

# Computerbaseret offsidetektering i fodbold – optimering af et dommerstøttesystem

<b>1. Indledning</b>	<b>3</b>
1.1. Problemformulering	6
1.2. Metode	6
1.3. Læsevejledning	8
1.3.1. Forudsætninger	9
<b>2. Offsidereglen</b>	<b>10</b>
2.1. Fodboldlovens § 11	10
2.1.1. Eksempel	11
2.2. Præcisering af § 11	11
2.2.1. Nærmere	11
2.2.2. Bolden røres	13
<b>3. Undersøgelse</b>	<b>14</b>
3.1. Systemkrav	14
3.1.1. Korrekthed	14
3.1.2. Realtidskrav	14
3.1.3. Afgivelse af offsidemarkeringer	15
3.1.4. Positioneringsdata	16
3.1.5. Afleveringsdetektering	16
3.1.6. Identifikation af afleverende spiller	17
3.1.7. Spillere på offsidegrænsen	17
3.1.8. Delkonklusion	18
3.2. Cairos	18
3.2.1. Teknik	19
3.2.2. Services	21
3.3. Bevægelsesanalyse	21
3.3.1. Qualisys	24
3.3.2. Analysesoftware	28
3.3.3. Almindeligt løb	29
3.3.4. Retningsskift	33
3.3.5. Acceleration	33
3.3.6. Nærkamp	33
3.3.7. Hovedstødsduel	34
3.3.8. Specialtilfælde	35
3.3.9. Boldens bevægelser	37
3.3.10. Delkonklusion	39
3.4. DommerStøtteSystem	39
3.4.1. Systemoversigt	40
3.4.2. Positioneringsdata	41
3.4.3. Offsidetektering	42
3.4.4. Design	43
3.4.5. Delkonklusion	44
<b>4. Algoritmer</b>	<b>46</b>
4.1. Sortering	46
4.2. Detektering af aflevering	46
4.3. Bolden ude af spil	47
4.4. Ude af banen	47
4.5. Detektering af afleverende spiller	47
4.5.1. Ud fra føddernes placering	47

4.5.2.	Ud fra omfattende data .....	47
4.6.	Bestemmelse af afleveringens retning .....	47
4.6.1.	Undersøgelse af boldens bane i forhold til fart og vinkel .....	47
4.7.	Bestemmelse af modtagende spillers position .....	48
4.7.1.	Ud fra føddernes placering .....	48
4.7.2.	Ud fra overkroppens placering .....	48
4.8.	Detektering af offside .....	46
<b>5.</b>	<b>Prototyper .....</b>	<b>49</b>
5.1.	ScenarioGenerator .....	49
5.2.	ScenarioSender .....	49
5.3.	DommerStøtteSystem .....	49
5.4.	Visualizer .....	49
<b>6.</b>	<b>Test .....</b>	<b>50</b>
6.1.	Scenario 1 .....	50
6.2.	Scenario N .....	50
6.3.	Testresultater .....	50
6.4.	Realtidskrav .....	50
<b>7.</b>	<b>Fremtidigt arbejde .....</b>	<b>51</b>
<b>8.</b>	<b>Konklusion .....</b>	<b>52</b>
<b>9.</b>	<b>Appendiks .....</b>	<b>54</b>
9.1.	Dataudglatning .....	54
9.2.	Afstandsberregning .....	55
9.3.	Testopstilling .....	56
9.4.	Brugsvejledning .....	57
9.5.	[Carlsen] .....	58
9.6.	[Carlsen2] .....	60
<b>10.</b>	<b>Litteratur .....</b>	<b>62</b>

## 1. Indledning

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 offside-situationer, og da offside-situationer 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.

Med den generelt dårlige økonomi i fodboldbranchen og de mange indtægter fra især tv-retteligheder 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.

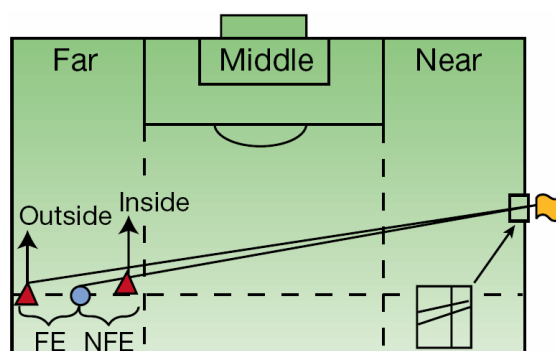
Også de retfærdighedssøgende har interesse i, at det hele går korrekt til. Fair play er et stort tema hos verdensfodboldforbundet FIFA, og bestemt også hos den klub, der går glip af store indtægter på grund af et mål scoret af modstanderne efter en offside, der ikke blev dømt, eller fordi de mangler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

Offsidedereglen 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.

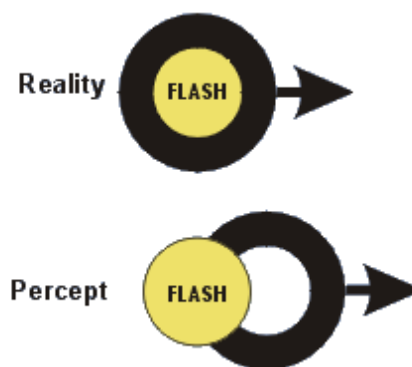
### Linjedommerne tager fejl

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 1.1 dømmes den røde 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 1.1 – 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.].**

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 1.2. 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.



**Figur 1.2 – 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].**

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 øjne<sup>1</sup>. Figur 1.3 og Figur 1.4 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.



**Figur 1.3 – Øjeblikket før afleveringen. Angriberen er på den rigtige side. Kilde: [Maruenda].**



**Figur 1.4 – 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

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

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 banelængde og står på hver deres sidelinje.

### **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 [FIFA].

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 linjedommerens 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 offside-detektering**

Det er således et særdeles relevant emne, Gert Vestergaard Larsen og Søren Thestrup Hansen tog op i deres speciale "Computerbaseret offside-detektering i fodbold - En undersøgelse af realtidskrav og definering af algoritmer" udarbejdet på Ingeniørhøjskolen i Århus i 2004 [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. Dette system benytter sig af radiosendere i spillernes benskinner og i bolden, og det betyder, at spillernes placering skal findes ud fra disse data. Da specialet blev afleveret, var det overkroppen der skulle ses på, når det skulle afgøres, om en spiller var nærmere mållinjen end en anden. Dette kan ikke direkte udledes af føddernes placering, men [Larsen & Hansen] baserer alligevel deres prototype på, at spillerne kan defineres som ét punkt.

I dette speciale 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. Der vil blive foreslået og implementeret løsninger på fundne problemer med systemet, ligesom der vil blive arbejdet videre indenfor de forslag til fremtidigt arbejde, der blev foreslået i [Larsen & Hansen, s. 76]. Det væsentligste forslag er en videreudvikling af afleveringsdetekteringen, så afleveringer, hvor bolden ikke tilføres fart, også kan opdages. Desuden konkluderes det, at deres system forudsætter en mindre regelændring for at kunne lave helt nøjagtige kendelser, fordi spiller skal kunne repræsenteres som et enkelt punkt [Larsen & Hansen, s. 78].

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 tidsgrænsen. Det vil stadig være op til linjedommeren at vurdere den aktive-passive del af offside-reglen. 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.

## 1.1. Problemformulering

Formålet med specialet kan formuleres med følgende hovedspørgsmål:

Kan en eksisterende prototype på et dommerstøttesystem til offside-detektering optimeres til at blive tilstrækkeligt pålidelig til brug i fodbold på topplan? Optimeringerne skal overholde realtidskravet på maksimum 1 sekund fra bolden bliver afleveret til annonceringen modtages af linjedommeren.

Til hovedspørgsmålet knytter der sig disse underspørgsmål:

- Cairos' positioneringssystem kan give oplysninger om føddernes placering på banen, men det er 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 retnings skift kan også ske, når bolden eksempelvis rammer en knold på banen eller bliver grebet af vinden. Kun reelle afleveringer må give anledning til offsidekendelser.
- Kan spillernes positioner med positioneringssystemet fra Cairos præciseres tilstrækkeligt til at identificere den afleverende spiller? Det er afgørende for vurderingen af en offside-situation, om afleveringen kommer fra en spiller fra det ene eller det andet hold.
- Hvordan kan det kommunikeres ud til linjedommeren, hvor mange og hvilke spillere, der står i offsideposition på afleveringstidspunktet? Kommunikation skal være sikker, så signaler ikke kan aflyttes, manipuleres eller ødelægges.

Det antages i øvrigt gennem specialet, at positioneringssystemet tager hånd om alle sikkerhedsmæssige aspekter i positioneringen af spillerne. Positioneringssystemet stiller de nødvendige data til rådighed, og dataene stemmer overens med virkeligheden.

## 1.2. Metode

Der arbejdes videre ud fra de prototyper der er udviklet i specialet "Computerbaseret offside-detektering 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 3.4.

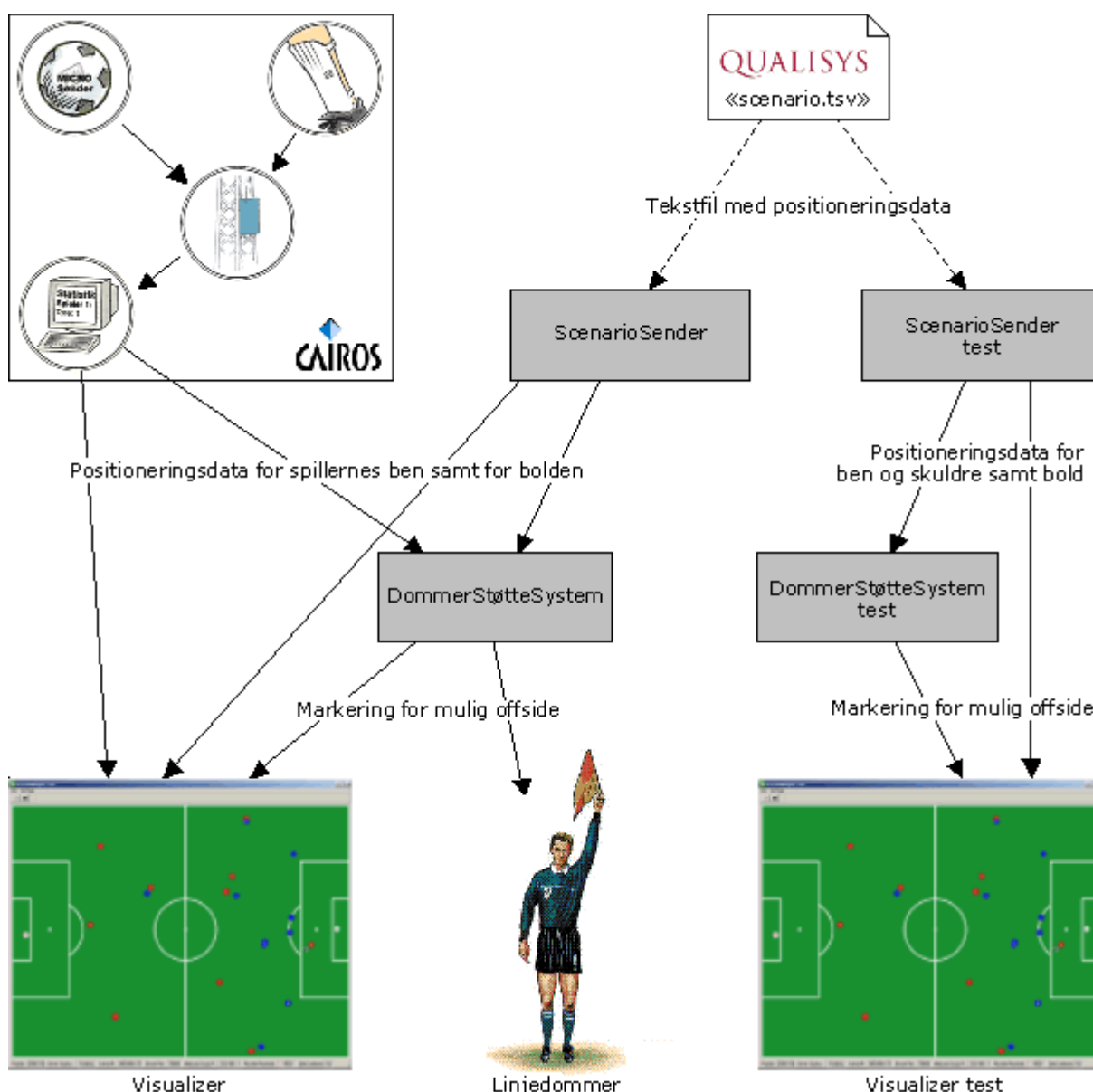
Til forskel fra [Larsen & Hansen] er der i dette speciale adgang til positioneringsdata skabt med systemet Qualisys. Scenarier specielt designet til at repræsentere forskellige spilsituationer med relation til offside-detektering optages med infrarøde kameraer for at give 3D-data om spillere og bolds 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' skal optagelserne lægge 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 kommer de udviklede prototyper til at hænge sammen som illustreret i Figur 1.5.



**Figur 1.5 – Systemoversigt.** Dele af figuren er hentet hos [Cairos], [Qualisys], [Fodboldloven] og [Larsen & Hansen].

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 testversionen sendes alle disse data ud, så der findes oplysninger om hele kroppens placering, mens den egentlige ScenarioSender nøjes med at videregive oplysninger om spillernes 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.

DommerStøtteSystem indeholder den egentlige offside-detekteringsalgoritme og er således det system, der laver offsidekendelserne. 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 DommerStøtteSystem gør. Disse data vises på skærmen, så man kan følge boldens og spillernes bevægelser på banen. Visualizer modtager offsidekendelser fra DommerStøtteSystem og markerer, hvilket spiller der vurderes til at være i offsideposition, når bolden afleveres. Kendelserne 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 opførelse, 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 DommerStøtteSystem 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.

### 1.3. 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 5 – Prototyper

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

## Kapitel 6 – 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 7 – 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 8 – Konklusion

Her konkluderes der på arbejdet og de opnåede resultater.

### 1.3.1. *Forudsætninger*

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

Med hensyn til den computermæssige side af sagen forudsættes en generel viden om softwareudvikling, programmering, systemarkitektur og deslige.

## 2. Offsidereglene

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, og diverse uklarheder i reglens formulering søges præciseret. Disse præciseringer eller fortolkninger lægger til grund for de udviklede algoritmer, og derfor frarådes det at springe kapitlet over, selvom man som læser føler sig godt bekendt med reglene.

I [Larsen & Hansen] foretages der valg vedrørende fortolkning af afleveringsøjeblik og det at være nærmere mållinjen end næstsidste modspiller. Disse valg vil blive diskuteret i dette kapitel sammenholdt med de nævnte præciseringer, som Jan Carlsen fra lovgruppen under Dansk Boldspil Unions dommerudvalg har været så venlig at bidrage med (se [Carlsen] og [Carlsen2]).

### 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 i sin fulde længde 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

#### Fortolkning

[Fodboldloven, s. 45] forklarer mere detaljeret, hvordan formuleringerne om at være aktivt offside skal fortolkes. *Indvirke på spillet* betyder at røre bolden, *genere en modspiller* kan eksempelvis være, hvis man dækker for målmandens udsyn, og *opnå en fordel af sin offsideposition* betyder, at han hvis bolden bliver reddet af målmanden eller rammer stolpen kan opnå en god mulighed ved at have været i offsideposition, da der blev afsluttet. Denne fortolkning er forholdsvis ny, idet den blev præciseret i den danske version af fodboldloven med virkning fra sommeren 2004.

