til de funktionelle krav. Det er denne forskning der lægges vægt på i nærværende speciale, mens de ikke-funktionelle krav opfattes som mere praktiske sider af et endeligt, kommercielt system, som systemets leverandør må tage hånd om.

1.3. Problemformulering

Dette speciale tager udgangspunkt i specialet af [Larsen & Hansen] samt positioneringssystemet fra Cairos, så ovennævnte krav kan formuleres som følgende hovedspørgsmål:

Kan en eksisterende prototype på et dommerstøttesystem til offsidedetektering optimeres til at blive tilstrækkeligt pålidelig til brug i fodbold på topplan? Optimeringerne skal overholde reeltidskravet på maksimum 250 millisekunder fra bolden bliver afleveret til annonceringen modtages af linjedommeren (Krav1).

Til hovedspørgsmålet knytter der sig disse underspørgsmål, som opsummerer de vigtigste systemkrav sat i relation til et positioneringssystem som Cairos':

- Cairos' positioneringssystem kan give oplysninger om benenes placering på banen, men det er hele kroppen og ikke kun benene, der afgør en mulig offsideposition. Kan kroppens position udledes af benenes positioner, så systemet kan fungere under den nuværende offsideregulering?

- Er det muligt at beregne sig frem til, hvornår bolden afleveres? Ved en aflevering vil bolden ofte få tilført fart eller skifte retning, men retnings skift kan også ske, når bolden eksempelvis rammer en knold på banen eller bliver grebet af vinderen. Kun reelle afleveringer må give anledning til offsidemarkeringer.
- Kan spillernes positioner med positioneringssystemet fra Cairos præciseres tilstrækkeligt til at identificere den afleverende spiller? Det er afgørende for vurderingen af en offside situation, om afleveringen kommer fra en spiller fra det ene eller det andet hold.
- Hvordan kan information om, hvor mange og hvilke spillere, der står i offsideposition på afleveringstidspunktet, kommunikeres ud til linjedommeren? Kommunikationen skal være sikker, så signalerne ikke kan aflyttes, manipuleres eller ødelægges.

Underspørgsmålene er særligt interessante, fordi de omfatter de tre centrale elementer i vurderingen af offside situationer: afleveringstidspunkt, den afleverende spiller samt spillere tæt på offsidegrænsen. Endelig skal linjedommeren naturligvis have besked om, hvordan systemet vurderer situationerne, men dette underspørgsmål er lavere prioriteret end de andre, som omhandler systemets interne funktionalitet – at foretage vurderingerne.

1.4. Metode

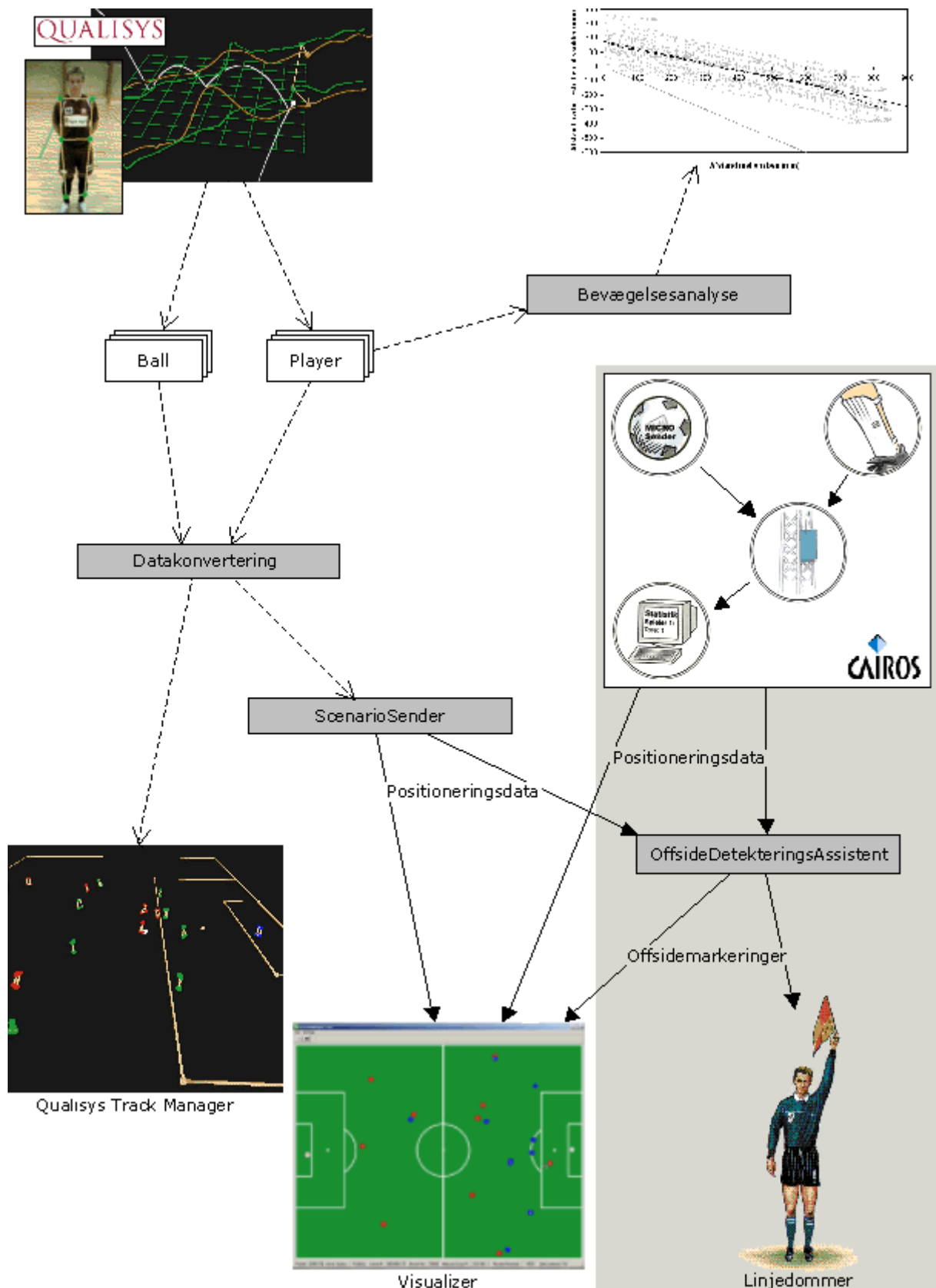
Der er blevet arbejdet videre ud fra de prototyper, der er udviklet i specialet "Computerbaseret offsidetektering i fodbold – En undersøgelse af realtidsskrav og definering af algoritmer" af Gert Vestergaard Larsen og Søren Thestrup Hansen. Den udviklede programsuite består af fire prototyper, hvoraf den ene hedder DommerStøtteSystem (DSS) og er specialets egentlige formål, mens de andre tre er udviklet for at teste DSS, som der kigges nærmere på i afsnit 3.3.

Da Cairos ikke ønskede at medvirke i nogen af specialerne, har det været nødvendigt at skabe positioneringsdata på anden vis. I dette speciale gøres der brug af positioneringsdata skabt med systemet Qualisys. Scenarier specielt designet til at repræsentere forskellige spilsituationer med relation til offsidetektering er blevet optaget med infrarøde kameraer for at give 3D-data om spillere og bolds placering. Systemet er videobaseret, hvilket kan betyde, at der ikke altid kan gives positioner på alle objekter, fordi de dækker for hinanden. Desuden kan systemet kun bruges indendørs, hvilket begrænser den plads, spillerne kan gøre brug af under optagelserne. Systemet fra Qualisys vil således ikke kunne bruges som positioneringssystem til en virkelig offsidetekteringsassistent, men kan alligevel give langt mere realistiske data end den i [Larsen & Hansen] udviklede ScenarioGenerator.

Som antydning i systemoversigten i Figur 5 kan Qualisys-optagelserne eksporteres til tabulator-separererede tekstfiler. Disse filer bruges som input til en applikation ved navn Bevægelsesanalyse, som generer data til brug i analyse af bevægelserne for fodboldspillere. Analysen foretages for at finde frem til en metode at positionere resten af spillerens krop ud fra benenes positioner.

Datakonvertering er et program, der via et scriptsprog bruges til at sammensætte Qualisys-eksporterede tekstfiler til et samlet scenario. Programmets output er scenarier i to formater, hvoraf det ene kan læses af Qualisys Track Manager (QTM), som bruges til at vise Qualisys-optagelser. Både Bevægelsesanalyse og Datakonvertering er udviklet i forbindelse med specialet her.

Det andet output-format kan læses af ScenarioSender, som blev udviklet i [Larsen & Hansen] til at simulere et rigtigt positioneringssystem ved at udsende positioneringsdata. I et virkeligt system (markeret med den lysegrå kasse i Figur 5) ville et positioneringssystem som det fra Cairos sørge for realtidsudsending af disse data, men de ønskede altså ikke at deltage i specialet.



Figur 5 – Systemoversigt. Den lysegrå kasse markerer de delsystemer, der vil indgå til offsidedetektering i en virkelig fodboldkamp, og fuldt optrukne pile repræsenterer netværksdata. Dele af figuren er hentet hos [Cairos], [Qualisys], [Fodboldloven] og [Larsen & Hansen].

Cairos' system fungerer på den måde, at radiosendere i spillernes benskiner samt bolden sender radiosignaler, som opfanges af et antennenetværk, hvorefter en central computer står for beregningerne, jf. afsnit 3.2.

Positioneringsdata modtages af det samlede systems centrale komponent, OffsideDetekteringsAssistent, som forestår offsidetekteringen. Visualizer, som ligesom ScenarioSender er udviklet i [Larsen & Hansen], modtager de samme data og viser dem på skærmen, og modtager endvidere de offsidemarkeringer, en linjedommer i et virkeligt system ville modtage. Linjedommeren vil ved modtagelse af en offsidemarkering skulle vurdere, om spilleren i offsideposition deltager aktivt i spillet og i så fald markere dette over for dommeren.

En fordel ved optagelserne lavet med Qualisys er, at de rent faktisk kan give oplysninger om placeringen af flere steder på kroppen og ikke kun benenes placering. Det betyder, at man i QTM kan få en god fornemmelse af spillernes omfang, og QTM giver samtidig mulighed for at standse og spole i scenarierne og aflæse koordinaterne for de udvalgte punkter på spillerne. På den måde kan QTM med en vis præcision bruges til at verificere systemets vurderinger.

ScenarioSender afsender positioneringsdata med en vis frekvens og afvikles derfor på en deterministisk platform, der kan garantere, at programmøren har kontrol over udførelsen af programmet og dermed også eksekveringstiden. Operativsystemet RTOS-32 fra On Time kan tilbyde denne form for styring af ressourcerne, og i programmeringssproget C++ er det også programmøren selv, der styrer, hvornår de forskellige rutiner udføres. Hvis programmet har en bestemt opførsel, kan man dermed som udvikler være sikker på, at det vil opføre sig på samme måde og tage lige så lang tid, når det afvikles igen.

Også OffsideDetekteringsAssistent har realtidskrav at leve op til, og derfor udvikles dette delsystem ligeledes i C++ og til RTOS-32. Visualizer er derimod ikke kritisk for det samlede systems afvikling, hvorfor det er udviklet i C#, som er lettere og hurtigere at udvikle grafiske programmer i. Disse beslutninger blev truffet i [Larsen & Hansen, s. 8], og der ses ingen grund til at ændre på dette. Datakonvertering og Bevægelsesanalyse er udviklet i Java, som dette speciales forfatter er mere bekendt med.

1.5. Læsevejledning

Forhåndenværende speciale er opbygget på følgende måde:

Kapitel 2 – Offsidereglen

Her forklares offsidereglen, og nødvendige præciseringer for at reglen kan inkorporeres i en algoritme foretages.

Kapitel 3 – Indledende analyse

I dette kapitel analyseres systemkravene fra afsnit 1.2, der ligger til grund for problemformuleringen, set fra en leverandørs side. Analysen fører blandt andet til nogle krav til et positioneringssystem, som systemet fra Cairos vurderes imod. Endelig vurderes DommerStøtteSystem, som prototypen i dette speciale er bygget på, i forhold til systemkravene.

Kapitel 4 – Bevægelsesanalyse

Den indledende analyse synliggør endvidere behovet for en analyse af spillernes bevægelser med henblik på at kunne fastslå punktet nærmest mållinjen ud fra benenes positioner. I dette kapitel frembringes en metode til at kunne fastslå et omrids af spillerne ved forskellige slags bevægelser, hvormed punktet nærmest mållinjen kan fastslås.

Kapitel 5 – Detektering af afleveringer

Det springende punkt i offsidetektering er, om det er muligt at detektere afleveringer korrekt, hvilket afgøres ud fra boldens opførsel. I dette kapitel undersøges det, om det er muligt at skelne afleveringer fra ændringer i boldens opførsel, som er forårsaget af andet

end fodboldspillere. Endvidere vurderes det, hvor stor præcision der kan opnås i detektering af såvel afleveringer som selve afleveringstidspunktet.

Kapitel 6 – OffsideDetekteringsAssistent

I dette kapitel beskrives de udviklede prototyper og den sammenhæng, hvori de indgår i en run-time-opsætning. ODA er den centrale komponent, og dette delsystems design og realtidsegenskaber beskrives.

Kapitel 7 – Test

Ved hjælp af en række opsatte scenarier testes ODA's funktionalitet i dette kapitel, ligesom det undersøges, om de fastsatte tidsgrænser kan overholdes.

Kapitel 8 – Fremskridt

Da specialet her bygger på specialet fra [Larsen & Hansen], vurderes det i dette kapitel, hvor meget tættere dette speciale bringer verden på visionen om et computersystem til at hjælpe linjedommerne med at vurdere offsidessituationer.

Kapitel 9 – Fremtidigt arbejde

Her angives retningslinjer for, hvilket arbejde der skal udføres, før ODA kan lanceres som et kommercielt system. Der gives bud på forbedringer, der skal ske før systemet kan bruges i topfodbold og videre analyser der bør foretages, ligesom systemets forretningspotentiale i andre sportsgrene vurderes.

Kapitel 10 – Relateret arbejde

Dette speciale er ikke det første projekt, der har omhandlet teknologi i forbindelse med sport. Kapitlet giver en lille indblik i, hvordan computersystemer hjælper til større retfærdighed i sportsverdenen, og hvordan tv-seere eksempelvis har glæde af visualiseringer.

Kapitel 11 – Konklusion

I specialets sidste kapitel konkluderes der på arbejdet og de opnåede resultater.

1.5.1. Forudsætninger

Specialet er skrevet på civilingeniøruddannelsen Teknisk Informationsteknologi med specialisering i Distribuerede Realtidssystemer, og læseren formodes derfor at have indsigt i datalogiske og ingeniørmæssige områder såsom softwareudvikling, programmering og systemarkitektur.

Der stilles ikke krav til læserens forudgående viden om fodbold i almindelighed eller offside-reglen i særdeleshed, men fodboldkendskab vil naturligvis gøre det lettere at forstå problemstillingen, benyttede eksempler og andet fodboldfagligt indhold.

1.5.2. Ordforklaring

Igen gennem specialet vil ordet *angriber* eller *angrebsspiller* blive brugt om medspillere til den spiller, der afleverer bolden. Denne spiller kaldes også afleveringens *kilde*. En *forsvarer* eller *forsvarsspiller* er således en spiller på det modsatte hold af afleveringens kilde.

I afsnit 2.1 forklares det, at såvel tilsigtede som utilsigtede boldberøringer i lovens forstand er at regne for *afleveringer*, hvorfor dette ord vil dække over begge typer. *Afleveringsøjeblikket* er det øjeblik, der opstår kontakt mellem en spiller og bolden, jf. afsnit 2.2.2.

Offsidegrænsen udgøres af den linje parallelt med mållinjen, som går gennem den næstsidste forsvarsspiller eller bolden, jf. afsnit 2.1.

OffsideDetekteringsAssistent eller *ODA* bruges om det konkrete centrale delsystem, der udvikles i dette speciale og som står for selve offside-detekteringen, mens *DommerStøtteSystem* er det tilsvarende delsystem i [Larsen & Hansen]. Bruges ordene med små

bogstaver – *offsidedetekteringsassistent* eller *dommerstøttesystem* – refereres der til systemerne som abstrakt begreb.

OffsideDetekteringsAssistent vil lave *vurderinger* af offsidesituationer og i tilfælde af strafbar offside eller tvivl herom komme med *markeringer*, som linjedommerne skal tage stilling til. Mener linjedommeren at der skal dømmes offside, skal han markere dette overfor dommeren ved at vinke med sit flag, og det er herefter dommerens opgave at foretage *kendelser*.

2. Offsidereglene

2.1. Fodboldlovens § 11	16
2.2. Præcisering af § 11	17
2.2.1. Deltage aktivt i spillet	17
2.2.2. Nærmere	17
2.2.3. Bolden røres	18
2.3. Eksempel	19

Formålet med offsidereglene er at forhindre angribere i at opholde sig tæt ved modstandernes mål og på den måde opnå en fordelagtig position alene med målmanden, når holdet erobrer bolden. I dette kapitel forklares offsidereglene, diverse uklarheder i reglens formulering præciseres og der gives et eksempel, der kan hjælpe til forståelse af reglen og dens fortolkninger. Præciseringerne lægger til grund for de udviklede algoritmer, og derfor frarådes det at springe kapitlet over, selvom man som læser føler sig godt bekendt med offsidereglene.

2.1. Fodboldlovens § 11

[Fodboldloven] forklarer spillets regler og er noget nær en direkte oversættelse af FIFA's regelsæt, som anvendes over hele verden. § 11 beskriver offsidereglene og lyder lettere forkortet således:

Offsideposition

Det er ikke strafbart i sig selv at være i offsideposition.

En spiller er i offsideposition, hvis:

- han er nærmere modspillernes mållinje end både bolden og næstsidste modspiller

En spiller er ikke i offsideposition, hvis:

- han er på egen banehalvdel, eller
- han er på linje med næstsidste modspiller, eller
- han er på linje med de to sidste modspillere

Strafbar offside

En spiller i offsideposition skal kun straffes for offside, hvis han, i det øjeblik bolden røres af en modspiller, efter dommerens skøn deltager aktivt i spillet ved at

- indvirke på spillet, eller
- genere en modspiller, eller
- opnå en fordel af sin offsideposition

Ikke-strafbar offside

Der foreligger ingen offsideforseelse, hvis spilleren modtager bolden direkte fra

- målspark, eller
- indkast, eller
- hjørnespark

2.2. Præcisering af § 11

Formuleringerne vedrørende offside er flere steder vage og kræver yderligere præcisering for at give en entydig fortolkning og ikke mindst for at kunne indgå i et computerbaseret system.

Det drejer sig om

- hvad det vil sige at deltage aktivt i spillet
- hvad det vil sige at være nærmere modspillernes mållinje end næstsidste forsvarsspiller
- hvornår bolden betragtes som værende rørt

2.2.1. *Deltage aktivt i spillet*

Som defineret ovenfor er det kun spillere, der deltager aktivt i spillet i det øjeblik bolden bliver rørt af en modspiller, der skal straffes for at være i offsideposition. [Fodboldloven, s. 26] forklarer mere detaljeret, hvordan formuleringerne om at være aktivt offside skal fortolkes:

De forskellige former for at deltage aktivt i spillet defineres således:

At *indvirke på spillet* vil sige at spille en bold, som sidst er blevet spillet af en modspiller.

At *genere en modspiller* vil sige at forhindre en modspiller i at spille eller kunne spille bolden ved klart at spærre for modspillerens udsyn eller bevægelser, eller at gestikulere eller bevæge sig og derved efter dommerens skøn distrahere en modspiller.

At *opnå en fordel af sin offsideposition* vil sige at spille en bold, som springer tilbage fra målstang, overligger eller modspiller, efter at spilleren, som nu skal straffes, oprindeligt var i en offsideposition.

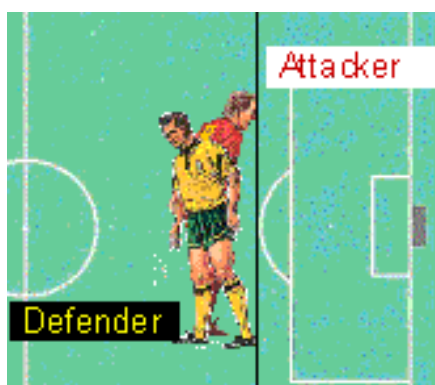
At indvirke på spillet er den oftest forekommende årsag til at en spiller dømmes offside. En spiller kan kun indvirke på spillet ved at røre bolden, og det er derfor ikke strafbart at stå i offsideposition, hvis bolden spilles til en anden modspiller, som eksempelvis står i den anden side af banen.

Denne fortolkning er forholdsvis ny, idet den blev præciseret i den danske version af fodboldloven med virkning fra sommeren 2004. Før dette tolkede man i Danmark så godt som alle spillere i offsideposition som aktive, når bolden blev spillet ned bag modstandernes forsvarskæde. Man tolkede spillere i offsideposition til at opnå fordel af sin offsideposition ud fra den betragtning, at modspillerne agerede ud fra spillernes placering, og at man efterfølgende kunne blive spillet fri til en målchance. Præciseringen af, hvad det vil sige at opnå fordel af sin offsideposition, omfatter kun modspillere og banens udstyr, og derfor kan kun spilleren der modtager bolden indvirke på spillet.

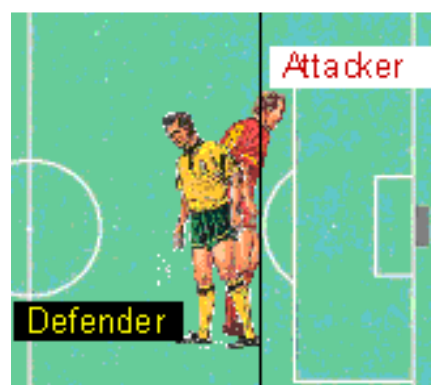
2.2.2. *Nærmere*

Indtil for nylig har det været op til de nationale fodboldforbund at definere deres egen version af 'nærmere', men i den seneste udgave af fodboldloven har FIFA vedtaget en fortolkning, som fremover skal benyttes over hele verden. Den officielle fortolkning findes i [Fodboldloven, s. 26] og lyder således:

I definitionen af offsideposition vil "nærmere modspillernes mållinje" sige, at en del af spillerens hoved, krop eller fødder er nærmere modspillernes mållinje end både bolden og næstsidste modspiller. Arme er ikke omfattet af denne definition.



Figur 6 – Angriberen (den røde spiller) er ikke i offsideposition [Kilde: Carlsen2].



Figur 7 – Angriberen er i offsideposition [Kilde: Carlsen2].

Figur 6 og Figur 7 illustrerer, hvad det vil sige at være nærmere modstandernes mållinje end en forsvarsspiller. Det er altså det punkt på spillerens krop (bortset fra armene, som man jo ikke spiller fodbold med) der er nærmest mållinjen, en eventuel offsideposition vurderes ud fra.

Denne præcisering er helt ny, idet det først er indføjet i regelsættet med virkning fra sommeren 2005. Førhen havde de nationale fodboldforbund deres egne fortolkninger, og i Danmark brugte man torsoen som indikator for, om en spiller var nærmere mållinjen end næstsidste modspiller, således at en overvejende del af torsoen skulle have passeret hele torsoen på næstsidste modspiller (eller hele bolden) for at man kunne være i offsideposition.

2.2.3. Bolden røres

Da det er i det øjeblik, bolden røres af en medspiller, offsidepositionen skal vurderes, er det vigtigt at få dette øjeblik præciseret. Dette øjeblik vil i dette speciale blive omtalt som afleveringsøjeblikket, men afleveringen behøver ikke være tilsigtet, og principielt hører driblinger også med i kategorien af tilfælde, hvor bolden røres. Bliver en angrebs-spiller ramt af bolden – eksempelvis når en forsvarer forsøger at sparke den ud af forsvarszonen – vil denne berøring i lige så høj grad som et almindeligt spark betegnes som en aflevering.

Spørgsmålet er imidlertid, om boldberøringen anses for at være sket når bolden opnår kontakt med spillerens støvle (eller hvad han nu rører bolden med), gennem hele boldberøringen eller når kontakten mellem støvle og bold ophører. Jan Carlsen fra lovgruppen under Dansk Boldspil Unions dommerudvalg har været så venlig at bidrage med præcisering af afleveringsøjeblikket. [Carlsen] formulerer en aflevering som følger:

'At røre bolden' kan [...] nagelfast defineres som det øjeblik, hvor den første kontakt opstår mellem bold og medspiller – og ikke i det øjeblik, hvor bolden slipper medspilleren (afleveringen foretages).

[Wesson, s. 9] hævder, at en bold har kontakt med jorden i lige under en hundrededel af et sekund, når den hopper på jorden. Dette gælder uanset boldens fart ved nedslaget. Ved et spark til bolden er kontakten rundt regnet en hundrededel af et sekund [Wesson, s. 19], hvilket kan tolkes til at være en smule længere. Igen gælder det, at kontakttiden er omtrent konstant, så et hårdere spark forøger ikke tidsrummet med kontakt med bolden – kun boldens fart forøges.

Udover at definere selve afleveringstidspunktet er det også væsentligt, hvor meget der skal til, før at bolden betragtes som rørt. [Carlsen3] forklarer, at...

[*Bolden betragtes som rørt*] når der er kontakt, uanset om det medfører en retningsændring eller ej. Pointen er, at dommeren ved en trøje- eller hårkontakt e.l. ofte vil kunne høre kontakten, også selv om den ikke kan ses.

Spørgsmålet om strafbarhed for en spiller i offsideposition skal altså vurderes ud fra, om spilleren var offsideposition i det øjeblik, der opstod kontakt mellem bolden og den afleverende spiller, uanset om denne kontakt havde indflydelse på boldens bane, fart eller rotation.

2.3. Eksempel

Figur 8 viser en spilsituation, der kan bruges til at forklare offsidereglen med.

Det røde hold angriber fra venstre mod højre, og rød nummer 6 skal netop til at sparke til bolden. Rød nummer 11 er ikke i offsideposition, da han er på linje med blått holds næstsidste spiller (nummer 5), mens rød nummer 9 befinder sig offsideposition.

Vælger rød nummer 6 at aflevere, skal det afgøres, om rød nummer 9 er strafbart offside, dvs. deltager aktivt i spillet.

- Spilles bolden til rød nummer 9, vil han være strafbart offside, hvis han rører bolden, fordi han *indvirker på spillet*.
- Hvis bolden spilles over i modsatte side, skal der ikke dømmes offside. Ingen af betingelserne præciseret i fortolkningen gælder for rød nummer 9, når bolden spilles til rød nummer 11.

Hvis bolden spilles til rød nummer 11, foreligger der herefter en ny spilsituation. Spiller rød nummer 11 bolden videre, og rød nummer 9 i mellemtiden er kommet ud af sin offsideposition, kan han altså ikke dømmes offside, selvom han var i offsideposition, da bolden blev spillet til rød nummer 11.

Vælger rød nummer 6 at sparke på mål i stedet for at aflevere, kan der ske det, at målmanden blokerer bolden, så den ryger ud i feltet igen.

- Rød nummer 9 vil blive vurderet som aktivt offside, hvis han forsøger at få fat i bolden, idet han har *opnået en fordel af sin offsideposition*.
- Er det rød nummer 11, der opfanger den reflekterede bold, skal der ikke dømmes offside, da han ikke var i offsideposition (også kaldet onside) i det øjeblik, da bolden blev spillet. Afleveringsøjeblikket var ikke da målmanden blokerede bolden, men da rød nummer 6 afsluttede, så selvom han skulle være kommet tættere på målet end næstsidste modspiller i mellemtiden, kan han stadig ikke dømmes offside.



Figur 8 – Spilsituation hvor der kan opstå offside.

3. Indledende analyse

3.1. Analyse af krav.....	20
3.1.1. Tidskrav.....	21
3.1.2. Spillere på offsidegrænsen.....	22
3.1.3. Afleveringsdetektering	23
3.1.4. Identifikation af afleverende spiller	24
3.1.5. Kommunikation til linjedommere	24
3.1.6. Positioneringsdata	25
3.1.7. Delkonklusion	26
3.2. Cairos	27
3.2.1. Teknik	27
3.2.2. Services.....	29
3.2.3. Evaluering.....	30
3.3. Analyse af DommerStøtteSystem	30
3.3.1. Tidskrav.....	30
3.3.2. Spillere på offsidegrænsen.....	31
3.3.3. Afleveringsdetektering	31
3.3.4. Identifikation af afleverende spiller	33
3.3.5. Kommunikation til linjedommere	33
3.3.6. Delkonklusion	33

I dette kapitel foretages nærmere undersøgelser af de krav og systemer, der sammen med offsidereglen ligger til grund for spillet.

Først vil kravene til et computerbaseret offsidedetekteringssystem blive diskuteret. For at et sådant system vil kunne bruges i topfodbold, skal det leve op til kravene fra afsnit 1.2 omhandlende korrekthed, reeltidsafvikling og præcision i både positioneringssystem og systemets vurderinger.

Positioneringssystemet fra Cairos kan levere data om positionerne på spillernes fødder og på bolden. Hvordan systemet fungerer, undersøges i kapitlets andet afsnit, hvor det også analyseres, om Cairos' system lever op til de krav, der kan stilles til et positioneringssystem til brug for offsidedetektering.

Dette speciale bygger videre på spillet af [Larsen & Hansen] samt deres prototype DommerStøtteSystem og tilhørende delsystemer. Hele systemet inklusive kildekode er stillet til rådighed for videreudvikling, så det er oplagt at gøre brug af dette frem for at starte fra bunden. Derfor analyseres det i afsnit 3.3, hvordan systemet lever op til de førnævnte krav.

3.1. Analyse af krav

Kravene til OffsideDetekteringsAssistent (set fra en kundes side) blev opstillet i afsnit 1.2, og i dette afsnit analyseres det, hvorvidt det er muligt at opfylde disse krav (set fra leverandørens side). Kravene er i Tabel 1 kategoriseret ud fra underspørgsmålene i afsnit 1.3, og analysen tager udgangspunkt i, at der anvendes et radiobaseret positioneringssystem lignende Cairos'. Dette system kan der i øvrigt læses mere om i afsnit 3.2, hvor også grundene til at vælge et radiobaseret positioneringssystem frem for et videobaseret forklares.

Afsnit	Krav
3.1.1 Tidskrav	Krav1 Krav6
3.1.2 Spillere på offsidegrænsen	Krav2 Krav5 Krav7
3.1.3 Afleveringsdetektering	Krav2 Krav4 Krav9

3.1.4 Identifikation af afleverende spiller	Krav2 Krav8
3.1.5 Kommunikation til linjedommere	Krav1 Krav3 Krav9 Krav11 Krav12
3.1.6 Positioneringsdata	

Tabel 1 – Oversigt over, hvilke krav der analyseres i hvilke afsnit.

Krav13 omhandler vedligeholdbarhed og kan således ikke puttes i nogen af kategorierne nævnt herover. Kravet bør kunne opfyldes gennem et modulært design og ved brug af designmønstre.

I dette afsnit analyseres først tidskravene i afsnit 3.1.1, og herefter i afsnit 3.1.2, 3.1.3 og 3.1.4 de tre underspørgsmål, som har med systemets kendelser at gøre, og som i øvrigt alle sammen er underlagt Krav2 om at systemets vurderinger ikke må kunne falsificeres af tv-billeder. Underspørgsmålet om kommunikation til linjedommerne analyseres i afsnit 3.1.5, inden der i afsnit 3.1.6 på baggrund af kravanalysen opstilles en række krav, man som leverandør vil stille til den underleverandør eller projektgruppe, der skal stå for positioneringssystemet.

3.1.1. Tidskrav

Det overordnede tidskrav (Krav1) er, at linjedommeren skal modtage en offsidemarkering indenfor 250 millisekunder efter at afleveringen har fundet sted. Ved en aflevering er der kontakt mellem spiller og bold i cirka 10 ms [Wesson, s. 9], mens afleveringen finder sted i det øjeblik, hvor spilleren opnår kontakt med bolden (se afsnit 2.2.3). Detekteres en aflevering ved at se på acceleration eller retnings skift over 10 ms, er der dermed 240 ms tilbage til de resterende beregninger samt datatransmission. I afsnit C.2.2 argumenteres der på baggrund af [Larsen & Hansen, s. 34] for, at datatransmissionen tager så kort tid at denne tid kan ignoreres i det samlede hele.

Dermed er der knap 240 ms til at foretage de nødvendige beregninger, og med tanke på [Larsen & Hansen, s. 75] kunne foretage disse beregninger på under et millisekund, er der ingen grund til at tro, at det selv med mere komplicerede beregninger ikke skulle kunne lade sig gøre indenfor 240 ms.

Det er ikke sikkert, alle beregningerne fortsat kan foretages på under et millisekund, men det behøver de heller ikke kunne, selvom der kommer nye data et millisekund senere. Hvis en aflevering er detekteret, kommer der ikke en ny aflevering indenfor de næste millisekunder, så den mellemliggende tid kan bruges på de øvrige beregninger.

Hvad angår Krav6 om at systemet skal kunne fungere uden at sinke spillet, skulle dette også være til at opfylde. Der nævnes som eksempel, at bolden skal kunne skiftes ud, når den forlader banen, hvilket let kan løses med et positioneringssystem som det fra Cairos. Her findes der en chip centralt i bolden, som udsender boldens ID med en vis frekvens. Bolddrengene ved kampe på højt niveau sidder klar med nye bolde ved sidelinjen, så spillet kan sættes hurtigt i gang igen, når bolden eksempelvis er sparket ud på tilskuertribunen. Ved at nøjes med at følge bevægelserne for den bold, der befinder sig inde på banen, kan nye bolde indsættes lige så hurtigt som det sker i dag.

Der kan opstå et lille problem, hvis bolden kastes fra tribunen og tilbage ind på banen, og der dermed er to bolde indenfor spilleområdet samtidig. I dette tilfælde kan man nøjes med at følge den bold, der kom ind på banen først ud fra den betragtning, at bolddrengen kan løbe ind på banen og hente den anden bold mens spillet er i gang. Ofte sker disse misforståelser, hvor der kommer to bolde på banen, kun i forbindelse med indkast, og her vil spillet sjældent være genoptaget, når bold nummer to entrerer banen. Spillet standses et øjeblik, indtil den ene bold er ekspederet ud af banen, og så kan systemet fortsætte med at følge den ene bold.

Spillet ville også blive sinket, hvis der gik for lang tid inden linjedommeren modtog systemets offsidemarkeringer, men tidsgrænsen på 250 ms fra afleveringsøjeblikket forhindrer dette. I tilfælde af at en aflevering helt oplagt kun kan nås af en spiller i offsideposi-

tion opfordres linjedommeren til at straffe spilleren med det samme for ikke at sinke spillet [Fodboldloven, s. 45], og det har han stadig mulighed for, når han får besked så hurtigt.

3.1.2. *Spillere på offsidegrænsen*

Som nævnt i indledningen er den største kilde til fejl ikke, at linjedommeren er i tvivl, om bolden bliver afleveret eller hvem der gør det. Problemet er, at han står forkert placeret eller at øjet simpelthen ikke kan nå at opfange situationerne. Dermed kan spillerne lige omkring offsidegrænsen – som altså er den næstsidste forsvarsspiller – nå at flytte sig en del i forhold til hinanden, hvorfor linjedommeren får en forkert opfattelse af situationen.

Krav2 foreskriver, at offside-detekteringsassistentens vurderinger ikke må kunne falsificeres af tv-billeder. Tv-billeder optages med en frekvens på 25 Hz og sendes ud i tv-stuerne med samme frekvens. Der findes specielle superslow-kameraer, som optager med 75 Hz, men disse benyttes kun til nærbilleder, og billederne herfra vil derfor ikke kunne bruges til at falsificere kendelser fra ODA. Kun på oversigtsbilleder (som altså optages med 25 Hz, da man alligevel ikke kan se mange detaljer på stor afstand) vil man på samme tid kunne se både bolden og spillerne omkring offsidegrænsen i afleveringsøjeblikket. Langsomme gengivelser fra disse kameraer opnås ved at gentage det samme billede flere gange i træk [Brask].

Imellem to billeder vil spillere kunne nå at flytte sig mellem 28,4 cm [Maruenda] og 44 cm [Larsen & Hansen, s. 36]. Sidstnævnte tal er beregnet ud fra en fart, som ikke engang de hurtigste 100 meter-løbere helt kan nå op, mens førstnævnte tal er baseret på en formodning om at gennemsnitsspillere kan løbe 100 m på 14 sekunder.

Ofte er det svært selv på slowmotion-billeder at bestemme på hvilket billede, bolden berøres, selvom der spoles frem og tilbage mellem billederne lige omkring tidspunktet. Det skyldes, at spillerens fod bevæges i samme retning som bolden, og da tv-kameraerne står forholdsvis langt fra spillerne på banen, kan den lille mængde luft mellem fod og bold ikke opfattes.

Ved 25 Hz er der 40 ms mellem to billeder, og eftersom kontakttiden mellem spiller og bold jf. afsnit 2.2.2 er cirka 10 ms, vil man kun i hvert fjerde tilfælde kunne se et billede, hvor spilleren rent faktisk rører bolden. Når det oven i købet er svært at bestemme på hvilket billede, boldberøringen sker, er der rum for en vis usikkerhed i ODA.

Selvom det var muligt at finde frem til billedet tættest på boldberøringen, ville dette billede befinde sig et sted mellem 20 ms før og 20 ms efter det reelle afleveringstidspunkt. Spillere kan som nævnt bevæge sig i omegnen af 30 cm på 40 ms, så der kan tillades en usikkerhed af denne størrelsesorden.

Med usikkerheder af denne størrelsesorden er det ikke urealistisk, at et computersystem vil kunne overvinde kravet til korrekthed. Samtidig skal der også tages højde for, at kameraet optager fra en bestemt vinkel, hvilket også er med til at gøre det svært at afgøre offside-situationer hjemme foran tv'et.

På grund af afstanden til spillerne, skæve vinkler for tv-kameraerne samt deres lave opdateringsfrekvens vurderes det til at være acceptabelt, hvis computersystemet kan positionere spillerne med 10-15 cm nøjagtighed. Denne unøjagtighed vil næppe kunne påvises ved brug af tv-billeder eller andre tekniske hjælpemidler, selvom usikkerheden for to spillere samlet set bliver 20-30 cm.

I Cairos' positioneringssystem gives der positioner på spillernes benskiner, men offside bedømmes jf. afsnit 2.2.2 ud fra placeringen af det punkt på spilleren, der er tættest på mållinjen, når der ses bort fra armene. Om det er muligt at fastlægge dette punkt med den krævede nøjagtighed studeres nærmere i kapitel 4. Er dette muligt, kan Krav5 opfyldes.

Krav7 fastslår, at kun spillere på banen må have indflydelse på ODA's vurderinger, og dette kan opnås ved kun at gøre brug af positioneringsdata indenfor de streger, der omkranser fodboldbanen. Ved indkast og hjørnespark forlader en enkelt spiller banen for at foretage igangsætningen af spillet, men i disse tilfælde kan man alligevel ikke være strafbart offside, hvorfor det er uden betydning, at spillerens position ikke inkluderes i datamængden.

3.1.3. Afleveringsdetektering

Det mest afgørende krav med indflydelse på afleveringsdetektering er Krav4, som påbyder systemet at detektere alle boldberøringer korrekt uden at der opdages boldberøringer, der ikke har fundet sted.

I første omgang vil en acceleration eller retningsændring for bolden indikere, at bolden er blevet rørt af en spiller. Vindstød og deslige kan dog også ændre boldens retning, men dette sker over en længere distance sammenlignet med en boldberøring, hvor retnings-skiftet sker pludseligt. Dermed kan mindre retningsskift ignoreres, men der skal stadig tages højde for, at en bold, der blot snitter en spiller, næsten ikke ændrer retning.

Hvis bolden kun snitter en spiller, vil dommeren have svært ved at se, at spilleren har rørt bolden, og sandsynligvis vil det heller ikke entydigt kunne afgøres ved hjælp af tv-billeder (Krav2). Der går en hårfin grænse imellem det at kunne detektere selv ubetydelige boldberøringer og det at sortere retningsskift fra, der er forårsaget af naturen. Heldigvis vil vurderingen i mange tilfælde kunne afgøres ved at kigge på, om der er en spiller i nærheden af bolden eller ej. I princippet kan bolden godt røres uden at den skifter retning (jf. afsnit 2.2.3), men dette kan umuligt opdages ud fra positioneringsdata, og tv-billeder vil heller ikke entydigt kunne afsløre boldberøringen. Argumentet med at en boldberøring med trøje- eller hårkontakt kan høres af dommeren er ikke brugbart i topfodbold, hvor systemet vil have sin anvendelse. Der er så meget larm fra tilskuere, at lyden fra kontakten vil drukne i den omkringliggende støj. Under alle omstændigheder skal boldens bevægelser analyseres nærmere for at kunne give et billede af, om afleveringsdetektering er mulig, og dette foregår i kapitel 5. Yderligere vil det blive analyseret med hvor stor præcision, afleveringsøjeblikket kan fastslås, og hvilken betydning dette har for præcisionen i positioneringen af spillere, som kan have flyttet sig i forhold til det reelle afleveringsøjeblik.

Ydermere er det ikke strafbart at være i offsideposition ved målspark, indkast og hjørnespark, så disse hændelser skal også sorteres fra, jf. Krav9. Det er ikke et ufravigeligt krav, men kan løses ved at holde øje med, hvornår bolden forlader banen og efterfølgende sættes i spil igen.

3.1.4. Identifikation af afleverende spiller

Som det fremgår af Krav8 er det ikke et ufravigeligt krav at den afleverende spiller identificeres korrekt, så længe han ikke identificeres forkert. Er der tvivl om, hvem den afleverende spiller er, kan man for en sikkerheds skyld give besked til linjedommeren, som så kan træffe beslutningen ud fra, hvad han selv har set. Tvivlsmarginen gør, at det ikke burde være noget problem at leve op til Krav2.

Den afleverende spiller vil oftest være den spiller, hvis fødder er tættest på bolden, men fødderne kan befinde sig et stykke fra det sted på benskinnen, hvor radiosenderen sidder. I nærkampe og tacklinger kan der være flere fødder i nærheden af bolden på én gang, og her vil det umiddelbart være svært at give noget godt gæt på, hvem der har rørt bolden. Et eksempel på dette ses i Figur 9. I dueller i luften så som hovedstødsdueller vil det være mere usikkert, hvem der har rørt bolden, da der er langt til den nærmeste benskinne.

For at kunne identificere den afleverende spiller korrekt er det nødvendigt med en mere tilbundsående analyse. Som nævnt kan man give linjedommeren besked for at være på den sikre side, men dette kræver at man ved, hvornår der er grund til at være i tvivl. Denne analyse foretages som en del af kapitel 4.



Figur 9 – Nærkamp, hvor det kan være svært at afgøre, hvem der rører bolden. På billedet er det Randers' Christian Lundberg (tv) og AaB's Trond Andersen. Kilde: [AaB-Online].

3.1.5. Kommunikation til linjedommere

Afgivelse af offsidemarkeringer er et problem i sig selv, og vil kun blive behandlet sparsomt i dette speciale. Det antages blot, at det er muligt at opfylde Krav3 om sikkerhed og Krav12 om enkel brugergrænseflade. For at opfylde Krav3 kan man ved konstant at sende signaler og ved brug af teknikker som kryptering og frekvenshop forhindre aflytning, jamming og forfalskning. Disse teknikker bruges i forvejen i forskellige trådløse netværk og undersøges derfor ikke nærmere.

Krav1 fastslår at linjedommeren skal kunne følge med i spillet på banen samtidig med at han modtager offsidemarkeringer. Med den nuværende teknologi har linjedommerne trådløs kontakt med dommeren, som ved hjælp af en vibrator eller en bip-højttaler monteret på kroppen kan gøres opmærksom på, at linjedommeren markerer med sit flag [Carlsen]. Samme løsning kunne bruges til kommunikation fra ODA til linjedommer, når systemets markeringer skal kommunikeres til linjedommeren.

Denne løsning er dog ikke avanceret nok til at leve op til Krav11 om at linjedommeren bør have at vide, hvem der kan risikere at være strafbart offside. I stedet kunne man

forestille sig, at linjedommeren blev udstyret med en øresnegl, hvor rygnumrene på spillerne i offsideposition blev læst op af en mekanisk stemme. Med flere spillere i offsideposition er det dog ikke sikkert, alle rygnumrene kan nå at blive læst op inden den næste aflevering falder, hvilket kan ske allerede et halvt sekund senere. Alternativt kunne man nøjes med at læse antallet af muligt strafbare spillere op under den antagelse, at linjedommeren står så godt placeret, at han kan regne ud hvilke spillere, det drejer sig om.

Ifølge lovteksten er enhver boldberøring kandidat til at medføre strafbar offside, da man først når bolden når frem kan se, om en medspiller opnår fordel af at have været i offsideposition i afleveringsøjeblikket. Krav9 åbner for en praktisk fortolkning af denne regel og kan opfyldes ved at sortere boldberøringer fra, som ikke har en chance for at nå frem til en angriber i offsideposition.

For at opnå dette kan der kigges på boldens position, fart og retning for at forudse, hvor bolden ender. Hvis bolden er på det angribende holds banehalvdel og ikke kan nå frem over midten, er der praktisk taget ingen mulighed for at en spiller i offsideposition kan blive strafbar (en spiller skal befinde sig på modstandernes banehalvdel for at kunne være i offsideposition, jf. afsnit 2.1). Ved tæmninger mister bolden det meste af sin fart og vil derfor sjældent kunne nå frem til en spiller i offsideposition, og ved driblinger får bolden ikke meget mere fart end den driblende spiller har.

Sorteres disse hændelser fra, så linjedommeren ikke modtager offsidemarkeringer hele tiden, bliver systemet langt mere behageligt for linjedommeren, fordi han kun får besked, når der virkelig opstår en situation, han skal tage stilling til. Risikoen ved for mange offsidemarkeringer er historien om drengen og ulven, men omvendt er det bedre at markere en gang for meget end en for lidt, når det drejer sig om situationer, som principielt kan føre til strafbar offside.

En yderligere grund til at sortere boldberøringer fra, som ikke kan nå frem til en angriber i offsideposition, er tidsmæssige hensyn. Linjedommeren skal kunne nå at opfatte en offsidemarkering inden den næste boldberøring finder sted og der kan komme en ny markering. Tilsigtede afleveringer kan forekomme med ned til et halvt sekunds interval, men bolden kan godt blive rørt af spillere med kortere mellemrum, eksempelvis i forbindelse med tæmninger, driblinger og tacklinger. Med mellemrum ned til et par tiendedele sekunder kan linjedommeren ikke skelne systemets markeringer fra hinanden, hvis de kommer med en forsinkelse på de tilladte 250 ms.

Det tidsmæssige aspekt gør sig især gældende, hvis man forsøger at give linjedommeren information om, hvilke spillere som kan tænkes at være i strafbar offsideposition. Ved flere spillere i offsideposition vil denne meddelelse tage et stykke tid at opfatte en besked med eksempelvis tre spillernumre i. Ønsket i Krav11 er derfor ikke realistisk at opfylde, når der er mere end én spiller i offsideposition. Dette beror mest på kommunikationen fra maskine til menneske, for hvis kravene fra de tidligere afsnit kan opfyldes, skulle alle spillere i mulig strafbar offsideposition kunne identificeres af systemet. Forudsætningen for at kunne sortere hændelserne fra må dog først og fremmest være, at de bliver detekteret.

Antallet af offsidemarkeringer kan halveres ganske enkelt ved kun at give den linjedommer besked, som har ansvaret for den banehalvdel, spillerne fra den boldberørende spillers hold angriber på.

3.1.6. *Positioneringsdata*

Første forudsætning for at et computersystem kan assistere linjedommerne i deres offsidemarkering er, at det ved, hvor spillerne og bolden befinder sig. Som det eksemplificeres i afsnit 3.3.3 er det endda nødvendigt med 3-dimensionel positionering for at kunne detektere boldberøringer, hvor bolden kun røres svagt og ikke ændrer retning i (x, y)-planet.

Dette speciale bygger som bekendt på positioneringssystemet fra Cairos (beskrives i afsnit 3.2), der så vidt vides er det eneste system, der kan levere data om boldens position. Andre radiobaserede positioneringssystemer vil også kunne bruges, hvis de lever op til følgende krav, som er delvist baseret på [Larsen & Hansen]:

- Pos1* Der skal leveres 3D-data om positionerne på boldens centrum og på spillernes benskiner indenfor 1 millisekund. Positionerne angives i et koordinatsystem, hvor 1 enhed svarer til 2 mm.²
- Pos2* Radiosenderne i bold og benskiner skal kunne holde til de belastninger og vejrforhold, de udsættes for i løbet af en kamp, og må ikke løbe tør for strøm. Desuden må de ikke genere spillerne eller ændre boldens opførsel.
- Pos3* Positionering af et objekt må ikke afvige mere end 5 cm fra dets virkelige position. Positionerne skal derfor leveres med en frekvens på mindst 500 Hz for spillerne og 1.000 Hz for bolden.
- Pos4* En liggende bold må ikke have forskellige koordinater fra sample til sample.
- Pos5* En bold uden eksterne påvirkninger såsom vindstød skal resultere i en sammenhængende bane uden pludselige retningsskift eller accelerationer.
- Pos6* Positionering må ikke kunne påvirkes af ondsindede personer eller elektronisk udstyr.

Disse krav er de krav, en leverandør af ODA ville stille til den underleverandør eller projektgruppe, der skulle levere positioneringsdelen af det samlede system. Kravene sikrer en nøjagtighed så stor, at systemkravene fra afsnit 1.2 kan opfyldes, således at afleveringer kan detekteres, at den afleverende spiller kan bestemmes samt at spillere på grænsen af at være i offsideposition positioneres rigtigt.

3.1.7. Delkonklusion

Ud fra den første analyse er det ikke urealistisk, at ODA kan laves, så systemet i realtid kan afgøre offside-situationer, der ikke efterfølgende entydigt kan falsificeres af tv-billeder.

Først og fremmest er det nødvendigt at have et positioneringssystem, der i realtid kan levere 3D-data om både spillere og bold med en nøjagtighed på få centimeter. Disse data ligger til grund for detektering af afleveringer, identifikation af den afleverende spiller samt en nærmere positionering af spillere ved offsidegrænsen.

For spillere nær offsidegrænsen kan en unøjagtighed på 15 cm i positioneringen af hver spiller tillades, hvilket skyldes den frekvens, tv-billeder optages med. Detektering og kategorisering af afleveringer tillader derimod ingen fejl, mens identifikation af den afleverende spiller har lidt slappere krav.

Positioneringssystemet indgår ikke i dette speciale, men antages at kunne leveres af en intern eller ekstern leverandør, som kan leve op til de opstillede krav i afsnit 3.1.6. Kommunikation af offsidemarkeringer til linjedommerne udgør også kun en mindre del af speialet, men vurderes til at kunne opfyldes på fornuftig vis. Dog er den avancerede del af Krav11 ikke realistisk på grund af den korte tid, der kan forventes at være mellem to på hinanden følgende afleveringer. Metoden kan dog bruges, hvis kun en enkelt spiller befinder sig i en muligt strafbar offsideposition.

Fokus i speialet er i stedet rettet mod det at kunne detektere offside og sortere trivielle boldberøringer fra, som linjedommerne ikke behøver få nys om. Til det formål kræves yderligere analyser af bevægelserne, som spillerne undergår i løbet af en fodboldkamp, samt for bolden. Analyserne findes i kapitel 4 og 5.

² Se analysen i afsnit 5.3 for yderligere forklaring.

3.2. Cairos

I [Larsen & Hansen, s. 21] blev positioneringssystemet fra Cairos valgt som værende det mest egnede til at levere positioneringsdata fra fodboldkampe. Dette afsnit vil afdække de facetter af systemet, der har betydning for designet af algoritmerne til offsidedetektering. Til sidst vil det blive vurderet, om systemet lever op til de krav til et positioneringssystem, som blev defineret i afsnit 3.1.6.

I første omgang blev radiobaserede systemer foretrukket frem for videobaserede systemer på grund af at, opdateringsfrekvensen i videobaserede systemer gør præcisionen for lav. Videobaserede systemer har endvidere den ulempe, at det kan risikeres, at der ikke kan gives positioneringsdata om bolden, hvis der står spillere i kameraernes synsvinkel.

Af de radiobaserede positioneringssystemer var Cairos' det mest præcise af de undersøgte, med en fejlmargen på $\pm 1,5$ cm [Cairos] og er endvidere så vidt vides det eneste radiobaserede system, der gør brug af chips så små og robuste, at de kan integreres i bolden og levere data om boldens position. Derfor er det oplagt at basere de nødvendige algoritmer i et offsidedetekteringssystem på et system som Cairos'.

Cairos' system er ikke kun et positioneringssystem, men består også af en række applikationer [Cairos2], der gør brug af de opsamlede positioneringsdata i realtid. Dataene kan eksempelvis bruges til at levere information om spillernes fart og bevægelsesmønstre, fart og præcision i skud på mål og afleveringer, boldbesiddelse for hvert af de to hold samt andre relevante statistikker, som kan bruges i for eksempel tv-transmissioner. Det er også muligt at lave 3D-animationer til brug som langsomme gengivelser eller til senere kampanalyse.

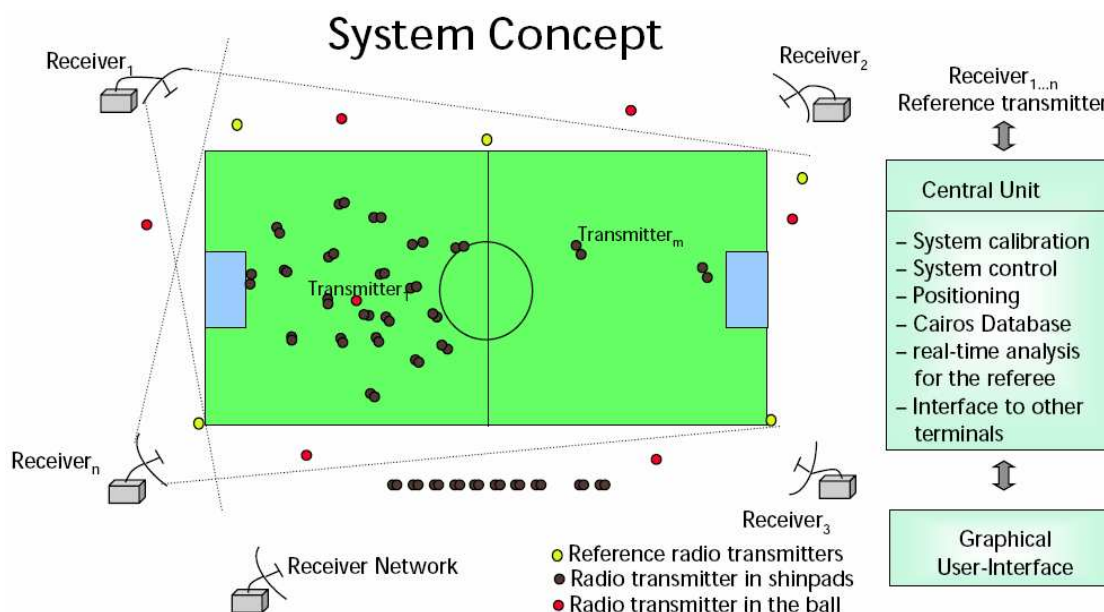
Endvidere kan systemet hjælpe dommeren ved at fortælle om bolden har passeret mållinjen og der derfor er mål, og om forsvarsmuren står de nødvendige 9,15 meter fra det sted, hvor et frispark skal sparkes. Cairos er dog endnu ikke nået så langt i udviklingen, at de kan hjælpe linjedommeren med at dømme offside.

3.2.1. Teknik

Systemet er som nævnt baseret på radioteknologi, og radiosenderne i bold og spillere er gjort så simple som muligt for at mindske størrelse og batteriforbrug [von der Grün, s. 7]. Derfor er radiosenderne lavet som *transmittere*, hvilket vil sige, at de ikke har anden funktionalitet end at sende deres ID ud med en vis frekvens. De forskellige radiomodtagere i modtager-netværket opfanger dette radiosignal med hver sin forsinkelse, og ud fra forsinkelserne i hver enkelt modtager kan den centrale enhed beregne positionen på radiosenderen.

Udover bold og spillere er der også radiosendere i et antal reference-sendere (de gule i Figur 10). Reference-sendere står på faste og i forvejen kendte positioner og sender deres positioner, som så kan bruges til automatisk, løbende kalibrering af det samlede positioneringssystem, idet de er synkroniseret med systemtiden [van der Grün, s. 8].

