

Computerbaseret offsidetektering i fodbold – optimering af et dommerstøttesystem

1. Indledning.....	3
1.1. Motivation.....	3
1.2. Systemkrav.....	6
1.3. Problemformulering.....	7
1.4. Metode.....	8
1.5. Læsevejledning.....	10
1.5.1. Forudsætninger	11
1.5.2. Ordforklaring	11
2. Offsidereglen	12
2.1. Fodboldlovens § 11	12
2.2. Præcisering af § 11	13
2.2.1. Deltage aktivt i spillet	13
2.2.2. Nærmere	13
2.2.3. Bolden røres	14
2.3. Eksempel.....	15
3. Analyse	16
3.1. Analyse af krav.....	16
3.1.1. Tidskrav.....	17
3.1.2. Spillere på offsidegrænsen.....	18
3.1.3. Afleveringsdetektering	19
3.1.4. Identifikation af afleverende spiller	20
3.1.5. Kommunikation til linjedommere	20
3.1.6. Positioneringsdata	21
3.1.7. Delkonklusion	22
3.2. Cairos	23
3.2.1. Teknik	23
3.2.2. Services.....	25
3.2.3. Evaluering.....	26
3.3. Analyse af DommerStøtteSystem	26
3.3.1. Tidskrav.....	27
3.3.2. Spillere på offsidegrænsen.....	27
3.3.3. Afleveringsdetektering	28
3.3.4. Identifikation af afleverende spiller	29
3.3.5. Kommunikation til linjedommere	30
3.3.6. Delkonklusion	30
4. Bevægelsesanalyse	31
4.1. Indledning	31
4.2. Spillernes omfang	36
4.3. Spillere nær offsidegrænsen	39
4.3.1. Almindeligt løb.....	40
4.3.2. Retningsskift	47
4.3.3. Acceleration	47
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.	Detektering af afleveringer	54
5.2.	Bestemmelse af afleveringstidspunkt	57
5.3.	Opnåelig præcision	58
5.4.	Delkonklusion	62
6.	OffsideDetekteringsAssistent	63
6.1.	Design	63
6.1.1.	Tasking model	63
6.1.2.	Mønstre	64
6.2.	Filtre	64
6.2.1.	Afleveringsdetektering	64
6.2.2.	OneMeterOffside	64
6.2.3.	Bolden ude af spil	64
6.2.4.	Bestemmelse af afleveringens retning	65
6.2.5.	Detektering af afleverende spiller ud fra 3D-data	65
6.2.6.	Bestemmelse af modtagende spillers position	65
6.2.7.	Ude af banen	65
6.3.	Konfigurationer	65
6.3.1.	DommerStøtteSystem	65
6.3.2.	To koordinater	65
6.3.3.	Tre koordinater	66
6.4.	Andre delsystemer	66
6.4.1.	ScenarioSender	66
6.4.2.	Visualizer	66
7.	Test	67
7.1.	Testdata	67
7.2.	Scenario 1	67
7.3.	Scenario N	67
7.4.	Testresultater	67
7.5.	Realtidskrav	67
8.	Fremskridt	68
9.	Fremtidigt arbejde	69
10.	Konklusion	70
A.	Appendiks	72
A.1.	Baggrund for systemkrav	72
A.1.1.	Ufravigelige krav	72
A.1.2.	Vigtige krav	75
A.1.3.	Ønskværdig funktionalitet	76
A.2.	Beskrivelse af [Larsen & Hansen]	77
A.2.1.	Positioneringsdata	79
A.2.2.	Design	79
A.2.3.	Offsidedetektering	80
A.3.	Qualisys	80
A.3.1.	Dataudglatning	84
A.4.	Analysesoftware	86
A.4.1.	Afstandsberegning	86
A.5.	ScenarioGenerator	87
A.6.	Testopstilling	90
A.7.	Brugsvejledning	91
A.8.	Litteratur	92
A.8.1.	[Brask]	92
A.8.2.	[Carlsen]	92
A.8.3.	[Carlsen2]	94
A.8.4.	[Carlsen3]	95
B.	Litteratur	96

1. Indledning

1.1. Motivation.....	3
1.2. Systemkrav.....	6
1.3. Problemformulering.....	7
1.4. Metode.....	8
1.5. Læsevejledning.....	10
1.5.1. Forudsætninger	11
1.5.2. Ordforklaring	11

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 de delsystemer, der tilsammen udgør prototypen ved navn OffsideDetekteringsAssistent (ODA), 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.

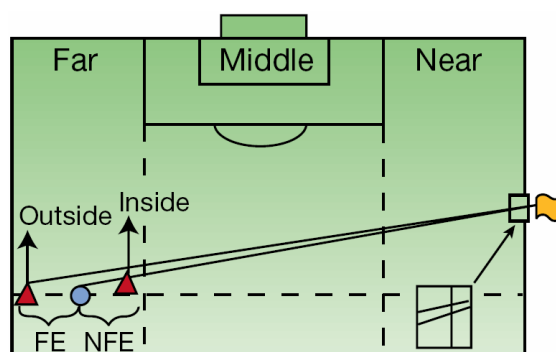
Også de retfærdighedssøgende har interesse i, at det hele går korrekt til. Fair play er et stort tema hos verdensfodboldforbundet FIFA, og bestemt også hos den klub, der går glip af store indtægter og sportslige udfordringer på grund af et mål scoret af modstanderne efter en offside, der ikke blev dømt, 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]:

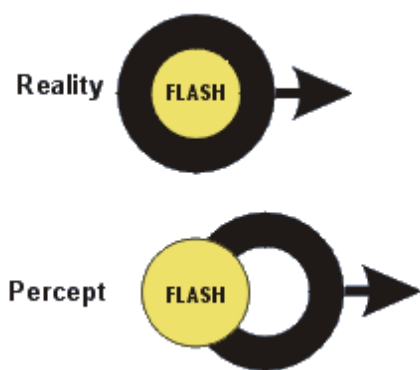
En spiller er offside, hvis han er nærmere modstandernes mål end både bolden og næstsidste modspiller, og efter dommerens skøn deltager aktivt i spillet i det øjeblik bolden røres af en medspiller.

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. Forsvarskæden 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 offsideposition, 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 speialet blev afleveret, var overkroppen 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 speialet fra [Larsen & Hansen] og ej heller i dette speiale.

I dette speiale vil det blive undersøgt, om det af Larsen og Hansen udviklede DommerStøtteSystem er tilstrækkeligt pålideligt til, at linjedommeren i en fodboldkamp kan stole på systemets afgørelser. Hvis systemet skal have nogen praktisk værdi, skal det afgive signal til linjedommeren hvis og kun hvis en medspiller befinder sig i en offsideposition, når bolden bliver afleveret.

Dette og en række andre krav, som man kunne forestille sig en kunde ville stille til en leverandør af ODA, opstilles og analyseres i dette speiale, og der arbejdes videre på at bevise konceptet via en kørende prototype med udgangspunkt i DommerStøtteSystem. Desuden foretages en række analyser for at afklare, hvorvidt forskellige tilnærmelser fra den fysiske virkelighed vil forhindre en realisering af visionen om en offside-detekterings-assistent. Tilnærmelserne omfatter detektering af afleveringer på basis af boldens position (det væsentligste forslag til fremtidigt arbejde i [Larsen & Hansen, s. 76]) samt bestemmelse af spillerens omfang ud fra positionerne på hans skinneben. Med hensyn til sidstnævnte foreslog [Larsen & Hansen, s. 78] en ændring af offsidereglen, hvilket nok ville blive svært at få igennem hos fodboldens lovgivende organisation, FIFA.

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 speiale udviklede prototype derfor få det mere sigende navn OffsideDetekteringsAssistent, forkortet ODA.

1.2. Systemkrav

Uanset hvilken teknologi der anvendes i en computerbaseret offside-detekteringsassistent 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 mulig 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 offside-situation.

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 straffbare.
- 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 kunne modificeres 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 kravs-specifikation 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 offsidetetektering optimeres til at blive tilstrækkeligt pålidelig til brug i fodbold på topplan? Optimeringerne skal overholde realtidskravet 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 føddernes placering på banen, men det er hele kroppen og ikke kun fødderne, der afgør en mulig offsideposition. Kan kroppens position udledes af føddernes 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 retningsskift kan også ske, når bolden eksempelvis rammer en knold på banen eller bliver grebet af vinden. 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 offsideposition, 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 signaler ikke kan aflyttes, manipuleres eller ødelægges.

Underspørgsmålene er særligt interessante, fordi de omfatter de tre centrale elementer i vurderingen af offsidepositioner: 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

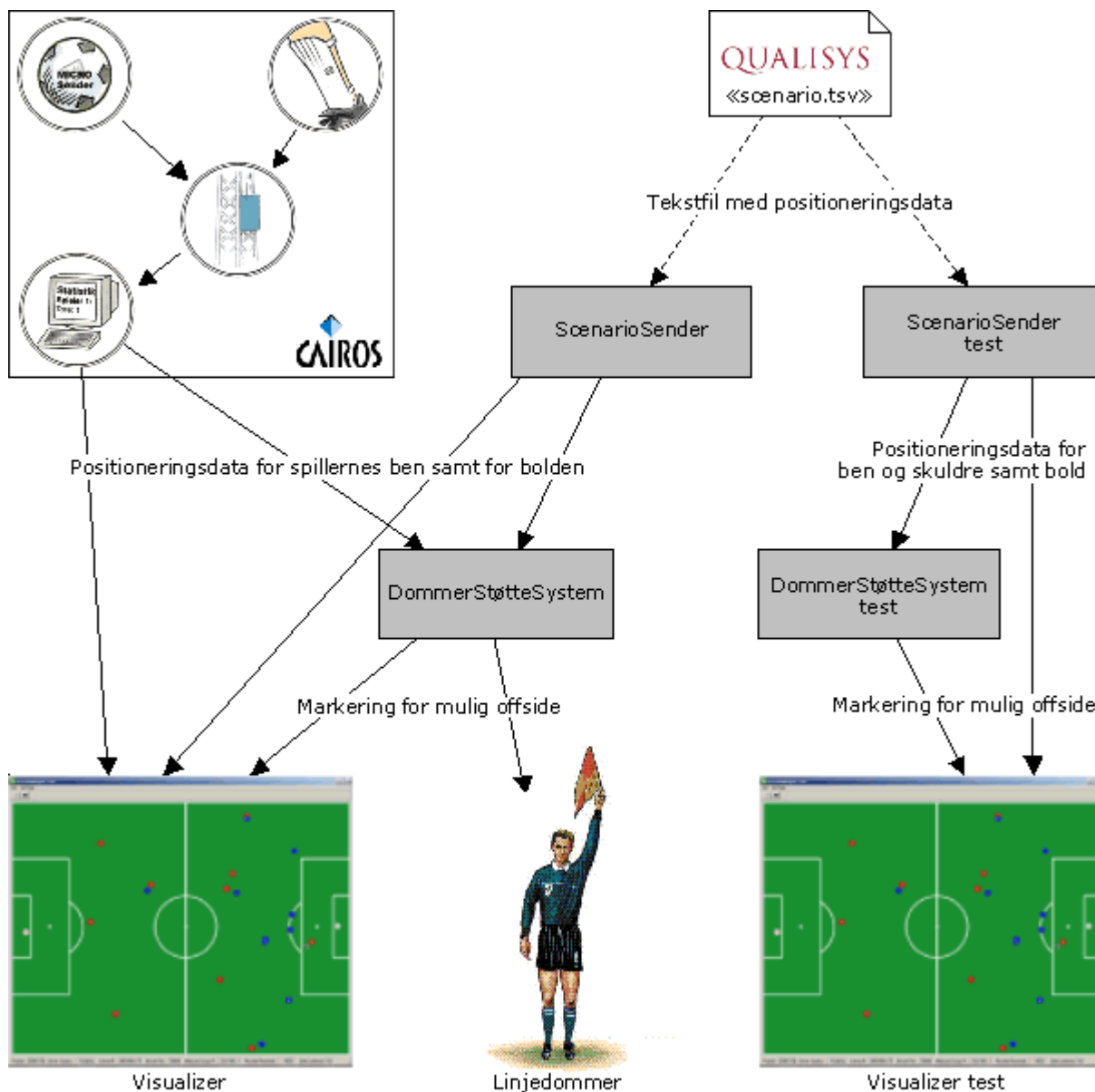
Der er blevet arbejdet videre ud fra de prototyper der er udviklet i specialet "Computerbaseret offsidetetektering i fodbold – En undersøgelse af realtidskrav og definering af algoritmer" af Gert Vestergaard Larsen og Søren Thestrup Hansen. Den udviklede programsuite består af fire prototyper, hvoraf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

Da Cairos ikke ønskede at medvirke i nogle af specialerne, har det været nødvendigt at skabe positioneringsdata på anden vis. Til forskel fra [Larsen & Hansen] har dette speciale gjort brug af positioneringsdata skabt med systemet Qualisys. Scenarier specielt designet til at repræsentere forskellige spilsituationer med relation til offsidetetektering er blevet optaget med infrarøde kameraer for at give 3D-data om spillere og bolds placering. Systemet er altså 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 i et virkeligt dommerstøttesystem, men kan alligevel give langt mere realistiske data end den i [Larsen & Hansen] udviklede ScenarioGenerator. Udover at fungere som erstatning for et rigtigt positioneringssystem som Cairos' ligger optagelserne til grund for en analyse af spillernes bevægelser med henblik på at kortlægge kroppens placering i forhold til fødderne ved forskellige bevægelsesmønstre.

En fordel ved optagelserne lavet med Qualisys er, at de rent faktisk kan give oplysninger om hele kroppens placering og ikke kun føddernes. Det betyder, at der kan skrives algoritmer til at verificere korrektheden af de kendelser, dommerstøttesystemet kommer med. På denne måde kan dele af systemet testes automatisk.

Samlet set hænger de udviklede prototyper sammen som illustreret i Figur 5.



Figur 5 – Systemoversigt. Dele af figuren er hentet hos [Cairos], [Qualisys], [Fodboldloven] og [Larsen & Hansen]. **Klargør, hvad der er test og hvad en virkeligt system ville indeholde.**

Systemerne længst til højre gør brug af mere omfattende data og har således et bedre grundlag for at kunne vurdere offside-situationer, hvilket gør dem egnede til at teste de egentlige vurderinger. I positioneringssystemet fra Cairos gives der imidlertid kun oplysninger om fødderne, og en del af formålet med dette speciale er at finde ud af, om dette er tilstrækkeligt til pålideligt at kunne støtte linjedommerne i deres offsidekendelser.

Et scenario optaget med systemet fra Qualisys gives som input til en af de to versioner af ScenarioSender. Filen indeholder data om placering af såvel fødder som skuldre. I test-versionen sendes alle disse data ud, så der findes oplysninger om hele kroppens placering, mens den egentlige ScenarioSender nøjes med at videregive oplysninger om spiller-

nes fødder. På den måde simuleres de data, som Cairos' positioneringssystem kan give. 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. Mere om det i afsnit 3.1.

OffsideDetekteringsAssistent indeholder den egentlige offside-detekteringsalgoritme og er således det system, der laver offsidevurderingerne. Testversionen gør brug af data om hele kroppens placering, og har således et bedre grundlag at vurdere offside-situationerne ud fra. Da kun oplysninger om fødderne kan forventes fra et virkeligt positioneringssystem, må det rigtige DommerStøtteSystem nøjes med disse oplysninger, når det skal træffe sine beslutninger.

De to versioner af Visualizer modtager de samme positioneringsdata som de tilhørende versioner af OffsideDetekteringsAssistent gør. Disse data vises på skærmen, så man kan følge boldens og spillernes bevægelser på banen. Visualizer modtager offsidemarkeringer fra ODA og markerer, hvilket spiller der vurderes til at være i offsideposition, når bolden afleveres. Markeringerne modtages naturligvis også af linjedommeren, som herefter skal tage stilling til, om spilleren i offsideposition deltager aktivt i spillet.

ScenarioSender skal afsende positioneringsdata med en vis frekvens og skal derfor afvikles på en deterministisk platform, der kan garantere, at programmøren har kontrol over udførelsen af programmet og dermed også udførselstiden. 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.