#### Ikke-strafbar offside

Der foreligger ingen offsideforseelse, hvis spilleren modtager bolden direkte fra

- målspark, eller
- indkast, eller
- hjørnespark

### 2.1.1. Eksempel

Figur 2.1 viser en spilsituation, der kan bruges til at forklare offsidedereglen med.

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

Bemærk, at hvis bolden spilles til rød nummer 11, foreligger der herefter en ny spilsituation. Er rød nummer 9 i mellemtiden kommet ud af sin offsideposition, når rød nummer 11 spiller bolden videre, 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 2.1 – Spilsituation hvor der kan opstå offside.

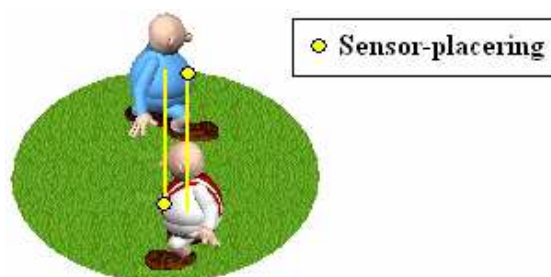
## 2.2. Præcisering af § 11

Formuleringerne vedrørende offside er mange steder vage og kræver yderligere præcisering for at kunne indgå i et computerbaseret system. Det drejer sig om, hvad det vil sige at være nærmere modspillernes mållinje samt hvornår bolden betragtes som værende rørt.

### 2.2.1. Nærmere

For at være i offsideposition skal angriberen befinde sig tættere på modstandernes mållinje end næstsidste forsvarsspiller. Algoritmen udviklet i [Larsen & Hansen] tager udgangspunkt i, at spillerne positioneres som et enkelt punkt på banen. Et punkt har ikke noget omfang, så i dette tilfælde 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 2.2 viser en situation, hvor spillernes orientering vil føre til en fejlkendelse.



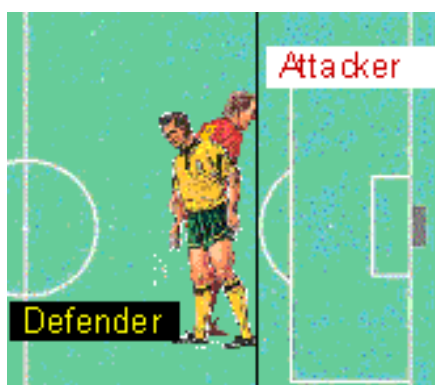
**Figur 2.2 – På grund af sensorernes placering vurderes den nederste spiller fejlagtigt til at være længere mod venstre end den øverste. Kilde: [Larsen & Hansen, s. 26].**

En spillers placering kan altså ikke direkte udledes ud fra en enkelt sender placeret på eksempelvis hans brystkasse, fordi hans krop har et vist omfang.

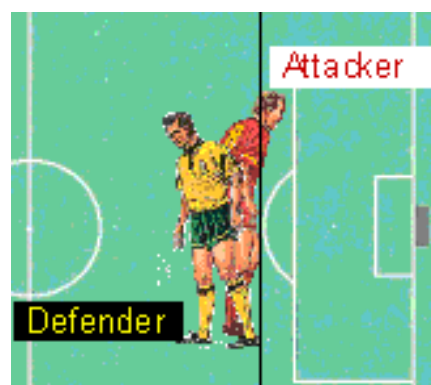
Indtil for nylig har det været op til de nationale fodboldforbund at definere deres egen version af 'nærmere', men i den seneste udgave af fodboldloven har FIFA vedtaget en fortolkning, som fremover skal benyttes over hele verden. [Carlsen2] forklarer den officielle fortolkning således:

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.

Figur 2.3 og Figur 2.4 forklarer bedre end ovenstående forklaring, hvad det vil sige at være nærmere modstandernes mållinje end en forsvarsspiller. Det er altså det punkt på spillerens krop (bortset fra armene) der er nærmest mållinjen, en eventuel offsideposition vurderes ud fra.



**Figur 2.3 – Angriberen (den røde spiller) er ikke i offsideposition [Kilde: Carlsen2].**



**Figur 2.4 – Angriberen er i offsideposition [Kilde: Carlsen2].**

Dette speciale tager sit udgangspunkt i positioneringssystemet fra Cairos, fordi det af [Larsen & Hansen, s. 21] blev vurderet som det mest anvendelige, hvilket især hænger sammen med præcisionen af positioneringen. I Cairos' system (undersøges nærmere i afsnit 3.1) skal spillerne bære en sender i hver benskinne, og det er således føddernes placering, spillernes positioner skal findes ud fra.

Dermed rejstes spørgsmålet, hvor kroppen befinder sig i forhold til fødderne under en fodboldkamp. En spiller gennemfører en stor mængde accelerationer, decelerationer, retnings skift og hop i løbet af en kamp, og ved hvert af disse bevægelsesmønstre kan

resten af kroppen antage forskellige positurer, hvorfor kroppen vil være forskellige steder i forhold til fødderne. I afsnit 3.3 vil det blive undersøgt, om det er muligt ud fra positioneringsdata for de to fødder at bestemme placeringen af resten af kroppen.

### 2.2.2. *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 angrebsspiller 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.

I [Larsen & Hansen, s. 27] vælges det at bestemme afleveringsøjeblikket som det tidspunkt, hvor spillerens støvle 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.

[Larsen & Hansen, s. 67] benytter fakta om tidsrummet med boldkontakt til at opdage afleveringer. Når bolden accelererer med mindst  $950 \text{ m/s}^2$ , svarende til en hastighedsændring på  $10 \text{ m/s}$  over  $10$  millisekunder, tolkes det som en aflevering. Afleveringen opdages 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.

DBU's opfattelse af afleveringstidspunktet stemmer ikke overens med den i [Larsen & Hansen, s. 27]. [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).

Denne formulering medfører visse komplikationer i forhold til den fra [Larsen & Hansen, s. 27]. I det øjeblik, hvor bolden og foden ikke længere har kontakt, er det nemlig let at detektere en aflevering. Når afleveringen er detekteret, gælder det blot om at undersøge spillernes placering for at finde ud af, om en medspiller til den afleverende befinder sig i en offsideposition.

Når afleveringstidspunktet defineres som det øjeblik, hvor der opstår kontakt, kan en aflevering ikke umiddelbart detekteres. Der vil gå nogle millisekunder inden det bliver opdaget, at bolden har ændret retning eller fart, og dermed er det nødvendigt at have historiske data for spillernes placeringer. Efter detektering af en aflevering skal der nemlig bestemmes et tidspunkt, hvor kontakten med bolden opstod (dvs. en hundrededel af et sekund tidligere), og det er spillernes placeringer på dette tidspunkt, offside-situationen skal vurderes ud fra.

### 3. *Undersøgelse*

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

Først vil kravene til computerbaseret offsidetekteringsystem blive diskuteret. For at et sådant system vil kunne bruges i topfodbold, skal det leve op til en række krav til korrekthed, realtidsafvikling og præcision i både positioneringssystem og systemets kendelser.

Positioneringssystemet fra Cairos kan levere data om positionerne på spillernes fødder og på bolden. Hvordan systemet fungerer, undersøges i kapitlets andet afsnit, som samtidig vil kunne give læseren en god fornemmelse af, hvilke krav der stilles til et positioneringssystem.

Som det foregående kapitel viste, er det hele kroppens placering bortset fra armene, der afgør en eventuel offsideposition. Derfor skal det undersøges, hvorvidt det er muligt at udlede resten af kroppens placering ud fra føddernes placering, fart, retning og så videre.

Dette speciale bygger videre på spillet fra [Larsen & Hansen] samt deres prototype DommerStøtteSystem og tilhørende delsystemer. Hele systemet inklusive kildekode er stillet til rådighed for videreudvikling, så det vil være oplagt at gøre brug af dette frem for at starte fra bunden. Derfor skal det undersøges, hvordan systemet er bygget op og fungerer.

#### 3.1. Systemkrav

Overordnet set skal et computersystem til at støtte linjedommeren – og dermed indirekte dommeren – i sine offsidekendelser kunne afgive korrekte kendelser kort tid efter at situationen er opstået.

##### 3.1.1. *Korrekthed*

Med linjedommernes 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]. Hvis linjedommeren ikke stoler på systemet kendelser, vil han vælge at ignorere dem og dømme, som han altid har gjort.

Hundrede procent korrekte kan kendelserne nok ikke blive, men et tilstrækkeligt kriterium for korrekthed er, at systemets kendelser ikke kan falsificeres af tv-optagelser. Hvis man som tv-seer kan sidde hjemme i stuen og se at systemet tager fejl, vil det være spild af penge at købe et sådant system. Hvis der til gengæld ikke kan sættes spørgsmålstegn ved kendelserne selv ud fra tv-billeder, vil der ikke være nogen som helst måder at falsificere systemet på.

Det skal nævnes at tv-billeder bliver optaget med en højere frekvens end de 25 Hz [Larsen & Hansen, s. 15], der sendes ud i tv-stuerne. Når situationerne vises i slowmotion vil spillerne altså ikke kunne nå at flytte sig 44 cm [Larsen & Hansen, s. 36] mellem to på hinanden følgende billeder, så det er en lidt højere standard, der skal måles ud fra. Ofte er det dog svært selv på slowmotion-billeder at fastslå det nøjagtige afleveringstidspunkt, så det er 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 offsidepositioner hjemme foran tv'et.

##### 3.1.2. *Realtidskrav*

[Larsen & Hansen, s. 32] definerer situationen til at opstå, når bolden afleveres (eller røres, som det retteligt hedder). Indenfor 1 sekund efter denne hændelse skal

linjedommeren have besked, om der på afleveringstidspunktet var spillere i offsideposition.

Oftest er det først når en angriber 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 besked 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].

Tidskravet på 1 sekund kan derimod virke højt sat, når der kigges på frekvensen af aflevering i en fodboldkamp. I perioder med mange korte afleveringer i træk kan man sagtens komme ud for, at der går mindre end et sekund mellem afleveringerne. Hvis der går et sekund inden linjedommeren får besked om en mulig strafbar offside og der i mellemtiden er lavet en ny aflevering, vil han sikkert tro, at beskeden gjaldt den nye aflevering. Spillerne kan som nævnt i indledningen nå at flytte sig et godt stykke på den korte tid imellem afleveringerne, og med tanke på, at [Larsen & Hansen, s. 75] kunne foretage de nødvendige beregninger på under et millisekund, er der ingen grund til at kravet ikke skulle være langt mindre.

Spanske FC Barcelona har ry for at være det hurtigst spillende fodboldhold i verden, så ved at betragte en af deres kampe og holde øje med sekvenserne med de hurtigste afleveringer, kan en mere brugbar tidsgrænse fastslås. **Når det går allerhurtigst, kan der forekomme tre afleveringer indenfor et sekund**, altså med et halvt sekunds mellemrum. Derfor vil det være mere fornuftigt at fastsætte tidskravet til det halve, 250 ms. Dermed kan linjedommeren nå at opfatte beskeden inden den næste aflevering foretages.

### 3.1.3. Afgivelse af offsidemarkeringer

Kommunikationen til linjedommeren er et problem i sig selv, og vil kun blive behandlet sparsomt i dette speciale. En løsning kunne være at udstyre linjedommeren 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 et halvt sekund senere. Alternativt kunne man nøjes med at læse antallet af spillere op under den antagelse, at linjedommeren står så godt placeret, at han kan regne ud hvilke spillere, det drejer sig om.

Ved eksempelvis tæmninger og nærkampe kan bolden blive rørt med intervaller langt kortere end et halvt sekund. Her er det umuligt for linjedommeren at opfatte en besked ved hver berøring, så nogle af berøringerne bliver nødt til at blive filtreret fra. Boldens fart og retning kan indikere om den har nogen som helst chance for at nå frem til en angriber i offsideposition, og har den ikke det, bør linjedommeren ikke informeres, selvom enhver boldberøring lovmæssigt set tæller som en aflevering. Denne praktiske fortolkning af offsidereglen må selvfølgelig ikke bevirke, at reelle offsidesituationer overses.

For øjeblikket har linjedommere 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 dommerstøttesystem til linjedommer, hvis løsningen med øresneglen

var for dyr eller generende. Også her skal der dog tages højde for, at beskeden skal kunne opfanges inden et halvt sekund, når der skal tages stilling til næste aflevering.

Med hensyn til antallet af offsidemarkeringer må det kræves, 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 besked om 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 tilkendegivelser 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. Der er dog kun én linjedommer ad gangen, der vil have glæde af at modtage besked om en mulig strafbar offside, nemlig ham som skal dække den banehalvdel, hvor det boldbesiddende holds spillere kan risikere at stå i offsideposition.

### 3.1.4. *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 3.4.3 er det endda nødvendigt med 3-dimensionel positionering for at kunne detektere situationer, hvor bolden kun røres svagt og ikke ændrer retning i (x, y)-planet. Et positioneringssystem skal være så nøjagtigt, at afleveringer kan detekteres, at den afleverende spiller kan bestemmes samt at spillere på grænsen af at være i offsideposition positioneres rigtigt. Samtidig må spillerne ikke generes af udstyret, så deres præstationer på banen hæmmes.

Positioneringssystemet fra Cairos (beskrives i afsnit 3.2) leverer positioneringsdata om spillernes ben med en nøjagtighed på +/- 1,5 cm [Cairos] og er p.t. det eneste anvendelige system. Til gengæld lever det op til kravene om i realtid at kunne levere 3D-positioneringsdata med den nøjagtighed og frekvens der kræves for at kendelserne ikke kan bestrides foran tv-apparaterne hjemme i stuerne.

Der stilles selvfølgelig krav om sikkerhed til et positioneringssystem, men i dette speciale antages, at positioneringssystemet (eksempelvis det fra Cairos) kan levere data som er nøjagtige og svarer til virkeligheden.

Udover sikkerhed kræves det også af et positioneringssystem, at eventuelle ID-tags radiosendere eller lignende ikke går i stykker eller løber tør for batteri i løbet af kampen. Hvis man risikerer at miste oplysninger om en spiller eller bolden undervejs, vil man ikke kunne stole på systemets kendelser.

### 3.1.5. *Afleveringsdetektering*

Detektering af afleveringer er startsignalet for de udregninger, der skal ende ud med at afgøre eventuelle strafbare offsitesituationer. Derfor er det uhyre vigtigt, at alle afleveringer detekteres, og at der ikke detekteres afleveringer, hvis bolden ikke bliver rørt.

Bolden bliver påvirket af fysiske kræfter som vindstød, vindmodstand og slipstrøm, og samtidig kan den skifte retning på grund af skruning eller hvis den rammer en knold på banen eller dommeren. Det betyder altså, at bolden kan skifte retning uden at blive rørt af en spiller, hvilket vanskeliggør afleveringsdetektering.

Vindstød og deslige ændrer boldens retning over en længere distance sammenlignet med en boldberøring, hvor retningsskiftet sker pludseligt. Dermed kan mindre retningskift



ignoreres, men der skal stadig tages højde for, at en bold der kun 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. Der går en hårfin grænse imellem det at kunne detektere selv ubetydelige boldberøringer og det at sortere retnings skift 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.

Driblinger samt afleveringer, der ikke har en chance for at nå frem til en spiller i offsideposition, kan med fordel sorteres fra, så linjedommeren ikke hele tiden får offsidemarkeringer fra systemet. Dermed kan en stor del af afleveringerne ignoreres, men som forklaret i afsnit 3.1.3 er det bedre at markere en gang for meget end en gang for lidt. Forudsætningen for at kunne sortere dem fra må dog først og fremmest være, at de bliver detekteret.

