



CHALMERS



Självspelande air-hockeyspel

-Utveckling och konstruktion av en prototyp

SSYX02-15-21

Emeric Bergendal
Max Ganelius
Jacob Gustafsson
Niclas Hellberg
Joakim Hesselgren
Jonathan Karlsson

Institutionen för Signaler & System
Kandidatarbete
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2015

Sammanfattning

Rapporten beskriver utvecklandet av ett autonomt mekatroniskt system som ska kunna spela air-hockey mot en mänsklig motståndare. Slutprodukten är en prototyp som monteras på ett existerande air-hockeybord. Prototypen besitter alla de nödvändiga funktionerna som krävs för att spela air-hockey, men lämpar sig inte för en kommersiell marknad då den inte är anpassningsbar för olika bord, lätt att tillverka eller hantera utan att vara insatt i utvecklandet.

Prototypen är uppbyggd av två linjära remaktuatorer, där plastdetaljerna är 3D-printade. Styrenheter, mikrokontroller, kamera och motorer är inköpta medan övriga komponenter är tillverkade. Infästningen av aktuatorerna är gjord med hjälp av specialtillverkade plåtar för att passa på det existerande bordet. Ett kameraställ är konstruerat ur VP-rör för att positionera kameran över bordet. Remaktuatorerna drivs av bipolära stegmotorer och använder sig av data från en CMUcam5 Pixy kamera med färgfiltrering för att detektera objekt och positionera sig rätt på planen.

En strategi som förutspår puckens rörelse och klarar av att slå tillbaka pucken utvecklas och testas. Resultatet är att prototypen klarar av att spela air-hockey och blockera majoriteten av alla puckar som rör sig i hastigheter upp emot $6,5 \text{ m/s}$.

Abstract

The report describes the development of an autonomous mechatronic system able to play air-hockey against a human opponent. The final product is a prototype which possesses all the necessary functions required to play the game, mounted on an existing air-hockey table. Said product is not suitable for a commercial market since it is not adaptable to different tables, easy to manufacture nor easy to handle without being familiar with the development process.

The prototype is composed of two linear actuators with 3D printed plastic parts. Controllers, microcontroller, camera and motors are purchased, and other components are locally manufactured. A camera stand is designed to center the camera above the table. The actuators are attached to the structure with custom manufactured plates fitted on the existing table. They are driven by two bipolar stepper motors which utilize data from a CMUcam5 Pixy camera able to detect objects using color filtering, in order to position themselves adequately on the table.

The result is a system that uses strategy to predict the puck's movement and is able to block the majority of all incoming pucks moving at speeds up to 6.5 m/s .

Innehåll

1	Inledning	1
1.1	Bakgrund	1
1.2	Syfte	1
1.3	Uppgift	2
1.4	Krav och önskemål	2
1.5	Avgränsningar	3
1.6	Översikt av kapitel	3
2	Konceptbeskrivning	4
2.1	Beskrivning av det mekaniska konceptet	4
2.2	Beskrivning av det elektroniska konceptet	6
3	Konstruktion av mekaniskt koncept	7
3.1	Val av mekaniskt koncept	7
3.2	Detaljkonstruktion av mekaniskt koncept	7
3.2.1	Övre aktuatorn, y-led	7
3.2.2	Undre aktuatorn, x-led	8
3.2.3	Kameraställ	9
3.3	Val av mekaniska komponenter	11
3.3.1	Remhjul och rem	11
3.3.2	Lager	11
3.3.3	Skenor	12
3.4	Tillverkning av det mekaniska konceptet	13
4	Lokalisering av objekt på spelplan	14
4.1	Egenskaper hos vald kamera	14
4.2	Placering av kamera	14
4.3	Optiska problem och korrigering av koordinater	16
4.4	Korrigering av klubbans position	18
5	Val och styrning av motorkomponenter	20
5.1	Val av motorer	20
5.1.1	Typ av motor	20
5.1.2	Val av remhjulsdiameter	20
5.1.3	Dimensionering av motorer med vald remhjulsstorlek	20
5.2	Styrning av aktuatorer	23
5.2.1	Styrenhet	23
5.2.2	Positionering av aktuatorer	23
5.2.3	Återkoppling av klubbans position	23
5.2.4	Acceleration av motorer	24

6	Utformning av Spelstrategi	27
6.1	Beräkning av puckrörelse	27
6.2	Strategi för prototyp	29
6.3	Optimering av strategi	30
6.3.1	Utskjutning i x-led	30
6.3.2	Återkoppling av klubba	31
6.3.3	Prototyp med prediktion	31
6.3.4	Korrektion av y-led vid utskjutning	31
7	Verifiering	32
7.1	Verifiering av kamera och bildbehandling	32
7.1.1	Verifiering av puckens position i vila	32
7.1.2	Beräkning av puckens position i rörelse över spelplanen	37
7.1.3	Verifiering av klubba position	38
7.2	Verifiering av puckbana vid studs i sarg	39
7.3	Verifiering av motorer	41
7.4	Test av prototypen	42
8	Diskussion	43
8.1	Diskussion av prototypens prestanda	43
8.2	Diskussion av kravuppfyllnad på dellösningar	44
8.3	Framtida projekt	45
8.4	Miljöaspekter	46
9	Slutsats	47
	Litteraturförteckning	49
A	Kravspecifikation	50
B	Alternativa mekaniska koncept	51
C	Komponentlista	52
D	Test av krav	53
E	Komponentbeskrivning	57

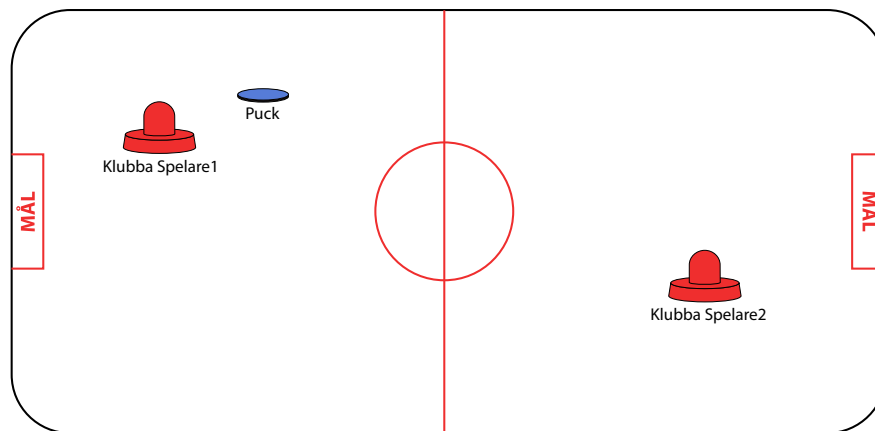
1. Inledning

Kapitlet behandlar projektets bakgrund, syfte och uppgift samt redogör för valda avgränsningar. Det är även här som uppsatta krav och önskemål presenteras, samt en kort kapitelsammanfattning.

1.1 Bakgrund

Traditionellt sett spelas air-hockey av två personer med varsin klubba och en puck på en rektangulär spelplan, se figur 1.1. Målet med spelet är att lyckas slå ner pucken i motståndarens mål, vilket är ett hål i sargen där pucken ramlar ner i en liten ficka. Spelplanen är försedd med många små hål där luft strömmar ut och bildar en luftbädd mellan spelplan och puck. Friktionen blir minimal och pucken kan färdas med höga hastigheter. Detta resulterar i ett intensivt spel där reaktionstiden hos spelarna blir den direkt avgörande faktorn för spelets utgång. Ett system med hög precision, bra repeterbarhet och låg reaktionstid lämpar sig utmärkt för att spela air-hockey.

Prototypen och idéer från detta projekt kommer troligtvis kunna användas i framtida projekt för att öka förståelsen kring användningsområden där människor ersätts av maskiner. Detta kan i sin tur resultera i ytterligare kunskap och idéer som kan komma att användas inom industrin för att effektivisera arbetet och minimera risker som uppstår på grund av den mänskliga faktorn.



Figur 1.1: Överblick av ett air-hockeyspel med 2 *st* röda spelklubbor och 1 *st* blå puck. Planen delas upp av den röda mittlinjen med mål på spelplanens kortsidor.

1.2 Syfte

Projektet syftar till att undersöka möjligheten att utveckla en autonom mekatronisk air-hockeyspelare som ska kunna spela air-hockey mot en mänsklig motståndare.

1.3 Uppgift

Uppgiften är att konstruera en mekatronisk prototyp som ska kunna spela air-hockey mot en mänsklig motståndare. Detta innebär att en puck ska kunna detekteras och dess position och riktning avgöras för att på så sätt veta vart klubban ska förflyttas. Därmed kan målet skyddas så att pucken inte går in samt att pucken kan skjutas tillbaka mot motståndaren. För att det ska vara möjligt måste också metoder tas fram för att förflytta klubban fysiskt. Det förekommer därför problem inom områden som programmering, konstruktion och reglerteknik.

För att summera uppgiften måste följande delmoment lösas:

- Lokalisera objekt på spelplan
- Beräkna puckens framtida position
- Förflytta klubban
- Utforma prototypens spelstrategi

1.4 Krav och önskemål

Nedan listas övergripande krav och önskemål för prototypen medan en komplett kravspecifikation finns i appendix A. Resultat av krav och önskemål finns i appendix D.

Krav:

- Prototypen ska klara av att blockera pucken 300 *mm* från klubbans startposition när pucken rör sig i 2 *m/s* och utgår från motsatt planhalva. (K.1.1)
- Bordet ska gå att fälla ihop tillsammans med prototypen. (K.8.3)
- Prototypens dimensioner monterad på bordet får ej överstiga 2 *m* hög, 1 *m* bred och 1,1 *m* djup. (K.8.1)
- Prototypen ska gå att montera isär. (K.6.1)
- Prototypen ska ha en livslängd på minst 3 år. (K.7.1)

Önskemål:

- Prototypen bör klara av att blockera pucken 40 *mm* från klubbans startposition när pucken rör sig i 8 *m/s* och utgår från andra planhalvan. (Ö.1.1)
- Prototypen bör kunna ställas in på olika strategier. (Ö.1.2)
- Prototypen bör kunna göra mål. (Ö.1.3)
- Prototypen bör enkelt gå att starta upp utan att inställningar eller kalibrering behöver göras. (Ö.1.4)

1.5 Avgränsningar

Följande avgränsningar har införts:

- På grund av budget och tidsram begränsas projektet till att endast en mekatronisk spelare konstrueras. Spelet kräver alltså en mänsklig motståndare.
- Det kommer krävas mänsklig interaktion för att få upp pucken ur målet om prototypen skulle släppa in den.
- Lösningen kommer vara specialanpassad för ett bestämt air-hockeybord med yttermåtten $1472\text{ mm} \times 736\text{ mm}$. Det kommer därför inte vara möjligt att använda lösningen på air-hockeybord av annan storlek utan omkonstruktion.
- Lösningen kommer vara utvecklad för att fungera under ett specifikt ljusförhållande och tar därför inte hänsyn till andra förhållanden.
- Ingen hänsyn tas till att puck och klubba ska hållas omodifierade.

1.6 Översikt av kapitel

Här ges en kort sammanfattning över vad som behandlas i vardera kapitel av rapporten.

Kapitel 2, Konceptbeskrivning förklarar hur prototypen är konstruerad och ett antal begrepp och namn på komponenter introduceras.

Kapitel 3, Konstruktion av passiva komponenter ger en detaljerad beskrivning på hur den passiva delen av prototypen konstrueras och det redogörs för materiaval.

Kapitel 4, Bildbehandling beskriver vald kamera och de metoder som används för att hämta ut relevant data.

Kapitel 5, Drivning av aktuatorer motiverar komponentval och beskriver hur drivningen av aktuatorerna utförs.

Kapitel 6, Spelstrategi beskriver hur strategin för prototypen är utförd. Beräkningar och finjusteringar som är gjorda presenteras också.

Kapitel 7, Verifiering presenterar de tester som görs på prototypen och resultatet av dessa.

Kapitel 8, Diskussion behandlar resultatet av projektet och möjliga vidarutvecklingsområden. Hur väl krav och önskemål uppfylls diskuteras samt förändringar föreslås. Det utförs även en kort miljöreflektion.

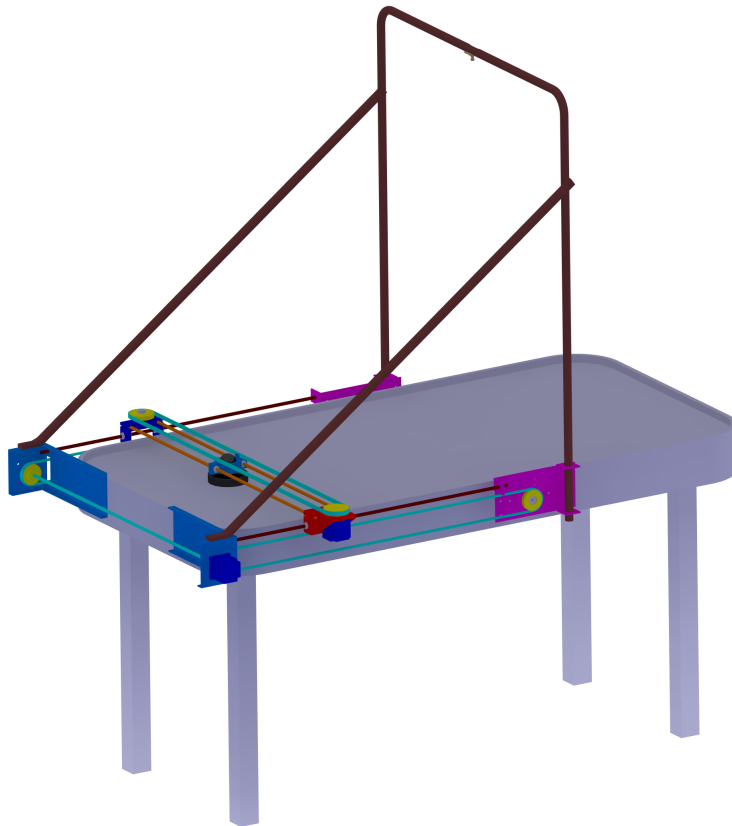
Kapitel 9, Slutsats sammanfattar syftet med rapporten och beskriver kort hur väl resultatet av projektet uppfyller syftet och om vad som hade kunnat vara framtida utvecklingsområden.

2. Konceptbeskrivning

Kapitlet ger en överblick och grundläggande förklaring av det valda konceptet samt dess funktion. Här introduceras också ett par begrepp och namn på komponenter som används i rapporten.

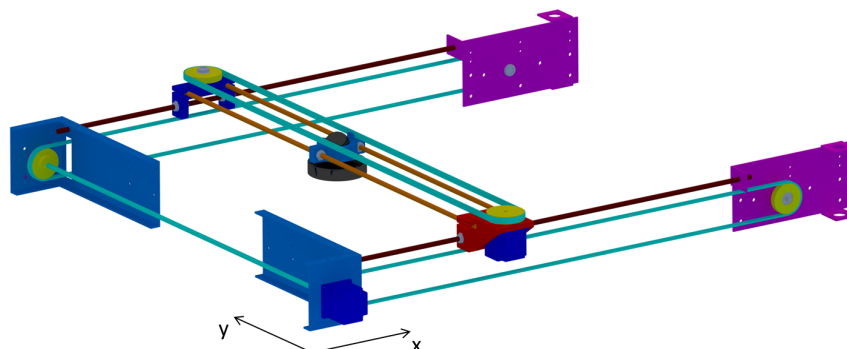
2.1 Beskrivning av det mekaniska konceptet

Det mekaniska konceptet består av två stycken remdrivna linjäraaktuatorer vars uppgift är att förflytta klubban. En beskrivning av linjäraaktuatorerna ges senare i detta avsnitt. I figur 2.1 visas hur de två remaktuatorerna monteras på bordet.