1.5. Læsevejledning

Dette speciale er opbygget på følgende måde: **Skrives om, når specialet er færdigt.**

Kapitel 2 – Offsidereglen

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

Kapitel 3 – Undersøgelse

Med offsidereglen præciseret er det muligt at opstille scenarier, der kan teste DSS' evne til at opdage offside. [Larsen & Hansen] og tilhørende kildekode vil blive studeret for at finde frem til virkemåden for DSS og dermed hvad der skal forbedres. Også grænsefladen til Cairos' positioneringssystem vil blive undersøgt med henblik på at gøre bedst muligt brug af de data, systemet stiller til rådighed.

Kapitel 4 – Algoritmer

Da kravene til systemet nu er fastlagt, er det muligt at gå i dybden med at designe de algoritmer, automatisk offside-detektering består af, heriblandt detektering af den afleverende spiller, opdagelse af afleveringsøjeblikket og beregning af, om angriberen er fri af forsvarsspilleren. Der udvikles flere algoritmer af hver slags med henblik på at kunne vurdere nytten af diversitet i beslutningsprocessen.

Kapitel 6 – Prototyper

I dette kapitel beskrives det overordnede design af de udviklede prototyper, med fokus på at leve op til realtidskravene.

Kapitel 7 – Test

Med udgangspunkt i offside-scenarier fra enten en virkelig kamp eller approksimation baseret på en båndet tv-kamp, vil algoritmerne i dette speciale blive sammenlignet med dem udviklet i [Larsen & Hansen]. Det at levere pålidelige vurderinger er essentielt i et system som dette, så det er i forhold til dette kriterium, systemerne vurderes.

Kapitel 8 – Fremtidigt arbejde

Det er praktisk talt altid muligt at forbedre systemer, så dette kapitel er afsat til at angive retningslinjer for dette. Den begrænsede mængde tid til specialeskrivning vil også betyde, at der vil være områder af et endeligt, kommercielt system, som ikke vil blive berørt i dette speciale.

Kapitel 10 – Konklusion

Her konkluderes der på arbejdet og de opnåede resultater.

1.5.1. Forudsætninger

Specialet er skrevet på uddannelsesretningen Teknisk Informationsteknologi med specialisering i Distribuerede Realtidssystemer, og læseren formodes derfor at have indsigt i datalogiske 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

Igennem 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 – *offside-detekteringsassistent* 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	12
2.2. Præcisering af § 11	13
2.2.1. Deltage aktivt i spillet	13
2.2.2. Nærmere	13
2.2.3. Bolden røres	14
2.3. Eksempel	15

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 medspiller, 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 medspiller.

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.

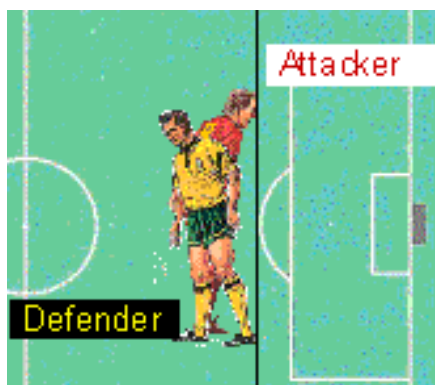
At indvirke på spillet er den oftest forekommende årsag til at en spiller dømmes offside. En spiller kan kun indvirke på spillet ved at røre bolden, og det er derfor ikke strafbart at stå i offsideposition, hvis bolden spilles til en anden medspiller, som eksempelvis står i den anden side af banen.

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.

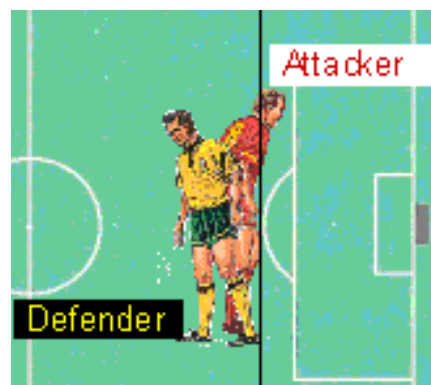
2.2.2. *Nærmere*

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 håarkontakt 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 blåt 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. Analyse

3.1. Analyse af krav.....	16
3.1.1. Tidskrav.....	17
3.1.2. Spillere på offsidegrænsen.....	18
3.1.3. Afleveringsdetektering	19
3.1.4. Identifikation af afleverende spiller	20
3.1.5. Kommunikation til linjedommere	20
3.1.6. Positioneringsdata	21
3.1.7. Delkonklusion	22
3.2. Cairos	23
3.2.1. Teknik	23
3.2.2. Services.....	25
3.2.3. Evaluering.....	26
3.3. Analyse af DommerStøtteSystem	26
3.3.1. Tidskrav.....	27
3.3.2. Spillere på offsidegrænsen.....	27
3.3.3. Afleveringsdetektering	28
3.3.4. Identifikation af afleverende spiller	29
3.3.5. Kommunikation til linjedommere	30
3.3.6. Delkonklusion	30

I dette kapitel foretages nærmere undersøgelser af de krav og systemer, der sammen med offsideren 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 A.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'.

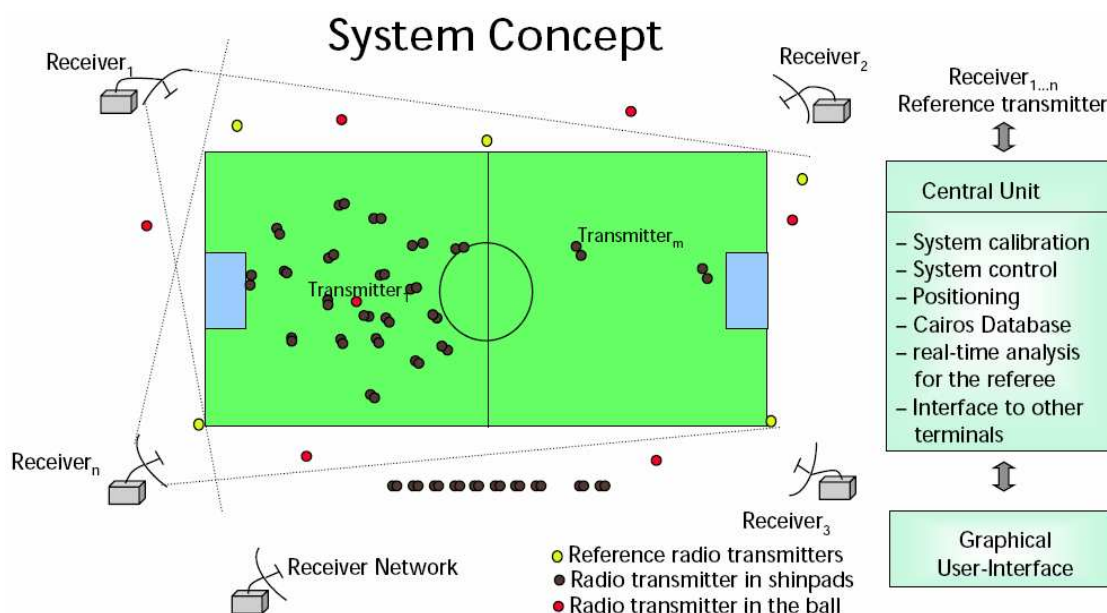
Cairos' system er ikke kun et positioneringssystem, men består også af en række applikationer [Cairos2], der gør brug af de opsamlede positioneringsdata i realtid. Dataene kan eksempelvis bruges til at levere information om spillernes fart og bevægelsesmønstre, fart og præcision i skud på mål og afleveringer, 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].



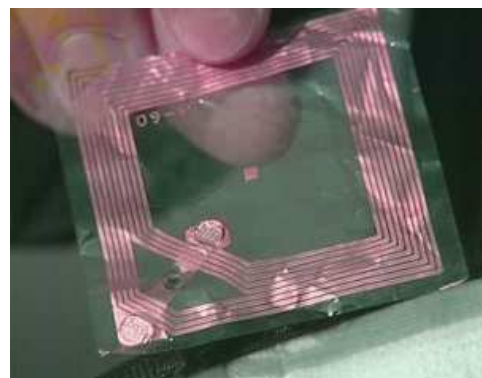
Figur 10 – Systemoversigt for Cairo's. Kilde: [Cairo's].

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].

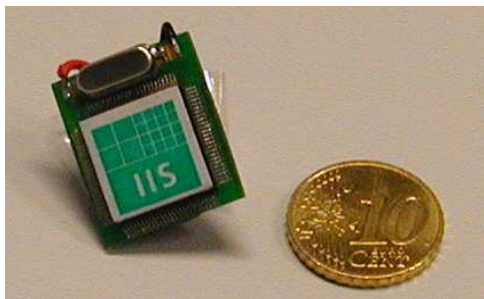
Hver spiller bærer to radiosendere som den i Figur 11 – en i hver benskinne. Benskinnerne er valgt til at repræsentere spillernes positioner, og det gør det eksempelvis muligt at beregne skridtlængde (som kan give indikationer om træthed til spillernes træner) og den fart, foden rammer bolden med, når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

Radiosenderne kan konfigureres til at sende signaler op til 750 gange pr. sekund [Cairo's], 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].



Figur 11 – Cairo's radiosender. Kilde: [Cairo's].



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

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, deres normale samarbejdspartner Fraunhofer Institut für Integrierte Schaltungen samt adidas (der producerer sportsudstyr) udviklet i samarbejde, og i september måneds 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, så bolden og systemet skal muligvis tages i brug til fodbold-VM i Tyskland i sommeren 2006. Først har FIFA dog en række ikke offentliggjorte forslag til forbedringer, og desuden skal systemet testes igen til VM for klubhold i december 2005. Den endelige beslutning om, hvorvidt systemet kan tages i brug til VM i Tyskland, finder sted i marts 2006 [FIFA].

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 højni-

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 omkranset af 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.

veau-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 offsidetetektering. 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 benskinne, og bolden er ligeledes forsynet med en radioender. 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 A.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 påtænkes taget 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 A.2, som også indeholder antagelser om positioneringssystemet samt beskrivelse af systemets design og den overordnede algoritme til offsidetetektering.

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 offsidereglen 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 offsidetetekteringsassistent, 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

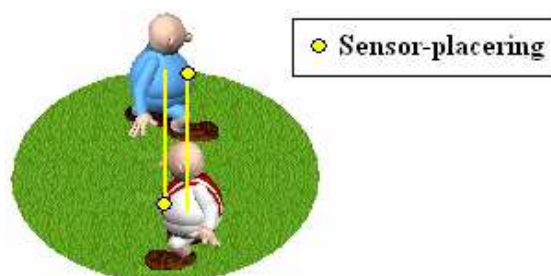
[Larsen & Hansen, s. 32] definerer en offside-situation til at opstå, når bolden afleveres (eller røres, som det rettelig hedder). Indenfor 1 sekund efter denne hændelse skal linjedommeren have besked, om der på afleveringstidspunktet var spillere i offside-position. Selvom dette krav er noget mere lempeligt 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 A.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 offside-position skal angriberen befinde sig tættere på modstandernes mållinje end næstsidste forsvarsspiller (samt afleveringskilde, 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 spillernes 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 offside-position skal vurderes. Alene det at der ved almindeligt løb kan være mere end 80 cm afstand mellem de to fødder (se Figur 36 i afsnit 4.3.1), 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 fejlmargen, 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.

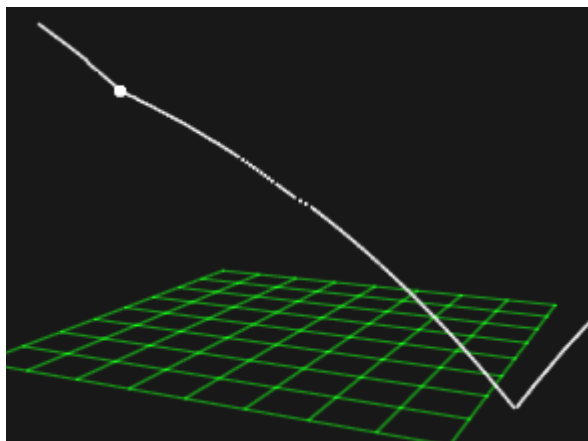
[Larsen & Hansen] tager ikke højde, for at afleveringer reelt opdages allerede efter syvotte millisekunder, da bolden i de sidste to-tre millisekunder af kontakttiden ikke længere tilføres fart [Larsen & Hansen, s. 39]. Yderligere vil en kraftigere acceleration end 950 m/s^2 medføre, at grænseværdien 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.

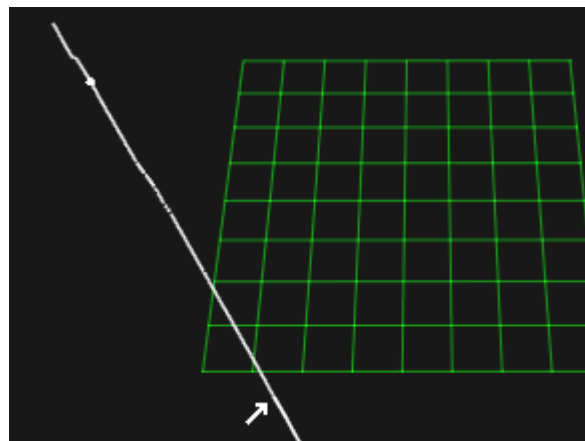
Positioneringsdata i tre dimensioner nødvendigt

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.



Figur 14 – Boldens bane i løbet af en hovedstødsduel optaget med Qualisys (se appendiks A.3). 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 A.3.

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 offsidetetekteringsassistent.

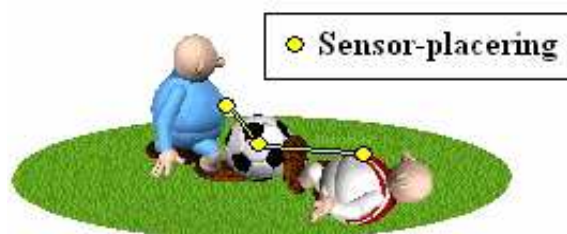
Målspark, indkast og hjørnespark skal heller ikke tolkes som afleveringer (Krav10), da man ikke kan være strafbart offside i disse situationer, men det tages der ikke højde for i DommerStøtteSystem [Larsen & Hansen, s. 33]. Dette er dog ikke noget ufravigeligt krav.

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 offsidetituationerne og endelig Visualizer, som kan vise de afspillede scenarier og DommerStøtteSystems kendelser.

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 offsidedetektering, 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 skruining, 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 offsidedetekteringssystem 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, 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 offsidedetekteringsmekanismen 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 offsidedetekteringsalgoritme er de udviklede prototyper et skridt på vejen mod computerbaseret offsidedetektering 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	31
4.2.	Spillernes omfang	36
4.3.	Spillere nær offsidegrænsen	39
4.3.1.	Almindeligt løb	40
4.3.2.	Retningsskift	47
4.3.3.	Acceleration	47
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 punktet 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.

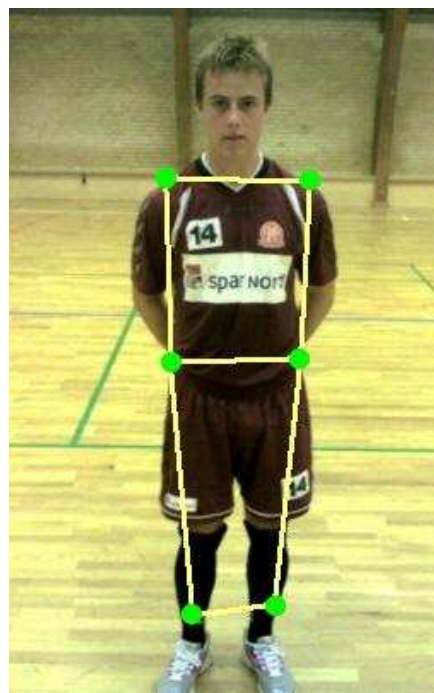
Optagelser til analysen

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.