Ydermere er det ikke strafbart at være i offsideposition ved målspark, indkast og hjørnespark, så disse hændelser skal også sorteres fra.

### 3.1.6. Identifikation af afleverende spiller

Oftes ses der situationer, hvor det med det menneskelige øje er svært at afgøre, hvem der har rørt bolden sidst. Situationerne opstår som regel i tacklinger tæt på mållinjen eller sidelinjen, hvor en tackling ender med at ryge ud af banen, og spillerne fra begge hold påberåber sig, at målsparket, hjørnesparket eller indkastet skal tilfalde dem. Når selv det menneskelige øje ikke kan give noget klart svar, kan det heller ikke forventes, at et computersystem kan.

I forbindelse med offside-detektering kan samme slags situationer opstå ude på banen, og derfor skulle man synes, at den afleverende spiller er vigtig at få fastslået, så det kan afgøres, hvilket holds spillere der kan risikere at være strafbart offside. Situationerne kan deles op i to kategorier alt efter, om kun den ene spiller eller begge to når at røre bolden.

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, for i virkelighedens verden vil linjedommeren sjældent kunne afgøre den afleverende spiller helt ude fra sidelinjen. Linjedommeren skal derfor alligevel 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.

Selvfølgelig vil det være at foretrække, hvis computersystemet kan identificere den afleverende spiller korrekt, men systemet vil i princippet kunne fungere uden denne funktionalitet, så længe selve afleveringen bliver detekteret. 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 derfor, at afleveringen ikke identificeres til at komme fra det forkerte hold, så reelle offside-situationer ikke ignoreres.

### 3.1.7. 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.

På grund af skæve vinkler for tv-kameraerne og 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. Positionerne på to spillere, der løber hver sin vej, vil dermed kunne afvige 20-30 cm fra virkeligheden i forhold til hinanden.

Radiosendernes placering i benene har den virkning, at usikkerheden oftest vil handle om placeringen af overkroppen. Overkroppens placering vil som oftest være foran eller imellem fødderne (analyseres nærmere i afsnit 3.3.3), når man kigger på løberetningen, så reelt er der kun usikkerhed om den af de to spillere, der løber mod målet. [Fodboldloven, s. 46] forklarer, at enhver tvivl skal komme angrebsspilleren til gode, så selvom en computer dårligt kan siges at kunne komme i tvivl, vil det være det rigtige hold, der får fordel af usikkerheden.

### 3.1.8. *Delkonklusion*

For at et computersystem i realtid skal kunne levere korrekte indikationer på situationer, som kan udvikle sig til en kendelse for strafbar offside, skal det leve op til visse krav.

Først og fremmest er det nødvendigt med et positioneringssystem, der i realtid kan levere 3D-data om både spillere og bold med en nøjagtighed på få centimeter. Fra dataene opsamles til linjedommeren skal have besked om en eventuelt strafbar offsideposition må der højst gå et kvart sekund af hensyn til frekvens af afleveringer og af hensyn til kommunikationen til linjedommeren. Positionering af spillere og bold samt kommunikation til linjedommeren er ikke emnet for dette speciale, hvor fokus er rettet på selve det at beregne sig frem til, om der kan risikere at opstå en strafbar offside.

Systemets kendelser skal være så korrekte, at de ikke kan falsificeres af slowmotion-optagelser. Det kræver, at alle boldberøringer (afleveringer) og kun boldberøringer kan kategoriseres korrekt i så godt som 100 % af tilfældene, da boldberøringer sætter offside-detekteringsalgoritmen i gang. Der accepteres kun fejl i kategoriseringen, når boldberøringen er så let, at bolden ikke ændrer bane og derfor i realiteten ikke er blevet rørt.

Med hensyn til at identificere den afleverende spiller er det en god funktion at have med i systemet, men systemet kan også fungere uden at den er helt korrekt. I tvivlstilfælde er det dommerens afgørelse, hvem der har rørt bolden sidst, fordi linjedommeren ofte ikke kan se situationen fra sin position ved sidelinjen. Her er det bedre at give en forkert indikation, som dommeren med sin bedre placering kan vælge at ignorere.

Det er mere vigtigt at have fuld kontrol over, hvor spillerne omkring offsidegrænsen befinder sig. Her kan en unøjagtighed på omkring 15 cm være acceptabelt, idet det ud fra tv-billeder ikke entydigt kan fastslås, at systemet har taget fejl.

## 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 offside-detektering.

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 med en fejlmargen på +/- 1,5 cm [Cairos] og er endvidere 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'.

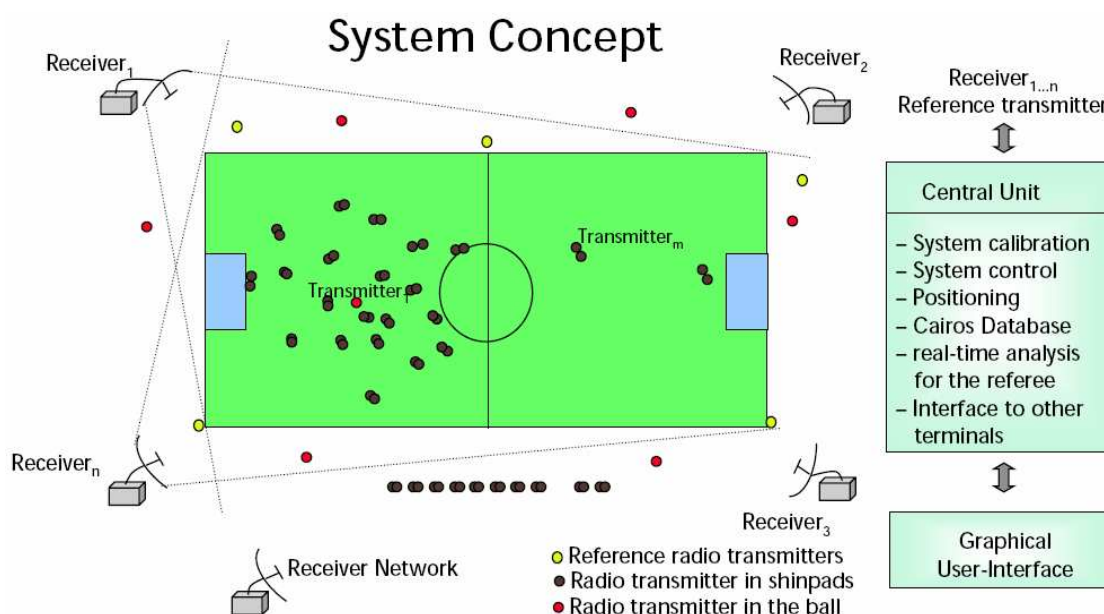
Cairos' system er ikke kun et positioneringssystem, men består også af en række applikationer [Cairos2], der gør brug af de opsamlede positioneringsdata i realtid. Dataene kan eksempelvis bruges til at levere information om spillernes fart og bevægelsesmønstre, fart og præcision i skud på mål og afleveringer, 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 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 3.1). Reference-senderne står på faste og i forvejen kendte positioner og sender deres positioner, som så kan bruges til automatisk, løbende kalibrering af det samlede positioneringssystem.



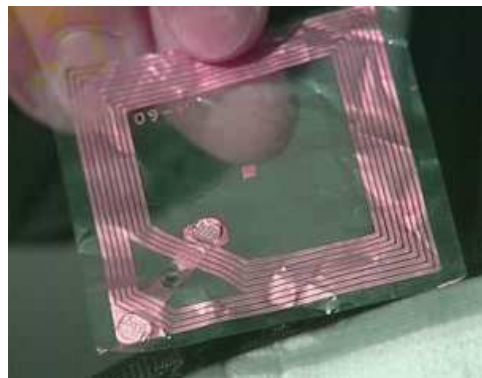
**Figur 3.1 – Systemoversigt for Cairos. Kilde: [Cairos].**

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.

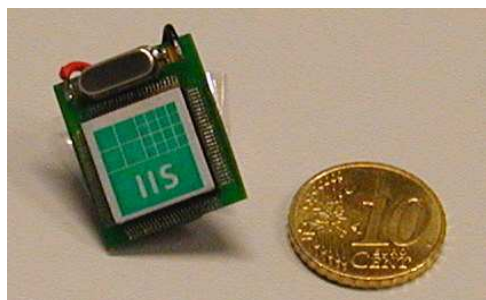
Hver spiller bærer to radiosendere som den i Figur 3.2 – en i hver benskinne. Benskinnerne er valgt til at repræsentere spillernes positioner, og det gør det eksempelvis muligt at beregne skridtlængde (som kan give indikationer om træthed til spillerens træner) og den fart, foden rammer bolden med, når der sparkes eller tackles.

Benskinnerne har ydermere den fordel frem for andre dele af beklædningen, at de meget sjældent skiftes i løbet af kampen. Man kan komme ud for, at spillerne skifter fodboldstøvler undervejs, fordi de har valgt støvler med en forkeert 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 [Cairos], og med den frekvens kan en spiller højst nå at bevæge sig 1,67 cm – svarende til positioneringssystemets usikkerhed – mellem to samples. Dette er beregnet ud fra en hastighed på 9 sekunder pr. 100 meter, og det kan ikke engang de hurtigste mennesker i verden nå op på [Larsen & Hansen, s. 36].



**Figur 3.2 – Cairos radiosender. Kilde: [Cairos].**



**Figur 3.3 – 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 3.3. 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 egenskaber<sup>2</sup>. Sådan en bold har Cairos, deres normale samarbejdspartner Fraunhofer Institut für Integrierte Schaltungen samt adidas (der producerer sportsudstyr) udviklet i samarbejde, og til efterårets verdensmesterskaber for U/17-landshold skal denne bold testes [FIFA]. Formålet er at hjælpe dommerne ved at give besked, når bolden har passeret mållinjen eller sidelinjen, og derfor vil eksperimentet også fungere som test af

Cairos' positioneringssystem. Forløber testen – som i øvrigt er bemyndiget og overvåget af FIFA, der er fodboldens højeste instans – som planlagt, vil bolden og systemet kunne tages i brug til fodbold-VM i Tyskland i sommeren 2006.

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.

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,

<sup>2</sup> En anden mulighed kunne være at beregne sig frem til boldens centrum. En fodbold er dækket af 32 små fem- og sekskantede lapper, som er syet sammen og omkranser en gummibold, der pumpes til et lufttryk på 1,6-2,1 atmosfære, hvilket gør at bolden kan hoppe [Wesson, s. 4]. En lap på hver sin side af bolden kunne udstyres med en radiosender som den i Figur 3.2, og boldens centrum ville dermed være gennemsnittet af de to radiosenders placeringer. Radiosenderen i Figur 3.3 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 offsidetektering.

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 offside-detektering, da der i så fald ikke vil være tilstrækkeligt med data om spillernes positioner. En bold med en dårlig radiosender kan naturligvis skiftes ud med en anden bold, men skal en spiller have skiftet sine benskinne, kræver det et længere stop i spillet. Det er hverken tilskuere eller tv-selskaber interesserede i, og da Cairos skal kunne levere pålidelige statistikker om kampene, må det formodes, at de har taget hånd om dette problem.

### 3.2.2. Services

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

Som det var tilfældet for [Larsen & Hansen] har Cairos ikke ønsket at medvirke til dette speciale, og selvom de gjorde, kunne mekanismen ikke nødvendigvis bruges til offside-detektering. I forbindelse med offside-situationer 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 offside-detektering.

## 3.3. Bevægelsesanalyse

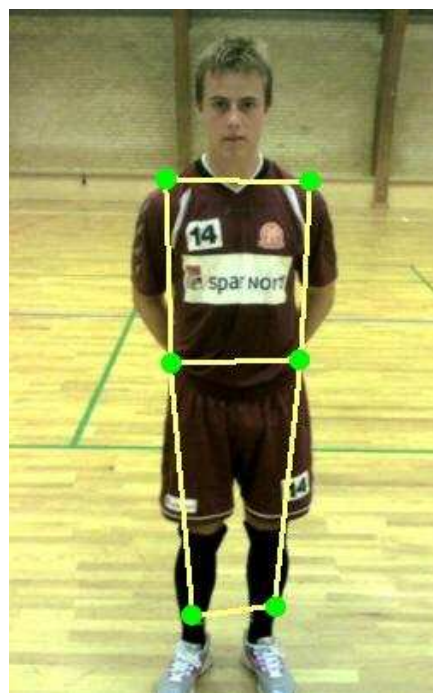
Som beskrevet i afsnit 2.2.1 afgøres en spillers eventuelle offsideposition af det punkt på spillerens hoved, krop og fødder, som er nærmest mållinjen. Positioneringssystemet fra Cairos benytter sig, jf. afsnit 3.2.1, af radiosendere i benskinne til at bestemme spillernes positioner, hvilket ikke umiddelbart er tilstrækkeligt til at afgøre en eventuel offsideposition. Afsnit 2.2.1 påviste fejlskøn, som kan opstå, når spillerne defineres ud fra kun ét punkt. I dette afsnit vil det blive undersøgt, om det er muligt at udlede punktet nærmest mållinjen ud fra oplysningerne om spillernes fødder samt deraf afledte informationer såsom retning, hastighed og acceleration – altså om to punkter er tilstrækkeligt til at undgå fejlskøn.

Til undersøgelserne benyttes et system fra svenske Qualisys [[henvisning](#)], 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 opfanges ved hjælp af reflekterende markører på udvalgte steder på kroppen – eksempelvis de led, der medvirker til den bevægelse, som ønskes analyseret. 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 afsnit 3.3.1.

Kroppens placering i forhold til fødderne kan findes ved at sætte markører på spillerens skinneben, hofter og skuldre som vist i Figur 3.4. Systemet fra Qualisys repræsenterer markørerne som prikker, der kan følges gennem optagelsen, og imellem prikkerne kan der efterfølgende indsættes 'knogler' for bedre at kunne følge bevægelserne. Figur 3.5 viser, hvordan omridset af en fodboldspiller ser ud fra Qualisys' synspunkt, når markørerne er placeret som beskrevet. I omridset indgår ikke den nederste del af spillerens ben samt hans hoved, men disse dele af kroppen vil ikke kunne befinde sig alverden langt fra henholdsvis skinneben (målbart helt op til 25 cm) og skuldre (op til 20 cm). Skinnebenene er valgt frem for fødderne, fordi Cairos' system jo bruger radiosendere i benskinnerne.



Figur 3.4 – U/21-landsholdsspiller Jeppe Lund Curth med påsatte markører.



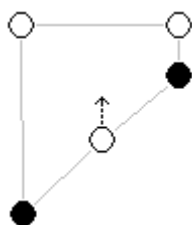
Figur 3.5 – Illustration af markørernes placering.

Markørerne på hofterne har vist sig at være overflødige, idet hofterne altid vil befinde sig et sted mellem fødderne og skuldrene i (x, y)-planet. Da optagelserne blev lavet, 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.

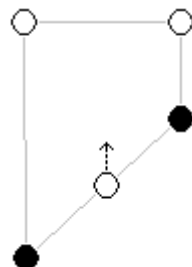
I løbet af en fodboldkamp vil en fodboldspiller foretage en række bevægelser, hvor kroppen skifter position i forhold til fødderne. Når man løber, vil kroppen være i en bestemt position, men for at accelerere må man læne sig mere forover for ikke at miste balancen. På samme måde skal man læne sig til 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 fødder. Eksempler på omrids kan ses i Figur 3.6, Figur 3.7 og Figur 3.8, hvor fødderne er de sorte prikker,

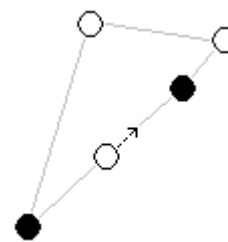
mens skuldrene udgøres af de hvide prikker. Den hvide prik med pilen viser den  $(x, y)$ -retning, spilleren bevæger sig i og befinder sig midt imellem fødderne, hvilket skyldes en formodning om, at skuldrene bevæger sig med samme og konstant fart. Fødderne skiftes til at være i høj og lav fart, og skuldrene vil derfor befinde sig med en konstant afstand fra gennemsnittet af føddernes placering i  $(x, y)$ -planet. Hvis det er muligt at regne sig frem til omrids som dem i de tre figurer, kan punktet nærmest mållinjen findes ved ganske enkelt at sammenligne punkternes  $x$ -værdier.