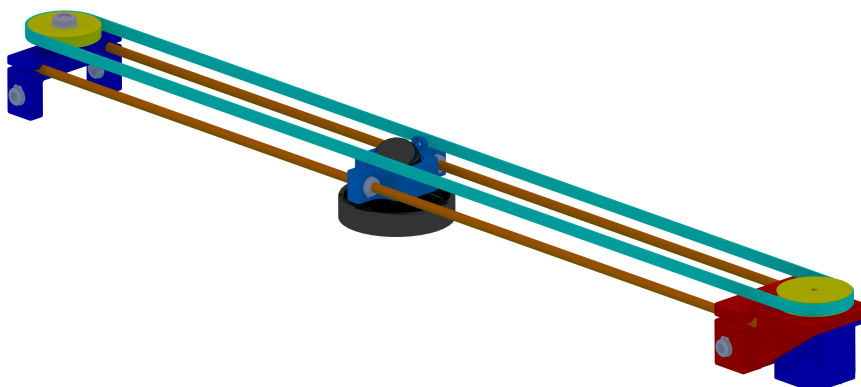
Figur 2.1: Bild på konceptet med bägge aktuatorerna, kameran och dess kameraställ monterat på bordet.

De två remdrivna linjäraktuatorerna samverkar och sköter rörelser i två led längs spelplanens långsida, x-led, samt längs spelplanens kortsida, y-led. För att åstadkomma detta monteras aktuatorerna ovanpå varandra, där den övre förflyttar klubban i y-led och den undre förflyttar den övre aktuatoren i x-led. På så sätt möjliggörs förflyttning av klubban i två led. I figur 2.2 åskådliggörs de två aktuatorerna ihopmonterade och hur x- respektive y-led är definierade.



Figur 2.2: Bild på de två remdrivna linjäraktuatorerna ihopmonterade samt en definition av koordinataxlarna.

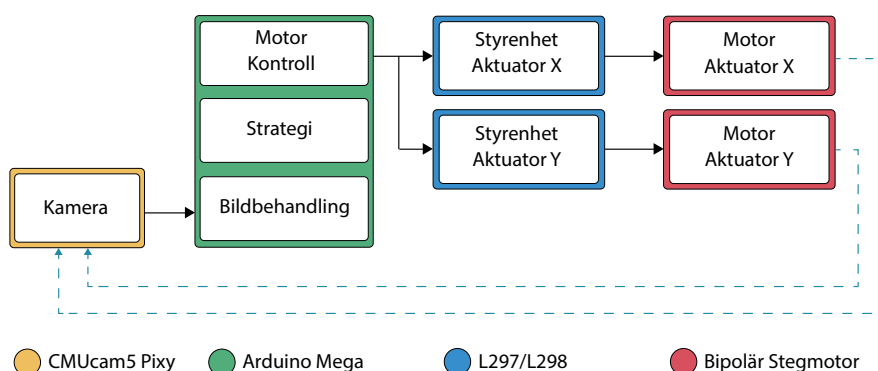
Varje linjäraktuator består av en stegmotor som driver remhjulen med tillhörande rem. Remmen fästs i den komponent som ska förflyttas, vilket i fallet med den övre aktuatoren som visas i figur 2.3 är klubbhållaren. Klubbhållaren är den komponent som omsluter klubban och fäster den i aktuatoren. En rotation på remhjulet medför att klubbhållaren med klubba förflyttas linjärt längs skenorna på vilka hållaren glider.



Figur 2.3: Bild på den övre aktuatoren som förflyttar klubban i y-led. Här syns hur den blåa motorn nere till höger driver remhjulen med tillhörande rem som är fäst i den ljusblå klubbhållaren mitt i bilden. Klubbhållaren förflyttas linjärt längs de bruna stängerna

2.2 Beskrivning av det elektroniska konceptet

Det elektroniska konceptet består av en mikrokontroller, en kamera och 2 *st* stegmotorer med tillhörande styrenheter. I figur 2.4 visas en överblick för hur de elektroniska komponenterna samverkar. Heldragna linjer är elektroniska signaler från kameran till motorerna. Streckade linjer motsvarar den visuella återkopplingen som kameran gör av klubbhållarens position.



Figur 2.4: Översikt av prototypens gränssnitt där varje komponenttyp representeras av en särskild färg. Heldragen pil visar en elektronisk signal medan de streckade representerar att information hämtas visuellt.

Mikrokontrollern beräknar vart klubban ska förflyttas baserat på data från kameran som är monterad rakt ovanför bordet på en ställning. I figur 2.1 illustreras hur kameran och ställningen är monterade på bordet. Mikrokontrollern sköter spelstrategi och styrlogiken för motorerna. Det är också här algoritmerna för att beräkna puckens framtida position är lagrade. Styrenheterna driver motorerna för att positionera aktuatorerna till önskat läge.

3. Konstruktion av mekaniskt koncept

Följande kapitel redogör för den mekaniska konstruktionen i detalj. Komponent- och materialval samt tillverkningsmetoder redovisas.

3.1 Val av mekaniskt koncept

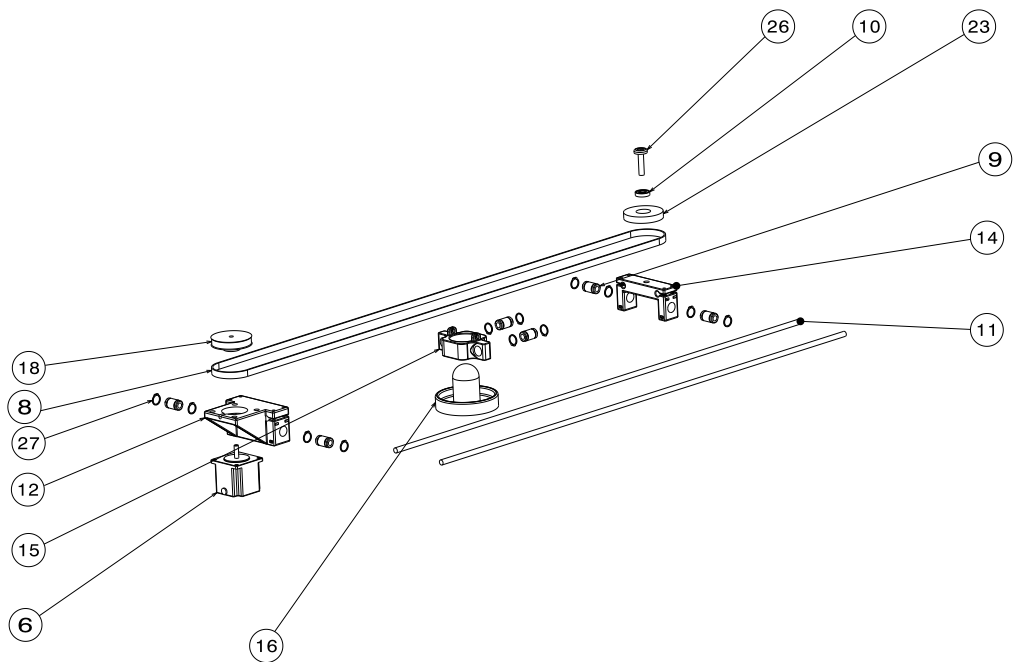
Det valda mekaniska konceptet består, som tidigare nämnts i kapitel 2, av två remdrivna linjäraktuatorer som sköter förflyttningen i x- och y-led samt ett kameraställ som positionerar en kamera över spelplanen. Detta koncept möjliggör förflyttning av klubban med hög hastighet, noggrannhet och repeterbarhet. Alternativa men bortvalda koncept är en kulskruvsaktuator, en kedjedriven linjäraktuator och en tvåledad robotarm. Mer information om dessa koncept och dess fördelar och nackdelar finns i appendix B.

3.2 Detaljkonstruktion av mekaniskt koncept

I följande avsnitt presenteras det mekaniska konceptets tre delkonstruktioner i detalj; den övre aktuatoren, den undre aktuatoren samt kamerastället. Avgörande val presenteras och motiveras också samt sprängskisser på de ingående delarna i varje delsystem.

3.2.1 Övre aktuatoren, y-led

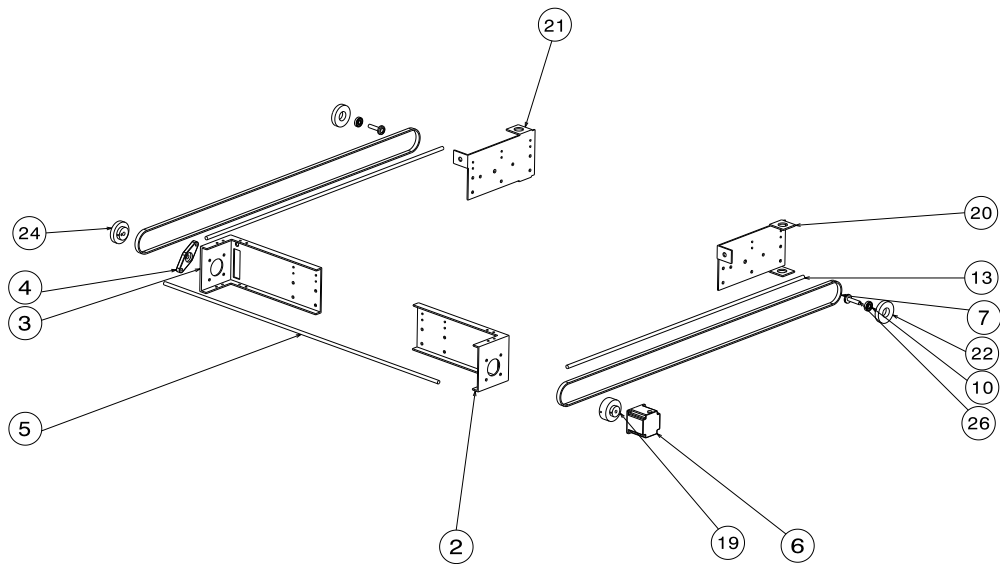
Den övre aktuatoren är en linjäraktuator med en kuggrem spänd mellan två stycken kuggremshjul, se figur 3.1. Ett kugghjul är fritt lagrat på ena sidan av spelplanen. Det andra är fast monterat på axeln till en stegmotor på andra sidan av spelplanen. Klubbhållaren som för klubban runt på spelplanen är fäst i remmen. Klubbhållaren glider med hjälp av kulbussningar längs två axlar som är fästa mellan aktuatorns ändklossar. En kulbussning är ett kullager som möjliggör linjära rörelser längs en axel.



Figur 3.1: Sprängskiss på den övre aktuatoren med alla ingående komponenter numrerade enligt komponentlistan i appendix C.

3.2.2 Undre aktuatoren, x-led

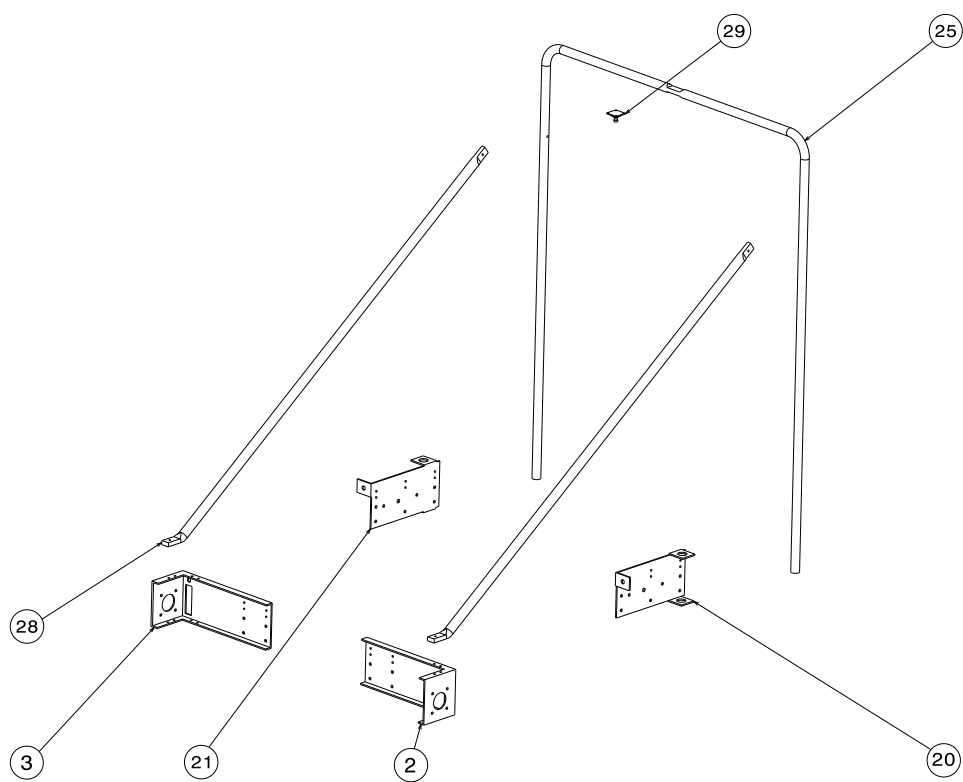
Den undre aktuatoren är byggd på samma princip som den övre, med en kuggrem spänd mellan två kuggremshjul. Skillnaden är dock att motorn driver två remmar, där kugg-hjulsparen sitter på varsin sida av bordet och de drivande hjulen är sammankopplade med en axel vilken är fäst i stegmotorns drivaxel. Detta kan ses i figur 2.2 och 3.2. Den undre aktuatoren driver hela den övre fram och tillbaka i x-led. För att möjliggöra denna förflyttning är även den övre aktuator lagrad med hjälp av kulbussningar mot den undre aktuatorns skenor. Den undre aktuatoren är konstruerad så att den förflyttar båda sidorna av den övre aktuatorn samtidigt vilket minimerar skeva belastningar på konstruktionen.



Figur 3.2: Sprängskiss på den undre aktuatoren med alla ingående komponenter numrerade enligt komponentlistan i appendix C.

3.2.3 Kameraställ

Kameraställets syfte är att hålla uppe kameran på en bestämd höjd över air-hockeybordets mitt. Den slutliga lösningen är ett enkelt kameraställ byggt av 20 mm VP-rör, det vill säga ihåliga rör gjorda av plasten PVC. I figur 3.3 visas de delar kamerastället består av och hur VP-rören skruvas ihop.



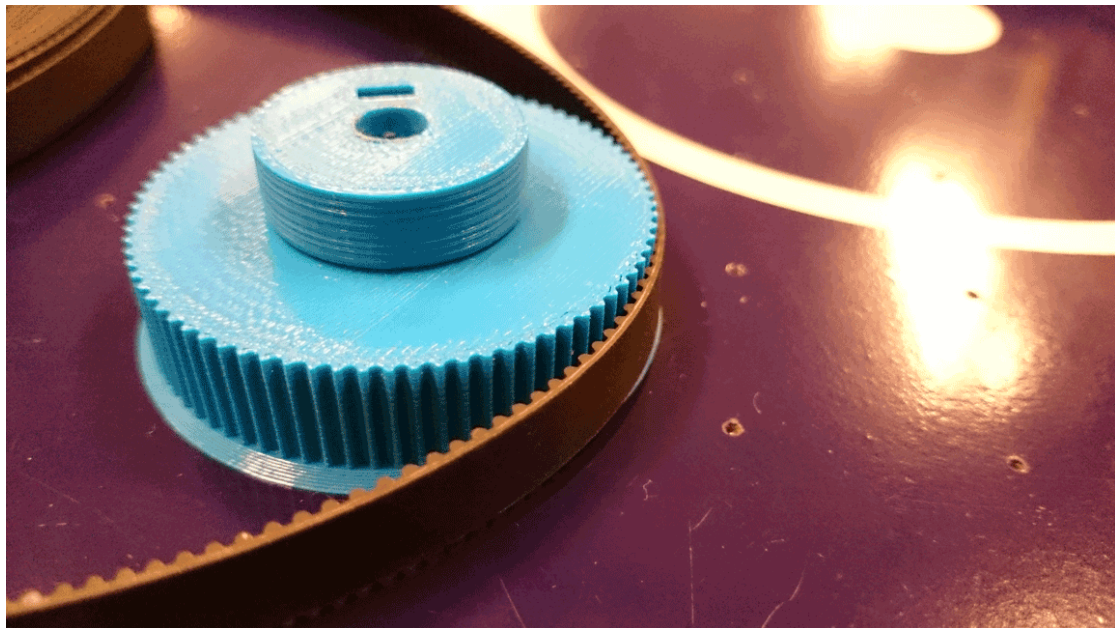
Figur 3.3: Sprängskiss på kamerastället med alla ingående komponenter numrerade enligt komponentlistan i appendix C.