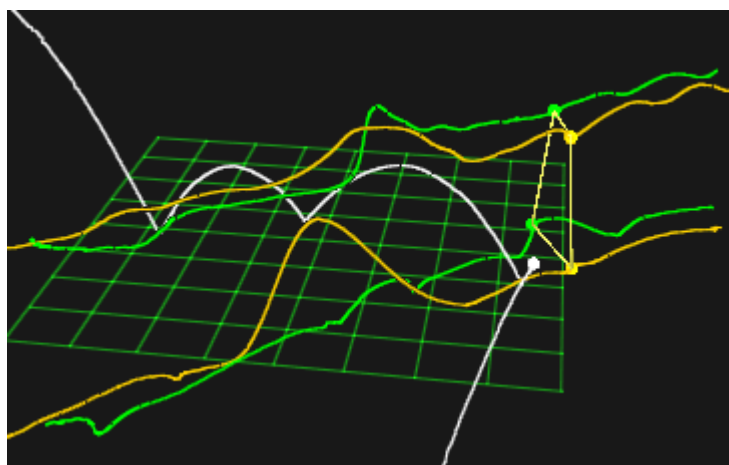
Figur 18 – Illustration af markørernes placering.

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,



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.

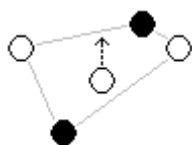
Spilleren er kommet løbende ind fra venstre side og tæmmer bolden i luften (derfor det højt løftede ben midtvejs) samtidig med at han vender rundt. Herefter sparker han til bolden i det øjeblik, der vises i figuren, og forsvinder ud i højre side løbende baglæns.

var det imidlertid en anden fortolkning af 'nærmere', der var gældende. Dengang var det den 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.

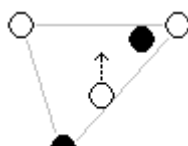
Dataene gemmes i en datafil og kan efterfølgende analyseres ved at afspille den optagede sekvens og betragte den fra forskellige vinkler. Markørerne reflekterer infrarødt lys udsendt af kameraerne tilbage i kameraernes linser, og hvis flere kameraer kan se den samme markør, kan markørens position beregnes i tre dimensioner. Systemet fra Qualisys beskrives nærmere i appendiks A.3.

Ønskede resultater

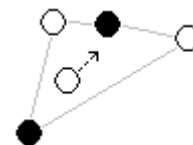
I løbet af en fodboldkamp vil en fodboldspiller foretage en række bevægelser, hvor kroppen skifter position i forhold til fødderne. Når man løber, vil kroppen være i en bestemt position, men for at accelerere må man læne sig mere forover for ikke at miste balancen. På samme måde skal man læne sig til 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.

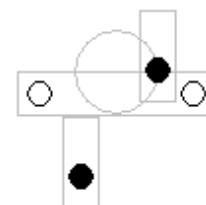


Figur 22 – Ved retningsskift flyttes overkroppen i den retning, der skiftes til.

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



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.

længderetning) på kassernes hjørner samt hovedets centrum plus radius.

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 A.3 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 forber-

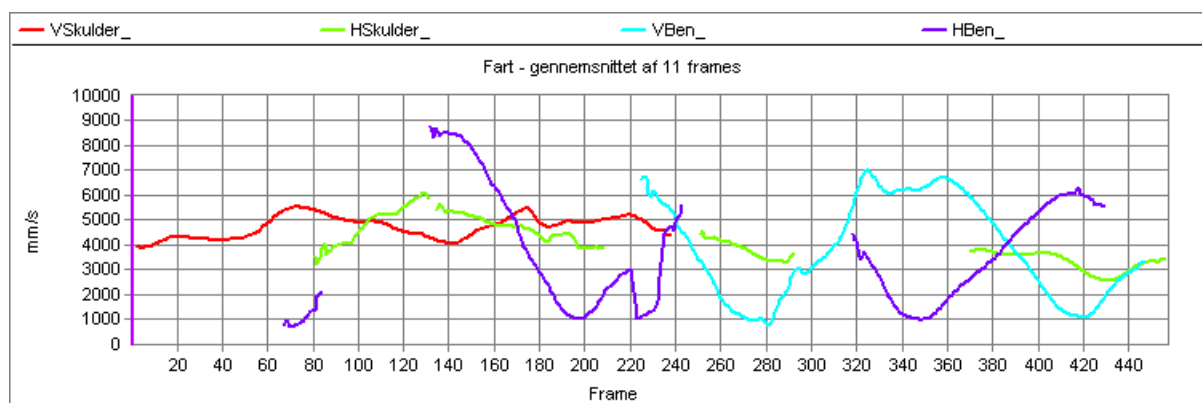
delser til den næste kamp og rehabiliteringen mellem deres træningspas. Dernæst er det et problem at finde en passende hal, fordi de fleste idrætshaller har trægulv og i øvrigt er fuldt bookede af folkeskoler. Optagelserne kan kun foregå inden døre, idet det infrarøde lys ellers vil blive forstyrret 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 i appendiks A.3.1 til at give det bedste kompromis mellem kurveglathed og nuancerigdom 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 A.3, 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 datae-

ne 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.

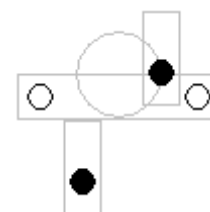
4.2. Spillernes omfang

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 32. 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 33.

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

⁴ Kilde: Skotøjsæske fra adidas.

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.

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 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.



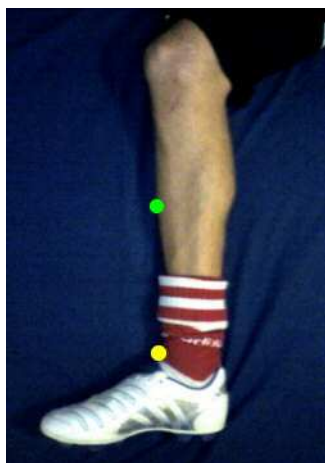
Figur 26 – AaB-spillerne Martin Ericsson (tv) og Simon Bræmer i løb. Kilde: [AaB-Online].



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 benskinne, 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 10 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 10 cm unøjagtighed i positioneringen af både forreste og bageste punkt på foden. Kun på billede 5 i Figur 27 er storetåen på forreste 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 3.3.4 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 afleverings 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. Spillere nær offsidegrænsen

I dette afsnit analyseres skuldrenes placering ved de bevægelser, der udføres af spillere nær offsidegrænsen. Spillere nær offsidegrænsen omfatter både medspillere til afleverings kilde og forsvarsspillere på det modsatte hold, og de udførte bevægelser udgøres af almindeligt løb, retningsskift og acceleration.

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.

4.3.1. Almindeligt løb

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.

Som det blev antydnet tidligere i Figur 24 på side 35, 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.

Fremgangsmåde

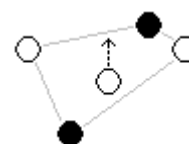
For at undersøge, hvorvidt der kan udledes en bestemt afstand mellem skinneben og skuldre, gennemløbes data fra de optagede scenarier, der er kategoriseret som almindeligt løb. Da scenarierne indeholder huller, er undersøgelserne udelukkende baseret på frames, hvor begge skinneben samt mindst én skulder har været at finde, og samtidig benyttes der som beskrevet i afsnit 4.1 udglatning for at modvirke de unøjagtigheder, der findes i dataene. En beskrivelse af den udviklede software, som bruges til bevægelsesanalysen, findes i appendiks A.4.

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 A.4.1.

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



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

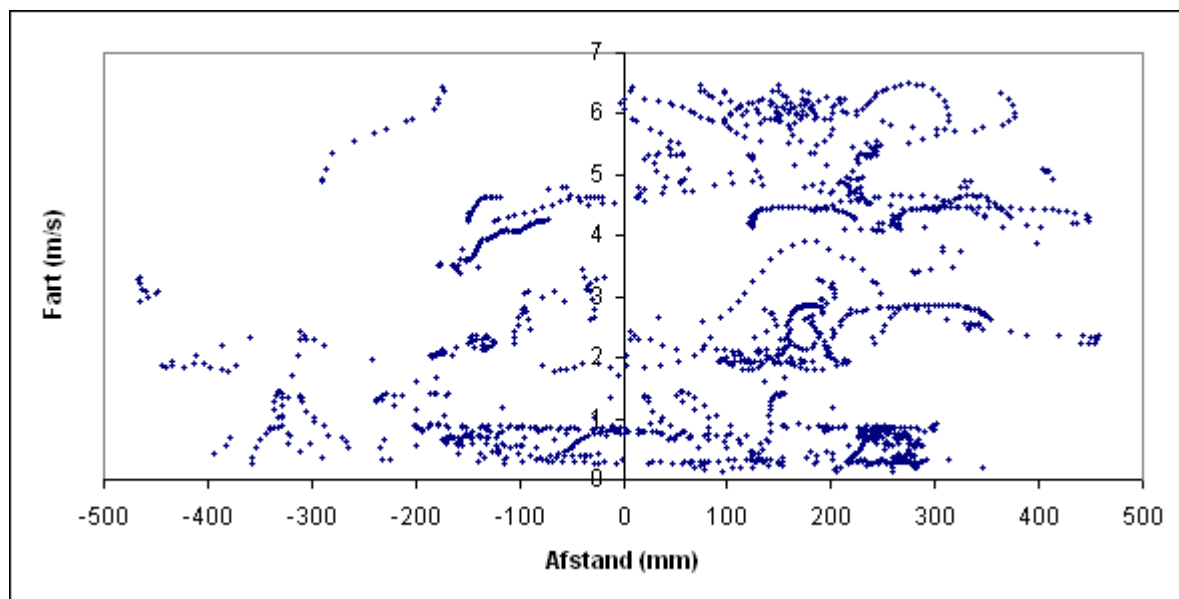


Figur 32 – Ved almindeligt løb formodes overkroppen hele tiden at have samme afstand til punktet midt imellem skinnebenene.

der laves selv små retningsændringer, ikke har samme retning, må spillerens retning beregnes på en anden måde.

Spillerens retning

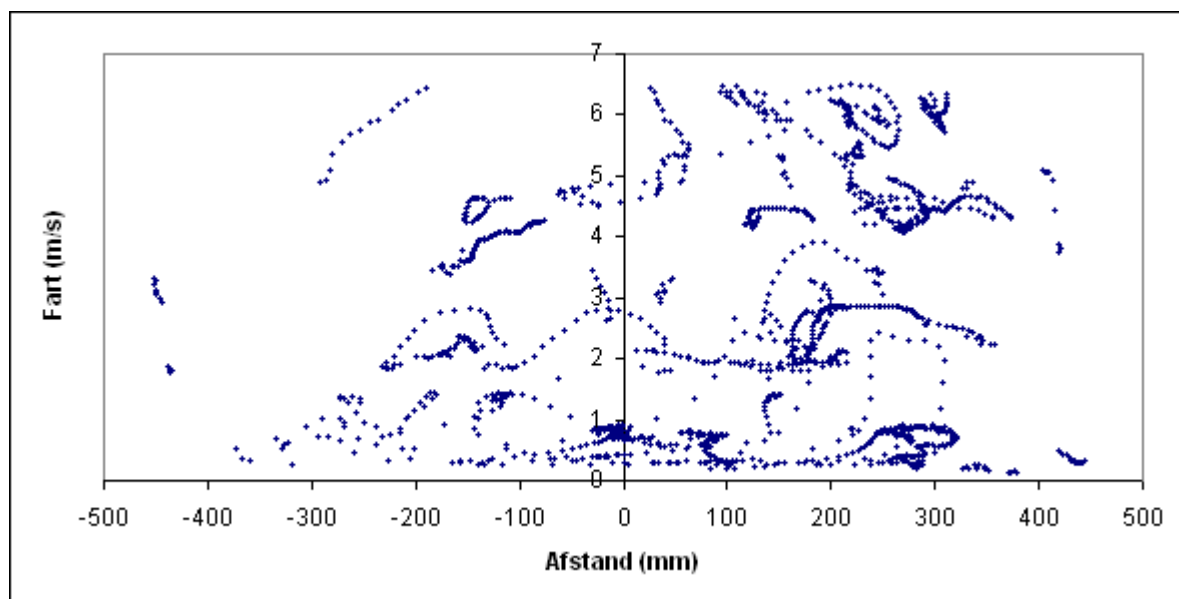
I Figur 33 vises afstanden til skuldrene, når spillerens retning beregnes som et gennemsnit af skinnebenenes retning. Hver markering i figuren repræsenterer afstanden fra benenes middelpacering til en skulder i en frame i en af de tolv optagelser. En negativ afstand betyder, at skulderen er placeret bag skinnebenenes middelpacering. Som det ses, er der stor spredning i de beregnede afstande, og umiddelbart har spillerens fart ikke nogen betydning for afstanden mellem ben og skuldre. Farten er i øvrigt defineret som gennemsnitsfarten på skinnebenene.



Figur 33 – Afstand fra benenes middelposition til en skulder. Løberetningen defineres som benenes gennemsnitlige retning. Hver markering repræsenterer afstanden til én skulder i én frame.

I stedet for den gennemsnitlige retning på benene, kan retningen på det hurtigste skinneben anvendes. Meget simplificeret står det ene ben stille, når det andet bevæger sig, og derfor vil benet med størst fart være en bedre repræsentant for den retning, spilleren bevæger sig i. Figur 34 viser de udregnede afstande, når retningen defineres ud fra det hurtigste ben. Igen ser der ikke ud til at være nogen sammenhæng mellem afstanden og den fart, der løbes med.

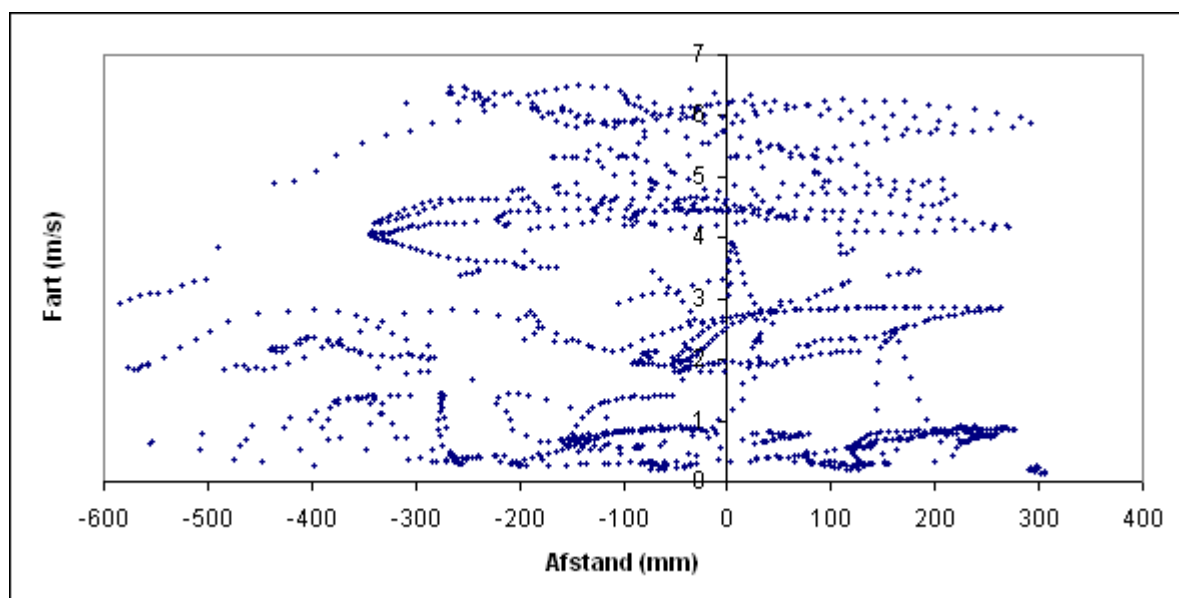
Anvendes gennemsnitsretningen opnås en gennemsnitlig afstand på 93 mm med en standardafvigelse på 192 mm. Benyttes det hurtigste skinneben giver det en lidt længere afstand, 114 mm, men til gengæld også mere konsistens, da standardafvigelsen nu er på 181 mm. Nærstuderet et tilfældigt udvalgt scenario opnås samme konklusion, idet der med sidstnævnte metode generelt er mindre forskel på afstanden til de to skuldre, hvilket stemmer bedre overens med, hvad man forventer – at skuldrene er cirka lige langt foran. Spillerens retning findes derfor bedst ud fra det hurtigste bens retning.