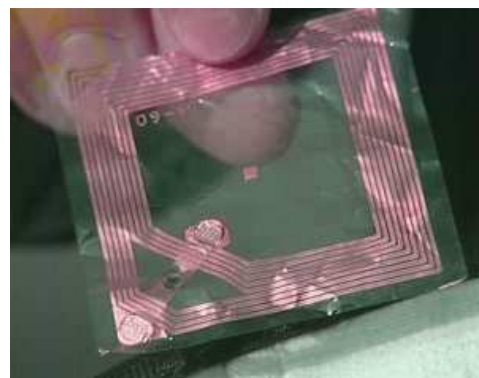
Kommunikationen mellem modtagerne og den centrale enhed foregår gennem et højhastighedsnetværk, og består dels af forsinkelsen for alle radiosenderne, dels af synkroniseringssignaler fra den centrale enhed, så alle modtagere er enige om tiden [von der Grün, s. 10].



Figur 10 – Systemoversigt for Cairos. Kilde: [Cairos].

Hver spiller bærer to radiosendere som den i Figur 11 – en i hver benskinne. Benskinnerne er valgt til at repræsentere spillernes positioner, og det gør det eksempelvis muligt at beregne skridtlængde (som kan give indikationer om træthed til spillerens træner) og den fart, foden rammer bolden med, når der sparkes eller tackles.

Benskinnerne har ydermere den fordel frem for andre dele af beklædningen, at de meget sjældent skiftes i løbet af kampen. Man kan komme ud for, at spillerne skifter fodboldstøvler undervejs, fordi de har valgt støvler med en forkert længde knopper. Er knopperne eksempelvis for korte og banen meget blød, kan man risikere at glide og komme til skade. Strømper, bukser og trøjer bliver ofte skiftet i pausen, fordi de er blevet våde og beskidte, og så er der kun benskinnerne tilbage af den obligatoriske påklædning.

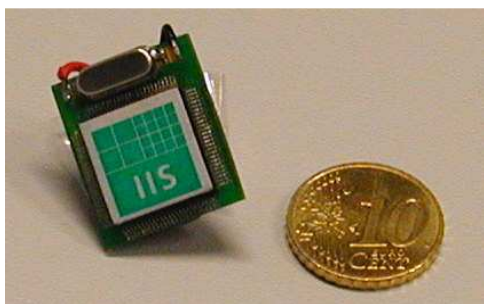


Figur 11 – Cairos radiosender. Kilde: [Cairos].

Radiosenderne kan konfigureres til at sende signaler op til 750 gange pr. sekund [Cairos], og med den frekvens kan en spiller højst nå at bevæge sig 1,67 cm – svarende til positioneringssystemets usikkerhed – mellem to samples. Dette er beregnet ud fra en hastighed på 9 sekunder pr. 100 meter, og det kan ikke engang de hurtigste mennesker i verden nå op på [Larsen & Hansen, s. 36].

For boldens vedkommende bruges en radiosender som vist i Figur 12. Med sine beskedne 2*2*0,5 cm og en vægt på 12 gram [Cairos] skulle det være muligt at indlejre chippen i centrum af en fodbold uden at ændre på boldens egenskaber³. Sådan en bold har Cairos,

³ En anden mulighed kunne være at beregne sig frem til boldens centrum. En fodbold er dækket af 32 små fem- og sekskantede lapper, som er syet sammen og omkranser en gummibold, der pumpes til et lufttryk på 1,6-2,1 atmosfære, hvilket gør at bolden kan hoppe [Wesson, s. 4]. En lap på hver sin side af bolden kunne udstyres med en radiosender som den i Figur 11, og boldens centrum ville dermed være gennemsnittet af de to radiosenders placeringer. Radiosenderen i Figur 12 er en forholdsvis intelligent chip, der kan give oplysninger om boldens lufttryk, spin, fart og acceleration [Cairos], men positionen på boldens centrum er tilstrækkeligt til offsidetetektering.



Figur 12 – Cairos radiosender til brug i boldene, med en 10 eurocent-mønt ved siden af. Kilde: [Cairos].

deres normale samarbejdspartner Fraunhofer Institut für Integrierte Schaltungen samt adidas (der producerer sportsudstyr) udviklet i samarbejde, og i september måned verdensmesterskaber for U/17-landshold blev denne bold testet [IFAB]. Formålet var at hjælpe dommerne ved at give besked, når bolden havde passeret mållinjen eller sidelinjen, og derfor fungerede eksperimentet også som test af Cairos' positioneringssystem. Testen – som i øvrigt var bemyndiget og overvåget af FIFA, der er fodboldens højeste instans – forløb som planlagt, og der blev overvejet, om bolden og systemet skulle tages i brug til fodbold-VM i Tyskland i sommeren 2006. FIFA havde en række ikke offentliggjorte forslag til forbedringer, og det var planen at systemet skulle testes igen til VM for klubhold i december 2005 [FIFA]. I den sidste ende valgte man dog at fokusere på at videreudvikle og teste systemet, hvorfor det ikke tages i brug i denne omgang [FIFA2].

Radiosenderen i bolden kan sende signaler op til 2.000 gange pr. sekund [Cairos], hvilket tillader en bold at bevæge sig 2,08 cm mellem to samples [Larsen & Hansen, s. 37]. Denne distance er beregnet ud fra en hastighed på 150 km/t, og et spark med så høj fart ses yderst sjældent, hvis man ellers kan stole på de fartmålinger, der af og til bruges i tv-transmitterede kampe.

Levetiden for et fuldt opladet batteri i en radiosender i en bold er omtrent fire timer ved en samplingsfrekvens på 2.000 Hz [Cairos]. Dette rækker så rigeligt til en fodboldkamp, som allerhøjest kan nå op på tre timers varighed, når der indregnes tid til både den ordinære kamp, eventuel forlænget spilletid og straffesparkskonkurrence samt de mellemliggende pauser. Batterierne til radiosenderne i benskinne antages at have omtrent samme levetid på en fuld opladning.

For begge typer radiosendere gælder det, at de skal være så robuste, at de ikke risikerer at gå i stykker i løbet af kampen. Svigter blot en enkelt sender, kan systemet ikke bruges til offsidetetektering, da der i så fald ikke vil være tilstrækkeligt med data om spillernes positioner. En bold med en dårlig radiosender kan naturligvis skiftes ud med en anden bold, men skal en spiller have skiftet sine benskinne, kræver det et længere stop i spillet. Det er hverken tilskuere eller tv-selskaber interesserede i, og da Cairos skal kunne levere pålidelige statistikker om kampene, må det formodes, at de har taget hånd om dette problem.

3.2.2. Services

At dømme ud fra [Cairos2, s. 8] indeholder Cairos-systemet en mekanisme til at genkende begivenheder som afleveringer, indlæg, driblinger og skud på mål. Denne mekanisme gør det muligt at forsyne applikationer med data på et højere niveau end blot positioner, når en begivenhed på banen indtræffer. For en afleverings vedkommende kunne højniveau-data eksempelvis bestå af boldens fart og retning, den afleverende spiller og hans fart samt det sted, bolden sandsynligvis vil lande.

Som det var tilfældet for [Larsen & Hansen] har Cairos ikke ønsket at medvirke til dette speciale, og selvom de gjorde, kunne mekanismen ikke nødvendigvis bruges til offsidetetektering. I forbindelse med offsidetituationer vil notifikationer om detekterede afleveringer ikke være tilstrækkeligt, da alle boldberøringer som forklaret i afsnit 2.2.2 tæller på lige fod med afleveringer.

Man kan ikke forvente, at et andet positioneringssystem end Cairos' kan tilbyde en mekanisme som denne, så i dette speciale vil algoritmerne blive baseret udelukkende på rå positioneringsdata. For at være sikker på at alle boldberøringer opfanges og at det rigtige øjeblik bedømmes som afleveringsøjeblikket, vil der altså i dette speciale skulle laves en

nogenlunde tilsvarende mekanisme, men specialiseret til offsidedetektering. En analyse af boldens bevægelser med henblik på at detektere afleveringer findes i kapitel 5.

3.2.3. *Evaluering*

Positioneringssystemet fra Cairos er et radiobaseret positioneringssystem udviklet med henblik på at levere statistikker om fodboldkampe. Spillerne bærer små radiosendere på deres benskiner, og bolden er ligeledes forsynet med en radiosender. Radiosenderne udsender deres ID med en vis frekvens, og et antennenetværk opfatter signalerne, hvorefter en central computer beregner positionerne.

Systemet leverer positioneringsdata om spillernes ben med en nøjagtighed på $\pm 1,5$ cm [Cairos] og lever således op til Pos3 fra afsnit 3.1.5. Da der kan leveres data med en frekvens på op til 2.000 Hz for bold og 750 for spillere må det antages, at systemet lever op til Pos1 om indenfor 1 millisekund at kunne levere 3D-positioneringsdata med den nøjagtighed og frekvens der beskrives i Pos3. Se appendiks C.2.2 for yderligere forklaring af, hvorfor tidskravet kan antages at være opfyldt.

Cairos er et privat firma som ikke ønsker at afsløre alt for mange detaljer om deres system, så det er ikke lykkedes at finde ud af, om Pos4 og Pos5 opfyldes. Det er dog ikke urimeligt at antage dette, da systemet benyttes til blandt andet at detektere afleveringer.

Da systemet er udviklet med henblik på at levere statistikker fra lige præcis fodboldkampe, må der også være taget højde for holdbarheden af radiosendere, ligesom levetiden på fire timer for et fuldt opladt batteri er tilstrækkeligt (Pos2). Ligeledes kan det med rimelighed antages, at der er taget hånd om sikkerheden (Pos6), da systemet var påtænkt at tages i kommercielt brug til VM i Tyskland i 2006 og har været testet til U/17-VM i Peru i efteråret 2005.

3.3. *Analyse af DommerStøtteSystem*

Dette speciale bygger som nævnt i indledningen videre på specialet skrevet af [Larsen & Hansen] i 2004. Deres prototyper – DommerStøtteSystem og de tilhørende delsystemer ScenarioGenerator, ScenarioSender og Visualizer – beskrives i appendiks C.1, som også indeholder antagelser om positioneringssystemet samt beskrivelse af systemets design og den overordnede algoritme til offsidedetektering.

Prototyperne er forholdsvis simple og baserer sig på positioneringsdata i to dimensioner for ét punkt på hver spiller (brystkassen) og for boldens centrum. [Larsen & Hansen] gør selv opmærksom på nogle af de fejl, som kan opstå grundet disse valg, mens andre valg strider imod offside-reglen som den blev præciseret i afsnit 2.2. Kapitel 8 forklarer forskellene mellem DommerStøtteSystem og ODA, og heriblandt vil de krævede forbedringer også indgå.

I dette afsnit evalueres systemet i forhold til de krav til en offsidedetekteringsassistent, der blev opstillet i afsnit 1.2. Afsnittet er ligesom analysen af kravene (afsnit 3.1) grupperet ud fra underspørgsmålene i afsnit 1.3, dog med den undtagelse, at Krav13 kort evalueres i delkonklusionen, afsnit 3.3.6. For en dybere forklaring af forskellene mellem designet af DommerStøtteSystem og OffsideDetekteringsAssistent henvises til kapitel 8.

3.3.1. *Tidskrav*

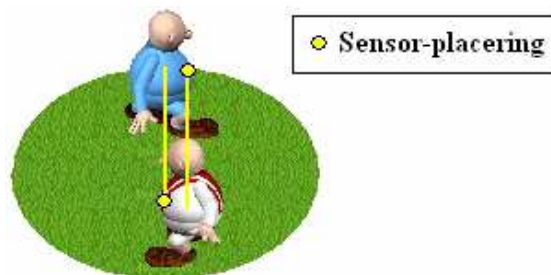
[Larsen & Hansen, s. 32] definerer en offside-situation til at opstå, når bolden afleveres (eller røres, som det rettelig hedder). Indenfor 1 sekund efter denne hændelse skal linjedommeren have besked, om der på afleveringstidspunktet var spillere i offside-position. Selvom dette krav er noget mere lempeligt end de 250 millisekunder i Krav1, opfyldes tidsdelen af Krav1 alligevel, da beregningerne kan foretages på under et millisekund [Larsen & Hansen, s. 75]. Udover beregningerne skal der i tidsrummet også foregå kommunikation af positioneringsdata og offsidemarkeringer, men i appendiks C.2.2 gøres der rede for, at dette ikke tager nævneværdig tid.

Krav6 er derimod ikke forsøgt opfyldt af prototypen, hvor der kun gives mulighed for brug af én bold.

3.3.2. *Spillere på offsidegrænsen*

I dette afsnit evalueres DommerStøtteSystems præcision i positioneringen af spillere tæt på offsidegrænsen. For at være i offsideposition skal angriberen befinde sig tættere på modstandernes mållinje end næstsidste forsvarsspiller (samt afleveringens kilde, midterlinjen og bolden). Algoritmen udviklet af [Larsen & Hansen] tager udgangspunkt i, at spillerne positioneres som et enkelt punkt på banen. Et punkt har ikke noget omfang, så her er det let at afgøre, hvem der er tættest på mållinjen, idet der blot skal kigges på x-koordinaten (banens længderetning).

Det punkt, der repræsenterer en spiller, måles ved hjælp af en sender, som placeres på spillerens brystkasse. Mennesker har en vis omkreds, og derfor er der positioneringen sårbar over for, om spilleren vender med fronten den ene eller den anden vej, som forklaret i [Larsen & Hansen, s. 26]. To spillere, der står skulder ved skulder og vender samme vej, vil korrekt nok blive vurderet til at være på linje. Vender den ene spiller derimod snuden i den modsatte retning, vil det se ud som om, der er en brystkasses forskel på afstanden til mållinjen, fordi senderen for begge spilleres vedkommende er placeret foran. Figur 13 viser en situation, hvor spillerens orientering kan føre til en fejlkendelse.



Figur 13 – På grund af sensorernes placering vurderes den nederste spiller fejlagtigt til at være længere mod venstre end den øverste. Kilde: [Larsen & Hansen, s. 26].

En spillers placering kan altså ikke direkte aflæses ud fra en enkelt sender placeret på eksempelvis hans brystkasse, fordi hans krop har et vist omfang. Ved at kigge på senders og dermed spillerens retning vil man i de fleste tilfælde kunne bestemme overkroppens omfang nogenlunde præcist, men dette gælder ikke, hvis spilleren løber baglæns eller sidelæns. Desuden kan fødderne risikere at være endog meget langt foran eller bagved overkroppen, og som beskrevet i afsnit 2.2.2 tæller hele kroppen, når en offsideposition skal vurderes. Alene det at der ved almindeligt løb kan være mere end 80 cm afstand mellem de to fødder (se Figur 33 i afsnit 4.3), gør det umuligt at fastslå spillerens position med de 10-15 cm nøjagtighed, der i afsnit 3.1.2 på baggrund af Krav2 blev vurderet til at være tåleligt. I [Larsen & Hansen, s. 78] foreslås en revurdering af offside-reglen for at overkomme den store usikkerhed, hvilket strider mod Krav5.

Krav7 er ikke forsøgt opfyldt i prototypen.

3.3.3. *Afleveringsdetektering*

I dette afsnit vurderes den fejlmargin, der opnås ved en forkert definition af afleveringsøjeblikket, og det påvises, at positioneringsdata skal være i tre dimensioner for at kunne detektere alle slags afleveringer.

Afleveringsøjeblikket

I [Larsen & Hansen, s. 27] vælges det at bestemme afleveringsøjeblikket som det tidspunkt, hvor spillerens støvle (eller et andet sted på kroppen) ikke længere har kontakt med bolden. Valget hænger sammen med, at et studie af slowmotion-billeder af et spark til en hvilende bold viser, at der går omkring ti millisekunder, før bolden slipper støvlen. I dette tidsrum tilføjes bolden fart, og det er accelerationen, der bruges som indikator for, at bolden er blevet spillet.

Tidsmålingen stemmer fint overens med [Wesson, s. 9], som hævder, at en bold har kontakt med jorden i lige under en hundrededel af et sekund, når den hopper på jorden.

Dette gælder i øvrigt uanset boldens fart ved nedslaget. Ved et spark til bolden er kontakten rundt regnet en hundrededel af et sekund [Wesson, s. 19], hvilket kan tolkes til at være en smule længere. Igen gælder det, at kontakttiden er omtrent konstant, så et hårdere spark forøger ikke tidsrummet med kontakt med bolden – kun boldens fart forøges.

At afleveringstidspunktet skulle være det øjeblik, hvor bold og støvle ikke længere har kontakt, blev tilbagevist i afsnit 2.2.3. Her det blev fastslået, at det er det øjeblik, hvor kontakten mellem bold og støvle opnås, der er at regne for afleveringsøjeblikket. En gennemsnitsspiller kan på de 10 ms, hvor der er kontakt, flytte sig godt 7 cm [Maruenda], så det gør en vis forskel for præcisionen, om den ene eller den anden metode bruges, især hvis spillerne tæt ved offsidegrænsen løber hver sin vej.

Fakta om tidsrummet med boldkontakt benyttes til at opdage afleveringer. Når bolden accelererer med mindst 950 m/s^2 , svarende til en hastighedsændring på 10 m/s over 10 millisekunder, tolkes det som en aflevering. Afleveringen opdages ifølge [Larsen & Hansen, s. 67] i samme øjeblik som bolden slipper støvlen på grund af, at den tid det tager at accelerere bolden svarer til den tid, der er kontakt mellem bold og støvle.

[Larsen & Hansen] tager ikke højde, for at afleveringer reelt opdages allerede efter syv-otte millisekunder, da bolden i de sidste to-tre millisekunder af kontakttiden ikke længere tilføres fart [Larsen & Hansen, s. 39]. Yderligere vil en kraftigere acceleration end 950 m/s^2 medføre, at grænseværdien overskrides tidligere end det 7. eller 8. millisekund. I det eksempel, som analysen af afleveringsøjeblikket er baseret på, har bolden allerede efter ca. 4 ms fået tilført 10 m/s til hastigheden [Larsen & Hansen, s. 39].

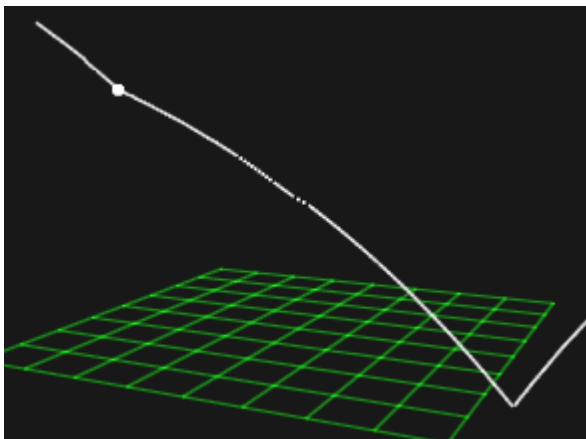
Argumentationen for, at en aflevering opdages i det øjeblik, bolden forlader støvlen, holder altså ikke, og unøjagtigheden på 2-6 millisekunder svarer til at spillere kan have flyttet sig ca. $1\frac{1}{2}$ - $4\frac{1}{2}$ cm i forhold til det tidspunkt, hvor kontakten reelt ophører. Dette giver en usikkerhed i spillerpositionering på ca. $2\frac{1}{2}$ - $5\frac{1}{2}$ cm i forhold til det egentlige afleveringstidspunkt, som er når kontakten opstår. Denne usikkerhed skal tages med i den samlede vurdering af systemets unøjagtighed.

Positioneringsdata i tre dimensioner nødvendigt

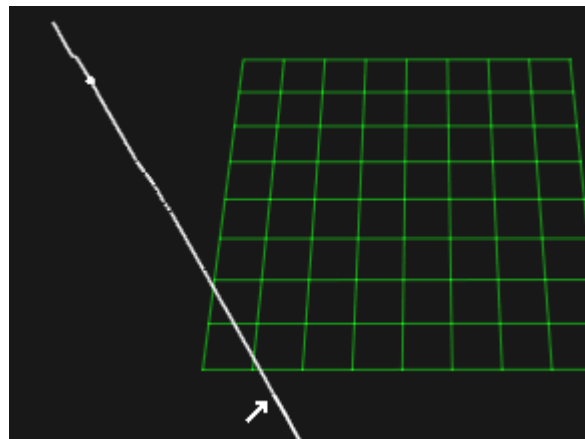
Det store problem ved afleveringsdetekteringen i DommerStøtteSystem er dog, at afleveringer udelukkende detekteres ved at holde øje med boldens fart og opdage en acceleration, mens retningsændringer ikke tages med i beregningerne [Larsen & Hansen, s. 40]. Da der ikke tages højde for, at bolden ikke nødvendigvis tilføres fart, når den afleveres, vil visse typer afleveringer ikke blive optaget af DommerStøtteSystem. Eftersom detektering af en aflevering iværksætter offsidealgoritmen, vil systemet ikke opdage en eventuel offside, hvilket bryder med Krav4.

Et eksempel på en boldberøring uden at bolden accelereres kan være en lang fremlægning, der spilles videre med hovedet, hvorved den kun skifter retning og ikke fart. For at gøre tingene endnu mere komplicerede, kan retningsskiftet endda risikere kun at foregå i z-koordinaten, mens boldens (x, y)-retning forbliver uændret. Et eksempel på dette kan ses i Figur 14 og Figur 15, hvor boldens bane ses fra to forskellige vinkler med den reelle boldberøring markeret med en pil. Der kan ses flere retningsskift i de to figurer, men disse skyldes unøjagtigheder i positioneringen i de optagelser, som figurerne er lavet ud fra. Figurerne illustrerer trods disse unøjagtigheder at ikke alle boldberøringer kan opda- ges ved brug af (x, y)-retningsskift.

Usikkerheden i spillerpositionering afledt af, at afleveringstidspunktet afviger fra det reelle afleveringstidspunkt, er meget lille, men trods det er afleveringsdetekteringen et område, der langt fra lever op til kravene til en offside-detekteringsassistent.



Figur 14 – Boldens bane i løbet af en hovedstødsduel optaget med Qualisys (se appendiks D.1). Ved den hvide prik røres bolden af en spiller, og nederst hopper bolden på jorden.



Figur 15 – Bolden ser ikke ud til at skifte retning set oppefra, og hoppet på jorden (ved pilen) ses heller ikke. De øvrige retningsskift skyldes unøjagtigheder i optagesystemet, som forklaret i appendiks D.1.

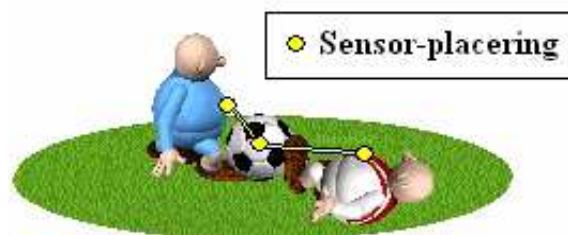
Målspark, indkast og hjørnespark skal heller ikke tolkes som afleveringer (Krav10), da man ikke kan være strafbart offside i disse situationer, men det tages der ikke højde for i DommerStøtteSystem [Larsen & Hansen, s. 33]. Dette er dog ikke noget ufravigeligt krav.

3.3.4. Identifikation af afleverende spiller

Krav8 fastslår, at den afleverende spiller ikke må identificeres forkert.

I DommerStøtteSystem findes afleveringens kilde ganske simpelt ved at udvælge den spiller, hvis brystkasse (hvor radiosenderen sidder) er nærmest bolden i (x, y)-planet til at være afleveringens kilde [Larsen & Hansen, s. 27]. Dermed kan fejl ske eksempelvis i forbindelse med glidende tacklinger som illustreret i Figur 16, hvor bolden spilles af en del af spilleren, som er langt væk fra radiosendere.

Fremgangsmåden med at udvælge den nærmeste spiller til at være afleveringens kilde giver ikke mulighed for i tvivlstilfælde at markere en usikkerhed, og dette kan altså give anledning til fejlvurdering.



Figur 16 – Den glidende spiller afleverer reelt bolden, men den stående spiller vurderes til at have afleveret, da hans brystkasse er tættere på bolden. Kilde: [Larsen & Hansen, s. 28].

3.3.5. Kommunikation til linjedommere

Det at afgive offsidemarkeringer er ikke implementeret i DommerStøtteSystem, men er i stedet videregivet som fremtidigt arbejde [Larsen & Hansen, s. 76-77]. Markeringerne sendes blot til Visualizer som ukrypterede TCP-pakker. Krav1, Krav3, Krav9, Krav11 og Krav12 vedrører kommunikation til linjedommere.

3.3.6. Delkonklusion

[Larsen & Hansen] lavede en programsuite bestående af fire delsystemer, som tilsammen udgjorde et testsystem bestående af ScenarioGenerator til at definere spilsituationer i, ScenarioSender til at afspille disse spilsituationer, DommerStøtteSystem til at afgøre offsidessituationerne og endelig Visualizer, som kan vise de afspillede scenarier og DommerStøtteSystems markeringer.

DommerStøtteSystem kunne så rigeligt leve op til realtidskravene om at give linjedommeren besked indenfor deres tidsgrænse på 1 sekund efter at en aflevering havde fundet sted. Dette resultat opnåedes dog med en algoritme så simpel, at mange situationer vurderedes forkert, og reelt er ingen af kravene fra afsnit 1.2 opfyldt. Dette skyldes for nogle kravs vedkommende, at systemet 'kun' er en prototype udviklet med henblik på at undersøge mulighederne for konceptet computerbaseret offside-detektering, hvorfor mange aspekter er udeladt, som et kommercielt system skal indeholde.

Som det blev diskuteret i afsnit 3.1.2 er afleveringsdetektering så vigtig en del af algoritmen, at den skal fange alle afleveringer og ikke lade sig narre af boldens skruning, vindstød og deslige. DommerStøtteSystems afleveringsdetektering består udelukkende i at detektere en acceleration, men det er langt fra alle boldberøringer, der tilfører bolden fart.

På grund af at hver spiller i prototyperne defineres som ét punkt – spillerens bryst – kan deres positioner ikke afgøres tilstrækkeligt præcist til at kunne identificere den afleverende spiller, ligesom der ikke gives rum for tvivl i identifikationen. Også spillere på offsidegrænsen kan positioneres forkert på grund af deres orientering og på grund af benenes relative uafhængighed af overkroppens placering. Usikkerhed i positionering af spillere ved offsidegrænsen vil give anledning til fejlkendelser i de snævre situationer, hvor et offside-detekteringssystem gerne skulle kunne hjælpe linjedommeren med at træffe den rigtige beslutning.

Hvad angår Krav13 er der i ScenarioSender og Visualizer ikke gjort meget for at sikre vedligeholdbarhed, da begge programmer bedst kan betegnes som monolitter [Stallings 1998, s. 164]. Som små og simple prototyper er dette ikke nødvendigvis et større problem, men begge programmer skal modificeres for at tage højde for 3D-data og flere radiosendere pr. spiller.

DommerStøtteSystem har et langt mere vedligeholdbart design, hvor der tilmed kan skiftes operativsystem ved at skifte nogle wrapper-klasser [POSA2, s. 47] ud. Designet af selve offside-detekteringsmekanismen kan der dog ikke uden videre arbejdes videre på, da algoritmen og de benyttede datastrukturer er en tand for simple til de mere komplicerede udregninger, dette speciale benytter sig af, men mere om det i kapitel 8.

Trods den simple offside-detekteringsalgoritme er de udviklede prototyper et skridt på vejen mod computerbaseret offside-detektering i realtid, og derfor arbejdes der i dette speciale videre ud fra prototyperne. Hvad forbedringerne udarbejdet i dette speciale omfatter, er beskrevet i kapitel 8.

4. Bevægelsesanalyse

4.1.	Indledning	35
4.2.	Spillernes omfang	40
4.3.	Almindeligt løb	43
4.4.	Afleverende spiller	47
4.4.1.	Nærkamp om bolden	48
4.4.2.	Hovedstødsduel	50
4.5.	Specialtilfælde	51
4.6.	Delkonklusion	52

I dette kapitel analyseres fodboldspilleres bevægelser med det formål at kunne udregne omridset af spillerens omfang ud fra radiosenderne i benskinnebenene ved forskellige bevægelser, en spiller gennemfører i løbet af en fodboldkamp. Analysen er blevet til i samarbejde med Thomas Bull Andersen, som er lektor på Center for Idræt ved Århus Universitet og arbejder indenfor biomekanik med hovedinteresser i bevægelsesanalyse og bevægelsessimulation.

Indledningsvis beskrives de data, som ligger til grund for analysen, og herefter foretages en analyse af spillernes omfang, idet radiosenderne placeres i benskinnebenene ikke siger alt om, hvor spilleren befinder sig. For spillere nær offsidegrænsen er det punkt nærmest mållinjen, der afgør en eventuel offsideposition, og hvorvidt dette punkt kan udledes af skinnebenenes placering, analyseres herefter. Der gives et bud på, hvordan den afleverende spiller kan identificeres blandt flere mulige i nærheden af bolden, og endelig gives eksempler på sjældent forekommende situationer, hvor positioneringsdata om spillernes benskinneben ikke er tilstrækkeligt til at kunne opfatte situationerne korrekt.

4.1. Indledning

Inden selve analysen foretages, beskrives i dette afsnit de optagelser, der ligger til grund for analysen samt hvilke resultater, der er målet med analysen. For at opnå størst mulig realisme har en række spillere fra superligaklubben AaB fungeret som medier i optagelserne, hvor de har deltaget i spilsituationer, som udforsker de ønskede bevægelser. Kvaliteten af optagelserne er desværre ikke helt optimal, så det beskrives hvorfor det er tilfældet og hvad der er gjort for at forbedre kvaliteten til analysen.

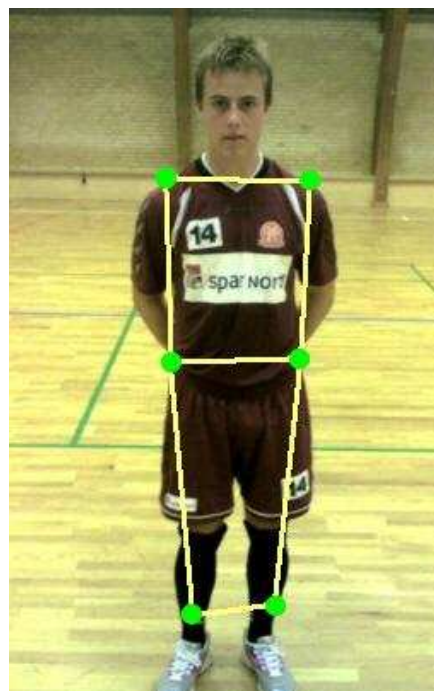
Optagelser til analysen

Til undersøgelserne er benyttet et system fra svenske Qualisys [Qualisys], som normalt bruges til at analysere bevægelser inden for idrætten. Det kan for eksempel være vægtløftning eller løb, hvor uhensigtsmæssige bevægelser kan medføre dårlig kraftudnyttelse eller højt energiforbrug og deraf følgende ikke-optimal præstation, og i værste fald skader.

I systemet benyttes en række infrarøde kameraer til at skabe en 3D-model af bevægelserne, som 240 gange i sekundet opfanges ved hjælp af reflekterende markører på udvalgte steder på kroppen – eksempelvis de led, der medvirker til den bevægelse, som ønskes analyseret. Til offside-detektering er de interessante steder spillerens skinneben, hofter og skuldre som vist på Figur 17. Skinnebenene repræsenterer de radiosendere, der benyttes i Cairos' positioneringssystem, mens skuldrene er det sted på kroppen, der kan komme længst væk fra fødderne. Her ses der bort fra hovedet, som ganske vist kan komme lidt længere væk, men ikke repræsenterer spillerens fysiske udformning så godt.



Figur 17 – U/21-landsholdsspiller Jeppe Lund Curth med påsatte markører.



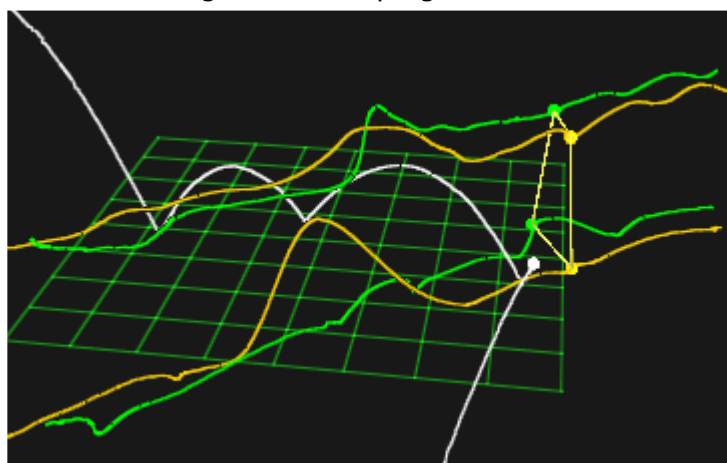
Figur 18 – Illustration af markørernes placering.

Med til systemet fra Qualisys følger et analyseprogram ved navn Qualisys Track Manager, som repræsenterer markørerne som prikker, der kan følges gennem optagelsen. Imellem prikkerne kan der efterfølgende indsættes 'knogler' for bedre at kunne følge bevægelserne. Figur 18 viser, hvordan omridset af en fodboldspiller ser ud fra Qualisys' synspunkt, når markørerne er placeret som beskrevet og der er indsat knogler.

I Qualisys Track Manager kan markørernes bane igennem en optagelse trækkes ud til linjer som dem i Figur 19, hvor man kan følge en spiller løbe ind fra venstre side, tæmme bolden i luften og spille bolden videre, mens han løber baglæns ud af billedet.

På grund af markørernes placering indgår den nederste del af spillerens ben samt hans hoved ikke i omridset, men disse dele af kroppen vil ikke kunne befinde sig alverden langt fra henholdsvis skinneben og skuldre (mere om det i afsnit 4.2).

Markørerne på hofterne har vist sig at være overflødige, idet hofterne altid vil befinde sig et sted mellem skinnebenene og skuldrene i (x, y)-planet, hvorfor de heller ikke er at finde i Figur 19. Da optagelserne blev lavet, var det imidlertid en anden fortolkning af 'nærmere', der var gældende. Dengang var det den



Figur 19 – En bevægelse optaget med Qualisys og vist i Qualisys Track Manager. Bolden er repræsenteret af den hvide linje, mens spillerens højre skulder og skinneben kan følges med de grønne linjer, og venstre skulder og skinneben er gule. 'Knoglerne' mellem de fire grønne og gule linjer viser spillerens position på et bestemt tidspunkt, og bolden er på samme tidspunkt ved den hvide prik.

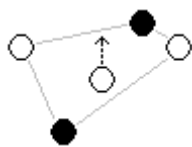
Spilleren er kommet løbende ind fra venstre side og tæmmer bolden i luften (derfor det højt løftede ben midtvejs) samtidig med at han vender rundt. Herefter sparker han til bolden i det øjeblik, der vises i figuren, og forsvinder ud i højre side løbende baglæns.

overvejende del af overkroppen, der skulle have passeret hele forsvarsspillerens overkrop, for at man kunne være i offsideposition [Carlsen]. Ved at sætte markører på hofter og skuldre kan man lave en kasse, der udgør spillerens overkrop, og har centrum af denne kasse passeret hele forsvarsspillerens overkrop/kasse, vil angriberen være i offsideposition. FIFA udsendte den nye fortolkning med virkning fra 1. juli 2005, og fra da af er det altså det punkt på hele kroppen undtaget armene, der er nærmest mållinjen, der afgør offsidepositionen.

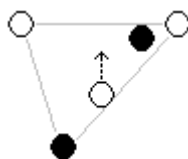
Dataene gemmes i en datafil og kan efterfølgende analyseres ved at afspille den optagede sekvens og betragte den fra forskellige vinkler. Markørerne reflekterer infrarødt lys udsendt af kameraerne tilbage i kameraernes linser, og hvis flere kameraer kan se den samme markør, kan markørens position beregnes i tre dimensioner. Systemet fra Qualisys beskrives nærmere i appendiks D.1.

Ønskede resultater

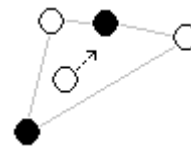
I løbet af en fodboldkamp vil en fodboldspiller foretage en række bevægelser, hvor kroppen skifter position i forhold til fødderne. Når man løber, vil kroppen være i en bestemt position, men for at accelerere må man læne sig mere forover for ikke at miste balancen. På samme måde skal man læne sig til siden for at skifte retning. Ved hovedstødsdueller er det oftest nødvendigt at hoppe for at komme først på bolden, og i andre nærkampe må man skubbe til modspilleren med skulderen for at holde ham væk fra bolden. Målet med bevægelsesanalysen er at finde frem til en metode, hvormed man kan udregne omridset af en fodboldspiller ud fra placeringen af spillerens skinneben ved disse bevægelser.



Figur 20 – Omridset af en spiller ved almindeligt løb, set ovenfra.



Figur 21 – Ved acceleration læner man sig frem.

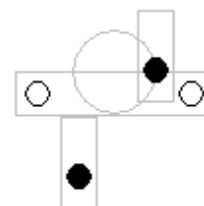


Figur 22 – Ved retningsskift flyttes overkroppen i den retning, der skiftes til.

I Figur 20, Figur 21 og Figur 22 vises tre eksempler på bevægelser, og skinnebenene er de sorte prikker, mens de hvide prikker viser de udregnede skulderpositioner. Den hvide prik med pilen viser den (x, y)-retning, spilleren bevæger sig i og befinder sig midt imellem skinnebenene, hvilket skyldes en formodning om, at skuldrene bevæger sig med samme og konstant fart. Skinnebenene skiftes til at være i høj og lav fart, og skuldrene vil derfor befinde sig med en konstant afstand fra gennemsnittet af føddernes placering i (x, y)-planet.

Når skuldrenes placering er regnet ud, kan spillerens omrids beregnes mere nøjagtigt. Positioneringssystemet giver data om et bestemt punkt (et punkt på skinnebenene), men spillernes fødder er som beskrevet i afsnit 4.2 cirka 28 cm lange, så punktet nærmest mållinjen kan afvige en del fra skinnebenets placering. Endvidere stikker hovedet et stykke ud foran skuldrene, og kan dermed i virkeligheden være spillerens forreste punkt, hvilket dog ikke er tilfældet for posituren i Figur 23, som forestiller samme positur som Figur 20.

Hvis det er muligt at regne sig frem til omrids som i Figur 23, kan punktet nærmest mållinjen findes ved ganske enkelt at sammenligne x-værdier (banens længderetning) på kassernes hjørner samt hovedets centrum plus radius.



Figur 23 – De beregnede punkter bruges til at fastlægge spillerens omrids mere nøjagtigt. De opretstående kasser viser spillerens fødder, mens den liggende kasse er oversiden af overkroppen. Den grå cirkel er hovedet, som stikker frem foran skuldrene.

Almindeligt løb, retningsskift og acceleration har størst betydning for de spillere, der står lige omkring offsidegrænsen, når bolden røres – altså forsvarsspillere og de angribere, bolden afleveres til. Offsidegrænsen er den linje på tværs af banen, der går igennem punktet nærmest mållinjen på den næstsidste forsvarsspiller, jf. afsnit 2.2.2. I hovedstødsdueller og nærkampe er kroppens position afgørende for, om systemet kan identificere den rette spiller som den, der har rørt bolden – altså kilden til afleveringen.

Elitespillere som medier

Optagelserne til undersøgelserne er foregået i AaB-hallen, som ligger i forbindelse med den ålborgensiske superligaklub AaB's træningsanlæg. Medierne i optagelserne var fire professionelle spillere fra AaB's superligatrup; Thomas Kortegaard, Jacob Sørensen, Michael Jakobsen og Jeppe Lund Curth, hvoraf de tre sidstnævnte er at finde på Danmarks U/21-landshold, som er ungdomslandsholdet for spillere op til 21 år. Det er altså spillere på allerhøjeste niveau i Danmark, der har fungeret som medier. Elitespillere bevæger sig anderledes og går ind i nærkampe på en anden måde end spillere fra de lavere rækker, og eftersom systemet er mest relevant på højt plan, hvor der står mange penge på spil, er elitespillere bedre repræsentanter i undersøgelsen.

De fire spillere har deltaget i en række spilsituationer, der er specielt tilrettelagt for at fremprovokere bevægelser, hvor kroppens placering i forhold til fødderne ikke umiddelbart kan aflæses. Det vil være for omfattende at beskrive øvelserne her, men kort fortalt er det en række spilsituationer med tilhørende løbemønstre, som skal afdække de ovennævnte situationer. Spilsituationerne er designet til at ligne almindeligt spil mest muligt, så spillet ikke bliver for kunstigt. Samtidig er der givet mulighed for en vis grad af improvisation undervejs, så spillerne har været nødt til at agere ud fra spillets udvikling frem for at følge skabelonen slavisk, hvilket øger realismen i bevægelserne.

Spilsituationerne er foregået på et område på cirka 10*10 meter, idet der er grænser for, hvor langt kameraerne kan stå fra hinanden. Af samme grund vil systemet ikke kunne bruges til at levere positioneringsdata fra en virkelig kamp. Systemet er endvidere video-baseret, så det kan ikke garanteres, at positionerne på markørerne kan beregnes hele tiden, idet der kan være nogle markører, kameraerne ikke har udsyn til.

Optagelsernes kvalitet

Som forklaret i appendiks D.1 kan kameraerne blive påvirket af, at gulvet giver efter, når der løbes på det, og det kan give huller, dubletter og spring i de baner, markørerne opfattes at have igennem optagelserne. Det skal også medgives, at udfyldning af hullerne kan give en afvigelse fra markørens reelle bane, især hvor hullerne strækker sig over store tidsrum. Samlet set betyder det, at resultaterne af undersøgelserne skal tages med visse forbehold.

Til illustration af fejlkildens størrelsesorden kan det nævnes, at afstanden mellem spillerens skuldre ved almindeligt løb i gennemsnit er 39,2 cm i frames, hvor begge skuldre optræder, med en standardafvigelse på 6,7 cm. Dette virker måske ikke voldsomt, men faktisk varierer afstanden mellem 24 og 66,7 cm. Dette stemmer så langt fra med det forventelige, nemlig at der ville være meget lille variation i afstandene, idet skuldrenes bevægelsesmuligheder er begrænsede.

Alternativerne til at bruge systemet fra Qualisys vurderes ikke til at kunne give mere nøjagtige resultater. Med andre videobaserede systemer end Qualisys' er det næsten umuligt at positionsbestemme med få centimeters nøjagtighed, og med hensyn til radio-baserede systemer kendes kun ét system, der kan give data om boldens position, og det er systemet fra Cairos, som ikke har ønsket at medvirke til dette speciale.

Der vil kunne opnås en anelse bedre resultater ved at lave nye optagelser på et mere fast gulv, men praktiske hensyn gør dette til en større opgave. Først og fremmest skal optagelserne helst ligge udenfor fodboldsæsonen for ikke at forstyrre spillernes forberedelse til den næste kamp og rehabiliteringen mellem deres træningspas. Dernæst er det

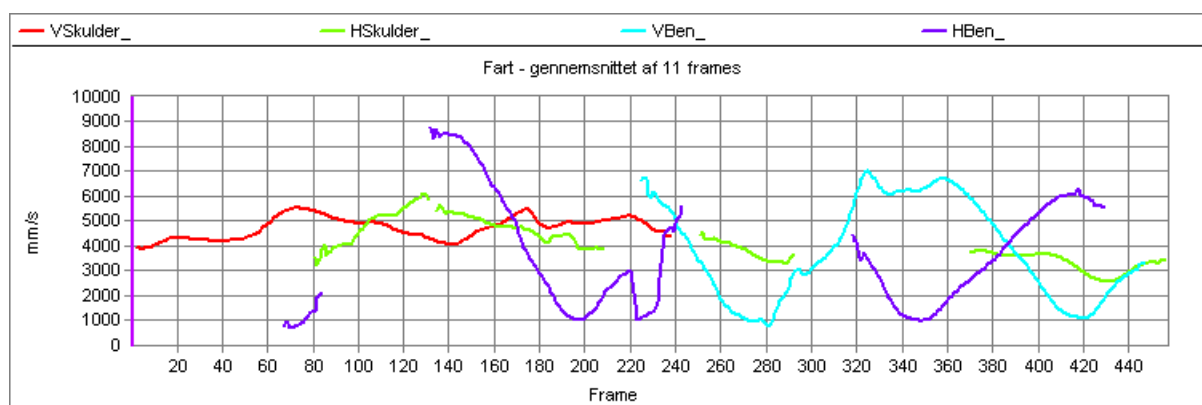
et problem at finde en passende hal, fordi de fleste idrætshaller har trægulv og i øvrigt er fuldt bookede af folkeskoler. Optagelserne kan kun foregå inden døre, idet det infrarøde lys ellers vil blive forstyrret af solens lys.

På grund af det begrænsede spilområde er der grænser for realismen i spilsituationerne. Da optagelserne er foregået indendørs, kan bolden endvidere ikke ramme en knold på banen eller blive grebet af vinden, hvilket betyder, at ikke alle relevante bevægelser for bolden kan undersøges.

Foranstaltninger mod unøjagtigheder

Til undersøgelsesernes formål vurderes de optagede data tilstrækkeligt nøjagtige til at kunne give et indtryk af kroppens placering i forhold til skinnebenene i forskellige bevægelser. For at kompensere for de nævnte usikkerheder udregnes fart, acceleration og retningsændringer for et bestemt tidspunkt ud fra gennemsnittet af de omkringliggende tidspunkter. Dermed bliver der mindre spring i eksempelvis farten fra sample til sample, og dette svarer bedre overens med de forventninger, man kan have til menneskets bevægelser. Når man eksempelvis flytter sit ben, foregår det i en glidende bevægelse, hvor farten ikke ændrer sig alverden på et millisekund.

Figur 24 viser farten på fire forskellige punkter gennem et optaget scenario. I figuren er farten for hvert tidspunkt (frame) beregnet ud fra gennemsnitsfarten i de fem foregående og de fem efterfølgende tidspunkter – altså 11 punkter i alt. 11 punkter vurderes på baggrund af fartkurver som dem i Figur 24 til at give det bedste kompromis mellem kurveglathed og nuancerighed på kurverne. Dette er vurderet ud fra fartkurver, men samme sammenhæng antages at gælde for retning og acceleration. Figuren er i øvrigt fremstillet med Qualisys Track Manager's analyseværktøj.



Figur 24 – Udglattede fartkurver med intervaller uden data. Kurverne svarer til de data, der benyttes i bevægelsesanalysen.

I Figur 24 findes der huller i kurverne, hvilket selvfølgelig skyldes, at der er huller i banerne i optagelsen. Godt nok kan disse huller udfyldes som beskrevet i appendiks D.1, men denne lapning tilfører et element af usikkerhed. For at bevægelsesanalysen så vidt muligt foretages på data der afspejler virkeligheden, benyttes til dette formål kun baner, hvor hullerne ikke er udfyldt.

De fire punkter, hvis fart afbildes i Figur 24, er ben og skuldre på en fodboldspiller i løb. Spillerens højre og venstre ben skiftes til at have høj og lav fart, mens skuldrene holder en nogenlunde ens og konstant fart. Selvom kurverne ikke er sammenhængende, kan man se antydningen af, at farten på skuldrene befinder sig i samme leje som gennemsnittet af farten på de to ben.

Datakvaliteten på de optagede scenarier er alt i alt ikke tilstrækkelig god til at kunne bruges som endegyldigt bevis i videnskabelig sammenhæng. Trods dette vurderes dataene til at kunne finde anvendelse i dette speciale, når blot der kun benyttes 'virkelige' data, kurverne glattes lidt ud og de værste udslag i resultaterne sorteres fra.

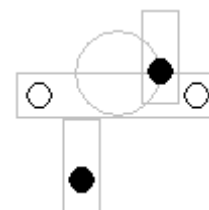
4.2. Spillernes omfang

Som nævnt i indledningen til dette kapitel gives der ingen informationer om placeringen af hovedet og den nederste del af skinnebenene, når markørerne sidder som vist i Figur 18 på side 36. I dette afsnit undersøges afstanden fra disse markører til de punkter på spilleren, der har betydning bestemmelse af spillerens omfang, jf. Figur 23 på side 37.

Mandlige fodboldspillere er en lille smule højere end den gennemsnitlige mandlige befolkning [Wesson, s. 122], så spillerne antages at have samme størrelse hoved, skuldre og fødder som almindelige, veltrænede mennesker. Fodboldspilleres fødder antages således at være mellem 25 og 31 cm, svarende til skostørrelser mellem 37 og 47 i europæiske mål⁴. En fod antages i det følgende at være gennemsnittet af dette – 28 cm fra hæl til spidsen af storetåen – og afstanden fra forsiden af skinnebenet til spidsen af storetåen formodes ud fra dette at være 19 cm. Mål på andre kropsdele af fodboldspillere antages at være som vist i Tabel 2.

Kropsdel	Afstand
Baghoved til næsetip	20 cm
Hovedets bredde	20 cm
Forside af skulder til bagside af skulder	10 cm
Overkroppens bredde	40 cm
Fodens længde	28 cm
Forside af skinneben til tåspids	19 cm
Forside af skinneben til hæl	9 cm
Fodens bredde	10 cm

Tabel 2 – Målene på udvalgte kropsdele (jf. Figur 25) hos en mandlig fodboldspiller af gennemsnitlig størrelse.



Figur 25 – Den store grå cirkel udgør spillerens hoved, fødderne er de små kasser med sorte prikker i, og den øverste del af overkroppen udgøres af kassen med de små cirkler.

Hovedet vil så godt som altid stikke ud foran skuldrene, mens det bageste ben vil være længere tilbage end hvilken som helst del af overkroppen. Skuldrenes placering udgør spillerens bredde, hvilket har interesse, når spilleren ikke løber i en lige bane mod det ene mål. Forreste del af spilleren vil enten være hovedet eller tåspidsen på den forreste fod, med dette undersøges nærmere herunder.

Afstand fra skulder til næsetip

Spilleren til højre i Figur 26 viser en situation, der kan betegnes som den værst mulige hvad angår afstand fra skulder til hoved, idet spilleren kigger lige frem og læner sig forholdsvis meget fremad. Forreste punkt på spilleren er hans næsetip, mens skulderen er placeret ud for spillerens øre. Dermed må forreste punkt på spilleren være ca. 15 cm foran skulderen, som antages af være afstanden fra øre til næse på et menneske.

For en spiller nær offsidegrænsen vil afstanden være en smule mindre end 15 cm. Spilleren timer sit løbemønster efter hvornår afleveringen foretages, og eftersom han jo skal være foran bolden for at være i offsideposition, vil hovedet være drejet bagud eller til siden, hvor bolden befinder sig.

Markørerne i optagelserne befandt sig lige ovenpå den knogle der sidder yderst på skulderen (på striben på skulderen af spillerne i Figur 26), hvorfra der er omkring 5 cm til kanten af skulderen, der som nævnt er på linje med øret, når spilleren kigger ligeud. En spiller i løb vil altid være en smule foroverbøjet, så hovedet må være et stykke foran skulderen, og et forsigtigt gæt er, at afstanden mindst er 5 cm.

⁴ Kilde: Skotøjsæske fra adidas.

Hovedet befinder sig altså et sted mellem 5 og 15 cm foran forreste punkt på skulderen, og ved at antage denne afstand til at være 10 cm kan usikkerheden om hovedets placering højst være 5 cm.

Markøren befinder sig midt på skulderen, og der vil derfor være 5 cm til både forsiden og bagsiden af skulderen. Fra midt på skulderen er der således 15 cm +/- 5 cm til forreste punkt af hovedet. Kan skulderens position fastslås ud fra føddernes placering, kan forreste del af spillerens overkrop dermed fastslås med en nøjagtighed på 5 cm.

Afstand fra radiosender til hæl og tå

Forreste del af overkroppen kan dermed positioneres ret præcist, når man kender skulderens placering, som analyseres i afsnit 4.3 og 4.4. Den nederste del af kroppen har meget større bevægelsesfrihed, og hælen på den bageste fod vil være det bageste punkt på spilleren, mens spidsen af storetåen på den forreste fod en stor del af tiden er forreste punkt på den nederste del af kroppen, jf. Figur 27, som viser de positurer, de to ben gennemgår i løbet af et skridt ved almindeligt løb. Forreste fod henviser naturligvis til løberetningen.

Overkroppen antager i Figur 27 samme holdning gennem hele sekvensen, men vil i virkeligheden rotere en smule således at venstre skulder skubbes en smule fremad, når der sættes af på højre fod og omvendt.

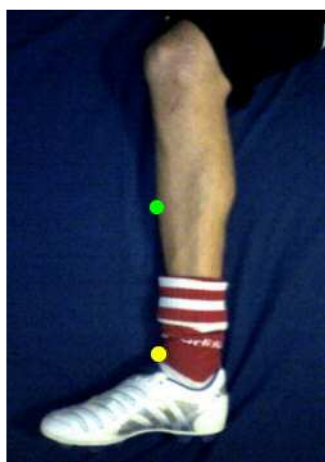


Figur 26 – AaB-spillerne Martin Ericsson (tv) og Simon Bræmer i løb. Kilde: [AaB-Online].



Figur 27 – Benenes stilling på fem tidspunkter i et skridt ved almindeligt løb. Billede 1 svarer til Simon Bræmers positur i Figur 26, mens billede 2 viser Martin Ericssons.

Gennem dele af skridtet i Figur 27 er tåspidsen det forreste punkt på spilleren, mens det på andre tidspunkter er skulderen (og dermed hovedet), der er forrest. Da foden til tider er spillerens forreste punkt, gælder det om at finde ud af, om tåspidsen og hælen i det hele taget kan positioneres nøjagtigt, og her har placeringen af radiosenderne stor betydning. Tabel 3 viser, hvor præcist tåspidsen og hælen kan positioneres, når positioneringsdata gives for et punkt på forsiden af anklen henholdsvis midt på skinnebenet som vist med de gule og grønne prikker i Figur 28, Figur 29 og Figur 30.



Figur 28 – Ret vinkel mellem fod og skinneben.



Figur 29 – Mindst mulig vinkel mellem fod og skinneben.



Figur 30 – Størst mulig vinkel mellem fod og skinneben.

Ved at placere benskinssens radiosender helt nede ved anklen (de gule prikker i Figur 28, Figur 29 og Figur 30), kan spillerens hæl og tåspids positioneres helt nøjagtigt, idet vinklen mellem fod og underben ingen betydning har for afstanden fra radiosender til henholdsvis hæl og tåspids. Denne præcision gælder dog kun, når foden er parallel med jorden, så i billede 3, 4 og 5 i Figur 27 kendes den grå fods position ikke med samme nøjagtighed. Ankens afstand til jorden kan bruges som indikator for, om foden er parallel med jorden eller ej. Under alle omstændigheder vil der være et sted mellem 9 og 19 cm fra radiosenderens placering til tåspidsen, når foden peger bagud, altså en usikkerhed på +/- 5 cm.

Placering af radiosender	Ret vinkel mellem fod og skinneben (Figur 28)	Mindst mulig vinkel mellem fod og skinneben (Figur 29)	Størst mulig vinkel mellem fod og skinneben (Figur 30)
Ankel (gul)	19 cm til tå 9 cm til hæl	19 cm til tå 9 cm til hæl	19 cm til tå 9 cm til hæl
Skinneben (grøn)	19 cm til tå 9 cm til hæl	0 cm til tå 28 cm til hæl	28 cm til tå 0 cm til hæl

Tabel 3 – Betydning af radiosenderens placering, jf. Figur 28, Figur 29 og Figur 30. Er radiosenderen placeret helt nede ved anklen, medfører vinklen i forhold til benet ingen usikkerhed for positionering af foden, så længe foden står fladt på jorden.

I Cairos' positioneringssystem er radiosenderen placeret i benskinen, og derfor må den befinde sig på forsiden af skinnebenet, cirka midt imellem ankel og knæ (de grønne prikker i Figur 28, Figur 29 og Figur 30). Står foden fladt på jorden, kan underbenet antage positioner, som ligger mellem de to yderpositioner, der angives af Figur 29 og Figur 30. Radiosenderen kan derfor befinde sig op til 28 cm fra tåspidsen eller hælden.

Tallene i Tabel 3 er baseret på teoretiske yderpositioner, men i praksis vil usikkerheden ikke være den samme, selv med radiosenderen placeret midt på skinnebenet. På intet tidspunkt i sekvensen i Figur 27 kommer forreste fod ud i den yderposition, der illustreres af Figur 30. Dermed kan der ses bort fra tallene i denne kolonne, hvormed tåspidsen kan være mellem 0 og 19 cm fra en radiosender midt på skinnebenet, mens afstanden til hælen er mellem 9 og 28 cm.