3.3 Val av mekaniska komponenter

Följande avsnitt redogör för val av de komponenter som används i det mekaniska konceptet. Dessa komponenter innefattar remhjul, rem, lager samt skenor.

3.3.1 Remhjul och rem

För att driva linjäraktuatorerna används kuggremmsdrift med en kuggprofil som kallas GT2, [1]. Denna profil ger bra grepp och minimerar slirning och är därför vanlig i 3D-skrivare, [2]. I figur 3.4 kan GT2-profilen ses, notera hur tänderna är rundade vilket skiljer sig en vanlig kuggrem där kuggarna har en kantigare profil.



Figur 3.4: Kuggrem och kughjul med GT2 kuggprofil.

Vid konstruktion av remhjul används verktyget "Parametric pulley - lots of tooth profiles" vilket är tillgängligt via 3D-printertillverkaren Makerbots community "Customizer", [3].

3.3.2 Lager

I konstruktionen används två sorters lager, radiallager och linjärlager. Radiallagerna är spårkullager av modell 608 ZZ med en innerdiameter på 8 mm och en ytterdiameter på 22 mm. Detta är samma typ som används för skateboards och inlines, [4] [5], vilket borgar för beprövade lager av hög kvalitet med god tillgänglighet och lågt pris. Spårkullagerna används för att lagra drivna remhjul samt drivaxeln som sammankopplar de båda sidorna av den undre aktuatoren.

Linjärlagerna är kulbussningar av modell LM8UU med en innerdiameter på 8 *mm* och en ytterdiameter på 15 *mm*, [6]. De används ofta till 3D-skrivare vilket medför god tillgänglighet och lågt pris, [7]. Kulbussningarna används för att lagra de aktuatorerna driver. För den övre aktuatorns fall är det klubbhållaren och för den undre aktuatorn är det den övre aktuatorn.

3.3.3 Skenor

Längs skenorna glider kulbussningar, se avsnitt 3.3.2, vilket ställer krav på skenorna och materialet de är tillverkade av. Kulbussningarna avgränsade valet till runda skenor, antingen ihåliga eller solida. Eftersom kulbussningarna har en innerdiameter på 8 *mm* avgränsar det val av axel till 8 *mm* i diameter. Utöver detta ställs följande krav:

- Den undre aktuatorns skenor ska kunna bära vikten av den övre aktuatorn med mindre än 5 *mm* utböjning.
- Ytan på skenorna ska vara tillräckligt jämn för att kulbussningarna ska fungera.
- Skenornas yta ska inte slitas ner av kulbussningarna under prototypens livslängd.

Utöver de kraven ska följande saker optimeras:

- Vikten ska minimeras för att minska massan som ska accelereras, gäller den övre aktuatorn.
- Livslängden ska vara så lång som möjligt.

Materialalternativ för axlarna är aluminium, silverstål, plast och kolfiber. Silverstål är solida axlar av slipat verktygsstål, [8]. Plast, kolfiber och aluminium fungerar inte på grund av att deras yta riskerar att skadas av kulbussningarna vilket i längden kan medföra att kulbussningarna inte fungerar på den ojämna ytan. Valet faller alltså på silverstål, detta trots dess relativt höga vikt i relation till de övriga alternativen.

För att de valda axlarna säkert ska klara av kravet på utböjning utförs en approximativ beräkning på utböjningen. Vikten för den övre aktuatorn approximeras till 1,5 kg, vilket är mer än den verkliga vikten. Samtidigt fördelas hela aktuatorns vikt på en av axlarna för att få en god säkerhetsmarginal. Utböjningen p hos en fast och glidinspänd balk ges enligt, [9]:

$$p = \frac{PL^3}{3EI} \alpha^3 \beta^3 \quad (3.1)$$

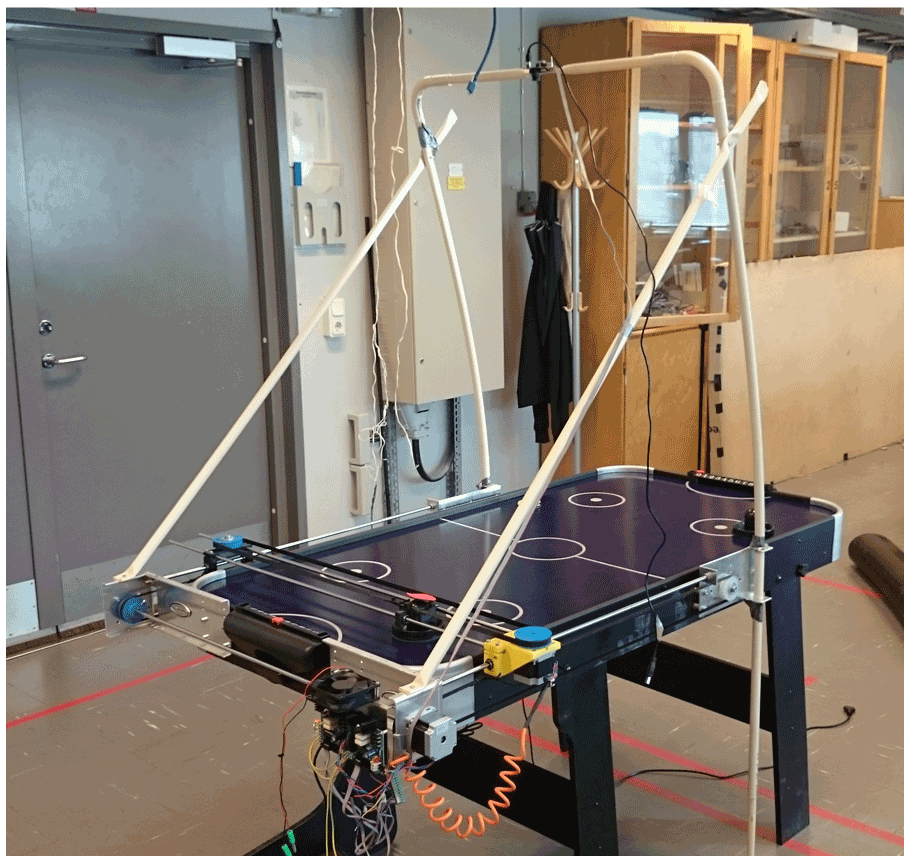
där P är den applicerade kraften, L är axelns längd, E är materialets elasticitetskonstant, I är axelns yttröghetsmoment, α är hur stor del av axeln som är från ena änden av axeln till kraftens angreppspunkt och β är förhållandet från andra änden till kraftens angreppspunkt. Detta ger en maximal utböjning på 1,9 *mm* då aktuatorn befinner sig vid mitten av axeln.

3.4 Tillverkning av det mekaniska konceptet

En prototyp av det färdiga konceptet, vilken kan ses i figur 3.5, är framställd med hjälp av personal och utrustning i Chalmers prototypplabb. Alla specialritade delar till projektet undantaget plåtarna är tillverkade av ABS-plast med hjälp av en 3D-skrivare. Anledningen till att denna tillverkningsprocess valts är att det är ett ekonomiskt och lättillgängligt alternativ samtidigt som det ger stor frihet kring vilka former som kan skapas.

Kamerastället är tillverkat av VP-rör vilka formas genom att värma upp dem med en värmepistol. Rören skruvas ihop och för att få vinklar används färdiga rörböjar vilka trycks på rören. Stället är fäst på aktuatorernas plåtar med skruv och tejp.

Plåtarna i konstruktionen är vattenskurna ur 3 mm aluminiumplåt och bockade med en CNC-styrd bockningsmaskin. CNC-styrd bockning och vattenskarvning ger en mycket hög precision i kombination med bra tidseffektivitet.



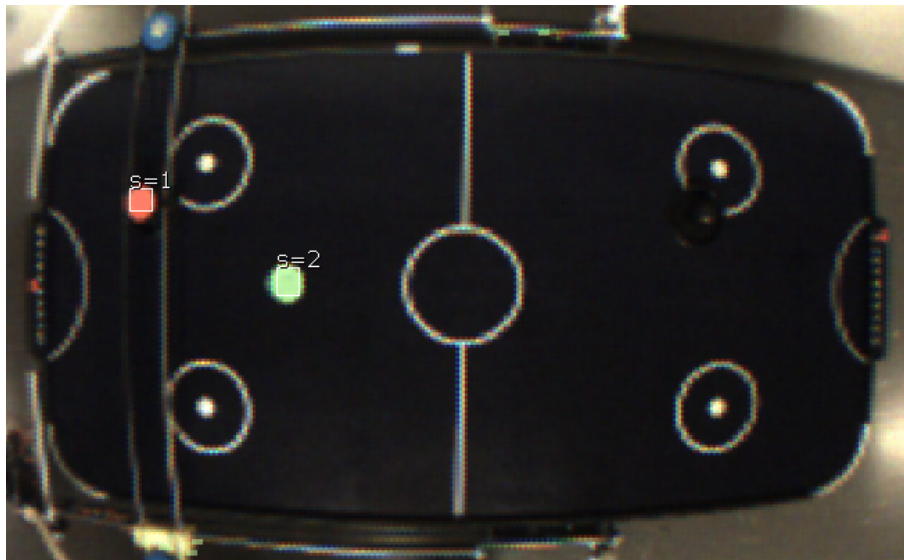
Figur 3.5: Den färdiga prototypen monterad på spelbordet.

4. Lokalisering av objekt på spelplan

Följande kapitel redogör val av kamera för att identifiera spelobjekt samt förklaringar av de metoder som används för att hämta ut relevant data för vidare användning.

4.1 Egenskaper hos vald kamera

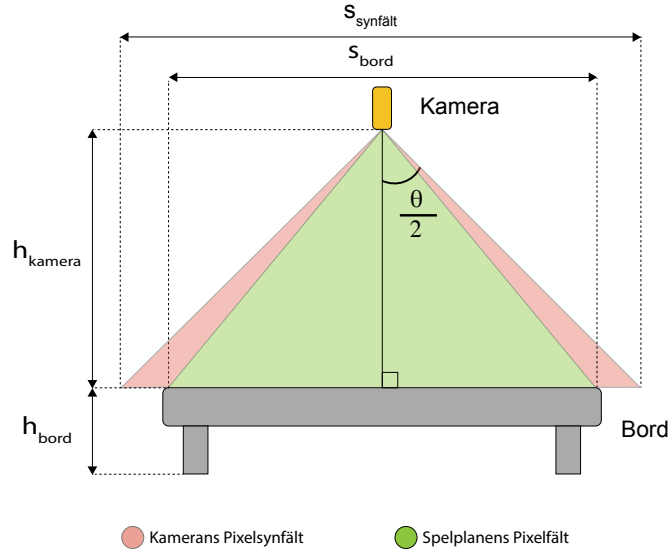
Den valda kameran är en CMUcam5 Pixy som har en dedikerad beräkningsenhet för att lokalisera objekt, [10]. Kameran identifierar objekt genom att urskilja färger från omgivningen och därmed kan olika objekt på spelplanen identifieras. Detta görs genom att användaren programmerar in en valfri färg vilket kameran sparar. Genom att använda olika färgmarkörer på puck och klubba kan föremålen därför följas vilket illustreras i figur 4.1. Fullständiga specifikationer för kameran går att finna i appendix E.



Figur 4.1: Bild över spelplan där kameran observerar två olika objekt. Rött objekt med $s=1$ är klubban som prototypen använder medan det gröna objektet med $s=2$ är pucken som används i spelet.

4.2 Placering av kamera

Kameran är monterad på en ställning vilken beskrivs närmare i avsnitt 3.2.3. Vid val av placering av kameran spelar aspekter som bordets storlek, lensens bildvinkel samt kamerans upplösning roll. Då kamerans bildförhållande är 16:10 medans bordets är 20:10 blir alltså den horisontella synen den kritiska. Figur 4.2 visar kamerans synfält då den är placerad över ett bord med kamerans bildvinkel θ , sträckan över bord s_{bord} , samt kamerahöjd h_{kamera} visas. Bordets höjd, h_{bord} är bestämt från det inköpta bordet och $s_{synfalt}$ är den totala längden på synfältet.



Figur 4.2: Placering av kamera över bord där kamerans synfält över bordet visas.

Ur figur 4.2 är ekvation 4.1 framtagen där den lägsta höjden för att kunna se hela spelplanen kan tas fram:

$$h_{kamera} = \frac{s_{bord}}{2 \cdot \tan(\frac{\theta}{2})} \quad (4.1)$$

där insättning av horisontell bildvinkel θ som är 75° och bordets längd L_{bord} som är 1448 mm i s_{bord} ges en höjd på 943 mm . För att ha en viss marginal och för att möjliggöra användning av eventuella objekt runt planen höjs kameran till 1030 mm över spelplanen. Kamerans synfält på denna höjd visas i figur 4.1.

Enligt ekvation 4.1 med insättning av horisontell bildvinkel θ , med värdet 75° och bordets längd, L_{bord} som s_{bord} med värdet 1448 mm fås ett horisontellt synfält, $L_{synfalt}$, på 1580 mm . Med insättning av vertikal bildvinkel θ , 47° , bordetslängd, 712 mm fås det vertikala synfältet, $B_{synfalt}$, på 896 mm för den valda höjden.

Ur ekvationen kan det också ses att användning av en annan lins ändrar höjdkravet och kamerans synfält. Vid den valda höjden på 1030 mm och kameraupplösning på $320 \times 200 \text{ pixlar}$ fås antalet pixlar som representerar spelplanen av:

$$\text{AntalPixlarPlanX} = 320 \cdot \frac{L_{bord}}{L_{synfalt}} \quad (4.2)$$

$$\text{AntalPixlarPlanY} = 200 \cdot \frac{B_{bord}}{B_{synfalt}} \quad (4.3)$$

där pixlar som representerar planen i x-led och y-led fås till 293 respektive 159. Vid den valda höjden på 1030 *mm* och kameraupplösning på 320x200 *pixlar* motsvarar en pixel i medel den teoretiska storleken 4,9 x 4,5 *mm* enligt:

$$pixelbredd = \frac{L_{bord}}{AntalPixlarPlanX} \quad (4.4)$$

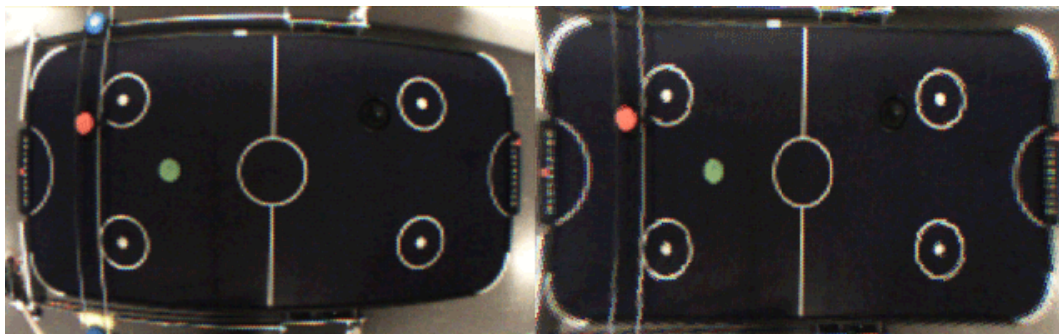
$$pixelhojd = \frac{B_{bord}}{AntalPixlarPlanY} \quad (4.5)$$

där *AntalPixlarPlanX* är 293 och *AntalPixlarPlanY* är 159. Antagandet av en konstant pixelstorlekt är en förenkling då ytan som täcks av en pixel ökar med avståndet från kameran på grund av den sfäriska linsen.

4.3 Optiska problem och korrigering av koordinater

Med den medföljande kameran uppstår en sfärisk förvrängning av bilden vilket innebär att pixelytan varierar över spelplanen, vilket syns i kanterna på den vänstra bilden i figur 4.1. Problemet ligger i att när bilden tas så förvrängs ljuset genom den sfäriska linsen vilket leder till att större avvikelser i position förekommer desto längre bort från mittpunkten som observationen görs, [11]. Fördelen med linsen är att dess stora bildvinkel θ gör att hela bordet syns från relativt låg höjd vilket kan ses i ekvation 4.1.