Figur 34 – Afstand fra benenes middelposition til en skulder. Løberetningen defineres som retningen på benet med den højeste hastighed.

Forreste ben som indikator for skulderens placering

Som alternativ til at kigge på skinnebenenes gennemsnitsplacering kan man bruge det forreste ben i løberetningen som pejlemærke på skulderens placering. For at finde ud af hvilket ben, der er forrest i forhold til løberetningen, kan man lave afstandsregninger ligesom dem, der bruges til at udregne afstanden fra middelplacering til skulder. Giver det venstre ben en positiv distance til skinnebenenes middelplacering, må det være forrest. Figur 35 viser et plot af afstanden fra det forreste ben til skulderen i de frames, hvor der er positioner på begge skinneben og mindst én skulder.



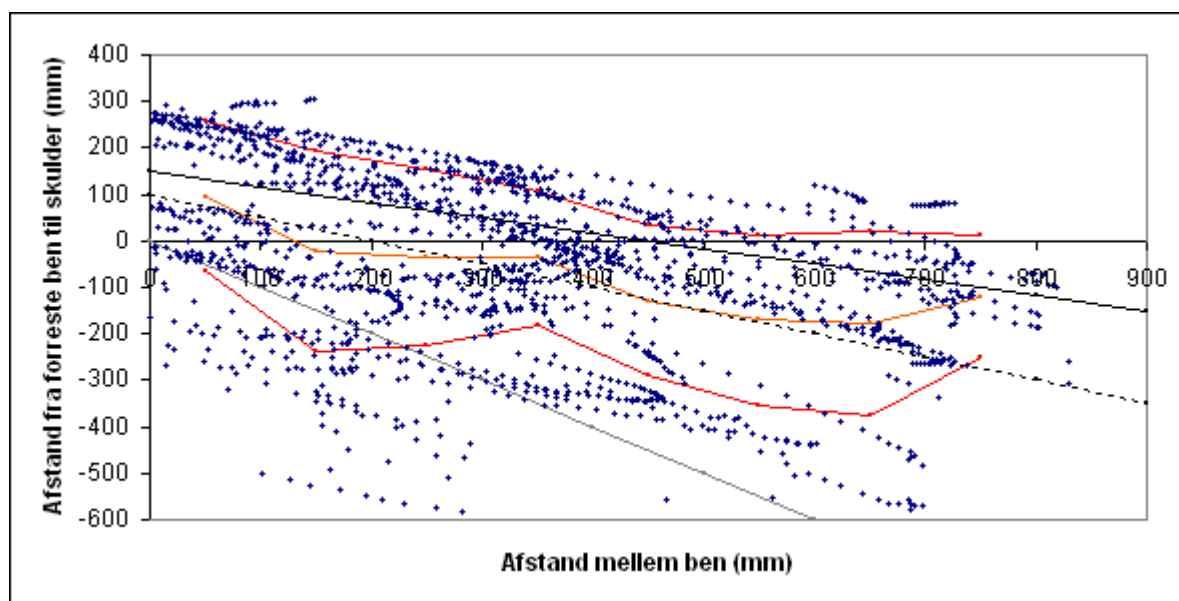
Figur 35 – Afstand fra forreste ben i løberetningen til skulderen.

I forhold til Figur 34 er der mere spredning på punkterne i Figur 35. Bruges middelplaceringen som udgangspunkt for udregningerne, vil der ikke være ret stor forskel på afstanden i sammenhængende frames. Da forreste skinneben ikke flytter sig ret meget, når man har sat foden i jorden, mens overkroppen fortsætter fremad, vil forskellen på to

sammenhængende frames være større ved denne fremgangsmåde. Punkterne ser dog ud til at dække et nogenlunde lige stort interval i begge figurer, men intervallet er naturligvis forskudt, idet forreste skinneben nødvendigvis må være foran – eller i det mindste på linje med – skinnebenenes middelpacering.

Regner man på den gennemsnitlige afstand fra forreste ben til skulderen, vil man se en distance på -58 mm. Standardafvigelsen er ved denne fremgangsmåde 194 mm og ser således ud til at være en værre indikator for skulderens placering.

Kigges der derimod på Figur 36 er det tydeligt, at der er en sammenhæng mellem afstanden mellem de to ben og afstanden fra forreste skinneben til skulderen. 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 36 – Jo længere afstand der er mellem benene, jo mindre er skulderen foran det forreste ben i løberetningen. Den orange linje er baseret på gennemsnitsafstanden for hvert interval på 100 mm. De røde linjer viser standardafvigelsen i de samme intervaller. Den stiplede sorte linje kan betragtes som den orange linje tilnærmet en ret linje, mens den grå linje viser det bageste bens placering. Den fuldt optrukne sorte linje kan bruges som estimat af skulderens placering.

Gennemsnittet og standardafvigelsen er beregnet ud fra alle punkterne i grafen, og dermed tages der ikke højde for den tydelige tendens, der ses i Figur 36. Hvis man udelukkende kigger på et lille interval – eksempelvis hvor afstanden mellem benene er mellem 400 og 500 mm – er spredningen ikke nær så stor som i grafen set som et hele. Afstandene varierer ikke mellem -600 og 300, men snarere mellem -400 og 200 mm. Standardafvigelsen i det nævnte interval er 162 mm og således mere end 10 % bedre i forhold til, når afstanden regnes ud fra skinnebenenes middelpacering.

Standardafvigelsen (de røde linjer) varierer lidt i de forskellige intervaller, og især intervallerne [100;200] og [200;300] afviger, hvilket skyldes mange data nedenfor det sædvanlige område. Dette antages at være på grund af støj i optagelserne, for i de andre intervaller ser tendensen klar ud.

Sammenhæng mellem afstanden til forreste ben og afstanden mellem benene

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 stiplede linje i Figur 36 viser en simpel forskrift på denne sammenhæng: $y = -\frac{1}{2}x + 100$.

En anden interessant betragtning er, at afstanden fra forreste skinneben til skulderen i de fleste tilfælde er negativ – helt nøjagtigt 839 ud af 1529 frames, svarende til 58,4 %. Kigger man på punkterne under x-aksen i Figur 36 ses det, at afstanden fra forreste ben til skulderen udover at være negativ i de fleste tilfælde er mindre end afstanden mellem benene. Det må betyde, at skulderen er placeret et sted imellem de to ben (x-aksen og den grå linje) og derfor ikke vil være tættere på mållinjen uanset om spilleren løber væk fra eller mod målet.

Kun når afstanden mellem skinnebenene er lille, vil overkroppen befinde sig udenfor benenes område. Ser man bort fra enkelte punkter, som ikke befinder sig alverden bag ved bageste ben (den grå linje i figuren), er skulderen som regel foran forreste ben, når den ikke er imellem skinnebenene. Det er derfor kun, når afstanden mellem benene er lille, at der er nogen større usikkerhed på skulderens placering.

I stedet for at bruge den tilnærmede gennemsnitslinje (den stiplede linje), kunne man udnytte det faktum, at usikkerheden kun findes på de tidspunkter, hvor afstanden mellem skinnebenene er lille. Usikkerhederne i form af standardafvigelsen, når afstanden mellem benene er større, bliver alligevel 'fanget' af afstanden mellem benene, så i stedet for at bruge $y = -\frac{1}{2}x + 100$ som tommelfingerregel, kunne man ændre linjen lidt – til for eksempel $y = -\frac{1}{3}x + 150$ (den fuldt optrukne sorte linje i Figur 36). Med denne linje vil usikkerheden om skulderens placering være nede på 150 mm i værste tilfælde, og i gennemsnit vil skulderens afstand til benene i løberetningen kunne afgøres med en usikkerhed på omkring 100 mm.

10-15 cm fejlmargen på afstand til skulder

264 punkter (ca. en sjettedel af alle) falder udenfor det område, der ligger mere end 100 mm under den grå linje i Figur 36, eller ligger mere end 100 mm over den sorte linje og over 100 mm over x-aksen. I gennemsnit ligger disse 45 mm udenfor området med en standardafvigelse på 62 mm. Blandt de 264 punkter findes imidlertid 11 punkter, som ligger så langt væk, at de må betegnes som støj, og i de resterende punkter er gennemsnittet 36 mm udenfor området med en standardafvigelse på 35 mm.

Sættes grænsen i stedet for 100 mm ved 150 mm, falder nu kun 73 punkter (under 5 %) udenfor området. Ses igen bort fra de 11 punkters støj, er de 62 punkter i gennemsnit 38 mm udenfor området med en standardafvigelse på 28 mm.

Selv i så støjfyldte data som de, der er brugt i dette speciale, kan mere end 95 % af alle skulderafstande afgøres med en sikkerhed på 15 cm ud fra skinnebenenes placeringer. Udover støj skal man også regne med, at ikke alle mennesker løber på helt samme måde, så også fra person til person vil der være variationer, som altså er dækket ind under de 15 cm.

Med støj og variationer mennesker imellem kan 5 ud af 6 skulderafstande endda afgøres med en fejlmargen på kun 10 cm. Derfor vil det nok ikke være helt forkert at antage, at vil kunne komme op i nærheden af de samme 95 % sikkerhed på alle skulderafstande, hvis der blev brugt støjfri data.

Ved almindeligt løb vurderes det derfor, at det ud fra skinnebenenes placering er muligt at opnå en tilstrækkeligt nøjagtig vurdering af afstanden til skuldrene. Skuldrene kan siges at befinde sig enten imellem benene (hvormed deres placeringer er ligegyldige) eller et lille stykke foran forreste ben efter forskriften

$$y = -\frac{1}{3}x + 150 \text{ mm,} \quad (\text{Formel 4.1})$$

hvor y er afstanden fra forreste ben til skulderen og x er afstanden mellem benene. Med dette udgangspunkt vurderes usikkerheden til at være på op til 10 cm. Formlen er uafhængig af den hastighed, hvormed spilleren 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 middeplacering. Følgende algoritme beskriver dette på en mere formel måde:

1. Beregn føddernes middeplacering, *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 middeplacering, *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 27,7 cm mellem de beregnede skulderplaceringer og skulderplaceringerne i målingerne, og standardafvigelsen er på 14,3 cm. Brug af formlen $y = -\frac{1}{2}x + 100$ mm i stedet for $y = -\frac{1}{3}x + 150$ mm (Formel 4.1) giver en lille smule bedre resultater, idet placeringerne nu afviger 26,5 cm fra de målte placeringer, med en standardafvigelse på 14,1 cm. Disse resultater ligger dog 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 middeposition. Trods det at retningen udglattes baseret på 10 frames, betyder støjen i positioneringen, at retningen ikke nødvendigvis svarer til den reelle retning. En fejlberetning i retningen medfører en fejlberetning i skuldrenes middeposition, og det bliver kun endnu værre, hvis benenes middeposition samtidig er udregnet forkert.

Forskellen på den beregnede middeplacering og middeplaceringen 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 middeplaceringen. Bruges middeplaceringen af de opfattede skulderplaceringer som udgangspunkt for beregningerne (i stedet for middeplaceringen 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. Disse optagelser repræsenterer ikke reelle kampsituationer, da der kun medvirker en enkelt spiller som medie; Frands Boe Johansen, som er bror til dette speciales forfatter og har

erfaring fra 2. division. Dette samt den lille mængde testdata skal tages i betragtning, når rigtigheden af de herunder nævnte analyser vurderes.

Disse testdata kan i nogen 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 12,7 cm (standardafvigelse: 7,2 cm). Ligesom ved de støjfyldte data kan det gøres en lille smule bedre ved at benytte $-\frac{1}{2}x+100$ i stedet for Formel 4.1 i skridt 4 i algoritmen, for så er skuldrenes beregnede position i gennemsnit 12,1 cm (standardafvigelse: 7 cm) fra den reelle position.

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.

Dybere analyse kan forbedre nøjagtighed

Samtidig er der stadig arbejde at gøre med at kunne fastslå skuldrenes middelplacering. 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 middelplaceringen kan gøres bedre med en anden fremgangsmåde. Det kan også tænkes, 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 middelplacering af skuldrene. Desuden kan der tages højde for rotationen i overkroppen igennem de forskellige faser af et løb.

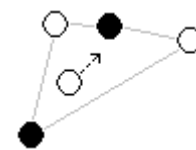
At analysere og kortlægge menneskers bevægelsesmønstre er et kæmpe område indenfor idrætsforskning, som man vil kunne blive ved med at granske i større og større detaljeringsgrad. Yderligere analyse efterlades som fremtidigt arbejde.

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 variabler 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 variabler, 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.

Som afslutning på den udførte analyse af almindeligt løb kan det konkluderes, 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 12 cm, men her skal der tages forbehold for, at verifikationen er udført på en meget lille datamængde lavet på mindre realistiske optagelser. 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 middelplacering – variabler der er indbyrdes afhængige – og i sidste ende skuldrenes placering.

4.3.2. Retningsskift

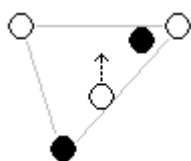
For at have så høj fart som muligt, når bolden spilles ind i området bag offsidegrænsen, vil en angriber ofte løbe på tværs af banen for så at skifte retning i det øjeblik, hvor bolden spilles. Som vist i Figur 37 vil skuldrene ved retningsskift være placeret et stykke væk fra den normale position, idet man læner sig til siden for at kunne opretholde balancen.



Figur 37 – Ved retningsskift læner man sig til siden.

I dette speciale antages det, at det er muligt at finde en sammenhæng mellem skuldebenedenes og skuldrenes placering ved retningsskift, ligesom det var tilfældet ved almindeligt løb. Sammenhængen analyseres ikke nærmere, men i et kommercielt system ville dette skulle gøres.

4.3.3. Acceleration



Figur 38 – 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 38. 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.

Ligesom for retningsskift overlades sammenhængen mellem benenes og skuldrenes placering ved acceleration til udbydere af et kommercielt system.

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 39 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 benskinnen 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.



Figur 39 – Thomas Augustinussen fra AaB med et halvtliggende vristspark. Kilde: [AaB-Online].

I dette afsnit undersøges det, om føddernes position er tilstrækkeligt til at identificere den afleverende spiller korrekt i de fleste tilfælde (Krav8). Undersøgelserne er kun interessante, når 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 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 40. 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 relevans.

Grundet nærkampes 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.



Figur 40 – Nærkamp om bolden mellem FC Midtjyllands Simon Poulsen (tv) og Rasmus Würtz fra AaB. Kilde: [AaB-Online].

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 40 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 20 er bolden i hoftehøjde men forsøges spillet med fødderne af de to spillere. Også på Figur 41 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 situationer, 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 detaljer om implementationen henvises til kapitel 6.



Figur 41 – 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].

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 spillers 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 42. Det betyder, at overkroppen og dermed skuldrene befinder sig imel-



Figur 42 – Hovedstødsduel mellem AaB's Kasper Risgård (tv) og Esbjergs Frank Hansen, der lige er landet efter duellen. Kilde: [AaB-Online].

lem 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. Skulderende 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 42, 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. Hovedstøt 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.

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 skuldebene 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 12 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 17 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 17 cm nøjagtighed, hvilket giver en samlet unøjagtighed på 34 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 $17 + 10 = 27$ 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 2 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. Detektering 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 A.3) kan der komme pludselige retningsskift uden at en spiller har rørt bolden. Analysen i kapitlet er derfor fortrinsvis af teoretisk karakter.

5.1. Detektering 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
	Målskick/indkast/hjørneskick	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)	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 offsidetetektering 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.