**Figur 3.6 – Omridset af en spiller ved almindeligt løb, set ovenfra.**



**Figur 3.7 – Ved acceleration læner man sig frem.**



**Figur 3.8 Ved retningsskift flyttes overkroppen i den retning, der skiftes til.**

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 2.2.1. 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.

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 der 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.

Spilsituationerne er foregået på et område på cirka  $10 \times 10$  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 videobaseret, så det kan ikke garanteres, at positionerne på markørerne kan beregnes hele tiden, idet der kan være nogle markører, kameraerne ikke har udsyn til.

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 6.

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.

### 3.3.1. *Qualisys*

Som nævnt ovenfor 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.

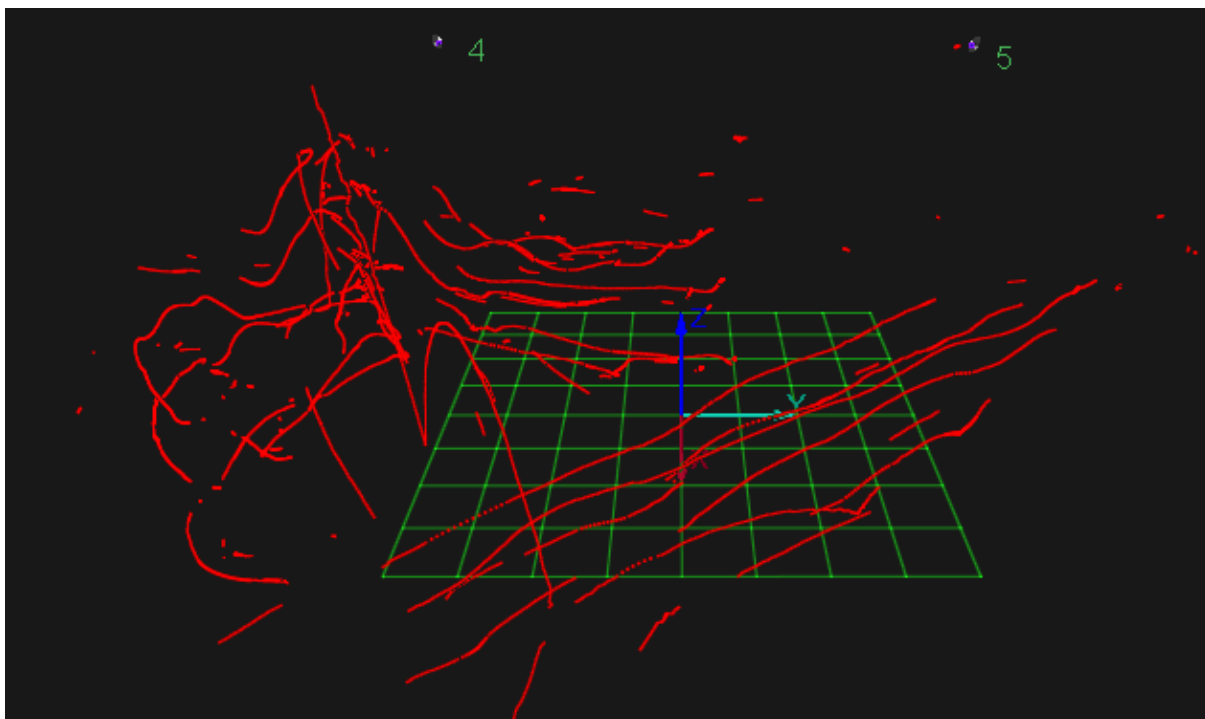
Optagelserne foregår på samme måde med infrarødt lys og reflekterende markører. Hvis to eller flere kameraer kan se den samme markør, kan markørens 3D-position beregnes efter almindelige trigonometriske principper. Dette gøres i systemets software med en frekvens på 240 Hz, og data gemmes i en fil. Der 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 3.9, 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 3.9 – 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 3.12 er banerne for markørerne på tre spillere samt bolden blevet farvelagt, så alle baner for den samme spiller har samme farve.

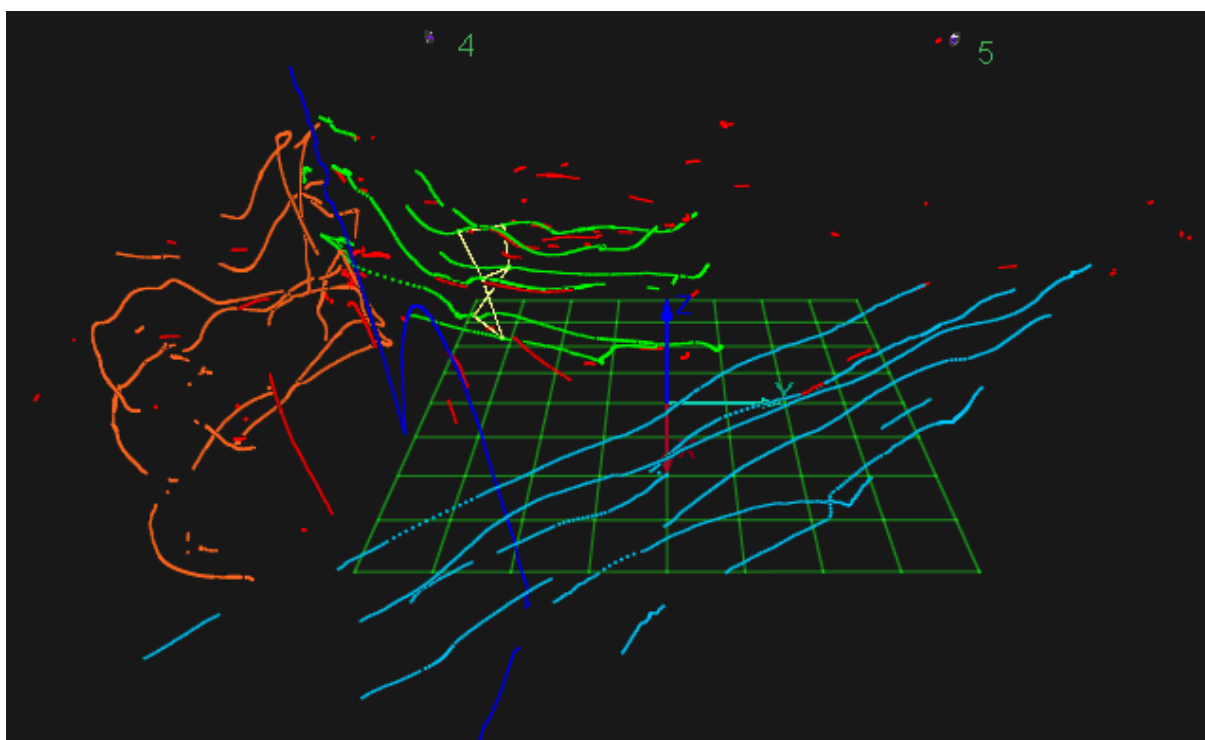
Hvis der er 'huller' i optagelserne, hvor kameraerne ikke har kunnet se markørerne tilstrækkeligt godt – eksempelvis den lyseblå spillers højre skulder, som udgøres af den øverste lyseblå linje – skal markørens bane stykkes sammen af flere baner. Den lyseblå spillers højre skulder har et hul længst til 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 3.9 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 3.10. 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 3.11 viser, hvordan en ret linje i virkelighedens verden kan blive forvansket på grund af støj i optagesystemet.

**Figur 3.10 – To forskudte optagelser af den samme markør.**

**Figur 3.11 – De to baner fra Figur 3.10 sat sammen til én bane.**

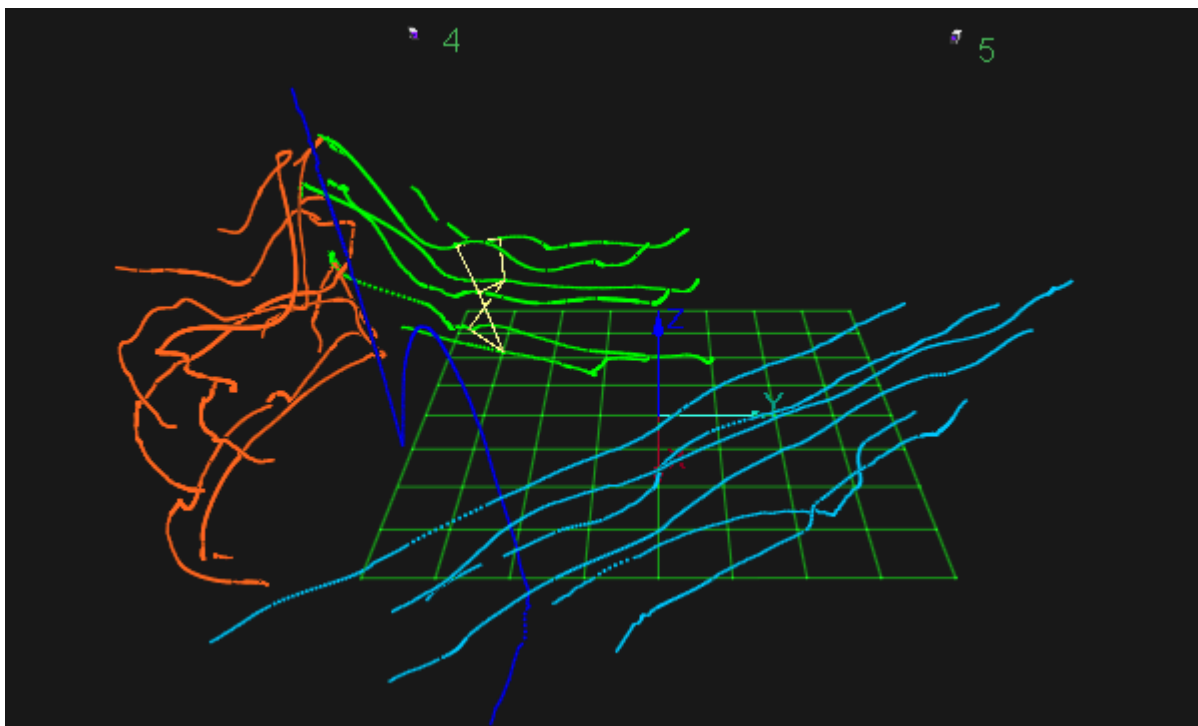
Yderligere kan der indsættes 'knogler' mellem banerne, hvilket også blev vist i Figur 3.5. I Figur 3.12 er der knogler mellem den grønne spillers fødder, hofter og skuldre, og dermed fås en omrids af den pågældende spiller. Knogler gør det lettere at se sammenhængen mellem banerne – både i efterbehandlingsfasen og når scenariet afspilles.



**Figur 3.12 – Scenariet fra Figur 3.9, 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 3.13 viser, hvordan scenariet fra Figur 3.9 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 3.13 – Støjen i Figur 3.12 er nu fjernet, hvormed kun de reelle data er at se. Endvidere er markørernes baner gjort sammenhængende, så der ikke længere er 'huller' i banerne.**

Efterfølgende kan det optagede scenario eller dele deraf eksporteres til en tabulator-separeret tekstfil, som i dette speciale vil gøre det ud for testdata til de udviklede algoritmer. I tekstfilerne angives markørernes 3D-placering med en nøjagtighed på millimeterniveau, endda med tre decimaler, men **hvorvidt denne præcision svarer til virkeligheden, står sikkert i deres dokumentation**. Desuden fungerer tekstfilerne som input til den software, som analyserer spillernes bevægelser. Mere herom i afsnit 3.3.2.

### Optagelsernes kvalitet

Som nævnt ovenfor 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. 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.

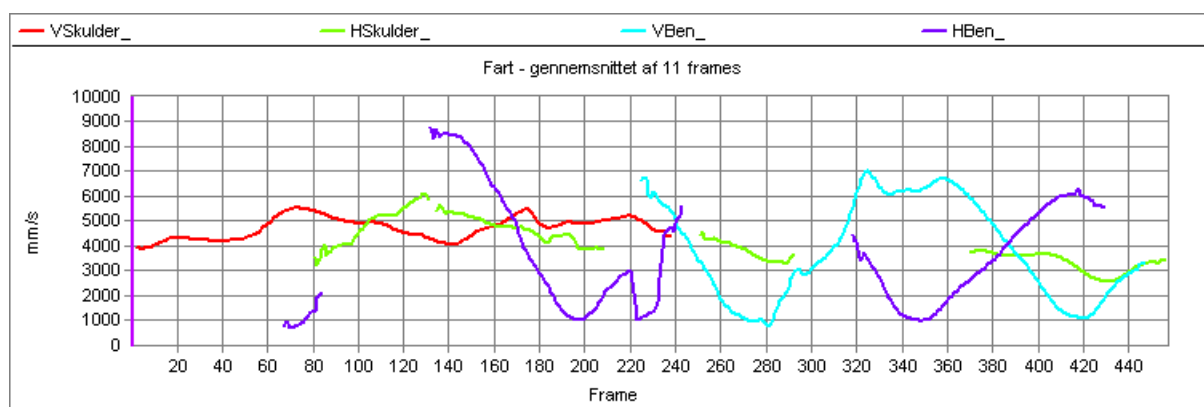
Alternativerne til at bruge systemet fra Qualisys vurderes ikke til at kunne give mere nøjagtige resultater. Med andre videobaserede systemer end Qualisys' er det næsten umuligt at positionsbestemme med få centimeters nøjagtighed, og med hensyn til radiobaserede systemer er der kun ét system, der kan 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 forberedelser 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.

Til undersøgelsernes formål vurderes de optagede data tilstrækkeligt nøjagtige til at kunne give et indtryk af kroppens placering i forhold til fødderne 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 3.14 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 afsnit 9 i appendiks 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 3.14 – Udglattede fartkurver med intervaller uden data. Kurverne svarer til de data, der benyttes i bevægelsesanalysen.**

I Figur 3.14 findes der huller i kurverne, hvilket selvfølgelig skyldes, at der er huller i banerne i optagelsen. Godt nok kan disse huller udfyldes som beskrevet ovenfor, 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 3.14, er ben og skuldre på en fodboldspiller i løb. Spillerens højre og venstre ben skiftes til at have høj og lav fart, mens skuldrene holder en nogenlunde ens og konstant fart. Selvom kurverne ikke er sammenhængende, kan man se antydningen af, at farten på skuldrene befinder sig i samme leje som gennemsnittet af farten på de to ben.

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

### 3.3.2. 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 0 i appendiks.

Fart?

Acceleration?

Udglatning 11 samt støj. 11 svarer til 10.

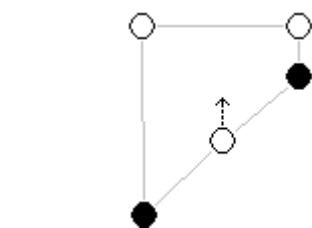
Hvordan gemmes og præsenteres data?

### 3.3.3. *Almindeligt løb*

Almindeligt løb dækker over de tidspunkter i en fodboldkamp, en fodboldspiller løber ligeud med en nogenlunde konstant hastighed, 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 bestemmes kroppens placering i forhold til fødderne i disse.