Den forreste fod er hele tiden nogenlunde parallel med jorden, så her kan forreste del af foden positioneres med en nøjagtighed på +/- 9 cm. Anderledes ser det ud for bageste punkt på bageste fod, fordi foden som vist på første billede i Figur 27 kan vende bagud, så tåen er det bageste punkt. Det gør det, når spilleren begynder at trække benet fremad, så når bageste ben begynder at få fart på, kan der være op til 40 cm fra midt på skinnebenet til tåspidsen. Der vil dog mindst være 19 cm, hvilket forekommer på billede 2 og 3 (det grå ben), så her vil unøjagtigheden også være i omegnen af +/- 10 cm.

Til disse tal skal lægges 3 cm usikkerhed som skyldes variation i føddernes størrelse, men denne usikkerhed kan fjernes ved at indsætte skostørrelsen i systemet, så der tages højde for hver enkelt spillers fodstørrelse i beregningerne.

Selvom knæet i nogle af billederne i Figur 27 er placeret foran forreste fod, tages det ikke med i beregningerne i dette afsnit, idet det ikke på noget tidspunkt ser ud til at være foran skulderen.

I analysen i de følgende afsnit antages radiosenderne at sidde midt på skinnebenene som i Cairos' positioneringssystem. Dette vil give andre afstande til skuldrene i forhold til en radioplacering ved anklen, men de fundne sammenhænge antages at gælde for denne metode også, blot med andre mål.

Hvad angår præcisionen i positionering af fødderne vil der altså kunne opnås en markant forbedring ved at placere radiosenderen helt nede ved anklen. På denne måde mindskes usikkerheden på placeringen af forreste fods storetå fra 9 til 0 cm, mens den for bageste punkt på bageste fod mindskes fra 10 til 5 cm.

Samlet vurdering

Med radiosenderne placeret på skinnebenene er der altså ca. 10 cm unøjagtighed i positioneringen af både forreste og bageste punkt på foden. Kun på billede 5 i Figur 27 er storetåen på forreste fod placeret foran skulderen, så resten af tiden er det skulderens og hovedets placering, der er spillerens forreste punkt. Antages skulderens position at kunne udregnes nøjagtigt, er der kun 5 cm unøjagtighed for det forreste punkt det meste af tiden.

To spillere, der begge løber mod målet, vil altså det meste af tiden kunne risikere at blive positioneret højst 10 cm forkert i forhold til hinanden, idet begge spilleres hoveder kan positioneres 5 cm forkert i det ene eller den anden retning. Spillere der løber hver sin vej, vil tilsvarende kunne positioneres med 10 cm unøjagtighed for bageste punkt på spilleren der løber væk fra mål, og 5 cm unøjagtighed på forrest punkt for spilleren, der løber mod mål. Det giver en samlet fejlmargen på 15 cm. Den tredje mulighed, hvor begge spillere løber væk fra målet og derfor skal positioneres ud fra hælen på bageste fod i løberetningen, giver en samlet usikkerhed på op til 20 cm, hvilket er indenfor det tilladte område på 30 cm, jf. afsnit 3.1.2.

De ovennævnte tal gælder for positionering af spillere nær offsidegrænsen. Identifikationen af den afleverende spiller er ikke nær så afgørende, da der i afsnit 3.1.4 gives rum for usikkerhed, og har på den måde mest betydning for, hvor stor radius af bolden, spillerne skal være, for at de kan være kandidater som afleveringens kilde.

Placeres radiosenderen ved anklen, vil der være 5 cm unøjagtighed for både bageste og forreste punkt, så her vil den samlede usikkerhed for to spillere være 10 cm, uanset hvilken vej de løber. Dette giver rum for en større usikkerhed i placeringen af skulderen, hvilket er emnet for afsnit 4.3 og 4.4.

4.3. Almindeligt løb

I dette afsnit analyseres skuldrenes placering ved den simpleste af de bevægelser, der udføres af spillere nær offsidegrænsen. Spillere nær offsidegrænsen omfatter både medspillere til afleveringens kilde og forsvarsspillere på det modsatte hold, og de udførte bevægelser udgøres af almindeligt løb, retningsskift og acceleration. De sidste to bevægelser er henlagt til fremtidigt arbejde, jf. afsnit 9.3.

Som beskrevet i afsnit 2.2.2 afgøres en spillers eventuelle offsideposition af det punkt på spillerens hoved, krop og fødder, som er nærmest mållinjen. I afsnit 4.2 blev det vist, at spillerens omfang kan udledes ud fra radiosendere på spillerens underben, hvis blot skuldrenes positioner kan bestemmes fra samme data. Det vil i dette afsnit blive undersøgt, om det er muligt at udlede skulderens placering ud fra oplysningerne om spillernes

skinneben samt deraf afledte informationer såsom retning, hastighed og acceleration – altså om to punkter er tilstrækkeligt til at opnå den ønskede præcision i positioneringen.

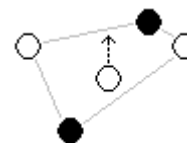
Almindeligt løb dækker over de tidspunkter i en fodboldkamp, en fodboldspiller løber ligeud med en nogenlunde konstant hastighed som eksemplificeret i Figur 31, og er således den simpleste bevægelse, der laves. I de optagede scenarier findes der tolv løb, der kan betegnes som almindeligt løb, og i dette afsnit analyseres skuldrenes placering i forhold til skinnebenene i disse.



Figur 31 – Randers' Christian Lundberg (tv) og AaB's Marco Reda løber om kap for at nå bolden. Kilde: [AaB-Online].

Som det blev antydnet tidligere i Figur 24 på side 39, skiftes skinnebenene til at være i høj fart, mens overkroppen ser ud til at have en nogenlunde konstant fart, som svarer til gennemsnittet af skinnebenenes fart. Derfor kan det antages, at skuldrene hele tiden har samme afstand til det punkt, der befinder sig midt imellem skinnebenene – i hvert fald så længe der løbes ligeud og med samme fart.

Hvis det er tilfældet at skuldrene hele tiden befinder sig med samme afstand til gennemsnittet af skinnebenenes placering, kan skuldrenes placering beregnes som illustreret i Figur 32. Herefter kan omridset af spilleren udregnes som beskrevet i afsnit 4.2.



Figur 32 – Ved almindeligt løb formodes overkroppen hele tiden at have samme afstand til punktet midt imellem skinnebenene.

Fremgangsmåde

For at undersøge, hvorvidt der kan udledes en bestemt afstand mellem skinneben og skuldre, gennemløbes data fra de optagede scenarier, der er kategoriseret som almindeligt løb. Da scenarierne indeholder huller, er undersøgelserne udelukkende baseret på frames, hvor begge skinneben samt mindst én skulder har været at finde, og samtidig benyttes der som beskrevet i afsnit 4.1 udglatning for at modvirke de unøjagtigheder, der findes i dataene. Dataene, der anvendes i analysen, er tabulator-separerede tekstfiler eksporteret fra Qualisys-optagelserne. En beskrivelse af den udviklede software, som bruges til bevægelsesanalysen, findes i appendiks D.2.

I hver frame udregnes (x, y) -afstanden fra skinnebenenes gennemsnitlige placering til skulderens placering i den retning, der løbes. Dette indebærer en lang række trigonometriske beregninger og er derfor en forholdsvis kompliceret udregning, som er nærmere beskrevet i appendiks D.2.1.

Spillerens retning

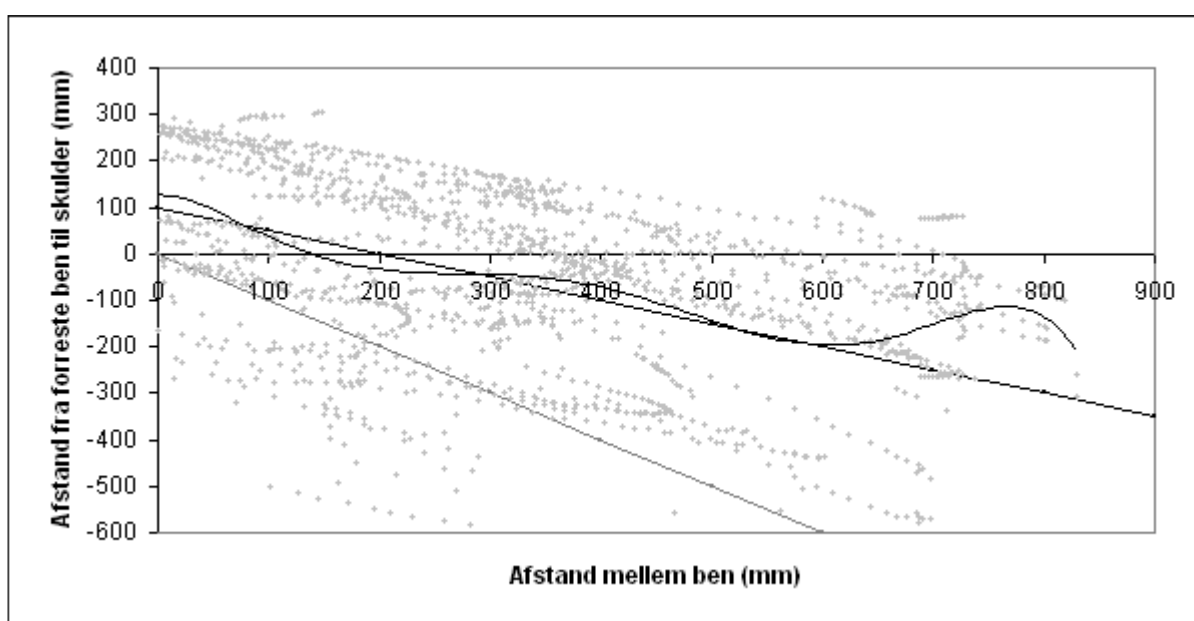
Skinnebenenes placering leveres naturligvis af positioneringssystemet, og skuldrene må befinde sig en vis distance foran skinnebenene i den retning, der løbes. Skinnebenenes retning kan beregnes ved hjælp af de tidligere placeringer, men da de to skinneben, når der laves selv små retningsændringer, ikke har samme retning, må spillerens retning beregnes på en anden måde.

Til at afgøre spillerens retning er to fremgangsmåder blevet undersøgt. I den ene blev spillerens retning defineret som et gennemsnit af benenes retning, og den anden definerede spillerens retning som retningen på det hurtigste ben. Sidstnævnte metode gav den bedste konsistens i afstanden fra benene til skuldrene i løberetningen, hvorfor denne metode anvendes herefter.

Forreste ben som indikator for skulderens placering

Tilsvarende er der blevet undersøgt to måder at beregne afstanden til skulderen. Anvendes benenes gennemsnitlige placering som udgangspunkt for beregningerne, er det ikke muligt at se nogen sammenhæng i afstanden mellem benene og skuldrene.

Kigges der derimod på Figur 33 er det tydeligt, at der er en sammenhæng mellem afstanden mellem de to ben og afstanden fra forreste skinneben til skulderen. Hvert punkt i figuren repræsenterer afstanden i løberetningen fra forreste fod til en skulder i én frame. Når der er langt mellem benene, vil det forreste ben være foran skulderen, mens skulderen er et stykke foran, når benene er i den fase af skridtet, hvor det hurtigste skinneben passerer det ben, der støttes på.



Figur 33 – Jo længere afstand der er mellem benene, jo mindre er skulderen foran det forreste ben i løberetningen. Den kurvede linje viser en tendenslinje tilnærmet et sjettegradspolynomium, mens den rette, sorte linje har forskriften $y = -\frac{1}{2}x + 100$. Den grå linje viser det bageste bens placering.

Ved at kigge på forreste ben frem for benenes gennemsnitlige placering kan man altså udnytte sammenhængen mellem afstanden på benene og afstanden til skulderen. Den rette linje i Figur 33 viser en simpel forskrift, som beskriver denne sammenhæng:

$$y = -\frac{1}{2}x + 100, \quad (\text{Formel 4.1})$$

hvor y er afstanden fra forreste ben til skulderen i løberetningen og x er afstanden mellem benene i løberetningen. Andre målinger tyder i øvrigt på, at formlen er uafhængig af den hastighed, hvormed spillere løber.

Nøjagtig placering af skuldrene

Afstanden til skuldrene i løberetningen er kun første skridt på vej mod at beregne sig frem til skuldrenes placering. Som beskrevet i afsnit 4.2 antages der at være 40 cm mellem skuldrene på en fodboldspiller, så skuldrene antages at befinde sig 20 cm på hver sin side af den linje, der angiver spillerens retning og går igennem skinnebenenes middelplassering. Følgende algoritme beskriver dette på en mere formel måde:

1. Beregn føddernes middelpacering, *gennemsnit*
2. Bestem spillerens retning, *retning*, til at være retningen på det hurtigste ben
3. Beregn afstanden i løberetningen fra *gennemsnit* til forreste skinneben, *afstand_forrest*
4. Beregn afstanden i løberetningen fra forreste skinneben til skulderen, *afstand_skulder*, med Formel 4.1
5. Skuldrenes middelpacering, *middel*, beregnes ved ud fra *gennemsnit* at lave en vektor af længden *afstand_forrest* + *afstand_skulder* i *retning*
6. Skuldrene sættes til at være placeret 20 cm på hver sin side af *middel*, vinkelret på *retning*

Ud fra denne algoritme er der i gennemsnit en forskel på 26,5 cm mellem de beregnede skulderplaceringer og skulderplaceringerne i målingerne, og standardafvigelsen er på 14,1 cm. Disse resultater ligger langt fra den ønskede præcision, hvilket der er flere forklaringer på.

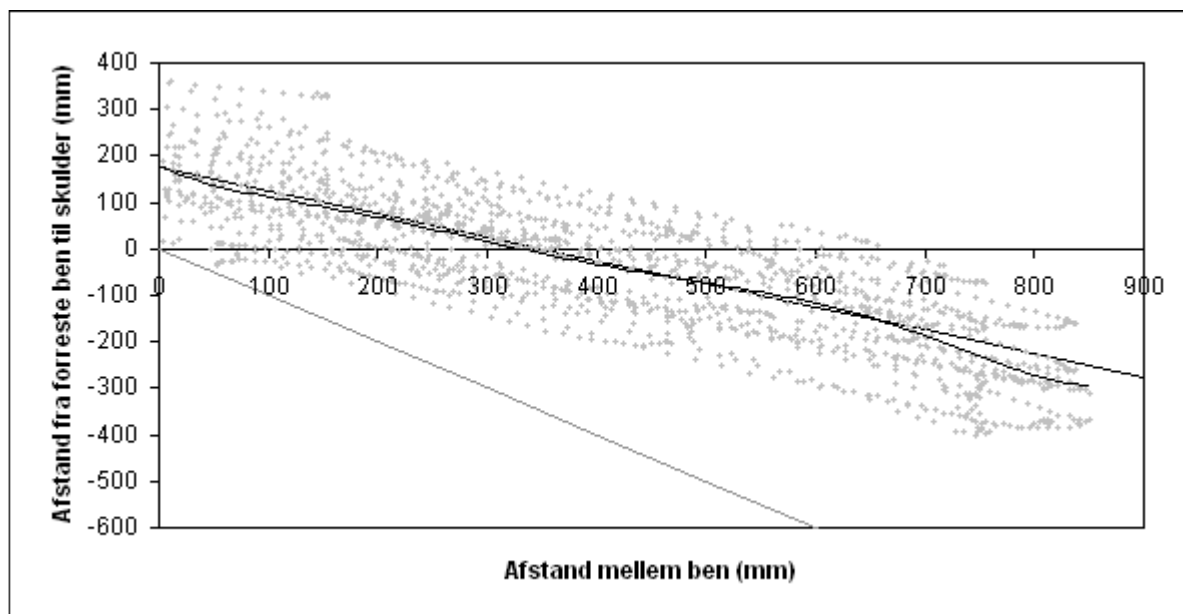
Målinger i Qualisys-optagelserne viser, at skuldrene ved almindeligt løb i gennemsnit opfattes til at være 39,2 cm fra hinanden, med en standardafvigelse på 6,7 cm. Afstandene varierer mellem 24 og 66,7 cm, hvilket ikke kan forekomme i virkeligheden, da skulderleddene ikke er særligt bevægelige. Derfor må en vis del af usikkerheden i skulderplaceringen tilskrives denne unøjagtighed. Fejlpositioneringen af skuldrene må også antages at gælde for positioneringen af benene, som på samme måde må antages at være gennemsnitligt $6,7/2 = 3,35$ cm fra deres reelle position.

Fejlpositionering af benene kommer til udslag i dels forkert beregning af benenes retning, dels forkert beregning af benenes middelposition. Trods det at retningen udglattes baseret på 10 frames, betyder støjen i positioneringen, at retningen ikke nødvendigvis svarer til den reelle retning. En fejlpositionering i retningen medfører en fejlpositionering i skuldrenes middelposition, og det bliver kun endnu værre, hvis benenes middelposition samtidig er udregnet forkert.

Forskellen på den beregnede middelpacering og middelpaceringen af de opfattede skulderplaceringer er på grund af ovennævnte faktorer på 20,7 cm, med en standardafvigelse på 9,9 cm. Meget af afvigelsen skyldes altså, at støjen i optagelserne gør det umuligt at beregne middelpaceringen. Bruges middelpaceringen af de opfattede skulderplaceringer som udgangspunkt for beregningerne (i stedet for middelpaceringen beregnet ud fra benenes placering), kan skuldrenes placering fastslås med en gennemsnitlig fravigelse på 12,6 cm (standardafvigelse: 9,3 cm), og heraf kan over halvdelen af unøjagtigheden tilskrives fejlpositionering af skuldrene.

Støjfri data som verificering

På grund af unøjagtighederne i de oprindelige optagelser, er der til testformål lavet nogle få testoptagelser på et fast gulv, hvormed disse optagelser fremstår som støjfri. I disse optagelser medvirker en kun enkelt spiller som medie; Frands Boe Johansen, som er bror til dette speciales forfatter og har fodboldmæssig erfaring fra 2. division. Dermed antages bevægelserne ikke at afvige betydende fra de oprindelige optagelser. Forskellen i forskriften mellem Figur 33 og Figur 34 antages at skyldes, at Frands er højere end de fire AaB-spillere. AaB-spillerne varierer også lidt i højden, og dette kan være en yderligere grund til spredningen i de oprindelige data.



Figur 34 – Ved brug af støjfri data er tendensen meget tydeligere end i Figur 33. Den kurvede linje viser en tendenslinje tilnærmet et sjettegradspolynomium, mens den rette, sorte linje har forskriften $y = -\frac{1}{2}x + 175$. Den grå linje viser det bageste bens placering.

Disse testdata kan i høj grad bruges til at verificere de sammenhænge, der trods de beskrevne unøjagtigheder ser ud til at være i de oprindelige data, hvor fire spillere fra AaB's superligahold optrådte. I de tre løb, der kan betegnes som almindeligt løb i testdataene, kan skuldrenes placering ved ovenstående algoritme fastslås med en gennemsnitlig afvigelse på 12,1 cm (standardafvigelse: 7 cm). Et bedre resultat kan opnås ved at benytte $-\frac{1}{2}x + 175$ i stedet for Formel 4.1 i skridt 4 i algoritmen, for så er skuldrenes beregnede position i gennemsnit 10,8 cm (standardafvigelse: 6,2 cm) fra den reelle position. Ved at tage spillernes højde med i betragtning ser det altså ud til, der kan opnås bedre præcision.

Dermed ser unøjagtighederne ud til at være nede i en størrelsesorden, hvor der er håb om at kunne leve op til Krav2. Der vil stadig kunne findes flere sammenhænge, der kan tages i brug for at fastslå skuldrenes placering endnu mere nøjagtigt. For eksempel sker der gennem et skridt en mindre rotation af overkroppen, således at skulderen i samme side som den hurtigste fod også har højere fart end modsatte skulder. Ved at tage dette med i beregningerne vil der kunne skæres mindst et par centimeter yderligere af unøjagtigheden.

I øvrigt understøtter Figur 34 påstanden fra afsnit 4.2 om, at skulderen aldrig er placeret bag bageste fod (den grå linje).

4.4. Afleverende spiller

I dette afsnit analyseres bevægelserne for spillere, som kan have afleveret bolden. Dette sker med henblik på at kunne identificere afleveringens kilde så præcist, at systemet sjældent er i tvivl om, hvem der afleverede eller rørte bolden. Indsnævringen af den mængde spillere, der muligvis kan have afleveret bolden, må ikke afstedkomme at afleveringens reelle kilde udelades fra mængden.

Figur 35 viser en spiller i færd med at foretage en aflevering. For bedre at kunne svinge skudbenet og dermed få mere fart i bolden, er overkroppen lænet til siden og derfor ikke placeret lige over fødderne som ved almindeligt løb.

Når bolden afleveres med foden, vil det på grund af radiosenderens placering i ben-skinne være let at afgøre, hvem den afleverende spiller er. Kun hvis der er andre spillere meget tæt på bolden eller bolden befinder sig i luften, kan der være tvivl om afleveringens kilde. Af denne grund er skulderens placering umiddelbart ikke særligt vigtig, når bolden opholder sig ved jorden.

I dette afsnit undersøges det, om føddernes position er tilstrækkeligt til at identificere den afleverende spiller korrekt i de fleste tilfælde (Krav8). Undersøgelser er kun interessante for de situationer, hvor der kan være tvivl om den afleverende spiller, hvilket vil sige i nærkampe og hovedstødsdueller.

4.4.1. Nærkamp om bolden

I dette afsnit undersøges det, hvor langt bolden kan befinde sig fra en spillers skinneben, når han rører den i forbindelse med en nærkamp om bolden. I en fodboldkamp opstår



Figur 36 – Nærkamp om bolden mellem FC Midtjyllands Simon Poulsen (tv) og Rasmus Würtz fra AaB. Kilde: [AaB-Online].



Figur 35 – Thomas Augustinussen fra AaB med et halvtliggende vristspark. Kilde: [AaB-Online].

der mange situationer, hvor to spillere fra hvert sit hold har mulighed for at nå bolden før den anden. I kampen for at nå bolden først vil spillerne ofte i en vis grad skubbe eller hive i hinanden for at komme det afgørende skridt foran modspilleren eller for at skærme modspilleren af og forhindre ham i at komme hen til bolden som illustreret i Figur 36. Når to spillere på denne måde kæmper om den samme bold, kaldes det en nærkamp.

Nærkampe kan gøre det svært at identificere den spiller der rører bolden, og dermed om det er spillerne fra det ene eller det andet hold, der har risiko for at stå i en strafbar offsideposition. Dette skyldes både at spillerne er så tæt på hinanden at de begge kan nå bolden, og at bolden undervejs kan røre begge spillere og derfor få en tilfældig bane.

En nærkamp vil altid foregå i nærheden af bolden, hvorfor det ikke er interessant i forhold til om en spiller er i offsideposition eller ej. Det er altså udelukkende i forbindelse med identificering af den afleverende spiller, at bevægelsesanalyse af nærkampe har re-

levans.

Grundet nærkamps natur har det ikke været muligt at optage sekvenser med nærkampe til bevægelsesanalysen. Systemet fra Qualisys kræver jo udsyn til markørerne, og når spillerne er tæt på hinanden, vil de komme til at dække for hinandens markører.

Glidende tacklinger hører også ind under kategorien nærkampe, men da optagelserne til bevægelsesanalysen er foregået på et halgulv, er denne slags situationer ikke blevet undersøgt, da et sådant gulv giver hudafskrabninger, når man glider på det.

Et radiobaseret positioneringssystem vil kunne give bedre informationer om placeringen af ben og skuldre, og vil også kunne benyttes udendørs. Endnu en gang skal det dog påpeges, at det så ikke vil være muligt at få informationer om boldens bane, idet så vidt vides kun systemet fra Cairos kan levere disse oplysninger. Boldens bane er nødvendig, idet det er spillernes position på afleveringstidspunktet, der har betydning for, om et computersystem vil kunne identificere den afleverende spiller korrekt, og dette tidspunkt kan kun findes ud fra boldens bane og fart.

I analysen af kroppens placering i forhold til skuldrene har det altså ikke kunnet lade sig gøre at lave målinger fra nærkampe. Man kan dog dele nærkampe op i to kategorier alt efter, hvor højt bolden befinder sig. Er bolden i nærheden af græsset, vil spillerne forsøge at spille den med fødderne, så her vil overkroppens placering ikke have nogen relevans. Bolde positioneret over en vis højde vil forsøges spillet med hoved eller bryst og går derfor ind under kategorien hovedstødsduel, som hører til i næste afsnit.

Figur 36 viser en nærkamp, hvor bolden er i græshøjde, og bedømt ud fra billedet er skulderen nogenlunde lige så langt fra fødderne som de ville være ved almindeligt løb. I Figur 9 på side 24 er bolden i hoftehøjde men forsøges spillet med fødderne af de to spillere. Også på Figur 37 er fødderne mere end skuldrene retningsgivende for, om spilleren kan have rørt bolden.

Krav8 fastslår, at det ikke er så vigtigt at fastlægge den afleverende spiller. Fra sin plads ude på sidelinjen kan det i snævre situationer som eksempelvis nærkampe være svært for linjedommeren at se situationen tilstrækkeligt godt til at kunne afgøre, hvem der har rørt og dermed afleveret bolden. Især hvis situationen foregår i modsatte side af banen kan det være svært at se – også fordi der kan være spillere, der dækker for linjedommerens udsyn.

Derfor bliver linjedommeren nødt til at vinke med flaget, hvis der er spillere i strafbar offsideposition. Linjedommerens opgave er egentlig kun at vejlede dommeren [Fodboldloven, s. 20], som så skal tage den endelige beslutning. Dommeren er som regel så tæt på situationen, at han kan træffe afgørelsen om, hvem afleveringen kom fra, og dermed om der skal dømmes offside. Et computersystem vil derfor kun komme i tvivl i de situati-



Figur 37 – Nærkamp mellem OB's Steffen Højer og Rasmus Würtz fra AaB. Skuldrene på OB-spilleren er langt fra hans fødder, men føddernes placering giver alligevel god indikation på, om han afleverer bolden. Kilde: [AaB-Online].

oner, hvor linjedommeren alligevel ville være i tvivl, og her skal dommeren afgøre situationen ud fra, hvad han selv har set.

Som udgangspunkt kan det antages, at et ben skal være indenfor 50 cm afstand af bolden i (x, y)-planet for at spilleren kan sparke til den. Dette skyldes fodens position i forhold til placeringen af radiosenderen midt på skinnebenet, jf. afsnit 4.2. Indeholdt i de 50 cm er 11 cm, som svarer til boldens radius [Fodboldloven, s. 13], fordi positioneringssystemet angiver positionen for boldens centrum. Er der mere end ét ben i nærheden af bolden, kan ODA vælge mellem at angive en tvivl ved at markere spillere i offsideposition til begge linjedommere eller at foretage yderligere beregninger baseret på eksempelvis benenes retning og bolden højde. For implementationsdetaljer henvises til kapitel 6.

4.4.2. *Hovedstødsduel*

I dette afsnit undersøges det, hvordan hovedet er placeret i forhold til benene, når fodboldspillere deltager i hovedstødsdueller. Hovedstødsdueller hører til den anden kategori af nærkampe, hvor bolden befinder sig i luften og forsøges spillet med hovedet, og for at kunne identificere den afleverende spiller er det derfor interessant, hvor langt væk, hovedet kan være fra benene.

Oftest kommer spillerne løbende fra hver sin side og hopper op for at møde bolden så tidligt som muligt. Den indledende afstand mellem spillerne gør, at det i modsætning til den første kategori af nærkampe har været muligt at optage scenarier brugbare til analyse.

Ligesom ved regulære nærkampe handler hovedstødsdueller om at identificere den afleverende spiller. En spiller vil ikke have nogen fordel af at gå op i en hovedstødsduel på afleveringstidspunktet, da bolden vil være så længe undervejs, at han alligevel vil have nået jorden inden den når frem.

I løbet af et hovedstød vil man gennemføre fire faser. Et tilløb efterfølges af afsættet til selve springet, og herefter befinder man sig i luften, indtil man lander på jorden igen. Kun tiden i luften er interessant, idet det ikke vil være muligt at vinde en hovedstødsduel uden at hoppe, medmindre der ikke er modspillere i nærheden. I så fald kan det næppe kaldes en duel, og eftersom der ikke er andre spillere i nærheden af bolden, giver det sig selv, hvem der afleverede.

For at kunne genvinde balancen, når man lander på jorden igen, er det nødvendigt at forblive oprejst gennem hele springet. Derfor foregår analysen af overkroppens placering i forhold til skinnebenene på den måde, at afstanden i (x, y)-planet mellem et ben og den tilhørende skulder måles. I de optagede scenarier findes 14 spillere, der hopper med det formål at støde til bolden med hovedet, og i disse 14 hovedstødsforsøg måles kun afstanden i intervallet fra spilleren sætter af for at hoppe til det øjeblik, spilleren igen lander på jorden. Dette tidsinterval varierer mellem $\frac{1}{2}$ og $1\frac{1}{2}$ sekund, og for hver frame i intervallet måles altså afstanden fra venstre ben til venstre skulder henholdsvis højre ben til højre skulder, når disse data eksisterer.

Målingerne viser, at (x, y)-afstanden fra markøren på spillerens ben til markøren på skulderen i samme side gennemsnitligt er på 23,7 cm, med en standardafvigelse på 14,7 cm.

Af balancemæssige hensyn spredes benene ofte ud til siderne som illustreret i Figur 38. Det betyder, at overkroppen og dermed skuldrene befinder sig imellem benene frem for at være foran benene som det forholder sig ved almindeligt løb.

Derfor giver skinnebenenes placering i lige så høj grad som skuldrenes placering indikationer på, hvor spilleren befinder sig.

Hvis retningen på hoppet tages med i betragtning som det er tilfældet for almindeligt løb, opnås en gennemsnitlig afstand på -5,7 cm og en standardafvigelse på 17,8 cm. Skuldrende befinder sig altså i gennemsnit knap 6 cm bagved skinnebenenes gennemsnitsplacering i forhold til løberetningen. Når der sættes af på ét ben, svinges det andet ben fremad og opad for at få så stor kraft som muligt i afsættet, jf. Figur 38, og det er derfor overkroppen findes bag benenes middelpacering. En stor del af standardafvigelsen kan tilskrives, at man kommer løbende fra siden i forhold til boldens retning, og derfor hopper skævt op i forhold til løberetningen for at vende rigtigt i forhold til bolden. Hovedstød er lettest at styre, hvis man har front mod bolden.

Med hensyn til hovedstødsdueller ser det altså ud til, at skinnebenenes koordinater er tilstrækkeligt til med rimelig sikkerhed at kunne afgøre, hvem der afleverede bolden. Som ved nærkampe kan en tvivl angives, hvis mere end én spiller har et skinneben indenfor 50 cm radius af boldens centrum i (x, y)-planet fra bolden på afleveringstidspunktet.



Figur 38 – Hovedstødsduel mellem AaB's Kasper Risgård (tv) og Esbjergs Frank Hansen, der lige er landet efter duellen. Kilde: [AaB-Online].

4.5. Specialtilfælde

Der findes enkelte specialtilfælde, som ikke er dækket af optagelserne foretaget med systemet fra Qualisys, fordi de er meget sjældent forekommende i praksis. Tilfældene dækker over situationer, som ikke indgår i ovennævnte kategorier, og hvor fødderne kan være langt fra hovedet i (x, y)-planet.

En situation, som ikke kan fanges ved kun at positionere spillernes fødder, er en liggende spiller. Selvom fødderne befinder sig på den rigtige side af offsidegrænsen, kan resten af kroppen være på den forkerte side af grænsen – fjerneste punkt kan være næsten to meter længere fremme for meget høje spillere. Selvom spilleren ligger ned på afleveringstidspunktet, kan han godt deltage aktivt i spillet ved at genere en modspiller eller ved at blive ramt af bolden.

Det mest oplagte scenario vil nok være, hvis angriberen ender med at ligge på jorden efter en duel i straffesparksfeltet, hvorefter en medspiller sparker på mål og enten rammer den liggende spiller eller får sit forsøg blokeret og den liggende spiller får muligheden for at prikke bolden ind i målet.

For at dette scenario kan give anledning til en fejlkendelse, kræver det at den liggende spiller har fødderne på den rigtige side af offsidegrænsen og hovedet på den forkerte side. Hvis det antages at radiosenderen sidder helt nede ved anklen (i Cairos' system

sidder den midt på skinnebenet) og spilleren er 1,90 meter høj, vil toppen af hovedet kunne befinde sig 180 cm tættere på mållinjen end spillerens fødder, men dette kræver, at spilleren ligger helt udstrakt og parallelt med sidelinjen. I praksis vil spilleren sjældent være helt udstrakt, idet han vil folde sig sammen for ikke at komme til skade i faldet, og samtidig vil han sjældent falde lige præcis parallelt med sidelinjen. Derfor vil forskellen på benene og toppen af hovedet nærmere være højst en meter.

For at skinnebenene skal være på den rigtige side af offsidegrænsen, skal der findes en forsvarsspiller med en radiosender, der er tættere på mållinjen end den liggende spillers radiosendere. Antages forsvarsspillerens radiosender ligeledes at sidde helt nede ved anklen, vil hans hæl være 9 cm længere tilbage, mens hans storetå er 19 cm længere fremme. Dermed kan en fejlkendelse altså højst forekomme indenfor et bælte på 90 cm.

Med tanke på, hvor sjældent situationen i sig selv sjældent forekommer og hvor lille spillerum der er for fejltagelser, kan dette specialtilfælde ignoreres. Skulle det vise sig at systemet laver fejlkendelser, kan fejlmargen i dette specialtilfælde formindskes betragteligt med en tredje radiosender placeret i nakken af spilletrøjen. Situationen er dog så usandsynlig, at det ikke vurderes til at være besværet værd at tilføje radiosender nummer tre.

Det forsvarende holds spillere har modsat det angribende holds altid indflydelse på spillet. En forsvarsspiller, der ligger med hovedet ned mod eget mål, vil derfor flytte offsidegrænsen op mod en meter tættere på mållinjen end det kan ses ud fra føddernes positioner. Problemet er lige så lille som for angriberne, og kan på tilsvarende måde løses med en radiosender i nakken.

Det ses ofte, at en angriber kaster sig frem i luften for at afslutte på mål med hovedet, og her vil resten af kroppen ikke kunne positioneres ud fra føddernes placering. Det betyder dog ikke noget, idet han aldrig vil være i luften på afleveringstidspunktet, for så vil han lande inden bolden kan nå frem til ham. Situationen kan til gengæld blive til en aflevering, hvis hovedstødet reddes af målmanden eller rammer stolpen. Her kan det måske være svært at se, hvem der har afsluttet, og dermed om hans medspillere kan opnå fordel af en eventuel offsideposition ved at afslutte på riposten.

På samme måde kan bolden ramme en spiller, der ikke har nået at rejse sig efter en glidende tackling, men det vil sjældent føre til en afgørende aflevering, fordi det er tilfældigt, hvor bolden ryger hen. For at der skal være tvivl om den afleverende spiller skal der endvidere være en modspiller tæt på den liggende spiller, så også her vurderes situationen til at være usandsynlig, mens problemet kan løses med en tredje radiosender.

Sidste specialtilfælde foregår i hovedstødsdueller, hvor den ene spiller får hovedet ind foran den anden spillers skulder. Dermed kan han røre bolden, selvom den anden spillers fødder er tættere på bolden i (x, y)-planet. Oftest vil der blive dømt frispark i sådan en situation, men der sker af og til, at dommeren lader spillet fortsætte. Situationen vil ikke forekomme på offsidegrænsen, men har i stedet forbindelse til den afleverende spiller.

4.6. Delkonklusion

I dette kapitel er der blevet gjort et forsøg på at finde frem til en metode til at udregne omridset af en fodboldspiller gennem forskellige bevægelser i en fodboldkamp. Med dette omrids ville man kunne beregne sig frem til punktet nærmest mållinjen og dermed afgøre offsidegrænsen og se, hvilke spillere, der er i offsideposition. Samtidig har et omrids af spilleren betydning for, hvor nøjagtigt afleveringens kilde kan fastslås.

Dataene til analysen er skabt med udstyr fra Qualisys, som desværre har vist sig at være uegnet til brug på almindeligt halgulv som det i AaB-hallen, der blev brugt for at kunne få medier på eliteplan til at deltage. Dette er skyld i store unøjagtigheder i de optagede positioneringsdata, som der kun delvist kan rettes op på gennem dataudglatning.

Alligevel er det lykkedes at finde sammenhænge i optagelserne med almindeligt løb, som har givet indikation om, at det er muligt ud fra positionerne på skinnebenene at beregne sig frem til skuldrenes placering. Sammenhængene har kunnet verificeres ved hjælp af ekstra og mindre realistiske testdata, hvorfor skuldrene ved almindeligt løb ser ud til at kunne positioneres gennemsnitligt under 11 cm forkert. Ved at gennemføre yderligere analyse formodes det at dette tal kan nedbringes væsentligt.

Ud fra skuldrenes placering er spillerens forreste punkt i løberetningen – hovedet – blevet påvist at kunne bestemmes med 5 cm nøjagtighed, som lagt sammen med usikkerheden i skuldrenes placering giver en usikkerhed på 16 cm for spillerens forreste punkt. For spillerens bageste punkt – hælen på bageste fod i løberetningen – er der blevet vist en usikkerhed på 10 cm i positioneringen.

For to spillere, der begge løber imod målet, kan forreste punkt for begge spilleres vedkommende fastslås med 16 cm nøjagtighed, hvilket giver en samlet unøjagtighed på 32 cm, hvilket overskrider de 30 cm tilladte unøjagtighed fra afsnit 3.1.2 en anelse. Løber spillerne derimod hver sin vej, er den samlede usikkerhed kun på $16 + 10 = 26$ cm, mens to spillere, der løber væk fra målet, kan fastslås med en samlet usikkerhed på $10 + 10 = 20$ cm. Kun når spillerne begge løber mod målet overskrides den tilladte usikkerhed altså, og det anses som sandsynligt at denne usikkerhed kan nedbringes ved videre bevægelsesanalyse. Blot 1 cm forbedring i nøjagtigheden af skulderpositionerne vil dermed bringe usikkerheden ned under den tilladte grænse, så der er tegn i sol og måne på, at spillerens omrids kan udledes af føddernes positioner og deraf afledte data.

En større nøjagtighed kan opnås ved at placere en tredje radiosender i nakken af spillerens trøje, da hans skulderposition så kan fastlægges med 4,6 cm nøjagtighed ved almindeligt løb, hvilket bringer usikkerheden om spillerens forreste punkt i løberetning ned på under 10 cm. Spillerens bageste punkt i løberetningen kan ligeledes positioneres mere præcist – mere nøjagtigt med 5 cm præcision – hvis radiosenderen placeres helt nede ved anklen frem for midt på skinnebenene, hvilket alene kan bringe usikkerheden ned i det tilladte område.

Der er stadig meget arbejde at gøre med hensyn til at bestemme skuldrenes placering ved almindeligt løb, og derfor er analysen af skuldrenes placering i forhold til skinnebenene ved retningsskift og acceleration også fremlagt som fremtidigt arbejde. Dermed er der heller ikke gjort nogen anstrengelser for at finde frem til en metode, hvormed de tre typer bevægelser kan skelnes fra hinanden ud fra skinnebenenes positioner og historiske positioner.

Disse betragtninger gælder for spillere nær offsidegrænsen, men det ser også ud til, at positioneringsdata om skinnebenenes placering er tilstrækkeligt til at identificere den afleverende spiller. Både i nærkampe og hovedstødsdueller skal en spiller have en skinneben indenfor 50 cm radius af boldens centrum i (x, y)-planet for at kunne nå bolden, og dermed vil der sjældent være tvivl, om afleveringen kommer fra en spiller på den ene eller det andet hold. En tvivl kan videregives til dommertrioen, eller vil kunne afklares med en nærmere beregning af spillerens omrids kombineret med boldens og skinnebenenes z-koordinat.

I enkelte tilfælde vil det være en fordel med en tredje radiosender til at give positionen på nakken af spilletrøjen, men det anses for unødvendigt, da disse tilfælde er meget sjældent forekommende. Desuden vil det føre til øgede omkostninger for drift af systemet, ligesom det bliver lidt mindre gnidningsfrit at bruge systemet, da trøjerne af og til går i stykker og skal skiftes ud eller bliver så våde, at de bliver skiftet i pausen. Som sagt burde det heller ikke være nødvendigt med en tredje radiosender, og derfor konkluderes det ud fra analysen, at det er sandsynligt, at positioneringsdata om spillernes skinneben – eller allerhelst anklerne – er nok til at danne et tilstrækkeligt præcist omrids af spillerne.

5. Detektering af afleveringer

5.1. Klassificering af afleveringer	54
5.2. Bestemmelse af afleveringstidspunkt	57
5.3. Opnåelig præcision	58
5.4. Delkonklusion	62

I dette kapitel analyseres de begivenheder, der kan få bolden til at ændre fart eller retning, med henblik på at kunne detektere afleveringer uden at ikke-afleveringer tolkes som afleveringer, jf. Krav4. Boldens opførsel ved et spark undersøges for at kunne fastslå det nøjagtige afleveringstidspunkt, og endelig vurderes den praktisk opnåelige præcision i afleveringsdetekteringen under hensyntagen til diskretisering i boldens positionering.

Boldens bevægelser kan ikke på samme måde som spillernes bevægelser (kapitel 4) analyseres med positioneringsdata fra Qualisys-optagelserne. For at kunne detektere en aflevering er det nemlig nødvendigt at kigge på boldens fart og retning, og på grund af unøjagtigheder i Qualisys-optagelserne (se appendiks D.1) kan der komme pludselige retningsskift uden at en spiller har rørt bolden. Analysen i kapitlet er derfor fortrinsvis af teoretisk karakter.

5.1. Klassificering af afleveringer

Afleveringer – dvs. boldberøringer – kan detekteres ud fra boldens position ved at holde øje med, hvornår den skifter fart og retning. I dette afsnit beskrives de hændelser, der kan få bolden til at skifte fart eller retning, og det vurderes, om det er muligt for et computersystem korrekt at inddele disse hændelser i de to kategorier afleveringer og ikke-afleveringer.

En spiller kan selvfølgelig få bolden til at skifte fart eller retning, men retningsskift kan også forekomme i virkeligheden, idet bolden kan skrue, ramme en knold på banen eller blive grebet af vinden. Yderligere ser man ofte, at bolden 'brækker' i luften ved pludselig at skifte retning, hvilket sker ved bestemte hastigheder og skyldes en kombination af luftmodstand og mikroturbulens forårsaget af boldens rotation om sin egen akse [Wesson, s. 51-56].

Mens retningsskift i (x, y)-planet er forholdsvis lette at finde frem til, kan (x, z)-retningsskift være mere komplicerede, fordi bolden ikke naturligt vil følge en lige bane. Havde der ikke været nogen luftmodstand, ville bolden have en bane, der ville se ud som en parabel [Wesson, s. 46], hvilket naturligvis er grundet tyngdekraften. Boldens (x, z)-retning ændrer sig dermed hele tiden, og kun når den over en kort distance ændrer sig mere end en vis grænse, kan det tolkes som en boldberøring.

Krav4 og afsnit 3.1.3 forklarede vigtigheden af at kunne detektere afleveringer korrekt, og det betyder, at de begivenheder, hvor bolden ikke røres af en spiller, skal kunne sorteres fra. Til det formål beskriver Tabel 4 alle de måder, hvormed bolden kan skifte fart og retning, og hvorvidt retningsskiftet eller fartændringen skal tolkes som en aflevering. Ved at karakterisere kendetegnene ved bolden er det lettere at vurdere, om det er muligt at detektere afleveringer tilstrækkeligt korrekt.

Aflevering	Begivenhed	ACC	DEC	(x, y)	(x, z)
	Bolden kastes/trilles hen til det sted, et frispark skal tages	x		x	x
	Målspark/indkast/hjørnespark	x			
x	Bolden sættes i gang ved frispark	x			
x	Bolden spilles med foden	x		x	x
x	Skud på mål	x		x	x

x	En spiller rammes af bolden			x	x
x	Bolden heades videre	(x)		(x)	x
x	Et skud rettes af/snittes			x	(x)
(x)	En spiller dribler med bolden	x		x	(x)
x	To spillere tackler hinanden	x		x	x
x	Bolden spilles med brystet		x	x	x
(x)	Bolden tæmmes		x	x	x
(x)	Målmanden griber bolden		x		
x	Målmanden kaster bolden ud	x		x	x
x	Målmanden bokser bolden væk			x	x
(x)	Målmanden redder et skud		x	x	x
	Bolden rammer jorden/hopper på jorden		x		x
	Bolden rammer en knold på banen		x	x	x
	Bolden skruer			x	
	Bolden brækker i luften			x	
	Vindstød tager fat i bolden	(x)	(x)	(x)	
	Bolden rammer stolpen			x	x
	Bolden rammer dommeren			x	x

Tabel 4 – Begivenheder, som muligvis kan tolkes som boldberøringer. 3.-6. kolonne viser, om bolden accelererer, decelererer, skifter retning i (x, y)-plan og skifter retning i (x, z)-plan. I (x, z)-planet opfattes retningsskift som en afvigelse fra den parabel, boldens bane normalt vil følge. Afleveringer markeret med (x) er i princippet at regne for afleveringer, men kan sorteres fra for ikke at overbebyrde linjedommeren.

I dette afsnit vurderes det kun, om det er muligt at detektere afleveringer ud fra boldens position. At identificere den afleverende spiller er ikke en del af denne analyse, og er som beskrevet i afsnit 3.1.4 ikke essentielt for, om et computersystem til offside-detektering vil være en hjælp for linjedommeren. Samtidig tages der ikke stilling til, om det er muligt at sortere eksempelvis driblinger fra, så linjedommeren får så få tilkendegivelser fra systemet som muligt.

Acceleration og retningsskift som indikatorer

Som det ses i tabellen, vil en acceleration af bolden stort set altid indikere en aflevering. De to første linjer er undtagelser herfra, men begge forekommer i forbindelse med spil-stop, hvorfor linjedommeren vil have let ved at ignorere meldinger om spillere i mulig strafbar offsideposition. Muligvis kan bolden også accelereres af et vindstød, men denne acceleration vil i så fald ske ganske langsomt, og en grænseværdi for minimumsacceleration kan forhindre begivenheden i at blive tolket som en boldberøring.

Når det regner hører man ofte om, at bolden kan få ekstra fart, når den rammer jorden, hvilket kan give uforudsigelige situationer og snyde målmanden. [Wesson, s. 13] forklarer imidlertid fænomenet med, at bolden mister mindre fart end normalt, hvorfor bolden opfattes til at være hurtigere. Bolden kan kun accelerere i et helt specielt tilfælde, nemlig når den rammer overliggeren med høj fart og dermed får så meget spin, at den springer langt, når den rammer jorden⁵. Man kan overbevise sig om fænomenet hjemme i stuen ved først at lade en bold falde til jorden normalt og herefter prøve at gøre det samme med spin i bolden. Også i denne situation vil det være åbenlyst for linjedommeren, at der ikke er forekommet en aflevering.

Deceleration kan i modsætning til acceleration ikke rigtigt bruges som indikation på, at bolden er blevet afleveret. Bolden mister fart når den rammer jorden og som følge af

⁵ For at bolden kan få ekstra fart, skal den have topspin med større hastighed end boldens horisontale hastighed plus den fart, bolden mister ved at ramme jorden [Wesson, s. 14]. Det er så godt som umuligt at sparke til en fodbold, så den får nævneværdigt topspin. På en god græsbane mister bolden omkring 50 % af sin horisontale fart, når den hopper [Wesson, s. 148], så der skal meget spin til, før bolden accelererer.

luftmodstand, og herudover er det oftest som følge af tæmning eller når målmanden har bolden, at bolden decelererer. Herudover vil afleveringer med brystet kunne decelerere bolden, men her er der også retningsskift at gå ud fra.

Retningsskift i de to retninger vil sammen med acceleration være nok til at detektere en mulig aflevering, men tabellens nederste syv begivenheder skal trods disse karakteristika ikke tolkes som afleveringer. Når bolden rammer jorden eller en knold på banen, vil z-værdien på centrum af bolden være under 15 cm, idet bolden skal have en omkreds på 68-70 cm [Fodboldloven, s. 13], hvilket giver en radius på cirka 11,1 cm. Gabet mellem 11,1 og 15 cm giver plads til mindre ujævnheder i banen og tillader også, at banen ikke er 100 % plan.

Spillere i nærheden

Den lave højde betyder dog ikke, at alle ændringer i boldens bane i den højde skal sorteres fra, for en stor del af afleveringerne foregår rent faktisk ved jorden. Derfor bliver man også nødt til at kigge på, om der er en spiller i nærheden af bolden, når den skifter retning. Er der ikke det, kan det ikke være en aflevering, men hvis der er, kan det ikke afvises, at der har fundet en aflevering sted.

Bolden kan godt ramme jorden i nærheden af en spiller uden at han rører den, men i så fald er der grænser for, hvor meget bolden kan skifte retning. Store retningsskift vil skyldes berøring fra en spiller, mens mindre ændringer er mere usikre. Her vil det være fornuftigt at give linjedommeren besked, hvis der er angribere i fare for at være strafbart offside, for dommeren kan altid vælge at ignorere linjedommerens markering, hvis han har set situationen bedre.

Når bolden skruer, brækker i luften eller gribes af et vindstød, vil retningsskiftet foregå ganske langsomt. Måles retningsskift derfor over en kort periode, vil ændringen være meget lille i den periode. En grænseværdi kan igen løse problemet, men risikoen er som sædvanligt, at meget lette boldberøringer kan risikere at blive ignoreret. Ligesom ved bolde i jordhøjde kan man drage fordel af, om der er spillere i nærheden af bolden, og så vil langt de fleste situationer være dækket. Tvivl bør stadig rapporteres til linjedommeren, så dommeren kan træffe den endelige beslutning.

Retningsskift forårsaget af rekvisitter

Dermed er der to begivenheder tilbage: når bolden rammer stolpen og når den rammer dommeren. Målets størrelse er 7,32 x 2,44 m målt på den indvendige side af stolperne [Fodboldloven, s. 9], så det skulle være enkelt at beregne sig frem til, om bolden har ramt en stolpe eller overliggeren.

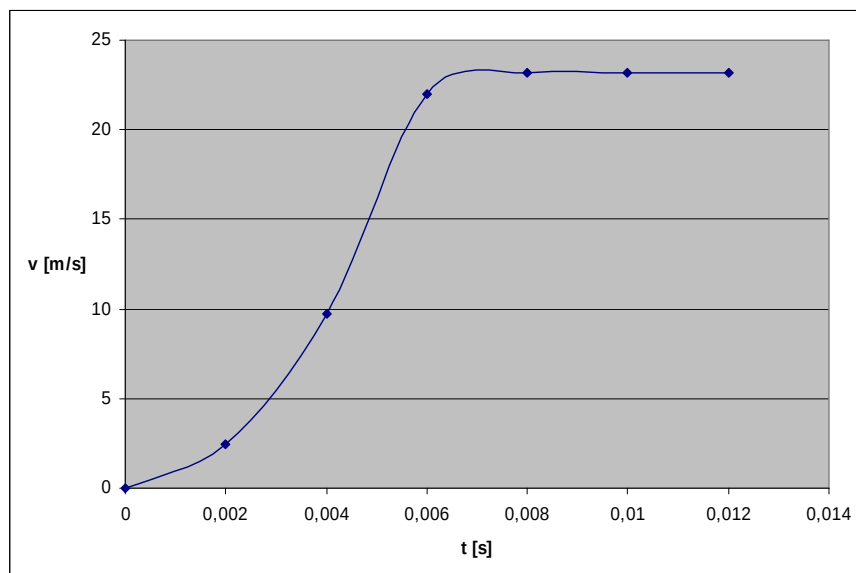
Dommeren vil det meste af tiden befinde sig med en vis afstand til den nærmeste spiller, så oftest vil der ikke være en spiller i nærheden, når bolden skifter retning, og det vil ikke blive opfattet som en aflevering. Topdommere er i øvrigt gode til at undgå at stå i vejen for spillet, så situationen er sjældent forekommende. Viser det sig at systemet fejler, når dommeren står tæt på spillerne og rammes af bolden, kan problemet løses ved at placere radiosendere på dommeren, så også hans position er kendt af systemet.

Det vurderes, at det med tilstrækkelig præcision vil være muligt at detektere afleveringer, hvis og kun hvis de er forekommet i virkeligheden. Til formålet gøres brug af enkelte grænseværdier, som vil skulle finjusteres for at opnå den bedst mulige korrekthed. Se afsnit 5.3 for en teoretisk vurdering af grænseværdierne. I sjældne tilfælde kan der opstå tvivl om, hvorvidt bolden er rørt af en spiller, og her vil det være fornuftigt at give linjedommeren besked, så dommeren i sidste ende kan træffe beslutningen ud fra sin egen oplevelse af situationen. Tvivlstilfældene vil være i situationer med retningsændringer så små, at de dårligt kan opfattes af det menneskelige øje.

5.2. Bestemmelse af afleveringstidspunkt

I [Larsen & Hansen, s. 38] analyseres en videosekvens af et spark til en bold, der ligger stille på jorden [Asai]. Sekvensen er optaget med 4500 billeder pr. sekund, og ud fra billederne er det bestemt, hvor langt bolden har flyttet sig på bestemte tidspunkter. Disse data ligger til grund for Figur 39, som viser boldens hastighed som en funktion af tiden efter der er sparket til bolden.

Figur 39 viser, at der de første to millisekunder efter at kontakten mellem bold og støvle er opstået kun tilføres en smule fart. Dette begrundes med at bolden deformeres i dette tidsrum. Efter de to millisekunder stiger hastigheden indtil der er gået lidt over seks millisekunder, hvorefter den holder samme fart resten af tiden.

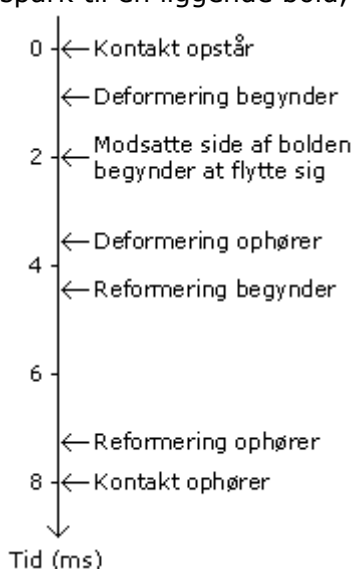


Figur 39 – Hastighedsfunktion for spark til en liggende bold. Kilde: [Larsen & Hansen, s. 39].

Tallene stemmer ikke overens med [Wesson, s. 9], hvor det fremgår, at bolden bruger lige så lang tid på at

deformere som på at genvinde sin form, og at den maksimale deformation finder sted midt imellem de tidspunkter, hvor kontakten opstår henholdsvis ophører. Disse tal er baseret på en bold der hopper på jorden og derfor er i fart, og derfor kan tallene ikke overføres direkte. Skulle resultaterne fra [Wesson, s.9] kunne føres direkte over på et spark til en liggende bold, ville bolden således ikke flytte sig før midtvejs i sparket. Dette

formodes dog ikke helt at være tilfældet, idet foden føres 'igennem' bolden ved et spark, hvilket er årsagen til at der tilføres fart.



Figur 40 – Tidslinje med begivenheder fra foden og bolden får kontakt indtil kontakten ophører.

Formodningen viser sig ikke at holde stik, da den maksimale deformation også ved et spark ligger midt imellem kontakten opstår og ophører. Ved at studere billederne fra [Asai] nærmere fås den tidslinje, der vises i Figur 40. I den optagede sekvens er der kontakt mellem bold og støvle i 36 frames (fra frame -674 til frame -638), hvilket svarer til 8 millisekunder, da sekvensen er optaget med 4500 Hz.

Deformeringen af bolden starter efter at der har været kontakt i 4 frames, hvorefter der går 5 frames inden den modsatte side af bolden begynder at bevæge sig. Deformeringen fortsætter dog i endnu 7 frames, og herefter kan der i de næste 4 frames ikke ses nogen forskel på bolden, før den begynder at rette sig ud, hvilket varer 7 frames. I 4 frames herefter er der endnu kontakt mellem bold og støvle.

Det er altså først efter 2 millisekunder (9 frames) at bolden begynder at flytte sig, og i de næste 2 millisekunder deformeres bolden. Tallene fra [Larsen & Hansen, s. 38] ser altså

ud til at være forskudt med 2 millisekunder, hvilket passer med at der i Figur 39 efter 6 millisekunder ikke længere tilføres fart. Reelt opstår kontakten altså 2 ms før det i Figur 39 angivne, hvorfor bolden først efter 8 ms ikke længere tilføres fart.