En korrigering för att kompensera förvrängningen görs i syfte att öka noggrannheten med vilken ett objekts position kan fastställas och att en förflyttning enklare kan beräknas. För detta används en algoritm som transformerar de förvrängda koordinaterna. Genom att använda bilden över spelplanen, se bild till vänster i figur 4.3, kan en förvrängning uppskattas genom testning av olika värden i ekvationerna 4.6-4.9. Resultatet visas i högra bilden i figur 4.3 där en klar förbättring går att urskilja. Kameran ser fortfarande enligt den vänstra bilden där den högra representerar det koordinatsystem som används.



Figur 4.3: Vänster: bild över spelplanen vid vald kamerahöjd, höger: bild över spelplanen efter att korrigering av koordinater utförts.

Följande steg används för att transformera positionen där avståndet till objektet från mitten, r_{dest} först räknas ut som:

$$r_{dest} = \sqrt{x_{objekt}^2 + y_{objekt}^2} \quad (4.6)$$

där x_{objekt} är avståndet i x-led till objektet och y_{objekt} är avståndet i y-led. r_{dest} blir således avståndet från kamerans mittpunkt till objektet vars position ska transformeras. Det transformerade avståndet r_{src} approximeras som:

$$r_{src} = a \cdot r_{dest}^4 + b \cdot r_{dest}^3 + c \cdot r_{dest}^2 + d \cdot r_{dest} \quad (4.7)$$

där variablerna a, b, c och d testades fram för att få ett nytt koordinatsystem [11]. Den korrekta positionen ($x_{korrekt}, y_{korrekt}$) kan således tas fram ur förhållandet mellan avstånden r_{dest} och r_{src} :

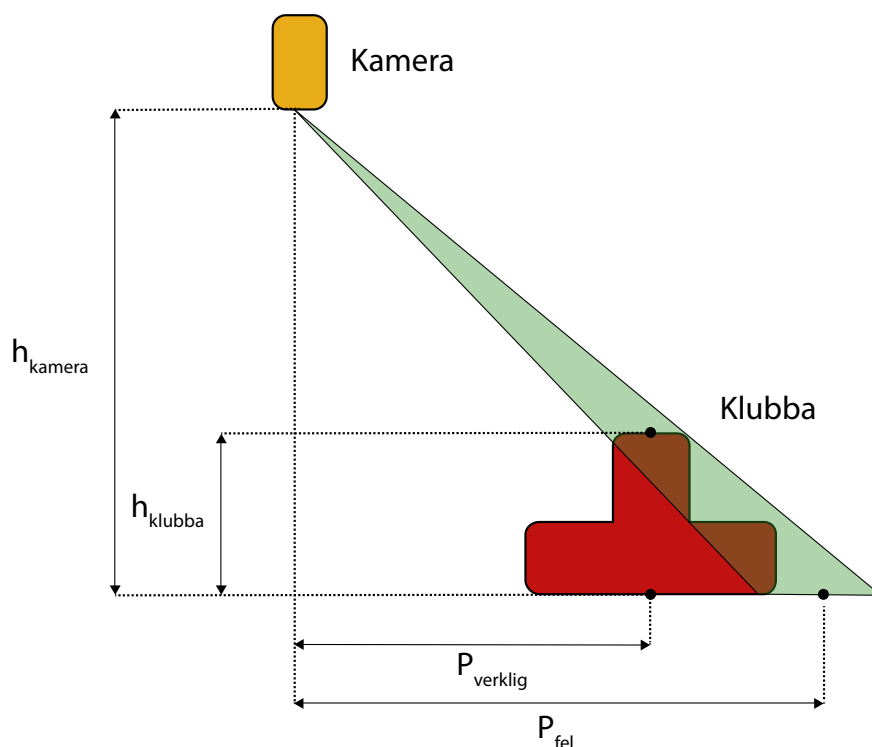
$$x_{korrekt} = x_{objekt} \cdot \frac{r_{dest}}{r_{src}} \quad (4.8)$$

$$y_{korrekt} = y_{objekt} \cdot \frac{r_{dest}}{r_{src}} \quad (4.9)$$

Efter beräkningen är storleken på bilden inte i samma skala och uppmätning ger en storlek på $4,9 \times 3,8 \text{ mm/koordinat}$ i det nya koordinatsystemet som antar värden mellan $0-200 \times 0-320$.

4.4 Korrigering av klubbans position

För att veta var prototypens klubba befinner sig används kameran för att säkerhetsställa positionen. En färgmarkering fästs därför uppe på klubban för att möjliggöra identifiering av dess position. Då klubbans höjd inte är försumbar ovanför bordet innebär det att en felaktig position hämtas från kameran då klubban befinner sig på en annan plats på bordet än precis under kameran, se figur. 4.4

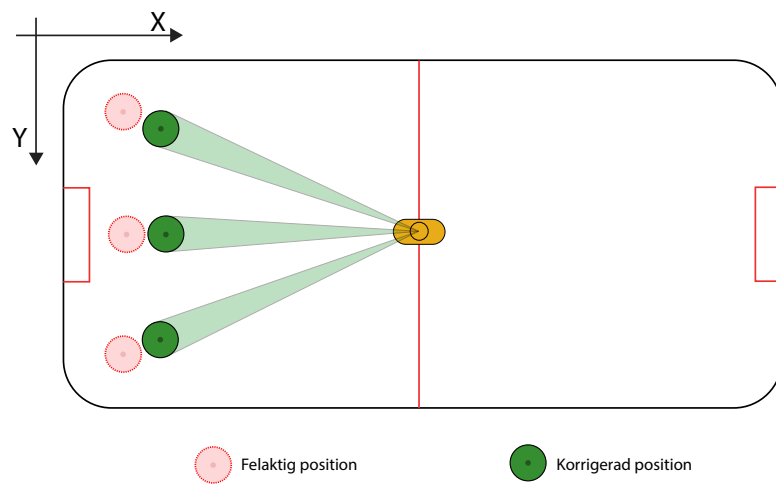


Figur 4.4: Illustration av hur en position kan bli felaktig beroende av ett objekts höjd. Kamera ser inte höjdvariationer vilket därför måste korrigeras.

Med hjälp av matematiska samband för likformighet vilka kan appliceras på figur 4.4 kan positionen i x- samt y-led korrigeras till $P_{verklig}$ enligt:

$$P_{verklig} = p_{fel} - \frac{p_{fel}}{h_{kamera}} \cdot h_{klubba} \quad (4.10)$$

där p_{fel} är den position kameran upplever, h_{kamera} är kamerahöjden och h_{klubba} är klubbans höjd. Utan korrigering kan klubbans position från kameran maximalt avvika med 55 mm i x-led samt 23 mm i y-led jämfört med dess verkliga position, enligt ekvation 4.10, där klubbans höjd är 70 mm och klubbgraden är 45 mm . I figur 4.5 visas effekten av den beskrivna korrigeringen.



Figur 4.5: Visuell representation över bordet med den felaktiga positionen för klubban som uppstår utan korrigering. Röd motsvarar den enligt kameran upplevda positionen och grön motsvarar den korrigerade positionen.

5. Val och styrning av motorkomponenter

Följande kapitel beskriver hur drivningen av prototypen utförs. Komponentval redovisas med en förklaring till hur komponenterna används.

5.1 Val av motorer

Följande avsnitt redogör för valet av motorer och hur relationen mellan remhjul och motorer påverkar prototypens prestanda.

5.1.1 Typ av motor

Stegmotorer väljs då dessa är lätta att styra och kan positioneras med hög precision. Nackdelen med stegmotorer är att de är dyra i förhållande till det vridmoment de producerar och behöver dyra styrenheter för att fungera. Stegmotorerna som används i konstruktionen behöver ett högt vridmoment vid hög hastighet som mäts i pulser per sekund, vilket förkortas *pps*.

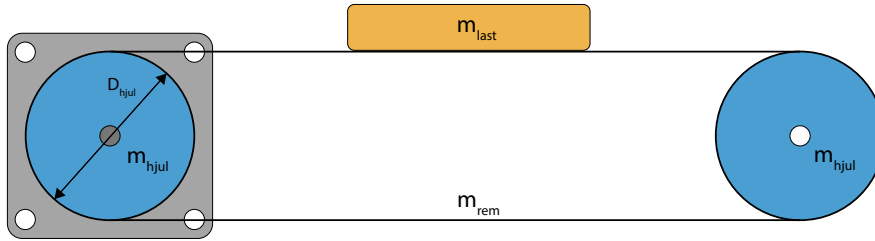
5.1.2 Val av remhjulsdiameter

Remhjulsdiametern väljs efter 2 olika parametrar, den passiva konstruktionen och stegmotorers preferens. Stegmotorer behöver en hög remhjulsdiameter för att få upp hastighet på remmen men samtidigt inte för hög då dess vridmoment inte klarar av det.

Konstruktionen tillåter hjul av olika storlekar där en preferens på 51 *mm* för hjulen på undre aktuatoren gavs då detta passade bra vid design av plåtarna. Då den övre aktuatoren ska driva en lägre vikt än den undre valdes detta hjul till 60 *mm* då detta gör att hastigheten går att få upp mer på denna aktuator.

5.1.3 Dimensionering av motorer med vald remhjulsstorlek

Då remhjulsdiametrarna är valda till 51 *mm* för x-axeln och 60 *mm* för y-axeln utförs beräkningar för att bestämma en lämplig motor för de valda remhjulsdiametrarna. Detta görs genom en beräkning med hjälp av ekvation 5.1 till 5.8, [12]. Lasten för övre aktuatorn motsvarar klubbhållare med klubba. Lasten för undre aktuatorn motsvarar vikten på alla delar som ingår i övre aktuatorn, se figur 2.3. Beräkningarna utförs för både motorn för den undre aktuatorn och den övre. Resultatet av dessa beräkningar visas i figur 5.2 där tiden som används för förflyttning av klubban är 60 *ms*. I figur 5.1 visas de vikter som används vid beräkning av tröghetsmoment i ekvationerna nedan.



Figur 5.1: De massor hos aktuatoren som påverkar tröghetsmomentet.

För att beräkna aktuatorns totala tröghetsmomentet J_{tot} adderas samtliga trögheter som påverkar aktuatoren, detta ges av ekvationen:

$$J_{tot} = J_{last} + J_{hjul} + J_{rem} + J_{motor} \quad (5.1)$$

där J_{last} är det tröghetsmoment som tillförs av lasten, J_{hjul} är remhjulens tröghetsmoment, J_{rem} det tröghetsmoment som tillförs av remmen och J_{motor} är motorns inre tröghetsmoment.

Vid beräkning av J_{last} används:

$$J_{last} = \frac{1}{4} \cdot m_{last} D_{hjul}^2 \quad (5.2)$$

där m_{last} är massan av lasten och D_{hjul} är diametern på remhjulet.

J_{hjul} beräknas med hjälp av ekvationen:

$$J_{hjul} = \frac{1}{8} \cdot n_{hjul} m_{hjul} D_{hjul}^2 \quad (5.3)$$

där m_{hjul} är massan för ett remhjul och n_{hjul} är antalet remhjul drivna av motorn.

För att beräkna J_{rem} används ekvationen:

$$J_{Rem} = \frac{1}{4} \cdot m_{rem} D_{hjul}^2 \quad (5.4)$$

där m_{rem} är vikten av remmen.

Den undre aktuatoren använder även en axel som (drivning) och har därför ett extra tröghetsmoment som adderas till i J_{tot} . Detta tröghetsmoment är J_{axel} som beräknas enligt:

$$J_{axel} = \frac{1}{4} \cdot m_{axel} D_{axel}^2 \quad (5.5)$$

där m_{axel} är vikten av axeln och D_{axel} är diametern av axeln.

Motorns inre tröghetsmoment J_{motor} hämtas ur motorns datablad, [13].

Topp hastigheten v_{max} som behöver uppnås vid acceleration med antagandet att accelerationen är konstant beräknas enligt:

$$v_{max} = \frac{2s}{t} \quad (5.6)$$

där s är sträckan klubban ska förflyttas och t är tiden det ska ske under.

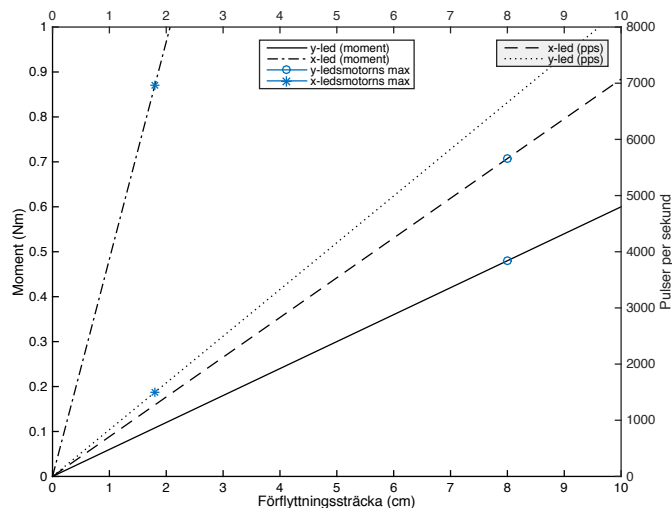
Topp hastigheten omvandlas till vinkelhastigheten ω_1 för att kunna beräkna vridmomentet utifrån det totala tröghetsmomentet enligt:

$$\omega_1 = \frac{2\pi v_{max}}{\pi D_{hjul}} \quad (5.7)$$

vilket sedan används för att beräkna vridmomentet T_{acc} . T_{acc} är det vridmoment som krävs av vardera motor för att uppnå den önskade hastigheten och beräknas enligt:

$$T_{acc} = 2J_{tot} \cdot \frac{\omega_1 - \omega_0}{t} \quad (5.8)$$

där ω_0 är starthastigheten, vilket motsvarar 0 i detta fall.



Figur 5.2: Det moment som krävs av motorerna vid olika förflyttningssträckor för den undre och övre motorn. De utsatta markörerna motsvarar hur väl den valda motorn presterar.

Den motor som väljs beskrivs i appendix, E där de fyra punkterna som är utmarkerade i figur 5.2 representerar hur väl denna motorn presterar för de båda leden. De två stjärnorna motsvarar den maximala sträcka som motorn som styr den undre aktuatoren kan förflytta sig på 60 *ms*. Den undre aktuatoren kan alltså förflyttas nästan 20 *mm* på denna tid. Ringarna motsvarar den maximala sträcka som motorn som styr den övre aktuatoren kan förflytta sig på 60 *ms*. Den övre aktuatoren kan alltså förflyttas cirka 80 *mm* på denna tid. Tiden 60 *ms* är använd då prototypen gavs 100 *ms* på sig att förflytta klubban till kollisionspunkten för pucken längs baslinjen och det tar maximalt 40 *ms* för kameran att ta fram denna punkt. 100 *ms* motsvarar att pucken åker i cirka 8 *m/s* vilket kommer från önskemål (Ö.1.1).

5.2 Styrning av aktuatorer

I detta avsnitt redogörs valet av styrenheter med en förklaring till hur positionering och acceleration utförs. Även kommunikationen mellan mikrokontrollerna och styrenheten förklaras.

5.2.1 Styrenhet

För att styra aktuatormotorerna i x- och y-led används två identiska drivkretsar som beskrivs mer ingående i appendix E [14]. Varje enhet kontrolleras av 2 *st* logiska signaler från mikrokontrollern, *Riktning* och *Steg*. Där en digital puls på *Steg* förflyttar motorn ett steg åt önskad håll satt av *Riktning*. Styr signaler mellan mikrokontrollern och stegmotorernas styrenheter se figur 2.4 sänds via mikrokontrollens digitala I/O utgångar.

5.2.2 Positionering av aktuatorer

För att förflytta motorn ett varv krävs det 400 steg vilket betyder att ett steg motsvarar 0,9°. Ett steg består av att styrenheten tar emot en puls bestående av en fyrkantsvåg som skickar vidare denna puls till motorn. Motorn som sitter på den undre aktuatoren har som tidigare nämnts ett remhjul med diameter 51 *mm* vilket medför att den övre aktuatoren förflyttas 0,40 *mm* i x-led varje steg som skickas till den.