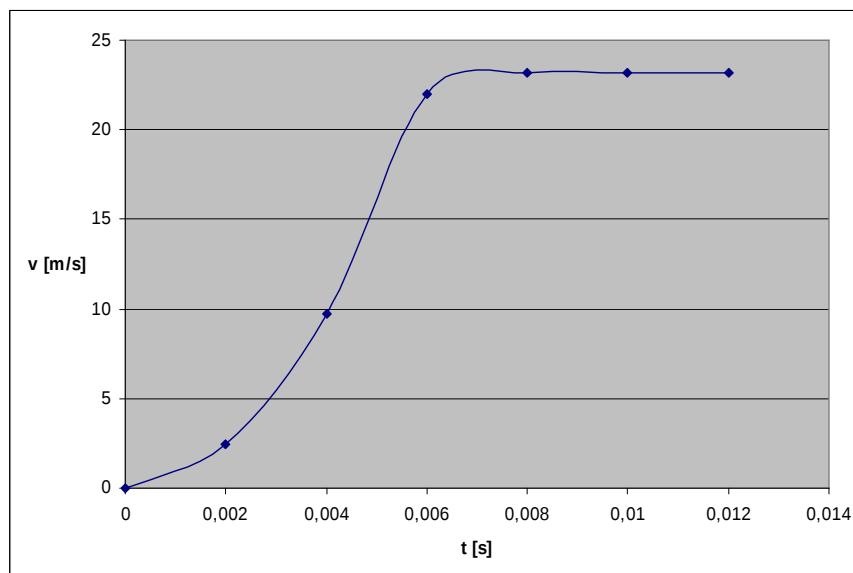
Det vurderes, at det med tilstrækkelig præcision vil være muligt at detektere afleveringer, hvis og kun hvis de er forekommet i virkeligheden. Til formålet gøres brug af enkelte grænseværdier, som vil skulle finjusteres for at opnå den bedst mulige korrekthed. Se afsnit 5.3 for en teoretisk vurdering 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

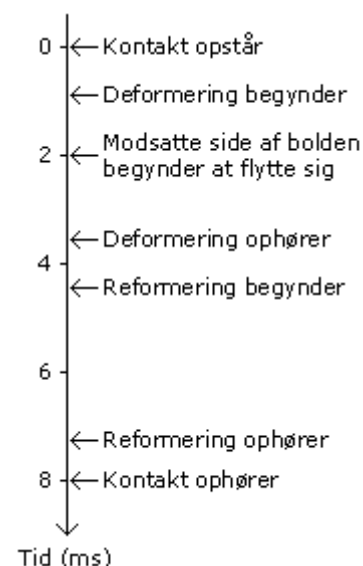
I [Larsen & Hansen, s. 38] analyseres en videosekvens af et spark til en bold, der ligger stille på jorden [Asai]. Sekvensen er optaget med 4500 billeder pr. sekund, og ud fra billederne er det bestemt, hvor langt bolden har flyttet sig på bestemte tidspunkter. Disse data ligger til grund for Figur 43, som viser boldens hastighed som en funktion af tiden efter der er sparket til bolden.

Figur 43 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.

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



Figur 43 – Hastighedsfunktion for spark til en liggende bold. Kilde: [Larsen & Hansen, s. 39].



Figur 44 – Tidslinje med begivenheder fra foden og bolden får kontakt indtil kontakten ophører.

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.

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 44. 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 43 efter 6 millisekunder ikke længere tilføres fart. Reelt opstår kontakten altså 2 ms før det i Figur 43 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

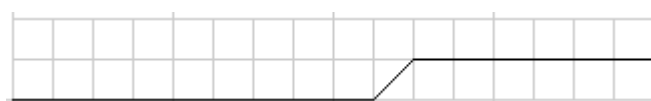
I dette afsnit gøres et forsøg på at opsætte teoretiske grænseværdier for såvel acceleration som retningsskift. Der tages udgangspunkt i koordinatsystemet fra [Larsen & Hansen, s. 25], således at positioneringsdata er angivet i cm. At overføre kontinuerte positioner til et diskret domæne medfører visse 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 45 viser boldens bane som den reelt er, med en vinkel på ca. $5,7^\circ$, mens Figur 46 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 45 – Boldens reelle bane følger en ret linje.



Figur 46 – 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 47, hvor de opfattede retningsskift nu er ca. 27° . Reduceres samplingsfrekvensen til en tiendedel, vil boldens retning i eksemplet opfattes korrekt, men det-

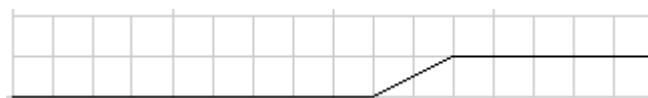


Figur 47 – Ved halvt så stor samplingsfrekvens er de to opfattede knæk mindre.

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 48 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 48 – 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 46, Figur 47 og Figur 48 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 45 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 cm $\approx$ 3 cm i x-retningen og 0,28 cm $\approx$ 1 cm i y-retningen, hvilket giver en retningsændring på 18,4° 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 cm $\approx$ 1 cm i y-retningen, og retningsændringen er på 8,1°. Ved 50 ms kommer retningsændringen ned på 4,1°. 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°	(11,1) = 5,2°	(28,2) = 4,1°	(56,5) = 5,1°
	(3,0) = 0°	(7,1) = 8,1°	(14,2) = 8,1°	(12,1) = 4,8°	(28,3) = 6,1°	(56,6) = 6,1°
	(2,1) = 26,6°			(11,2) = 10,3°		
	(3,1) = 18,4°			(12,2) = 9,5°		

Tabel 5 – Retning som funktion af fart, periode og afrunding. Boldens retning er reelt 5,7°.

Tallene i Tabel 5 skal ses i forhold til den reelle retning på 5,7°. Derfor kan grænseværdien sættes til 2,5°, 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°. Præcist hvornår den mulige aflevering detekteres, afhænger af størrelsen på retningsskiftet. Jo større ændringen er, jo før overskrides grænseværdien.

En grænseværdi på 2,5° 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 retningsskift udglattes tilsvarende, så de opfattes at følge en bane, der minder om en hyperbel. Først 50 millisekunder efter et retningsskift vil boldens bane opfattes til at have den retning, den i virkeligheden har, og ved små retningsskift, 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 retningsskift på 45° og en fartændring fra 10 m/s til 14,1 m/s – vil den opfattede retning efter 3 millisekunder have oversteget 2,5°. Retningsskift ses ved at kigge på den nuværende retning i forhold til retningen 50 ms tidligere.

Et mindre retningsskift på 5,7° 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°, 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 6 ms med en usikkerhed på 4 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 cm kan medføre en mindre acceleration på grund af kvantificering.

I Figur 46 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 1 cm er $14,04 \text{ cm/ms}$, mens en ændring på 2 cm giver en fart på $14,14 \text{ cm/ms}$, og grænsen for hastighedsforøgelse behøver i dette tilfælde være blot $0,2 \text{ cm/ms}^2$ for at en aflevering ikke fejlagtigt opdages. På den måde antages afleveringen ligesom ved retningskift at blive detekteret efter $6 \pm 4 \text{ ms}$ 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 34 cm. Der er lige så meget som når spillerne begge løber mod målet, jf. afsnit 4.6, 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

Sammenligning af 2 og 3 koordinater, hvis der er tid

Kommunikation til dommertrioen

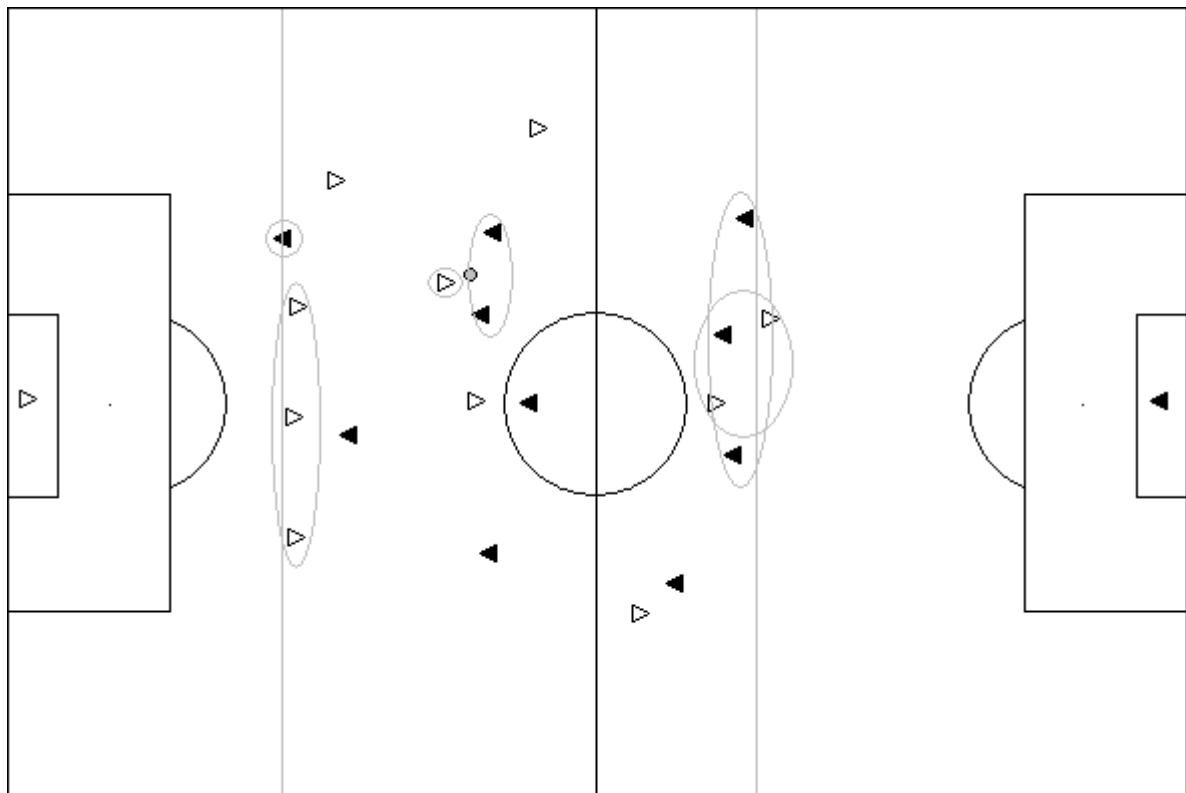
Persistering?

Pre- and postconditions

6.1. Design

To tråde, seks mængder og nogle filtre.

Tre/fem datastrukturer, som udtynnes efterhånden som filtrene gennemløbes



Figur 49 – For hvert hold vedligeholdes tre mængder: spillere der kan udgøre offsidegrænsen, spillere der kan have afleveret bolden og spillere der kan være offside. Samtidig holdes der styr på, hvor offsidegrænsen går i begge ender af banen.

Også denne prototype skal laves i to versioner, så et endeligt system kan testes i forhold til et mere detaljeret system, som dog ikke kan bruges i praksis på grund af den til rådighed stillede mængde data.

Skal kunne udvides til at dømme mål m.m.

6.1.1. Tasking model

Tasking model [Douglass, s. 369] tråde og delte ressourcer. Semaphore [Stallings, s. 208]. Producer/Consumer [Stallings, s. 211]. Bounded-Buffer Producer/Consumer Problem Using Semaphores [Stallings, s. 218]

External events [Douglass, s. 218] messages, arrival patterns, system response

Timing diagrams [Douglass, s. 339]

Time-driven [Douglass, s. 518] (ikke event-driven – eller hvad?) (s. 523 hard og soft deadlines)

Priority-based preemption [Douglass, s. 531]

Rate Monotonic Analysis [Douglass, s. 553]

6.1.2. *Mønstre*

Filter Pattern, Template Method Pattern, Strategy Pattern, Abstract Factory Pattern, Singleton Pattern, Wrapper Façade Pattern

6.2. *Filtre*

Slå indledende afleveringsdetektering fra, mens offside beregnes – modtagelse af data foregår i egen tråd

Tre mængder, der gradvist formindskes: Afleverende spillere (fra begge hold), offside-grænsen (i begge ender, bolden/næstsidste forsvarsspiller, midterlinjen, spillere i nærheden), spillere i mulig offsideposition (banehalvdel)

a) Der er sjældent spillere på offsidegrænsen

Boldberøring – Grov beregning (spillere indenfor 2 meters radius af bolden, 1 meter offside (offsidegrænse i begge ender – angribere i begge ender)) – Fin beregning (fod indenfor 20 cm radius af bolden – knold/tæt på jorden – kan afleveringen nå frem (skud på mål) – præcist hvor er spillerne)

b) Der er få boldberøringer i forhold til antal retningsskift og accelerationer

Boldberøring – Afleveringsdetektering (spillere indenfor 2 meters radius af bolden – knold/tæt på jorden – fod indenfor 20 cm radius af bolden) – Fin beregning (1 meter offside (offsidegrænse i begge ender – angribere i begge ender) – kan afleveringen nå frem (skud på mål) – præcist hvor er spillerne)

6.2.1. *Afleveringsdetektering*

Her skal der især tages højde for, at bolde kan ændre retning uden at have rørt en spiller (knolde på banen, bolden skruer, brækker i luften), og at driblinger ikke forveksles med afleveringer. Desuden kan en spiller ikke være strafbart offside ved målspark, hjørnespark og indkast.

Bolden kan brække i luften, men kan ikke (bortset fra specialtilfælde, når overliggeren rammes) få ekstra fart ved at glide i græsset [Wesson, s. 13]. Bolden skifter retning, når den rammer jorden eller dommeren. Hvor meget kan bolden skrue?

Vindstød kan accelerere bolden en smule.

Så længe bolden tilføres fart er den under berøring. Kan ikke testes pga. interpolering.

6.2.2. *OneMeterOffside*

Indledende filtrering

6.2.3. *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 modtog kendelser om spillere i offsideposition.

Målet er 7,32 x 2,44 m indvendigt

Målfeltet slutter 5,5 m efter den indvendige side af målstolpen og er 5,5 m langt

Straffesparksfeltet slutter 16,5 m efter den indvendige side og er 16,5 m langt

6.2.4. *Bestemmelse af afleveringens retning*

En angriber kan kun være i aktiv offsideposition, hvis bolden spilles til ham, og derfor kan afleveringer, som på grund af retning eller fart aldrig vil kunne nå frem til spilleren, sorteres fra. Dette strider godt nok mod indledningen, hvor det blev beskrevet, at den aktiv-passive del af offsidereglen ikke ville indgå i systemet, men for at belaste linjedommerne mindst muligt, kan de helt åbenlyse passive offsidekendelser godt sorteres fra. Angriberen skal i øvrigt også befinde sig foran bolden, og her skal der tages højde for boldens omfang i forhold til spillerens placering. Afleveringen behøver derimod ikke være fremadrettet.

Fanger tæmninger og driblinger

Skud på mål

Undersøgelse af boldens bane i forhold til fart og vinkel

Til filtrering af afleveringer, der aldrig vil nå frem. [Wesson] beskriver det. Der vil selvfølgelig blive taget udgangspunkt i en approksimation, for vindforhold og den slags har stor betydning for, hvor lang en aflevering kan blive.

Parabel-form for at kunne detektere boldens sandsynlige bane.

Ekstrapolering

6.2.5. *Detektering af afleverende spiller ud fra 3D-data*

Eftersom spillernes positioner bestemmes ud fra deres fødder, er det i de fleste tilfælde let at finde ud af, hvem der afleverede bolden. Bolden kan imidlertid også spilles med hovedet eller ved at blive ramt i ryggen, og også i disse tilfælde skal den afleverende spiller kunne identificeres korrekt. Sammenlign med OneMeterOffside.

Tvivl medfører, at linjedommeren notificeres. Dommeren må træffe beslutningen.

6.2.6. *Bestemmelse af modtagende spillers position*

Positionen på den spiller, der afleveres til, skal bestemmes ud fra hans fødders placering på banen. Denne algoritme findes i to versioner – en der skal modtage data som fra Cairos' system, og en der kan bruges til test.

Hvis der skal bruges tre punkter, må der være 20 cm til skulderen, 20 cm til fødderne og 20 cm til panden.

6.2.7. *Ude af banen*

Spillere som befinder sig udenfor banen har ingen indflydelse på offsidekendelserne. En forsvarsspiller, der ligger skadet på banen, vil tælle som næstsidste forsvarsspiller, men en tilsvarende angriber vil blot betegnes som uden indflydelse på spillet.