Hvorfor der i billederne fra [Atai] kun er kontakt i 8 millisekunder må bero på statistiske tilfældigheder, idet [Wesson, s. 19] nævner en kontakttid på ca. en hundrededel sekund, mens [Tol et al.] refererer til 10,7 millisekunder som den gennemsnitlige kontakttid ved et spark til en fodbold, der ligger stille.

Konklusionen er, at der går cirka 2 millisekunder inden bolden så småt begynder at accelerere, og at bolden først midtvejs i kontakttiden begynder at accelerere kraftigt. Ved at indsætte en grænseværdi for, hvor stor accelerationen skal være for at det kan tolkes som en aflevering, vil afleveringen derfor kunne detekteres 2-5 millisekunder efter afleveringsøjeblikket. Hvornår i dette interval afleveringen detekteres er afgjort af, hvor kraftig boldens acceleration er.

Kontakttiden antages at være den samme uanset om bolden ligger stille eller allerede er i fart.

Ved retningsskift antages samme karakteristika at gælde, således at bolden midtvejs i retningsskiftet, dvs. når bolden begynder at rette sig ud, påbegynder sit retningsskift. Først herefter kan retningsskiftet detekteres, og hvornår dette sker, afhænger af vinklen på retningsskiftet sammenholdt med grænseværdien for, hvornår et retningsskift tolkes som en mulig aflevering.

5.3. Opnåelig præcision

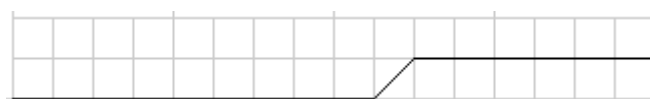
I dette afsnit gøres et forsøg på at opsætte teoretiske grænseværdier for såvel acceleration som retningsskift. Der tages udgangspunkt i koordinatsystemet fra [Larsen & Hansen, s. 25], således at positioneringsdata er angivet i cm. At overføre kontinuerte positioner til et diskret domæne medfører visse vanskeligheder, som forklares igennem afsnittet, og stiller krav om at positioneringssystemet skal kunne levere data med koordinater af størrelsen 2 mm.

Falske retningsskift

For at forklare, hvorfor opløsningen på koordinatsystemet er et problem, kigges der først på retningsskift, som er lidt lettere at forholde sig til ud fra figurer. Figur 41 viser boldens bane som den reelt er, med en vinkel på ca. $5,7^\circ$, mens Figur 42 viser boldens bane som den opfattes, når positionerne skal tilnærmes hele cm. Efter ti cm overskrider bolden grænsen til det næste koordinat, og der vil opstå to pludselige knæk i boldens opfattede retning, hver med en vinkel på 45° . Tilnærmelsen til cm medfører altså at bolden opfattes til at have skiftet retning, selvom den reelt har fulgt den samme bane hele tiden.



Figur 41 – Boldens reelle bane følger en ret linje.



Figur 42 – Når der regnes i hele cm opfattes boldens bane til at have to knæk.

Ovenstående forklaring er lavet under den antagelse, at boldens position samples hver gang den har flyttet sig en cm i x-retningen. Samples der kun halvt så tit, opleves retningsskiftet ikke til at være så kraftigt, hvilket kan ses i Figur 43, hvor de opfattede retningsskift nu er ca. 27° . Reduceres samplingsfrekvensen til en tiendedel, vil boldens retning i eksemplet opfattes korrekt, men det-



Figur 43 – Ved halvt så stor samplingsfrekvens er de to opfattede knæk mindre.

te ville ikke gælde for en bold med en anden retning.

Ved halvt så stor samplingsfrekvens vil bolden flytte sig dobbelt så langt mellem to samples. Det samme kan opnås ved at fastholde samme samplingsfrekvens, hvis bolden bevæger sig dobbelt så hurtigt. Boldens fart er altså i lige så høj grad som samplingsfrekvensen afgørende for, hvor store retningskift, bolden opfattes at have.

Samme opfattede retning kan opnås ved at aflede retningen ikke ud fra nuværende og foregående sample, men ud fra nuværende sample og samplingen to tidsenheder før. Figur 44 viser resultatet af denne metode. Læg mærke til, at figuren ikke viser boldens position men dens retning. Således er boldens opfattede bane opnået ved at sætte de opfattede baner for hver enkelt centimeter sammen efter hinanden, hvilket forklarer den umulige position efter ni centimeter i figuren.



Figur 44 – Udregnes retningen ud fra historiske data opnås mindre retningskift ligesom ved lavere samplingsfrekvens. Figuren viser boldens opfattede retning snarere end dens opfattede position.

Både i Figur 42, Figur 43 og Figur 44 opfattes det falske retningskift ved samplen ved ti centimeter, men størrelsen af retningskiftet er i de to sidstnævnte figurer mindre. Dette har betydning for, hvor lille grænseværdien kan sættes til at være uden at der opdages retningskift, som ikke findes i virkeligheden. En for stor grænseværdi vil medføre at reelle retningskift overses.

Boldens hastighed

I dette speciale antages positioneringssystemet at kunne levere positioneringsdata med en frekvens på 1000 Hz, og det er derfor interessant, hvor hurtigt bolden bevæger sig i en fodboldkamp. Ved hastigheder på 5 km/t henholdsvis 150 km/t kan bolden tilbagelægge en distance på 0,14 cm henholdsvis 4,17 cm [Larsen & Hansen, s. 37].

Disse tal er ekstremer, idet en bold med 5 km/t ikke vil trille ret langt inden den standser, mens ikke engang spillerne med de hårdeste skud kan sende en bold af sted med 150 km/t, hvis man ellers kan stole på de tal, der af og til nævnes i tv-transmitterede kampe.

Boldens fart fra scenarierne optaget med systemet fra Qualisys giver et mere reelt billede af, hvilken hastighed bolden kan antages at have. Optagelserne er lavet på et lille område og svarer derfor til meget snævert spil i virkelighedens fodbold, og derfor antages tallene at passe med de blødeste afleveringer, mens farten for afleveringer over en længere distance naturligvis vil være større.

En gennemgang af Qualisys-optagelserne foretaget med Qualisys Track Manager's analyseværktøj viser boldhastigheder på ca. 3-11 m/s svarende til ca. 10-40 km/t. Ved korte afleveringer på et lille område antages bolden derfor at flytte sig mellem 0,28 og 1,12 cm hvert millisekund.

Grænseværdi for retningskift

Figur 41 er et grelt eksempel på en bolds bane, idet y-koordinaten kun skifter hver tiende gang x-koordinaten skifter. Det formodes at være usandsynligt at bolden spilles nøjagtigt langs med en af de to akser, og vinklen på $5,7^\circ$ betragtes derfor som et grænsetilfælde. En bold trillende i denne retning med 10 km/t vil skifte y-koordinat for hvert 36 ms (36 samples), da den flytter sig 0,28 cm i x-retningen mellem hvert sample og kun 0,28 mm i y-retningen.

Som vi lige har set, vil y-positionsændringen medføre et opfattet retningskift på 45° , og vil derfor opfattes som en mulig aflevering, hvis ikke der opsættes en grænseværdi. En grænseværdi på 45° medfører at mange afleveringer ikke vil blive detekteret, så for at nedbringe grænseværdien kan retningen i stedet udregnes på baggrund af den nuværen-

de position og positionen 10 ms tidligere. I dette tidsrum har bolden flyttet sig $2,8 \text{ cm} \approx 3 \text{ cm}$ i x-retningen og $0,28 \text{ cm} \approx 1 \text{ cm}$ i y-retningen, hvilket giver en retningsændring på $18,4^\circ$ i forhold til vinklen på 0° i den forrige sample.

Denne vinkel kan formindskes ved at kigge 25 ms bagud i stedet for 10. Nu har bolden flyttet sig 7 cm i x-retningen og $0,7 \text{ cm} \approx 1 \text{ cm}$ i y-retningen, og retningsændringen er på $8,1^\circ$. Ved 50 ms kommer retningsændringen ned på $4,1^\circ$. Kigges der endnu længere tilbage, risikeres det at bolden i den mellemliggende periode kan have skiftet retning mere end én gang, hvilket ødelægger mulighederne for at detektere afleveringer korrekt. Tabel 5 opsummerer retningen for både langsomme og lidt hårdere afleveringer i forhold til afrunding og længden på den periode, som retningen udregnes over.

	10 km/t			40 km/t		
Antal ms	10	25	50	10	25	50
x-ændring	2,8 cm	7 cm	14 cm	11,2 cm	28 cm	56 cm
y-ændring	0,28 cm	0,7 cm	1,4 cm	1,12 cm	2,8 cm	5,6 cm
Retning afhængigt af afrunding af (x,y)	(2,0) = 0°	(7,0) = 0°	(14,1) = $4,1^\circ$	(11,1) = $5,2^\circ$	(28,2) = $4,1^\circ$	(56,5) = $5,1^\circ$
	(3,0) = 0°	(7,1) = $8,1^\circ$	(14,2) = $8,1^\circ$	(12,1) = $4,8^\circ$	(28,3) = $6,1^\circ$	(56,6) = $6,1^\circ$
	(2,1) = $26,6^\circ$			(11,2) = $10,3^\circ$		
	(3,1) = $18,4^\circ$			(12,2) = $9,5^\circ$		

Tabel 5 – Retning som funktion af fart, periode og afrunding. Boldens retning er reelt $5,7^\circ$.

Tallene i Tabel 5 skal ses i forhold til den reelle retning på $5,7^\circ$. Derfor kan grænseværdien sættes til $2,5^\circ$, hvis retningen udregnes på baggrund af den nuværende position og positionen 50 ms tidligere, uden at der detekteres falske afleveringer på baggrund af positioneringsdata. Ved endnu langsomme afleveringer bliver usikkerheden større, men ved at kigge på, hvor langt bolden kan nå, kan denne type afleveringer filtreres fra.

Som beskrevet i afsnit 5.2 antages bolden at skifte retning midtvejs i boldkontakten, altså ca. 5 ms efter kontakten mellem bold og støvle er opstået. Når kontakten ophører ca. 5 ms senere, vil bolden have opnået den retning, den herefter fortsætter med. Indenfor de sidste 5 ms af kontakttiden kan den mulige aflevering (bolden kan jo også bare have ramt en knold på banen) detekteres, hvis retningsændringen overstiger grænseværdien på $2,5^\circ$. Præcist hvornår den mulige aflevering detekteres, afhænger af størrelsen på retningsskiftet. Jo større ændringen er, jo før overskrides grænseværdien.

En grænseværdi på $2,5^\circ$ over 50 millisekunder betyder også, at skruende bolden og bolde, der brækker i luften, ikke vil kunne detekteres ved en fejl. I så fald skulle bolden i løbet af et sekund kunne ændre retning med over 50° , og det er ikke muligt.

Centimeter-koordinatsystem for upræcist

Ved at udregne retningen over 50 millisekunder opstår der det problem, at retningskift udglattes tilsvarende, så de opfattes at følge en bane, der minder om en hyperbel. Først 50 millisekunder efter et retningskift vil boldens bane opfattes til at have den retning, den i virkeligheden har, og ved små retningskift, som kun lige overskrider grænseværdien, kan afleveringen derfor risikere at blive opdaget meget sent.

Hvis bolden kommer trillende langs x-aksen med 1 cm pr. millisekund og herefter skifter retning og fart, så hvert skift i x-koordinat betyder skift i y-koordinat – et retningskift på 45° og en fartændring fra 10 m/s til $14,1 \text{ m/s}$ – vil den opfattede retning efter 3 millisekunder have oversteget $2,5^\circ$. Retningsskift ses ved at kigge på den nuværende retning i forhold til retningen 50 ms tidligere.

Et mindre retningskift på $5,7^\circ$ afstedkommer blot skift i y-koordinaten for hvert tiende skift i x-koordinaten, så her overskrides grænseværdien ikke, før der er gået 30 millisekunder. Indtil det 30. millisekund er y-koordinaten kun ændret med 2 cm , hvilket giver en opfattet retning på $2,3^\circ$, som altså er lavere end grænseværdien, idet den inverse

tangens til (2/50) er $2,3^\circ$. I det 30. millisekund opfattes retningsskiftet, idet den inverse tangens til (3/50) er $3,4^\circ$.

Retningsskiftet i vinklerne $5,7^\circ$ og 45° betyder altså en forskel i opdagelsen af afleveringstidspunktet på hele $30 - 3 = 27$ millisekunder, og i dette tidsrum kan spillere nå at flytte sig 19,2 cm [Maruenda], hvilket jf. afsnit 3.1.2 ikke er acceptabelt, specielt da boldens fart kan være endnu mindre end de 10 m/s, eksemplet er baseret på, hvilket giver større forsinkelse i detektering af afleveringer.

En nedsættelse af grænseværdien er ikke nogen løsning på problemet, da det ville medføre falske afleveringer, eksempelvis ved en fart på 10 km/t og retningen udregnet ud fra 50 ms data, som det kan ses i Tabel 5.

Koordinatstørrelse på 2 mm anvendeligt

I stedet kan en tilfredsstillende præcision af afleveringstidspunktet opnås ved at gå fra en opløsning i cm i positioneringen til en højere opløsning. Pakkeformatet i [Larsen & Hansen, s. 24], hvor der afsættes 2 bytes til både x-koordinat og y-koordinat, giver mulighed for at opdele banens længderetning i 65.536 koordinater. Da en fodboldbane maksimalt kan være 120 meter lang, vil koordinaterne kunne blive så små som $120.000/65.536 < 2$ mm.

Antallet af koordinatskift set over et tidsrum, når hvert koordinat svarer til 2 mm, er fem gange så stort som antallet af skift, når et koordinat svarer til 1 cm. Dermed kan der på 10 ms opdages lige så mange koordinatskift á 2 mm som der kan på 50 ms med koordinatskift á 1 cm, og dermed kan boldens retning fastslås med samme præcision i begge tilfælde. Forskellen er blot, at retningsskift opdages indenfor kortere tid, når retningen kun udglattes over 10 ms, som det er muligt med koordinater på 2 mm. Indenfor 10 ms vil et retningsskift på mindst $2,5^\circ$ altså kunne detekteres med koordinater på 2 mm.

En koordinatangivelse på mm-niveau stiller lidt højere krav til positioneringssystemet, men dette er altså nødvendigt for at kunne fastsætte afleveringstidspunktet nogenlunde præcist og samtidig fastsætte en tilpas lav grænseværdi for retningsskift.

Ved et spark begynder bolden først at flytte sig efter en fjerdedel af kontakttiden, så den mulige aflevering kan under ingen omstændigheder detekteres før der er gået 2 ms. Først halvvejs igennem kontakttiden begynder bolden at genvinde sin naturlige form og få tilført fart (det samme antages at gælde for retningsskift), så der går 5 ms inden fartændringen eller retningsskiftet begynder at kunne ses. Eftersom retningen udregnes over 10 ms, vil der efter retningsskiftets påbegyndelse gå 10 ms inden boldens nye retning kan opfattes helt. Ved små retningsskift tæt på grænseværdien kan den nye retning således risikere først at blive opfattet 15 ms efter at kontakten er opstået.

Et retningsskift vil altså blive opdaget et sted mellem 5 og 15 ms efter kontakten med bolden er opstået, så ved at antage at kontakten er opstået 10 ms før retningsændringen opdages vil der være 5 ms unøjagtighed i bestemmelsen af afleveringstidspunktet. I det tidsrum kan en normal fodboldspiller nå at flytte sig ca. 3,5 cm [Maruenda], som skal tages med i den samlede usikkerhed om spillernes positionering.

Når kontakten er ophørt, vil der gå 10 ms inden retningen har stabiliseret sig, således at den opfattede retning ikke beror på den tidligere retning. Til dette skal lægges de 5 ms usikkerhed om afleveringstidspunktet, så i 15 ms efter en detekteret aflevering bør algoritmen til afleveringsdetektering slås fra for ikke at opdage samme aflevering flere gange.

Vertikale retningsskift

På grund af tyngdekraften vil boldens (x, z)-retning se ud som en parabel [Wesson, s. 46], havde det ikke været for luftmodstanden, som bremser bolden undervejs. Derfor vil boldens hældning hele tiden blive mindre, hvis ikke den påvirkes af en ekstern kraft såsom jorden eller en fodboldspiller.

For at en aflevering udelukkende kan aflæses i (x, z) -retningen, må den være blevet headet videre som beskrevet i afsnit 3.3.3, hvorved hældningen på boldens retning stiger. Bolden ændrer (x, z) -retning hele tiden, mens den er i luften, men hældningen forøges kun, hvis den røres af en spiller eller hopper på jorden.

Denne type retningsskift kan detekteres på næsten samme måde som (x, y) -retningsskift, dvs. ved at detektere en forøgelse i hældningen på mindst $2,5^\circ$ over 10 ms. På samme måde formodes det, at den mulige aflevering detekteres efter 10 ms med en usikkerhed på 5 ms.

Grænseværdi for acceleration

I afsnit 5.1 argumenteres der for, at en acceleration af bolden altid skyldes en aflevering. Derfor kunne grænseværdien for acceleration i realiteten sættes til 0, så enhver acceleration på mere end 0 m/s^2 medførte detektering af en aflevering. Dog skal der tages højde for, at opløsningen i koordinater á 2 mm kan medføre en mindre acceleration på grund af diskretisering.

I Figur 42 på side 58 opfattes bolden til at følge en ret linje de første 9 cm, hvorefter der pludselig hoppes 1 cm både opad og henad i næste sample. Uden brug af historiske data vil farten i de første ni samples være 1 cm/ms , hvorefter den i tiende sample stiger til $(\sqrt{2}) \approx 1,41 \text{ cm/ms}$.

Set over 10 ms som ved retningsskift vil den opfattede hastighedsforøgelse for en bold med en fart på 10 km/t være meget lille. I løbet af de 10 ms ændrer bolden x -værdi 14 gange og y -værdi 1 eller 2 gange afhængigt af afrunding. Farten ved en y -ændring på 2 mm er $28,07 \text{ mm/ms}$, mens en ændring på 4 mm giver en fart på $28,28 \text{ mm/ms}$, og grænsen for hastighedsforøgelse behøver i dette tilfælde være blot $0,25 \text{ mm/ms}^2$ for at en aflevering ikke fejlagtigt opdages. På den måde antages afleveringen ligesom ved retningsskift at blive detekteret efter $10 \pm 5 \text{ ms}$ af kontakttiden.

5.4. Delkonklusion

Analysen af boldens bevægelser har vist at det kan lade sig gøre at detektere afleveringer, hvis bolden accelererer eller skifter retning. Accelerationen skal overskride $0,2 \text{ cm/ms}^2$ for at blive rubriceret som en mulig aflevering, mens et retningsskift kun vil blive opdaget, hvis vinklen er større end $2,5^\circ$ over 10 ms. Forudsætningen for disse tal er, at positioneringssystemet kan angive positioner i enheder á 2 mm. Er dette opfyldt, vil ændringen i boldens opførsel kunne detekteres ca. 10 ms efter at kontakten mellem bold og støvle (eller eksempelvis jord eller målstang) er opstået. Usikkerheden om det nøjagtige afleveringstidspunkt på 5 ms medfører, at spillere risikerer at blive positioneret 3,5 cm forkert.

Hvis to spillere løber i samme retning, vil usikkerheden i positioneringen ophæve hinanden, så kun når den ene spiller løber mod målet og den anden løber væk fra målet vil usikkerheden kunne give anledning til fejl. Sammenholdt med resultaterne fra kapitel 4 når den samlede usikkerhed for de to spillere op på 33 cm. Der er lidt mere end når spillerne begge løber mod målet, jf. afsnit 4.6, og altså en kende over det tilladte.

Ikke alle accelerationer eller retningsskift skyldes menneskelig påvirkning, så når en mulig aflevering er detekteret, skal det ud fra afstanden til jorden, nærmeste spiller eller målstang vurderes, om en spiller har rørt bolden. En lavere grænseværdi kan opnås ved at opløse fodboldbanen i koordinater mindre end 2 mm, men grænseværdien på $2,5^\circ$ sikrer under alle omstændigheder, at skruende bolde ikke fejlagtigt opfattes som afleveringer.

6. *OffsideDetekteringsAssistent*

6.1. Deployment, kommunikation og data	63
6.1.1. ScenarioSender	64
6.1.2. Visualizer	64
6.1.3. ODA	65
6.1.4. Kommunikationsprotokoller	65
6.1.5. Datamodel	65
6.2. Grundlæggende funktionalitet i ODA	67
6.3. Designbeslutninger	68
6.4. Filtermekanismen	69
6.4.1. Filtre	72
6.4.2. Positioneringsstrategier	74
6.4.3. Konfigurationer	74
6.5. Samtidighed	75
6.5.1. Trådinteraktion	76
6.5.2. DataThread	77
6.5.3. OffsideDetection	78
6.5.4. Synkronisering	79
6.5.5. Events	80
6.5.6. Timing	81

Dette kapitel er en beskrivelse af de udviklede prototyper til offside-detektering. Hovedvægten er lagt på den centrale komponent, ODA, da de øvrige prototyper er udviklet til testformål og i øvrigt er videreudviklinger af dem fra [Larsen & Hansen] og ikke er ændret grundlæggende.

Bortset fra afsnit 6.1, som beskriver det samlede system, omhandler alle afsnittene således ODA og dens opbygning. Der fokuseres mest på systemets design, idet systemkravene blev analyseret i afsnit 3.1. Efter en kort beskrivelse af ODA's grundlæggende funktionalitet i afsnit 6.2 gives i afsnit 6.3 et overblik over de designbeslutninger, der ligger til grund for delsystemets opbygning.

En vigtig del af designet er en filtermekanisme, der vedligeholder seks mængder af spillere, der kan have betydning for vurderingen af offside-situationer. Filtermekanismen beskrives i afsnit 6.4, hvorefter de samtidighedsspørgsmål, der opstår ved brug af tråde, afklares i kapitlets sidste afsnit (6.5).

6.1. Deployment, kommunikation og data

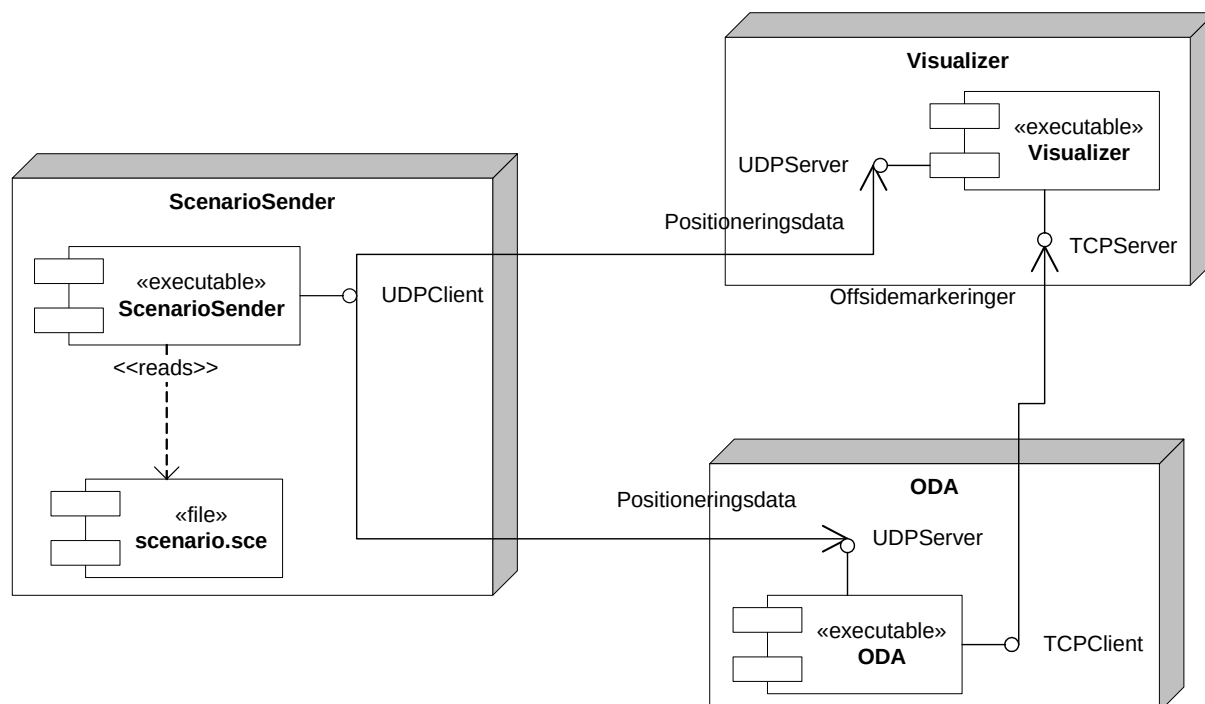
Dette afsnit beskriver sammenhængen mellem de delsystemer, det samlede run-time-system til testformål består af, hvordan kommunikationen mellem dem foregår samt hvilke dataformater, der benyttes.

Run-time består systemet af tre delsystemer, jf. Figur 45, som afvikles på hver sin standard-pc. ScenarioSender og ODA er realtidssystemer og afvikles derfor på et realtidsoperativsystem, nærmere bestemt RTOS-32 fra On Time [On Time], mens Visualizer er en C#-applikation, der er udviklet på Microsofts .Net-plattform.

Udover de tre eksekverbare komponenter findes der endnu en komponent: en datafil indeholdende positioneringsdata, som ScenarioSender har til opgave at sende ud på netværket. RTFiles, som er RTOS-32's komponent til filhåndtering, kræver et FAT-filsystem for at fungere, så dette er et yderligere krav til den pc, der afvikler ScenarioSender.

Delsystemerne er koblet sammen via et 100 Mbit/s Ethernet, og al datatransmission foregår over dette netværk. ScenarioSender bruger UDP af performancehensyn, men da denne protokol ikke tager hånd om pakkeab, er den ikke anvendelig til kommunikation

af offsidemarkeringer. En tabt offsidemarkering ville betyde en manglende offsidekendelse, så til disse markeringer bruges i stedet TCP, som er pålidelig i den forstand at datapakkerne garanteres at nå frem i samme stand som da de blev afsendt.



Figur 45 – Deployment-diagram for det samlede run-time-system.

Specifikationer for testopstillingen findes i appendiks E.3.

6.1.1. ScenarioSender

Dette delsystem simulerer et positioneringssystem ved hvert millisekund at udsende en datapakke indeholdende positioner for bold og spillere. Data udsendes med UDP multicast, men det kan der læses mere om i afsnit 6.1.4, mens dataformatet for pakkerne beskrives i afsnit 6.1.5.

ScenarioSender er baseret på delsystemet af samme navn i [Larsen & Hansen, s. 49], hvorfor der henvises hertil for yderligere beskrivelser, blandt andet af den realtidsløkke, der sikrer timingen i pakkeafsendelsen. Basalt set er forskellen mellem de to systemer, at positioner i dette speciale angives i et tredimensionelt koordinatsystem og at der gives positioner for flere punkter pr. spiller. I øvrigt henvises der til kapitel 8 for en forklaring af fremskridtene i dette speciale i forhold til [Larsen & Hansen], mens en nærmere beskrivelse af opsætningen findes i appendiks E.3.

Den indlæste fil (scenario.sce i Figur 45) er genereret af en ekstern applikation, Datakonvertering, som er beskrevet i appendiks E.1, hvor der også kan findes flere informationer om dataformatet i en scenario-fil. Datakonvertering er et program, som på baggrund af et specielt scriptsprog kan sammensætte en række bevægelser optaget med systemet fra Qualisys og generere en samlet scenariofil, der kan læses af ScenarioSender.

6.1.2. Visualizer

Ligesom det er tilfældet for ScenarioSender, er Visualizer et delsystem udviklet på baggrund af et system af samme navn i [Larsen & Hansen, s. 52] med det formål at vise de afspillede scenarier, mens de afspilles. Også her består ændringerne i at kunne modtage data i 3D for flere punkter pr. spiller.

Visualizer modtager positioneringsdata fra ScenarioSender og offsidemarkeringer fra ODA. Offsidemarkeringer modtages fra ODA via en TCP-forbindelse i et format beskrevet i afsnit 6.1.5. Ved opstart forsøger ODA at oprette denne TCP-forbindelse til Visualizer på IP-adressen 192.168.1.75, hvorfor sidstnævnte skal være startet før ODA.

6.1.3. ODA

Det centrale delsystem, OffsideDetekteringsAssistent, adskiller sig grundlæggende fra DommerStøtteSystem [Larsen & Hansen, s. 56], som det ellers er baseret på. Designet er så anderledes, at resten af dette kapitel er tilegnet beskrivelsen af ODA's design. Som Figur 45 viser, foregår kommunikationen med ScenarioSender og Visualizer dog stadig via henholdsvis en UDP-server og en TCP-klient. TCP-klienten opretter en forbindelse til Visualizer, som derfor skal være startet før ODA.

6.1.4. Kommunikationsprotokoller

Kommunikationen mellem delsystemerne foregår på samme måde som i [Larsen & Hansen, s. 43]. Positioneringsdata udsendes via UDP multicast på adressen 224.100.1.1, hvorfor data kan modtages af adskillige andre delsystemer uden at påføre yderligere belastning af ScenarioSender.

UDP er beregnet til envejskommunikation, og afsenderen ved dermed ingenting om, hvorvidt de afsendte pakker når deres destination. Run-time-systemet afvikles på et dedikeret netværk, så pakketabet på grund af kollisioner antages at være yderst beskedent, da den eneste anden trafik på netværket er offsidemarkeringer, som er relativt sjældent forekommende. Det lave pakketab bekræftes gennem observation af testscenarierne fra kapitel 7. Efter hvert programgennemløb udskriver ODA antallet af modtagne pakker, og dette antal svarer praktisk talt hver gang til antallet af afsendte pakker. En decideret test af pakketabet udført i [Larsen & Hansen, s. 66] giver samme billede.

Trods den observerede pålidelighed i det dedikerede netværk benytter ODA alligevel TCP til afsendelse af offsidemarkeringer til Visualizer. En garanteret pålidelighed som den, der kan opnås gennem TCP-forbindelser, er at foretrække til offsidemarkeringer, der forekommer sjældent sammenlignet med frekvensen af pakker med positioneringsdata. Det ekstra overhead, som TCP gør brug af til kvittering for modtagelse, forekommer med lange mellemrum og er et lille offer i forhold til vigtigheden af at offsidemarkeringerne når frem til linjedommeren og/eller Visualizer.

6.1.5. Datamodel

De store forskelle i kommunikationen i forhold til [Larsen & Hansen] består i et anderledes dataformat for positioneringsdata, hvor der gives 3D-data for flere objekter.

Positioneringsdata

Pakkeformatet for positioneringsdata anvendt i dette speciale minder meget om det fra [Larsen & Hansen, s. 24], idet alle data for samme tidspunkt sendes i én pakke, med timestamp som de første 4 bytes. Figur 46 viser pakkeformatet, hvor det også fremgår, at koordinater for hvert objekt nu angives i tre dimensioner.

Bytes	4	1	2	2	2	1	2	2	2		1	2	2	2
Data	Timestamp	ID	X	Y	Z	ID	X	Y	Z	...	ID	X	Y	Z
Byte nr.	1-4	5	6-7	8-9	10-11	12	13-14	15-16	17-18		313	314-315	316-317	318-319

Figur 46 – Pakkeformat for positioneringsdata.

Med 3-dimensionelle koordinater skal der sendes yderligere 2 bytes pr. objekt sammenlignet med [Larsen & Hansen, s. 24] for hvert objekt, som dermed fylder 7 bytes. Positioneringssystemet antages at give positioneringsdata for to punkter for hver spiller, og med to hold á 11 spillere vil der sammen med bolden i alt gives informationer om 45 ob-

jekter pr. pakke. Sammen med de 4 bytes til timestamp bliver pakkestørrelsen 319 bytes, der som nævnt i afsnit 6.1.1 udsendes med 1000 Hz.

Koordinater

Positioner for spillere og bold angives i et koordinatsystem, hvor hver enhed svarer til 2 mm. Som forklaret i afsnit 5.3 er dette den højest mulige opløsning der kan indeholdes i 2 bytes, når fodboldbanen kan være op til 120 meter lang.

Ligesom i [Larsen & Hansen, s. 25] er koordinatsystemets nulpunkt placeret i øverste venstre hjørne af fodboldbanen, hvor x-værdien angiver positionen i banens længderetning. Af hensyn til repræsentation på en computerskærm, hvor pixel-koordinaten tager udgangspunkt i øverste venstre hjørne, er y-værdier negerede i forhold til normale koordinatsystemer.

Koordinater angives som positive værdier, og repræsenteres derfor som unsigned short med værdier mellem 0 og 65.535. Dette kan give et lille problem, idet bolden vil antage en negativ x-værdi, når den ryger ud over venstre mållinje, eller en negativ y-værdi, når bolden ryger ud over øverste sidelinje. Faktisk vil værdien blive negativ inden bolden ryger ud, da hele bolden skal have passeret hele linjen for at være ude. Boldens position repræsenteres af dens centrum, så allerede når halvdelen af bolden har passeret hele sidelinjen bliver værdien negativ.

Problemet vil kunne løses ved at flytte koordinatsystemets nulpunkt et par meter op og til venstre, men i prototyperne er der ikke taget hånd om dette. I testdata holder både bold og spillere sig indenfor banen, men i et endeligt system kan dette naturligvis ikke garanteres.

ID'er for objekterne

Bolden og benskinnerne identificeres gennem deres ID, som tildeles efter et bestemt mønster, så alle delsystemer er enige om, hvad der er hvad. Boldens ID er 200, mens objekterne for spillere på hold 1 har ID mellem 100 og 199. For hold 2 er ID'erne mellem 0 og 99, og endelig bruges ID 250 til at angive, at afspilningen af et scenario er slut. Dette ID gives til det første objekt i pakken, hvormed ODA og Visualizer ved, at der ikke kommer flere pakker før afspilningen af næste scenario begynder.

For spillernes vedkommende er der reserveret fem ID'er pr. spiller, hvoraf kun de to første bruges. De sidste tre reserverede ID'er for hver spiller kan eventuelt bruges i en videreudvikling af systemet, hvor der bruges mere omfattende positioneringsdata. En samlet oversigt med ID'et for hvert objekt kan ses i Tabel 6.

	Venstre ben	Højre ben	?	?	?
Hold 1 spiller 1	101	102	103	104	105
Hold 1 spiller 2	106	107	108	109	110
...	...	...	...	...	...
Hold 2 spiller 1	1	2	3	4	5
Hold 2 spiller 2	6	7	8	9	10
...	...	...	...	...	...
Bold	200				
Slutpakke	250				

Tabel 6 – Objekternes ID.

Offsidemarkeringer

En offsidemarkering sendes i en pakke, som angiver spilleren i offsideposition. Er der to spillere, som systemet vurderer kan være i muligt strafbar offsideposition, sendes der således to pakker. Pakkeformatet for en offsidemarkering vises i Figur 47. For at ID'et kan repræsentere en spiller frem for en punkt på en

Bytes	1	4	2	2
Data	ID	Timestamp	X	Y
Byte nr.	1	2-5	6-7	8-9

Figur 47 – Pakkeformat for offsidemarkeringer.

spiller, skal ID'et svare til ID'et på spillerens venstre ben – altså eksempelvis 106, hvis spiller 2 på hold 1 er i offsideposition. Timestamp, x-

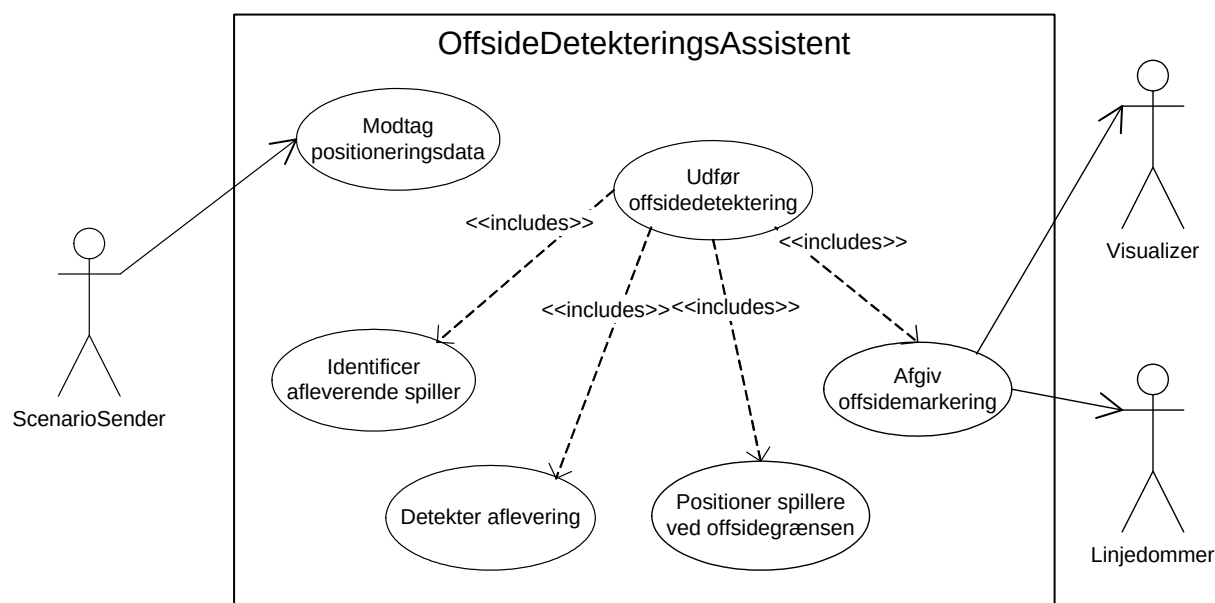
værdi og y-værdi bruges pt. ikke til noget, men det er ikke fundet relevant at ændre i pakkeformatet, da pakkerne alligevel kun er på 9 bytes.

Placering af data

Som det fremgår af deployment-diagrammet (Figur 45) er ScenarioSender det eneste sted, hvor der er placeret datafiler (formatet kan findes i appendiks E.1). I [Larsen & Hansen, s. 56] har DommerStøtteSystem ansvar for at persistere indkommende positioneringsdata, men denne funktionalitet kunne lige så vel udføres af en separat enhed på netværket, da positioneringsdata som beskrevet i afsnit 6.1.4 udsendes gennem multicast. I dette speciale foretages der ikke persistering af nogen art.

6.2. Grundlæggende funktionalitet i ODA

Som nævnt i afsnit 6.1.3 er ODA fundamentalt anderledes end DommerStøttesystem, og derfor beskriver resten af kapitlet dette centrale delsystem. Use case-diagrammet i Figur 48 viser den overordnede funktionalitet i ODA og de aktører, ODA interagerer med.



Figur 48 – Use Case-diagram for ODA.

Den eksterne aktør til venstre er prototypen *ScenarioSender*, som simulerer et positioneringssystem ved at sende pakker med positioner på bold og spillere hvert millisekund. Use casen *Modtag positioneringsdata* beskriver, at en del af ODA's funktionalitet er at kunne modtage data om boldens og spillernes positioner med en høj frekvens.

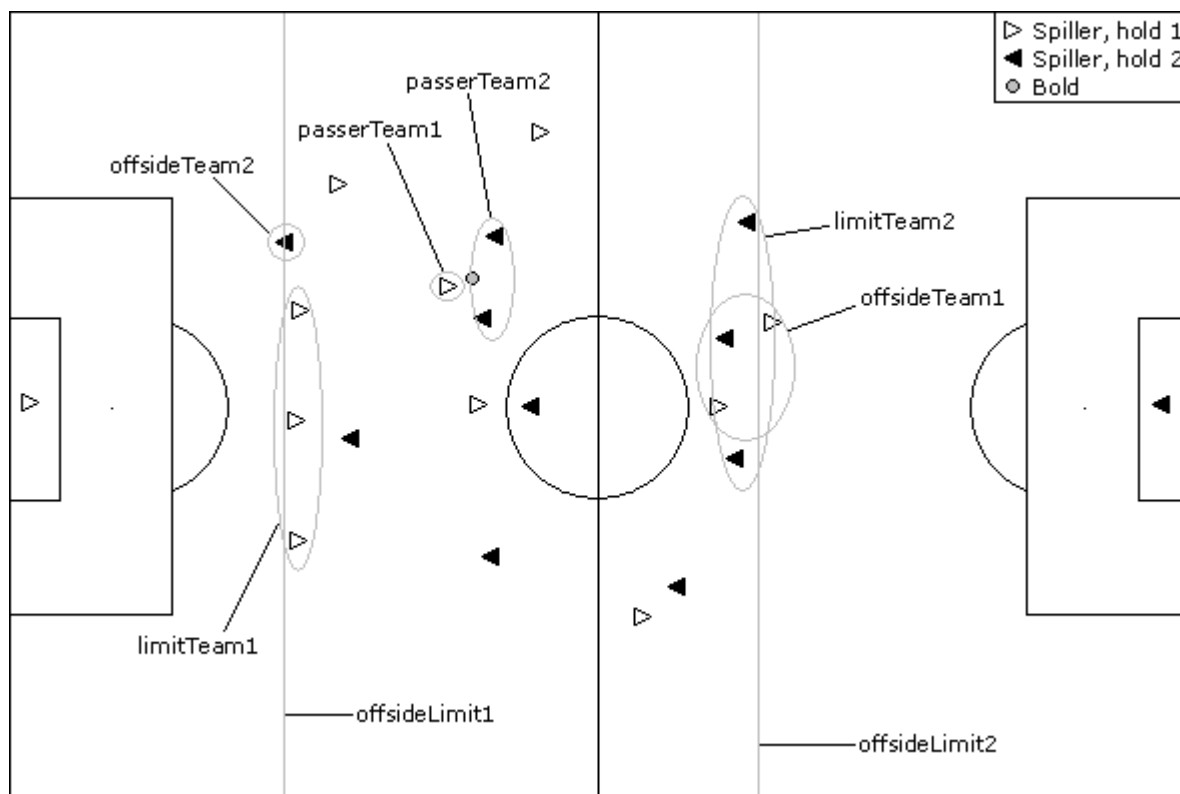
Den anden overordnede use case i systemet er *Udfør offsidedetektering*, som kan deles op i mindre dele, der mere detaljeret beskriver de krav, systemet skal leve op til. Disse fire dele – *Identificer afleverende spiller*, *Detekter aflevering*, *Positioner spillere ved offsidegrænsen* og *Afgiv offsidemarkering* – svarer overens med de fire underspørgsmål i afsnit 1.3, og det skal igen bemærkes, at der er lagt mest vægt på de tre førstnævnte, selvom *Afgiv offsidemarkering* forestår kommunikationen til de eksterne aktører, *Visualizer* og en *linjedommer*, som skal modtage markeringer for muligt strafbare offside-situationer. *Visualizer* modtager endvidere positioneringsdata fra *ScenarioSender*, men dette er ikke vist i figuren, da det ikke har nogen direkte sammenhæng med ODA.

I forhold til [Larsen & Hansen, s. 56] er use casen *Gem positioneringsdata* gledet ud, som det er forklaret i afsnit 6.1.5.

6.3. Designbeslutninger

Dette afsnit beskriver de grundlæggende beslutninger angående ODA's design. Der benyttes to tråde, som hver især tager sig af en af de overordnede use cases fra afsnit 6.2. Da det er meget beregningstungt præcist at bestemme spillernes omfang, jf. kapitel 4, ønskes disse beregninger begrænset til så få spillere som muligt. Derfor er ODA designet således at spillere, der åbenlyst ikke er vigtige i vurderingen af offside-situationen, sorteres fra inden de tunge beregninger begynder. Dette gøres ved at vedligeholde en række mængder, som køres igennem en række filtre og efterhånden udtynnes. Hvis der stadig er spillere i offsideposition, når alle filtrene er gennemløbet, får linjedommeren en markering for en muligt strafbar offside.

De mængder, der vedligeholdes, er illustreret i Figur 49. *limitTeam1* og *limitTeam2* består af de spillere, der kan være sidste og næstsidste forsvarsspiller på deres respektive hold. I figuren er målmændene af æstetiske årsager ikke indtegnet i mængderne, men for at vide, hvilken spiller der er den næstsidste, skal man også vide, hvem der er den sidste, så de indgår også i de to mængder. Det punkt på næstsidste forsvarsspiller, der er nærmest mållinjen, udgør offsidegrænsen, som der også holdes styr på via *offsideLimit1* og *offsideLimit2*.



Figur 49 – For hvert hold vedligeholdes tre mængder: spillere der kan udgøre offsidegrænsen (*limitTeam1* og *limitTeam2*, hvor også målmændene hører med), spillere der kan have afleveret bolden (*passerTeam1* og *passerTeam2*) og spillere der kan være offside (*offsideTeam1* og *offsideTeam2*). Samtidig holdes der styr på, hvor offsidegrænsen går i begge ender af banen.

Angrebsspillere som befinder sig foran eller i nærheden af offsidegrænsen i deres respektive ende af banen, befinder sig i mængderne *offsideTeam1* og *offsideTeam2*. Grunden til at også spillere, der ikke umiddelbart er i offsideposition, findes i mængderne, er, at der indtil de nøjagtige beregninger er foretaget er en vis usikkerhed om punktet nærmest mållinjen.

Endelig indeholder mængderne *passerTeam1* og *passerTeam2* spillere, som befinder sig tæt på bolden og derfor er kandidater til at have rørt den. Er der kun spillere fra det ene

hold tæt på bolden, er det kun spillere på samme hold, der kan risikere at være i offside-position. Der gives ved at anvende mængder mulighed for at angive tvivl i identifikationen af den afleverende spiller, idet spillere fra begge hold kan risikere at stå i offsideposition.

Mængderne kommer som tidligere nævnt igennem en række filtre, som beskrives i afsnit 6.4. Nogle filtre har til formål at detektere afleveringer, og der er desuden filtre til at identificere den afleverende spiller og at positionere spillere nær offsidegrænsen. Der findes også filtre, der simulerer funktionaliteten i DommerStøtteSystem, så der kan laves en sammenligning af de to systemer. Endvidere kan man forestille sig filtre til at frasortere målspark, indkast og hjørnespark samt driblinger og korte afleveringer, hvor spillere i offsideposition ikke kan deltage aktivt i spillet.

Offside-detekteringen foretages af to tråde, som hver især har et ansvar nogenlunde svarende til de to overordnede use cases fra Figur 48 på side 67. De to tråde, *OffsideDetection* og *DataThread*, beskrives nærmere i afsnit 6.5. *DataThread* har til ansvar at modtage positioneringsdata, og udregner endvidere hastighed, acceleration og retning for bolden. *OffsideDetection* udfører offside-detektering på baggrund af disse beregninger, hvilket foregår gennem de førnævnte filtre. Ved hver påbegyndelse af offside-detekteringsalgoritmen nulstiller *OffsideDetection* de seks mængder med spillere, så alle spillere igen indgår i samtlige mængder hørende til deres hold.

Udover filtermekanismen benyttes også en række andre designmønstre som gør det let at konfigurere systemet på forskellige måder. For eksempel bruges Strategy Pattern [GoF, s. 315] til forskellige positioneringsstrategier for spillerne. En simpel strategi kan bruges til den indledende filtrering af mængderne, mens mere beregningstunge strategier kan benyttes til nøjagtig positionering, når der kun er få spillere tilbage i mængderne.

6.4. Filtermekanismen

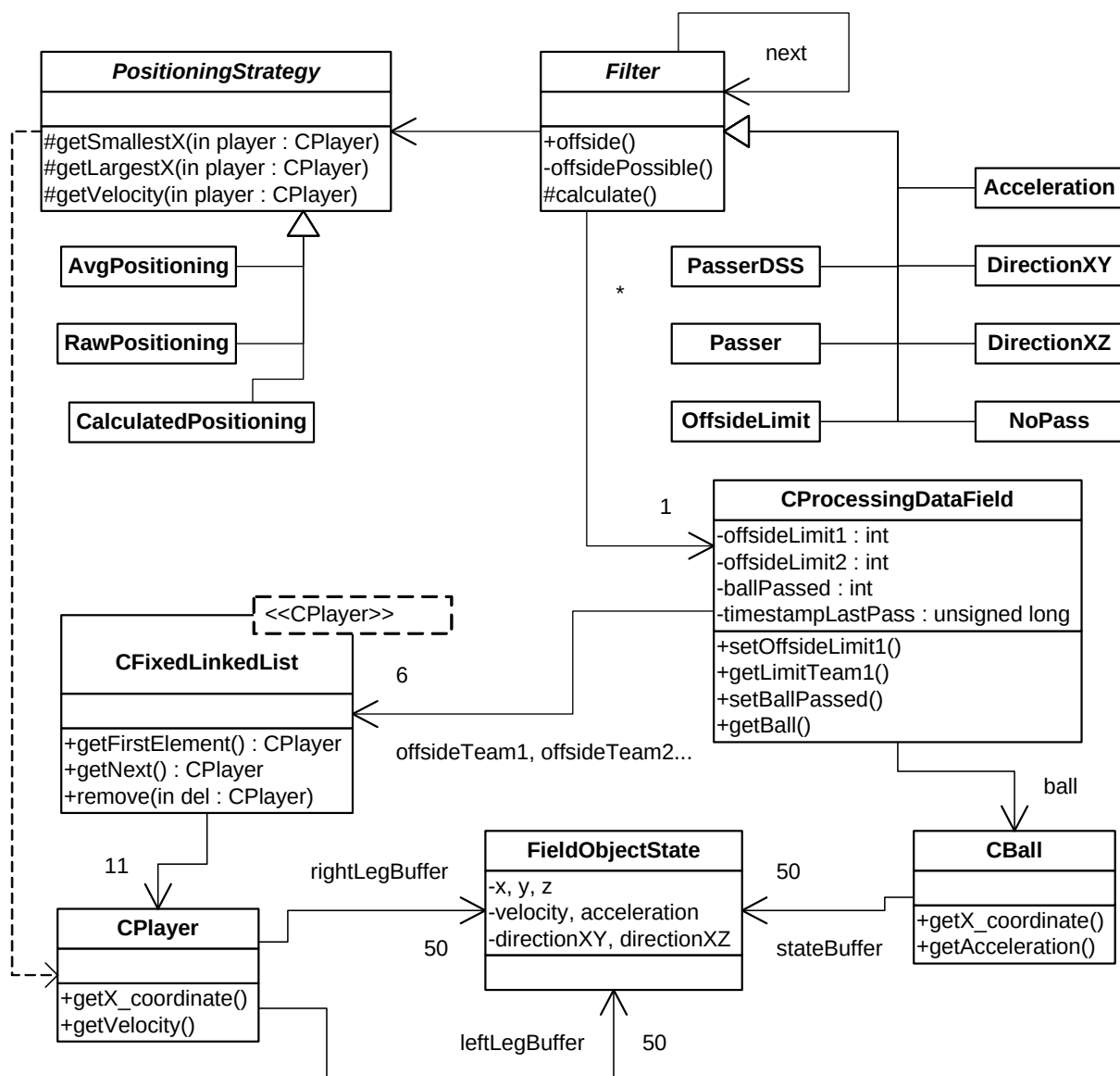
Et af de centrale elementer i designet er valget af en filtermekanisme til offside-detektering. Dette afsnit beskriver, hvordan denne mekanisme anvendes til at foretage offside-detektering. Et klassediagram over de klasser, der indgår i offside-detekteringen, vises i Figur 51.

Filtermekanismen er baseret på designmønstret *Filter Pattern* [Yacoub, s. 4], der gør det muligt at sammensætte dele af et program eller en algoritme på mange forskellige måder, og endda ændre sammensætningen, mens programmet kører. Hvert enkelt filter kender det næste filter i rækken via en next-pointer, og *offside()*-metoden udføres ved rekursivt at kalde samme metode på næste filter, indtil der ikke er flere, jf. Figur 50. Alle specialiseringer af *Filter* skal implementere *calculate()*-metoden, som beskriver filterets opførsel. De forskellige filtre beskrives i afsnit 6.4.1.

```
bool Filter::offside() {
    calculate();
    if(next==0)
        return offsidePossible();
    return (offsidePossible() && next->offside());
}
```

Figur 50 – *offside()*-metoden. *calculate()* er det eneste, der skal implementeres af specialiseringer af den abstrakte klasse *Filter*. *offsidePossible()* er beskrevet i Figur 52.

Metoden *offside()* i Figur 50 er implementeret med designmønstret *Template Method Pattern* [GoF, s. 325], hvor det i den abstrakte klasse (i dette tilfælde *Filter*) defineres, hvordan specialiseringerne i hovedtræk skal opføre sig. Dette sker ved at *offside()* kalder *calculate()*, hvorefter det med *offsidePossible()*, som findes i Figur 52, undersøges, om der eksempelvis stadig findes spillere i mængderne med spillere nær offsidegrænsen. Hvis det ikke kan afvises, at der foreligger en muligt strafbar offsideposition, kaldes *offside()* på næste filter i rækken.



Figur 51 – Klassediagram over klasser, der indgår i offsidedetektering.

Samtidig benyttes *Strategy Pattern* [GoF, s. 315] til at angive mere eller mindre komplicerede positioneringsstrategier, som dermed også har forskellig udførselstid. En simpel strategi kan benyttes indledningsvis til at foretage en grov filtrering, mens mere nøjagtige og dermed beregningstunge strategier kan benyttes for spillere tæt på bolden eller offsidegrænsen. Ved at benytte Strategy Pattern kan filtrene implementeres således at de ikke behøver kende til den anvendte positioneringsstrategi. Dette giver en god fleksibilitet i sammensætningen af programmet, idet samme filter kan fungere på flere forskellige måder uden at der skal ændres i kildekoden. De implementerede strategier beskrives i afsnit 6.4.2.

Alle filtrene har en reference til det samme **CProcessingDataField**-objekt, som er implementeret med *Singleton Pattern* [GoF, s. 127] for at sikre, at der kun findes ét objekt af denne type. **CProcessingDataField** indeholder informationer om de data, filtrene arbejder på. Således er det muligt for filtrene at aflæse eller ændre offsidegrænserne i begge ender af banen, fjerne spillerne fra de mængder, hvor de ikke længere hører til, eller angive om bolden er blevet afleveret. Desuden findes et timestamp for den sidst opdagede aflevering, så afleveringsdetekteringen efter en detekteret aflevering ikke sættes i gang igen, før bolden har opnået sin nye retning. Retningen beregnes ud fra boldens po-

sition de seneste ti millisekunder, jf. afsnit 5.3, og dette timestamp sikrer, at den samme aflevering ikke detekteres to gange.

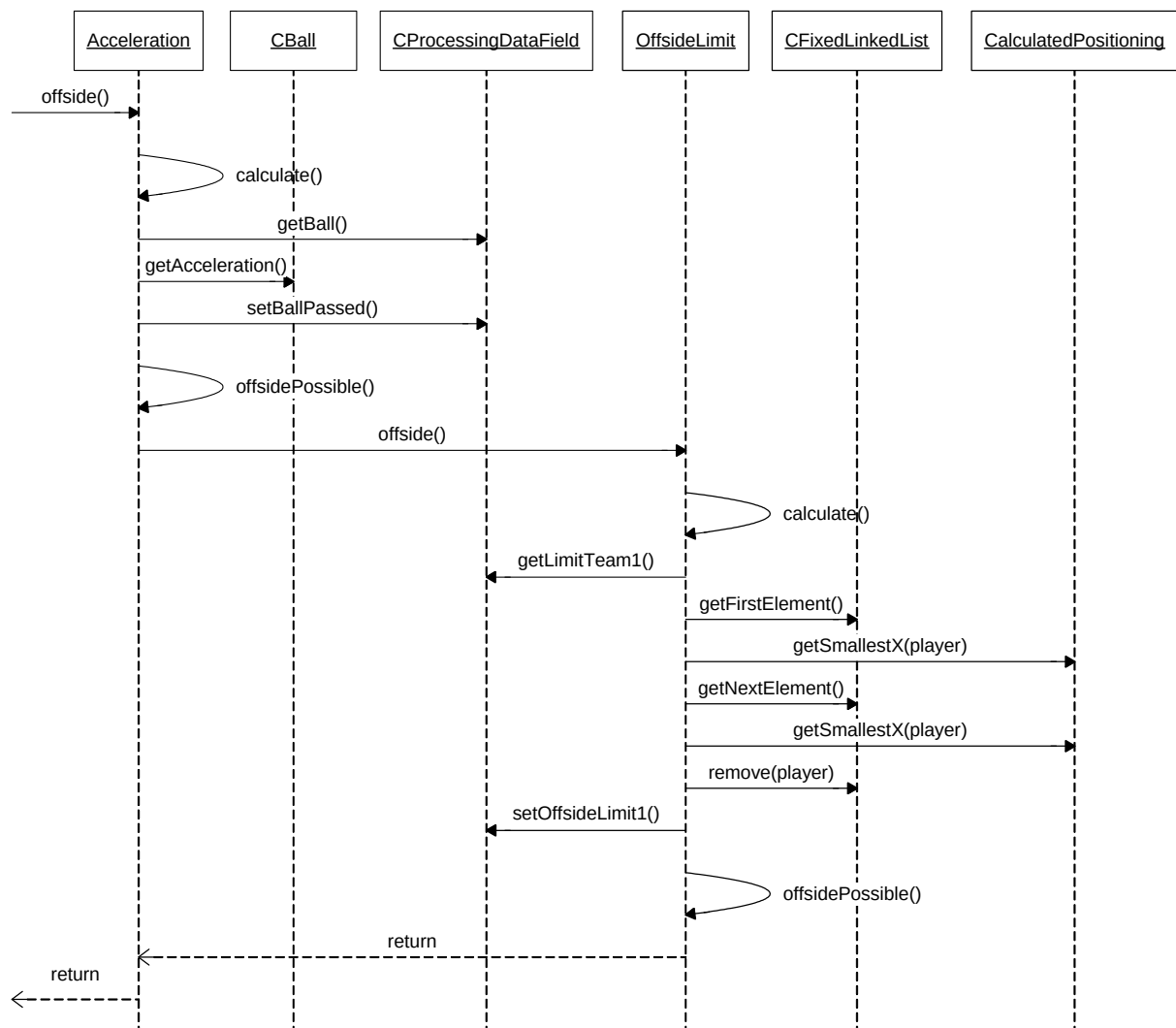
```

Bool Filter::offsidePossible() {
    if(ballPassed == no)
        return false;
    if(offsideTeam1()->size() == 0 && offsideTeam2()->size() == 0)
        return false;
    if(passerTeam1()->size() == 0 && passerTeam2()->size() == 0)
        return false;
    return true;
}

```

Figur 52 – Forsimpleret kode for offsidePossible(). Hvis bolden ikke er rørt, ingen spillere er i offsideposition eller ingen spillere er i nærheden af bolden, er offside ikke muligt.