Den motor som sitter på den övre aktuatoren har ett remhjul med diameter 60 *mm* vilket medför att klubban förflyttas 0,47 *mm* i y-led för varje steg som skickas till den.

Stegen skickas till motorstyrenheterna från arduionon när det bestäms en önskad position för klubban. Det fortsätts att skickas steg tills styrenheterna har mottagit rätt mängd pulser från arduionon som därefter väntar till nästa kommando skickas till styrenheterna.

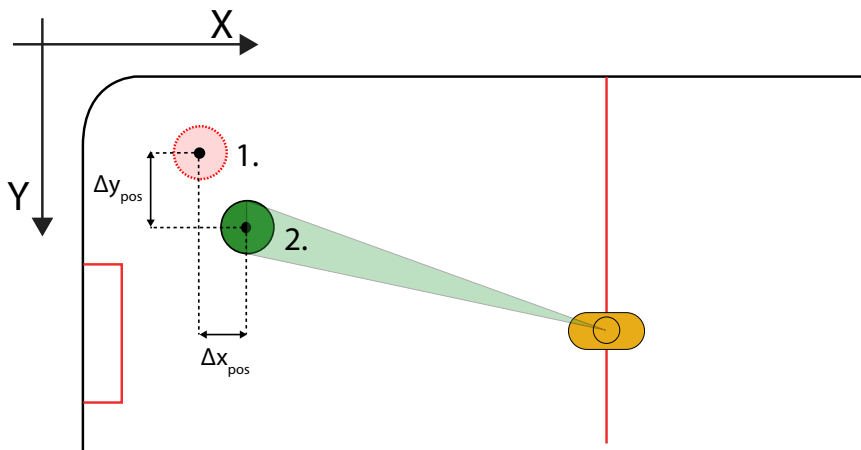
5.2.3 Återkoppling av klubbans position

Vid varje uppstart av prototypen går klubban till en startposition vilken ligger i mitten av y-led och cirka 140 *mm* från målet i x-led. Detta görs för att få klubban att automatiskt vara framför mål vid uppstart så att motorernas koordinatsystem sammanfaller med kamerans koordinatsystem.

Då motorerna och kameran har olika upplösning görs en omvandling mellan dessa två. De omvandlas till $mm/koordinat$ och $mm/steg$ som därefter omvandlas till $steg/koordinat$. Denna upplösning blev $8,5\ steg/koordinat$ i y-led och $10\ steg/koordinat$ i x-led. Dessa kan då användas för att förflytta motorerna ett visst antal koordinater istället för mm eller $steg$.

Eftersom att stegmotorerna kan tappa steg och förlora sin position gör prototypen en positionskontroll var femte bild och när klubban står stilla. Den jämför klubbans position enligt kameran med dess sparade position i koden och när skillnaden är större än 3 koordinater uppdateras positionen i koden till positionen enligt kameran. Gränsen på 3 koordinater finns för att klubban inte ska vibrera på grund av osäkerheter i kamerans positionering.

I figur 5.3 visas ett exempel på den återkoppling som kan ske när motorerna tappar steg där Δy_{pos} är den sträcka som motorn i y-led har tappat. Δx_{pos} är den sträcka som motorn i x-led har tappat. Denna bild är ett överdrivet exempel för att se vad som händer då motorerna i verkligheten inte tappar så här lång sträcka.



Figur 5.3: Klubbans position enligt motorerna symboliseras med den röda markören medan den gröna markören är klubbans position enligt kameran. Δy_{pos} och Δx_{pos} är de sträckor som korrigeras med hjälp av återkopplingen

5.2.4 Acceleration av motorer

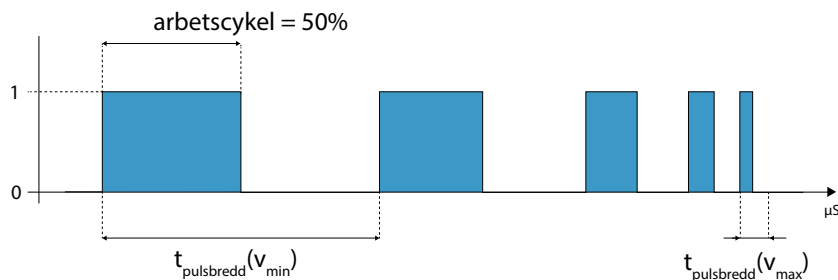
Generellt sett är vridmomentet för stegmotorer relativt lågt i förhållande till tillförd energi och har i likhet med övriga elektriska motorer störst vridmoment då de accelereras ifrån stillastående läge. Den valda motorn är utformad för högt vridmoment, men förhållandet mellan vridmoment och hastighet är fortfarande något som måste kompenseras för, [13].

Om en motor får instruktioner att förflytta aktuatorn med för hög hastighet räcker inte vridmoment till och den kommer att stegra. Vilket innebär att pulserna skickas till motorn men energin räcker inte till för att förflytta den det önskade steget. För att uppnå specificerad hastighet regleras acceleration och retardationsförloppet linjärt. Genom att starta motorerna med en lägre hastighet erhålls det nödvändiga momentet inledningsvis för att sedan öka hastigheten då aktuatorn redan är i rörelse.

Accelerationen kontrolleras av pulserna som skickar steg till motorn, beskrivet i avsnitt 5.1.1. En kortare pulsperiod resulterar i en snabbare förflyttning, se figur 5.4. I ekvation 5.9 definieras förhållandet mellan *arbetscykeln* som är pulsens aktiva tid i procent och t_{puls} som är hela pulsens bredd i μs . Under accelerationsfasen dekrementeras pulsbredden $1 \mu s$ per steg medans arbetscykeln bibehålls, vilket resulterar i fler pulser per sekund dvs högre *pps*.

$$pps = \frac{arbetscykel}{t_{puls}} \quad (5.9)$$

Accelerationens ursprungshastighet är v_{min} och topphastigheten är v_{max} mätt i *pps*. Topphastigheten undersöks under projektets gång och resultatet presenteras i avsnitt 7.3. Styrenheternas pulsmoduleringen kontrolleras av två avbrottsrutiner som pausar mikroprocessorns pågående process för att skicka ett steg till motorn. Avbrottsrutinen styrs av mikroprocessorns inbyggda timerar för att se till att stegen skickas synkroniserat. En förklaring av pulserna som skickas till styrenheterna och hur accelerationen varierar kan ses i figur 5.4

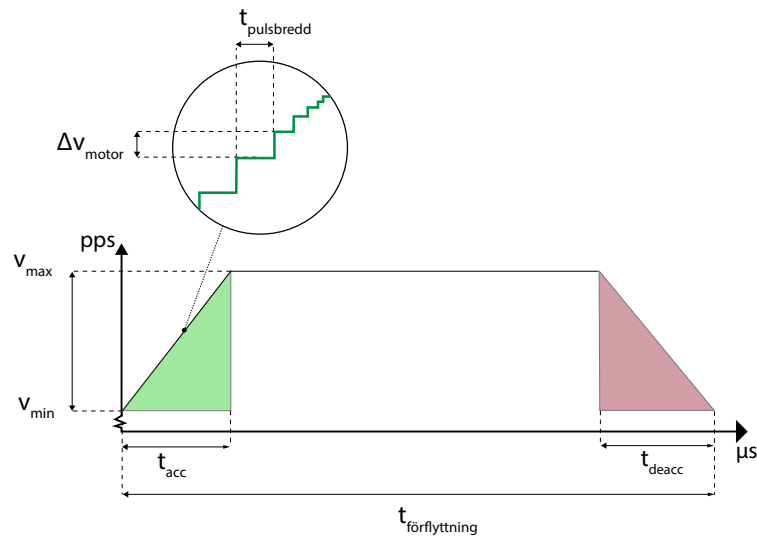


Figur 5.4: Illustration över hur pulsmoduleringen är uppdelad och hur pulsbredden ändras för att uppnå en högre hastighet. Där $t_{pulsbredd}(v_{min})$ är pulsbredden i μs vid lägsta hastigheten och $t_{pulsbredd}(v_{max})$ är pulsbreddenden i μs vid högsta hastigheten.

Mikroprocessorn kontrollerar hela accelerationsprocessen och håller koll på antal kvarvarande steg per förflyttning samt nuvarande position.

Accelerationen inleds så fort en förflyttning sker och deaccelereras då accelerationstiden t_{acc} är lika stor som kvarvarande tiden till slutpositionen det vill säga deaccelerationsfasen t_{deacc} . Detta för att hinna återgå till utgångshastigheten. I bild 5.5 illustreras acceleration- och deaccelerationsförloppet under en förflyttingsperiod mellan två punkter.

$t_{pulsbredd}$ är dekrementeringen som sker varje steg på pulsbreddens längd och Δv_{motor} är hastighetsförändringen per steg.



Figur 5.5: Övergripande bild över hur accelerationsprocessen regleras över en flyttning $t_{förflyttning}$ förflyttning. Förflyttningsförloppet av en aktuator. Acceleration och deacceleration illustreras samt

6. Utformning av Spelstrategi

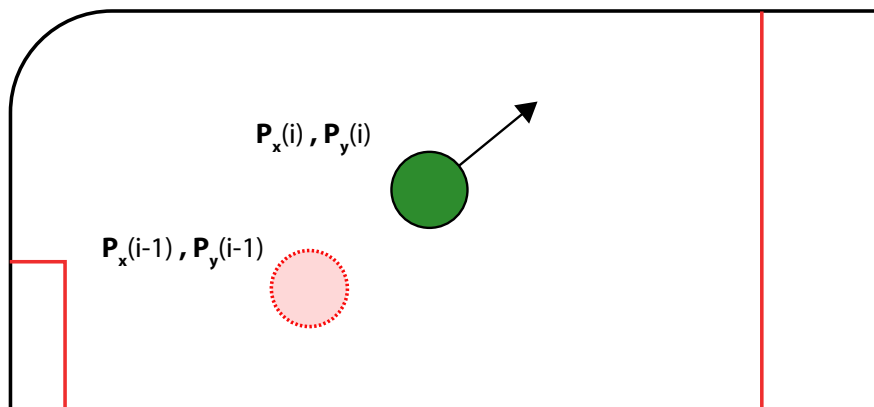
I följande kapitel beskrivs den strategi som prototypen använder sig av och hur denna tas fram.

6.1 Beräkning av puckrörelse

Puckrörelse beräknas efter sampling av tagna bilder av kameran. Här beräknas även kollisioner med sargen och skärningspunkt med baslinjen.

För att kunna beräkna puckens framtida position lagras de senaste positionerna. Vid varje bild där kameran registrerar en puck beräknas dess hastighet genom att förflyttningen räknas ut från förra bild som i figur 6.1.

Varje intressant tidpunkt har ett index där index i är puckens nutida position, index $i - 1$ är puckens förra position och index $i + 1$ respektive $i + 2$ är tidpunkten vid första respektive andra kollision med sargen. Puckens nutida position i x och y-led är benämnd $P_x(i)$ och $P_y(i)$, dess hastighet är i x och y-led benämnda $v_x(i)$ och $v_y(i)$



Figur 6.1: De två senaste bilderna som kameran tagit under tiden 20 ms med nuvarande position $(P_x(i), P_y(i))$ och förra bildens position $(P_x(i-1), P_y(i-1))$.

Puckens hastighet i x-led $v_x(i)$ respektive hastighet i y-led $v_y(i)$ ges i pixlar per sekund enligt

$$v_x(i) = \frac{P_x(i) - P_x(i-1)}{t(i) - t(i-1)} \quad (6.1)$$

$$v_y(i) = \frac{P_y(i) - P_y(i-1)}{t(i) - t(i-1)} \quad (6.2)$$

Puckens riktning k beräknas som

$$k = \frac{v_y(i)}{v_x(i)} \quad (6.3)$$

Beräkning av eventuell kollision med sarg görs sedan vilket även visas grafiskt i figur 6.2 och sparas som koordinaterna $(P_x(i+1), P_y(i+1))$:

$$P_x(i+1) = P_x(i) + \frac{\Delta y_{pos}}{k} \quad (6.4)$$

För att undvika extremvärden på k som då $v_y(i)$ går mot noll sätts k till ett stort värde istället. då försummas $\frac{\Delta y_{pos}}{k}$ termen och $P_x(i+1)$ blir lika med $P_x(i)$.

För att simulera puckens stötar med sargen, speglas hastighetsriktningen k enligt ekvationerna 6.5-6.8. Nya hastighetsvärden sparas som $v_x(i+1)$ och $v_y(i+1)$. Eftersom puckens studsar mot sargen är inte helt elastiska krävs det dämpning på en av hastighetskomponenterna. Efter kort testning av olika värden blev en dämpning på 30 procent tillräcklig.

Om kollisionen är vid långsidan av sargen används fljande modell:

$$v_x(i+1) = v_x(i) \quad (6.5)$$

$$v_y(i+1) = -0.7 \cdot v_y(i) \quad (6.6)$$

Om kollisionen är vid kortsidan av sargen används fljande modell:

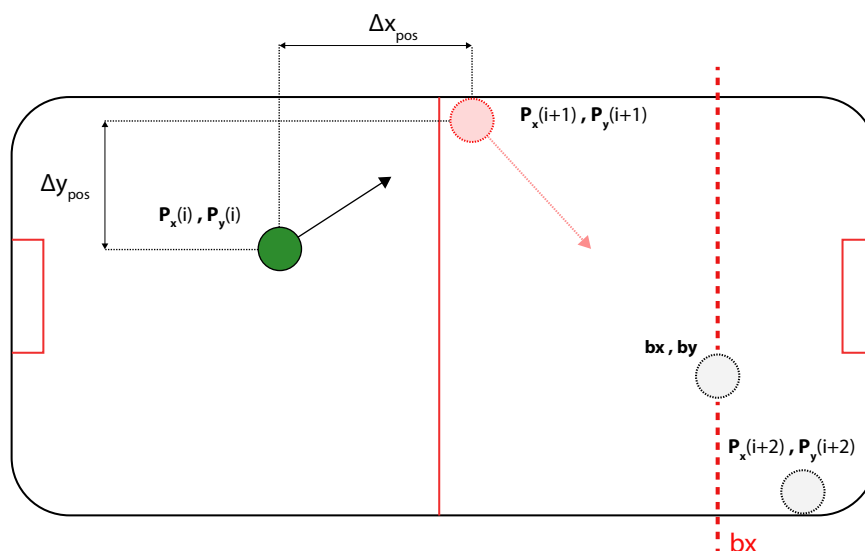
$$v_x(i+1) = -0.7 \cdot v_x(i) \quad (6.7)$$

$$v_y(i+1) = v_y(i) \quad (6.8)$$

Metoden upprepas 2 gånger så att man kan beräkna puckens position och riktning efter en kollision med sargen. De nya koordinaterna sparas som $(P_x(i+2), P_y(i+2))$, se figur 6.2.