Ny bold

6.3. Konfigurationer

Forskellige opsætninger

6.3.1. *DommerStøtteSystem*

For at sammenligne

Acceleration, DSSOffside

AvgPositioning

319 bytes

6.3.2. *To koordinater*

Flere filtre

RawPositioning, CalculatedPositioning

319 bytes

6.3.3. *Tre koordinater*

Flere filtre

Raw Positioning, CalculatedPositioning

473 bytes

6.4. Andre delsystemer

Dem som deltager run-time (i testopsætning). De andre findes i appendiks.

6.4.1. *ScenarioSender*

Afhængigt af, om det bliver Cairos eller Qualisys, der leverer filen med positioneringsdata, skal ScenarioSender sende disse data til DommerstøtteSystem i realtid.

Der vil skulle laves en version til at afspille positioneringsdata med kun føddernes placering, men til testformål skal der laves en anden version, som kan levere mere nøjagtige data om positioner flere steder på kroppen.

Læse alle positionsdata ind i RAM a priori

6.4.2. *Visualizer*

Denne prototype vil nok ikke have ændret sig en helt masse i forhold til [Larsen & Hansen]. Den skal indstilles til at kunne modtage data i et lidt andet format på grund af at z-koordinaten på bolden også fremgår af de fra ScenarioSender afsendte data, og desuden skal det fremgå, hvilke spillere, der vurderes til at være offside. Visualizer skal sikkert indstilles til at kunne modtage to forskellige dataformater.

250 ms mellem gentegning

7. Test

På baggrund af data fra Qualisys og måske Cairos skal pålideligheden af DommerStøtteSystem vurderes. Dette gøres ved at sammenligne systemets resultater med resultaterne fra testudgaven af prototyperne. Til at vurdere, hvem den afleverende spiller er, er en menneskelig vurdering af situationerne på baggrund af 3D-modellen nødvendig. Da der ikke findes et system, der kan afgøre sådanne situationer 100 % korrekt, må systemets pålidelighed vurderes ud fra grundig analyse af videobilleder af spilsituationerne.

Hver enkelt algoritme fra kapitel 4 kan testes på denne måde, og derved kan opnås et billede af, hvor godt DommerStøtteSystem vil kunne gøre det i en virkelig situation. 3-5 typiske scenarier vil skulle beskrives, mens de samlede resultater kan opsummeres i et enkelt afsnit, hvormed 15-20 sider skulle være fyldt.

Da scenarierne optaget med Qualisys ikke helt kan betragtes som realistiske spilsituationer, kunne det være interessant også at teste algoritmerne med data fra en virkelig kamp optaget med Cairos' system. Her vil det være nødvendigt at have videobilleder af kampen for at kunne vurdere, om DommerStøtteSystem træffer de rigtige beslutninger.

Ikke alting kan testes med så små scenarier.

Testopstilling. Jf. appendiks.

Pakketab [43]

Larsen-Hansens version at sammenligne med.

7.1. Testdata

Testdata er sammenstykket af bidder optaget med min lillebror, Frands Boe Johansen, der har erfaring fra 2. division. 240 Hz interpoleres. ScenarioGenerator-dims i appendiks.

7.2. Scenario 1

Ud fra videobilleder vurderes det, hvornår og af hvem bolden er blevet spillet, hvilken retning bolden spilles i, og om der findes en angriber i offsideposition. Ud fra disse data bedømmes det, om der er tale om offside.

Herefter sættes systemet til at afgøre samme situation, og resultaterne sammenlignes.

7.3. Scenario N

Ud fra videobilleder vurderes det, hvornår og af hvem bolden er blevet spillet, hvilken retning bolden spilles i, og om der findes en angriber i offsideposition. Ud fra disse data bedømmes det, om der er tale om offside.

Herefter sættes systemet til at afgøre samme situation, og resultaterne sammenlignes.

7.4. Testresultater

I dette afsnit vurderes resultaterne af de 20-25 scenarier, der i alt er blevet testet. Dette vises med skemaer over succesraten for hver enkelt algoritme og den overordnede offsidetetekteringsalgoritme. Dermed er det muligt at finde områder, der skal forbedres for at algoritmerne kan anvendes i topfodbold.

7.5. Realtidskrav

Det skal undersøges, om systemet kan leve op til kravet om at afgøre offsidetituationer på under 1 sekund. Dette gøres ved at sætte timere til at måle, hvor lang tid det har taget at udføre de nødvendige beregninger, og ud fra disse målinger forudsige, hvorvidt der kan opstå situationer, hvor systemet ikke kan følge med.

8. *Fremskridt*

Hvordan har jeg forbedret systemet i forhold til LarsenHansen?

3D-positionering i 2 mm koordinater.

Meget bedre afleveringsdetektering (kapitel 5).

Bedre positionering af spillere nær offsidegrænsen (bevægelsesanalyse).

Mulighed for tvivl om afleverende spiller.

Historik i Player og Ball.

Mulighed for forsinkelse i beregningerne (designspørgsmål for optimering og modularisering). Beviselig timeliness?

3 koordinater for spillerne + tilhørende strategi for beregning af positioner lige til.

ScenarioSender og Visualizer bedre opbyggede (antal kodelinjer).

Persistering kan, som det nævnes i [Larsen & Hansen, s. 62] overlades til en separat enhed på netværket, idet positioneringsdata sendes ud med multicast og derfor kan læses af flere på én gang. I dette speciale vil persisteringsdelen derfor glide ud.

Relevansen af at persistere data i netop dette delsystem kan diskuteres, men [Larsen & Hansen, s. 56] har altså valgt at implementere denne funktionalitet i DommerStøtteSystem.

9. *Fremtidigt arbejde*

Her beskrives det, hvilket arbejde, der mangler at blive udført, før prototyperne kan implementeres i et virkeligt system. Om alt går vel, skal der blot mere udførlige test til at verificere de udviklede algoritmer.

I et samlet system til brug i virkelighedens verden skal systemets kendelser formidles videre til dommertrioen, og dette skal ske uden at omverdenen kan opsnappe eller manipulere kendelserne. Grænsefladen til linjedommerne kan laves på flere måder, f.eks. så de får at vide, hvor mange spillere, der står offside. I øjeblikket benytter linjedommerne et system, hvor der i deres flag er inkorporeret en radiosender, så de ved at trykke på en knap kan sende et signal til en sensor på dommerens arm. Knappen bruges, når linjedommeren hejser sit flag, og aktiverer en bip-lyd eller en vibrator på dommerens arm. På den måde behøver dommeren ikke hele tiden kigge ud på linjedommeren for at se, om der skal dømmes offside, men kan koncentrere sig mere om spillet på banen.

Linjedommeren kunne udstyres med en lignende sensor, som kunne sørge for kommunikationen mellem DommerStøtteSystem og linjedommerne. Antallet af bip kan indikere antallet af spillere i offsideposition.

Cairos' system kan eventuelt også bruges til at afgøre, om bolden har været i mål, ligesom systemet muligvis kan overføres til andre sportsgrene. Andre ideer til indhold til dette kapitel vil dukke op undervejs, hvorfor det ikke bør tage mere end et par dage at fylde ord på ideerne.

Mere nøjagtige undersøgelser/test for nærmere at kunne bestemme afleveringernes kilde i forbindelse med nærkampe, hovedstødsdueller.

Ishockey-offside.

10. Konklusion

Den tredje koordinat er nødvendig for at kunne finde spilleren? Placeret i nakken helst. Udstyret har ikke været godt nok til at afgøre kilden til afleveringen.

Virkelighedens usikkerheder i form af brækkende bolde, knolde på banen, boldens skruening.

Spillernes placering er nok til at afgøre offside, hvis afleveringsdetekteringen ellers fungerer? 2 eller 3 radiosendere? Ellers laves fortolkningen om.

Afleveringsdetektering ikke tilstrækkeligt sikker – kan man give linjedommeren besked herom? Hvordan forgår kommunikationen i det hele taget?

Det er lige før, linjedommeren helt kan undværes (når bolden har forladt banen + offside kan i realiteten godt klares af dommeren.)

Hvad skal der til for at systemet kan bruges i virkeligheden? (Præcist positioneringssystem, der også virker med bolden, og som ikke generer spillerne).

Hvad har jeg bidraget med? (bevægelsesanalyse, flere punkter, afleveringsdetektering, 3d, hvornår er det nødvendigt at markere)

Hvor præcist er systemet? Hvor præcist kan det blive? Hvordan kan man overhovedet teste?

Videre arbejde (mere bevægelsesanalyse, afleveringens retning, bolden ude af spil, indkast, mål)

Sælg idéen, ikke produktet. Hvorfor ofre tid og penge på videreudvikling? Hvad er det essentielle for at man kan tro på idéen?

En prototype har vist, at det på simpel vis er muligt at få et computersystem til i realtid at lave offsidevurderinger. For at komme tættere på et bevis er der i dette speciale opsat krav til en offside-detekteringsassistent, som en kunde kunne tænkes at opstille dem. Disse krav har været udgangspunktet for en videreudvikling af prototypen, som med stor præcision kan afgøre offside-situationer. For at kunne påvise at præcisionen stemmer overens med den fysiske virkelighed er der udført en analyse af spillerbevægelser og boldbevægelser.

Relater til andre tekniske hjælpemidler i sportens verden: målfoto, hawk-eye (tennis, cricket), orad virtual replay. Ikke nødvendigvis i konklusionen. **Tennis, ishockey, amerikansk fodbold, løb (RFID tags) ... målfoto. Ændre måden, hvorpå spillet spilles**

8. september – 12. december 14.30:

Definere/diskutere realtidskrav (1)

Videre bevægelsesanalyse + delkonklusion (x+1)

Undersøgelse af boldens bevægelser (2)

Beskrivelse af analysesoftware (1)

Flere optagelser til at verificere med + optagelser til test (1)

Klargøre data til test (2)

Sætte enkeltpersoner og bolde sammen til testscenarier (3)

Beskrive testscenarier (2)

Få DommerStøtteSystem til at kunne afvikles (3)

Modificering af ScenarioSender – to versioner (2)

Modificering af Visualizer – to versioner (2)

Design, implementation, test, beskrivelse af:

- Den overordnede offsidealgoritme – to versioner (3)
- Afleveringsdetektering (3)
- Modtagende spiller – to versioner (3)
- Afleverende spiller – to versioner (3)
- Afleveringens retning (2) ?
- Bolden ude af spil (2) ?

Arkitekturbeskrivelse (3) Mønstre osv.

Beskrivelse af prototyper (4)

Test af præcision og tidskrav (5)

Korrektur, indledning, fremtidigt arbejde, konklusion, brugsvejledning, testopstilling (7)

I alt: 51 (+4?) dage.

Tid: $13 \cdot 5 + 2 \cdot P2P = 67 - P2P$.

A. Appendiks

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 mulig 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 modsat-te 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 offsidetetekteringsassistent 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 bolddrengene 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 amatørfotoграф 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 offsidetetekteringsassistent 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 offsidetituationerne. En forsvarsspiller, der lå til behandling ved sidelinjen tæt ved egen mållinje, ville i modsat fald annullere så godt som alle offsidetituationer.

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 offsidetetekteringsassistenten.

Ifølge [Fodboldloven, s. 28] må en spiller ikke forlade banen uden at have fået tilladelse af dommeren. Spillerne vil derfor finde 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 bolddrengene 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 negativer.

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 4.

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 kunne modificeres 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.

A.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 50 nedenfor. For en mere detaljeret beskrivelse end den, som tilbydes herunder, henvises til [Larsen & Hansen, s. 42-63].

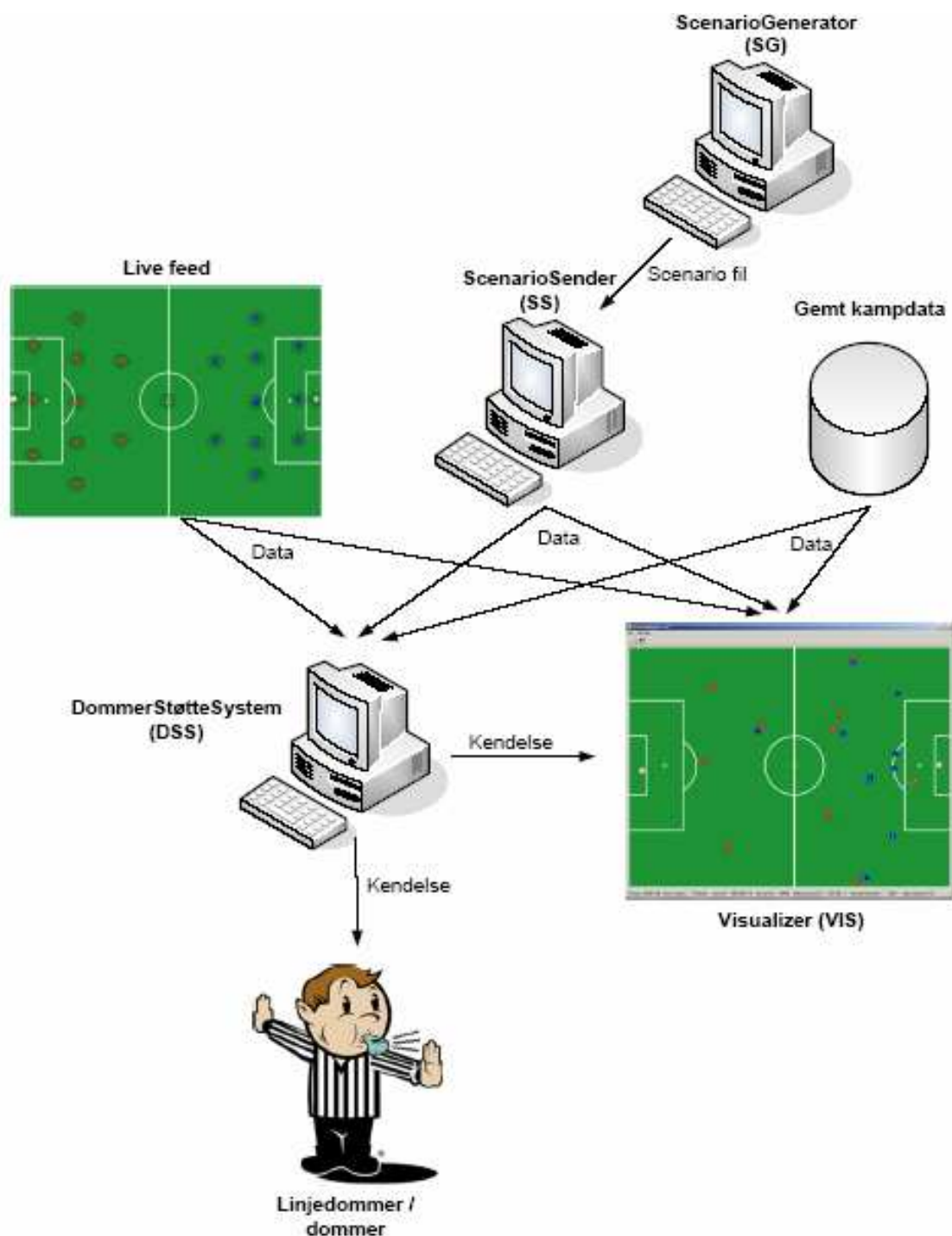
ScenarioGenerator

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. ScenarioSender kan afspille en scenariofil lavet med ScenarioGenerator, og simulerer så at sige et positioneringssystem.



Figur 50 – 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.

A.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].

A.2.2. Design

Overordnet set er det samlede system designet som forklaret i indledningen til afsnit A.2. 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.

Offsidetetekteringstråden 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].

A.2.3. Offsidetetektering

Den overordnede algoritme til offsidetetektering 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.

A.3. 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.