De seks mængder opretholdes ved hjælp af seks CFixedLinkedList-objekter, hvor remove() bruges til at fjerne de irrelevante spillere efterhånden som filtrene gennemløbes. Når et filter skal aflæse eksempelvis koordinater eller hastighed for en spiller, hentes en reference til den første spiller i listen med getFirstElement(), mens de efterfølgende spillere findes med getNext().



Figur 53 – Sekvensdiagram for filtermekanismen til offsidedetektering.

Både spillere (CPlayer) og bold (CBall) råder over en cirkulær buffer med historiske koordinater, og for boldens vedkommende også udregnet hastighed, acceleration og retning. Som forklaret i afsnit 6.5 udregnes disse afledte informationer af tråden DataThread, når nye positioneringsdata indsættes.

Et sekvensdiagram for udvalgte dele af et gennemløb af offside-detekteringen kan ses i Figur 53. I figuren består offside-detekteringen af de to filtre Acceleration og OffsideLimit, og spillerpositioneringen foregår med strategien CalculatedPositioning. Filtrene beskrives sammen med de andre implementerede filtre i afsnit 6.4.1, mens de forskellige positioneringsstrategier beskrives i afsnit 6.4.2.

Når offside()-metoden kaldes på det første filter, Acceleration, udføres først calculate(). Dette filter bruges til afleveringsdetektering og skal derfor bruge data om bolden, som kan hentes via getBall() på CProcessingDataField. På CBall udføres getAcceleration() og efterfølgende opdateres CProcessingDataField med de oplysninger, CBall kan bidrage med. I dette tilfælde angiver Acceleration, at bolden er blevet afleveret.

De nærmere detaljer for offsidePossible() er ikke angivet i Figur 53, men kort fortalt laves der en række forespørgsler på CProcessingDataField for at finde ud af, om der stadig kan forelægge en muligt strafbar offside-situation, jf. Figur 52. Er bolden eksempelvis ikke blevet rørt, kan der ikke dømmes offside, og det samme gælder, hvis der ikke findes spillere i offside-position.

For forklaringens skyld antages det, at Acceleration detekterede en aflevering, hvorved offside stadig kan forekomme. Dermed returneres værdien true af offsidePossible(), og Acceleration kalder offside() på det filter, dens next-pointer peger på, altså OffsideLimit. Dette filters calculate()-metode arbejder på de forskellige mængder af spillere, som hentes gennem eksempelvis getLimitTeam1(), der består af forsvarende spillere, der kan udgøre offsidegrænsen, jf. Figur 49. For disse spillere beregnes punktet nærmest mållinjen med getSmallestX(), som kaldes på den tilknyttede positioneringsstrategi, CalculatedPositioning. I eksemplet kan den næste spiller i mængden ikke længere udgøre offsidegrænsen og fjernes derfor med remove(). Når hele mængden er gennemløbet, kan offsidegrænsen i CProcessingDataField opdateres med setOffsideLimit1(). Tilsvarende gælder for de øvrige mængder.

OffsideLimit finder ved hjælp af offsidePossible() ud af, om der kan foreligge en muligt strafbar offside-situation. Kan der ikke det, eller er filtret det sidste i rækken, returneres denne oplysning rekursivt til det objekt, som kaldte offside() på det første filter.

6.4.1. Filtre

Dette afsnit beskriver de filtre, der er implementeret i ODA. Filtrene repræsenterer den basale funktionalitet, der skal til for at kunne udføre offside-detektering. Mere avancerede filtre til opfyldelse af eksempelvis Krav9 og Krav10 er ikke implementeret, men der gives ideer til sådanne filtre i kapitel 9. Filtrene er udviklet med designmønstrene *Filter Pattern* [Yacoub, s. 4] og *Template Method Pattern* [GoF, s. 325], og flere af dem benytter positioneringsstrategier beskrevet i afsnit 6.4.2.

Afleveringsdetektering

Detektering af afleveringer foregår gennem de fire filtre Acceleration, DirectionXY, DirectionXZ og NoPass. Funktionaliteten kunne snildt udføres i ét og samme filter, men for at kunne simulere DommerStøtteSystems funktionalitet, hvor kun acceleration benyttes til afleveringsdetektering, er de adskilt.

De tre førstnævnte filtre aflæser boldens acceleration samt retning i henholdsvis (x, y)- og (x, z)-plan og sammenligner med samme information et stykke tid tidligere. Har acce-

lerationen overskredet en grænseværdi, eller er boldens retning skiftet mere end en bestemt vinkel (defineret i filen Constants.h), anses bolden som kandidat til at være blevet rørt. Når bolden hopper på jorden uden at være blevet rørt, vil den have et retningsskift i (x, z)-retningen, men da boldens centrum er mindre end 15 cm over græsset, kan denne begivenhed filtreres fra. DirectionXZ er det sidste af de tre filtre, så kun hvis der sker det usandsynlige, at en spiller har rørt bolden i græshøjde uden at den har skiftet (x, y)-retning eller fart, vil dette filter betyde en overset boldberøring. Om bolden reelt blot ramt stolpen eller fået et skævt opspring på grund af en ujævnhed i banen, tager filtrene ingen stilling til, idet blot en ændring i boldens opførsel detekteres.

Detekteres en mulig aflevering, kan filtrene ændre tilstanden i CProcessingDataField. Her findes en attribut, ballPassed, som angiver om bolden er blevet rørt. Til at begynde med er attributten i tilstanden maybe, men hvis en aflevering detekteres, kan denne værdi ændres til probably eller definitely. Sidstnævnte benyttes kun af Acceleration, idet bolden kun kan få tilført fart ved at blive rørt af en spiller, jf. afsnit 5.1.

NoPass er et specielt filter, som indsættes efter de af de andre filtre, som ønskes benyttet. Hvis ballPassed stadig er i tilstanden maybe, når de valgte filtre er gennemløbet, ændres tilstanden til no. Metoden offsidePossible() tester attributten og returnerer false, hvis ballPassed er no. Hvis en aflevering ikke er detekteret, når filtret NoPass er nået, vil ODA dermed standse offside-detekteringen, mens en anden værdi vil medføre et kald af offside() på det næste filter i rækken, jf. Figur 50 side 69.

OffsideLimit

Dette filter bruges til at filtrere spillere fra de fire mængder fra afsnit 6.3, der indeholder spillere nær de to offsidegrænser. Det drejer sig om spillere, der kan udgøre offsidegrænserne og spillere, der kan risikere at være i offsideposition.

Filteret kan konfigureres med forskellige positioneringsstrategier og grænseværdier for, hvornår en spiller anses for værende i risikozonen for at være i offsideposition. Afhængigt af nøjagtigheden af den valgte positioneringsstrategi kan grænseværdien sættes til at kompensere for denne unøjagtighed, så spillere ikke fejlagtigt filtreres fra.

OffsideLimit gennemgår de fire mængder med den valgte positioneringsstrategi. Først beregnes offsidegrænser, dernæst fjernes spillere, der ikke kan udgøre offsidegrænserne, og til sidst fjernes spillere, der ikke kan være i offsideposition.

Passer

De to mængder, der ikke tages hånd om af OffsideLimit, kan gennemgås med filtret Passer. Mængderne indeholder spillere fra de to hold, der befinder sig så tæt på bolden, at de er kandidater til at have afleveret bolden.

Filtret kan konfigureres med en grænseværdi for, hvor langt et ben skal være fra bolden, for at en spiller kan have rørt den. Afstanden måles for begge skinneben, og hvis ingen af skinnebenene er indenfor det konfigurerede radius af bolden, sorteres spilleren fra. Et mere avanceret filter kunne eventuelt tage z-koordinaten med i betragtning, men mere om det i afsnit 9.2.

PasserDSS

PasserDSS er et filter, der bruges til at simulere identifikationen af den afleverende spiller, som den foregår i DommerStøtteSystem [Larsen & Hansen, s. 27]. Filtret udvælger den spiller, der er nærmest bolden, og fjerner alle andre spillere fra de to mængder med spillere tæt på bolden. Ligesom for Passer-filtret er det benenes middelplassering der bruges til at udregne afstanden til bolden.

Dette filter skal udelukkende bruges til at simulere identificeringen i DommerStøtteSystem for sammenligningens skyld. Denne fremgangsmåde overtræder Krav8 og bør således *ikke* anvendes i et endeligt system.

6.4.2. Positioneringsstrategier

I ODA er der implementeret tre forskellige strategier til positionering af spillere, som beskrives i dette afsnit. Strategierne er udviklet efter designmønsteret *Strategy Pattern* [GoF, s. 315] og kan således byttes med hinanden alt efter ønsket præcision.

Metoderne, som alle strategierne har implementeret, tager et `CPlayer`-objekt som input og returnerer eksempelvis den største x-værdi (punktet nærmest den ene mållinje på spilleren). De største og mindste x- og y-værdier giver det nødvendige syn på spillerens omfang, mens hastighed og retning kan udregnes på forskellige måder.

AvgPositioning

Denne strategi bruges til at simulere spillerpositioneringen i `DommerStøtteSystem`. Da `ScenarioSender` udsender positionerne på begge spillerens ben og [Larsen & Hansen, s. 26] tager udgangspunkt i positionering af spillerne som ét punkt, skal disse to punkter laves om til et enkelt punkt. Derfor udregnes spillerens placering som et gennemsnit af benenes placering, hvilket gør, at den største og den mindste x-værdi er lig hinanden, og det samme gælder for y-værdierne.

I `DommerStøtteSystem` antages afleveringstidspunktet fejlagtigt at være, når bolden slipper støvlen, så positioneringen foretages på baggrund af data for det tidspunkt, hvor afleveringen detekteres. Dette er cirka 10 ms efter kontakten er opstået, hvilket passer med en kontakttid på gennemsnitligt 10 ms (se afsnit 5.2).

RawPositioning

`RawPositioning` er en smule mere raffineret, idet der gøres brug af positionerne på begge ben, når spillerne positioneres. Den største x-værdi findes således ved at returnere x-værdien på det ben, der er tættest på den ene mållinje, og den mindste findes ved at returnere x-værdien på det andet ben. Denne fremgangsmåde gør, at der kun kræves nogle få beregninger for at give et nogenlunde billede af spillerens placering på banen. De fleste spillere befinder sig langt fra bolden og langt fra offsidegrænsen, og `RawPositioning` er derfor en hurtig strategi, der kan bruges af filtrene til at fjerne de uinteressante spillere.

Spillerens hastighed udregnes som et gennemsnit af benenes hastighed, mens retningen findes ved at kigge på retningen for det hurtigste ben. Da boldberøringen antages at være opstået 10 ms inden den opdages, jf. afsnit 5.3, er det positionen på dette tidspunkt, der anvendes i beregningerne.

CalculatedPositioning

Den mest avancerede strategi for spillerpositionering er `CalculatedPositioning`, som udfører alle beregningerne fra afsnit 4.2 og afsnit 4.3. Ud fra løberetning beregnes der både skulderpositioner og position for hovedet samt forreste og bageste punkt på fødderne for at finde frem til det punkt på spilleren, der er tættest på den ene eller den anden mållinje.

Løberetningen defineres som retningen på den hurtigste fod, og hastigheden findes ved benenes gennemsnitsfart. Som ved `RawPositioning` bestemmes spillernes placering af deres placering 10 ms inden afleveringen er detekteret.

6.4.3. Konfigurationer

For at gøre det så let som muligt at skifte mellem forskellige opsætninger af ODA er det gjort muligt at oprette forskellige konfigurationer. Til dette formål er anvendt designmønsteret *Abstract Factory Pattern* [GoF, s. 87], som tillader klienter at være uvidende om de specifikke klasser af objekter, der skal oprettes for at programmet kan fungere.

Den abstrakte klasse `OffsideFactory` definerer to operationer, som specialiseringer skal implementere: `makeFilters()` står for at oprette de filtre, der indgår i konfigurationen,

og returnerer en pointer til det første filter i rækken, mens `packetSize()` returnerer pakkestørrelsen på de pakker, der modtages over netværket. Dette giver mulighed for på et senere tidspunkt at lave konfigurationer, der benytter sig af tre koordinater til spillerpositionering uden at skulle ændre i kildekoden. Kravet er naturligvis, at `ScenarioSender` laves om til at sende den samme størrelse pakker, men dette kan gøres med samme designmønster.

De to implementerede konfigurationer beskrives i dette afsnit.

DSSFactory

For at kunne sammenligne løsningen udviklet i dette speciale med løsningen fra [Larsen & Hansen], er der lavet en række specielle filtre og positioneringsstrategier, der simulerer opførslen i dette system.

Til afleveringsdetektering benyttes filtret `Acceleration` samt det specielle filter `NoPass`, som sørger for at der ikke foretages yderligere beregninger, hvis bolden ikke er blevet afleveret. Positionering foretages af `AvgPositioning`, som benytter sig af positionerne på begge spillers ben og definerer hans position til at være gennemsnittet af disse. Derfor benyttes der også en pakkestørrelse på 319 bytes, jf. afsnit 6.1.5.

Den afleverende spiller identificeres af filtret `PasserDSS`, som definerer den afleverende spiller som ham, der har kortest afstand til bolden. Offside-detekteringen sker gennem filtret `OffsideLimit`, der initieres med grænseværdien 0. Således vil alle spillere, hvis gennemsnitsplacering er tættere på mållinjen end næstsidste forsvarsspillers gennemsnitsplacering, vurderes til at være i offsideposition.

TwoCoordinateFactory

Den anden konfiguration er mere avanceret og indeholder fremskridtene i dette speciale som forklaret i kapitel 8. Pakkestørrelsen er stadig den samme, men der bruges flere filtre i både afleveringsdetektering og den efterfølgende offside-detektering.

Afleveringer detekteres ved at gennemløbe de tre filtre `Acceleration`, `DirectionXY` og `DirectionXZ`. Opdater et af disse filtre en ændring i boldens opførsel, vil `NoPass`-filtret, som er placeret lige efter de tre filtre, kalde det første af de efterfølgende filtre.

Det første af disse filtre er `OffsideLimit`, der med positioneringsstrategien `RawPositioning` og grænseværdien 50 cm sørger for at fjerne de spillere, der ikke kan udgøre offsidegrænser eller være i offsideposition, fra deres respektive mængder. Herefter bruges `Passer` til at sortere spillere fra, der ikke kan have afleveret bolden, og til sidst benyttes `OffsideLimit` nok en gang for en mere nøjagtig positionering, hvor `CalculatedPositioning` udregner offsidegrænsen præcist og sorterer spillere fra, der er mere end 0 cm tættere på målet end denne grænse.

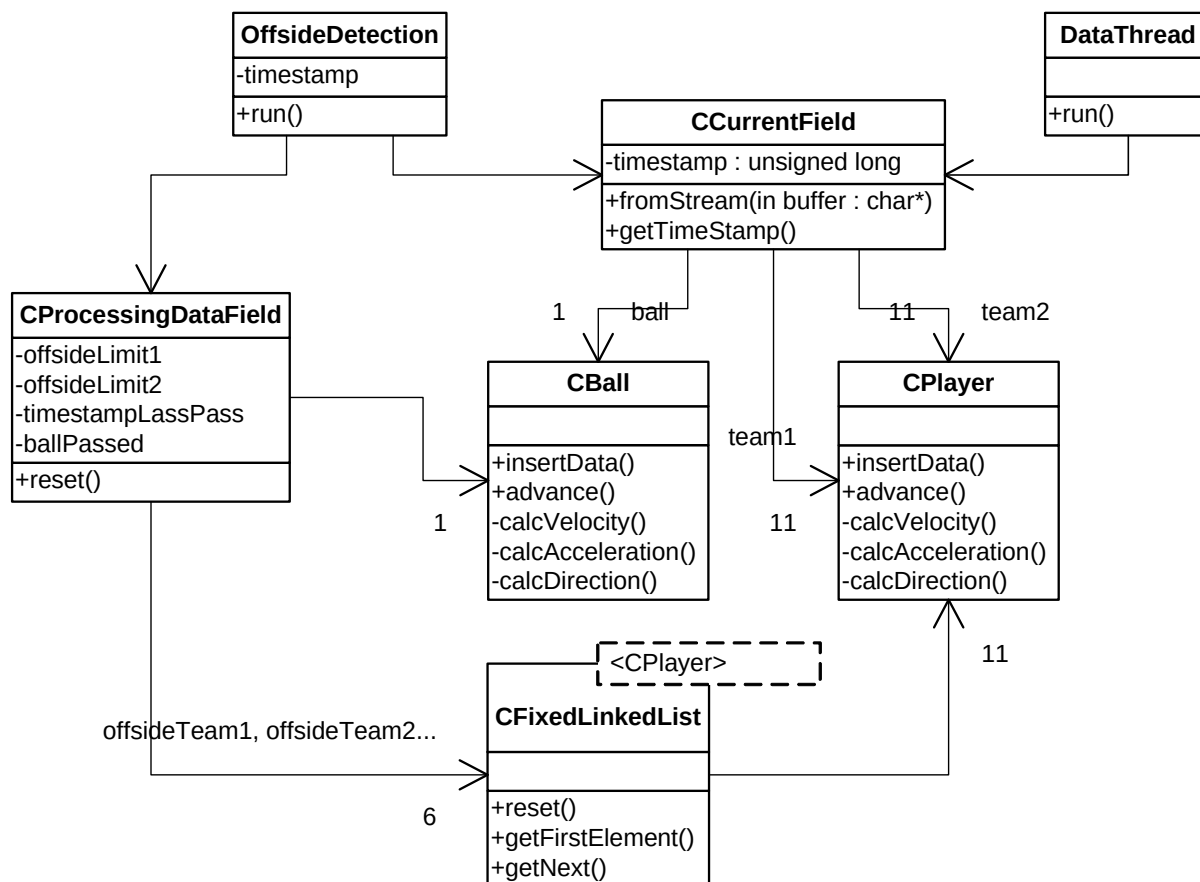
6.5. Samtidig

ODA styres af de to tråde `DataThread` og `OffsideDetection`, som beskrives i dette afsnit, hvor også de samtidighedsspørgsmål afklares, der opstår ved brug af tråde. Desuden foretages en analyse af tidsforbruget for at kunne retfærdiggøre, at systemet kan opfylde realtidskrav.

En vigtig betragtning er, at den lave afleveringsfrekvens medvirker, at selve offside-detekteringen ikke nødvendigvis skal kunne udføres inden der kommer nye data næste gang. Når en aflevering er detekteret, opstår der ikke en ny med det samme, og så længe tidsgrænsen fra `Krav1` opfyldes, må filtermekanismen gerne tage lang tid. Når filtermekanismen er gennemløbet, kan den næste offside-detektering tage udgangspunkt i de nyeste data, for på grund af intervallet mellem to afleveringer kan der alligevel ikke være sket nye afleveringer i mellemtiden, og nye offside-situationer kan dermed ikke være blevet overset.

6.5.1. Trådinteraktion

Dette afsnit beskriver den overordnede *Tasking model* [Douglass, s. 369] omhandlende tråde og delte ressourcer. Figur 54 viser den statiske struktur i den del af ODA, som trådene er fælles om at administrere.



Figur 54 – De to tråde, DataThread og OffsideDetection, har et Producer/Consumer-forhold til de cirkulære buffere, der er indeholdt i CBall- og CPlayer-objekterne.

De delte ressourcer i ODA er CBall og CPlayer, som hver især indeholder cirkulære buffere med historiske data om x-, y- og z-værdier samt hastighed, acceleration og retning for de objekter, der tilsammen udgør bold og spillere. For bolden er det kun bolden selv, mens hver spiller har en buffer for både venstre og højre ben.

Da afleveringer først detekteres 10 ms efter de er opstået, jf. kapitel 5, er det nødvendigt at have information om spillernes position på daværende tidspunkt. For bolden er historiske data nødvendige for at kunne beregne hastighed og så videre til brug i afleveringsdetektering. DataThread og OffsideDetection indtager rollerne som henholdsvis producent og konsument i den klassiske Producer/Consumer-problemstilling [Stallings 1998, s. 211]. De to tråde er beskrevet nærmere i henholdsvis afsnit 6.5.2 og afsnit 6.5.3.

DataThread kan fortsætte med at indsætte data mens OffsideDetection er i færd med at vurdere offside-situationen for et bestemt timestamp. For at DataThread ikke overskriver de data, OffsideDetection læser, kommunikerer de to tråde gennem tre *semaforer* [Stallings 1998, s. 208]. Læs mere om samtidighed i afsnit 6.5.4.

Den ene semafor er en tællesemafor, som forhindrer DataThread i at overskrive data, der stadig kan have interesse for OffsideDetection. Denne semafor forhindrer DataThread i at komme mere end 30 ms foran OffsideDetection og dermed overskrive data. Som vist i Figur 51 indeholder bufferne 50 FieldObjectState-objekter med historiske data, hvilket er nok til at OffsideDetection kan bruge 30 ms på at udføre sine beregninger uden at da-

ta overskrives og uden at DataThread forsinkes. Bufferstørrelsen kan eventuelt sættes op for at give længere tid til offsidetetekteringen, hvis det skulle blive nødvendigt. Startværdien for tællesemaforen sættes i så fald tilsvarende op.

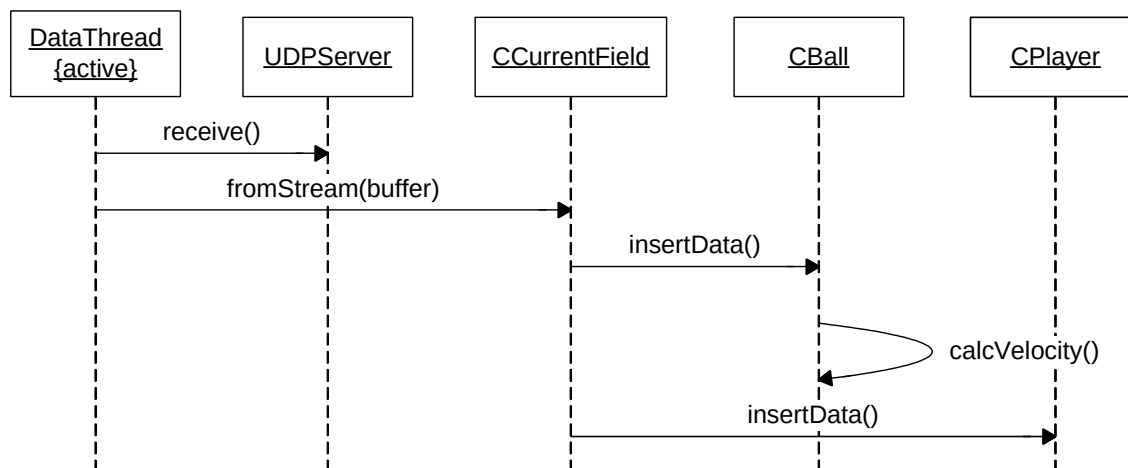
Sættes bufferstørrelsen op, skal man sikre sig, at der ikke kan forekomme en ny aflevering i løbet af den tid, det tager at udføre offsidetetektering. I mellemtiden slås afleveringsdetektering så at sige fra, og en ikke-detekteret aflevering har den uheldige konsekvens, at den kan medføre en manglende offsidemarkering. Det er dog kun, når en mulig aflevering er detekteret, at offsidetetekteringen tager lang tid, jf. afsnit 6.5.6. Da kontakttiden mellem bold og støvle eller bold og bane er 10 ms, jf. afsnit 5.2, kan ændringer i boldens opførsel ikke overses, når der kun bruges 10 ms på offsidetetektering.

DataThread indsætter nye data i CBall- og CPlayer-objekterne gennem fromStream()-metoden i CCurrentField, som erstatter de ældste data med nye. OffsideDetection manipulerer CBall- og CPlayer-objekterne gennem advance()-metoderne, som flytter de pegepinde i de cirkulære buffere, der angiver, hvor langt den er nået i læsning af data. For CPlayer-objekterne foregår dette igennem reset()-metoden i CFixedLinkedList, som udgør de mængder af spillere, der blev beskrevet i afsnit 6.3.

Trådene kører med *priority-based preemption* [Douglass, s. 531], hvor den arbejdende tråd kan afbrydes af en tråd af højere prioritet, hvis en sådan bliver klar imens tråden med den laveste prioritet arbejder. For at undgå pakketab grundet overfyldte netværksbuffere har DataThread højeste prioritet af de to tråde, mens OffsideDetection må finde sig i at blive afbrudt i offsidetetekteringen. I afsnit 6.5.6 findes en mere detaljeret gennemgang af timingen mellem trådene.

6.5.2. DataThread

Denne tråd tager sig af use casen Modtag positioneringsdata, og er illustreret med sekvensdiagrammet i Figur 55. Sekvensen gentages i en uendelig løkke i run()-metoden i DataThread, men i figuren er kun vist et enkelt gennemløb af denne løkke.



Figur 55 – Sekvensdiagram for use casen Modtag positioneringsdata.

DataThread blokeres med kaldet receive() og vækkes ved ankomsten af positioneringsdata. Når UDPServer har modtaget data i sin buffer, giver DataThread denne buffer videre til CCurrentField gennem metoden fromStream(). Bufferen indeholder en datapakke med positioneringsdata (se afsnit 6.1.5), som løbes igennem. Først læses timestamp, og variabelen af samme navn opdateres, og herefter læses 7 bytes ad gangen, som indeholder ID samt x-, y- og z-værdi for det pågældende objekt. Afhængigt af ID'et kaldes insertData() på enten CBall-objektet eller det CPlayer-objekt, ID'et svarer til.

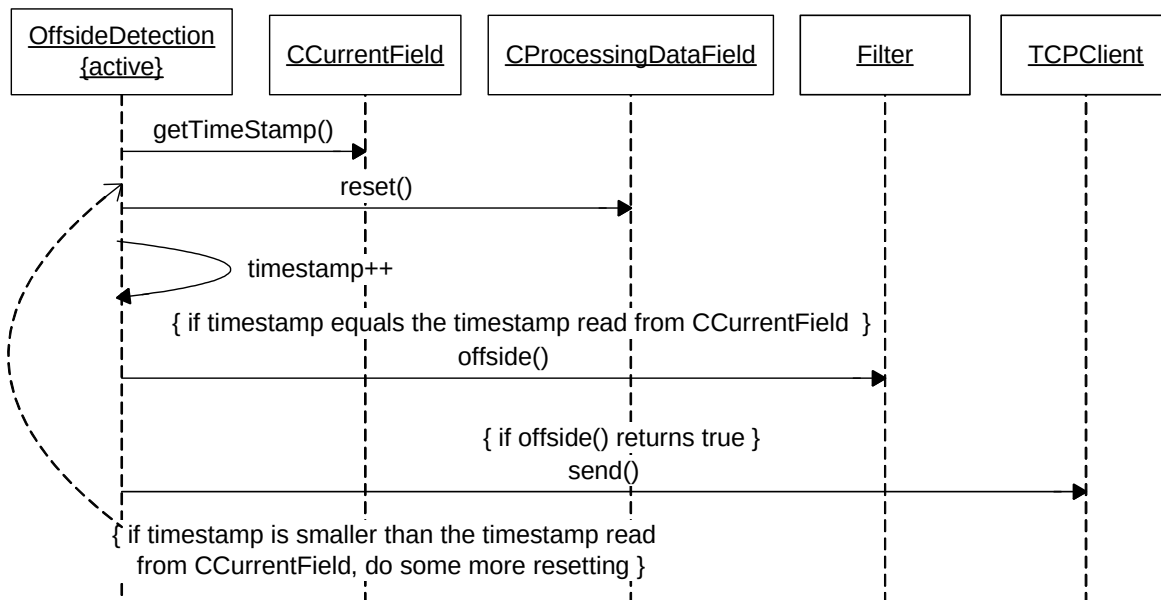
Til CPlayer's `insertData()`-metode hører udover timestamp og x-, y- og z-værdier også en markering af, om data gælder for venstre eller højre ben, så data indsættes i den rigtige buffer. I CBall udregnes hastighed, acceleration og retning som en del af `insertData()`. Dette foregår på baggrund af historiske data, da analysen af boldens bevægelser i kapitel 5 viste et behov for dette. Udover `calcVelocity()` kaldes også `calcAcceleration()` og `calcDirection()`, men disse er ikke vist i Figur 55. For CPlayer udregnes de afledte data ikke af DataThread, da der ikke er brug for dem nær så ofte som det er tilfældet for CBall.

Denne sekvens gennemløbes hvert millisekund, når UDPServer modtager data over netværket. Da der modtages den samme mængde data hvert millisekund, og de samme beregninger skal foretages hver gang, har denne tråd en opførsel, der minder om en kontrolløkke, hvilket gør det let at analysere de tidsmæssige aspekter af systemet ved brug af eksempelvis *Rate Monotonic Analysis* [Liu & Layland], se afsnit 6.5.6.

6.5.3. OffsideDetection

Systemets anden tråd, OffsideDetection, har en noget mindre deterministisk opførsel, da afviklingstiden afhænger af det antal filtre, der skal gennemløbes for at afgøre, om der skal markeres for en muligt strafbar offside. Jo kortere tid det tager at afvise, at der kan være offside, jo tidligere slutter beregningerne. Findes der derimod spillere i en muligt strafbar offsideposition, vil alle filtre (se afsnit 6.4) blive gennemløbet, hvilket selvfølgelig tager længere tid. Desuden har antallet af spillere, de tunge beregninger skal udføres på, betydning for den tid, det tager at gennemføre de nødvendige beregninger.

Er en aflevering blevet detekteret, kan gennemløbet af alle de efterfølgende filtre ikke nødvendigvis nås, inden der kommer nye positioneringsdata. Da der ikke forekommer nye afleveringer i et stykke tid efter detekteringen af en aflevering, kan beregningerne fordeles over de efterfølgende millisekunder. DataThread sørger gennem udregning af hastighed, acceleration og retning for bolden for, at data altid indeholder de informationer, OffsideDetection har brug for til afleveringsdetektering. DataThread er altid sikret at kunne udføres, da denne tråd har højere og prioritet end OffsideDetection og der benyttes priority-based preemption.



Figur 56 – Sekvensdiagram for use casen Udfør offside-detektering.

Når de efterfølgende filtre er gennemløbet, er der i mellemtiden indløbet nye positioneringsdata. OffsideDetection holder styr på, hvilket timestamp, beregningerne er udført

på, og 'spoler frem' til de nyeste data, inden afleveringsdetekteringen begynder forfra. Figur 56 illustrerer, hvorledes dette foregår.

OffsideDetection starter med at finde ud af, hvilket timestamp, de nyeste data kommer fra, og dette gøres ved at kalde `getTimeStamp()` på `CCurrentField`. Herefter bruges `reset()` til at nulstille `CProcessingDataField`, som indeholder de data, filtrene skiftes til at arbejde på. Nulstillingen er ikke vist i Figur 56, men medfører blandt andet, at læsepointeren i de cirkulære buffere i `CBall` og `CPlayer` avancerer en plads.

Herefter gennemføres en løkke, indtil det lokale timestamp svarer til timestamp på de nyeste data. For hvert gennemløb avancerer læsepointeren i de cirkulære buffere, og der lægges 1 til det lokale timestamp. Når de to timestamps er ens, kaldes `offside()` på det første Filter i rækken. Filtrene gennemløbes med rekursive kald som forklaret i afsnit 6.4, hvor også `offside()`-metoden beskrives. Hvis der stadig efter det sidste filter i rækken er spillere, der kan være strafbart offside, bruges `TCPClient` til at udsende offsidemarkeringer. Når denne løkke er gennemført, startes der forfra med at finde det nyeste timestamp hos `CCurrentField`.

Denne fremgangsmåde har ingen betydning for det tidspunkt, hvor afleveringer opdages, hvis alle filtrene er gennemløbet inden den næste aflevering foretages. Dette analyseres nærmere i afsnit 6.5.6. Under forudsætning af, at det sideløbende med datamodtagelse kan nås at afvise ikke-afleveringer indenfor et millisekund, vil fremspoling heller ikke medføre, at afleveringer overses eller opdages senere end nødvendigt. Filtrene til afleveringsdetektering har en deterministisk udførselstid ved ikke-afleveringer, idet alle disse filtre skal gennemløbes for at det kan afvises, at en aflevering har fundet sted.

6.5.4. Synkronisering

De delte ressourcer er beskyttet af semaforer, som forhindrer de to tråde i fortsætte deres arbejde, hvis *race conditions* [Douglass, s. 79] kan give anledning til fejl. `DataThread` må ikke overskrive gamle data i de cirkulære buffere, før `OffsideDetection` er færdig med at bruge dem. Omvendt må `OffsideDetection` ikke læse data, før `DataThread` har skrevet dem, da disse data er affald.

[Stallings 1998, s. 218] kalder dette problem *Bounded-Buffer Producer/Consumer Problem Using Semaphores* og har også en løsning på problemet, som er anvendt i ODA. Løsningen er i Figur 57 omskrevet, så den indeholder fremgangsmåden med at spole frem, som blev forklaret i afsnit 6.5.3.

Semaforen `s` initieres med værdien 1, hvilket tillader den første tråd at komme ind i den kritiske del af koden. `CCurrentField.fromStream()` og `CCurrentField.getTimeStamp()` henholdsvis ændrer og læser timestamp for de nyeste positioneringsdata og skal således beskyttes for at sikre en korrekt afvikling af programmet.

```
//Initially:
s:=semaphore(1);      //allows only one process to enter critical section
n:=semaphore(0);      //prevents OffsideDetection from reading ahead
e:=semaphore(int);    //prevents DataThread from overwriting old data

//DataThread:                                //OffsideDetection:
UDPServer.receive();                               n.wait();
e.wait();                                         s.wait();
s.wait();                                         cur_time:=CCurrentField.getTimeStamp();
CCurrentField.fromStream();                       s.signal();
s.signal();                                     while(l_time<cur_time)
n.signal();                                       CProcessingDataField.reset();
                                                l_time++;
                                                if(l_time==cur_time)
                                                    Filter.offside();
                                                e.signal();
```

Figur 57 – Løsning på Bounded-Buffer Producer/Consumer Problem ved brug af semaforer.

For at forhindre OffsideDetection i at læse timestamp, før der er indsat data, initieres semaforen *n* med værdien 0. Denne værdi bliver først talt op, når *DataThread* er gået ud af sin kritiske sektion og har kaldt *n.signal()*.

Semaforen *e* initieres med en værdi, som afhænger af størrelsen på de cirkulære buffere. Hvis *DataThread* kommer så langt foran, at *e* når ned på 0, blokeres tråden, og OffsideDetection kan få lov at køre. *while*-løkken sikrer, at *e* tælles op lige så mange gange som den bliver talt ned af *DataThread*.

Ved hjælp af denne løsning sikres det, at skrive- og læsepointers i *CBall*- og *CPlayer*-objekterne opdateres lige ofte. Ved hver *CCurrentField.fromStream()*-kald avancerer skrivepointeren en plads, mens *CProcessingDataField.reset()* medfører, at læsepointeren avancerer.

Løsningen i Figur 57 afviger fra løsningen i [Stallings 1998, s. 218], idet *while*-løkken ikke er en del af sidstnævnte løsning. For at bevise en korrekt opførsel i ODA er processerne i Figur 57 modelleret i analyseværktøjet LTSA fra [Magee & Kramer], som har undersøgt, om der kan opstå *deadlock* eller *starvation* i denne løsning. Som det fremgår af appendiks E.2 er denne løsning også korrekt.

6.5.5. Events

Selvom *DataThread* opfører sig som en kontrolløkke, der udfører de samme beregninger hvert millisekund, må ODA betegnes som et *reaktivt* eller *event-driven* realtidssystem [Douglass, s. 58], da systemet reagerer på eksterne events, dvs. modtagelsen af positioneringsdata, og interne events, dvs. detektering af en aflevering.

En analyse af de eksterne events baseret på [Douglass, s. 221] er hurtigt foretaget, idet modtagelse af en datapakke med positioneringsdata er den eneste eksterne event, systemet påvirkes af. Som det blev forklaret i afsnit 6.1.4 er pakketabet på det dedikerede netværk meget lille, så mønstret for ankomst af denne type event (*arrival pattern*) må betegnes som periodisk, med en ankomst hvert millisekund. Systemets svar (*system response*) på en besked (*message*) er et gennemløb af use casen Modtag positioneringsdata, som blev beskrevet på Figur 55 i afsnit 6.5.2. Endvidere skal de filtre, der står for at detektere en mulig aflevering, kunne udføres inden næste datapakke ankommer.

Detektering af en mulig aflevering kan siges at medføre en intern event, som skal besvares med et gennemløb af en række filtre. Denne type event er episodisk (også kaldet aperiodisk [Douglass, s. 221]), og samtidig er det svært at sige noget om, hvor lang tid det tager at besvare den. Som minimum er det dog et krav, at de filtre, som bruges til at detektere afleveringer, kan gennemføres sideløbende med modtagelse af positioneringsdata hvert millisekund. Er en aflevering detekteret, forekommer der ikke en ny indenfor et tidsrum på mindst 250 ms, hvorfor der i den efterfølgende tid ikke behøver udføres afleveringsdetektering. I stedet kan de øvrige filtre gennemløbes i den del af hvert millisekund, der var afsat til afleveringsdetektering (se afsnit 6.5.6). Samtlige filtre skal dog kunne gennemløbes indenfor tidsgrænsen fra Krav1 og skal endvidere være gennemført inden *DataThread* løber tør for bufferpladser til de nye positioneringsdata.

Tabel 7 viser en oversigt over de events, der forekommer i ODA. Deadline for begge events skal generelt kunne overholdes, men en smutter i ny og næ vil ikke medføre at data bliver ubrugelig eller ødelagt, hvorfor de går i kategorien bløde deadlines [Douglass, s. 59].

Event	Type	Ankomstmønster	Frekvens	Svar	Svartid	Deadline
Modtagelse af positioneringsdata	Ekstern	Periodisk	1000 Hz	Opdatering af buffere, filtre til afleveringsdetektering	1 ms	Blød
Detektering af mulig aflevering	Intern	Episodisk	<4 Hz	Gennemløb af filtre	250 ms	Blød

Tabel 7 – Events i ODA.

Mens ODA kan karakteriseres som et event-driven realtidssystem, vil ScenarioSender falde i kategorien *time-driven* realtidssystemer [Douglass, s. 58]. Afviklingen af dette delsystem drives af en cyklisk timer [Larsen & Hansen, s. 51]. Ved indledningen af hvert tidsinterval (1 ms) indlæses positioneringsdata for alle objekterne og afsendes i en datapakke.

Havde Visualizer været et realtidssystem, ville det ligesom ODA skulle betegnes som event-driven, da det reagerer på såvel modtagelse af positioneringsdata som modtagelse af offsidemarkeringer. Dette delsystem har dog ingen tidskrav og afvikles af samme grund på en Microsoft .Net platform.

6.5.6. Timing

I dette afsnit anvendes analysemetoden *Rate-Monotonic Analysis* [Liu & Layland] til at afgøre, om de opsatte deadlines for hver enkelt opgave kan garanteres opfyldt. Denne analyse forudsætter kendskab til eksekveringstiden for de forskellige opgaver, hvilket kan opnås ved at udføre test eller have et meget grundigt kendskab til instruktionssættet på den platform, programmet afvikles.

Figur 58 viser et timing-diagram for de opgaver, der udføres i ODA. Figuren viser princippet i ODA, men de nøjagtige tider stemmer ikke overens med de blokke, der angiver, hvornår hvilken opgave udføres. De nøjagtige tider findes gennem test, som foregår i afsnit 7.2.

Offsidetetektering								
Afleveringsdetektering								
Datamodtagelse								
Tid (ms)	1	2	3	4	5	6	7	8

Figur 58 – Timing-diagram for ODA. Datamodtagelse og afleveringsdetektering foregår hvert millisekund. I tredje millisekund detekteres en aflevering, og herefter gennemløbes de efterfølgende filtre til offsidetetektering fordelt over de næste fire millisekunder. Datamodtagelse forestås af DataThread, mens OffsideDetection tager sig af de andre to opgaver.

Hvert millisekund modtager DataThread en datapakke med positioneringsdata over netværket og beregner hastighed, acceleration og retning for de objekter, der findes i pakken. Positioneringsdata for alle objekter findes i samme datapakke, så der er et så godt som konstant antal beregninger, der skal udføres, og derfor tager det også konstant tid. Afleveringsdetekteringen kan variere en smule, men i de tilfælde, hvor der ikke har fundet en aflevering sted, skal alle filtrene til afleveringsdetektering (se afsnit 6.4.1) gennemløbes, inden det kan fastslås, at bolden ikke er blevet rørt.

I det tredje millisekund i eksemplet i Figur 58 opdages en aflevering af et af de første filtre til afleveringsdetektering, og derfor tager denne opgave kortere tid end normalt. Når en aflevering er detekteret, gennemløbes de efterfølgende filtre, som blandt andet identificerer den afleverende spiller og positionerer spillere nær offsidegrænsen. Denne opgave kan tage lang tid, og i mellemtiden kan tråden afbrydes af DataThread, når der kommer nye data, da der benyttes priority-based preemption. Når offsidetetekteringen er fuldført – hvis der helt tydeligt ikke findes spillere i offsideposition, kan dette gøres på kort tid – vender OffsideDetection tilbage til at detektere afleveringer.

Prioriteter på trådene er baseret på Rate-Monotonic Priority Assignment [Liu & Layland, s. 50], hvor trådenes periodetid (tiden mellem to deadlines) afgør prioriteterne, så tråde med en lav periodetid får høj prioritet. Prioriteterne er statiske og kan således ikke ændres gennem eksekveringen af programmet.

De tre opgaver i Figur 58 udføres af to tråde, hvoraf den ene, DataThread, udfører samme opgave hele tiden. OffsideDetection udfører to forskellige opgaver, som hver især har forskellig periodetid og dermed deadline. Afleveringsdetektering skal kunne udføres sideløbende med datamodtagelse hvert millisekund, men ved detektering af en aflevering

skal denne opgave ikke udføres igen, før offsidedetekteringen er overstået. Derfor kan analysen foretages med den simplificering, at der kun skal laves skemalægning (*scheduling*) for to opgaver ad gangen.

I det følgende beregnes, hvor lang tid der er til rådighed for hver opgave. T_i beskriver periodetiden for opgave i , mens C_i er eksekveringstiden. i kan antage værdierne 1, 2, og 3 for henholdsvis datamodtagelse, afleveringsdetektering og offsidedetektering.

Når der kun er to opgaver, og resten ved divisionen T_i/T_1 er 0, er den teoretiske grænse U for processorudnyttelse 1, dvs. processoren kan udnyttes hele tiden [Liu & Layland, s. 52]. Dette er tilfældet både ved $i=2$ og $i=3$, så processoren kan antages at stå til rådighed hele tiden, hvilket alt andet lige gør det lettere at skemalægge opgaverne.

For at beregne den maksimale eksekveringstid, C_2 , for afleveringsdetektering, antages det i første omgang, at offsidedetektering aldrig skal udføres. Dermed er $T_2 = T_1 = 1$ ms. Med $U=1$ er $C_2 = 1 - C_1$, fordi opgave 2 kan benytte sig af al den processortid, opgave 1 ikke bruger. Målinger i testopstillingen viser at $C_1 = 310$ μ s, hvorfor C_2 maksimalt må være 690 μ s. Kan afleveringsdetektering holde sig på en eksekveringstid under 690 μ s, kan afleveringer detekteres 10 ms efter boldkontakten opstod, jf. afsnit 5.3.

Efter detektering af en aflevering skiftes denne opgave ud med offsidedetektering, og der foretages ingen afleveringsdetektering, før offsidedetekteringen er afsluttet. Igen skal processortiden derfor deles mellem kun to opgaver, og med $T_3 = 250$ er U igen 1. Da $T_3 \neq T_1$, bliver formelen lidt mere kompliceret, nemlig $C_3 < T_3 - C_1(T_3/T_1)$ [Liu & Layland, s. 52]. Indsættes værdier i denne formel fås at $C_3 < 250 - 0,31 \cdot 250 = 172,5$ ms. Beregningerne skal imidlertid være udført inden DataThread løber tør for bufferplads, så hvis tællersemaforen antages at have en startværdi på 30, lyder beregningen i stedet $C_3 < 30 - 0,31 \cdot 30 = 20,7$ ms.

De anvendte formler fungerer under en række antagelser [Liu & Layland, s. 48]. Antagelsen om at udførelsestiden er konstant ved hvert gennemløb er ikke opfyldt, men ved at anvende worst-case-tider kan det alligevel garanteres, at deadlines kan nås, endda med hårde deadlines. I et system som ODA med bløde deadlines ville gennemsnitstider være nok til at garantere rettidig afvikling, men ved at bruge worst-case-tider sikres der samtidig imod længerevarende perioder med lange eksekveringstider.

Uafhængighed mellem opgaverne er heller ikke opfyldt i analysen, men denne afhængighed er meget lille. Forudsat at DataThread ikke løber tør for bufferplads, hvilket sikres ved at holde C_2 og C_3 under de beregnede grænser, kan T_1 kun blokeres af lavereprioriterede opgaver i et kort øjeblik. OffsideDetection låser adgangen til den kritiske sektion, når den aflæser det nyeste timestamp på `CCurrentField`, men dette må antages at tage så kort tid, at der kan ses bort fra det.

Ved at dele analysen op i to dele og antage alle opgaver til at være periodiske omgås ydermere bruddet med antagelsen om, at ikke-periodiske opgaver er specielle og ikke har deadlines. Opsplitningen vurderes dog ikke til at have nogen negativ betydning for analysen, da afleverings- og offsidedetektering ikke overlapper hinanden i tid.

Tidsmålingerne i afsnit 7.2 viser, at eksekveringstiden i værste tilfælde er 50 μ s for afleveringsdetektering og 2,3 ms for offsidedetektering, og derfor er det muligt at overholde alle deadlines, selv om de skulle betragtes som hårde. Samtidig er der masser af tid til at tilføje ekstra funktionalitet uden at overskride deadlines.

7. Test

7.1. Testdata	83
7.2. Tidsmålinger	84
7.3. Test af funktionalitet	86
7.4. Delkonklusion	88

I dette kapitel udføres test af den udviklede prototype, ODA. Først beskrives testdata, dernæst udføres tidsmålinger, og til sidst testes systemets funktionalitet, mens der sammenlignes med DommerStøtteSystem fra [Larsen & Hansen]. Testopstillingen er beskrevet i appendiks E.3.

7.1. Testdata

Som beskrevet i afsnit 4.1 er de oprindelige Qualisys-optagelser støjfyldte og unøjagtige, og derfor er der blevet lavet nogle ekstra optagelser, som er blevet brugt til at verificere de fundne sammenhænge i bevægelsesanalysen (se afsnit 4.3). De samme data er brugt til at sammenstykke testscenarier med den dertil udviklede applikation Datakonvertering (se appendiks E.1).

Sammenstykningsen af testscenarier er et større puslespil, idet boldens bane og spillernes løbemønstre skal passe sammen, så der hele tiden er en spiller i nærheden af bolden, når den skifter retning eller fart. På grund af det begrænsede mængde data er det især svært at finde spillerbevægelser der kan sættes sammen, så spilleren har den rette afstand til bolden på det rette tidspunkt. Samtidig skal scenarierne også gerne udforske forskellige dele af offsidereglen undervejs.

Det største problem med Qualisys-optagelserne i forbindelse med test er, at bolden bevæger sig i en hakkende bane. På afstand ser det pænt ud, men zoomer man tæt ind på boldens bane, kan man se små retningsskift fra frame til frame. Da retningsskift er en vigtig del af afleveringsdetekteringen, er boldens baner glattet ud ved hjælp af et værktøj i Qualisys Track Manager. Ved at fjerne nogle af positionerne i datafilen kan man efterfølgende få hjælp til at udfylde hullerne i boldens bane. Her kan man 'trække i enderne' af hullet, og værktøjet viser så den bane, der bedst forener retningen på de to endestykker. Det er altså retningen på de to stykker på hver sin side af hullet, der afgør den mellemliggende bane, så ved at gøre hullet større eller mindre kan man få en bane, der ser nogenlunde ud som man vil have den.

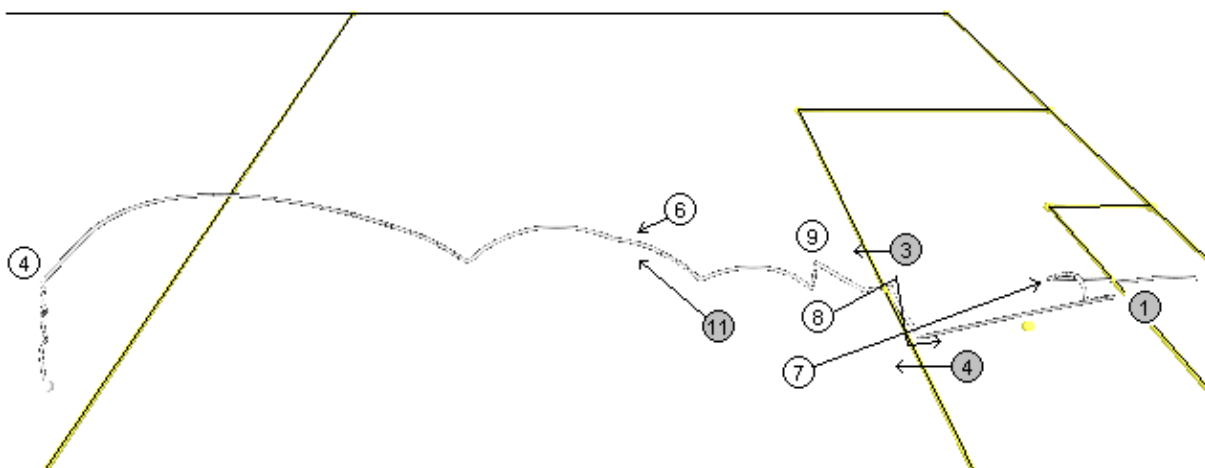
Ved retningsskift og når bolden hopper på jorden er det svært at få boldens bane til at se ordentlig ud, fordi der kun er få valgmuligheder for, hvor stort man kan trække hullet. Selvom resten af boldens bane kan gøres helt glat, kan der i testdataene forekomme små retningsskift lige før eller efter et reelt retningsskift, og det betyder, at det reelle afleveringstidspunkt ikke kan fastslås nøjagtigt. En yderligere unøjagtighed i boldens baner er, at Datakonvertering interpolerer fra de 240 Hz, Qualisys-optagelserne er lavet med, til 960 Hz. Denne interpolation foregår lineært, og derfor forekommer retningsskiftene at ske midt imellem to Qualisys-frames. Et positioneringssystem, som lever op til kravene opstillet i afsnit 3.1.6, antages at kunne levere data, hvor boldens bane foregår som en glidende bevægelse, når den ikke røres af en spiller eller en genstand.

De fleste typer bevægelser for bold og spillere i den sparsomme mængde data er dækket af de to scenarier, der beskrives herunder.

Scenario 1

Det første scenario er vist i Figur 59. Bolden kommer hoppende mod den hvide nummer 4, der sparker den fremad. Bolden rammer jorden og hopper op i luften igen, hvorefter hvid nummer 6 og grå nummer 11 går op i en hovedstødsduel, som førstnævnte vinder.

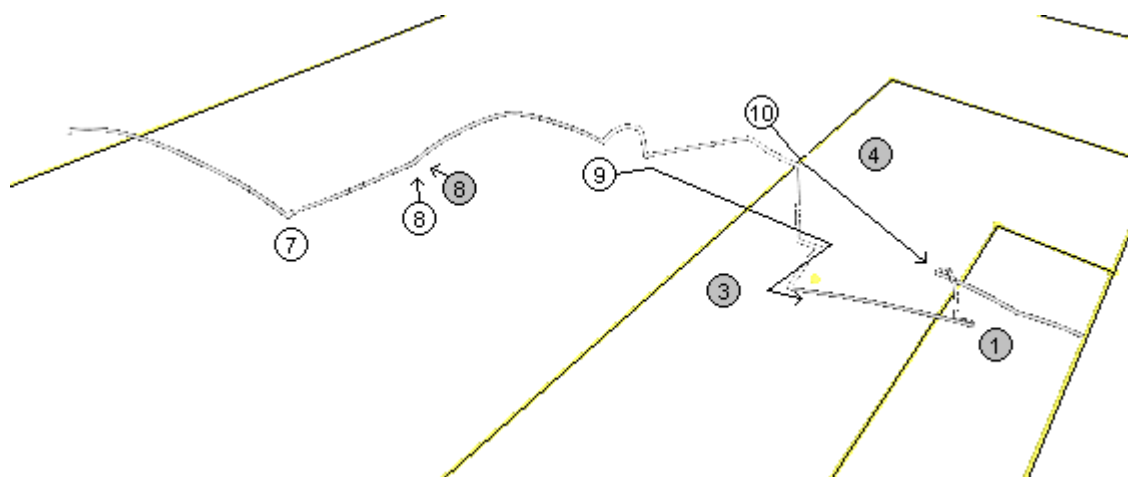
Hvid nummer 8 modtager bolden, spiller den til hvid nummer 9 og får den tilbage med det samme, hvorefter han dribler mod højre og sparker på mål. Grå nummer 1, som er målmanden, redder skuddet, men hvid nummer 8 er løbet ind i straffesparksfeltet og kan skyde bolden i mål. Grå nummer 3 og grå nummer 4 løber fremad for at presse det hvide holds spillere og for at få det hvide holds spillere til at stå i offsideposition.



Figur 59 – Scenario 1.

Scenario 2

Det andet scenario er vist i Figur 60. Hvid nummer 7 tæmmer bolden og spiller ind mod midten, hvor de to holds nummer 8 kæmper om den. Hvid nummer 8 får spillet bolden i en blød bue frem mod hvid nummer 9, som tæmmer den og spiller til hvid nummer 10. Hvid nummer 10 løber med bolden og spiller tilbage til hvid nummer 9, der tager et træk til højre og skyder på mål. Målmanden, grå nummer 1, redder bolden, men hvid nummer 10 er løbet med frem og kan afslutte mod mål.



Figur 60 – Scenario 2.

De to scenarier ligger til grund for tidsmålingerne og testen af funktionaliteten i de efterfølgende afsnit.

7.2. Tidsmålinger

I dette afsnit beskrives resultaterne af de tidsmålinger, der er foretaget for at kunne analysere tidsforbruget, jf. afsnit 6.5.6. Tidsforbruget for begge trådene er blevet målt i forskellige opsætninger for at give et billede af, hvor godt ODA kan forventes at leve op til reeltidskravene under såvel normale omstændigheder som i de værste tilfælde.

Ved hver test er de to scenarier fra afsnit 7.1 begge blevet afspillet 10 gange for at mindske usikkerhederne i tidsmålingerne. Variationen fra måling til måling er meget lille, så de statistiske usikkerheder formodes at være små.

I første test er det blevet målt, hvor lang tid `DataThread` bruger på at modtage data og tilføje disse data i de buffere, der er tilknyttet bold og spillere. For at give det bedst mulige billede af tidsforbruget er filtermekanismen slået fra, så `OffsideDetection` ikke bruger tid på andet end at tælle de tre semaforer op og ned, således af `DataThread` kan fortsætte uden forstyrrelser.