Som det blev antydnet tidligere i Figur 3.14 skiftes fødderne til at være i høj fart, mens overkroppen ser ud til at have en nogenlunde konstant fart, som svarer til gennemsnittet af føddernes fart. Derfor kan det antages, at skuldrene hele tiden har samme afstand til det punkt, der befinder sig midt imellem fødderne – 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 føddernes placering, kan skuldrenes placering beregnes som illustreret i Figur 3.15.



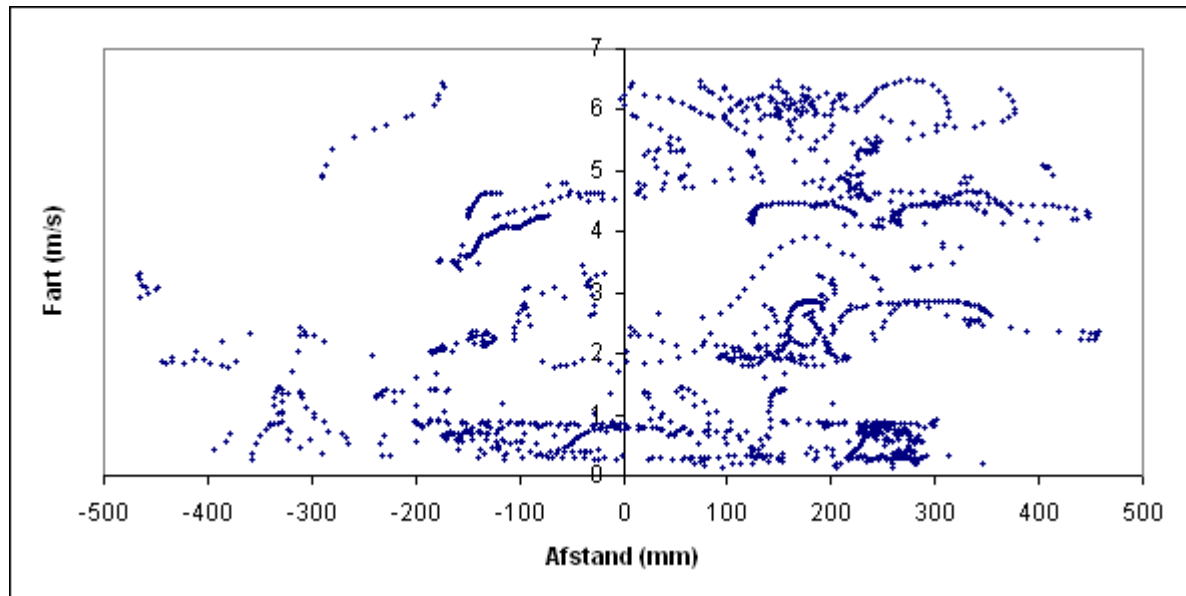
**Figur 3.15 – Ved almindeligt løb formodes overkroppen hele tiden at have samme afstand til punktet midt imellem fødderne.**

For at undersøge, hvorvidt der kan udledes en bestemt afstand mellem fødder 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 fødder samt mindst én skulder har været at finde.

I hver frame udregnes (x, y)-afstanden fra føddernes 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 afsnit 9.2 i appendiks.

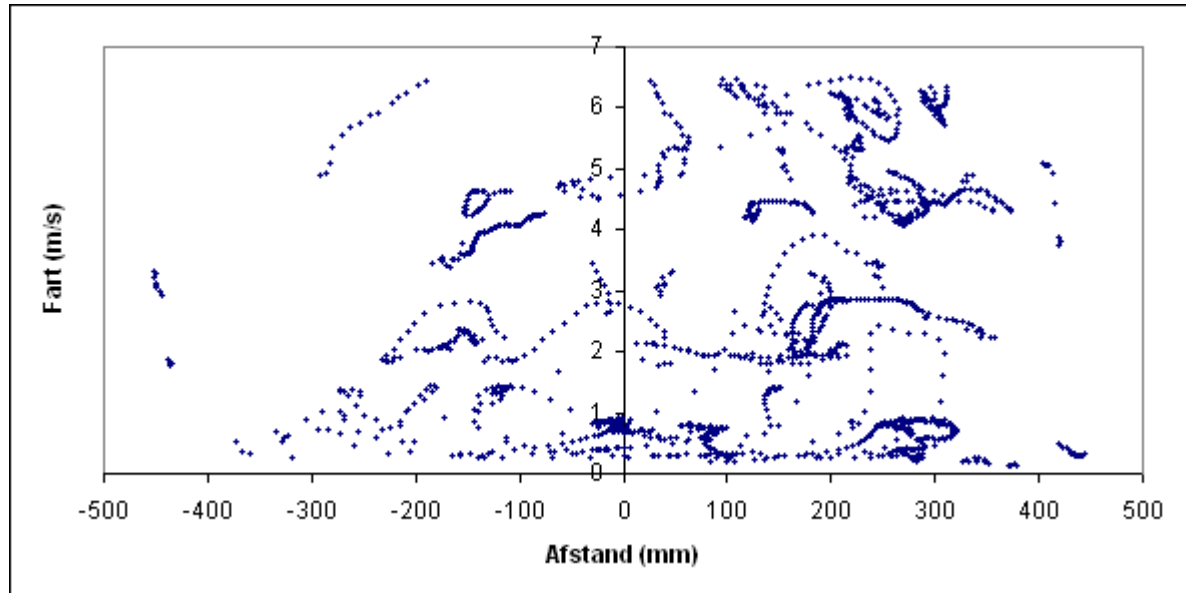
Føddernes placering leveres naturligvis af positioneringssystemet, så skuldrene må befinde sig en vis distance foran fødderne i den retning, der løbes. Føddernes retning kan beregnes ved hjælp af de tidligere placeringer, men da de to fødder blot ved små retningsændringer ikke har samme retning, må spillerens retning beregnes på en anden måde.

I Figur 3.16 vises afstanden til skuldrene, når spillerens retning beregnes som et gennemsnit af føddernes retning. Hver markering i figuren repræsenterer afstanden fra føddernes middelplacering til en skulder i en frame i en af de tolv optagelser. En negativ afstand betyder, at skulderen er placeret bag føddernes middelplacering. Som det ses, er der stor spredning i de beregnede afstande, og umiddelbart har spillerens fart ikke nogen betydning for afstanden mellem fødder og skuldre. Farten er i øvrigt defineret som gennemsnitsfarten på fødderne.



**Figur 3.16 – 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 fødderne, kan retningen på den hurtigste fod anvendes. Meget simplificeret står det ene ben stille, når det andet bevæger sig, og derfor vil foden med størst fart være en bedre repræsentant for den retning, spilleren bevæger sig i. Figur 3.17 viser de udregnede afstande, når retningen defineres ud fra den hurtigste fod. Igen ser der ikke ud til at være nogen sammenhæng mellem afstanden og den fart, der løbes med.

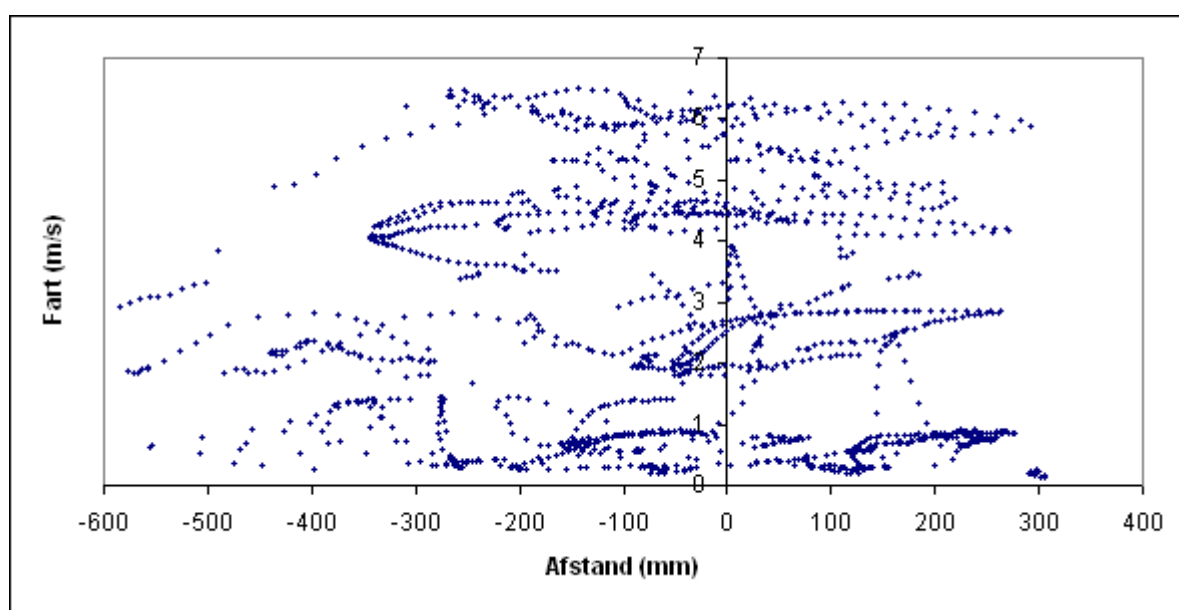


**Figur 3.17 – Afstand fra benenes middelposition til en skulder. Løberetningen defineres som retningen på benet med den højeste hastighed.**

Anvendes gennemsnitsretningen opnås en gennemsnitlig afstand på 93 mm med en standardafvigelse på 192 mm. Benyttes den hurtigste fod giver det en lidt længere afstand, 114 mm, men til gengæld også mere konsistens, da standardafvigelsen nu er på 181 mm. Nærstuderes 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 den hurtigste fods retning.

Som alternativ til at kigge på føddernes gennemsnitsplacering kan man bruge den forreste fod i løberetningen som pejlemærke på skulderens placering. For at finde ud af hvilken fod, der er forrest i forhold til løberetningen, kan man lave afstandsregninger ligesom dem, der bruges til at udregne afstanden fra middelpacering til skulder. Giver den venstre fod en positiv distance til føddernes middelpacering, må den være forrest. Figur 3.18 viser et plot af afstanden fra den forreste fod til skulderen i de frames, hvor der er positioner på begge fødder og mindst én skulder.

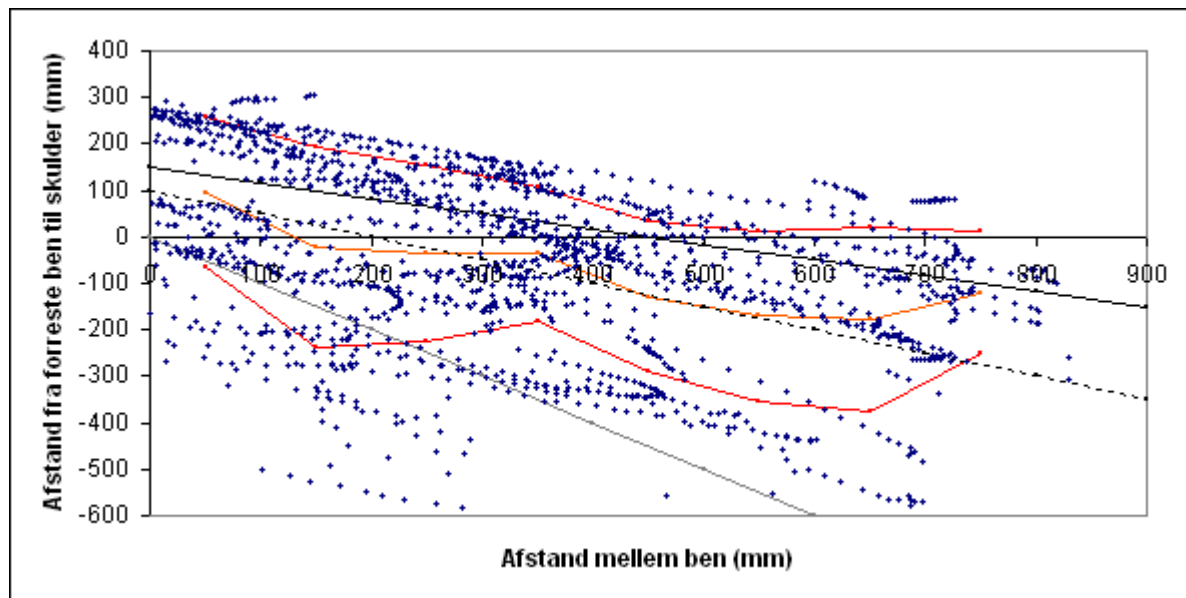


**Figur 3.18 – Afstand fra forreste fod i løberetningen til skulderen.**

I forhold til Figur 3.17 er der mere spredning på punkterne i Figur 3.18. Bruges middelpaceringen som udgangspunkt for udregningerne, vil der ikke være ret stor forskel på afstanden i sammenhængende frames. Da forreste fod 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 fod nødvendigvis må være foran – eller i det mindste på linje med – føddernes middelpacering.

Regner man på den gennemsnitlige afstand fra forreste fod 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.

Kigger man derimod på Figur 3.19 kan man se, at der er en sammenhæng mellem afstanden mellem de to fødder og afstanden fra forreste fod til skulderen. Når der er langt mellem fødderne, vil den forreste fod være foran skulderen, mens skulderen er et stykke foran, når fødderne er i den fase af skridtet, hvor den hurtigste fod passerer den fod, der støttes på.



**Figur 3.19 – Jo længere afstand der er mellem benene, jo mindre er skulderen foran den forreste fod 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 den bageste fods 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 3.19. 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 føddernes middelpacering.

Standardafvigelsen 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.

Ved at kigge på forreste fod frem for føddernes gennemsnitlige placering kan man altså udnytte sammenhængen mellem afstanden på benene og afstanden til skulderen. Den sorte linje i Figur 3.19 viser en simpel forskrift på denne sammenhæng:  $y = -\frac{1}{2}x + 100$ .

En anden interessant betragtning er, at afstanden fra forreste fod 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 3.19 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 hvilken retning, spilleren løber i.

Kun når afstanden mellem fødderne er lille, vil overkroppen befinde sig udenfor benenes område. Ser man bort fra enkelte punkter, som ikke befinder sig alverden bag ved bageste fod (den grå linje i figuren), er skulderen som regel foran forreste fod, når den ikke er imellem fødderne. Det er derfor kun, når afstanden mellem fødderne 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 fødderne er lille. Usikkerhederne i form af standardafvigelsen, når afstanden



mellem fødderne 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 3.19). Med denne linje vil usikkerheden om skulderens placering være nede på 150 mm i værste tilfælde, og i gennemsnit vil skulderens afstand til fødderne i løberetningen kunne afgøres med en usikkerhed på omkring 100 mm.

264 punkter (ca. en sjettedel af alle) falder udenfor det område, der ligger mere end 100 mm under den grå linje i Figur 3.19, 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 føddernes 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 føddernes placering er muligt at opnå en tilstrækkeligt nøjagtig vurdering af afstanden til skuldrene. Skuldrene kan siges at befinde sig enten imellem fødderne (hvormed deres placeringer er ligegyldige) eller et lille stykke foran forreste fod efter forskriften  $y = -\frac{1}{3}x + 150$  mm, hvor  $y$  er afstanden fra forreste fod til skulderen og  $x$  er afstanden mellem fødderne. Med dette udgangspunkt vurderes usikkerheden til at være på op til 10 cm. Formelen er uafhængig af den hastighed, hvormed spilleren løber.