Sist kan en baslinje, b_x enligt figur 6.2 bestämmas där klubban ska stoppa pucken. För att beräkna puckens korsningspunkt (b_x, b_y) används följande ekvation:

$$b_y = P_y(i) + k \cdot (b_x - P_x(i)) \quad (6.9)$$

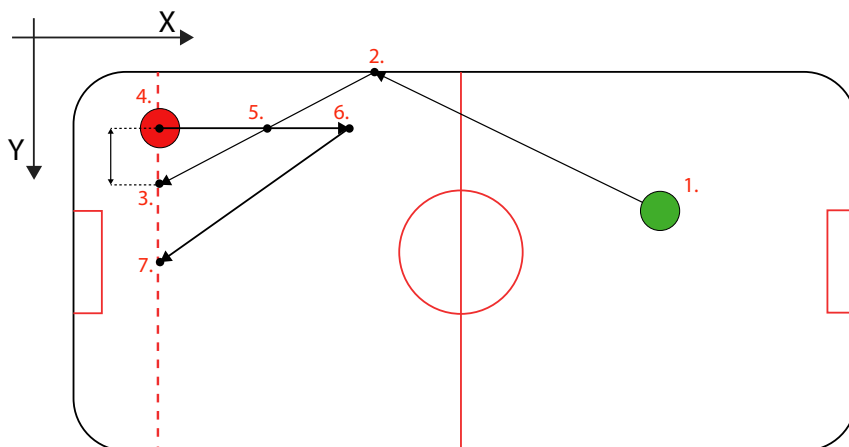


Figur 6.2: Illustration över pucken med hastighet $k = (v_x(i), v_y(i))$ och position $(P_x(i), P_y(i))$ och dess beräknade positioner vid första och andra kollisionen med sargen, $(P_x(i+1), P_y(i+1))$ resp $(P_x(i+2), P_y(i+2))$ och dess beräknade position vid baslinjen (b_x, b_y)

6.2 Strategi för prototyp

I figur 6.3 beskrivs hur strategin för prototypen fungerar. Vid punkt 1 beräknas en vektorn för pucken fram som därefter studsar i punkt 2. Klubban rör sig längs med den streckade baslinjen strax utanför målet och förflyttar sig till punkt 4 istället för punkt 3 där pucken ska skära baslinjen på. Anledningen till att det är åt detta hållet om punkt 3 är på grund av att pucken kommer från detta håll och den gör tvärtom om den istället kommer från andra hållet. Detta är för att justera när klubban ska skjutas ut och därmed möta pucken i punkt 5. Den korrigerade sträckan mellan punkt 3 och 4 bestäms beroende på hur snabb pucken är i y-led.

När klubban når punkt 4 skjuts den ut i x-led när pucken är tillräckligt nära. Detta utförs för att få upp högre hastighet på pucken. Klubban når då punkt 6 och återkopplas därefter tillbaka till sin startposition i punkt 7 för att vara beredd på nästa attack mot den.



Figur 6.3: Bild över klubbans och puckens rörelse under en exempel-attack från spelare.

När pucken har för låg hastighet i både x- och y-led och dessutom är på sidan där prototypen är monterad kommer klubban att följa puckens y-position och sedan skjuta ut sig i x-led så att den skickar iväg pucken mot spelaren.

6.3 Optimering av strategi

Följande avsnitt presenterar olika optimeringar som utförs på systemet

6.3.1 Utskjutning i x-led

Då klubban behöver kunna skjuta ut sig i x-led så att den kunde få upp hastighet på pucken påväg tillbaka. Detta görs med hjälp av att 500 pulser skickades till x-motorn och efter uppnåd position gick tillbaka 500 pulser. Under testet utförde systemet utskjutningen när pucken låg mellan pixel 100 och 90 vilket motsvarar 434 mm och 386 mm från prototypens mål. Detta för att undvika att den går fram för ofta och därmed tappar steg och hamnar för långt från ursprungsposition.

Då klubban skjuter ut sig för ofta är det bestämt att den enbart ska göra en utskjutning om pucken rör sig över en viss hastighet i x-led. Puckhastighet definieras som pixlar per bild. Denna hastighet är satt till att pucken måste röra sig mer än tre *pixlar* per bild i x-led.

6.3.2 Återkoppling av klubba

Då klubban tappade många steg lades det till en återkoppling åt klubba. Detta gick ut på att positionen enligt motorerna sätts till den position som kameran ser på klubban.

Detta görs då var 100 *ms* och när klubban står stilla för att få så exakta värden som möjligt. Då kameran kan skaka en pixel ibland läggs det till att återkopplingen endast går på om den skiljer sig med mer än tre *pixelar* mellan positionen av klubban enligt motorerna och enligt kameran.

6.3.3 Prototyp med prediktion

Prototypen ska använda en prediktion men denna prediktion är inte alltid rätt vilket visas i avsnitt 7.2. Det behöver alltså filtreras ut de värden av prediktionen som är rätt. Detta görs genom att prediktionen endast används när prediktionen ligger längs med baslinjen. Om ingen prediktion finns går klubban istället till sin startposition i mitten av baslinjen.

Resultatet blev att klubban rör sig till rätt position längs baslinjen men följer fel prediktion vid vissa tillfällen då filtreringen av prediktioner inte är tillräckligt bra.

6.3.4 Korrektion av y-led vid utskjutning

Då klubban ska skjuta ut sig i x-led behöver det tas med i beräkningarna att pucken inte kommer vara på den position som beräknats ut i prediktionen utan kommer ha en viss förskjutning åt det hållet pucken kommer ifrån för att möta den. Denna korrektion är satt till att bero på puckens hastighet i y-led och beroende på ifall den har en studs i sidan eller inte innan den når baslinjen. Denna korrektion motsvarar sträckan mellan punkt 3 och 4 i figur 6.3.

För korrektion blev två *pixelar* förflyttning i y-led mot puckens position per puckhastighet i y-led ett rimligt alternativ då detta gav bäst resultat och därmed slog till pucken istället för att missa.

7. Verifiering

I följande kapitel redovisas ett urval av de tester, och dess resultat, som utförts med syftet att verifiera de mätbara krav som ställts upp. I appendix A finns en sammanställning av alla krav och önskemål med information om de uppfylls eller inte

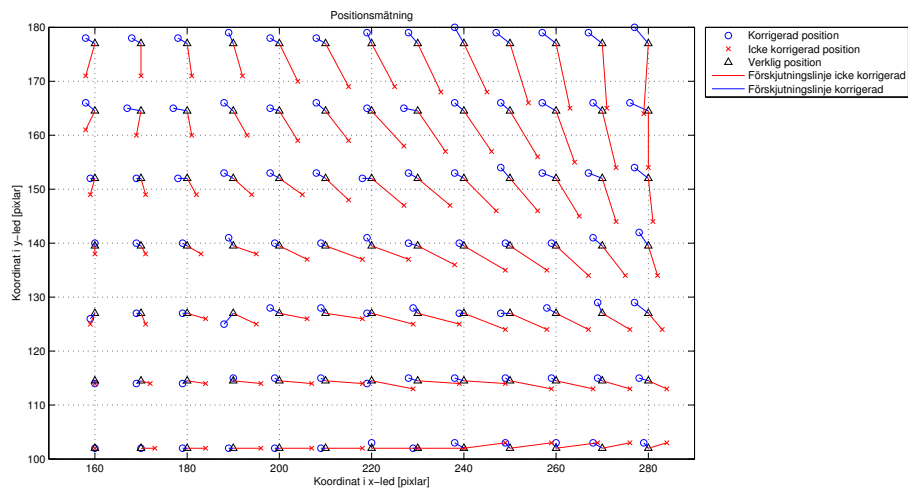
7.1 Verifiering av kamera och bildbehandling

Följande avsnitt presenterar en serie tester som genomförs för att kontrollera om de krav och önskemål som ställs på fastställande av ett objekts position på spelplanen uppfylls.

7.1.1 Verifiering av puckens position i vila

För att verifiera krav (K.2.1), identifiera pucken på spelplanen inom 5 mm i vila genomförs en serie tester. Koordinaternas teoretiskt täckta yta, se 4.3, kontrolleras mot verkligheten och bildförvrängningsalgoritmens effekt och det kvarstående felet mäts upp.

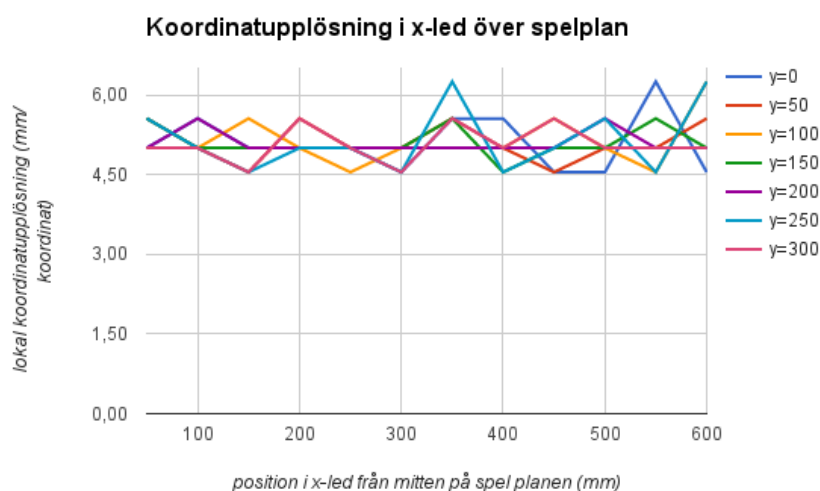
Positioner för ett objekt på spelplanen mäts upp och jämförs med de som arduinon beräknar. Positionerna väljs med 50 mm mellanrum i både x- och y-led med utgångspunkt från bordets mitt. Eftersom spelplanen är symmetrisk utförs mätningar endast i en av bordets kvadranter. Utifrån mitten stegas en total sträcka av 300 mm i y-led och 600 mm i x-led. Detta ger totalt 91 mätpunkter där de verkliga, okorrigerade och korrigerade koordinaterna antecknas och ritas upp i figur 7.1.



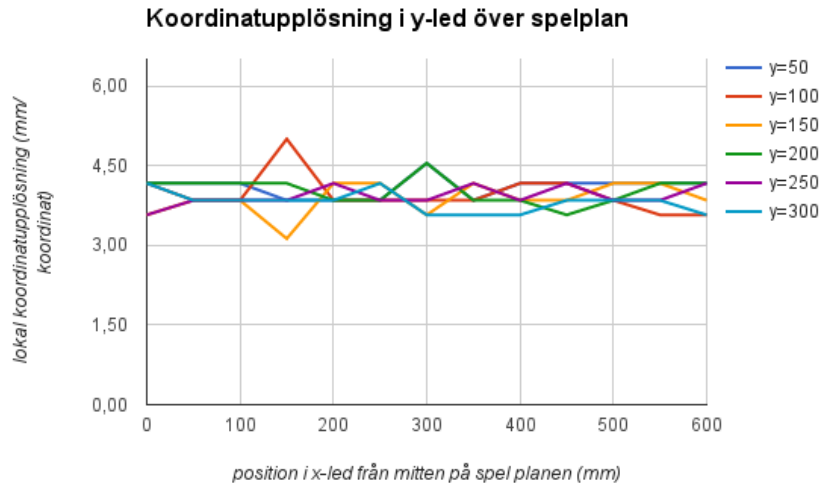
Figur 7.1: Mätpunkter av puckens position på spelplanen ritas upp och kopplas samman för att visa hur felet varierar på spelplanen. Svarta trekanterna representerar fysiska mätpunkter, blåa fyrkanter representerar korrigerade koordinater och röda stjärnor representerar okorrigerade koordinater från kameran.

Figur 7.1 visar hur mätpunkterna, svarta trekantar, placerats samt hur felen varierar över en av spelplanens kvadranter. Figuren visar två olika fel, det som uppstår på grund av bildförvrängningen, röda stjärnor och streck, och kvarvarande fel efter kompensation för bildförvrängningen, blåa fyrkanter och streck.

Diagrammen i figurerna 7.2 och 7.3 visar på hur koordinatupplösningen varierar på spelplanen. X-axeln i diagrammen representerar positionen på spelplan i x-led, y-axeln representerar den lokala koordinatupplösningen runt en specifik mätpunkt och varje färggrupp representerar en y-koordinat (i millimeter) för mätpunkten på spelplanen, som utgår ifrån spelplanens mitt.



Figur 7.2: Spridning av horisontell pixelupplösning i x-led över spelplanen

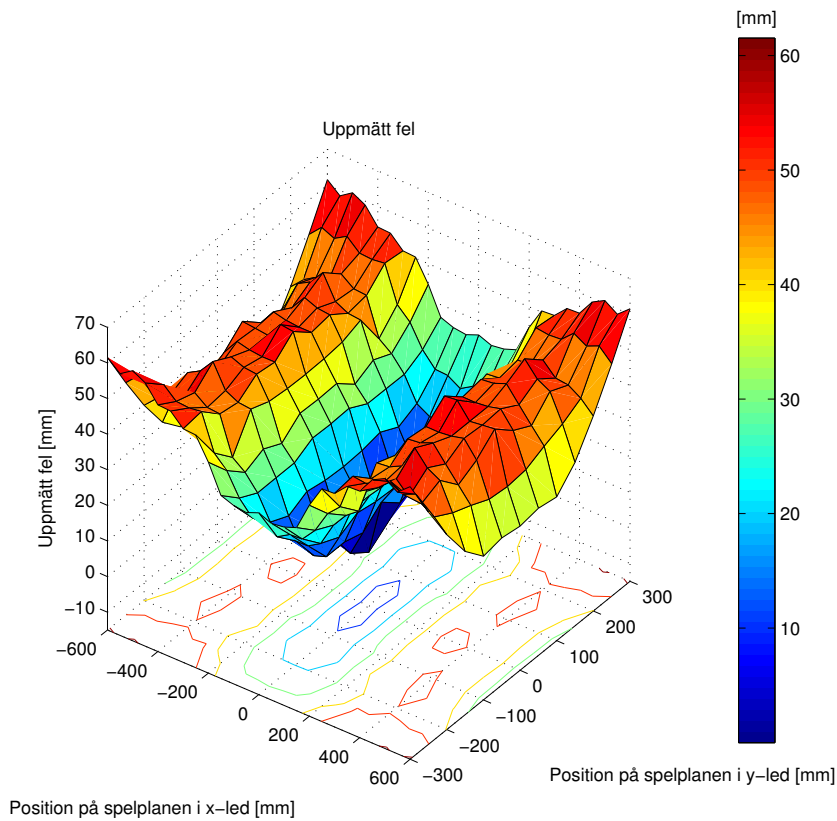


Figur 7.3: Spridning av vertikal pixelupplösning i x-led över spelplanen

Mätresultaten i figurerna 7.2 och 7.3 visar att trots vissa extremvärden så är koordinatupplösningen i princip konstant över hela spelplanen. Detta tyder på att algoritmen för att korrigera koordinaterna fungerar som den ska. Figurerna visar också att den teoretiska ytan en koordinat borde täcka som beräknades i avsnitt 4.3, det vill säga $4,9 \times 3,8 \text{ mm/koordinat}$, stämmer bra.

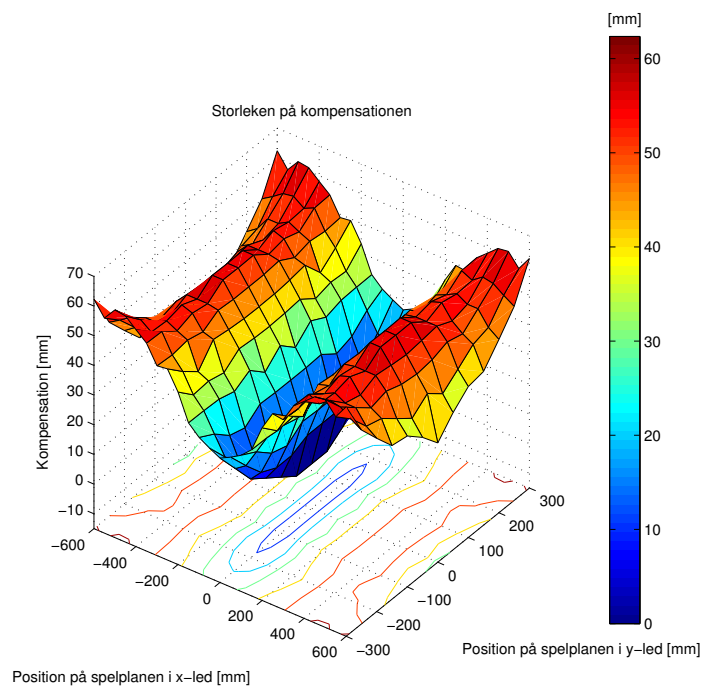
Den tidigare beskrivna mätdatan ritas upp i figur 7.4 - 7.6. Gemensamt för 3D graferna är att x- och y-axel anger positionen på spelplanen och att höjdlinjer placeras i xy-planet. Höjdlinjerna syftar till att ge en kompletterande bild över hur värdena på z-axeln varierar i dolda delar av graferna.

I figur 7.4 åskådliggörs de i testet uppmätta felen orsakade av bildförvrängningen. Felen beräknas som skillnaden mellan de i verkligheten uppmätta koordinaterna och de okorrigerade koordinaterna som beräknas av Arduinon. Mätvärdena från den uppmätta kvadranten av planen speglas så att figuren visar hur felen är fördelade över hela planen. De största felen fås i spelplanens hörn med ett maximalt fel på $61,5 \text{ mm}$. Felen minskar in till spelplanens mitt där felet är noll.