`DataThread` består meget forenklet af to metoder, som skal kunne udføres hvert millisekund: `receive()` læser data fra netværket, og `fromStream()` opdaterer bufferne med historiske data for bold og spillere. Førstnævnte metode tager i værste tilfælde 866 μ s at blive udført, mens sidstnævnte kan tage op til 156 μ s.

Ved første blik ser det altså ud til, at datamodtagelsen tager en stor del af tiden, og at det kniber med at nå begge dele. Sådan forholder det sig dog ikke, for ved at øge arbejdsbyrden i `fromStream()` måles denne opgave nu til at tage op til 709 μ s, mens datamodtagelsen er nede på 368 μ s i værste tilfælde. Størstedelen af tidsforbruget i `receive()` skyldes altså at tråden skal vente på, at der kommer data ind fra netværket. Der er set målinger på helt ned til 101 μ s, så `receive()` kan forsigtigt antages at kunne udføres på 150 μ s.

Målinger af de tre filtre til afleveringsdetektering viser, at det tager mellem 0 og 46 μ s at udføre denne opgave. Når det kan tage ned til 0 μ s skyldes det dels opløsningen i tidsenhederne i RTOS-32, dels at det i visse tilfælde allerede i det første filter, `Acceleration`, kan slås fast, at en aflevering har fundet sted, hvorfor de andre filtre ikke behøver udføre beregninger. Ved denne tidsmåling har de to tråde haft ens prioritering, hvorfor `OffsideDetection` ikke har kunnet risikere at blive afbrudt undervejs. Det er derfor den reelle udførselstid for denne opgave, der er blevet målt.

Afleveringsdetektering er den mest simple opgave, der kan udføres af `OffsideDetection`. Når der er detekteret en aflevering, begynder den reelle offsidetetektering, og dette kan tage kortere eller længere tid afhængigt af, hvor mange spillere, der skal udføres tunge beregninger for. Ved at antage at de tunge beregninger skal udføres for alle spillere (hvilket opnås ved at bruge positioneringsstrategien `CalculatedPositioning` på alle spillere), kan den værst tænkelige udførselstid måles. Igen gives der samme prioritet til begge tråde, og nu kan det ses, at det i værste fald kan tage 4010 μ s at udføre `offside()`.

Gives der højere prioritet til `DataThread`, som det er tilfældet i en normal opsætning, kan det tage op til 10,6 ms i reel tid at udføre `offside()` med denne positioneringsstrategi. Ved at bruge den normale opsætning med en indledende grov filtrering på baggrund af en simpel positioneringsstrategi (se afsnit 6.4.3), vil det for de to testscenarier aldrig tage mere end 2,3 ms i reel tid at udføre de nødvendige beregninger. Udskrifter viser samtidig, at det på intet tidspunkt har været nødvendigt at springe over data fra mere end ét millisekund, når der 'spoles frem' som forklaret i afsnit 6.5.3. Offsidetetekteringen kommer derfor på ingen måde til at lide under brugen af denne mekanisme.

Alt i alt kan følgende tider antages at kunne bruges som worst-case-tider for de forskellige delopgaver, når der tages højde for afrundingsfejl i RTOS-32:

- `Receive()`: 150 μ s
- `FromStream()`: 160 μ s
- Filtre til afleveringsdetektering: 50 μ s

Det er disse opgaver, der skal udføres hvert millisekund, og der står dermed rundt regnet 640 μ s til rådighed for de resterende filtre til offsidetetektering.

7.3. Test af funktionalitet

Testen er foregået i testopstillingen fra appendiks E.3, og med grænseværdier, som ligger et stykke fra de teoretiske, der blev opstillet i afsnit 5.3. Det antages, at unøjagtigheder i Qualisys-dataene ikke vil forekomme i et virkeligt positioneringssystem, så de teoretiske grænseværdier kan opfyldes.

I testen har grænseværdierne været acceleration på 250 m/s^2 over 10 ms, (x, y)-retningsskift på 20° og (x, z)-retningsskift på 15° . Samtidig benytter filtret DirectionXZ sig af en grænseværdi på 20 cm, således at (x, z)-retningsskift for bolde under denne højde tolkes som at bolden har hoppet på jorden. Havde en spiller rørt bolden i denne højde, må han have brugt foden, og der er ret så usandsynligt, at bolden i så fald ikke har skiftet fart eller retning og at afleveringen derfor er blevet detekteret af et af de andre to filtre.

I Tabel 8 ses resultaterne fra testen af scenario 1. De øverste to rækker viser, i hvilke frames i det sammensatte scenario, der vurderet ud fra afspilningen i Qualisys Track Manager er foregået begivenheder, der har ændret boldens adfærd. De næste to rækker er en angivelse af, om den pågældende begivenhed skal tolkes som en aflevering, og hvor mange centimeter den forreste angriber er foran næstsidste forsvarsspiller.

Begivenhed	Hop på jorden	Hop på jorden	Hop på jorden	Langt spark	Hop på jorden	Hovedstød	Hop på jorden	Aflevering	Bande	Medtagning	Træk	Let berøring	Skud	Redning	Hop på jorden	Spark	Hop på jorden	Hop på jorden
Frame	377	494	585	613	1081	1332	1487	1708	1798	1923	2028	2172	2339	2410	2459	2653	2724	2816
Boldberøring				x		x		x	x	x	x	x	x	x		x		
Offside	207	108	8	0	104	154	16	0	-13	For.	For.	For.	44	225	For.	For.	For.	For.
Acceleration				613	1079				1799				2338			2654		
(x, y)	375		587	612	1083			1708	1797	1921	2027		2338	2411	2461	2652		
(x, z)						1332								2410				
Afleverende spiller	0, 0		0, 0	1, 0	0, 0	1, 0		1, 0	1, 0	1, 0	1, 0		1, 0	0, 0	?	1, 0		
Offside ODA				614		1332							2340			2652		
Offside DSS					1079								2338					

Tabel 8 – Test af scenario 1.

Herefter er der tre rækker med angivelser af, hvornår de tre filtre til afleveringsdetektering har detekteret ændringen i boldens opførsel. Filtrene er testet et ad gangen for at kunne se, hvilke filtre, der detekterer hvilke afleveringer. Næstfølgende række beskriver,

hvor mange spillere fra hvert af de to hold, der er tæt nok på bolden til at kunne have afleveret den, og de sidste to rækker kan bruges til sammenligning af ODA og DommerStøtteSystem.

Som det ses kan acceleration kun bruges til at detektere en lille del af afleveringerne i scenariet. Omvendt kan den lette berøring i frame 2172 ikke detekteres på grund af de høje grænseværdier anvendt i testen. Kombinationen af unøjagtige testdata og deraf afledte høje grænseværdier formodes at være skyld i flere af de underlige resultater i tabellen, for eksempel at der nogle gange opleves retningsskift på over 20°, når bolden hopper på jorden. Af uforklarlige årsager overses endvidere hoppet på jorden i frame 2459, når alle filtrene sættes sammen.

ODA er trods disse vanskeligheder i stand til at vurdere de to offsidetituationer i scenariet korrekt, mens der i de to tvivlsomme tilfælde, hvor angriberen er på linje med næstsidste forsvarsspiller, dømmes offside i den ene. Der er en enkelt fejlvurdering i frame 2653, hvor angriberen vurderes til at være offside, selvom han er forreste spiller og selv har bolden. Denne situation tages der ikke højde for i nogen af filtrene, så der er en naturlig årsag til fejlen.

DommerStøtteSystem har noget mindre held i sine vurderinger, og det skyldes først og fremmest, at der kun detekteres fem af de elleve afleveringer ændringer i bolden opførsel gennem scenariet, som skyldes spillerberøringer. Der dømmes korrekt i et enkelt tilfælde, mens der afgives en fejlvurdering på et tidspunkt, hvor bolden hopper på jorden og samtidig får ekstra fart på. Denne situation vil dog ikke forekomme i virkeligheden, men skyldes sammensætningen af boldens bane ud fra forskellige stykker.

Begivenhed	Tæmning	Hop på jorden	Hop på jorden	Hop på jorden	Aflevering	Aflevering	Hop på jorden	Tæmning	Hop på jorden	Aflevering	Medtagning	Aflevering	Medtagning	Træk	Let berøring	Spark	Redning	Hop på jorden	Spark	Hop på jorden
Frame	449	515	569	614	618	709	911	1063	1245	1256	1454	1663	1898	1996	2146	2305	2374	2444	2638	2699
Boldberøring	x				x	x		x		x	x	x	x	x	x	x	x		x	
Offside	-38	57	113	128	129	78	-254	-384	-173	-171	For.	-32	For.	For.	88	51	-13	For.	For.	For.
Acceleration					617					1256		1663				2304			2639	
(x, y)	450	515	566+			710		1065			1452	1662	1898	1994		2304	2374	2443	2637	
(x, z)								1063		1255		1664	1895	1996	++	2301	2374	2442	2640	
Afleverende spiller	1, 0	1, 0	0, 0	0, 0	1, 0	?		1, 0		1, 0	1, 0	0, 0	1, 0	1, 0		1, 0	1, 0	1, 0	1, 0	
Offside ODA		515			620											2301				
Offside DSS					617											2304				

Tabel 9 – Test af scenario 2.

I scenario 2 er de to systemer begge i stand til at vurdere to af de tre offsidesituationer korrekt, mens ODA fejlagtigt tolker et hop på jorden som en aflevering. Denne fejl skyldes at boldens z-værdi overskrider grænseværdien på 20 cm, hvilket skyldes sammensætningen af scenariet og ikke vil forekomme i virkeligheden. Den lette berøring i frame 2146 er den samme som i scenario 1 og detekteres heller ikke denne gang. Desuden overses afleveringen i frame 710, hvor der reelt skal afgives offsidemarkering. Ligesom ved scenario 1 overses en aflevering, når alle filtrene sættes sammen, men det er ikke lykkedes at finde frem til årsagen til dette problem. Det skyldes dog ikke fremspoling (se afsnit 6.5.3), da der ikke bruges mere tid end at det hele kan nås.

7.4. Delkonklusion

Grundet unøjagtighed og begrænset realisme i den lille mængde testdata har det ikke ladet sig gøre at teste ODA's funktionalitet til fulde. De høje grænseværdier, som skyldes unøjagtigheder i de simulerede positioneringsdata, bærer en del af skylden for visse mangler i afleveringsdetekteringen. Testen har dog også vist et behov for yderligere filtre for at ODA kan bruges til offsidedetektering i elitefodbold, og detaljerede forslag til disse gives i afsnit 9.2.

I den forbindelse er det en nyttig information, at tidsmålingerne viste masser af uudnyttet processorkraft. Der er således intet tidsmæssigt til hinder for at systemet kan udvides med yderligere funktionalitet.

Sammenlignet med DommerStøtteSystem er ODA en klar forbedring, idet 5 af de 7 faktiske offsidesituationer vurderes korrekt, mens de to tvivlsomme tilfælde falder ud til hver sin side. DSS vurderer 3 af de 7 situationer korrekt, mens de to tvivlsomme ikke detekteres på grund af afleveringsdetekteringen. Netop i afleveringsdetekteringen halter DSS, idet der kun detekteres 5 ud af 12 henholdsvis 4 ud af 10 afleveringer, når kun acceleration bruges som detekteringsmekanisme. For ODA er tallene 10 og 9, men der opdages også afleveringer, der ikke eksisterer. For en dels vedkommende skyldes det som beskrevet usikkerheder i positioneringsdata og sammensætningen af dele til et samlet scenario.

8. *Fremskridt*

Specialet her bygger videre på specialet fra [Larsen & Hansen] og den deri udviklede prototype DommerStøtteSystem, og i dette kapitel forklares det, hvilke fremskridt der er gjort i specialet.

Fokus på krav

Det første fremskridt er en definering af de krav, en kunde kunne forestilles at have til et computerbaseret system til offsidedetektering.

Dernæst er der i kapitel 2 foretaget en grundig gennemgang af offsidereglen, hvor alle unøjagtigheder er blevet afklaret, og præciseringerne strider imod nogle af antagelserne i det tidligere speciale. [Larsen & Hansen, s. 27] antager eksempelvis afleveringsøjeblikket til at være, når kontakten mellem bold og støvle ophører, men dette strider mod opfattelsen hos dansk fodbolds øverste organ, DBU, som er taget med på råd i dette speciale. I de 10 ms, hvor der er kontakt med bolden, kan spillerne flytte sig op til 7 cm, så det er ikke helt irrelevant for positionering af spillerne, hvornår afleveringstidspunktet opfattes at være. Omkring definering af, hvad det vil sige at være nærmere mållinjen end næstsidste modspiller, er [Larsen & Hansen, s. 11] dog lovligt undskyldt, idet reglerne på dette område har ændret sig.

I afsnit 3.1 er kravene til ODA blevet analyseret fra en leverandørs synsvinkel, og den nødvendige præcision er blevet fastslået. I [Larsen & Hansen] blev kravene hverken opstillet eller analyseret.

Nøjagtig positionering af spillere

For identifikationen af den afleverende spiller er det især interessant, at det ikke nødvendigvis er spilleren nærmest bolden, der har rørt den. [Larsen & Hansen, s. 27] antog spilleren nærmest bolden som værende den afleverende spiller, hvilket kan give anledning til fejlkendelser. Analysen af systemkravene viste, at systemet hellere skal angive en tvivl end at lave en forkert vurdering, og dette opnås i ODA gennem mængderne af spillere, der kan have rørt bolden, jf. afsnit 6.3.

Heller ikke i positionering af spillere nær offsidegrænsen (hvor der kan tillades 15 cm unøjagtighed) eller i detektering af afleveringer (som skal være så godt som 100 % korrekt) lever DommerStøtteSystem op til kravene.

For at kunne leve op til kravet om præcis positionering af punktet nærmest mållinjen på spillerne, er der i kapitel 4 blevet foretaget en bevægelsesanalyse i samarbejde med en forsker indenfor dette felt, og her er en sammenhæng mellem benenes og skuldrenes placering blevet kortlagt for almindeligt løb. Dette blev ikke gjort i [Larsen & Hansen], hvor spillerne blev positioneret som ét punkt. Da der jf. afsnit 4.3 kan være over 80 cm mellem spillerens skinneben – og heri er ikke engang regnet de ca. 10 cm, som spillerens fødder jf. afsnit 4.2 befinder sig udenfor dette område – er brugen af kun ét punkt langt fra præcist nok til at kendelserne ikke kan falsificeres af tv-billeder.

På baggrund af bevægelsesanalysen ser det ud til, at positioneringsdata om begge spillernes ben er tilstrækkeligt til at positionere spillerne præcist nok til at leve op til kravene. Analysen er foregået med semi-realistiske positioneringsdata, som desuden har kunnet fungere som testdata på mere realistisk vis end de i ScenarioGenerator [Larsen & Hansen, s. 44] manuelt opsatte scenarier kunne gøre.

Afleveringsdetektering

Den væsentligste faktor i vurderingen af offsidesisuationer er dog, at afleveringer detekteres korrekt. DommerStøtteSystem detekterer udelukkende afleveringer ved at kigge på boldens acceleration [Larsen & Hansen, s. 40], og i de opsatte testscenarier er dette kun nok til at detektere 9 ud af 22 boldberøringer.

I afsnit 3.3.3 vises det, at det også er nødvendigt at kigge på boldens retning – endda i tre dimensioner – for at kunne detektere alle afleveringer, og med dette implementeret i ODA detekteres praktisk talt alle ændringer i boldens opførsel. Der mangler dog stadig at blive implementeret flere filtre, så alle ikke-afleveringer sorteres fra (se afsnit 9.2).

For at ændringer i boldens opførsel kan detekteres, er der i kapitel 5 blevet foretaget en analyse af boldens bevægelser med henblik på at kunne filtrere retningsskift fra, som ikke er forårsaget af, at spillere har rørt bolden. Her viste det sig, at et koordinatsystem med en enhedsstørrelse på 1 cm [Larsen & Hansen, s. 25] er for grov i opløsningen til at være anvendelig til afleveringsdetektering.

Udvidbart og modificerbart design

De nævnte forbedringer i afleveringsdetektering, identifikation af den afleverende spiller og positionering af spillere nær offsidegrænsen er indarbejdet i den nye prototype ODA. Den højere opløsning, brugen af testdata i 3 dimensioner og data for to punkter pr. spiller har desuden medført ændringer i de tilhørende delsystemer, ScenarioSender og Visualizer.

I samme forbindelse er der foretaget en forbedring af de førhen mere eller mindre monolitiske delsystemer, så de nu fremtræder mere objektorienteret. I ScenarioSender er der blevet indført en enkelt klasse på 126 linjer kode, og ved at tilføje denne klasse er den centrale klasse i delsystemet blevet reduceret fra 875 til 414 kodelinjer. For Visualizers vedkommende har en klasse på 65 kodelinjer reduceret den centrale klasse fra 1523 til 1216 linjer kode. Over halvdelen af denne klasse består af kode til den grafiske brugergrænseflade og af tråde til datamodtagelse, så forskellene træder ikke så synligt frem. Forbedringerne, som samtidig gør systemerne lettere at vedligeholde og modificere, er opnået samtidig med at der gøres brug af 3-dimensionelle data og gives positioneringsdata for to punkter pr. spiller frem for ét. Endvidere skal der kun ganske små ændringer til for at benytte tre eller fire punkter pr. spiller.

ODA har gennemgået en større forvandling i forhold til DommerStøtteSystem, som dog i modsætning til de to andre delsystemer var opbygget på objektorienteret vis og derfor var lettere at gå til. I DommerStøtteSystem kunne alle de nødvendige beregninger foretages på under et millisekund, men med flere beregninger til især positionering af spillere har det været nødvendigt at lave designet grundlæggende om i ODA. Arbejdet deles nu mellem to tråde, der har ansvaret for henholdsvis datamodtagelse og offside-detektering. På denne måde kan beregningerne til offside-detektering deles ud over et længere tidsrum uden at muligt strafbare offside-situationer overses.

Endvidere foregår afleverings- og offside-detektering gennem en række filtre, som kan sammensættes efter behov, og yderligere funktionalitet kan tilføjes ganske enkelt. Filtermekanismen gør det meget lettere at tilføje funktionalitet i systemet, og opdelingen i to tråde giver mulighed for mere komplicerede beregninger uden at det behøver gå ud over deadlines.

Test

Som man måske kunne forvente, har test foretaget i kapitel 7 vist, at ODA især i afleveringsdetekteringen gør et bedre stykke arbejde end DommerStøtteSystem. I de to testscenarier detekteres 19 af 22 i stedet for kun 9 af 22 boldberøringer, og dette sker endda selvom grænseværdien for acceleration er langt lavere end den, der benyttes i DommerStøtteSystem [Larsen & Hansen, s. 67], hvilket betyder flere detekterede afleveringer. Forbedringerne i positionering af spillerne og i identifikation af den afleverende spiller er lidt vanskeligere at måle. Alt i alt detekteres 5 i stedet for 3 ud af 7 faktiske offside-situationer, og med mere realistiske data formodes det at kunne forbedres.

Med disse fremskridt må dette speciale betegnes som endnu et skridt på vej mod visionen om computerbaseret offside-detektering. Der er stadig yderligere skidt at tage, og forslag til sådanne fremføres i kapitel 9.

9. Fremtidigt arbejde

9.1. Kommunikation til linjedommerne	91
9.2. Filtre	92
9.3. Videre bevægelsesanalyse.....	94
9.4. Forretningspotentiale i andre sportsgrene	95

I dette kapitel beskrives noget af det arbejde, der med fordel kan udføres, før ODA kan lanceres som et funktionelt system til brug i topfodbold. Der fremføres idéer til kommunikationen af offsidemarkeringer, som skal foregå på sikker vis, og der gives detaljerede forslag til flere filtre for at kunne reducere mængden af unødvendige markeringer. Endvidere vil man med yderligere bevægelsesanalyse kunne give endnu mere præcise omrids af spillerne. Til sidst vurderes mulighederne for at kunne sælge systemet til brug i andre sportsgrene.

Inden de mere detaljerede forslag skal det også nævnes, at ODA i kraft af sin status som prototype kun indeholder den basale funktionalitet. Som eksempel kan nævnes, at koordinatsystemet ikke tillader bolden at forlade mållinjen i venstre side af banen, og at der ikke er lavet grænseflader til konfiguration af for eksempel banestørrelse. Der er heller ikke taget højde for, at spillere eller bold kan skiftes ud i løbet af kampen.

Udover offsidetetektering kunne der også laves andre tiltag til at hjælpe dommertrioen med at dømme. Med et nøjagtigt positioneringssystem er det oplagt at lade systemet afgøre, om bolden har forladt banen til indkast, målspark, hjørnespark eller måske endda mål.

Ydermere kan samme positioneringssystemet bruges til at måle afstanden fra bolden til forsvarsmuren ved frispark, så frisparksskytten får den regelbestemte afstand på 9,15 meter. Dette kræver logik til at detektere, når der er dømt frispark, hvilket allerede er implementeret i Cairos' system, som kan detektere et væld af begivenheder [Cairos2]. Dette bruges som nævnt i afsnit 3.2.2 til at give diverse statistikker om spillere og hold. Al denne funktionalitet behøver ikke foregå i ODA, men kan klares af andre delsystemer, idet positioneringsdata udsendes med multicast. Der skal dog tages hensyn til, hvordan disse delsystemer i så fald kan kommunikere markeringerne ind til dommertrioen uden at forstyrre hinanden.

9.1. Kommunikation til linjedommerne

At kommunikere offsidemarkeringer til linjedommerne skal ifølge Krav3 foregå på en sikker måde, så markeringerne ikke kan ødelægges, forfalskes eller opsnappes. Denne sikkerhed kunne opnås med en metode som den der anvendes i GoalRef [Lassen], som er et system til at afgøre, om bolden er i mål.

Kommunikationen i GoalRef maskeres ved hele tiden at kommunikere med linjedommerens apparat, som eksempelvis kunne være et armbåndsur, som så aktiverer en vibrator eller en øresnegl. På forhånd er armbåndsuret konfigureret med et antal positive beske-der, som betyder mål. Det først scorede mål består således af et bestemt bitmønster, mens det næste mål er beskrevet af et andet bitmønster og så videre. På den måde er det ikke muligt at opsnappe en besked og genspille den ved en senere lejlighed. Alle andre bitmønstre betyder, at der ikke er mål, og de afsendte markeringer for mål vil for en tilhører ikke kunne opsnappes.

Bluetooth er en standard for trådløs kommunikation, som i GoalRef anvendes til at kommunikere målbeskeder til dommeren og altså også beskeder til maskering. Bluetooth benytter sig af *frequency hopping* [Stallings 2002, s. 481], hvilket gør det svært at ødelægge kommunikationen med jamming, da der skiftes frekvens 1600 gange i sekundet.

Denne metode kan også anvendes til kommunikation af offsidemarkeringer. Alt efter informationen i de afsendte markeringer skal der oprettes forskellige bitmønstre, som kan bruges til hver deres besked. Ønsker man eksempelvis at give besked om antallet af spillere i muligt strafbar offsideposition, kan man forestille sig bitmønstre for '1 spiller', '2 spillere', '3 spillere' og så videre, og ved hver modtaget besked skal linjedommerens ur så kigge på næste besked i hver af disse mængder for at afgøre, om beskeden er 'falsk' eller indeholder reel information.

I GoalRef-løsningen udsendes beskeder med 10 millisekunders mellemrum, som optager en del af de 250 millisekunder, der er tidskravet jf. Krav1. Derfor vil der være lidt mindre tid at udføre de nødvendige beregninger i.

Krav11 definerer et ønske om, at spilleren eller spillerne i muligt strafbar offsideposition identificeres overfor linjedommeren med deres rygnummer, så linjedommeren ved nøjagtigt, hvem han skal holde øje med. Dette kan ikke kommunikeres med en vibrator, men det er muligt med en øresnegl med indbygget højttaler. Hvis linjedommeren skal kunne nå at opfatte en besked i en øresnegl, kan der ikke nås mere end ét rygnummer indenfor de 250 ms, der er til rådighed. Hvis der er flere spillere i muligt strafbar offsideposition, bør der således kun gives besked om antallet af spillere.

En mere avanceret løsning kunne være at udstyre linjedommerne med et *head-up display*, så offsidemarkeringerne kan præsenteres for linjedommerne i tekstform samtidig med at de kan følge med i spillet på banen. Et sådant display må dog ikke begrænse linjedommerens bevægelsesmuligheder, da de stadig skal kunne løbe frem og tilbage langs sidelinjen for at kunne holde øje med spillets udvikling og vurdere det strafbare i offside-situationerne.

9.2. Filtre

På afleveringstidspunktet for spillet er offsidetetektering implementeret af syv filtre, som tilsammen udfører den mest basale filtrering. Der kan med fordel laves flere filtre for at begrænse antallet af offsidemarkeringer i situationer, hvor spillere i offsideposition alligevel ikke deltager aktivt i spillet. Formålet med dette er at undgå at oversvømme linjedommerne med offsidemarkeringer i situationer, der ikke kan være strafbare. Detaljerede idéer til sådanne filtre præsenteres i dette afsnit.

Afleveringens retning og længde

Det er ved de færreste boldberøringer, en spiller i offsideposition kan komme til at deltage aktivt i spillet. Tæmninger og driblinger hører til denne kategori, og det vil være generende for en linjedommer at modtage offsidemarkeringer hver gang, en spiller rører bolden samtidig med en medspiller står i offsideposition. Heller ikke korte, bagudrettede afleveringer på egen banehalvdel kan føre til strafbare offsidepositioner, da spillere i offsideposition i praksis aldrig kan deltage aktivt i spillet, da de er så langt væk fra bolden (man skal være på modstanderens banehalvdel for at kunne være i offsideposition, jf. afsnit 2.1), at de ikke kan komme til at spille den.

Ved at kigge på boldens hastighed, retning, højde og tid i luften kan man ekstrapolere sig nogenlunde frem til, hvor bolden vil ende. [Hall, s. 340] beskriver nogle formler til beregning af projektilers bane. Formlerne tager ikke højde for luftmodstand, så de beregnede baner vil få en parabelform, og vil være længere end i virkeligheden, selv med medvind. Derfor kan de fungere som optimistiske gæt på, hvor langt bolden kan nå, og dermed pessimistiske gæt på, om spillere i offsideposition kan komme til at spille videre med afleveringen.

Formlerne i [Hall, s. 340] har endvidere den begrænsning, at kun stedet hvor bolden lander, kan beregnes. Efter at bolden har hoppet på jorden vil den fortsætte sin bane, men med en ny parabel. I sammenstødet med jorden mister bolden meget af sin fart, og den nye parabel vil derfor være mindre. [Wesson, s. 11] beskriver, at en bold på kortklippet græs vil miste 40 % af sin fart, når den hopper på jorden, og dette tal kan bruges

til at forudsige, hvor langt bolden vil komme i de efterfølgende hop. Ved længere græs mistes endnu mere fart, så et estimeret farttab på 40 % gør igen længden på afleveringen større end i virkeligheden. Dermed vil bolden beregnes til at kunne nå frem til en spiller i offsideposition, selvom den i virkeligheden ikke kan, og således risikeres det ikke, at strafbare offside-situationer overses.

Ved meget flade afleveringer er det ikke sikkert, en estimering som denne giver et korrekt billede af afleveringens længde, idet bolden kan trille langt, når den er færdig med at hoppe. En undersøgelse af dette fænomen er nødvendigt for at sikre, at gættet på afleveringens længde ikke bliver for kort.

Dette filter kan betragtes som en meget grov vurdering af den aktiv/passive del af offside-reglen, men på grund af overestimering af afleveringens længde vil kun situationer, hvor spillere i offsideposition ikke kan nå bolden, blive sorteret fra. Ved tæmninger tages det meste af farten ud af bolden, og de vil derfor blive fanget af dette filter, og ved driblinger har bolden også forholdsvis lav fart.

I en mere avanceret udgave kunne filtret også bruges til at filtrere spillere fra i den ene side af banen, hvis bolden spilles over i den modsatte side. Igen skal man dog være sikker på, at spilleren i modsatte side af boldens retning er så langt fra bolden, at han umuligt kan nå den inden andre spillere. Desuden må der ikke ved skud på mål ske det, at en spiller bliver sorteret fra, som senere kan score på riposten, hvis målmanden redder eller stolpen rammes.

Spillere udenfor banen

Spillere som befinder sig udenfor banen må jf. Krav7 ingen indflydelse have på offside-vurderingen. De kan for eksempel være udenfor banen for at modtage behandling, men ellers er det ikke tilladt at forlade banen uden dommerens tilladelse [Fodboldloven, s. 28]. Det er dog indforstået, at spillere, der skal tage målspark, indkast eller hjørnespark, har tilladelse til at forlade banen og komme ind igen. Ved nærkampe og tacklinger ved sidelinjen kan det ligeledes ske, at en spiller kommer udenfor banen, men dette vil altid foregå i nærheden af bolden og dermed for den afleverende spiller, og ikke nær offside-grænsen.

Frasortering af spillere udenfor banen bør ske som noget af det første efter afleverings-detektering, så spilleren uden for banen ikke har betydning for, hvor offsidegrænsen i første omgang antages at være. En forkert beregning af offsidegrænsen kan medføre, at spillere filtreres fra og derfor ikke længere vurderes til at være i offsideposition.

Identifikation af afleverende spiller

Som beskrevet i afsnit 6.4.1 identificeres den afleverende spiller efter (x, y)-afstanden fra spillerens ben til bolden. Sættes grænseværdien for denne afstand højt, hvilket er nødvendigt for ikke at udelukke spillere der reelt har rørt bolden, kan der godt være flere spillere tæt nok på bolden til at have afleveret den.

Denne grove metode til at identificere den afleverende spiller vil medføre, at systemet ofte er i tvivl, og derfor vil linjedommeren modtage en offsidemarkering, hvis medspilleren befinder sig i offsideposition. Antallet af tvivlstilfælde kan formindskes ved at lave en gøre brug af alle tre dimensioner i identificering af den afleverende spiller.

For at kunne have sparket til bolden, skal spillerens underben være i nogenlunde samme højde som bolden og tæt på en fod. Hvis dette kun er tilfældet for en enkelt spiller, vil han være den afleverende spiller, og alle andre kan filtreres fra.

Endvidere kan der kigges den indbyrdes position for spillere, der er tæt på bolden. Står den ene spiller imellem bolden og den anden spiller, vil den anden spiller ikke kunne nå bolden.

Yderligere bevægelsesanalyse kan være nødvendigt for at være sikker på, at en implementation af det beskrevne filter til identifikation af den afleverende spiller ikke forårsager fejl.

Bolden ude af spil

I forbindelse med frispark, målspark, indkast og hjørnespark stoppes spillet, men alligevel vil der komme data fra positioneringssystemet. Indtil spillet sættes i gang igen, vil det kun være til gene for linjedommerne, hvis de modtager kendelser om spillere i offsideposition.

Målspark, indkast og hjørnespark kan relativt let detekteres, fordi bolden forlader spilområdet, og ved det efterfølgende påbegyndelsesspark er det ikke strafbart at befinde sig i offsideposition. Derfor vil offside-detektering med fordel kunne slås fra, når bolden ryger udenfor banen og indtil spillet sættes i gang igen. Ved indkast er igangsætningen ikke svær at detektere, da spillet sættes i gang, når bolden kommer tilbage på banen. Målspark og hjørnespark har dog den uheldige egenskab, at bolden kommer ind på banen inden igangsætningen foretages. Offside-detekteringen bør ikke fortsætte, før begyndelsessparket er foretaget, og det kan eventuelt gøres ved at vente til bolden ligger stille i det område, igangsætningen skal foregå (målfeltet eller en meter fra hjørneflaget), og er klar til at blive sat i gang med et spark. Når dette spark er foretaget, kan offside-detekteringen fortsætte fra næste detekterede aflevering.

Når der begås frispark er bolden ligeledes ude af spil, og bolden skal trilles hen til det sted, hvorfra begyndelsessparket skal foretages. Hvordan frispark kan detekteres har dette speciales forfatter ingen umiddelbar løsning på, men i flere af systemerne beskrevet i relateret arbejde anvendes Bayesianiske netværk [Jensen, s. 19], neurale netværk [Mitchell, s. 81] eller andre maskinlærings teknikker til at lære en sammenhæng i data, som kan bruges i algoritmen. Det er dog vigtigt, at fremgangsmåden kan anvendes i realtid og er meget pålidelig, så offside-detekteringen ikke slås fra på forkerte tidspunkter.

Linjedommeren kan let ignorere offsidemarkeringer ved frispark, hvorfor dette filter ikke hører til de allervigtigste. Metoden til at frasortere målspark, indkast og hjørnespark er dog så enkel, at den bør inkluderes i et endeligt system.

9.3. Videre bevægelsesanalyse

Som afslutning på den udførte analyse af almindeligt løb i afsnit 4.3 blev det konkluderet, at der ved yderligere analyse – med støjfri data – formodes at kunne findes frem til en tilstrækkeligt præcis metode til at positionere skuldrenes placering ud fra føddernes placering. For nuværende ser den opnåede præcision ud til at være på 11 cm. Den benyttede algoritme formodes at kunne forbedres på en række punkter og på denne måde opnå større præcision i bestemmelse af spillerens retning, afstanden fra fødderne til skulderen i løberetningen, skuldrenes middelpacering – variabler der er indbyrdes afhængige – og i sidste ende skuldrenes placering.

Den samlede analyse i kapitel 4 og 5 viste, at det er muligt med en præcision lige omkring den tilladte grænse at positionere spillerne ved almindeligt løb. Der er dog stadig arbejde at gøre med at kunne fastslå skuldrenes middelpacering. Kendes middelpositionen (i testdata kan den beregnes ved at tage gennemsnittet af de to skuldres placering), kan skulderpositionerne fastslås med 4,6 cm nøjagtighed (standardafvigelse: 2,7 cm), så det er sandsynligt, at beregningen af middelpaceringen kan gøres bedre med en anden fremgangsmåde.

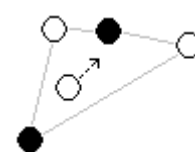
Det er også muligt, at retningen på forreste fod ikke er den mest sigende om spillerens retning, så der kan skæres noget af usikkerheden væk på den front, selv med en kendt middelpacering af skuldrene. Desuden kan der tages højde for, at overkroppen roterer en anelse igennem de forskellige faser af et løb, og at spillernes højde kan have betydning for, hvor langt skuldrene er foran benene.

At analysere og kortlægge menneskers bevægelsesmønstre er et kæmpe område indenfor idrætsforskning, som man vil kunne blive ved med at granske i større og større detaljeringsgrad.

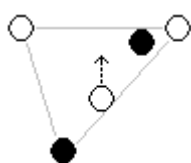
Til inspiration til en eventuel fremtidig analyse af skuldrenes placering kan nævnes evolutionære fremgangsmåder som eksempelvis genetiske algoritmer [Michalewicz & Fogel, s. 151] eller differentiell evolution [Vesterstrøm & Thomsen] til at minimere fejlen i den beregnede afstand. Ved at lade en af disse typer algoritmer arbejde med variable som eksempelvis benenes retning, benenes position, de forskellige faser i et skridt, benenes fart samt rotation i overkroppen, vil algoritmen kunne finde frem til en vægtning af disse variable, som giver mindre forskel i den beregnede skulderposition i forhold til den reelle skulderposition. Disse algoritmer arbejder dog ikke så godt med støjfyldte data, så der vil skulle laves nye optagelser. Desuden bør algoritmerne have større datamængder at arbejde på for at kunne finde frem til en god løsning.

Andre bevægelser

Almindeligt løb er ikke den eneste måde, spillere nær offsidegrænsen bevæger sig på. For at have så høj fart som muligt, når bolden spilles ind i området bag offsidegrænsen, vil en angriber ofte løbe på tværs af banen for så at skifte retning i det øjeblik, hvor bolden spilles. Som vist i Figur 61 vil skuldrene ved retningsskift være placeret et stykke væk fra den normale position, idet man læner sig til siden for at kunne opretholde balancen.



Figur 61 – Ved retningsskift læner man sig til siden.



Figur 62 – Ved acceleration læner man sig forover.

Når man fra lavt tempo vil skifte til højt tempo, er det nødvendigt at læne overkroppen fremad for ikke at miste balancen som vist i Figur 62. Forsvarsspillere kan gøre dette lige før afleveringen falder, idet man så kan trække modstandernes angribere offside, mens angribere kan have fordel af acceleration for at komme så langt foran forsvaret, at der er bedre tid til at skyde på mål.

Hvordan skuldrenes positioner kan udregnes ved disse typer bevægelser er ikke blevet analyseret i dette speciale. Er det ligesom ved almindeligt løb muligt at finde frem til fremgangsmåder, hvormed skulderpositionerne kan fastslås, skal der også laves en mekanisme til at afgøre, hvilken af bevægelserne, der foretages.

9.4. Forretningspotentiale i andre sportsgrene

ODA er ikke kun interessant i fodbold, for også i ishockey og rugby findes der offsideregler, som vil kunne afgøres af systemet, hvis det bliver tilpasset på rette vis. På denne måde kan ODA kunne nå ud til større markeder og dermed indtjene flere penge.

I ishockey er det ikke tilladt at bevæge sig ind i modstandernes forsvarszone, før pucken har passeret den blå linje, som markerer grænsen til denne zone [Ishockeyloven, s. 54]. Begge spillernes skøjter skal have passeret den blå linje inden pucken for at han kan dømmes offside.

Der er dog to undtagelser for denne regel: en angribende spiller må gerne indtræde i zonen før pucken, hvis han har kontrol over den, og der kan ikke dømmes offside, hvis pucken kommer fra en spiller på det modsatte hold.

Hvis positionerne på spillernes stave og på bageste punkt på skøjterne er kendte, vil det være muligt at foretage fuldautomatisk offside-detektering i ishockey. Stavenes positioner kan godt nok knække i løbet af en kamp, men hvis systemet blot ved, hvilket hold hver enkelt stav tilhører, er offside-detektering mulig. Stavenes placering er nemlig kun afgørende for, hvilket hold en aflevering er kommet fra.

I ishockey er offsiderereglen ikke nær så afgørende som i fodbold, idet der ofte vil være forsvarsspillere tættere på deres eget mål, hvorfor en offsideposition ikke automatisk medfører en åben målchance. Derfor må forretningspotentiallet for ODA i ishockey formodes at være mindre end i fodbold.

Rugbysporten spilles efter flere forskellige sæt spilleregler, hvoraf Rugby Union nok er det mest anvendte, og som følgende beskrivelse tager udgangspunkt i. I åbent spil er en spiller i offsideposition, hvis han befinder sig foran bolden, og han skal straffes, hvis han modtager bolden eller obstruerer en modspiller [Wikipedia]. Ved *line-out* (en slags indkast) er der specielle regler for enkelte spillere (afhænger af deres rygnumre, som beskriver deres rolle på holdet), og ved dødbolde (når spillerne står samlet i en klump) er det ikke tilladt at være foran bageste forsvarsspiller.

Hvis disse situationer kan kendes fra hinanden ved brug af filtre, skulle ODA også kunne modificeres til at lave offsidevurdering i denne sportsgren. Dette speciales forfatter kender ikke nok til rugbysporten til at have nogen fornemmelse af, om offsiderereglen er lige så kontroversiel som i fodbold og dermed, om det ville være muligt at afsætte ODA til dette marked.

For at kunne finde anvendelse i ishockey og rugby kræver det lidt modifikation af ODA. Eksempelvis er der forskel på de baner, der spilles på, og hvor det er muligt at være i offsideposition. Der vil tilsvarende skulle bruges forskellige filtre og forskellige positioneringsstrategier for hver sportsgren, men da designmønstret Abstract Factory Pattern [GoF, s. 87] benyttes, kan disse strategier tilføjes uden at ændre i resten af kildekode

10. Relateret arbejde

Sport og teknologi er ikke nogen ny kombination, og elektroniske hjælpemidler har i mange år været brugt til at sikre en retfærdig afvikling af sportsbegivenheder.

I individuelle sportsgrene som alpint skiløb og til enkeltstarter i cykelsport er tiden den eneste konkurrenceparameter, og da det er ofte hundrededele af sekunder der skiller vinderen fra nummer to, kan man ikke bero på den menneskelige reaktionsevne til at afgøre konkurrencerne. I tidsprøverne til Formel 1 er det endda tusindedele sekunder der kan være afgørende for starttrækkefølgen til det afgørende løb. For at man kan være sikker på, at den hurtigste deltager bagefter kan kåres som vinder, bruges der i dag elektronisk tidtagning til denne slags begivenheder.

Verdensrekorder i eksempelvis 100 meter-løb og svømning bærer en stor del af den fascination, der omgiver disse sportsgrene, men her er der også en anden dimension, idet deltagerne konkurrerer direkte hinanden og ikke kun med tiden. I meget tætte afgørelser er det umuligt at se med det blotte øje, hvem der vandt, fordi det går meget stærkt. Til at afgøre, hvilken løber, hest, skøjteløber eller cykelrytter, der krydser målstregen først, har polaroid-billeder været brugt som målfoto, men denne teknologi er blevet overhalet af digitale kamerasystemer.

FinishLynx [FinishLynx] er et eksempel på et kamerasystem til målfoto. Systemet kan optage knivskarpe billeder med en frekvens på helt op til 10.000 Hz, hvorfor man ved at spole langsomt frem og tilbage kan finde det nøjagtige billede, hvor eksempelvis forreste punkt på cyklens hjul passerer målstregen.

Ifølge [Rojas] er FinishLynx ved Tour de France blevet brugt sammen med Activ fra AMB [AMB]. Her udlægges kobbertråde på tværs af vejen, og på cyklerne monteres transpondere. Med frekvens på 1000 Hz aflæser kobbertrådene signaler på forbipasserende transpondere, og giver dem et timestamp for, hvornår de passerede. Systemet er derfor velegnet til at give mellemtider undervejs, så tv-seere kan følge med i, hvor langt cykelrytterne er efter hinanden. Activ kan også anvendes til motorsport og løb.

Til landevejssløb kan også anvendes ChampionChip, som første gang blev introduceret ved Berlin Maraton i 1994 og bruges ved mange store maratons [ChampionChip]. Her anvendes en RFID-chip, som kan bindes ind i snørebåndet på løbeskoen, og som aktiveres når løberen passerer en antennemåtte. Det smarte ved systemet er, at chipsene ikke bruger batterier, idet en magnetisk felt i antennemåtterne giver chipsene energi nok til at udsende sit 7-cifrede ID. Ved store maraton starter løberne i grupper med flere tusinde mennesker i hver. Hvis man er uheldig at starte bagest i sit startfelt kan der godt gå et stykke tid inden man kom frem til startlinjen, men med ChampionChip sættes den individuelle tidtagning ikke i gang, før startlinjen passerer.

Flere af den nye generation af tidtagningssystemer kan udover nøjagtig tidtagning også levere information til brug i tv-transmissioner eller til internet-tjenester. Således kan man ved Boston Maraton sidde mageligt hjemme i stuen og over internettet følge sine venners fremskridt på ruten, mens de gennemfører de hårde strabadser [Daily Wireless]. Data kan også bruges til at præsentere mellemtider langs ruten og til at beregne afstanden mellem løbets deltagere.

Det er som statistisk værktøj, Cairos' positioneringssystem oprindeligt var tiltænkt [Cairos]. Som nævnt i afsnit 3.2 findes der i forbindelse med systemet en række applikationer, der kan give statistikker om afleveringer, skud på mål, tilbagelagt distance og lignende, ligesom der kan laves 3D-animationer af kampene, som eksempelvis kan vises over internettet, mens kampen er i gang.

Til tv-transmissioner af fodboldkampe bruges der ofte virtuel grafik, som tegnes på baren af en computer, inden tv-billederne sendes ud i stuerne. Denne type grafik bruges eksempelvis til at tegne en cirkel i en radius af 9,15 meter af bolden, så man som tv-seer kan se, om muren ved et frispark er placeret langt nok væk. På samme måde kan sy-

sternerne tegne en pil, der angiver distancen til mål ved et frispark, eller klubbernes logoer og stillingen i kampen kan tegnes på grønsværen 'under' spillerne.

Nogle systemer går skridtet videre og kan ligefrem levere *virtual replay*, hvor tv-billederne digitaliseres ind i en 3D-model, så kampen kan genspilles fra enhver tænkelig synsvinkel, med kameraerne flyvende rundt omkring spillerne i den virtuelle genafspilning af kampen. Orad Virtual Replay er et eksempel på et sådant system [Magna Group]. Orad har også lavet et radiobaseret positioneringssystem til hestevæddeløb, men med en positioneringsfrekvens kan der kun gives en nøjagtighed på 20 cm. Selvom Orad angiver, at deres virtual replay selv kan identificere offsidesituationer, er der ingen grund til at tro, at dette er mere præcist end deres radiobaserede løsning.

Hawk-eye er et lignende system, der kan levere virtual replay fra tennis- og cricket-kampe [Hawk-Eye]. En række monokrome kameraer med en frame rate på 120 Hz monteres bestemte steder omkring banen, og præcisionen af boldens position kan udregnes med højst 5 mm unøjagtighed [Tester]. Tennis-server foregår ofte med hastigheder på over 200 km/t, hvilket gør det næsten umuligt for servedommere at se, om bolden var indenfor eller udenfor servefeltet. Systemet testes i øjeblikket, mens det overvejes, om Hawk-Eye skal erstatte nogle af dommerne i tennissporten, ligesom det tidligere er sket for netdommeren og fodfejlsdommeren, hvis opgaver er blevet overtaget af elektroniske apparater [Harman].

Den tidligere tennisspiller og nuværende tv-kommentator Cliff Drysdale fremfører i [Harman] som argument for at bruge systemet til at dømme, at selvom systemet med sin fejlmargen på normalt 2-3 mm måske ikke er 100 % korrekt, er det i hvert fald 100 % upartisk. Om argumentet er holdbart kan diskuteres, for det afhænger mest af præcisionen. Fandtes der et tilsvarende system med en nøjagtighed på en meter, ville dette også være upartisk, men det ville ikke være bedre til at dømme i situationerne end en mønt er.

I cricketsporten har man ligeledes overvejelser om at bruge Hawk-Eye som dommer, her til vurdering af leg-before-wicket-situationer. Hvis en spiller med sin krop forhindrer bolden i at ramme gærdet, kan dommeren dømme ham ude, men for at kunne det, skal dommeren vurdere, om bolden ville have ramt gærdet. Hawk-Eye foretager en løbende ekstrapolering af boldens bane ud fra fart, retning og højde og kan derfor forudsige, om bolden ville have ramt gærdet, hvis den ikke havde ramt spilleren først [Tester].

Fodboldsporten har endnu ikke gjort brug af elektroniske dommere, endsige elektronisk hjælp til dommerne i deres kendelser. Som nævnt i afsnit 3.2.1 har Cairos' positioneringssystem været testet til vurderinger af, om bolden er i mål, og [GoalRef] arbejder på at opnå det samme med et mere lokalt system, som er billigere, da det ikke kræver et stort antennenetværk for at fungere.

På forskningsbasis har der været flere projekter i gang for at detektere offside på baggrund af videobilleder, eksempelvis [McRedmond] og [Maruzsi], mens Cairos ser ud til at være de eneste, der har forsøgt sig med et radiobaseret positioneringssystem, hvor også boldens positioner har kunnet gives. Det ser dog også ud til at Intel i samarbejde med University of Bath er begyndt at lave research indenfor området [KencI].

Inden for golfsporten findes der allerede et radiobaseret system, hvor en chip er indlejret i bolden og kan give besked om, hvor den er. Chippen er en antenne i størrelsesordenen 1-2 mm som kan besvare radiosignaler fra et håndholdt apparat, hvormed afstanden til bolden kan beregnes. Systemet bruges til bolde, som er røget udenfor banen og kan være svære at finde igen, og har en rækkevidde på 10-35 meter alt efter terræn [Radar-Golf].

Til offsidedetektering er det vigtigt at kunne detektere en bestemt begivenhed, nemlig en aflevering. I systemer til automatisk generering af statistikker er der masser af andre interessante begivenheder i løbet af en kamp, og for fodbold kunne det eksempelvis være skud på mål, redninger, tacklinger, udskiftninger, frispark og ikke mindst mål. [Han et

al.] gør brug af videobilleder til at detektere begivenheder i baseball, og der anvendes maskinlæring til at oplære systemet.

[Xu & Chua] præsenterer et framework, der ved hjælp af eksterne kamppreferater og – statistikker fra fodboldkampe kan svare på forespørgsler angående en bestemt spiller, et bestemt hold eller en bestemt type begivenhed. Videobilleder af kampen analyseres på baggrund af disse eksterne kilder, hvormed der oprettes en database af videosekvenser, der kan returnere de udtræk, som svarer på forespørgslen. Brugen af eksterne kilder giver en markant forbedring i andelen af korrekt klassificerede begivenheder.

Disse anstrengelser opererer imidlertid begge på beregningstung videoanalyse og fungerer derfor ikke i realtid. [Wang et al.] forsøger sig med at fremstille et framework til automatisk at genkende begivenheder for at kunne styre langsomme gengivelser i tv-transmitterede fodboldkampe – og vel at mærke indsætte dem i tidspunkter i kampen, hvor der ikke foregår noget vigtigt. Lydniveauet på stadion er med til at give indikationer på, om der foregår vigtige begivenheder, og videoanalysen består kun af at opfatte bevægelse og følge bolden, hvilket ikke kræver så mange beregninger. Sammenlignet med menneskelige producere genereres der tre gange så mange gentagelser, så der er stadig meget arbejde at gøre, før det kan erstatte menneskelig arbejdskraft.

Heller ikke i detektering af begivenheder ser der ud til at være iværksat de helt store tiltag med radiobaserede teknologier. Cairos er oprindeligt lavet til at generere statistikker, og derfor er detektering af begivenheder en integreret del af systemet [Cairos2]. Intel ser også ud til at have det med i deres overvejelser [Kenc1].

11. Konklusion

Specialet her har haft til formål at undersøge mulighederne for at anvende computerkraft til at hjælpe linjedommerne med at foretage de svære offsidevurderinger i fodboldkampe. Indledningsvis er kravene til et sådant system blevet opstillet, sådan som en kunde kunne tænkes at stille dem.

I kravene fastslås det overordnet set, at systemet skal kunne afgøre offsitesituationer så præcist, at vurderingerne ikke entydigt kan falsificeres af tv-billeder, og at linjedommeren skal have besked om en muligt strafbar offsitesituation indenfor 250 ms efter at en spiller har rørt bolden. Herefter kan linjedommeren træffe beslutningen om, hvorvidt spilleren skal straffes for sin offsitesituation, fordi han deltager aktivt i spillet.

Offsidereglen er efterfølgende blevet beskrevet, og forskellige uklarheder er blevet præciseret, så det er muligt for en computer at forstå dem. Blandt andet fastslås det, at det er det punkt på spilleren, som er nærmest mållinjen, der afgør en mulig offsideposition.

Herefter er der udført en analyse af kravene, sådan som en mulig leverandør af systemet ville gøre for at finde ud af, om han ville give sig i kast med opgaven. Analysen viser, at punktet nærmest mållinjen for spillere nær offsidegrænsen skal kunne bestemmes med en nøjagtighed på 15 cm, men at den afleverende spiller ikke nødvendigvis skal kunne identificeres med sikkerhed. Helt essentielt er det, at alle afleveringer detekteres, uden at fænomener i den virkelige verden, som kan ændre boldens opførsel, giver anledning til offsidemarkeringer.

Specialet bygger videre på specialet af [Larsen & Hansen] og deres prototype Dommer-StøtteSystem. Her blev det radiobaserede positioneringssystem fra Cairos valgt som det mest anvendelige som grundlag til offsidedetektering. Systemet fra Cairos, som det desværre ikke er lykkedes at overtale til at tage del i dette speciale, ser ud til leve op til alle de krav, man ville stille til en leverandør af et positioneringssystem til dette formål.

I systemet fra Cairos positioneres spillerne ved hjælp af radiosendere i deres benskiner, og derfor er der foretaget en grundig analyse af, hvorvidt punktet nærmest mållinjen kan afledes af skinnebenenes positioner. Et infrarødt kamerasystem fra Qualisys, som ved hjælp af reflekterende markører har kunnet give 3D-data på udvalgte steder af spillernes kroppe, har været brugt til at optage spillerbevægelser i noget nær realistiske kampsituationer til brug i analysen.

Desværre viste de oprindelige data sig at være meget støjfyldte på grund af et lettere fjedrende gulv, og praktiske hensyn gjorde det umuligt at lave dem om. Trods støjen er det lykkedes at finde sammenhænge i disse data, som efterfølgende har kunnet verificeres med mere simple optagelser lavet på et fast gulv. Punktet nærmest mållinjen blev vist at kunne beregnes med 16 cm nøjagtighed ved almindeligt løb, hvilket er meget tæt på den tilladte grænse, og der er grund til at tro, at dette kan forbedres gennem yderligere analyse. Alene ved at placere radiosenderne helt nede ved anklerne frem for midt på skinnebenene kan der skæres 5 cm af usikkerheden for spillerens bageste punkt.

Positioneringssystemet fra Cairos kan endvidere levere data om boldens position, og boldens opførsel afledt af disse data ligger til grund for detektering af afleveringer. Boldens opførsel kan dog også ændre sig af naturlige årsager, men en analyse har vist, at disse ændringer godt kan skelnes fra reelle afleveringer. Ved positionering af bolden diskretiseres dens position fra et kontinuert domæne til et koordinatsystem med enhedsstørrelsen 2 mm, hvilket medfører, at meget små retningsændringer på under $2,5^\circ$ ikke kan detekteres. Retningsændringer og acceleration af bolden ligger til grund for detektering af afleveringer, og afleveringer kan detekteres med en unøjagtighed på 5 millisekunder, hvilket giver en lille smule ekstra usikkerhed, når spillere ved offsidegrænsen løber hver sin vej.

På baggrund af ovennævnte analyser er der udarbejdet en prototype på et computersystem til offsidedetektering ved navn OffsideDetekteringsAssistent, forkortet ODA. Proto-

typen bygger videre på DommerStøtteSystem fra [Larsen & Hansen], hvilket har været en fordel, da det så har været muligt i små skridt at gennemføre de ændringer, der har været nødvendige for at systemet kan leve op til kravene. Samtidig har der kun skullet foretages små ændringer i de to tilhørende delsystemer ScenarioSender og Visualizer, som tilsammen simulerer de omgivelser, ODA ville have i en virkelig installation.

ODA har modsat de to andre delsystemer gennemgået en total omstrukturering i forhold til DommerStøtteSystem. Dette gav små problemer undervejs, da ønsket var at kunne afvikle den overleverede kode for sammenligningens skyld. Med to forskellige design i spil på samme tid blev systemet på et tidspunkt svært at overskue, men opførslen af DommerStøtteSystem viste sig at kunne simuleres gennem ODA's fleksible design.

Designet er baseret på en række filtre, som ved hjælp af mere eller mindre komplicerede positioneringsstrategier gradvist udtynder seks mængder af spillere. For hvert hold vedligeholdes mængder om spillere, der kan være i offsideposition, have afleveret bolden eller kan udgøre offsidegrænsen i deres ende af banen. Kan der stadig foreligge en muligt strafbar offsidesituation, når alle filtrene er gennemløbet og spillerne er positioneret helt præcist, får linjedommeren besked om dette. Arbejdet fordeles mellem to tråde, der har ansvaret for henholdsvis datamodtagelse og offsidetetektering. Offsidetetekteringen kan tage adskillige millisekunder, så for ikke at miste vigtige historiske data, mens dette foregår, udregnes afledte informationer som hastighed og retning af samme tråd som modtager data.

På afleveringstidspunktet for specialet benytter ODA sig af syv filtre for at kunne afvikle de allermest basale funktioner til offsidetetektering, og disse kan gennemløbes på 2-3 millisekunder sideløbende med at de nyeste positioneringsdata modtages. Der er altså indenfor tidsgrænsen på 250 millisekunder rigeligt plads til at indføre yderligere filtre for at opnå større præcision og for at forhindre, at linjedommerne oversvømmes med offsidemarkeringer for spillere, der ikke kan blive straffbare.

For at systemet kan finde anvendelse i fodboldkampe på højeste niveau kræves det, at der implementeres flere filtre, og der skal foretages yderligere analyser af spillernes bevægelser for at retfærdiggøre at den krævede præcision kan opnås. En anden mulighed er at udstyre spillerne med en endnu en radiosender, som kan placeres i nakken af spillertrøjen, men denne løsning er ikke ønskværdig, da systemet bliver mindre praktisk i en kampsituation. Endvidere er ODA ment som en prototype, så der er ikke taget hånd om eksempelvis udskiftning af spillere og bold undervejs i kampen, ligesom en sikring af kommunikationen til linjedommeren også hører med til et endeligt system. Til gengæld er designet så fleksibelt og modificerbart, at systemet uden større besvær vil kunne overføres til andre sportsgrene som ishockey og rugby, som også har regler om offside.