Det skal bemærkes, at afstanden til skulderen i løberetningen ikke siger alt om skulderens placering. Eftersom fodboldspillere kun er en lille smule højere end den gennemsnitlige mandlige befolkning [Wesson, s. 122] og er af nogenlunde normal bygning, er der vel omkring 40 cm mellem de to skuldre på en fodboldspiller. Skuldrene vil derfor befinde sig cirka 20 cm på hver sine side af den linje, som angiver spillerens retning og går igennem føddernes middelpacering.

### 3.3.4. *Retningsskift*

Modtagende spiller + forsvarsspiller

Hvad skal man tro?

### 3.3.5. *Acceleration*

Modtagende spiller + forsvarsspiller

Forreste punkt er  $x$  cm foran gennemsnittet af føddernes placering plus gennemsnittet af accelerationen af fødderne?

Overkroppen er, hvor fødderne kommer til at være lidt senere?

Hvor lang tid går der, før fødderne begynder at bevæge sig ved acceleration fra stående fod?

### 3.3.6. *Nærkamp*

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. (Billeder fra AaB Online?)

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

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

Et radiobaseret positioneringssystem vil kunne give bedre informationer om placeringen af fødder 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 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, og 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.

Vælger man at se problematikken fra linjedommerens synspunkt, kan man argumentere for, 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.

Ud fra billederne ser det ud til, at kroppen befinder sig nogenlunde over fødderne?

### 3.3.7. Hovedstødsduel

Hovedstødsdueller hører til den anden kategori af nærkampe, hvor bolden befinder sig i luften og forsøges spillet med hovedet. 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. Der tages tilløb efterfulgt 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 fødderne på den måde, at afstanden i (x, y)-planet mellem en fod 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 ½ og 1½ sekund, og for hver frame i intervallet måles altså afstanden fra venstre ben til venstre skulder henholdsvis højre ben til højre skulder, når disse data eksisterer.

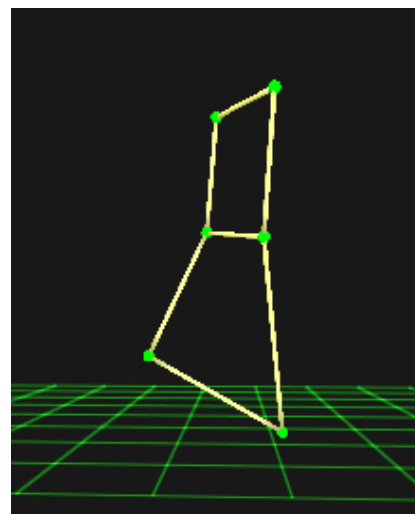
Målingerne viser, at (x, y)-afstanden fra markøren på spillerens ben til markøren på skulderen i samme side gennemsnitligt er på 23,7 cm, med en standardafvigelse på 14,7 cm.

Af balancemæssige hensyn spredes benene ofte ud til siderne som illustreret i Figur 3.20. Det betyder, at overkroppen og dermed skuldrene befinder sig imellem fødderne frem for at være foran fødderne som det forholder sig ved almindeligt løb. Derfor giver føddernes 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. Skuldrene befinder sig altså i gennemsnit knap 6 cm bagved føddernes 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, og det er derfor overkroppen findes bag føddernes middelpacering. En stor del af standardafvigelsen kan tilskrives, at man kommer løbende fra siden i forhold til boldens retning, og derfor hopper skævt op i forhold til løberetningen for at vende rigtigt i forhold til bolden. Hovedstød er lettest at styre, hvis man har front mod bolden.

Med hensyn til hovedstødsdueller ser det altså ud til, at føddernes koordinater er tilstrækkeligt til at kunne afgøre, hvem der afleverede bolden.

### 3.3.8. Specialtilfælde



Figur 3.20 – En fodboldspiller i en hovedstødsduel.

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 sparkes 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 fødderne 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 10 cm længere tilbage, mens hans storetå er 20 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 fejlmargin 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 afleveringstidspunktet, men har i stedet forbindelse til den afleverende spiller.

### 3.3.9. Boldens bevægelser

Boldens bevægelser kan ikke på samme måde som spillernes bevægelser analyseres med positioneringsdata fra Qualisys-optagelserne. For at kunne detektere en aflevering er det nødvendigt at kigge på bolden fart og retning, og på grund af unøjagtighed i Qualisys-optagelserne kan der komme pludselige retningskift uden at en spiller har rørt bolden.

Retningskift 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 retningskift i  $(x, y)$ -planet er forholdsvis lette at finde frem til, kan  $(x, z)$ -retningskift 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.

I afsnit 3.1.5 blev vigtigheden af at kunne detektere afleveringer korrekt forklaret, så de nævnte begivenheder skal kunne sorteres fra. Til det formål beskriver Tabel 3.1 de måder, hvormed bolden kan skifte fart og retning, og hvorvidt retningskiftet eller fartændringen skal tolkes som en aflevering. Ved at karakterisere kendetegnene ved bolden er det lettere at vurdere, om det er muligt at detektere afleveringer tilstrækkeligt korrekt.

Aflevering	Begivenhed	ACC	DEC	$(x, y)$	$(x, z)$
	Bolden kastes/trilles hen til det sted, et frispark skal tages	x		x	x
	Målspark/indkast/hjørnespark	x			
x	Bolden sættes i gang ved frispark	x			
x	Bolden spilles med foden	x		x	x
x	Skud på mål	x		x	x
x	En spiller rammes af bolden			x	x
x	Bolden heades videre	(x)		(x)	x
x	Et skud rettes af/snittes			x	(x)
(x)	En spiller dribler med bolden	x		x	(x)
x	To spillere tackler hinanden	x		x	x
x	Bolden spilles med brystet		x	x	x
(x)	Bolden tæmmes		x		x
(x)	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 3.1 – 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.**

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 spilstop, 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 jorden<sup>3</sup>. 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 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.

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

<sup>3</sup> 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.

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.

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 [Fodbolddloven, 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. 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. Tvivlstillfældene vil være i situationer med retningsændringer så små, at de dårligt kan opfattes af det menneskelige øje.

I dette afsnit er det kun blevet vurderet, 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 3.1.6 ikke essentielt for, om et computersystem til offsidetetektering vil være en hjælp for linjedommeren. Samtidig er der ikke taget stilling til, om det er muligt at sortere eksempelvis driblinger fra, så linjedommeren får så få tilkendegivelser fra systemet som muligt.

### 3.3.10. *Delkonklusion*

Hvordan skelner man mellem almindeligt løb, retningsskift og acceleration?

Måske kan det nærmeste punkt på kroppen ikke udledes af føddernes placering, retning, fart og acceleration – inden for tidsgrænsen? I så fald kræves der regelfortolkningsændring fra FIFA's side.

Afleverende spiller kan ikke afgøres 100 % sikkert ud fra data fra Qualisys. Nærmere undersøgelser med Cairos eller lignende system.

Boldens bevægelser er ikke tilstrækkeligt præcise til at kunne give en fuldstændigt naturlig bane.

Ikke nok data om skruning + brække i luften, som det foregår i virkeligheden, til at kunne fastsætte grænseværdier. Afleveringsdetektering.

Findes der ordentligt udstyr der kan bruges i stedet for Qualisys?

Tre punkter vil være nødvendigt, hvis specialtilfældene skal dækkes.

Dommeren må tage sig af at afgøre den afleverende spiller, hvis der er tvivl. Linjedommeren kan for nuværende ikke forventes at være så tæt på situationen, at han kan træffe beslutningen.

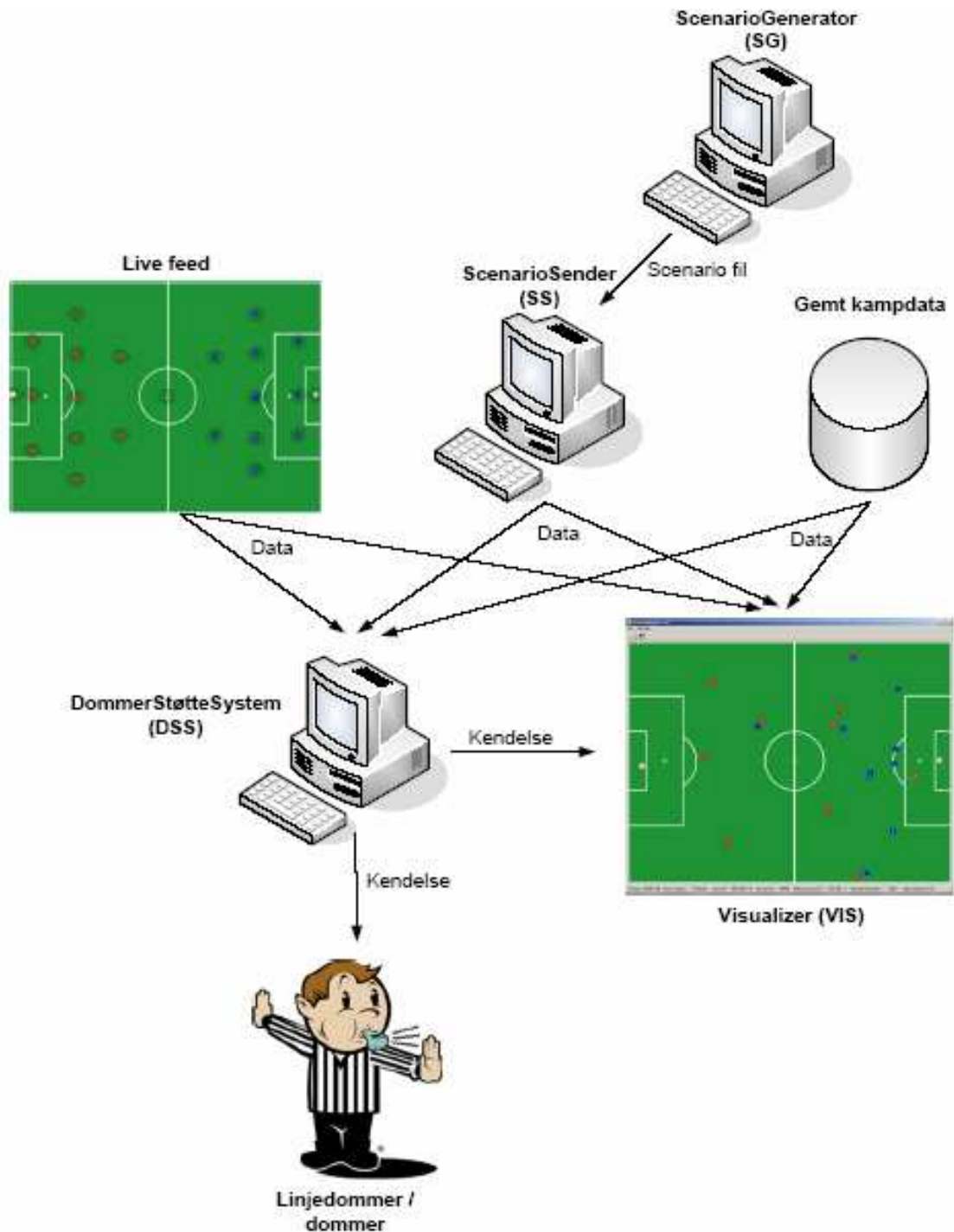
## 3.4. DommerStøtteSystem

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, som beskrives herunder – er implementeret på baggrund af en række valg i forhold til forskellige aspekter af offsidedetektering, og disse vil blive beskrevet og diskuteret i dette afsnit. For valgene vedrørende fortolkninger af selve offsiderreglen henvises til afsnittene 2.2.1 og 2.2.2, mens softwarestrukturen diskuteres i kapitel 5.

### 3.4.1. Systemoversigt

Det samlede system hænger sammen som vist i Figur 3.21. For en mere detaljeret beskrives end den, som tilbydes herunder, henvises til [Larsen & Hansen, s. 42-63].



Figur 3.21 – Systemoversigt fra [Larsen & Hansen, s. 8].



## ScenarioGenerator

ScenarioGenerator er udviklet med det formål at opstille scenarier, der kan bruges til at teste den udviklede algoritme. I dette program 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 fra On Time, hvorfor det kan garanteres, at data om spillere og bolds placering kan sendes til DommerStøtteSystem hvert millisekund. ScenarioSender kan afspille en scenariefil lavet med ScenarioGenerator, og simulerer så at sige et positioneringssystem.

## 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.

## Visualizer

Den fjerde applikation modtager positioneringsdata og kendelser og viser dem på skærmen. På den måde kan det efterses, om data afsendes korrekt, og rigtigheden af de afgivne kendelser kan kontrolleres, mens systemet kører.

### 3.4.2. Positioneringsdata

Som beskrevet i afsnit 3.1 valgte [Larsen & Hansen] positioneringssystemet fra Cairos som værende det mest anvendelige til brug for offside-detektering. 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, hvilket giver de i afsnit 2.2.1 beskrevne problemer. 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 er det fornuftigt at antage, 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].

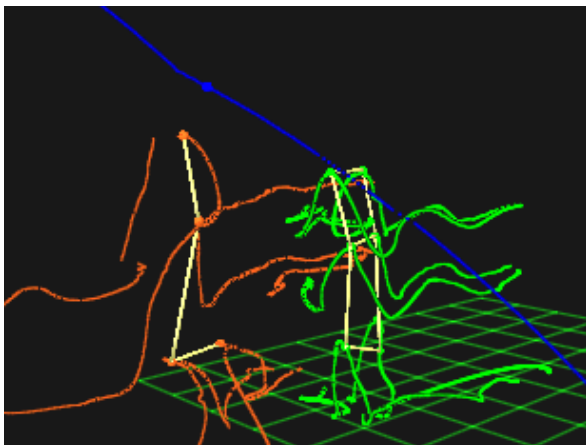
### 3.4.3. *Offsidedetektering*

Den overordnede algoritme til offsidedetektering 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]. Afleveringstidspunktet anses af dette speciales forfatter ikke som værende endegyldigt interessant som realtidskrav for bedømmelsen af offside, da 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.

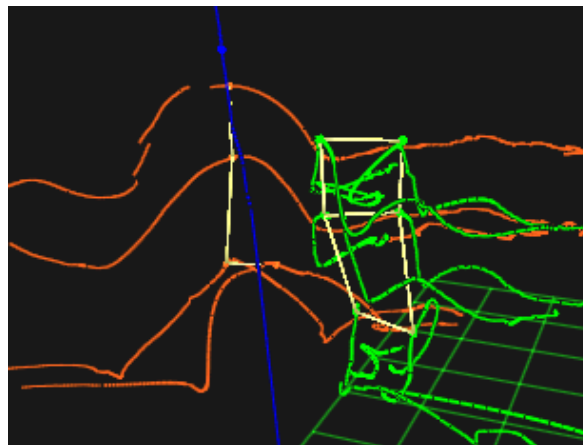
Afleveringstidspunktet blev i [Larsen & Hansen, s. 27] defineret som det øjeblik, hvor bold og støvle ikke længere har kontakt. Dette blev tilbagevist i afsnit 2.2.2, hvor det blev fastslået, at det er det øjeblik, hvor der opnås kontakt mellem bold og støvle, der er at regne for afleveringsøjeblikket.

Afleveringer detekteres ved at holde øje med boldens fart og opdage en acceleration [Larsen & Hansen, s. 40] på mindst 10 m/s over 10 ms [Larsen & Hansen, s. 67]. Dermed tages der ikke højde for, at bolden ikke nødvendigvis tilføres fart, når den afleveres. Det betyder, at visse typer afleveringer ikke vil blive optaget af DommerStøtteSystem, og da det er detektering af en aflevering, som iværksætter offsidealgoritmen, vil systemet ikke opdage en eventuel offside.