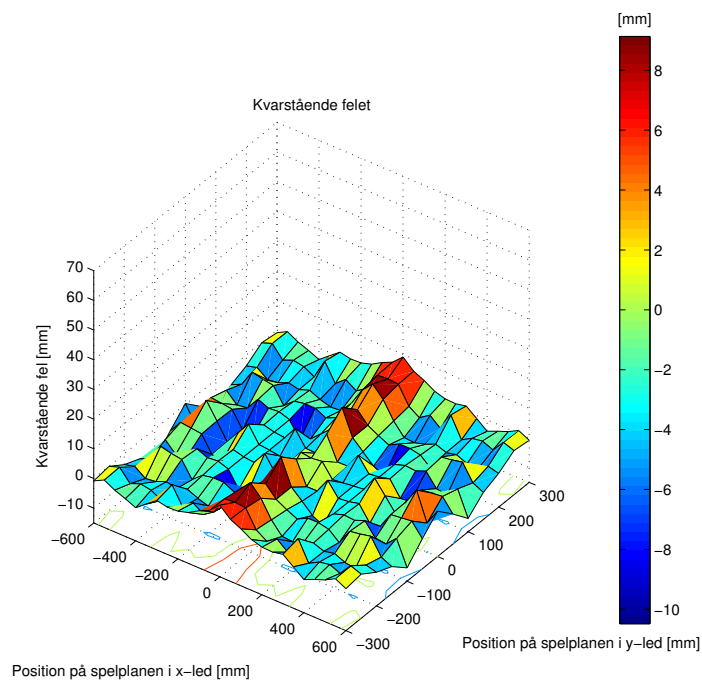
Figur 7.4: Figuren visar hur avståndet mellan uppmätt position och den beräknade okorrigerade positionen varierar över hela spelplanen. Grafen är baserad på 91 mätvärden i en kvadrant som sedan speglats kring spelplanens mitt.

Förvrängningarna korrigeras enligt avsnitt 4.3. Den korrigering som görs visas i figur 7.5 som avståndet mellan de uppmätta okorrigerade och korrigerade koordinaterna i alla 91 mätpunkter. Även här fås störst värden i hörnen, där kompensationen är $62,4 \text{ mm}$, och korrigeringen i spelplanens mitt är noll.



Figur 7.5: Grafen visar hur stor korrigerings storlek som görs och hur denna varierar över spelplanen. Korrigeringen är avståndet mellan de uppmätta okorrigerade och korrigerade koordinaterna. Grafen är baserad på 91 mätvärden i en kvadrant som speglats kring spelplanens mitt.

Kompensationen i figur 7.5 applicerad på felet i figur 7.4 resulterar i det kvarstående felet som åskådliggörs i figur 7.6. Det största felet återfinns 100 *mm* från spelplanens mitt i y-led, det vill säga ca 250 *mm* från sargen, och 600 *mm* från planens mitt i x-led. Felet blir i denna punkt -10,5 *mm*, det vill säga att felet överkompenseras så att resultatet blir ett negativt fel.



Figur 7.6: Grafen visar de kvarstående felet och hur de är fördelade över spelplanen. Grafen är baserad på 91 mätvärden i en kvadrant som speglats kring spelplanens mitt

Resultatet blir alltså:

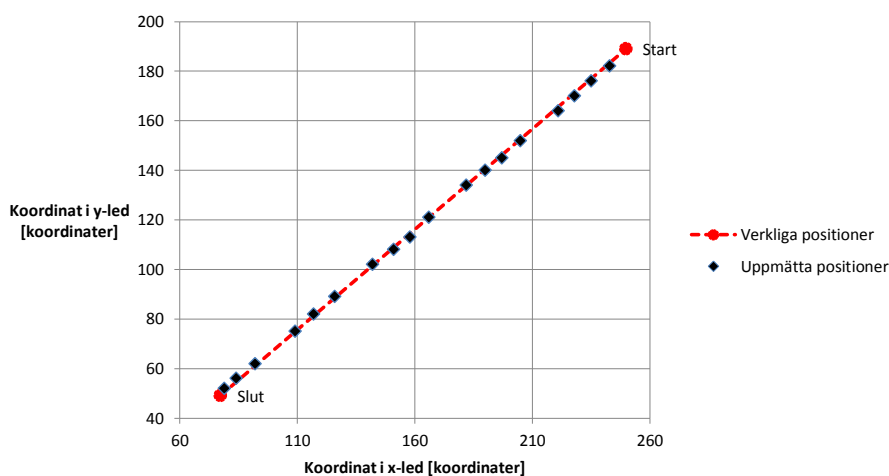
- Krav (K.2.1), identifiera pucken på spelplanen inom 5 mm i vila uppfylls inte. Uppmätt fel blir 10,5 mm.

7.1.2 Beräkning av puckens position i rörelse över spelplanen

Krav (K.2.2) testas genom att undersöka hur bra pucken rör sig över spelplanen.

Testet utförs genom att pucken läggs på en koordinat, (250,189), och skjuts iväg. Då pucken färdas över planen samplas positionen vilka sparas tills pucken når slutkoordinaten, (77,49), där resultatet visas i figur 7.7.

Jämförelse mellan uppmätt och verklig puckbana



Figur 7.7: Positionen för pucken när den färdas mellan två positioner på spelplanen mätt i pixlar

Testet visar att största avvikelsen från banan är 6 *mm*.

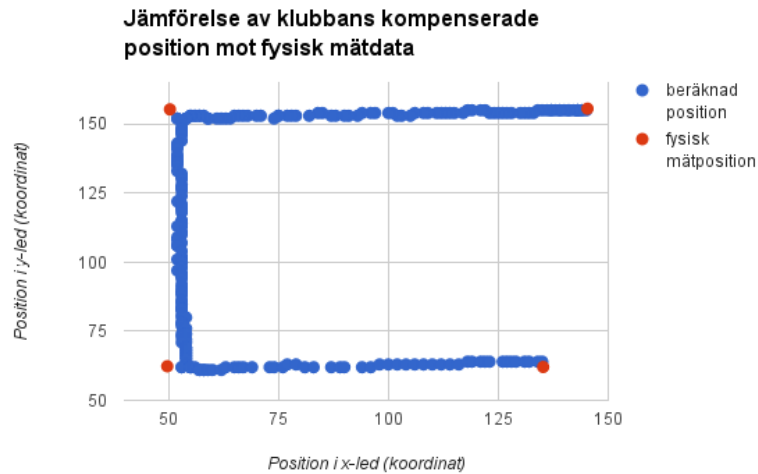
Resultatet från testet blir alltså följande:

- Krav (K.2.2), ska gå att identifiera pucken på spelplanen 10 *mm* i rörelse, uppfylls. Testet visar på en maximal avvikelse på 6 *mm*.

7.1.3 Verifiering av klubba position

För att verifiera krav (K.2.3), där klubban inte får avvika med mer än 5 *mm* i vila kontrolleras klubbans uppmätta position mot den verkliga.

Testet utförs genom att klubban positioneras i en bestämd position, (145,155), och flyttas i raka sträckor, först i x-led, y-led och till sist x-led. Positionen av klubban mäts vid stoppunkterna så förflyttelsen kan räknas ut. Under testet hämtas den beräknade positionen vilka jämförs mot de uppmätta. Resultatet av testet visas i figur 7.8.



Figur 7.8: Positionen för klubban när den färdas mellan fyra positioner på spelplanen mätt i pixlar. Röda och blåa punkter representerar fysiska respektive korrigerade mätpositioner för klubbhållaren på spelplanen

Mätvärden visar att absoluta avvikelser i första punkten är 3 mm , sedan 15 mm , 21 mm och sist 7 mm . Under förflyttningen är rörelsen linjär men positionerna stämmer inte riktigt överens med uppmätta positioner.

Resultatet från testet blir alltså följande:

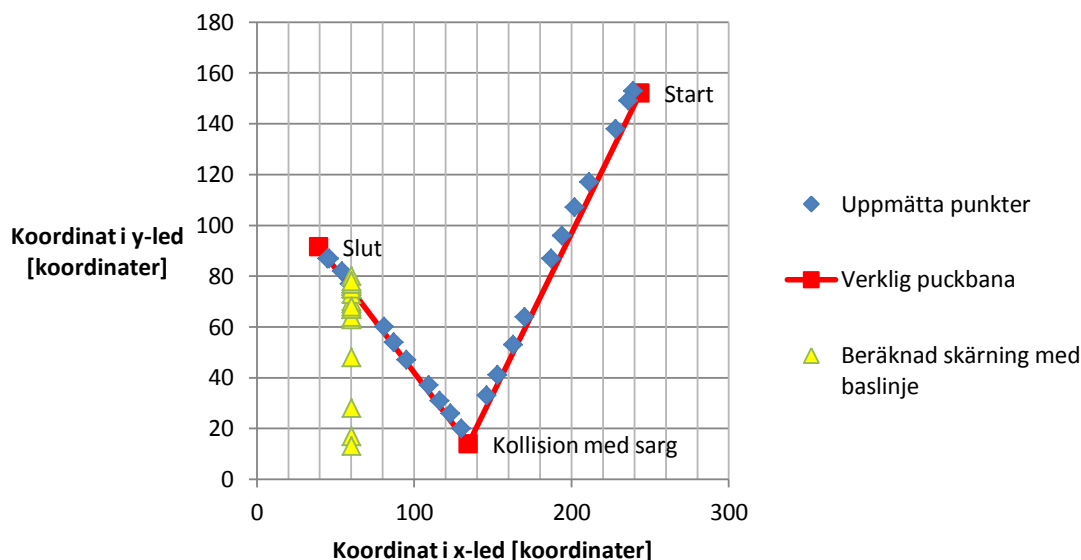
- Krav (K.2.3), ska kunna identifiera klubban på spelplanen, inom 5 mm i vila, uppfylls inte. Testet visar på en maximal avvikelse på 21 mm .

7.2 Verifiering av puckbana vid studs i sarg

Strategin för beräkning av puckens bana vid sargstuds testades för att kontrollera om krav (K.3.1), (K.3.2), (K.3.3), (Ö.3.1) uppfylls. Det vill säga om klubbans tillslagspunkt kan bestämmas med en noggrannhet på klubbans radie samt om det går att beräkna ny prediktion på under 20 ms och då verifiera hur snabbt en prediktion tar att få fram.

Testet utförs genom att en puck skickas iväg från en på spelplanen bestämd punkt mot sargen där kollisionspunkten med sargen märks ut liksom den position där pucken passerar baslinjen. Kameran följer puckens rörelse och arduinon beräknar och skriver ut puckens position i varje bild liksom den beräknade skärningspunkten med baslinjen. Denna information visualiseras sedan i figur 7.9. Figuren visar att de samplade punkterna stämmer väl överens med den fysiska banan. Kameran verkar missa en av fem värden men antalet mätvärden resulterar trots det i bra information för beräkningarna. De gröna punkterna som visar kollisionspunkter vid baslinjen antar ganska stor spridning. Några felvärden går att urskilja men flest punkter urskiljs runt positionen 70 koordinater med en spridning på ± 10 koordinater vilket motsvarar en osäkerhet på runt $\pm 40\text{ mm}$.

Kontroll av puckbana vid sargstuds



Figur 7.9: Positionen för pucken mellan varje bild tagen av kameran där linjen visar den verkliga förflyttningen. De gula triangelarna visar de beräknade skärningspunkterna med baslinjen. Röda punkterna visar start och stoppmätning och de blå är de samplade punkterna.

Med hjälp av mikrokontrollerns systemklocka kan tiden för beräkningen av prediktion tas fram. Tiden det tog för en beräkning tar mellan 4 till 7 *ms* och därefter ligger en fördröjning på 20 *ms* vilket medför att varje bild hämtas var 24 till 27 *ms*. Det tar två bilder för att hämta ut en prediktion vilket medför att det tar maximalt 54 *ms* för att få fram en prediktion.

Resultatet blir alltså följande:

- Krav (K.3.1), beräkna klubbans tillsagspunkt mot pucken inom klubbans radie, det vill säga inom 48 *mm*, uppfylls. Den uppmätta osäkerheten är 40 *mm*.
- Krav (K.3.2), beräkning av nya vektorer tar max ska max ta 20 *ms*, uppfylls inte. Beräkningen tar 24 till 27 *ms*.
- Krav (K.3.3), framtagning av vektor ska max ta 60 *ms* från tillslag av människa, uppfylls. Det tar maximalt 54 *ms* att ta fram en vektor från tillslag av människa.
- Önskemål (Ö.3.1), framtagning av vektor bör max ta 40 *ms* från tillslag av människa, uppfylls inte. Det tar maximalt 54 *ms* att ta fram en vektor från tillslag av människa.

7.3 Verifiering av motorer

Motorerna testas för att kontrollera om de uppfyller krav, (K.4.1), (K.4.2), (K.4.3), samt önskemål, (Ö.4.1), (Ö.4.2).

Motorerverifieringen går ut på att ett känt antal steg skickas till motorerna som därmed rör sig till en fix position. Därefter skickas samma antal steg till motorerna i motsatt riktning vilket teoretiskt sätt bör positionera motor i ursprungsläget. Proceduren upprepas flertalet gånger för att säkerställa repeterbarhet och styrka resultatet. Samtliga positioner kontrolleras ner på millimeternivå.

När ett steg skickas till motorerna ska y-led förflytta sig 0,47 mm och x-led förflytta sig 0,4 mm enligt tidiga beräkningar. 500 respektive 1000 steg skickas till motorerna vilket resulterar i en osäkerhet på ± 1 mm.

Accelerationshastigheten testas genom att tiden för varje steg minskas mer och mer för att se hur snabbt motorerna kan förflytta klubban. Steglängden minskar med 2 μs för varje skickat steg till motorerna.

- Motorn för x-led kan ta emot steg med en steglängd på 700 μs , (1430 pps, 0.57 m/s) och accelereras sedan till 400 μs , (2500 pps, 1 m/s). Accelerationssträckan för x-led är alltså 150 steg vilket motsvarar 60 mm. Medelhastigheten på 150 mm blir 0,9 m/s och 0,82 m/s på 75 mm.
- Motorn för y-led kan ta emot steg med en steglängd på 400 μs , (2500 pps, 1.18 m/s) och accelereras sedan till 300 μs , (3330 pps, 1,57m/s). Accelerationssträckan för y-led är 50 steg vilket motsvarar 23,5 mm. Medelhastigheten på 300 mm blir 1,55 m/s och 1,54 m/s på 150 mm.

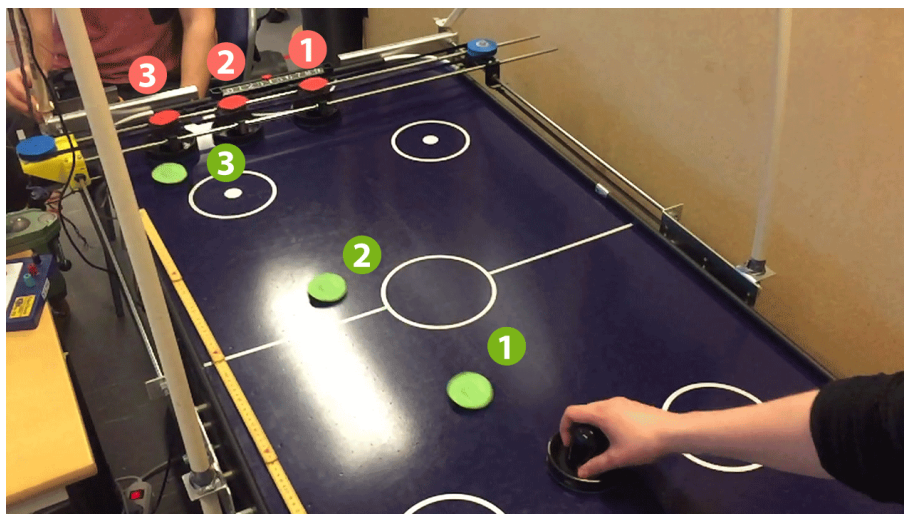
Resultaten blir alltså följande:

- Krav (K.4.1), Klubban ska kunna förflyttas 300 mm med en medelhastighet på 0,9 m/s längs y-axeln uppfylls. Motorerna uppnår ett medel på 1,55 m/s.
- Krav (K.4.2), Klubban ska kunna förflyttas 150 mm med en medelhastighet på 0,5 m/s längs x-axeln uppfylls. Motorerna uppnår ett medel på 0,9 m/s.
- Krav (K.4.3), Klubban ska inte skilja med mer än 5 mm från utsatt position uppfylls. Motorerna har en osäkerhet på 1 mm.
- Önskemål (Ö.4.1), Klubban bör kunna förflyttas 150 mm med en medelhastighet på 2,5 m/s längs x-axeln uppfylls inte. Motorerna uppnår ett medel på 1.54 m/s.
- Önskemål (Ö.4.2), Klubban bör kunna förflyttas 75 mm med en medelhastighet på 1,5 m/s längs x-axeln uppfylls inte. Motorerna uppnår ett medel på 0,82 m/s.