Alt i alt har specialet her opnået en klar fastlæggelse af kravene til et computersystem til offsidetetektering, og disse krav er blevet analyseret grundigt for at kunne opnå en præcision så høj, at systemets vurderinger ikke kan falsificeres af tv-billeder. Udover prototypen er algoritmen til præcis bestemmelse af punktet nærmest mållinjen samt afleveringsdetektering på baggrund af 3D-data de væsentligste resultater af arbejdet.

Med mindre en videre analyse af spillernes bevægelser modbeviser at spillere kan positioneres med de tilladte 15 cm unøjagtighed, eller at realistiske positioneringsdata ikke er mærkbart bedre end de benyttede testdata, er der altså ikke noget teknisk til hinder for at lade et computersystem som ODA hjælpe linjedommerne med at vurdere offsidesituationer, selv uden at ændre den nuværende offsideregulering.

A. Appendiks til kapitel 1

A.1. Baggrund for systemkrav

I dette afsnit begrundes formuleringen af kravene til en offsidedetekteringsassistent, sådan som de blev opstillet i afsnit 1.2. Kravene er formuleret uden at lægge sig fast på en bestemt teknologi, der måtte benyttes til at positionere spillere og bold, så denne side af sagen står leverandøren af en offsidedetekteringsassistent frit for.

A.1.1. Ufravigelige krav

I forbindelse med **Krav1** begrundes, hvorfor netop afleveringstidspunktet er udgangspunktet for tidskravet, og hvorfor tidskravet er på netop 250 ms.:

Linjedommeren skal have besked om spillere i muligt strafbar offsideposition, når bolden røres af en spiller fra samme hold. Dette skal ske indenfor 250 millisekunder efter at bolden er rørt og skal ske på en sådan måde, at han stadig kan følge med i spillet på banen.

Tidskravet på 250 millisekunder er sat for at undgå misforståelser hos linjedommerne. Hvis der går eksempelvis et sekund inden linjedommeren får en markering om en mulig strafbar offside og der i mellemtiden er lavet en ny aflevering, vil han sikkert tro, at markeringen gjaldt den nye aflevering. At grænsen er sat ved netop 250 ms skyldes en analyse af afleveringsfrekvensen hos spanske FC Barcelona, som har ry for at være det hurtigst spillende fodboldhold i verden. Ud fra en tv-kamp kan det iagttages, at der kan forekomme tilsigtede afleveringer med ned til et halvt sekunds mellemrum, når det går allerhurtigst. Tidskravet fastsættes til det halve, 250 ms, så linjedommeren kan nå at opfatte en offsidemarkering inden den næste aflevering foretages.

Udgangspunktet for tidskravet er afleveringstidspunktet – når bolden er rørt. Oftest er det først når en spiller rører bolden, han skal dømmes offside, men alligevel er afleveringstidspunktet et godt tidspunkt at gå ud fra. Angriberen kan nemlig også være strafbart offside, hvis han på afleveringstidspunktet generede en modspiller eller et øjeblik senere får fordel af at have været i offsideposition, da bolden blev rørt. Disse situationer kræver en menneskelig vurdering og kan ikke nødvendigvis afgøres i afleveringsøjeblikket. Får linjedommeren markeringer om spillere i offsideposition på afleveringstidspunktet, kan han fokusere på at følge disse spillere efterfølgende og træffe sin beslutning ud fra, om en spiller i offsideposition spiller rører bolden, generer en modspiller eller får fordel af sin position.

En yderligere fordel ved at tage udgangspunkt i afleveringstidspunktet er, at linjedommeren hurtigere kan markere, hvis han kan se, at ingen andre spillere på det angribende hold kan nå bolden fra en onsideposition. I disse situationer opfordres linjedommeren til at straffe spilleren i offsideposition med det samme for ikke at sinke spillet [Fodboldloven, s. 45], og derfor skal han naturligvis have besked så hurtigt som muligt.

Kommunikationen til linjedommeren skal ske, så han stadig kan følge med i spillet på banen. Her skal han holde øje med, om spillerne i offsideposition ender med at blive straffbare, og han derfor skal markere dette til dommeren, ligesom hans andre opgaver blandt andet omfatter at markere, når bolden forlader banen, eller hvis spillere overtræder reglerne udenfor dommerens synsfelt [Fodboldloven, s. 20].

Krav2 omhandler den generelle korrekthed af systemets vurderinger:

Systemets vurderinger må ikke kunne falsificeres af tv-billeder efterfølgende.

Hvis man som tv-seer kan sidde hjemme i stuen og se at systemet tager fejl, vil det være spild af penge at købe en offsidedetekteringsassistent. Linjedommere ser nemlig også tv, og hvis de ikke stoler på systemets vurderinger, vil de vælge at ignorere dem og dømme som de altid har gjort.

Kan der til gengæld ikke sættes spørgsmålstejn ved kendelserne selv ud fra tv-billeder, vil der ikke være nogen som helst måder at falsificere systemet på.

Med linjedommerens fejlmargen in mente kan det diskuteres, hvor stor en del af computersystemets kendelser, der skal være korrekte for at systemet kan bruges. Pressens og tilskuernes forventninger til et computersystem vil imidlertid være, at kendelserne er hundrede procent korrekte, for ellers vil man blot have flyttet fejlkilden fra linjedommeren til computersystemet [Carlsen].

Krav3 beskriver kravene til sikkerhed:

Kommunikationen af offsidevurderinger må ikke kunne ødelægges, forfalskes eller opsnappes af uvedkommende personer.

For at linjedommerne kan stole på markeringer modtaget fra systemet, skal alle systemets markeringer og kun systemets markeringer modtages af linjedommeren i samme stand som de blev afsendt i.

Er det muligt at forhindre markeringerne i at nå frem til linjedommeren, vil der opstå fejlkendelser, hvor en spiller i strafbar offsideposition ikke bliver straffet. Derfor må signalet til linjedommeren ikke kunne ødelægges. Forfalskede markeringer vil have modsatte effekt; at spillere i onsideposition uretmæssigt straffes.

Endvidere må systemets markeringer ikke kunne opsnappes, så iagttagere kan holde øje med, om linjedommeren følger systemets anvisninger. Sådanne observationer kan let risikere at føre til kritik, som anfægter linjedommeren redelighed og er derfor ikke ønskværdig. Evaluering af enkelte kendelser skal foretages internt i dommertrioen i samråd med dommerbedømmeren, som er udpeget af dommerunionen med henblik på at vurdere dommertrioens præstation.

Det er ikke utænkeligt at andre interessenter kan komme på tale, for eksempel for at evaluere systemet med henblik på finjustering af algoritmerne, men personer uden tilknytning til systemet bør ikke kunne følge med i systemets gøren og laden.

Krav4 definerer kravene til præcision i afleveringsdetekteringen:

Alle boldberøringer skal opfattes uden at ikke-afleveringer kategoriseres forkert. En boldberøring defineres til at ske i det øjeblik, kontakten mellem spiller og bold opstår.

Afleveringstidspunktet (når bolden røres af en spiller) er helt afgørende for vurderingen af en offside-situation, hvilket også fremgår af Krav1. En overset aflevering kan medføre en overset offsidemarkering, og omvendt kan en spiller uretmæssigt dømmes offside, hvis der detekteres afleveringer på tidspunkter, hvor bolden ikke er blevet rørt. Derfor er det essentielt, at alle boldberøringer detekteres i systemet.

Den eneste tilladte undtagelse fra dette krav er boldberøringer, hvor bolden ikke skifter hverken retning eller fart. Disse boldberøringer tæller i princippet som afleveringer [Carlsen3], men vil ikke kunne påvises af tv-billeder, da bolden netop ikke ændrer opførsel. Dommeren har kun mulighed for at opdage denne type boldberøringer, hvis han kan høre at bolden har snittet en spillers trøje eller hår, men på grund af larmen fra tilskuerpladserne er dette næppe muligt på højeste plan.

I **Krav5** stilles der krav til at offside-detekteringsassistenten kan fungere under den nuværende version af [Fodboldloven]:

Systemet må ikke kræve ændringer til den pr. 1. juli 2005 gældende version af fodboldloven eller de dertil hørende fortolkninger.

Fodboldloven er ens på alle niveauer i alle verdens fodboldforbund og vedtages af International Football Association Board (IFAB). FIFA sidder på halvdelen af stemmerne i IFAB, og lovændringer kræver tre fjerdedele flertal for at blive vedtaget [IFAB]. Med mindre FIFA ligefrem er kunden og der dermed med en vis sandsynlighed kan skabes

flertal for at ændre i loven, skal en offsidedetekteringsassistent underkaste sig den nuværende lovgivning.

I **Krav6** sikres en flydende afvikling af kampene:

Systemet skal fungere uden at sinke spillet. Eksempelvis skal bolden kunne skiftes ud, når den forlader banen, så spillet kan sættes i gang hurtigst muligt.

For at fastholde tilskuernes og tv-seernes interesse gennem de to gange 45 minutter, som en fodboldkamp varer, skal der ske noget på banen hele tiden, og af den grund er der gennem årene lavet flere tiltag for at undgå pauser i spillet. Eksempelvis er bold-drengene på sidelinjen klar med nye bolde, så spillet kan sættes hurtigt i gang igen, når bolden har forladt banen.

Et andet eksempel på et tiltag for at undgå tidsspilde er, at det i 1992 blev vedtaget, at målmændene ikke længere måtte samle bolden op i hænderne. Dette var førhen en meget benyttet metode til at trække tempoet ud af kampen eller til at få tiden til at gå, når holdet var foran.

Ønsker om at undgå pauser i spillet er en væsentlig årsag til den modstand, der altid er mod forslag om at bruge tv-billeder til at afgøre tvivlsomme situationer. Hvis dommeren skal ud på sidelinjen for at vurdere en situation ud fra tv-billeder, kan der let gå mere end et minut inden spillet kan optages igen. Et yderligere argument mod at bruge tv-billeder er, at man ikke altid kan stole på, at tv-kameraerne har fanget situationen fra den rigtige vinkel, så dommeren entydigt kan give en korrekt vurdering. Ved VM i Frankrig i 1998 fik Norge eksempelvis et straffespark mod Brasilien, som set fra alle vinkler i tv-transmissionen så ud til at være forkert, fordi den norske angriber Tore André Flo havde 'filmet' sig straffesparket. Først dagen efter dukkede der billeder op, der kunne bevise at kendelsen var korrekt. Billederne var optaget af en amatørfotoğraf blandt publikum, som tilfældigvis stod i den rigtige vinkel i forhold til situationen.

Disse tiltag sikrer altså at fodbolden som sportsgren ikke mister den folkelige interesse, og en offsidedetekteringsassistent må naturligvis ikke indvirke negativt på dette.

Krav7 sikrer, at ingen spillere eller bolde udenfor banen influerer på systemets vurderinger:

Kun spillere og bolde på banen må have betydning for systemets vurderinger.

Det sker ikke sjældent, at spillere kommer til skade i løbet af kampen og skal undergå behandling på sidelinjen. Imens spilleren er udenfor banen har han således ingen indflydelse på spillet og skal ikke inddrages i vurderingen af offsidesituationerne. En forsvarsspiller, der lå til behandling ved sidelinjen tæt ved egen mållinje, ville i modsat fald annullere så godt som alle offsidesituationer.

På samme måde må udskiftningsspillere i færd med at varme op eller som står klar til at blive skiftet ind ikke regnes for værende aktive af offsidedetekteringsassistenten.

Ifølge [Fodboldloven, s. 28] må en spiller ikke forlade banen uden at have fået tilladelse af dommeren. Spillerne vil derfor befinde sig indenfor spilområdet hele kampen igennem – med undtagelse af den spiller, der skal tage et indkast eller hjørnespark, når disse situationer opstår. Her gives tilladelsen automatisk til den pågældende spiller.

Af og til forlader spillere kortvarigt banen i forbindelse med nærkampe tæt på sidelinjen, fordi de bliver skubbet derud af en modspiller eller skal undvige en tackling fra en modspiller. Spilleren vil derfor ikke have betydning for systemets vurderinger, indtil han kommer ind på banen igen, men fordi situationerne opstår i kamp om bolden, vil spilleren ikke være i offsideposition i det øjeblik, bolden røres af en af hans medspillere. Han er netop selv den medspiller, der rører eller forsøger at røre bolden.

Som det også fremgik af Krav6 sidder bolddrenge ved topkampe klar ved sidelinjen til at kaste nye bolde hen til den spiller, der eksempelvis skal kaste et indkast. Det skal natur-

ligvis kun være den bold, som befinder sig på banen, der må give anledning til detektering af afleveringer.

A.1.2. *Vigtige krav*

Krav8 omhandler identificering af den afleverende spiller:

Den afleverende spiller bør kunne identificeres korrekt i de fleste tilfælde. Når der opstår tvivlstilfælde, hvor flere spillere kan have afleveret bolden, bør linjedommeren hellere modtage en markering en gang for meget end en for lidt.

Det er kun medspillere til den spiller, der rører bolden, som kan straffes for at være i offsideposition. Alligevel er det ikke essentielt at kunne identificere den afleverende spiller, når blot det ikke er en spiller fra det forkerte hold, der vurderes til at have rørt bolden, da dette kunne betyde, at reelle offside-situationer blev ignoreret.

Tvivlstilfælde kan forekomme i eksempelvis tacklinger, hvor to spillere er så tæt på bolden, at det kan være svært at afgøre kilden til afleveringen. Dette problem findes for linjedommerne i forvejen, idet de ikke altid har frit udsyn til de spillere, der kæmper om bolden. Er linjedommeren i tvivl, skal han markere med sit flag, og herefter er det op til dommeren at bestemme, om bolden kommer fra en spiller på det ene eller det andet hold.

Tvivlstilfældene kan deles op i to kategorier, alt efter om bolden i tacklingen røres af to eller kun en spiller. Hvis begge spillere rører bolden, kan spillerne på begge hold risikere at være offside, og i så fald vil det ikke være forkert at give linjedommeren besked, hvis der er spillere i offsideposition. Den anden kategori dækker over situationer, hvor begge spillere er så tæt på bolden, at computersystemet ikke kan afgøre kilden på afleveringen. Heller ikke i disse situationer vil det være forkert at give linjedommeren besked om spillere i offsideposition, da de svarer til situationer, hvor han selv kan være i tvivl. Modtager han en markering, hvor han kan se at afleveringen ikke kommer fra en spiller på det hold, han skal holde øje med, kan han blot undlade at markere.

Selvfølgelig vil det være at foretrække, hvis en offside-detekteringsassistent kan identificere den afleverende spiller korrekt, men systemet vil i princippet kunne fungere uden denne funktionalitet, så længe selve afleveringen bliver detekteret (Krav4). Dommeren og linjedommerne skal holde øje med spillet under alle omstændigheder, og systemet vil stadig kunne støtte linjedommerne i deres beslutninger, selvom de skulle holde øje med den afleverende spiller også. Det vigtigste er, at afleveringen ikke identificeres til at komme fra det forkerte hold – at undgå falske negative.

Krav9 sørger for, at linjedommeren ikke modtager markeringer for mulig offside, hvis afleveringen ikke kan nå frem til en spiller i offsideposition:

Linjedommerne bør ikke modtage markeringer med mindre der er chance for at en spiller i offsideposition deltager aktivt i spillet.

Med hensyn til antallet af offsidemarkeringer foreskriver Krav1, at systemet som minimum giver besked hver eneste gang, en spiller i offsideposition har mulighed for at blive spillet, når en medspiller rører bolden. Til gengæld ville linjedommeren blive overfodret med oplysninger, hvis han modtog en markering for en mulig strafbar offside, hver gang en spiller rørte bolden. Hvis der bliver spillet en kort aflevering på tværs eller baglæns midt på egen banehalvdel (man skal være over midten for at være i offsideposition, jf. afsnit 2.1), er der ingen grund til at forstyrre linjedommeren, selvom en medspiller står i offsideposition, for spilleren vil alligevel ikke kunne modtage bolden. På samme måde vil markeringer ved driblinger være unødvendige – og irriterende for linjedommeren.

Det vil uden tvivl være muligt at filtrere en masse irrelevante boldberøringer fra, men af princip er det bedre at give linjedommeren besked en gang for meget end en for lidt, som det også fastslås i Krav8. Der er dog kun én linjedommer ad gangen, der vil have

glæde af at modtage besked om en mulig strafbar offside, nemlig ham som dækker den banehalvdel, hvor det bolddesiddende holds spillere kan risikere at stå i offsideposition.

Krav10 omhandler en del af offsidereglen, som systemet ikke nødvendigvis behøver opfylde:

Målspark, indkast og hjørnespark bør ikke give anledning til at systemet vurderer situationen som en offsideposition.

Ved målspark, indkast og hjørnespark er det, jf. afsnit 2.1, ikke strafbart at befinde sig i en offsideposition. Skulle en linjedommer modtage markering for en mulig strafbar offside i en sådan situation, ville han let kunne se, at han ikke skal markere for offside. Det letteste for linjedommeren vil dog være, hvis hændelserne blev sorteret fra af systemet.

A.1.3. Ønskværdig funktionalitet

Krav11 beskriver de beskeder, der overgives til linjedommerne:

Kommunikationen til linjedommeren bør mindst omfatte antallet af spillere i offsideposition og bør om muligt omfatte, hvilke spillere i offsideposition, der kan risikere at være straffbare.

Offside-detekterings vurderinger skal naturligvis kommunikeres ud til linjedommeren, og her kan der opstilles tre niveauer for detaljeringsgraden af informationerne:

1. Der er spillere i offsideposition
2. Der er to spillere i offsideposition
3. Spillerne 7, 9 og 10 er i offsideposition

I niveau 1 kan linjedommeren ved en forkert placering blive i tvivl om, hvilke spillere der risikerer af være strafbar offside. Hvis en spiller står klart offside og en anden spiller lige omkring offsidegrænsen modtager bolden, kan linjedommeren ikke vide, om denne spiller skal straffes, fordi han ikke ved, om spilleren var i offsideposition, da bolden blev rørt. Derfor er niveau 1 ikke acceptabelt.

Også niveau 2 kan give anledning til fejl, men dette er i mere specielle situationer, hvor linjedommerens placering gør, at han ser situationen forkert. Fejl kan opstå, hvis linjedommeren opfatter en spiller, som ikke er i offsideposition, til at være det, samtidig med at den spiller som er strafbar offside opfattes til at være onside. Dette kan skyldes en skæv betragtningsvinkel ind over banen som forklaret i [Oudejans et al.] og illustreret i Figur 1 på side 7.

Niveau 3, hvor linjedommeren får besked om, nøjagtigt hvilke spillere der kan risikere at være i strafbar offsideposition, hjælper linjedommeren mest muligt, idet han blot skal holde øje med, om de nævnte spillere i offsideposition skal straffes. Her er spørgsmålet bare, om linjedommeren kan nå at opfatte beskeden inden næste aflevering foretages og der opstår en ny situation, der skal tages stilling til.

Som Krav1 foreskriver, skal kommunikationen foregå således at linjedommeren kontinuerligt kan følge med i spillet på banen.

Krav12 sikrer, at systemet kan betjenes uden den store oplæring:

En eventuel brugergrænseflade til systemet bør kunne betjenes af dommertrioen og fjerdedommeren og kræve så lidt interaktion som muligt mens kampen forløber.

For at sikre en flydende afvikling af kampene bør der ikke være større spilstop i forbindelse med eksempelvis udskiftninger, fordi systemet skal omkonfigureres. Omkonfigurationen kunne selvfølgelig gøres af fjerdedommeren på sidelinjen, men han har også andre opgaver i løbet af kampen, så dette er heller ikke en optimal løsning. At lade en helt

femte person stå for det kræver, at en sådan person er ansat til opgaven, og det koster penge. Kravet er opsat for at systemet i drift koster så lidt som muligt.

Det sidste krav, **Krav13**, omhandler vedligeholdelsesudgifter:

Systemet bør let kunne justeres i tilfælde af ændringer i fodboldloven.

Med jævne mellemrum sker der små ændringer af fodboldloven, som oftest er præcise fortolkninger af uklare regler, der har været fortolket forskelligt verden over. Disse ændringer skal kunne overføres til offside-detekteringsassistenten uden at der skal postes en masse penge i nyudvikling af systemet.

I løbet af udarbejdelsen af dette speciale har der været en regelændring af betydning for specalet, nemlig en præcisering af, hvad det vil sige at være nærmere mållinjen end næstsidste modspiller. Førhen brugte man i Danmark den fortolkning, at hovedparten af spillerens overkrop skulle have passeret hele modspillerens overkrop for at man kunne være i offsideposition [Carlsen], men FIFA har pr. 1. juli 2005 vedtaget den fortolkning, der er forklaret i afsnit 2.2.2.

Ændringer som denne indføres gerne med højst tre måneders varsel, så modificering af systemet skal kunne implementeres med kort varsel og dermed med et minimum af omkostninger.

B. *Appendiks til kapitel 2*

B.1. [Carlsen]

E-mail modtaget 25/3 2005 som svar på spørgsmål om præciseringer af offsidereglen.

Først og fremmest: selvfølgelig har du hermed tilladelse til at gengive fodboldlovens § 11 (lovteksten) og tilhørende danske afgørelser (bagest i lovbogen) mod behørig kildeangivelse. Den tør jeg godt give dig på kompagniets vegne.

Og så til dine spørgsmål.

Definitionen på at være nærmere er – jfr. fodboldlovens danske afgørelser – at den overvejende del af angriberens krop (torsoen!) skal have passeret modspillerens krop (eller bolden, hvis det er den, det handler om). Den overvejende del er principielt og matematisk 51 % - men det kan det menneskelige øje selvfølgelig ikke opfange. Ikke desto mindre er det den 'juridiske' udlægning af kriteriet.

Jeg ville finde det meget betænkeligt uden videre at definere spillerens overkrop som værende over den forreste fod (som du selv skriver i afsnittet nedenunder, 'strider det lidt mod fortolkningen om overkroppen'). Og det er nok netop pointen: jeg/vi kan ikke officielt sanktionere en 'praktisk' fortolkning, som strider imod den teoretiske. Du vil uden tvivl ramme langt de fleste praktiske situationer – men du vil have et problem med f.eks. situationer, hvor angriberen kaster sig vandret fremefter, før afleveringen falder, og hans tyngdepunkt og overkrop dermed er langt foran forreste fod. Det er akkurat i disse afvigende situationer, hvor den menneskelige vurdering (linjedommeren) vil kunne lægge nogle kriterier ind, som den maskinelle vurdering (computeren) ikke kan håndtere.

Du stiller spørgsmålet, om en computerbaseret kendelse skal være 100 % korrekt eller bare bedre, end hvad linjedommeren kan gøre. Det bliver så min helt personlige holdning (som Edb-mand!), men 'reklamerer' man med en computerbaseret afgørelse, bør den efter min overbevisning også være 100 % korrekt (eller deromkring). Det er nemlig sådan, pressen vil udlægge den – og ellers har vi jo bare flyttet fejlmarginen fra linjedommeren til computersystemet. Vel vidende, at intet computerprogram er bedre end de input, som det bliver fodret med

Det er i hvert fald et forbehold eller et supplerende argument, som jeg ville anbefale dig at tage med i dit speciale...

'At røre bolden' kan til gengæld nøjagtigt defineres som det øjeblik, hvor den første kontakt opstår mellem bold og medspiller – og ikke i det øjeblik, hvor bolden slipper med-spilleren (afleveringen foretages). Det gør muligvis ikke den store forskel i praksis, som du skriver – men som teoretisk holdepunkt er det vigtigt...

Til sidst spørger du – uden for specialet – om dommernes brug af flere armbåndsure og eventuel anden brug af elektronisk udstyr. De to armbåndsure er, så vidt jeg ved, alene en sikkerhed – og af andet elektronisk udstyr vil du i SAS-ligaen og internationalt møde bip-flagene, som giver en elektronisk kontakt fra linjedommernes flag til en sensor monteret på dommerens krop. Dette er alene et spørgsmål om at sikre kontakten mellem alle tre parter, således at man ikke oplever en linjedommer markere længe, uden at dommeren registrerer det (f.eks. hvis han ikke kan råbes op på grund af larmen fra tilskuerne).

Så langt, så godt.

Så vil jeg godt give dig det hint, at et computersystem virkelig vil komme på hårdt arbejde, hvis det skal vurdere en eventuel offside-position (uden at vi overhovedet begynder at filosofere over strafbar offside). Det skal nemlig, hver eneste gang en medspiller rører bolden, vurdere, om der er nogen af de 10 andre medspillere, der er i en offside-position – og denne vurdering skal det gemme, indtil bolden næste gang røres af en medspiller. For det er først dér, at én eventuel offside-position fra første fase bliver annulleret. Der kan faktisk gå ganske lang tid, fra en medspiller rører bolden, til en anden medspiller viser sig at være strafbar offside (ikke mindst efter den nye fortolkning af strafbarhed, som du formentlig er i besiddelse af – står i seneste udgave af Fodboldloven).

Og endelig – og dette er ikke gjort for at ødelægge dit humør, men blot for at bringe dig på (indtil videre fortrolig) forkant med udviklingen: The Board (fodboldlovens højesteret) havde møde den 26. februar, og det ser ud til, at man har vedtaget en definition af offside-position, som gør, at den definition af 'overvejende del af kroppen', som vi hidtil har bygget på, svinger over til, at man er i offside-position, hvis nogen del af angriberens hoved, krop eller fødder er nærmere end modspilleren.

Vi har i DBU ikke set det officielle cirkulære endnu – det dukker formentlig først op sidst i maj, så vi vil ikke kaste os ud i nærmere forklaringer eller fortolkninger på nuværende tidspunkt – men der er i hvert fald noget på vej, som vil få virkning internationalt og på højeste niveau i Danmark pr. 1.7.2005.

Jeg har med interesse læst de artikler, som du vedhæftede i den oprindelige post – og skal så samtidig spørge, om du har mødt Baldo, Ranvaud, Morya (i *Perception* 2002, vol. 31, pp. 1205-1210). Det kan være, at den skulle med – om ikke andet i bibliografien.

B.2. [Carlsen2]

Uddrag fra e-mail om de lovændringer og nye retningslinjer i fodboldloven, der trådte i kraft pr. 1/7 2005. E-mailen er modtaget 29/6 2005.

Årets lovændringer fra The International F.A. Board er måske ikke så dramatiske som tidligere år – men de sætter alligevel hele fire af de ting på plads, som har givet masser af diskussioner, når dommere og instruktører har mødtes rundt omkring i Europa.

[...]

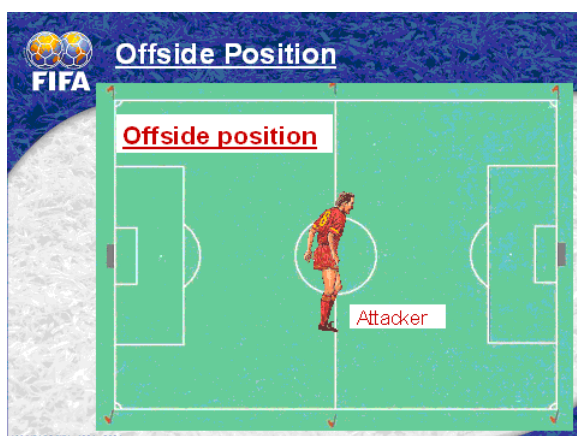
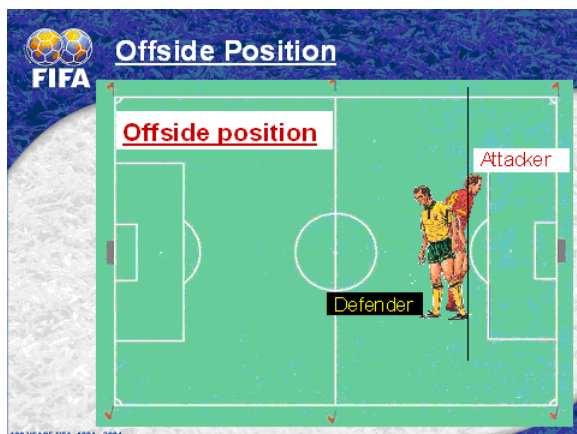
I selve offside-reglen er der nu kommet en entydig definition på begrebet 'nærmere modspillernes mållinje end både bolden og næstsidste modspiller'. Også her har man forsøgt sig på forskellig vis rundt omkring i verden – i Danmark med udlægningen af, at 'den overvejende del af kroppen' skulle være nærmere, for at definitionen var opfyldt.

Fremover er man nærmere, når nogen del af hoved, krop eller fødder har passeret modspilleren (og bolden). Armene tæller ikke med – dem spiller man jo ikke fodbold med. Vi henviser til hosstående tegninger fra FIFA, som illustrerer det bedre end nok så mange ord.

Hvor meget det så kommer til at betyde i praksis, er nok et stort spørgsmål, når man tager øjets træghed og reaktionstiden hos dommer og linjedommer i betragtning, men nu er der i hvert fald en glasklar teoretisk definition. Bemærk også, at den gode gamle danske fortolkning af, hvornår man er på egen banehalvdel (så længe man havde kontakt med midterlinjen) ved samme lejlighed står for fald.

Det er stadig et helt grundlæggende princip, at man ikke skal fløjte/vinke, hvis man er i tvivl – med andre ord skal tvivlen fortsat komme angriberen til gode.

[...]



B.3. [Carlsen3]

Uddrag fra e-mail som svar på forespørgsel om præcisering af, hvornår bolden er rørt. E-mailen er modtaget 12/9 2005.

[...]

Mht. definitionen af, hvornår bolden er rørt: det er den, når der er kontakt, uanset om det medfører en retningsændring eller ej. Pointen er, at dommeren ved en trøje- eller håarkontakt e.l. ofte vil kunne høre kontakten, også selv om den ikke kan ses. Selvfølgelig er det undtagelsen, at der ikke er en eller anden form for retningsændring, men i reglens forstand er det altså ikke noget krav. Så jeg vil foreslå dig at tage det nævnte forbehold for mikroskopiske berøringer...

C. Appendiks til kapitel 3

C.1. [Brask]

Telefonsamtale med Martin Brask fra TV3. Samtalen fandt sted 28. september 2005 som svar på en e-mail til TV3's fodboldredaktion, Onside, om kameradækning.

Martin Brask fungerer ved TV3's livedækning af superligakampe skiftevis som teknisk koordinator og som kameraoperatør. På grund af hans viden om kameraerne var det ham, redaktionen valgte til at svare på henvendelsen.

Ved superligakampe er der opstillet en række kameraer forskellige steder på stadion for at følge kampens begivenheder fra flere vinkler. Hovedkameraet, som er det man som tv-seer ser det meste af kampen igennem, er placeret højt oppe på tribunen og ud for midterlinjen, så man kan se så meget som muligt af banen på én gang.

Til visse kampe og når der er plads opstilles der endvidere to såkaldte offsidekameraer, som er placeret ud for midten af hver sin banehalvdel, så der kan gives en bedre kameravinkel ved offside-situationer. For kunne bedømme offside-situationer skal man helst se situationen ud for næstsidste forsvarsspiller, og et kamera ud for midten af banehalvdelene er tættere på at opfylde dette.

Endvidere findes der super-slow-kameraer rundt om banen, som det meste af tiden fokuserer på enkelte spillere, nærkampe og tætte situationer i straffesparksfelterne. Disse kameraer optager nærbillederne med en frekvens på 75 Hz for at situationerne kan afspilles i en tredjedel tempo, hvorved man bedre kan se driblinger, redninger, frispark og så videre. Når der vises billeder i almindeligt tempo fra disse kameraer, vises kun hvert tredje billede.

Hovedkameraerne og offsidekameraerne optager oversigtsbilleder med en frekvens på 25 Hz, da disse billeder ikke er beregnet til langsomme gengivelser. Ønskes der langsomme gengivelser af situationer optaget med oversigtskameraer, vises de samme billeder flere gange i træk.

I udlandet ses der af og til kameraer monteret på skinner helt nede ved sidelinjerne. På den måde kan kameraet følge med, når spillerne løber ned langs sidelinjen, hvilket giver flotte billeder. Formålet med disse kameraer er ligesom super-slow-kameraer at give nærbilleder, og er derfor ikke anvendelige i offside-sammenhæng, da man som regel ikke kan se bolden og spillerne omkring offsidegrænsen samtidig.

C.2. Beskrivelse af [Larsen & Hansen]

Dette afsnit er en kort beskrivelse af prototyperne udviklet af [Larsen & Hansen]. Det samlede system hænger sammen som vist i Figur 63 nedenfor. For en mere detaljeret beskrivelse end den, som tilbydes herunder, henvises til [Larsen & Hansen, s. 42-63].

ScenarioGenerator

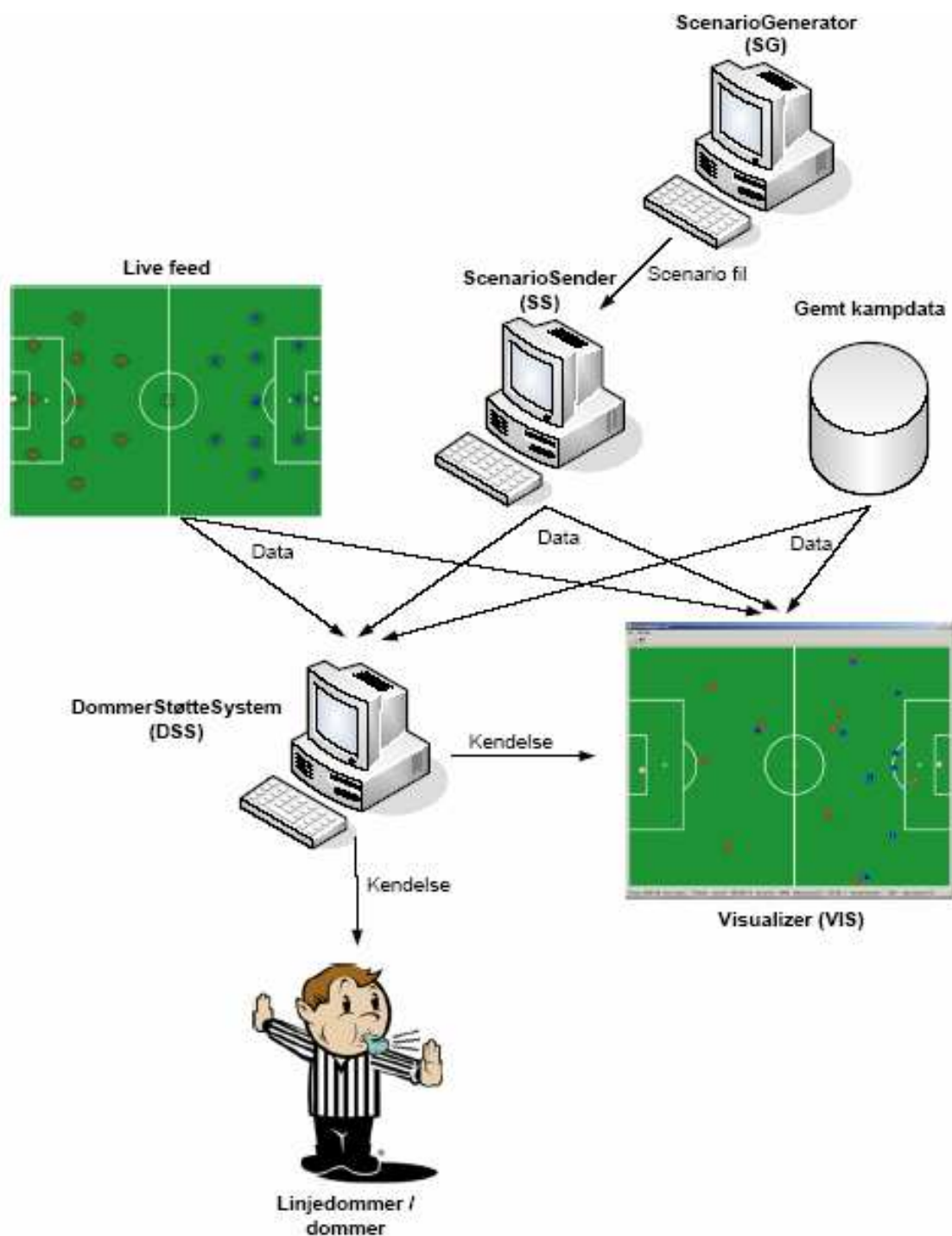
ScenarioGenerator er udviklet med det formål at opstille scenarier, der kan bruges til at teste den udviklede algoritme. I dette program, som er skrevet i C# og kan afvikles på en almindelig PC, kan spillere og bolds placering og bevægelser opsættes, og det opsatte scenario kan gemmes som en fil.

Dette delsystem er skrevet for at råde bod på, at det ikke er lykkedes at fremskaffe rigtige positioneringsdata. Kun meget primitive scenarier kan opstilles, hvor brugeren selv definerer hver eneste bevægelse for både spillere og bold. Skruning i bolden, vindstød, skæve opspring, og andre situationer, hvor bolden får en mere eller mindre tilfældig opførsel, dækkes derfor ikke i scenarierne, med mindre man lægger et stort arbejde i at definere dem. De andre delsystemer er tilsvarende simple, så ScenarioGenerator lever fint op til dets formål.

ScenarioSender

ScenarioGenerator er udviklet i C#, som har fine faciliteter til grafiske programmer, men til gengæld kan der ikke garanteres noget i relation til realtid. Derfor er ScenarioSender udviklet med henblik på at sende positioneringsdata ud på det netværk, der kobler systemerne sammen. ScenarioSender er udviklet i C++ og afvikles fra en PC med styresystemet RTOS-32 fra On Time [On Time], hvorfor det kan garanteres, at data om spillere og bolds placering kan sendes til DommerStøttesystem hvert millisekund. ScenarioSen-

der kan afspille en scenariofil lavet med ScenarioGenerator, og simulerer så at sige et positioneringssystem.



Figur 63 – Systemoversigt fra [Larsen & Hansen, s. 8].

DommerStøtteSystem

DommerStøtteSystem modtager positioneringsdata fra enten et positioneringssystem (live feed) eller et simuleret positioneringssystem og vurderer, om der findes medspillere i offsideposition i det øjeblik, en spiller afleverer bolden. I så fald gives der besked til interesserede parter i form af Visualizer eller en linjevogter, som så kan vurdere, om spilleren er i en strafbar offsideposition.

Endvidere har DommerStøtteSystem til opgave at persistere de indkommende data, så kampen kan 'spilles igen' for eksempelvis at verificere kendelserne.

Ligesom ScenarioSender kører DommerStøtteSystem på en PC med RTOS-32 og er derfor udviklet i C++.

Visualizer

Den fjerde applikation modtager positioneringsdata og markeringer og viser dem på skærmen. På den måde kan det efterses, om data afsendes korrekt, og rigtigheden af de afgivne markeringer kan kontrolleres, mens systemet kører. Visualizer skal ikke opfylde realtidskrav og er derfor udviklet i C#, som er lettere at udvikle grafiske applikationer i.

C.2.1. Positioneringsdata

Som beskrevet i afsnit 3.2 valgte [Larsen & Hansen] positioneringssystemet fra Cairos som værende det mest anvendelige til brug for offsidetetektering. Cairos ønskede dog ikke at tage del i specialet, så i stedet blev et sæt af minimumskrav til et positioneringssystem stillet op [Larsen & Hansen, s. 23]. Disse minimumskrav ligger til grund for de udviklede prototyper.

Prototyperne er baseret på, at en fodboldspiller kan bestemmes som ét punkt. For hver spiller samt bolden angives (x, y)-koordinater, og disse sendes hvert millisekund i én samlet datapakke med et tilhørende tidsstempel [Larsen & Hansen, s. 24].

Valgene af 2-dimensionelle data og opdateringsfrekvensen på 1000 Hz for både spillere og bold skyldes en afvejning af implementeringsmæssig kompleksitet i forhold til udbytte. Ved at sende alle data i samme pakke opnås et væsentligt mindre overhead [Larsen & Hansen, s. 83], men det forudsætter til gengæld samme opdateringsfrekvens for bold og spillere, hvilket ikke er tilfældet i Cairos' positioneringssystem.

Synkronisering og uddeling af tidsstempler antages forestået af positioneringssystemet [Larsen & Hansen, s. 40]. Positioneringssystemet står i forvejen for at indsamle de opfangede radiosignalers forsinkelser hos modtagernetværket og derudfra beregne transmitternes positioner. Derfor kan det antages, at systemet har så meget styr på tiden, at det kan give nøjagtige tidsstempler, og eftersom alle radiosendere sender med samme frekvens, kan alle data i samme pakke gives samme tidsstempel. Dette kan godt nok give en lille unøjagtighed, da radiosenderne ikke nødvendigvis sender på præcist samme tidspunkt, men forskydningen vil være på under et millisekund, og da spillere og bold kun flytter sig minimalt i dette tidsrum, kan unøjagtigheden ignoreres.

Spillernes og boldens positioner antages at være angivet i cm, hvor koordinatsystemets nulpunkt er det ene hjørne af fodboldbanen [Larsen & Hansen, s. 25]. x-koordinaten svarer til banens længderetning, og y-koordinaten svarer til bredderetningen. De maksimale mål på en fodboldbane er i øvrigt 120 x 90 m [Fodboldloven, s. 8] og ikke 120 x 95 m, som det angives i [Larsen & Hansen, s. 25].

C.2.2. Design

Overordnet set er det samlede system designet som forklaret i indledningen til afsnit C.1. I den virkelige verden ville DommerStøtteSystem modtage live-data fra et positioneringssystem, men i [Larsen & Hansen] er det ScenarioSender, der sørger for at sende positioneringsdata. Det gør den på baggrund af scenariofiler oprettet med ScenarioGenerator, hvor man kan indtaste bevægelsesmønstre for spillere og bold. Visualizer modtager de samme data og viser dem på skærmen sammen med de markeringer, DommerStøtteSystem kommer med.

De samme markeringer skulle i et endeligt system sendes krypteret til linjedommeren, men dette er ikke implementeret [Larsen & Hansen, s. 63].

Positioneringsdata sendes via UDP, men da systemet kører på et dedikeret 100 Mbit Ethernet, er pakketabet minimalt, hvilket test også viser [Larsen & Hansen, s. 64]. Da

både Visualizer og DommerStøtteSystem samt eventuelt andre interessenter skal modtage en voldsom mængde data, benyttes multicast, så de samme data kun sendes én gang [Larsen & Hansen, s. 43].

Systemets offsidemarkeringer er en anelse vigtigere end de enkelte pakker med positioneringsdata, så for at være helt sikker på, at markeringerne når frem, anvender DommerStøtteSystem TCP til at sende beskeder over [Larsen & Hansen, s. 43].

For at kunne leve op til realtidskravene om at linjedommeren skal have systemets markering at vide senest 1 sekund efter at bolden er afleveret, skal alle beregninger og al datatransmission kunne nås i dette tidsrum. Radiosenderne antages at sende deres ID til modtagernetværket hvert millisekund, og dette tager så kort tid, at der kan ses bort fra denne tid i den samlede tid til rådighed. Herefter sender modtagerne tidsstempel og ID til en central enhed, hvilket tager omtrent lige så kort tid. Den centrale enhed formodes at kunne give positioneringsdata for bolden og spillerne 1000 gange i sekundet, så den må antages at kunne nå at foretage positionsberegningerne og sende dem ud på netværket på den korte tid, der er herimellem. Positioneringsdata sendes på lige så kort tid som andre data og udgør derfor heller ikke nogen belastning i det samlede regnskab, og det samme gælder transmissionen fra DommerStøtteSystem til linjedommeren. Dermed er der næsten et helt sekund for DommerStøtteSystem til at foretage sine beregninger i [Larsen & Hansen, s. 34].

DommerStøtteSystem består af to tråde, der har ansvar for dommerkendelserne henholdsvis persistering af de indkommende data. Data gemmes i klumper á 500 indkomne pakker at hensyn til tiden det tager at skrive på disk, og tråden er lavt prioriteret for at persistering ikke går ud over hovedformålet, offsidemarkering.

Offsidetekteringstråden styres af en løkke, der sættes i gang ved modtagelse af en pakke med data. Dataene for bolden gemmes i en cirkulær buffer med 11 pladser, svarende til et tidsrum på 10 ms, som er den tid, boldens acceleration måles over [Larsen & Hansen, s. 59]. Der køres med *preemptive scheduling* (læs mere om scheduling i [Douglass, s. 531]), så denne tråd kan afbryde persisteringstråden, når der kommer nye data [Larsen & Hansen, s. 63].

C.2.3. Offsidetektering

Den overordnede algoritme til offsidetektering tager udgangspunkt i boldens bevægelser, og først når en aflevering detekteres, kigges på spillernes positioner [Larsen & Hansen, s. 32]. Et andet alternativ, hvor der ved boldmodtagelse kigges tilbage for at se, om den modtagende spiller var i offsideposition, da bolden blev afleveret, nævnes i [Larsen & Hansen, s. 31]. Denne fremgangsmåde forkastes, fordi der er fare for, at den mulige offside ikke kan afgøres indenfor tidskravet på 1 sekund efter afleveringstidspunktet [Larsen & Hansen, s. 32]. Dette sker, fordi bolden ved en lang aflevering kan være længe undervejs, inden den når frem til den spiller, der eventuelt er strafbart offside. Et bedre argument for at forkaste den alternative fremgangsmåde er, at man ikke behøver modtage bolden for at være strafbart offside. Det er nemlig også strafbart at deltage aktivt i spillet ved at genere en modspiller eller opnå en fordel af sin offsideposition, jf. afsnit 2.1, og derfor kan man ikke vente og se, om spilleren i offsideposition modtager bolden.

Når en aflevering er detekteret, findes den afleverende spiller ved at finde frem til den spiller, der er tættest på bolden. Herefter sammenlignes spillernes x-værdier for at finde ud af, om der findes medspillere til afleveringens kilde, som er tættere på modstandernes mål end den næstsidste spiller på modstanderholdet samt midterlinjen, afleveringens kilde og bolden. Er der det, sendes markeringer indeholdende numrene på de spillere, der befinder sig i en offsideposition.

D. Appendiks til kapitel 4

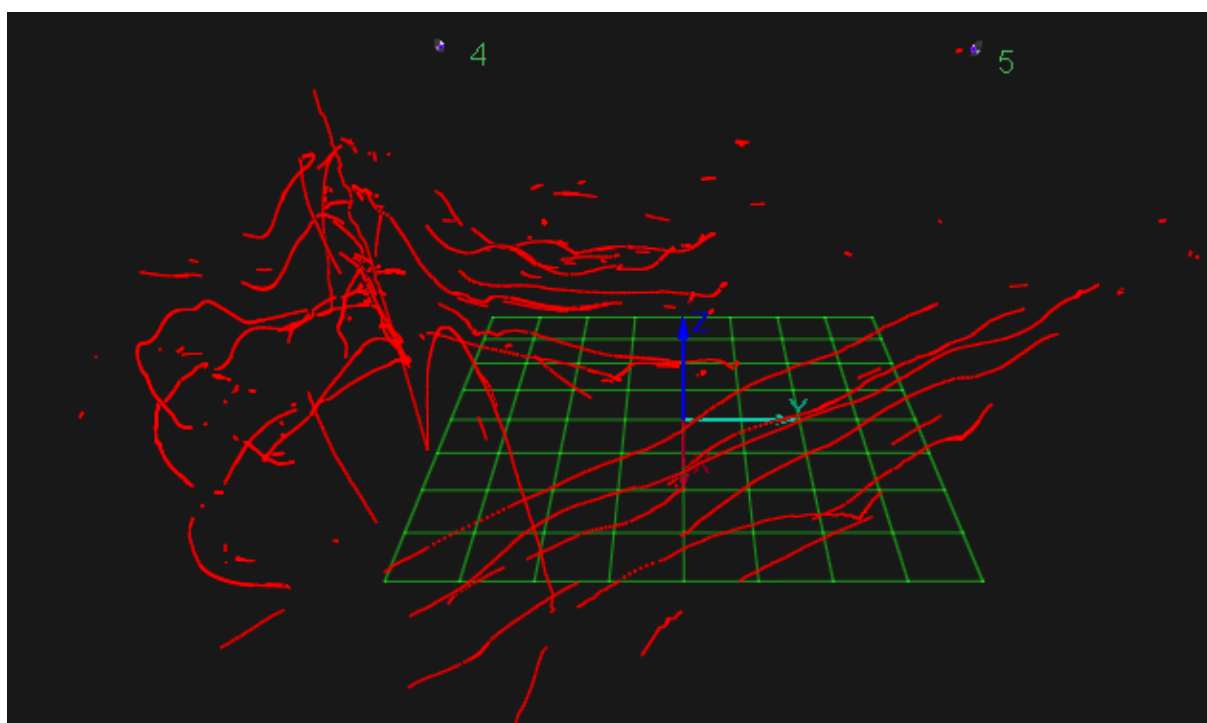
D.1. Qualisys

Som beskrevet i kapitel 4 bruges et optagesystem fra Qualisys til analyse af kroppens placering i forhold til fødderne ved forskellige bevægelser i en fodboldkamp. I dette afsnit beskrives det, hvordan systemet fungerer, og hvordan de optagne scenarier skal behandles, så de bliver egnede til menneskeligt brug og computerbrug.

Systemet kan optage en slags videosekvenser, hvor der i stedet for levende billeder optages 3D-positioneringsdata for bestemte punkter. Punkterne identificeres ved at sætte reflekterende markører på udvalgte steder på de emner, der skal optages.

I systemet benyttes en række kameraer, der stilles op omkring det område, hvor der skal optages. Ved hjælp af en L-formet stok med en bestemt størrelse og med reflekterende markører, kan hver enkelt kamera ud fra dets betragtningsvinkel beregne dets fysiske position. Kameraerne udsender infrarødt lys, som reflekteres af markørerne og dermed kan genkendes af kameraets linse og softwaren bag. Systemet er herefter kalibreret, og hjørnet af stokken udgør 3D-koordinatsystemets nulpunkt.

Optagelserne foregår med infrarødt lys og reflekterende markører. Hvis to eller flere kameraer kan se den samme markør, kan markørens 3D-position beregnes efter almindelige trigonometriske principper. Dette gøres i systemets software med en frekvens på 240 Hz, og data gemmes i en fil. Der kan ikke sættes markører udenpå en fodbold, hvis den skal opføre sig normalt, men i stedet kan man klistre reflekterende tape omkring bolden. Systemets software leder efter runde objekter, og hvis hele boldens overflade er dækket af tape, vil den også blive opfattet som en markør.



Figur 64 – 3D-billede med ubehandlede data. De røde baner udgør markørernes bevægelser gennem optagelsen. Det grønne område er 4x4 meter, og koordinatsystemets nulpunkt findes, hvor den blå, den lyseblå og den mørkerøde pil mødes. De blå kasser ved siden af 4-tallet og 5-tallet foroven viser den fysiske placering for to af kameraerne.

En datafil kan åbnes med et program ved navn Qualisys Track Manager, hvor det optagede scenario kan afspilles. Markørernes bevægelser kan følges som røde prikker, der

bevæger sig i et 3D-rum, hvor man løbende kan skifte betragtningsvinkel og zoom, så man kan se bevægelserne fra forskellige vinkler og i forskellig detaljeringsgrad.

Efterbehandling af data

Qualisys Track Manager benyttes også til at efterbehandle datafilerne. Til det formål kan det være nyttigt at få vist hele scenariet på én gang, som det er gjort i Figur 64, hvor alle markørernes baner gennem scenariet er tegnet op. Som det kan ses på figuren, indeholder datafilerne en del støj, og det er i det hele taget ikke nemt at finde hoved og hale i optagelsen.

For at give bedre overblik over det optagne scenario er det muligt at navngive hver enkelt bane og give den en farve. I Figur 67 er banerne for markørerne på tre spillere samt bolden blevet farvelagt, så alle baner for den samme spiller har samme farve.

Hvis der er 'huller' i optagelserne, hvor kameraerne ikke har kunnet se markørerne tilstrækkeligt godt – eksempelvis den lyseblå spillers højre skulder, som udgøres af den øverste lyseblå linje – skal markørens bane stykkes sammen af flere baner. Den lyseblå spillers højre skulder har et hul længst til venstre på billedet, men da de to baner ikke overlapper hinanden i tid, kan de uden videre sættes sammen til at tilhøre den samme navngivne bane. Er der kun et lille tidsmæssigt overlap mellem to baner, kan banernes positioner i overlappet interpoleres, så de kun fremstår som én bane. I figurene angiver de stiplede linjer, at banen er blevet interpoleret, og som det kan anes i Figur 64 laver systemet selv en vis mængde interpolering, når markørernes baner beregnes.

Optagelserne er foregået i idrætshallen på AaB's træningsanlæg, hvor der er trægulv. Denne type gulv giver en lille smule efter, når man løber på det, hvilket har den uheldige konsekvens, at kameraerne også rystes en smule. Derfor risikeres det, at den samme markør fremstår som flere baner i optagelsen med en lille forskydning imellem dem. Ofte er det tidsmæssige overlap stort, men den ene bane kan starte tidligere, mens den anden slutter senere, som illustreret i Figur 65. For at give den længst mulige bane skal de to baner sættes sammen, og dermed vil den sammensatte bane afvige fra den virkelige bevægelse. Figur 66 viser, hvordan en ret linje i virkelighedens verden kan blive forvansket på grund af støj i optagesystemet.

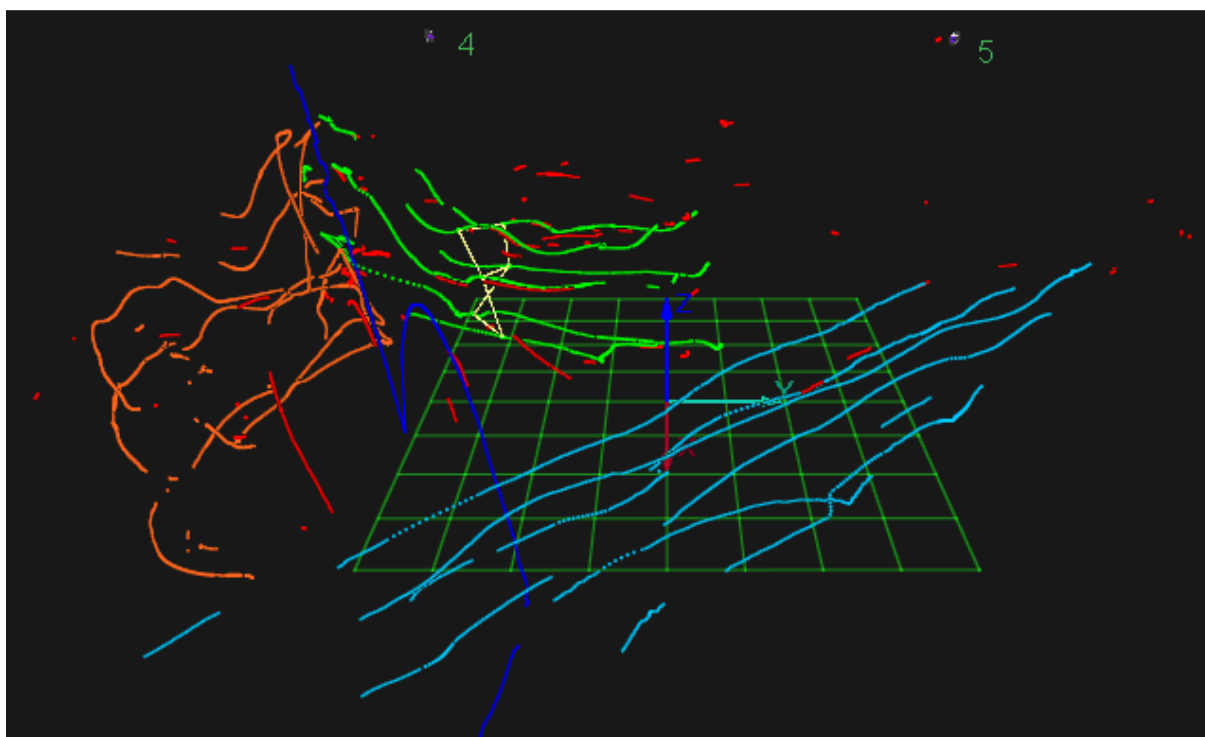
Figur 65 – To forskudte optagelser af den samme markør.

Figur 66 – De to baner fra Figur 65 sat sammen til én bane.