Bolden kan eksempelvis afleveres ved at en lang fremlægning spilles videre med hovedet, hvorved den kun skifter retning og altså 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 3.22 og Figur 3.23, som er det samme øjeblik set fra to forskellige vinkler. Når bolden (den blå bane) kommer længere frem tidsmæssigt og nærmer sig jorden, ser den ud til at skifte retning, men det skyldes usikkerhederne ved optagesystemet fra Qualisys, jf. afsnit 3.3.1.



**Figur 3.22 – Hovedstødsduel, hvor bolden lige er blevet snittet videre af den orange spiller.**

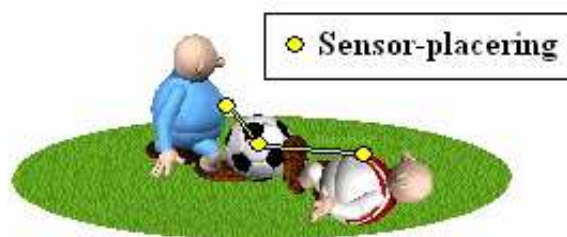


**Figur 3.23 – Bolden ser ikke ud til at skifte retning set fra denne vinkel.**

Bolden kan imidlertid også skifte retning på grund af ujævnheder i banen eller ved at ramme dommeren eller en målstolpe, og det vil være en fejl at tolke disse hændelser som afleveringer. Der skal en meget mere sofistikeret algoritme til for at kunne detektere afleveringer hvis og kun hvis de sker i virkeligheden.

Målspark, indkast og hjørnespark skal heller ikke tolkes som afleveringer, da man ikke kan være strafbart offside i disse situationer, men det tages der ikke højde for i DommerStøtteSystem [Larsen & Hansen, s. 33].

Når en aflevering er detekteret, er næste skridt at finde ud af, hvem der rørte bolden. Afleveringens kilde findes ganske simpelt ved at udvælge den spiller, hvis brystkasse (hvor radiosenderen sidder) er nærmest bolden i (x, y)-planet [Larsen & Hansen, s. 27]. Dette kan give fejl i forbindelse med glidende tacklinger som illustreret i Figur 3.24.



**Figur 3.24 – 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].**

Ved at benytte radiosendere i spillernes benskiner, vil det kunne afgøres med større præcision, hvem den afleverende spiller er, fordi bolden oftest afleveres med fødderne. Ved hovedstødsafleveringer vil der derimod være lidt mere tvivl om afgørelsen, men som regel vil hovedet befinde sig nogenlunde lige over fødderne i sådanne situationer, jf. afsnit 3.3.7.

Sidste skridt i algoritmen er at finde ud af, om en spiller befinder sig i offsideposition, og som forklaret i afsnit 2.2.1 giver anvendelsen af kun én radiosender problemer med at fastlægge spillerens position nøjagtigt.

#### 3.4.4. Design

Overordnet set er det samlede system designet som forklaret i afsnit 1.2. 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 kendelser, DommerStøtteSystem kommer med.

De samme kendelser 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 offsidekendelser er en anelse vigtigere end de enkelte pakker med positioneringsdata, så for at være helt sikker på, at kendelserne 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 kendelse at vide senest 1 sekund efter at bolden er afleveret, skal alle beregninger og al datatransmission kunne nås i dette tidsrum. Radiosenderne i spillernes benskiner sender 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 den centrale enhed, hvilket tager omtrent lige så kort tid. Den centrale enhed kan give positioneringsdata for bolden 2000 gange i sekundet og for spillerne 750 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 så godt som 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. 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. 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, offsidekendelserne.

Offside-detekteringstråden 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*, så denne tråd kan afbryde persisteringstråden, når der kommer nye data [Larsen & Hansen, s. 63].

### 3.4.5. 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 offside-situationerne og endelig Visualizer, som kun vise de afspillede scenarier og DommerStøtteSystems kendelser.

DommerStøtteSystem kunne så rigeligt leve op til realtidskravene om at give linjedommeren besked indenfor 1 sekund efter at en aflevering havde fundet sted. Dette resultat opnås dog med en algoritme så simpel, at mange situationer vurderes forkert.

Som det blev diskuteret i afsnit 3.1.5 er afleveringsdetektering så vigtig en del af algoritmen, at den skal fange alle afleveringer og ikke lade sig narre af boldens skruring, 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 spillere på offsidegrænsen kan positioneres forkert på grund af deres orientering. Sidstnævnte mangel vil give anledning til fejkendelser i de snævre

situationer, hvor et offsidedetekteringssystem gerne skulle kunne hjælpe linjedommeren med at træffe den rigtige beslutning.

Trods den simple offsidedetekteringsalgoritme er de udviklede prototyper et godt skridt på vejen mod computerbaseret offsidedetektering i realtid. Derfor vil der i dette speciale blive arbejdet videre ud fra prototyperne. ScenarioGenerator må dog lade livet til fordel for de semi-realistiske positioneringsdata som er resultatet af Qualisys-optagelserne.

Disse optagelser giver mere omfattende data og i et andet format, så derfor skal ScenarioSender modificeres til at kunne læse og afsende disse data. Grundet ændringen af dataformatet kræves også mindre ændringer af DommerStøtteSystem og Visualizer. Det største arbejde ligger i DommerStøtteSystem, hvor de simple algoritmer skal skiftes ud med mere komplekse algoritmer, der kan leve op til de krav, der stilles til et computersystem til offsidedetektering.

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.

## 4. Algoritmer

De algoritmer, der skal til for at detektere offside, beskrives med tekst og figurer i form af aktivitetsdiagrammer eller lignende i dette kapitel. Forskellige mulige løsninger til hvert problem vil blive afvejet i forhold til hinanden, og flere af dem kan måske endda supplere hinanden, hvormed der opnås bedre præcision i offsidevurderingerne.

Nogle af algoritmerne vil blive skrevet i to versioner, hvor af den ene kan bruges til test. Med optagesystemet fra Qualisys kan man sætte markører mange forskellige steder på medierne (fodboldspillere), og dette kan udnyttes til testformål, da det gør det muligt at få nøjagtige informationer om overkroppens placering. Frem for at skulle analysere videobilleder for at afgøre, om en angriber er nærmere mållinjen end næstsidste forsvarsspiller, kan dette arbejde nu gøres automatisk. Det kræver blot en mindre omskrivning af ScenarioSender, så den sender overkroppens placering i stedet for føddernes.

Hjælpealgoritmer til eksempelvis sortering af spillernes indbyrdes positioner vil også blive beskrevet i det omfang, der er brug for dem.

### 4.1. Sortering

[Larsen & Hansen] fandt frem til, at det ville være en fordel at sortere spillerne efter deres indbyrdes placering, og til dette formål valgte de QuickSort på grund af dens lave tidskompleksitet. Umiddelbart skulle jeg mene, det er unødvendigt at sortere spillerne for at finde frem til, om en af de to spillere, der er tættest på mållinjen, er fra det angribende hold. En test kan måske overbevise mig om noget andet.

Bruges også til at finde frem til den afleverende spiller?

### 4.2. Detektering af offside

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

Tre mængder, der gradvist formindskes: Afleverende spillere (fra begge hold), offsidegrænsen (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 retnings skift 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)

### 4.3. Detektering af aflevering

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.

Parabel-form for at kunne detektere boldens sandsynlige bane.

#### 4.4. 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

#### 4.5. 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

#### 4.6. Detektering af afleverende spiller

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.

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

##### 4.6.1. *Ud fra føddernes placering*

I et system der gør brug af data fra Cairos skal den afleverende spiller bestemmes ud fra føddernes positioner.

##### 4.6.2. *Ud fra omfattende data*

Qualisys kan levere positioner på et vilkårligt antal steder på kroppen, og på den måde skulle det være muligt at bestemme den afleverende spiller med stor præcision.

#### 4.7. 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

##### 4.7.1. *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.

## 4.8. 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.

### 4.8.1. *Ud fra føddernes placering*

Denne fremgangsmåde skal benyttes i et endeligt system, da Cairos kun giver information om føddernes placering. Overkroppen skal altså beregnes ud fra, hvor fødderne befinder sig.

### 4.8.2. *Ud fra overkroppens placering*

Qualisys kan levere data om overkroppens placering, og derfor vil denne algoritme kunne give et nøjagtigt svar på, hvor spilleren befinder sig.



## 5. Prototyper

Designet af de udviklede prototyper forklares i dette kapitel. Desuden forklares det, hvordan systemerne hænger sammen indbyrdes, og hvordan de kommunikerer med hinanden. Samlet set kan kapitlet forventes at komme til at fylde 20-25 sider inklusive klassesdiagrammer.

Designet af prototyperne fra [Larsen & Hansen] ligger til grund for disse prototyper, så anvendeligheden og muligheden for videreudvikling vil blive diskuteret.

Kommunikation til dommertrioen

Persistering?

### 5.1. ScenarioGenerator

Denne prototype vil ikke blive benyttet, da der er adgang til realistiske data fra Qualisys og måske også Cairos.

### 5.2. 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

### 5.3. DommerStøtteSystem

Her beskrives arkitekturen for den væsentligste prototype, som står for selve det at lave offsidekendelser.

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.

Strategy Pattern? [59]

### 5.4. 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

## 6. 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]

Testdata er sammenstykket af bidder optaget med min lillebror, Frands Boe Johansen, der har erfaring fra 2. division.

### 6.1. 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.

### 6.2. 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.

### 6.3. 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.

### 6.4. Realtidskrav

Det skal undersøges, om systemet kan leve op til kravet om at afgøre offsidepositioner 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.

## 7. 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.

## 8. 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, bolden skrining.

Spillernes placering er nok til at afgøre offside, hvis afleveringsdetekteringen ellers fungerede? 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?

### **Opgaver, der skal udføres:**

*April-juli - kravspecifikation:*

**Planlægge, optage og** analysere scenarier for at bestemme overkroppens placering i forhold til fødderne

**Planlægge og optage spilsituationer til brug i test**

**Undersøge virkemåden af DommerStøtteSystem**

**Hvis de ønsker at samarbejde, skal dataformat og lignende fra Cairos undersøges**

**Undersøge dataformat og lignende fra Qualisys**

**Definere/diskutere realtidskrav**

*August - forberedelse af prototyper:*

Undersøgelse af prototypernes arkitektur og mulighed for udvidelse

ScenarioSender skal kunne læse en tekstfil fra Qualisys og sende data – to versioner

DommerStøtteSystem og Visualizer skal kunne modtage data i det rigtige format – to versioner (en til algoritmerne, en til testalgoritmerne)

*September-oktober - algoritmer:*

Så mange som muligt (minimum fire) af følgende iterationer bestående af design, implementation, test og beskrivelse af algoritmer (helst flere, så de kan supplere hinanden) til offside-detektering

- Offside-detektering – den overordnede algoritme
- Detektering af aflevering

- Bestemmelse af modtagende spillers position – to versioner
- Afleverende spiller – to versioner
- Afleveringens retning
- Bolden ude af spil

*November - test:*

Beskrive arkitektur af prototyper

Teste og vurdere præcisionen af de udviklede algoritmer samt om realtidskrav overholdes

*December - færdiggørelse af rapport:*

Læse korrektur, skrive indledning, fremtidigt arbejde, konklusion

*12. december: Aflevering*

### **8. september – 12. december:**

**Definere/diskutere realtidskrav (1)**

Videre bevægelsesanalyse + delkonklusion (?+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)

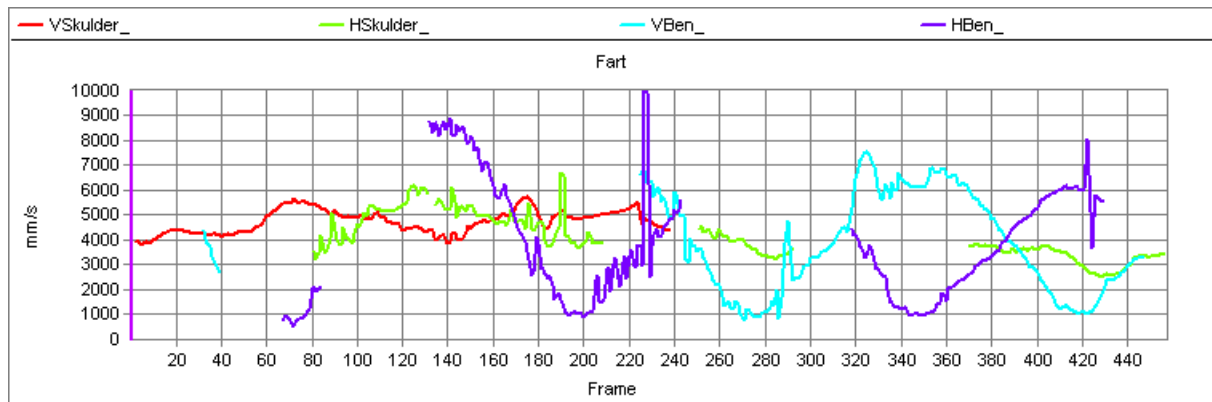
I alt: 51 (+4?) dage.

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

## 9. Appendiks

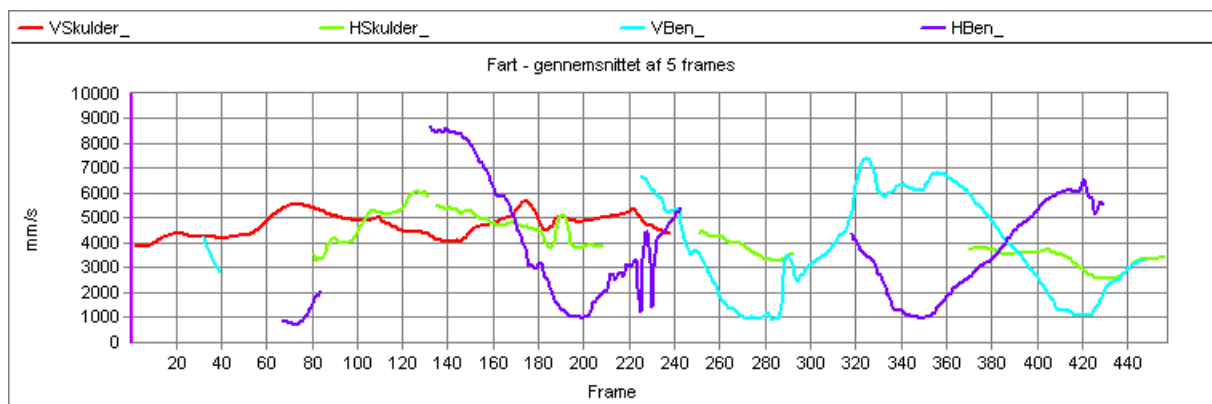
### 9.1. Dataudglatning

Figur 9.1 viser farten for fire forskellige punkter på en fodboldspiller gennem en spilsituation optaget med systemet fra Qualisys som beskrevet i afsnit 3.3. 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.