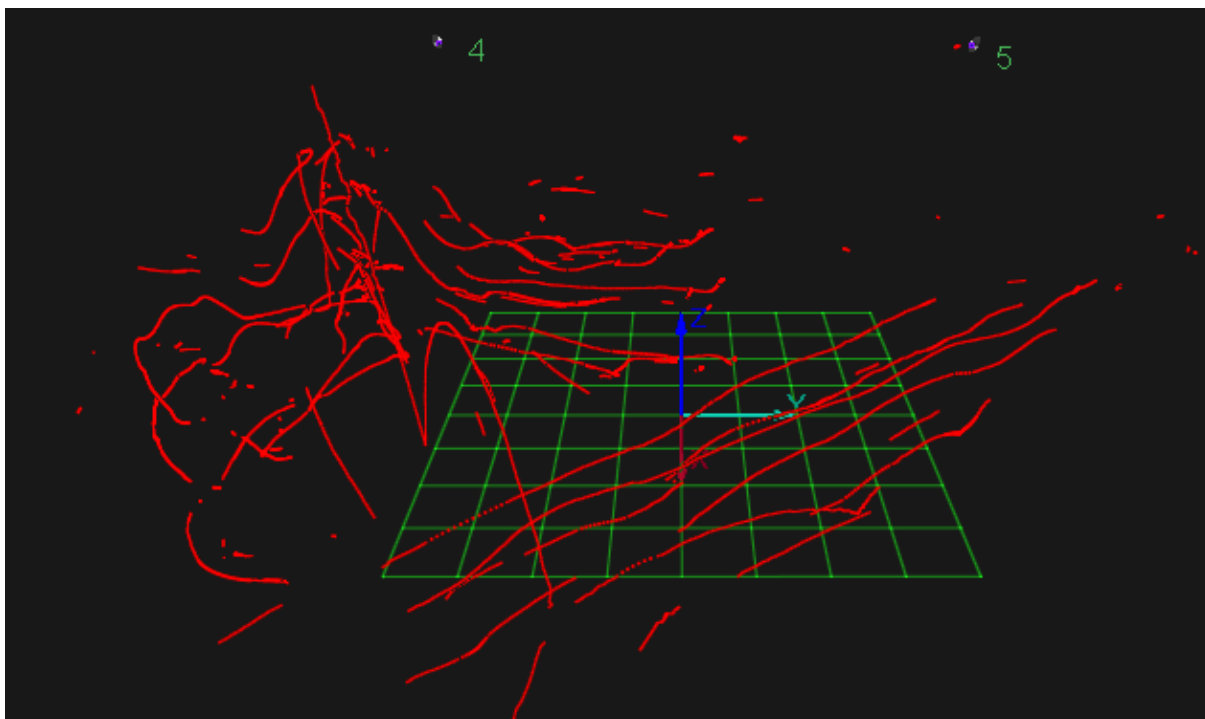
I systemet benyttes en række kameraer, der stilles op omkring det område, hvor der skal optages. Ved hjælp af en L-formet stok med en bestemt størrelse og med reflekterende markører, kan hver enkelt kamera ud fra dets betragtningsvinkel beregne dets fysiske position. Kameraerne udsender infrarødt lys, 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 på samme måde 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.

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 51, 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.



Figur 51 – 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.

For at give bedre overblik over det optagne scenario er det muligt at navngive hver enkelt bane og give den en farve. I Figur 54 er banerne for markørerne på tre spillere samt bolden blevet farvelagt, så alle baner for den samme spiller har samme farve.

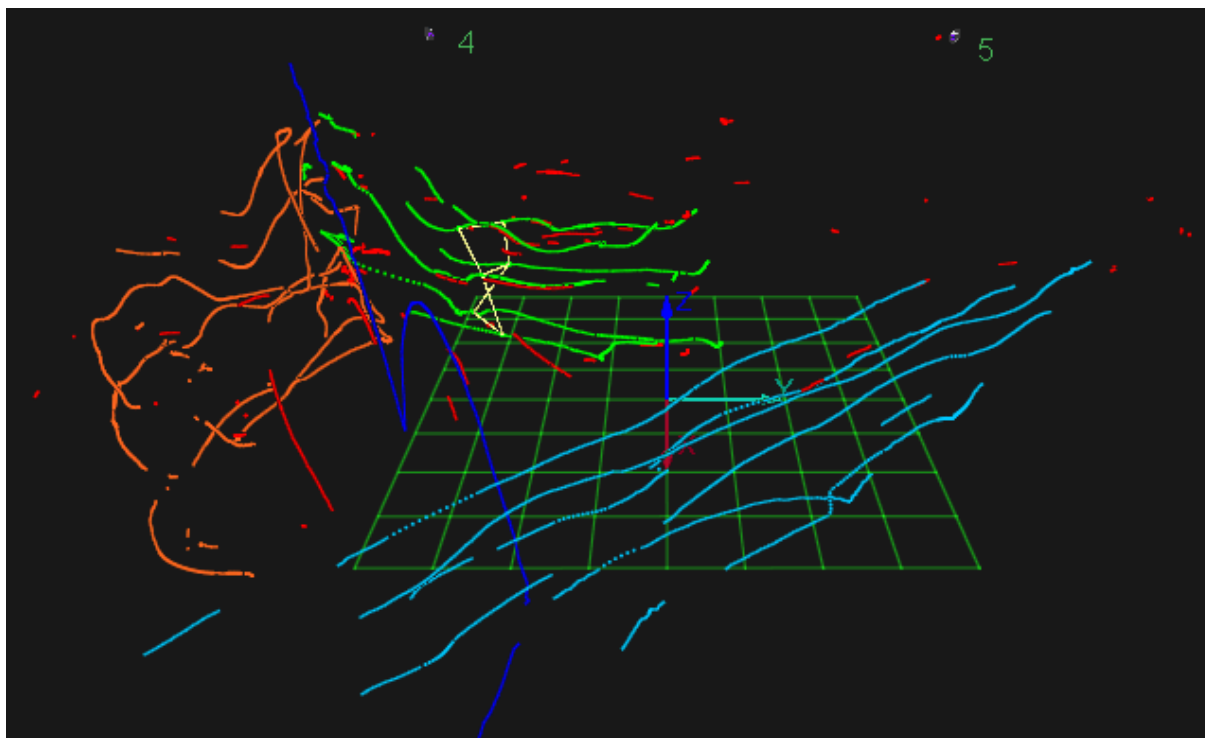
Hvis der er 'huller' i optagelserne, hvor kameraerne ikke har kunnet se markørerne tilstrækkeligt godt – eksempelvis den lyseblå spillers højre skulder, som udgøres af den øverste lyseblå linje – skal markørens bane stykkes sammen af flere baner. Den lyseblå spillers højre skulder har et hul længst til 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 figurerne angiver de stiplede linjer, at banen er blevet interpoleret, og som det kan anes i Figur 51 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 52. 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 53 viser, hvordan en ret linje i virkelighedens verden kan blive forvansket på grund af støj i optagesystemet.

Figur 52 – To forskudte optagelser af den samme markør.

Figur 53 – De to baner fra Figur 52 sat sammen til én bane.

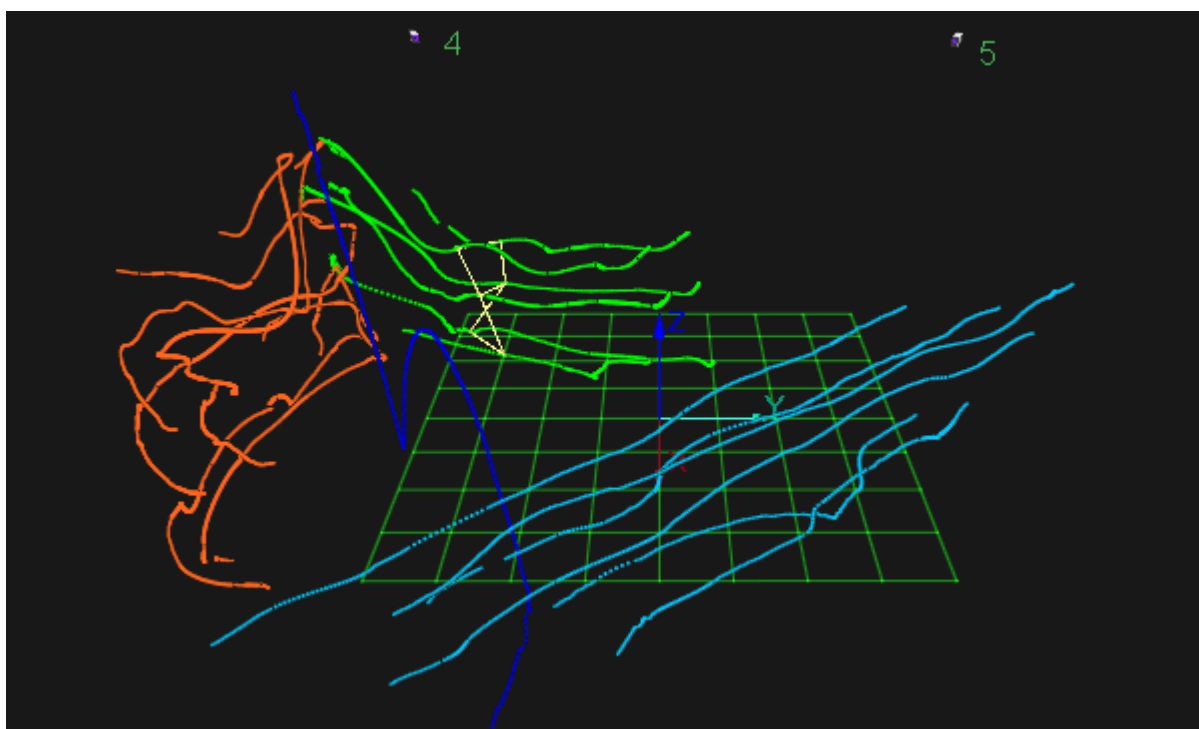
Yderligere kan der indsættes 'knogler' mellem banerne, hvilket også blev vist i Figur 18. I Figur 54 er der knogler mellem den grønne spillers fødder, hofter og skuldre, og dermed fås en omrids af den pågældende spiller. Knogler gør det lettere at se sammenhængen mellem banerne – både i efterbehandlingsfasen og når scenariet afspilles.



Figur 54 – Scenariet fra Figur 51, 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.

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 55 viser, hvordan scenariet fra Figur 51 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.



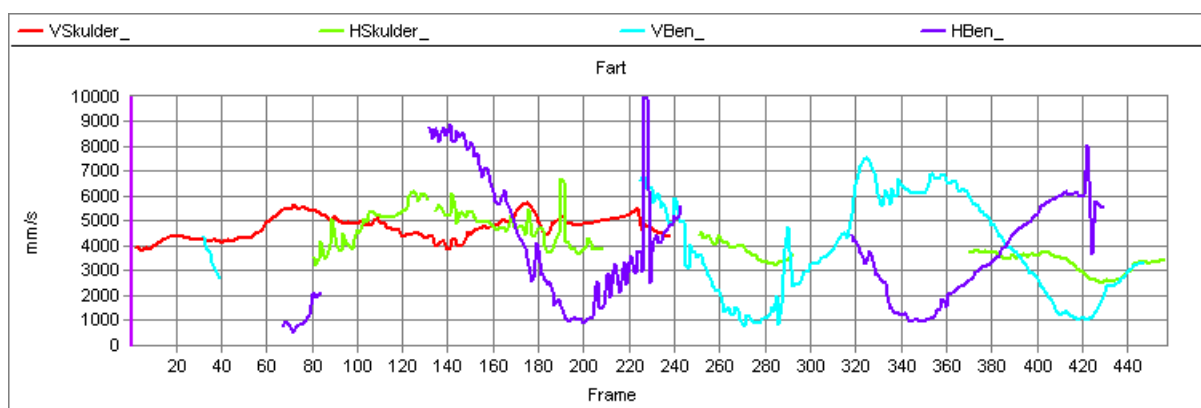
Figur 55 – Støjen i Figur 54 er nu fjernet, hvormed kun de reelle data er at se. Endvidere er markørernes baner gjort sammenhængende, så der ikke længere er 'huller' i banerne.

Efterfølgende kan det optagede scenario eller dele deraf eksporteres til en tabulatorsepareret 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 virkeligheden, er ikke at finde i deres dokumentation [QTM]. Desuden fungerer tekstfilerne som input til den software, som analyserer spillernes bevægelser. Mere herom i afsnit A.3.

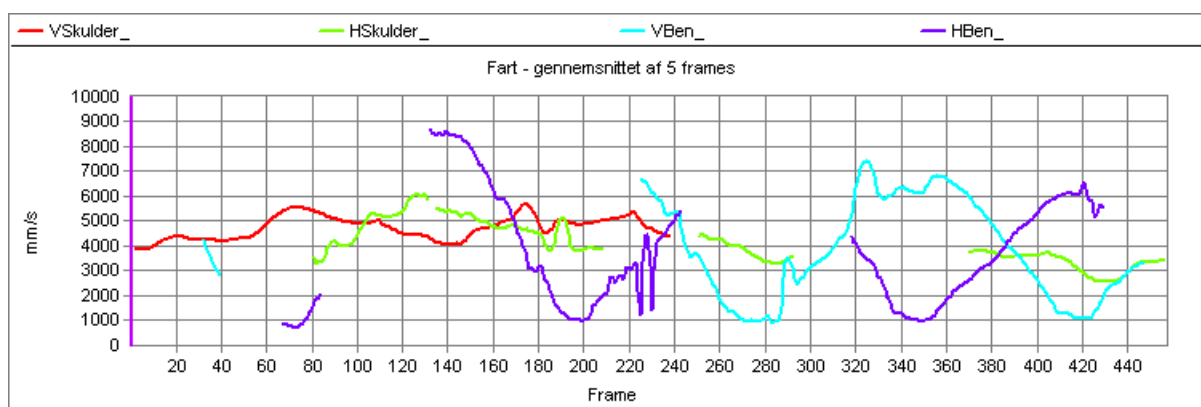
Udover at kortlægge elitespilleres bevægelser har formålet med optagelserne været at generere testdata til brug i test af de udviklede algoritmer. Systemet fra Qualisys giver nemlig mulighed for at eksportere 3D-optagelserne til rå tekstfiler, som en modificeret udgave af ScenarioSender kan sende ud 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. Samtidig giver det mulighed for automatisk at verificere det samlede systems afgørelser, men mere herom i kapitel 7.

A.3.1. Dataudglatning

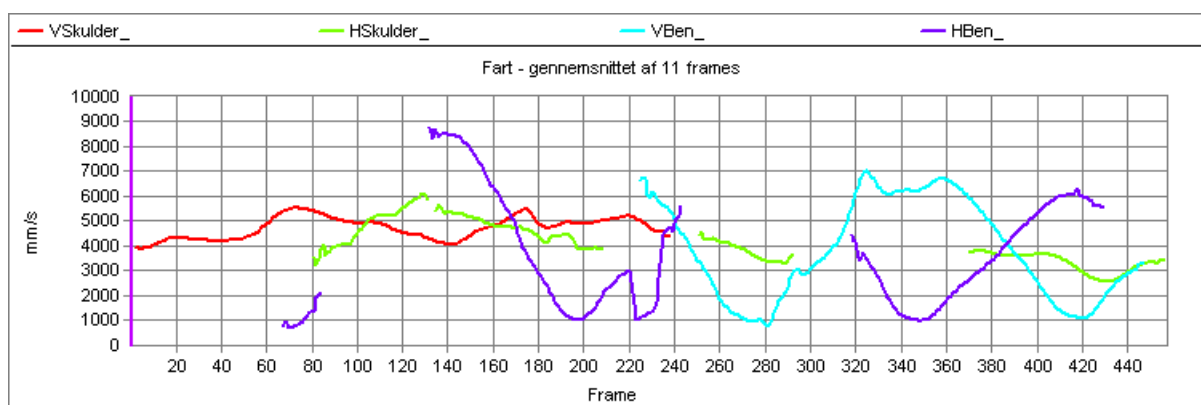
Figur 56 viser farten for fire forskellige punkter på en fodboldspiller gennem en spilsituation optaget med systemet fra Qualisys som beskrevet i appendiks A.3. Som det ses er kurverne meget kantede, hvilket skyldes støj samt den korte samplingsfrekvens. Det virker ikke sandsynligt, at benet på et menneske ændrer fart så mange gange i løbet af et skridt som eksempelvis den lille kurve (spillerens højre ben) i figuren antyder.