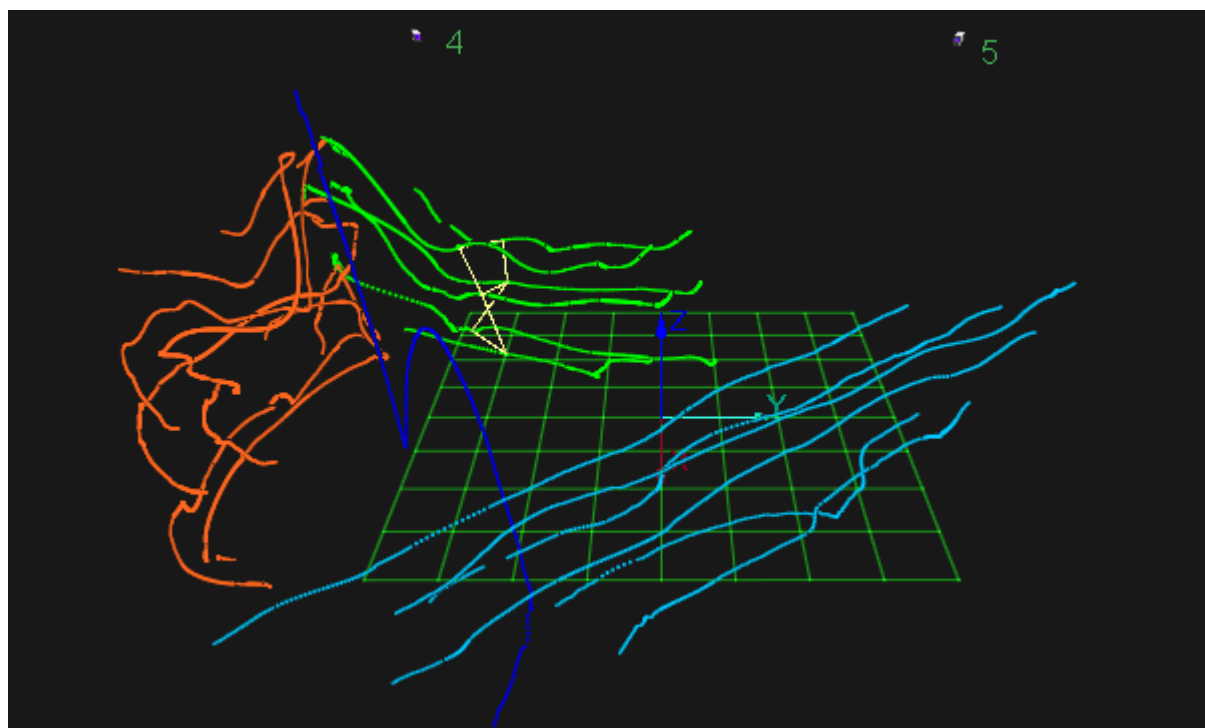
Yderligere kan der indsættes 'knogler' mellem banerne, hvilket også blev vist i Figur 18 på side 36. I Figur 67 er der knogler mellem den grønne spillers fødder, hofter og skuldre, og dermed fås en omrids af den pågældende spiller. Knogler gør det lettere at se sammenhængen mellem banerne – både i efterbehandlingsfasen og når scenariet afspilles.

Sidste trin i efterbehandlingsfasen er at fjerne støjen og udfylde hullerne i banerne. Qualisys Track Manager stiller et værktøj til rådighed, hvor man visuelt kan fylde hullerne ud, så banerne får så flydende et forløb som muligt. Denne udfyldning er en interpolering mellem de to endepunkter, som hullet befinder sig imellem, men der tages højde for retningen på endestykkerne, så retningsændringer sker i en blød bue. På samme måde forholder det sig med hensyn til farten, så en acceleration eller deceleration ikke kommer på et øjeblik, men spredes ud over det udfyldte hul.

Figur 68 viser, hvordan scenariet fra Figur 64 ser ud, når efterbehandlingen er afsluttet. Selvom hullerne er blevet fyldt ud, ser banerne ikke ud til at være helt sammenhængende, og det skyldes, at markøren har foretaget et stort spring imellem to billeder. Dette er ikke nødvendigvis i overensstemmelse med virkeligheden, men skyldes unøjagtigheder forårsaget af omgivelserne.



Figur 67 – Scenariet fra Figur 64, hvor de reelle baner er blevet farvelagt. Den blå bane er bolden, de røde baner er støj, mens de lyseblå, grønne og orange baner repræsenterer markørerne på spillerne. De gule streger, der forbinder de grønne baner, er den grønne spillers 'knogler' på et givet tidspunkt.



Figur 68 – Støjen i Figur 67 er nu fjernet, hvormed kun de reelle data er at se. Endvidere er markørernes baner gjort sammenhængende, så der ikke længere er 'huller' i banerne.

Efterfølgende kan det optagede scenario eller dele deraf eksporteres til en tabulator-separeret tekstfil, som i dette speciale vil gøre det ud for testdata til de udviklede algoritmer. I tekstfilerne angives markørernes 3D-placering med en nøjagtighed på millimeterniveau, endda med tre decimaler, men hvorvidt denne præcision svarer til virkelighe-

den, er ikke at finde i deres dokumentation [QTM]. Desuden fungerer tekstfilerne som input til den software, som analyserer spillernes bevægelser. Mere herom i afsnit D.2.

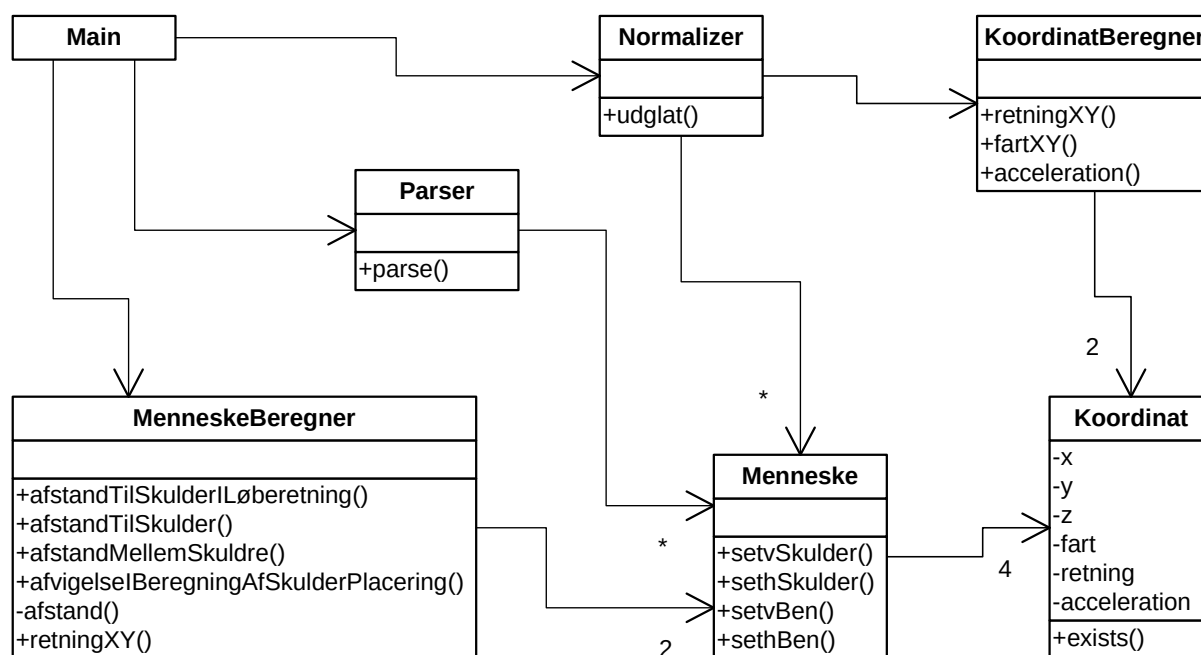
Udover at kortlægge elitespilleres bevægelser har formålet med optagelserne været at generere testdata til brug i test af de udviklede algoritmer. Systemet fra Qualisys giver nemlig mulighed for at eksportere 3D-optagelserne til rå tekstfiler, som en modificeret udgave af ScenarioSender kan sende ud på netværket. [Larsen & Hansen] udviklede deres egen simple ScenarioGenerator til at opsætte scenarier til brug i test. Optagelser med Qualisys er langt mere realistiske og omfattende, og vil således bedre kunne bruges til at vurdere algoritmerne ud fra.

D.2. Analysesoftware

Til bevægelsesanalysen i kapitel 4 er skrevet et stykke software med det lidet opfindsomme navn Bevægelsesanalyse. Der kan udføres forskellige analyser, som beregner eksempelvis afstanden fra forreste fod til en skulder i løberetningen, afstanden fra foden til den tilhørende skulder eller afstanden mellem skuldrene. Applikationen arbejder på en række optagelser foretaget med systemet fra Qualisys og efterfølgende eksporteret til .tsv-format. En fil antages at give positioneringsdata for én person, hvorfor der er fire eller seks markører pr. linje. Markørerne i samme frame skrives ved eksport til .tsv-format i samme linje.

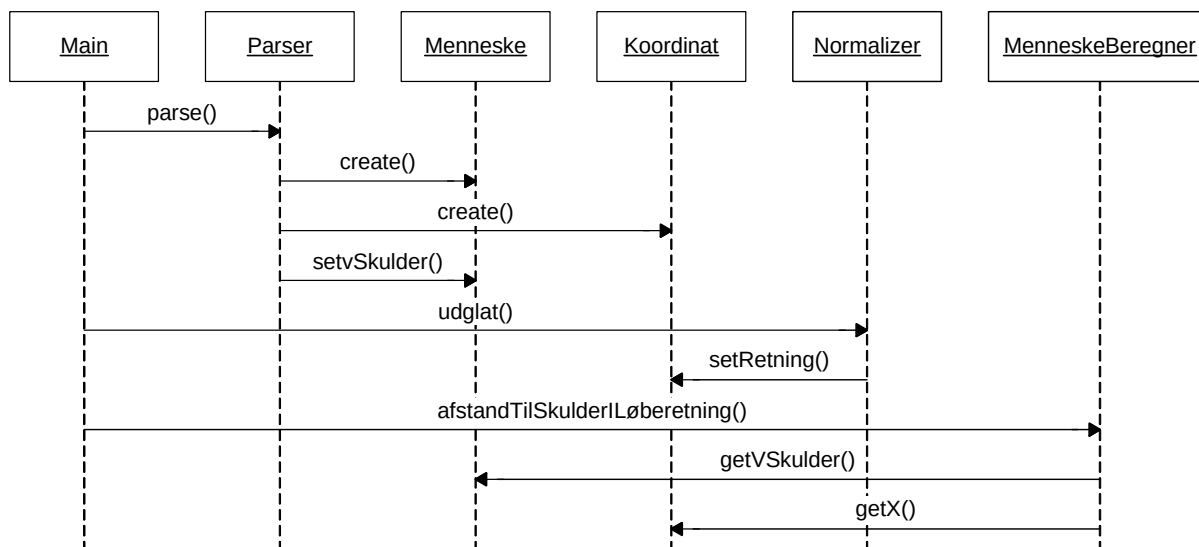
Programmet er skrevet i Java, og der er ikke lavet nogen grafisk brugergrænseflade, hvorfor programafviklingen styres gennem kommentering i `main()`-metoden. Her specificeres et array af .tsv-filer, som analysen skal udføres på, og den valgte analysemetode vælges. I afviklingen af den valgte analyse udskrives de rå resultater i konsollen, og disse resultater kan så efterfølgende importeres i et regneark for yderligere analyse og tegning af grafer.

Opbygningen af programmet er vist i Figur 69. MenneskeBeregner udfører den egentlige analyse, når de ønskede filer er blevet indlæst af Parser og efterfølgende udglattet med Normalizer. De mest komplicerede beregninger har til formål at beregne afstanden i løberetningen mellem to koordinater, og algoritmen til denne type beregning beskrives i appendiks D.2.1.



Figur 69 – Klassediagram for Bevægelsesanalyse.

Et typisk programgennemløb er vist ved sekvensdiagrammet i Figur 70. Sekvensen gentages et antal gange, der svarer til antallet af filer, der er valgt til analyse.



Figur 70 – Sekvensdiagram for Bevægelsesanalyse.

Main starter med at oprette et Parser-objekt, hvor det angives, hvilken fil der skal parses. Filen indlæses ved kaldet af `parse()`, og undervejs oprettes nye Menneske- og Koordinat-objekter. Parser indlæser en linje af filen ad gangen, og på denne linje står fire eller seks (x, y, z)-koordinater adskilt af tabulatorer. Således vil hver linje for et menneske med seks markører bestå af atten tal. Rækkefølgen af markører formodes at være venstre skulder, højre skulder (eventuelt efterfulgt af venstre hofte, højre hofte), venstre ben og højre ben, og hvert af disse koordinater tilknyttes det rigtige sted på Menneske-objektet.

Når hele filen er gennemløbet, returneres kontrollen til Main, der ved hjælp af Normalizer sørger for at fjerne den værste støj, som det blev forklaret i afsnit 4.1. Hastighed, acceleration og retning udregnes således som en funktion af positionen i den pågældende frame og positionen ti frames senere, hvis disse findes. Udregningerne foregår ved brug af Koordinatberegner, som ikke er vist i Figur 70. Når et objekt af klassen Koordinat-Beregner oprettes, får det to Koordinat-objekter som input, og herefter beregnes alle de nævnte oplysninger.

Efter udglatning starter den egentlige analyse, som foretages af MenneskeBeregner. Der findes flere forskellige analyser, som udføres gennem hver deres metode – i sekvensdiagrammet er det `afstandTilSkulderILøberetning()` – men fælles for dem alle er, at de udskriver de rå resultater (de beregnede afstande samt eventuelt fart og acceleration) i konsollen. For at kunne foretage de nødvendige beregninger laver MenneskeBeregner forespørgsler på såvel Menneske-objekter som på disses Koordinat-objekter, hvor fart og retning er blevet udregnet af Normalizer.

D.2.1. Afstandsberegning

Som en del af bevægelsesanalysen i afsnit 4.3 undersøges det, hvor langt skuldrene er foran fødderne i forhold til (x, y)-løberetningen ved almindeligt løb. Denne afstand er en vigtig del af den algoritme, der bruges til at beregne skuldrenes placering i forhold til benene, og dermed hvor præcist, punktet nærmest mållinjen på spilleren kan bestemmes.

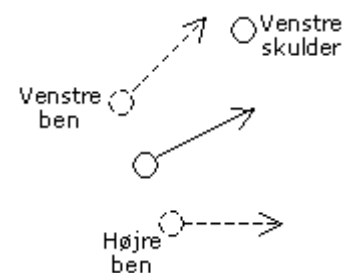
Afstandsberegningen er forholdsvis kompliceret og forklares i dette afsnit med udgangspunkt i Figur 71, hvor de stiplede cirkler med de stiplede pile repræsenterer placeringen

af spillerens fødder. Den skulder, afstanden skal udregnes for, repræsenteres af den fuldt optrukne cirkel uden pil.

Beregningen forløber efter følgende algoritme:

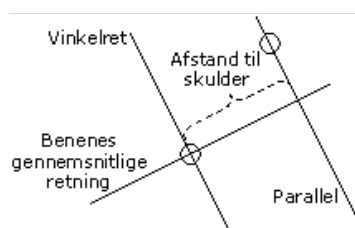
1: Beregn benenes gennemsnitlige placering. Den fuldt optrukne cirkel med pilen i Figur 71 viser denne placering.

2: Beregn kroppens retning. I afsnit 4.3 beskrives to metoder at gøre dette på. Eksemplet tager udgangspunkt i den simpleste metode, hvor benenes gennemsnitlige retning bruges som indikation på kroppens retning. I Figur 71 vises denne retning med den fuldt optrukne pil.



Figur 71 – Benenes placering og retning samt skulderens placering.

3: Find den retning, der står vinkelret på benenes gennemsnitlige retning. I Figur 72 er denne retning tegnet, så det går igennem benenes gennemsnitlige placering. Benenes gennemsnitlige retning er i forhold til Figur 71 tegnet som en linje, der går igennem benenes gennemsnitlige placering.



Figur 72 – Afstanden fra benenes gennemsnitlige placering til skulderen i løberetningen.

4: Beregn hældningen på denne retning. Hældningen bruges til at udregne forskriften for de to linjer, der i Figur 72 kaldes *Vinkelret* og *Parallel*.

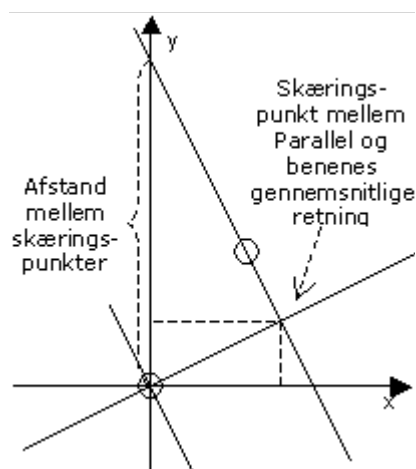
5: Ud fra hældningen fra punkt 4 og koordinatet for benenes gennemsnitlige placering bestemmes skæringspunktet med y-aksen for den linje parallelt med den vinkelrette, som går igennem føddernes gennemsnitlige placering (i Figur 72 kaldet *Vinkelret*).

6: På samme måde bestemmes skæringspunktet med y-aksen for den linje parallelt med den vinkelrette, som går igennem skulderens placering (i Figur 72 kaldet *Parallel*).

7: Afstanden mellem de to skæringspunkter (se Figur 73) bruges til at finde skæringspunktet mellem *Parallel* fra Figur 72 og føddernes gennemsnitlige retning, når koordinatsystemet sættes til at starte i føddernes gennemsnitlige placering.

8: Ved hjælp af skæringspunktets x- og y-koordinater kan afstanden til skulderen i forhold til løberetningen (se Figur 72) beregnes med Pythagoras' sætning.

Kort fortalt findes altså to linjer, der begge står vinkelret på løberetningen, og som går gennem benenes gennemsnitlige placering henholdsvis skulderens placering. Linjerne flyttes, så den ene går igennem koordinatsystemets centrum, og fra samme sted tegnes en linje, der svarer til løberetningen. Skæringspunktet mellem løberetningen og linjen gennem skulderen beregnes, og ud fra disse (x, y)-koordinater udregnes afstanden til skæringspunktet.



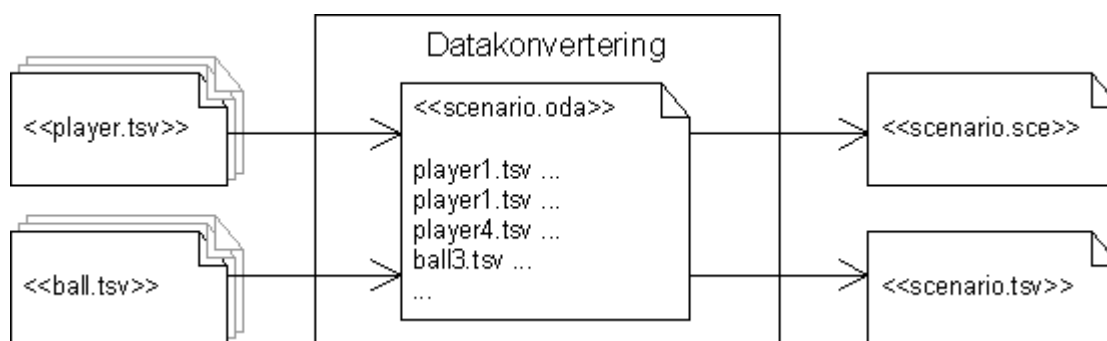
Figur 73 – Skæringspunktet mellem løberetningen og skulderen bruges til at finde afstanden.

E. Appendiks til kapitel 6

E.1. Datakonvertering

Datakonvertering er en applikation udviklet med det formål at sammensætte bidder fra Qualisys-optagelser til samlede scenarier, som ODA kan testes med. Hver bid beskriver en bevægelse for én spiller eller én bold, og disse bidder kan sættes sammen til spille-

rens eller boldens samlede bevægelsesmønster gennem scenariet. Sammensætningen af delbevægelser foregår gennem et scriptsprog, som kan parses af Datakonvertering, som efterfølgende indlæser de valgte filer og sætter dem sammen. Endelig skrives scenarierne i to forskellige formater, som kan forstås af henholdsvis ScenarioSender og Qualisys Track Manager. Figur 74 illustrerer denne proces.



Figur 74 – Datakonvertering fungerer ved hjælp af et scriptsprog, som i en .oda-fil beskriver de Qualisys-filer, der skal indgå i scenariet. Filerne sættes af Datakonvertering sammen til et samlet scenario og konverteres til .sce og .tsv.

Qualisys-filer kan eksporteres til tabulator-separerede tekstfiler af typen .tsv som den i Figur 75, der beskriver en bolds bevægelser. De tre tal på samme linje udgør henholdsvis x-, y- og z-værdi for boldens position i den pågældende frame, angivet i millimeter. Spillere repræsenteres af fire markører – venstre ben, højre ben, venstre skulder og højre skulder i nævnte rækkefølge – og vil således resultere i tolv tal pr. linje mod kun tre for bolde.

Når der i Figur 75 forekommer negative værdier skyldes det, at koordinatsystemets nulpunkt i systemet fra Qualisys findes midt i scenariet. En illustration af dette findes i Figur 68 på side 116.

Datakonvertering forudsætter, at hver enkelt person samt bolden i Qualisys-optagelser eksporteres til sin egen fil som den Figur 75.

Herefter kan man definere en scenariofil som den, der ses uddrag fra i Figur 76.

X	Y	Z
-2902.510	1674.580	55.148
-2902.130	1674.757	55.305
-2901.532	1674.792	54.932
-2901.229	1674.179	54.798
-2900.629	1673.309	54.973
-2900.184	1672.979	55.300
-2899.781	1673.281	55.237
...		

Figur 75 – Eksempel på uddrag af en bolds bevægelser i en .tsv-fil.

Objektnavn	Fil	Startframe	Slutframe	StartX	StartY	StartZ
Ball1	bold1.tsv	250	601	80000	39000	0
Ball1	bold14-1,2.tsv	315	474			
Ball1	bold14-.tsv	474	786			
Ball1	bold14-2.tsv	786	858			
Ball1	bold13-.tsv	294	558			
Ball1	bold13-1,5.tsv	558	705			
Team1Player8	1.tsv	365	415	79280	39450	0
Team1Player8	1.tsv	0	360			
...						

Figur 76 – Eksempel på .oda-fil.

Hver linje i scenariofilen indeholder navnet på det objekt, linjen gælder for, og navnet på den .tsv-fil, spillerens bevægelse skal hentes fra. De to efterfølgende tal angiver start- og slut-frame i den pågældende fil, så bevægelsen behøver ikke dække over alle frames i filen. Endelig angiver man med de sidste tre tal, i hvilket (x, y, z)-koordinat, bevægelsen skal starte. Er der flere linjer for samme objekt – som det er tilfældet for bolden – bliver bevægelserne sat sammen til en samlet bevægelse. De efterfølgende bevægelser starter, hvor den første bevægelse slutter, så det er ikke nødvendigt at angive startkoordinater i

mere end én linje. Startkoordinaterne angives i mm, og nulpunktet for koordinatsystemet er i øverste venstre hjørne, med x-koordinaten som repræsentant for banens længderetning, jf. afsnit 6.1.5.

Navn	X	Y	Z
Ball1	8000	3899	5
Ball1	8001	3899	5
Ball1	8001	3899	5
Ball1	8001	3899	5
Ball1	8002	3899	5
Ball1	8002	3899	5
Ball1	8003	3898	5
Ball1	8003	3898	5
...			

Figur 77 – Eksempel på bolds bevægelser i .sce-fil.

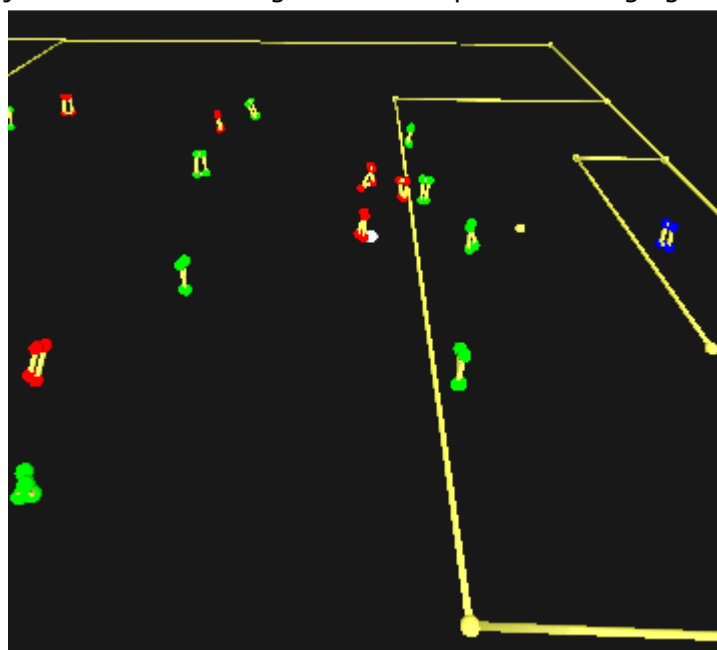
For bolden og alle spillere på banen defineres de filer, objekternes bevægelser skal sammensættes af, i en tekstfil som den ovenfor. Datakonvertering læser denne fil, sætter bevægelserne sammen til et enkelt scenario, og eksporterer som vist i Figur 74 dette scenario til to forskellige formater.

Det ene format er .sce, som ScenarioSender forventer, når den skal afspille et scenario. Figur 77 viser resultatet af en eksport, hvor boldens ID efterfølges af koordinater i tre dimensioner, denne gang oversat til koordinater á 2 mm. Qualisys-optagelserne er lavet med 240 Hz, så for at ScenarioSender kan afspille scenariet i nogenlunde samme fart som i virkeligheden, interpoleres der mellem hver frame, så frekvensen når op på 960 Hz. ScenarioSender afspiller 1000 frames pr. sekund, så afspilningen foregår en smule hurtigere end i virkeligheden. For spilleres vedkommende skrives

ID samt koordinater for venstre og højre ben.

Udover .sce oversættes scenariet også til .tsv, som altså kan vises af Qualisys Track Manager. Der angives positioner for bolden samt for ben og skuldre for hver enkelt spiller. Ved at indsætte ekstra markører i hjørnerne af banen og ved straffesparksfelter og lignende og forbinde dem med 'knogler' kan scenarierne afspilles, så de ligner virkeligheden. Et eksempel på dette ses i Figur 78. Alle markører for samme tidspunkt indsættes på samme linje, da Qualisys Track Manager opfatter en linje tekst som én frame.

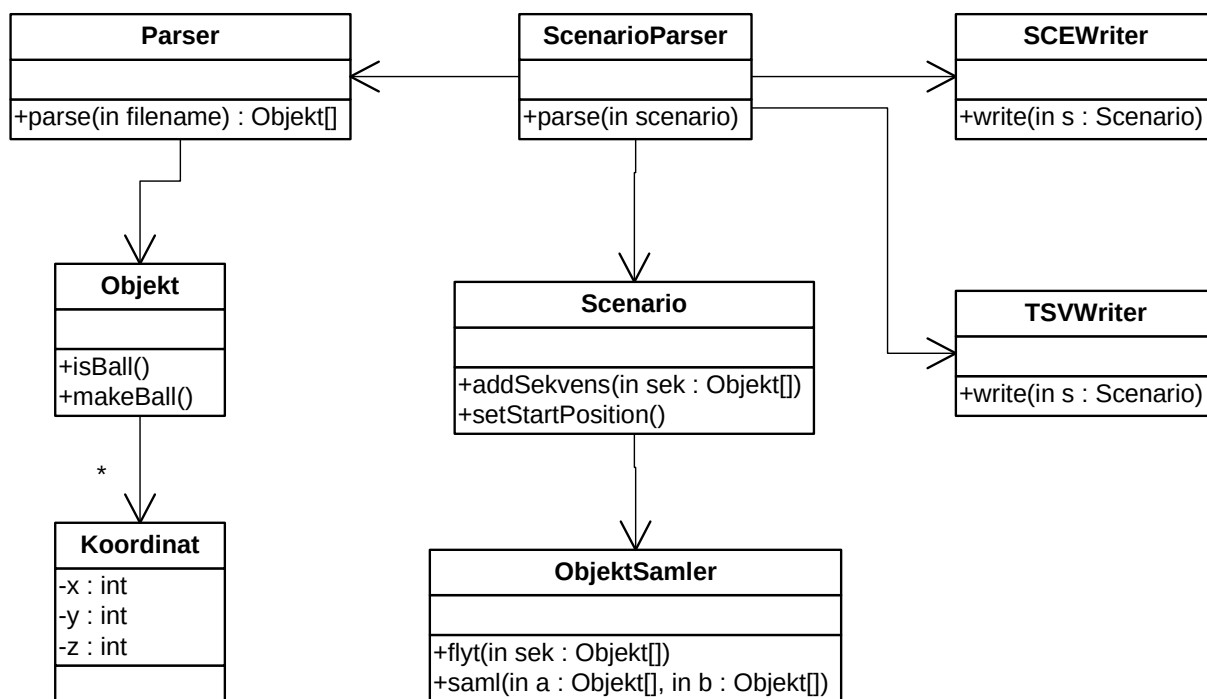
I Qualisys Track Manager kan man 'fryse' afspilningen af et scenario og skifte vinkel og zoom samt spole meget langsomt frem og tilbage, og på den måde er det muligt at nærstudere et scenario grundigt og eksempelvis finde frem til afleveringstidspunktet. Endvidere er der mulighed for at aflæse koordinaterne på alle markører, hvorved man kan afgøre, om en spiller er i offsideposition. Skulderpositionerne stemmer overens med de optagede positioner, så bortset fra føddernes udformning og hovedets placering kan man få et næsten helt præcist billede af spillerens udformning. Et scenario oversat til .tsv-format giver altså meget nøjagtige data at sammenligne ODA's resultater med.



Figur 78 – Øjebliksbillede fra scenario afspillet i Qualisys Track Manager.

Applikationen er opbygget som vist i Figur 79. Programforløbet styres af ScenarioParser, der læser en linje i scenariofilen ad gangen. For hver linje parses den fil, scenariofilen foreskriver, af Parser. Parser returnerer et array af typen Objekt, som hver indeholder fire Koordinat-objekter med x-, y- og z-værdier for den pågældende markør. En bold indeholder kun en enkelt markør, hvilket markeres med metoden makeBall(). Ar-

rayet af objekter gives til `Scenario`, som står for at holde styr på alle spillerne samt bolden. `ObjektSamler` bruges til at flytte de parsede objekt-arrays hen til den ønskede startposition, og sørger for at sætte delbevægelser sammen, så de fremstår som en sammenhængende bevægelse. Når hele scenariofilen er parset, omdannes scenariet til de to ønskede formater med `TSVWriter` og `SCEWriter`.



Figur 79 – Klassediagram for Datakonvertering.

Skal klassediagrammet i Figur 79 relateres til Figur 74, ses den første sammenhæng i højre side, hvor `SCEWriter` og `TSVWriter` står for at skrive de to filformater på hver deres måde. `ScenarioParser` indlæser .oda-filen i midten af Figur 74 linje for linje og beder for hver linje `Parser` om at indlæse en .tsv-fil (til venstre i Figur 74) med en enkelt person eller en bold. `Parser` opretter en række objekter med tilhørende koordinater, som gemmes i datastrukturen `Scenario` gennem programforløbet.

E.2. Bevis for korrekt programafvikling

I afsnit 6.5.4 blev det beskrevet, hvorledes ODA opnår en korrekt programafvikling uden race conditions. I dette afsnit bevises det ved hjælp af analyseværktøjet *Labeled Transition System Analyser (LTSA)* fra [Magee & Kramer], at ODA-løsningen på *Bounded-Buffer Producer/Consumer Problem Using Semaphores* [Stallings 1998, s. 218] også er korrekt.

Kort forklaret fungerer LTSA ved hjælp af det tilhørende modelleringssprog *Finite State Process (FSP)*, hvor der kan defineres en række processer, som kommunikerer ved hjælp af fælles transitioner. De modellerede processer fungerer som tilstandsmaskiner, og ved at sætte flere processer sammen opnås større tilstandsmaskiner. LTSA gennemgår disse tilstandsmaskiner og analyserer sig frem til den korteste vej til en fejltilstand eller deadlock. Kan en af disse tilstande ikke nås, sikrer modellen en korrekt programafvikling, og man kan trygt gå i gang med at implementere processerne i sin applikation, hvis man vel at mærke formår at overføre modellen på korrekt vis.

Figur 80 er en FSP-model af den måde, ODA opererer på de delte ressourcer. For at gøre modellen så lille som muligt er den semafor, der beskytter de kritiske sektioner, udeladt. På samme måde udelades opførsel, der ikke har direkte betydning for samtidigheden i programmet.

```

const Max = 2
const Mod = Max+1
range Int = 0..Max

//Semaphore
SEMAPHORE(I=0, M=1) = SEMA[I][M],          //I: initial value, M: max value
SEMA[v:Int][m:Int] = ( when(v<m) up   -> SEMA[v+1][m]
                      | when(v>0) down -> SEMA[v-1][m]
                      ).

//OffsideDetection
ODA = ODA[0][0],
ODA[t:Int][w:Int] =                      //t: local timestamp, w: global timestamp
  ( readAhead.down ->
    ( when((t+2)%Mod==w) advance ->
      ( when((t+1)%Mod==w) overwrite.up -> ODA[(t+1)%Mod][w]
        | when((t+1)%Mod==w) advance -> offside ->
          overwrite.up -> ODA[(t+1)%Mod][w]
        )
      )
    | fromStream -> ODA[t][(w+1)%Mod]
    ).
  ).

//DataThread
DATA = ( overwrite.down -> fromStream -> readAhead.up -> DATA ).

//Circular buffers
BUFFER = BUFFER[0][0],                    //write pointer, read pointer
BUFFER[w:Int][r:Int] =
  ( when(w==r) fromStream -> BUFFER[(w+1)%Mod][r]
    | when(w!=r) advance   -> BUFFER[w][(r+1)%Mod]
    | when(w!=r && (w+1)%Mod!=r) fromStream -> BUFFER[(w+1)%Mod][r]
    ).

//OffsideDetection and DataThread run concurrently, with one buffer and two
//semaphores
||PROGRAM = (BUFFER || ODA || DATA
  || readAhead:SEMAPHORE(0,1) || overwrite:SEMAPHORE(2,2))
  @{advance, fromStream, offside
//
  readAhead.down, overwrite.down //uncomment to do priorities
  }.

//Property to specify the allowed behaviour
property VERIFIER = VERIFIER[0],
VERIFIER[v:Int] = ( fromStream -> VERIFIER[v+1]
                  | advance   -> VERIFIER[v-1]
                  ).

//The program and the verifier run concurrently
||SECURE_PROGRAM = (VERIFIER || PROGRAM).

//Concurrent program to prove correctness even when OffsideDetection has
//higher priority
||PRIORITY_ODA = (SECURE_PROGRAM)<<{advance, readAhead.down, offside}.
//Concurrent program to prove correctness even when DataThread has higher
//priority
||PRIORITY_DATA = (SECURE_PROGRAM)<<{fromStream, overwrite.down}.

```

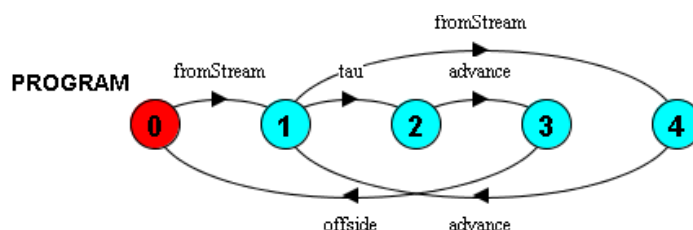
Figur 80 – FSP-model til bevis af korrekt afvikling af samtidighed.

Semaphore-processerne readAhead og overwrite modellerer selvfølgelig semaforer, nærmere bestemt semaforerne n og e i Figur 57 på side 80. I definitionen af Semaphore markerer when-garderne den mulige opførsel i forskellige tilstande. Således kan down eksempelvis ikke tælle semaforens værdi ned, hvis ikke den er større end 0.

ODA er en model af tråden OffsideDetection og har to variabler: det lokale timestamp t , der tælles op ved hver advance-transition, og det globale timestamp w , der tælles op hver gang der forekommer en fromStream-transition. fromStream er synkroniseringspunktet med den anden tråd, DATA, som er DataThread, og denne transition kan således kun forekomme, når begge processer er i de rigtige tilstande.

De cirkulære buffere, der er indeholdt i CBall- og CPlayer-objekterne i ODA, er modelleret som en enkelt buffer, som naturligt nok hedder Buffer.

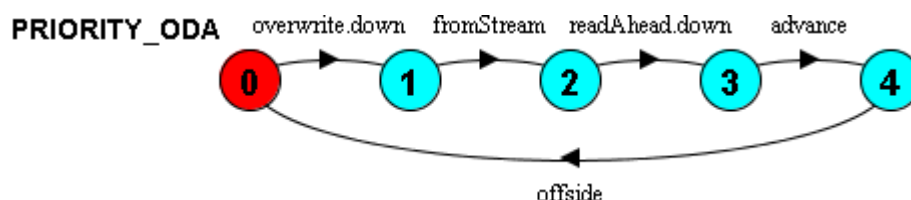
Når disse processer sættes sammen til en parallelt udført model Program, fås en stor tilstandsmaskine, som modellerer hele ODA's samtidighedsproblematik. Denne tilstandsmaskine kan minimeres af LTSA, så kun de ikke-skjulte transitioner (i Figur 80 markeret med @) fremgår af den tegnede tilstandsmaskine. Figur 81 viser tilstandsmaskinen for Program. Transitionen mærket tau dækker over en readAhead.down-transition, som er den eneste mulige transition, når der er udført mere end én fromStream-transitioner flere end advance-transitioner. Secure_Program giver en tilsvarende tilstandsmaskine.



Figur 81 – Tilstandsmaskine for det sammensatte program. tau-transitionen er den skjulte transition readAhead.down.

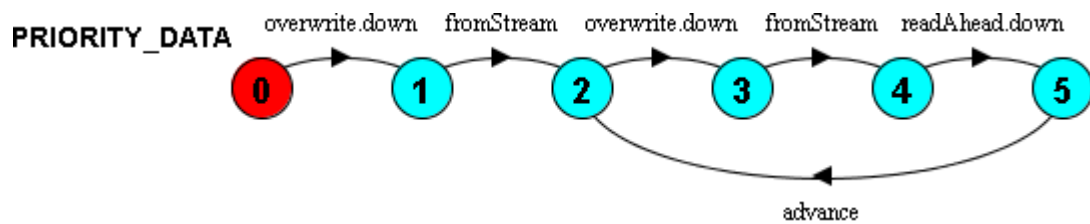
Ved at fjerne kommenteringen af den midterste linje i Program kan der åbnes op for at køre de processer, hvor der gives højere prioritet til enten transitionerne udført i ODA eller dem i Data. Disse processer kræver nemlig adgang til henholdsvis readAhead.down og overwrite.down for at kunne give højere prioritet til transitionerne i de to tråde.

Ved at give højest prioritet til transitionerne i ODA-processen fås tilstandsmaskinen i Figur 82. Som det fremgår, når det globale timestamp, som Data-processen styrer med fromStream, aldrig at komme mere end én foran det lokale.



Figur 82 – Tilstandsmaskine for det sammensatte program, når der gives højere prioritet til transitionerne i ODA.

Gives der i stedet prioritet til transitionerne i Data-processen, vil ODA som vist i Figur 83 først komme til, når Data er blevet blokeret af semaforen overwrite. Data starter med at kalde fromStream alle gange den kan, og lige så snart ODA har lavet en advance-transition, laves fromStream igen. Dermed udføres offside aldrig, men dette skyldes at den simple FSP-model ikke stemmer helt overens med løsningen i Figur 57 på side 80. I denne løsning gemmes en lokal kopi af den globale timestamp, og denne kopi kan ikke ændres af andre end OffsideDetection selv. Desuden tages der i FSP-modellen ikke højde for, at DataThread blokeres mens den venter på nye positioneringsdata og derfor ikke sidder på processoren hele tiden.



Figur 83 – Tilstandsmaskine for det sammensatte program, når der gives højere prioritet til transitionerne i Data.

Uanset om der gives lige høj prioritet til begge tråde eller højst prioritet til den ene eller den anden, kan der altså ikke nås til en tilstand, hvor der ingen fremdrift er, eller til en fejltilstand. Modellen i Figur 80 beviser altså, at programmet kan afvikles uden race conditions, hvormed løsningen fra Figur 57 på side 80 kan anses som værende lige så korrekt som den i [Stallings 1998, s. 218].

E.3. Testopstilling

Dedikeret 100 Mbit/s Ethernet.

Multicast Group IP: 224.100.1.1.

Visualizer

Dell 2,6 GHz P4, 512 MB RAM, 1000 Mbit/s netkort. (IHA-navn: GX270-005)

IP: 192.168.1.75 (sættes op manuelt)

Windows XP inklusiv .Net

DommerStøtteSystem

550 MHz PIII, 384 MB RAM, 10/100 Mbit/s netkort. (IHA-navn: BX2-003)

IP: 192.168.1.50 (defineret i NetConfig.h)

Startdiskette PC386_disk_mon

Visual C++ (dbgshell devenv.exe)

ScenarioSender

550 MHz PIII, 512 MB RAM, 10/100 Mbit/s netkort. (IHA-navn: BX2-004)

IP: 192.168.1.25 (defineret i NetConfig.h)

Kræver FAT-filsystem for at RTFiles kan læse scenariofilerne

PC386_disk_mon (Kommandolinje + seriel)

RTOS-32 4.13 - IHA-installation, men med følgende ændringer:

```

disk_mon -> pc386_disk_mon
           Locate  PageTable  PageTable  HighMem  40k
           Locate  Stack      Stack      HighMem  9M
monitor1 -> pc386monitor1
sbc_def  -> pc386_def
sbc686_1 -> pc386_1
           Region = HighMem      1M,   30M,  RAM,      Assign
           //Senere rettet til 256k, 64M, 128M af ham selv
Tilføjet Locate Heap Heap HighMem 64M (pc386_disk_mon)
  
```

E.4. Brugsvejledning

Visualizer

Sæt maskinens IP til 192.168.1.75 (Egenskaber for TCP/IP-konfigurationen for den anvendte netværksforbindelse – alternativ konfiguration)

Start Visualizer.exe (Visualizer – bin – Debug)

Start serveren på play-knappen

ScenarioSender

Overfør scenariofiler til den PC, programmet skal afvikles på, i biblioteket C:\data. Pc'ens harddisk skal have FAT-filsystem.

Forbind den PC, der udvikles på, til den PC, programmet skal afvikles på, med nulmodemkabel i COM1-porten.

Lav en startdiskette på udviklings-Pc'en

1. rtk413.bat

2. bootdisk PC386monitor1 a:

Start target-Pc'en med startdisketten isat

Kør ScenarioSender\DoSerial.bat på udviklings-Pc'en.

1. rtk413.bat

2. link @ScenarioSender.rsp

3. rtloc Main PC386_disk_mon.cfg

4. rtrun Main

DommerStøtteSystem

Forbind den PC, der udvikles på, til den PC, programmet skal afvikles på, med nulmodemkabel i COM1-porten.

1. Installer RTKernel med instal.bat i OnTime413

2. Kør rtk413.bat i kommandoprompt (laver miljøvariable til VS, sætter RTTarget=c:\Program Files\On Time RTOS-32 4.0, sætter RTBuild=c:\Program Files\On Time RTOS-32 4.0\build plus paths til binm, lib og include)

3. Kald dbgshell devenv.exe (dbgshell er RTKernel-skal til debugging) (devenv starter Visual Studio – adressen er "c:\Programmer\Microsoft Visual Studio .Net 2003\Common7\IDE\devenv.exe")

4. Fra Visual Studio, åbn projektet ODA.sln eller ODA.vcproj

5. Indsæt startdiskette (den samme som for ScenarioSender) og start den PC, DommerStøtteSystem skal køre på

6. Tryk F5 for at starte programmet OffsideRef

7. OffsideRef forsøger at forbinde til Visualizer på 192.168.1.75, så denne skal være startet på en maskine med den IP.

C/C++ – General – Additional Include Directories:
"C:\Kasper\ODA\OffsideStrategy"; "<de andre biblioteker/pakker>"; "C:\Program File\On Time RTOS-32 4.0\Source\RTip"; "\$(RTTarget)\Include"
C/C++ – Linker – General – Output File:
\$(OutDir)\ODA.exe
C/C++ – Linker – General – Additional Library Directories:
\$(RTTarget)\Libmsvc
C/C++ – Linker – Input – Additional Dependencies:

drvdoc.lib rtfiles.lib rtfsk32.lib webserv.lib rtip.lib rtk32.lib drvrt32.lib rtt32.lib \$(NOINHERIT)
C/C++ – Linker – Input – Ignore Specific Library:
kernel32.lib
C/C++ – Linker – Input – Force Symbol References:
_malloc, _EnterCriticalSection@4, _RTFileSystemList
C/C++ – Linker – Debugging – Generate Program Database File:
\$(OutDir)/ODA.pdb
C/C++ – Build Events – Post-build Event – Command Line:
"\$(RTTarget)\bin\rtloc" "\$(OutDir)\\$(ProjectName)" "\$(OutDir?)\PC386_disk_mon.cfg"

Tabel 10 – Project Properties i Microsoft Visual Studio .Net 2003

F. Litteratur

[AMB]

<http://www.amb-it.com/modules/?name=Systems&systemID=6>

[Asai]

Takeshi Asai, hjemmeside for Yamagata University, Faculty of Science, Sports Science Lab, <http://www.e.yamagata-u.ac.jp/~asai/index.html>. High speed videooptagelse af spark til en bold findes på adressen <http://www.e.yamagata-u.ac.jp/~asai/4500.mpg>

[Baldo et al.]

Marcus Vinicius C Baldo, Ronald D Ranvaud, Edgard Morya, *Flag errors in soccer games: the flash-lag effect brought to real life*, Perception, vol. 31, pp. 1205-1210, 2002
http://www.fisio.icb.usp.br/~vinicius/Public_pdf/Baldo_Ranvaud_Morya.pdf

[Berendt 2003]

Lars Berendt, *DBU forventer underskud på 8 millioner*, Dansk Boldspil Union, september 2003 <http://www.dbu.dk/news/newsShow.aspx?id=2243>

[Berendt 2004]

Lars Berendt, *2,3 millioner for at vinde EM*, Dansk Boldspil Union, maj 2004
<http://www.dbu.dk/news/newsShow.aspx?id=21617>

[Brask]

Martin Brask, *Telefonsamtale med Martin Brask fra TV3. Samtalen fandt sted 28. september 2005 som svar på en e-mail til TV3's fodboldredaktion, Onside, om kameradækning*. Findes i appendiks C.1.

[Cairos]

Cairos Technologies AG, <http://www.cairos.de>

[Cairos2]

Cairos System Utilization, præsentation af Cairos-systemets anvendelighed

[Carlsen]

Jan Carlsen, *E-mail modtaget 25/3 2005 som svar på spørgsmål om præciseringer af offsidereglen*. Findes i appendiks B.1

[Carlsen2]

Jan Carlsen, *Uddrag fra e-mail om de lovændringer og nye retningslinjer i fodboldloven, der trådte i kraft pr. 1/7 2005. E-mailen er modtaget 29/6 2005*. Findes i appendiks B.2

[Carlsen3]

Jan Carlsen, *Uddrag fra e-mail som svar på forespørgsel om præcisering af, hvornår bolden er rørt. E-mailen er modtaget 12/9 2005*. Findes i appendiks B.3

[ChampionChip]

<http://www.championchip.com/home/>

[Daily Wireless]

Daily Wireless, *RFID: Where the Rubber meets The Road*, 20. april 2004,
<http://www.dailywireless.org/modules.php?name=News&file=article&sid=2376/>

[Douglass]

Bruce Powel Douglas, *Doing Hard Time – Developing Real-Time Systems with UML, Objects, Frameworks, and Patterns*, Addison-Wesley, 1999, ISBN 0-201-49837-5.

[Eagleman & Sejnowski]

David M. Eagleman, Terrence J. Sejnowski, website med supplerende information til artiklen *Motion Integration and Postdiction in Visual Awareness*, Science, vol. 287, 17. marts 2000, <http://nba.uth.tmc.edu/homepage/eagleman/flashlag/>

[euro2004.com]

UEFA's website om EM-slutrunden i Portugal i 2004, <http://www.euro2004.com/tournament>

[FIFA]

FIFA Media Department, *Goal-line technology to be tested again in Japan*, FIFA.com, 3. oktober 2005, <http://www.fifa.com/en/media/index/0,1369,110296,00.html>

[FIFA2]

FIFA Media Department, *Smartball technology not to be used at the FIFA World Cup*, FIFA.com, 5. December 2005, <http://www.fifa.com/en/comp/index/0,2442,111942,00.html>

[FinishLinx]

<http://www.finishlynx.com/>

[Fodboldloven]

Fodboldloven, 56. udgave, 2005/2006, Dansk Boldspil Union <http://www.dbu.dk/data/dbu/filedb/1855.pdf>

[GoalRef]

<http://www.isis.alexandra.dk/software/projekter.htm#goal>

[GOF]

Erich Gamma, Richard Helm, Ralph Johnson, John Vlissides, *Design Patterns – Elements of Reusable Object-Oriented Software*, Addison Wesley, 1995, ISBN 0-201-63361-2

[von der Grün]

Thomas von der Grün, *3D Online Localisation and Tracking System of Players and Ball using Wireless Technologies*, Cairos Technologies AG, 2003

[Hall]

Susan J. Hall, *Basic Biomechanics*, 4th edition, McGraw Hill, 2003, ISBN 0-07-255241-7

[Han et al.]

Mei Han, Wei Hua, Wei Xu, Yihong Gong, *Poster session and reception: An integrated baseball digest system using maximum entropy method*, Proceedings of the tenth ACM international conference on Multimedia, ACM Press, december 2002

[Harman]

Neil Harman, *An electronic line judge? You cannot be serious!*, The Times, 17. oktober 2005, <http://www.timesonline.co.uk/article/0,,5205-1829189,00.html>

[Hawk-Eye]

<http://www.hawkeyeinnovations.co.uk/Flasharea/Hawkeye1.htm>

[IFAB]

International F.A. Board AGM, *New Laws of the Game*, FIFA.com, 28. februar 2005, <http://www.fifa.com/en/news/feature/0,1451,105505,00.html?articleid=105505>

[Ishockeyloven]

Spilleregler for ishockey, Danmarks Ishockey Union, august 2004

[Jensen]

Finn V. Jensen, *Bayesian Networks and Decision Graphs*, Springer-Verlag, 2001, ISBN 0-387-95259-4

[Kencl]

Lukas Kencl, Steve Pennock, Alan Bramley, David Kerwin, Peter Shepherd, Grant Trewartha, *A System for Radio Tracking of Team-Sports Players*, Poster at the Ubicomp 2004 Conference, Nottingham, September 2004, http://www.cambridge.intel-research.net/~lkencl/publications/Conference/Ubicomp04_Poster_Abstract.pdf (resumé) http://www.cambridge.intel-research.net/~lkencl/publications/Conference/Ubicomp04_Poster.pdf (plakat)

[Larsen & Hansen]

Gert Vestergaard Larsen, Søren Thestrup Hansen, *Computerbaseret offsidedetektering i fodbold - En undersøgelse af realtidskrav og definering af algoritmer*, 2004 http://www.topscorer.dk/offside/Computerbaseret_offsidedetektering_i_fodbold.pdf

[Lassen]

M. Lassen, *GoalRef sikkerhed ved kommunikation*, GoalRef, 2004

[Liu & Layland]

C. L. Liu, James W. Layland, *Scheduling Algorithms for Multiprogramming in a Hard-Real-Time Environment*, Journal of the Association for Computing Machinery, vol. 20, No. 1, januar 1973, pp. 46-61.

[Magee & Kramer]

Jeff Magee, Jeff Kramer, *Concurrency – State Models & Java Programs*, John Wiley & Sons, 1999, ISBN 0-471-98710-7. <http://www.doc.ic.ac.uk/~jnm/book/>

[Magna Group]

<http://www.magnasys.com.au/Products/Orad/orad.html>

[Maruenda]

Francisco Belda Maruenda, *Can the human eye detect an offside position during a football match?*, British Medical Journal, vol. 329, s. 1470-1472, 18. december 2004 <http://www.pubmedcentral.gov/articlerender.fcgi?tool=pubmed&pubmedid=15604187>

[Maruzsi]

Laszlo Maruzsi, patent for Referee Support System, 2003, <http://www.1000inventions.com/detail2.php?id=482>

[McNulty]

Phil McNulty, *Blatter rules out video aid*, BBC Sport Online, 27. juni 2002 http://news.bbc.co.uk/sport3/worldcup2002/hi/other_news/newsid_2069000/2069578.stm

[McRedmond]

Luke McRedmond, januar 2004, <http://glasnost.itcarlow.ie/~softeng4/Mcredmond/>

[Michalewicz & Fogel]

Zbigniew Michalewicz, David B. Fogel, *How to Solve It: Modern Heuristics*, 2nd edition, Springer-Verlag, 2000, ISBN 3-540-22494-7

[Mitchell]

Tom M. Mitchell, *Machine Learning*, International Edition, McGraw-Hill, 1997, ISBN 0-07-042807-7

[On Time]

On Time AG, <http://www.on-time.com>

[Oudejans et al.]

Raoul R. D. Oudejans, Raymond Verheijen, Frank C. Bakker, Jeroen C. Gerrits, Marten Steinbrückner, Peter J. Beek, *Errors in judging 'offside' in football*, Nature, vol. 404, s. 33, 2. marts 2000, <http://www.rps.as/rpsmedia/offside.pdf>

[POSA2]

Douglas Schmidt, Michael Stahl, Hans Hohnert, Frank Buschmann, *Pattern-Oriented Software Architecture – Patterns for Concurrent and Networked Objects*, John Wiley & Sons, 2000, ISBN 0-471-60695-2

[QTM]

Qualisys Track Manager User Manual v. 1.8.2xx, 31. august 2005

[Qualisys]

Qualisys AB, <http://www.qualisys.se>

[RadarGolf]

<http://orders.radargolf.com/Merchant2/merchant.mvc?Screen=BPS>

[Rojas]

Peter Rojas, *Counting Every Second: A Behind-the-Scenes Look at Timing and Scoring the Tour De France*, Engadget.com, 19. juli 2004, <http://features.engadget.com/entry/5170866986686287/>

[Stallings 1998]

William Stallings, *Operating Systems – Internals and Design Principles*, 3rd edition, Prentice-Hall, 1998, ISBN 0-13-887407-7

[Stallings 2002]

William Stallings, *Wireless Communications and Networks*, Prentice-Hall, 2002, ISBN 0-13-040864-6

[Tester]

Ross Tester, *Hawk-Eye: The Coming Revolution in Sport?*, Silicon Chip, 26. marts 2004, http://www.siliconchip.com.au/cms/A_100993/article.html

[Tol et al.]

Johannes L. Tol, Erik Slim, Arthur J. van Soest, C. Niek van Dijk, *The Relationship of the Kicking Action in Soccer and Anterior Ankle Impingement Syndrome: A Biomechanical Analysis*, American Journal of Sports Medicine, s. 45-50, januar 2002

[Vesterstrøm & Thomsen]

Jakob Vesterstrøm, René Thomsen, *A Comparative Study of Differential Evolution, Particle Swarm Optimization, and Evolutionary Algorithms on Numerical Benchmark Problems*, http://www.daimi.au.dk/~krink/fec05/articles/JV_ComparativeStudy_CEC04.pdf

[Wang et al.]

Jinjun Wang, Changsheng Xu, Engsiong Chng, Kongwah Wah, Qi Tian, *Technical session 2: networked multimedia applications: Automatic replay generation for soccer video broadcasting*, Proceedings of the 12th annual ACM international conference on Multimedia, ACM Press, oktober 2004

[Wesson]

John Wesson, *The Science of Soccer*, Institute of Physics Publishing, 2002, ISBN 0-7503-0813-3

[Wikipedia]

Offside (rugby), [http://en.wikipedia.org/wiki/Offside_\(rugby\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Offside_(rugby))

[Xu & Chua]

Huaxin Xu, Tat-Seng Chua, *Applications I: The fusion of audio-visual features and external knowledge for event detection in team sports video*, Proceedings of the 6th ACM SIGMM international workshop on Multimedia information retrieval, ACM Press, oktober 2004

[Yacoub]

Sherif M. Yacoub, *Composite Filter Pattern*, Publishing Systems and Solutions Laboratory, HP Laboratories Palo Alto, 30. maj 2001, www.hpl.hp.com/techreports/2001/HPL-2001-131.pdf

[AaB-Online]

Carsten Kristensen, website med billeder fra AaB-kampe, <http://www.aab-online.dk>