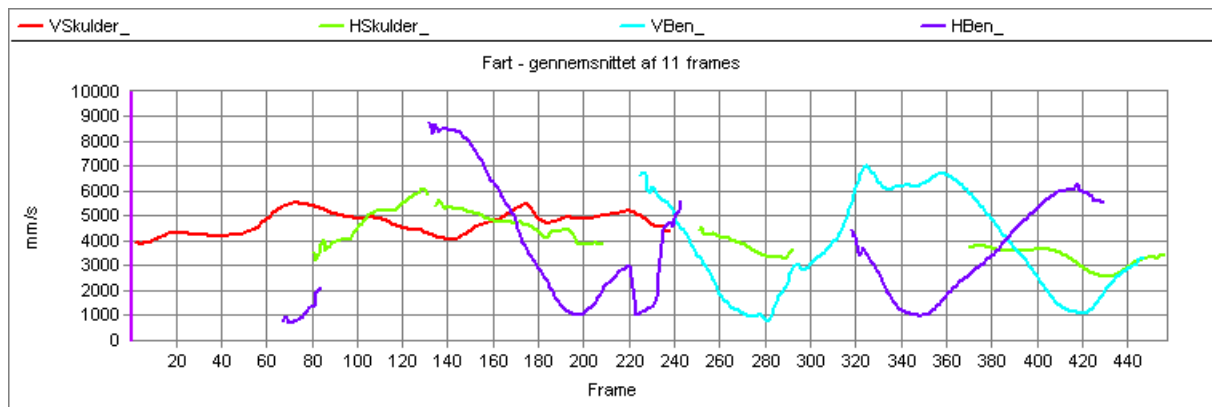
**Figur 9.1 – Fart.**

Ved at beregne farten som et gennemsnit af farten i de foregående og efterfølgende frames opnås glattere kurver. Figur 9.2 viser kurverne, når farten i de to foregående og de to efterfølgende frames tages med i udregningen af farten.



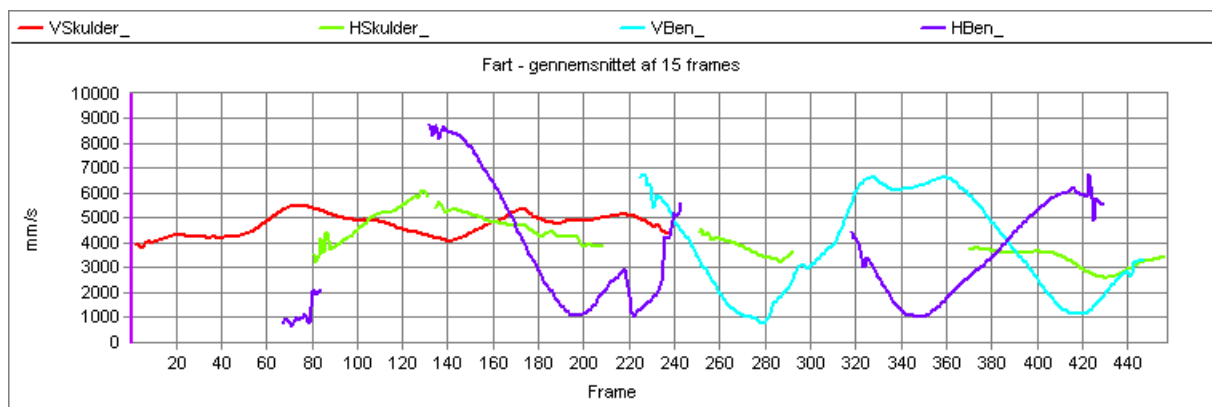
**Figur 9.2 – Fart som gennemsnit af 5 frames.**

I Figur 9.2 er der stadig en del kanter på fartkurverne, men i Figur 9.3 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 9.3 – Fart som gennemsnit af 11 frames.**

Benyttes der flere end 11 frames begynder kurverne igen at se kantede ud, som illustreret i Figur 9.4, og det bliver værre, jo flere frames der benyttes. Dette skyldes, at udglatningen kommer til at dække over flere fartændringer. Især i enderne af kurvestykkerne kommer der nu ganske meget støj sammenlignet med en glat kurve.



**Figur 9.4 – 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 9.1.

Qualisys Track Manager 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.

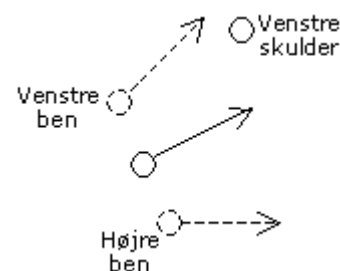
## 9.2. Afstandsberegning

I afsnit 3.3.3 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 9.5, 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:

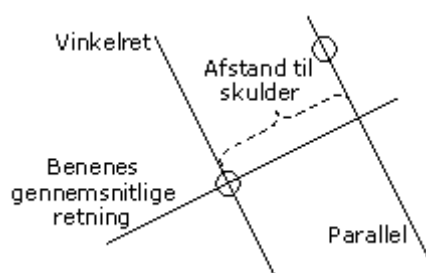
1: Beregn benenes gennemsnitlige placering. Den fuldt optrukne cirkel med pilen i Figur 9.5 viser placeringen.

2: Beregn kroppens retning. I afsnit 3.3.3 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 9.5 vises denne retning med den fuldt optrukne pil.



**Figur 9.5 – Føddernes placering og retning samt skulderens placering.**

3: Find den retning, der står vinkelret på føddernes gennemsnitlige retning. I Figur 9.6 er denne retning tegnet, så det går igennem benenes gennemsnitlige placering. Benenes gennemsnitlige retning er i forhold til Figur 9.5 tegnet som en linje, der går igennem benenes gennemsnitlige placering.



**Figur 9.6 – 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 9.6 kaldes *Vinkelret* og *Parallel*.

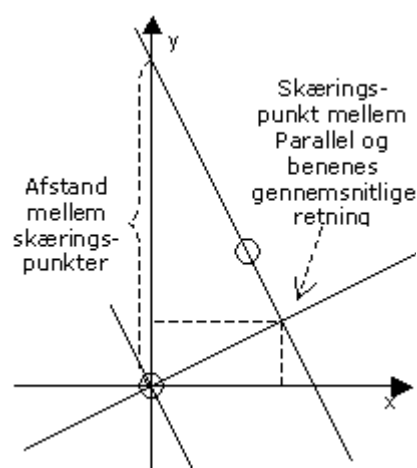
5: Ud fra hældningen fra punkt 4 og koordinatet for benenes gennemsnitlige placering bestemmes skæringspunktet med y-aksen for den linje parallelt med den vinkelrette, som går igennem føddernes gennemsnitlige placering (i Figur 9.6 kaldet *Vinkelret*).

6: På samme måde bestemmes skæringspunktet med y-aksen for den linje parallelt med det vinkelrette, som går igennem skulderens placering (i Figur 9.6 kaldet *Parallel*).

7: Afstanden mellem de to skæringspunkter (se Figur 9.7) bruges til at finde skæringspunktet mellem *Parallel* fra Figur 9.6 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 9.6) 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 9.7 – Skæringspunktet mellem løberetningen og skulderen bruges til at finde afstanden.**

### 9.3. Testopstilling

Dedikeret 100 Mbit/s Ethernet.

#### 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
```

## 9.4. Brugsvejledning

### **Visualizer**

Sæt maskinens IP til 192.168.1.75 (Egenskaber for TCP/IP-konfigurationen for den anvendte netværksforbindelse – alternativ konfiguration)

Start Visualizer.exe (Visualizer – bin – Debug)

Start serveren på play-knappen

### **ScenarioSender**

Overfør scenariofiler til den PC, programmet skal afvikles på, i biblioteket C:\data. Pc'ens harddisk skal have FAT-filsystem.

Forbind den PC, der udvikles på, til den PC, programmet skal afvikles på, med nulmodemkabel i COM1-porten.

Lav en startdiskette på udviklings-Pc'en

1. rtk413.bat
2. bootdisk PC386monitor1 a:

Start target-Pc'en med startdisketten isat

Kør ScenarionSender\DoSerial.bat på udviklings-Pc'en.

1. rtk413.bat
2. link @ScenarioSender.rsp
3. rtloc Main PC386\_disk\_mon.cfg
4. rtrun Main

## DommerStøtteSystem

Forbind den PC, der udvikles på, til den PC, programmet skal afvikles på, med nulmodemkabel i COM1-porten.

1. Installer RTKernel med instal.bat i OnTime413
2. Kør rtk413.bat i kommandoprompt (laver miljøvariable til VS, sætter RTTarget=c:\Program Files\On Time RTOS-32 4.0, sætter RTBuild=c:\Program Files\On Time RTOS-32 4.0\build plus paths til binm, lib og include)
3. Kald dbgshell devenv.exe (dbgshell er RTKernel-skal til debugging) (devenv starter Visual Studio – adressen er "c:\Programmer\Microsoft Visual Studio .Net 2003\Common7\IDE\devenv.exe")
4. Fra Visual Studio, åbn projektet OffsideRef.sln eller OffsideRef.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.

<b>C/C++ – General – Additional Include Directories:</b>
"C:\Kasper\LarsenHansen\Kode\OffsideRef\OffsideStrategy"; "<de andre biblioteker/pakker>"; "C:\Program File\On Time RTOS-32 4.0\Source\RTip"; "\$(RTTarget)\Include"
<b>C/C++ – Linker – General – Output File:</b>
\$(OutDir)\OffsideRef.exe
<b>C/C++ – Linker – General – Additional Library Directories:</b>
\$(RTTarget)\Libmsvc
<b>C/C++ – Linker – Input – Additional Dependencies:</b>
drvdoc.lib rtfiles.lib rtfsk32.lib websrv.lib rtip.lib rtk32.lib drvrt32.lib rtt32.lib \$(NOINHERIT)
<b>C/C++ – Linker – Input – Ignore Specific Library:</b>
kernel32.lib
<b>C/C++ – Linker – Input – Force Symbol References:</b>
_malloc, _EnterCriticalSection@4, _RTFileSystemList
<b>C/C++ – Linker – Debugging – Generate Program Database File:</b>
\$(OutDir)/OffsideRef.pdb
<b>C/C++ – Build Events – Post-build Event – Command Line:</b>
"\$(RTTarget)\bin\rtloc" "\$(OutDir)\\$ProjectName" "\$(RTBuild)\PC386_disk_mon.cfg"

Tabel 9.1 - Project Properties i Microsoft Visual Studio .Net 2003

## 9.5. [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 medspilleren (afleveringen foretages). Det gør muligvis ikke den store forskel i praksis, som du skriver – men som teoretisk holdepunkt er det vigtigt...

Til sidst spørger du – uden for specialet – om dommernes brug af flere armbåndsure og eventuel anden brug af elektronisk udstyr. De to armbåndsure er, så vidt jeg ved, alene en sikkerhed – og af andet elektronisk udstyr vil du i SAS-ligaen og internationalt møde bip-flagene, som giver en elektronisk kontakt fra linjedommernes flag til en sensor monteret på dommerens krop. Dette er alene et spørgsmål om at sikre kontakten mellem alle tre parter, således at man ikke oplever en linjedommer markere længe, uden at dommeren registrerer det (f.eks. hvis han ikke kan råbes op på grund af larmen fra tilskuerne).

Så langt, så godt.

Så vil jeg godt give dig det hint, at et computersystem virkelig vil komme på hårdt arbejde, hvis det skal vurdere en eventuel offside-position (uden at vi overhovedet begynder at filosofere over strafbar offside). Det skal nemlig, hver eneste gang en medspiller rører bolden, vurdere, om der er nogen af de 10 andre medspillere, der er i en offside-position – og denne vurdering skal det gemme, indtil bolden næste gang røres af en medspiller. For det er først dér, at én eventuel offside-position fra første fase bliver annulleret. Der kan faktisk gå ganske lang tid, fra en medspiller rører bolden, til en anden medspiller viser sig at være strafbar offside (ikke mindst efter den nye fortolkning af strafbarhed, som du formentlig er i besiddelse af – står i seneste udgave af Fodboldloven).

Og endelig – og dette er ikke gjort for at ødelægge dit humør, men blot for at bringe dig på (indtil videre fortrolig) forkant med udviklingen: The Board (fodboldlovens højesteret) havde møde den 26. februar, og det ser ud til, at man har vedtaget en definition af offside-position, som gør, at den definition af 'overvejende del af kroppen', som vi hidtil har bygget på, svinger over til, at man er i offside-position, hvis nogen del af angriberens hoved, krop eller fødder er nærmere end modspilleren.

Vi har i DBU ikke set det officielle cirkulære endnu – det dukker formentlig først op sidst i maj, så vi vil ikke kaste os ud i nærmere forklaringer eller fortolkninger på nuværende tidspunkt – men der er i hvert fald noget på vej, som vil få virkning internationalt og på højeste 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.

## 9.6. [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.

[...]

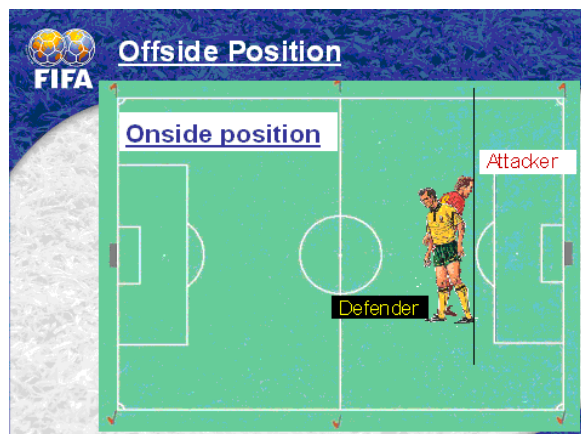
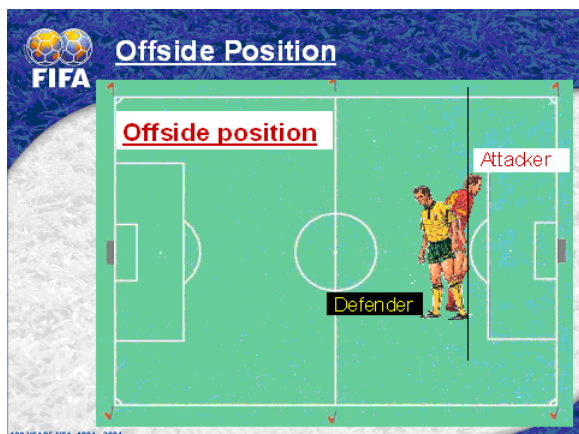
I selve offside-reglen er der nu kommet en entydig definition på begrebet 'nærmere modspillernes mållinje end både bolden og næstsidste modspiller'. Også her har man forsøgt sig på forskellig vis rundt omkring i verden – i Danmark med udlægningen af, at 'den overvejende del af kroppen' skulle være nærmere,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

[...]





## 10. Litteratur

World Congress of Science and Football I-V, 1988-2005

bind III og IV bestilt hjem 15/2

bind I-IV findes på Statsbiblioteket, men lånes ikke ud

Information om Cairos

Information om Qualisys

GoF – design patterns

POSA2

OnTime – realtidsstyresystemet RTOS32

### [Adam]

David Adam, *Football hazy*, Nature, marts 2000

[http://www.nature.com/news/2000/000302/pf/000302-10\\_pf.html](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](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>

### [Cairos]

Cairos Technologies AG, <http://www.cairos.de>

### [Cairos2]

*Cairos System Utilization*, præsentation af Cairos-systemets anvendelighed

### [Carlsen]

Jan Carlsen, *E-mail modtaget 25/3 2005 som svar på spørgsmål om præciseringer af offsidereglen*. Findes i appendiks i afsnit 9.3.

### [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 i afsnit 9.6.

### [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]

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>

**[Fodboldloven]**

*Fodboldloven*, 55. udgave, 2004/2005, Dansk Boldspil Union  
<http://www.dbu.dk/data/dbu/filedb/791.pdf>

**[von der Grün]**

Thomas von der Grün, *3D Online Localisation and Tracking System of Players and Ball using Wireless Technologies*, Cairos Technologies AG, 2003.

**[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](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](http://news.bbc.co.uk/sport3/worldcup2002/hi/other_news/newsid_2069000/2069578.stm)

**[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>

**[Qualisys]**

Qualisys AB, <http://www.qualisys.se>

(Qualisys Track Manager User Manual v. 1.8.2xx, 31. august 2005.)

**[Wesson]**

John Wesson, *The Science of Soccer*, Institute of Physics Publishing, 2002