**Figur 56 – Fart.**

Ved at beregne farten som et gennemsnit af farten i de foregående og efterfølgende frames opnås glattere kurver. Figur 57 viser kurverne, når farten i de to foregående og de to efterfølgende frames tages med i udregningen af farten.

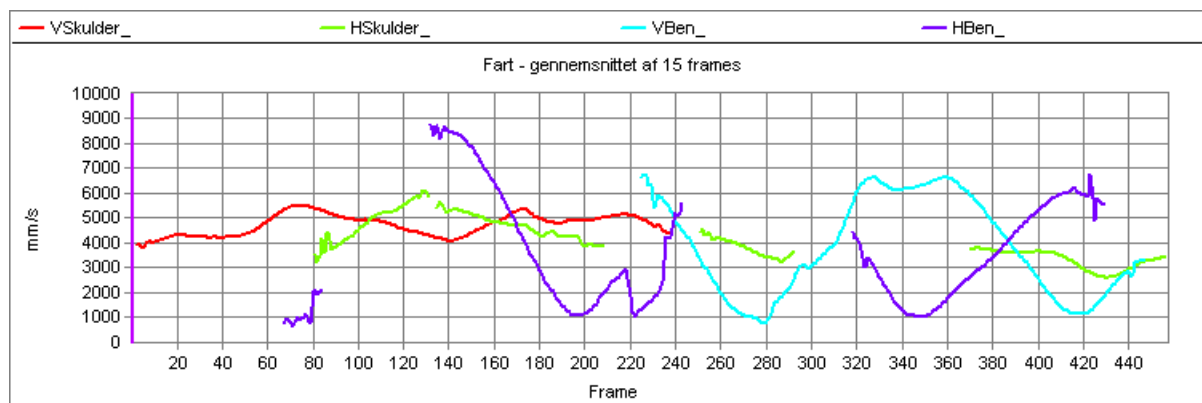
**Figur 57 – Fart som gennemsnit af 5 frames.**

I Figur 57 er der stadig en del kanter på fartkurverne, men i Figur 58 er disse glattet mere ud ved at benytte flere historiske data. Farten beregnet ud fra farten i 11 frames – altså med de fem foregående og de fem efterfølgende som en del af beregningen – giver de glatteste kurver.

**Figur 58 – Fart som gennemsnit af 11 frames.**

Benyttes der flere end 11 frames begynder kurverne igen at se kantede ud, som illustreret i Figur 59, og det bliver værre, jo flere frames der benyttes. Dette skyldes, at udglat-

ningen kommer til at dække over flere fartændringer. Især i enderne af kurvestykkerne kommer der nu ganske meget støj sammenlignet med en glat kurve.



Figur 59 – Fart som gennemsnit af 15 frames.

Desuden har udglatning over et større antal frames den bivirkning, at små stykker kurve forsvinder, som det er tilfældet med den del af den lyseblå kurve, der er længst til venstre i Figur 56.

Qualisys Track Manager [QTM] har et værktøj til at fylde hullerne i banerne ud, så de kommer til at fremstå som sammenhængende. Da fartkurverne bruges til bevægelsesanalyse er det væsentligt at kun reelle data analyseres. I de reelle data findes der huller i banerne, så for at have så mange data som muligt at analysere ud fra, skal der ikke smides alt for mange små stykker data ud.

A.4. Analysesoftware

Noget software, jeg selv har skrevet.

Parser.

Fart, retning og acceleration i punkter i forhold til mennesker. KoordinatBeregner, MenneskeBeregner.

```
Retning:   retningCos = Math.acos(distanceX/distanceXY);    //distanceXY: Pythag.
           retningSin = Math.asin(distanceY/distanceXY);
           if(retningSin<0.0)
               retningCos = Math.PI*2-retningCos;
```

Afstand mellem fødder og skuldre – se afsnit A.4.1 i appendiks.

Fart?

Acceleration?

Udglatning 11 samt støj. 11 svarer til 10.

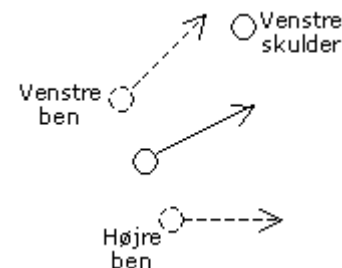
Hvordan gemmes og præsenteres data?

A.4.1. Afstandsberegning

I afsnit 4.3.1 undersøges det, hvor langt skuldrene er foran fødderne i forhold til (x, y)-løberetningen ved almindeligt løb. Afstandsberegningen er forholdsvis kompliceret og forklares i dette afsnit med udgangspunkt i Figur 60, 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.

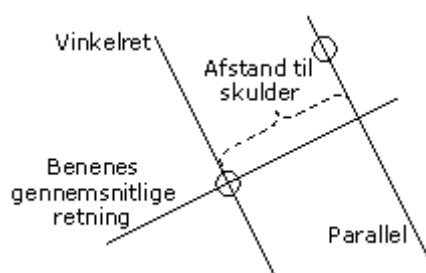
Beregningen forløber efter følgende algoritme:

- 1: Beregn benenes gennemsnitlige placering. Den fuldt optrukne cirkel med pilen i Figur 60 viser placeringen.
- 2: Beregn kroppens retning. I afsnit 4.3.1 beskrives to metoder at gøre dette på. Eksemplet tager udgangspunkt i den første metode, hvor benenes gennemsnitlige retning bruges som indikation på kroppens retning. I Figur 60 vises denne retning med den fuldt optrukne pil.



Figur 60 – Føddernes placering og retning samt skulderens placering.

- 3: Find den retning, der står vinkelret på føddernes gennemsnitlige retning. I Figur 61 er denne retning tegnet, så det går igennem benenes gennemsnitlige placering. Benenes gennemsnitlige retning er i forhold til Figur 60 tegnet som en linje, der går igennem benenes gennemsnitlige placering.



Figur 61 – 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 61 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 61 kaldet *Vinkelret*).

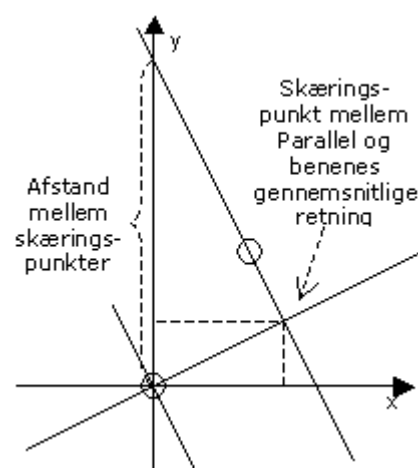
- 6: På samme måde bestemmes skæringspunktet med y-aksen

for den linje parallelt med det vinkelrette, som går igennem skulderens placering (i Figur 61 kaldet *Parallel*).

- 7: Afstanden mellem de to skæringspunkter (se Figur 62) bruges til at finde skæringspunktet mellem *Parallel* fra Figur 61 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 61) 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 62 – Skæringspunktet mellem løberetningen og skulderen bruges til at finde afstanden.

A.5. ScenarioGenerator

ScenarioGenerator er udviklet med det formål at sammensætte bidder fra Qualisys-optagelser til samlede scenarier, som ODA kan testes med.

Qualisys-filer kan eksporteres til tabulator-separerede tekstfiler af typen .tsv som den herunder, der beskriver en bolds bevægelser. 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. Herunder vises altså en bolds bane:

```
-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
...
```

ScenarioGenerator forudsætter, at hver enkelt person samt bolden i Qualisys-optagelser eksporteres til sin egen fil som den ovenfor. Herefter kan man definere en scenariofil som den, der ses uddrag fra herunder:

```
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
...
```

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.

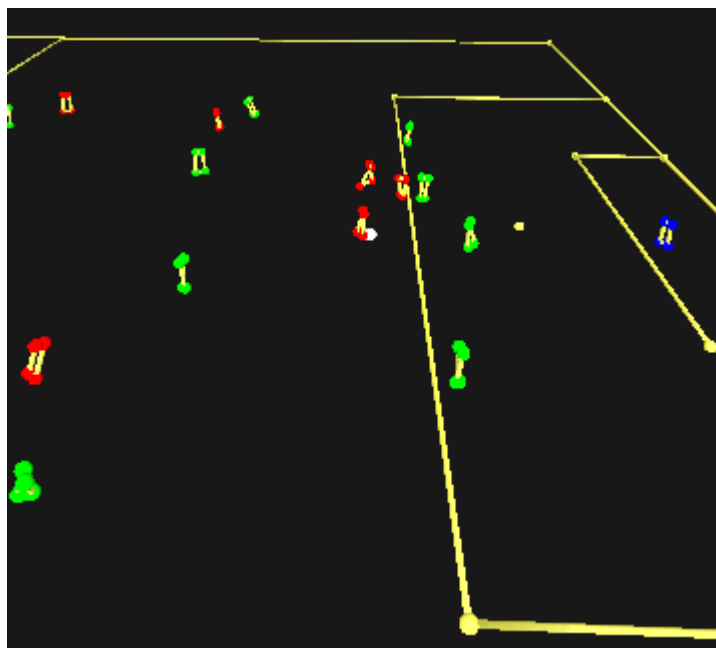
For hver spiller og bold på banen defineres de filer, objekternes bevægelser skal sammensættes af, i en tekstfil som den ovenfor. ScenarioGenerator læser denne fil, sætter bevægelserne sammen til et enkelt scenario, og eksporterer dette scenario til to forskellige formater.

Det ene format er .sce, som ScenarioSender forventer, når den skal afspille et scenario. Nedenunder vises resultatet af en eksport, hvor boldens ID efterfølges af koordinatet 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.

```

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 8002 3899 5
Ball1 8003 3898 5
Ball1 8003 3898 5
...
```

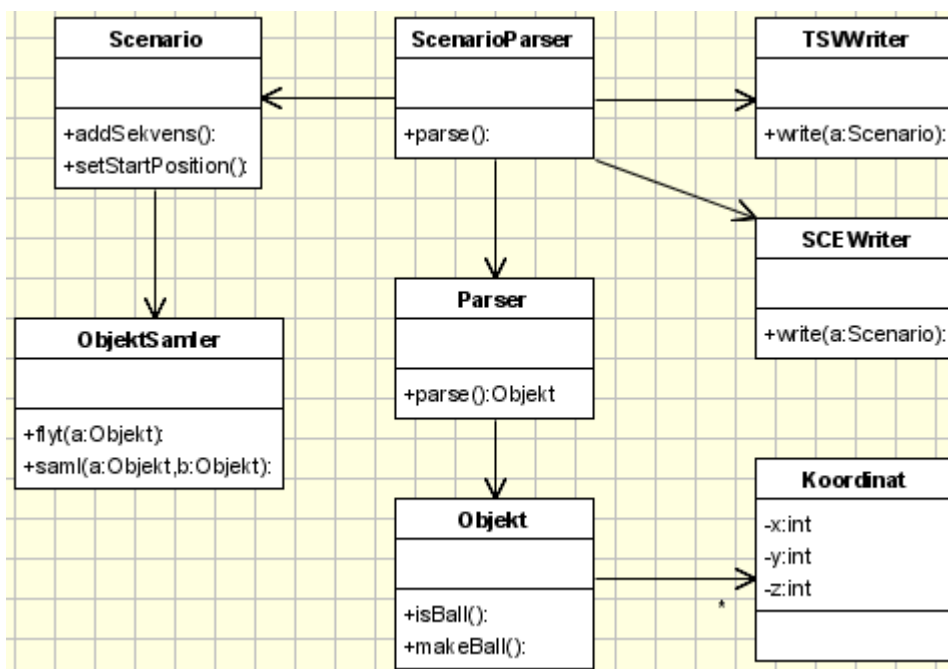
Udover .sce oversættes scenariet også til .tsv, som altså kan vises af Qualisys Track Manager. Der angives positioner for bolden samt for ben og skuldre for hver enkelt spiller. Ved at indsætte ekstra markører i hjørnerne af banen og ved straffesparksfelter og lignende og forbinde dem med 'knogler' kan scenarierne afspilles, så de ligner virkeligheden. Et eksempel på dette ses i Figur 63. Alle markører for samme tidspunkt indsættes på samme linje, da Qualisys Track Manager opfatter en linje tekst som én frame.



Figur 63 – Øjebliksbillede fra scenario afspillet i Qualisys Track Manager.

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.

ScenarioGenerator er opbygget som vist i Figur 64. Programforløbet styres af Scenario-Parser, 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(). Arrayet 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 64 – Klassediagram for ScenarioGenerator.

A.6. 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

```

A.7. 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-skala 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 websrv.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)" "\$(RTTBuild eller OutDir?)\PC386_disk_mon.cfg"

Tabel 6 – Project Properties i Microsoft Visual Studio .Net 2003

A.8. Litteratur

A.8.1. [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 (tlf. 25 14 33 03) 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 offidesituationer. For kunne bedømme offidesituationer skal man helst se situationen ud for næstsidste forsvarsspiller, og et kamera ud for midten af banehalvdel 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 offidesammenhæng, da man som regel ikke kan se bolden og spillerne omkring offsidegrænsen samtidig.

A.8.2. [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 nagelfast 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 off-side-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 niveauer 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.

A.8.3. [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.

[...]

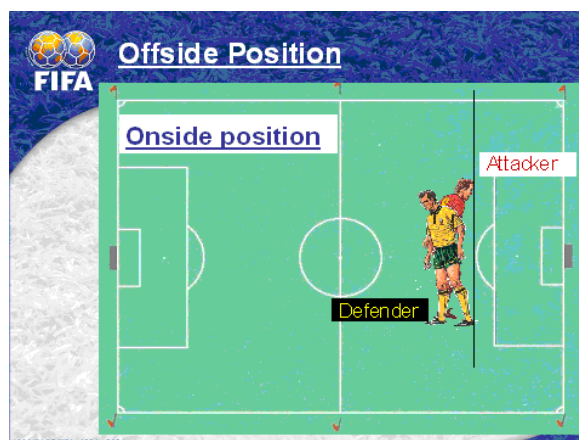
I selve offside-reglen er der nu kommet en entydig definition på begrebet 'nærmere modspillernes mållinje end både bolden og næstsidste modspiller'. Også her har man forsøgt sig på forskellig vis rundt omkring i verden – i Danmark med udlægningen af, at 'den overvejende del af kroppen' skulle være nærmere, 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.

[...]





A.8.4. [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...

B. Litteratur

[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>

[Adam]

David Adam, *Football hazy*, Nature, marts 2000
http://www.nature.com/news/2000/000302/pf/000302-10_pf.html

[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 A.8.1. Tlf. 25 14 33 03

[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 præcisering af offsidereglen*. Findes i appendiks A.8.2

[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 A.8.3

[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 A.8.4

[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 and 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>

[Fodboldloven]

Fodboldloven, 56. udgave, 2005/2006, Dansk Boldspil Union
<http://www.dbu.dk/data/dbu/filedb/1855.pdf>

[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

[Grand98] – Filter pattern

Mark Grand, *Patterns in Java – A Catalog of Reusable Design Patterns Illustrated with UML*, John Wiley & Sons, 1998

[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

[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>

[Larsen & Hansen]

Gert Vestergaard Larsen og 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

[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>
<http://bmj.bmjournals.com/cgi/eletters/329/7480/1470#92782> **(FJERNES IGEN)**

[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

[Michalewicz & Fogel]

Zbigniew Michalewicz, David B. Fogel, *How to Solve It: Modern Heuristics*, 2nd edition, Springer-Verlag, 2000, ISBN 3-540-22494-7

[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>

[POSA1] – Pipes and filters

F. Buschmann, R. Meunier, H. Hohnert, P. Sommerlad, M. Stal, *Pattern-Oriented Software Architecture – A Pattern System*, Addison-Wesley, 1996

[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>

[Stallings]

William Stallings, *Operating Systems – Internals and Design Principles*, 3rd edition, Prentice-Hall, 1998, ISBN 0-13-887407-7

[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

[Wesson]

John Wesson, *The Science of Soccer*, Institute of Physics Publishing, 2002, ISBN 0-7503-0813-3

[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>