7.4 Test av prototypen

Prototypen testas för att kontrollera om den uppfyller de krav, (K.1.1), samt önskemål, (Ö.1.1), som ställs på dess huvudfunktioner.

Systemet testades med att det skjuts löst i sidorna (cirka 300 mm från klubban) av bordet för att klara av kravet som satts på systemet. Detta utförs flertalet gånger för att få ett bra resultat. Systemet klarar av att blockera pucken då pucken rör sig i 2,2 m/s. Ett av dessa test kan ses i figur 7.10 där punkt 1 är när klubban börjar röra sig. Punkt 2 är när pucken är påväg och klubban är halvvägs till prediktionen och slutgiltigen punkt 3 när klubban blockerar.



Figur 7.10: Bildserie över puckens och klubbans bana vid blockering av pucken.

Slutligen testades höga hastigheter på pucken. Det utfördes flertalet skott nära klubban för att se om den klarar av att utföra det önskemål som är satt. Då det är svårt att sikta 40 mm från klubban ansågs det tillräckligt bra ifall systemet rörde sig 40 mm på den tid det tog att nå dess baslinje. Pucken uppnådde en hastighet på 6,5 m/s under detta test innan klubban slutade klara av att blockera pucken.

Resultaten blir alltså följande:

- Krav (K.1.1), klubban ska kunna blockera puckar som rör sig i 2 m/s, 300 mm från startposition när pucken utgår från motsatt planhalva uppfylls. Den maximala hastigheten blev 2,2 m/s.
- Önskemål (Ö.1.1), klubban bör kunna blockera en puck med en hastighet på 8 m/s, 40 mm från startpositionen uppfylls inte. Den maximala hastigheten blev 6,5 m/s.

8. Diskussion

I följande kapitel utförs ett resonemang om huruvida resultaten var förväntade och vad som kan vara orsakerna till de eventuella avvikelser. Prototypens prestanda och redovisning om hur väl kraven uppfylls finns i appendix A.

8.1 Diskussion av prototypens prestanda

Prototypen uppfyllde samtliga krav på huvudfunktioner som ställts, det vill säga att den klarade av att blockera puckar som gick mot mål med en hastighet av 2 m/s , (K.1.1). Det uppmätta värdet för denna uppgift i avsnitt 7.4 var $2,2\text{ m/s}$. Prototypens övergripande prestanda bedömdes därför vara bra utefter satta krav och önskemål även om krav (K.1.1) i efterhand ansågs något lågt satt. Oförmågan att uppfylla önskemålet att blockera puckar med högre hastighet, (Ö.1.1), berodde troligen till störst del på följande brister:

- Brister i strategin
- Ofiltrerad positionsdata från kameran
- Kameraställets instabilitet
- Kamerans uppdateringsfrekvens
- Otillförlitliga kulbussningar

En brist med strategin är att den kompenserar dåligt för avvikande positionsdata från kameran vilket är en bidragande faktor till att prototypen inte uppfyller önskemålet om hög hastighet (Ö.1.1).

I verifiering 7.2, figur 7.9 syns det en tydlig spridning i beräknade punkter på baslinjen vilket kan indikera att modellen för sargstudsar är bristfällig. En trolig anledning kan vara att beräkning av ett medelvärde av puckens senaste hastighetsvektorer inte hanterar alla de undantag som behöver göras för olika händelser. Vid testet sågs 4 värden som var direkt avvikande från den verkliga skärningspunkten. Vid de 4 felaktiga värden som fås med 20 ms mellanrum skickas då felaktiga koordinater till motorerna under en tid på ungefär 80 ms . De värden som skickas kan då leda till att klubban missar pucken om studsens vid sargen är för nära baslinjen för att kompenseras i tid. En lösning på problemet skulle kunna vara att ta ett medelvärde på de beräknade punkterna på baslinjen eller att filtera bort punkter med stor avvikelse.

Utöver beräkningsfelet då pucken studsar i sargen finns det en risk att kameraställets instabilitet påverkar utdata från kameran tillräckligt mycket för att det ska vara ett problem. Valet av VP-rör medförde konstruktionsfördelar då det snabbt gick att designa och bygga kamerastället, men visade sig vara en kompromiss som gav onödiga osäkerheter. Ett stabilare kameraställ, alternativt en kamerainfästing som inte är fastsatt i bordet, skulle minimera vibrationerna på kameran och osäkerheten försummas.

För att uppnå önskemål (Ö.1.1), att kunna blockera puckar med en hastighet på 8 m/s skulle en kamera med bättre uppdateringsfrekvens krävas. En uppdateringsfrekvens på 50 Hz ger inte tillräckligt med bilder för att kunna beräkna puckens bana på ett tillförlitligt sätt.

De kulbussningar som användes för att lagra långsgående rörelser för linjäraktuatorerna visade sig ha problem vid högre hastigheter då de har en tendens att låsa sig och börja hacka längs axeln. Vilket i ett fåtal tillfällen har lett till ökad friktion och därmed minskad hastighet på förflyttningarna av klubban.

8.2 Diskussion av kravuppfyllnad på dellösningar

Utöver de krav och önskemål på huvudfunktioner hos prototypen har också krav ställts på dellösningar, se appendix A. Resultaten av kravuppfyllnaden för dess krav var blandade, som kan ses i appendix D. De krav som inte uppfylldes kan diskuteras om de generellt sett var för hårt satta. Syftet med krav på dellösningar var att kunna testa dessa både under utvecklingsarbetet samt i ett eventuellt scenario där kraven på huvudfunktionerna hos prototypen inte uppfylls. De skulle då kunna användas för att identifiera vilken del av prototypen som brast och därigenom vidta åtgärder. Utifrån detta resonemang bör inte någon större vikt läggas på uppfyllda krav på dellösningar.

Ett av de krav på delproblem som sattes på prototypen var den noggrannhet som lokalisering av objekt på spelplanen ska ske med. Det vill säga (K.2.1) till (K.2.4) att pucken respektive klubban ska kunna identifieras inom 5 mm i vila och 10 mm i rörelse. Som nämnt i avsnitt 7.1.2 visade testerna på olika uppfyllnadsnivå av kraven. Att testet på puck i vila inte uppfyllde ett krav på samma mått som puck i rörelse gjorde kan röra sig om att mätmetoderna inte var optimala. De två olika testen är inte utförda på samma del av spelplanen. Testet av puck i rörelse gjordes endast i planens mitt medan testet med puck i vila gjordes på hela spelplanen. Enligt figur 7.6 varierar det kvarstående felet kraftigt över spelplanen vilket kan vara en av orsakerna till de oväntade testresultaten. Figur 7.6 tyder också på att mätfel finns då variationerna i felet är kraftiga mellan två mätpunkter.

I avsnitt 7.1.1 uppmättes upplösningen av slutliga koordinatsystemet. Figurerna 7.2 och 7.3 visar att den uppmätta koordinatupplösningen över spelplanen förblir relativt konstant som tyder på att korrigeringsalgoritmen fungerar som den ska. Extremvärdena i diagrammen kan kopplas till felavläsning vid mätning då endast ett fåtal värden avviker från medelvärdet.

8.3 Framtida projekt

Möjligheterna för vidareutveckling av konceptet är goda, både som direkta förbättringar av vissa i konceptet ingående delar men det finns också möjlighet att lägga till ytterligare funktioner för ökad prestanda. Nedan diskuteras de idéer som väckts under projektets gång.

Då objektidentifieringen som fanns inbyggd i kameran endast gav bredd, höjd och position var det inte möjligt att identifiera formerna på objekten. Vidare begränsades bildbehandlingen även till att färgmarkeringar behövde fästas på det som letades efter. Detta ledde till att det inte gick att identifiera bordskanter, människor eller andra föremål som kunde varit intressanta. Om egen behandling hade implementerats hade det därför funnits större möjligheter till ett flexibelt system som hade kunnat utföra fler funktioner. En vidareutveckling skulle vara att kameran även har koll på människans klubba och då beräkna rörelser som personen gör och därmed beräkna framtida skott.

Från början var det tänkt att färgmarkeringar skulle placeras ut i bordets hörn för att på så sätt plocka ut koordinaterna för spelplanen. Detta testades men då bildförvrängningen var så stor ute i kanterna hade kameran svårt att identifiera färgmarkeringarna. Det är möjligt att detta kunde lösts genom att höja kameran och på så sätt minskat förvrängningen över bordet vilket behandlades i avsnitt 4.2. Nackdelen med att höja kameran blir dessvärre att pixelstorleken ökar och en sämre noggrannhet fås. En annan lösning hade varit att byta ut linsen på kameran mot en lins med mindre bildvinkel. Detta hade resulterat i att förvrängningen vid kanterna skulle blivit mindre men också att den krävda höjden för kameran hade ökat enligt ekvation 4.1.

Som beskrivet i avsnitt 5.2.3 tappade motorerna räkningen på sin exakta position. En återkoppling användes men den var osäker och långsam. Detta resulterade i onödiga korrigeringar för klubbhållaren som lätt hade kunnat undvikas om en säkrare och framförallt snabbare lösning för att fastställa aktuatorns position hade implementerats. En lösning skulle till exempel kunna vara någon typ av sensor för optisk avståndsbedömning som monteras på konstruktionen för att bestämma klubbans position. En sådan lösning hade resulterat i ett snabbare system.

För att kunna göra bordet helt autonomt hade det även behövts ytterligare ett system på andra sidan av bordet. För att det ska fungera utan mänsklig interaktion behöver pucken kunna plockas upp från alla punkter på planen. Det behövs även någon sorts mekanism som automatiskt tar upp pucken ur målet då det blir mål. En sådan lösning hade på så sätt ersatt ytterligare en av människans uppgifter.

8.4 Miljöaspekter

För att ta hänsyn till miljön under detta projekt har vissa åtgärder vidtagits:

- Konstruktionen drivs endast av elmotorer och det genereraras inga utsläpp utöver vid produktion av elen som används för att driva motorerna.
- Materialval har gjorts med livslängd i åtanke där materialen inte ska slitas ut och behöva bytas efter kort tid.
- Lösningen har ingen direkt koppling till miljö men ett autonomt mekatroniskt system kan förhoppningsvis användas inom andra områden för att minska energiförbrukning och resursslöseri. Ett exempel är inom transportsektorn där fordon kan köras säkrare och effektivare.
- För att värna om miljön är konstruktionen utformad så att alla delar är sammanfogade med skruvförband eller med tejp vilket innebär att den enkelt kan plockas isär och återvinnas.

9. Slutsats

Syftet med projektet var att undersöka möjligheten att ersätta en människa som spelar air-hockey med ett autonomt mekatroniskt system.

Resultatet blev en prototyp bestående av två linjäraktuatorer som tillsammans med en kamera monterades på bordet för att kunna förflytta klubban. Kameran används för att återkoppla klubbans position samt för att kunna lokalisera pucken på spelplanen och beräkna dess framtida position.

Syftet med projektet kan anses uppfyllt då prototypen uppfyller de flesta av de krav och önskemål som ställts på precision och hastighet. Den är därmed fullt kapabel att ersätta en människa som air-hockeyspelare.

Trots att prototypen uppfyller syftet finns det områden för framtida projekt att förbättra. Det skulle till exempel kunna vara en egenutvecklad objektidentifieringskod kombinerat med en mer högupplöst kamera för att snabbare och mer precist kunna beräkna puckbanor och klubbåterkoppling.

Litteraturförteckning

- [1] R. J. N. Thaddeus F. Cathey, John C. Gaynor, Low backlash-high-torque power transmission system and toothed belt used therein (2015-05-19).
URL <http://www.freepatentsonline.com/4515577.pdf>
- [2] Adafruit, Timing belt gt2 profile (2015-05-19).
URL <http://www.adafruit.com/product/1184>
- [3] Droftarts, Parametric pulley - lots of tooth profiles (2015-05-19).
URL <http://www.thingiverse.com/thing:16627>
- [4] SKF, Skf freestyler (2015-05-19).
URL <http://www.skf.com/group/industry-solutions/skates/applications/skateboard/regular/skf-freestyler/index.html>
- [5] SKF, Skf funglider (2015-05-19).
URL <http://www.skf.com/group/industry-solutions/skates/applications/In-line/fitness/skf-funglider/index.html>
- [6] Adafruit, Linear ball bearing - 8mm diameter - lm8uu (2015-05-19).
URL <https://www.adafruit.com/products/1181>
- [7] RepRap, Linear bearing (2015-05-19).
URL http://reprap.org/wiki/Linear_bearing
- [8] Slöjd-Detaljer, Silverstål (2015-05-19).
URL <http://www.slojd-detaljer.se/kategorier/tra-metallslojd/metall/ror-stanger-trad/silverstal-pid2697>
- [9] Institutionen för hållfasthetslära KTH, Handbok och formelsamling i hållfasthetslära (2010) s. 347.
- [10] J.-P. Lang, Camera pixy (2015-03-15).
URL <http://www.cmucam.org/projects/cmucam5>
- [11] Imatest, Distortion (2015-04-27).
URL <http://www.imatest.com/docs/distortion/>
- [12] L. T. C. Ltd, Motor torque calculation (2015-04-25).
URL <http://www.leadshine.com/Pdf/Calculation.pdf>
- [13] R. Components, Data sheet 57mm 1.8' high torque stepper, 200 step (2015-05-10).
URL <http://docs-europe.electrocomponents.com/webdocs/07e2/0900766b807e2898.pdf>
- [14] A. K. TM, Data sheet m023' high current bipolar stepper motor controller step (2015-05-10).
URL <http://www.electrokit.com/productFile/download/527>

- [15] A. Corporation, Atmega2560 (2015-03-10).
URL http://www.atmel.com/Images/Atmel-2549-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega640-1280-1281-2560-2561_datasheet.pdf

A. Kravspecifikation

I figur A.1 nedan presenteras de krav och önskemål som är ställda på prototypen. Det anges även hur viktiga dessa krav och önskemål är och vilken typ av test som ska göras för att verifiera dem.

Tabell A.1: Uppställning över alla krav och önskemål satta på systemet

Kravspecifikation "Silhoperande airhockeyspel"						
Kriterier	Kravnummer och önskemålsnummer	Måttvärde	K/O	Vikt	Verifiering	
Huvudfunktioner						
Blockera raket, hög hastighet	K.1.1	Puck som rör sig 1,2 m/s, 300 mm från startposition	K	5	Fysisk provning	
Beräkningstakt	K.1.2	Klara sig utan dator som beräkningstakt	K	5	Fysisk provning	
Blockera raket, hög hastighet	K.1.1	Puck som rör sig 8 m/s, 40 mm från startposition	O	3	Fysisk provning	
Blockera raket, hög hastighet	K.1.2	Komma tillbaka till raket och startposition	O	2	Fysisk provning	
Sätt tillbaka pucken	O.1.1	Göra mål	O	3	Fysisk provning	
Identifiera av objekt på spelplan	K.2.1	5 mm i vika, 20 mm i rörelse	K	5	Fysisk provning	
Identifiera klubben på spelplanen	K.2.2	5 mm i vika, 20 mm i rörelse	K	5	Fysisk provning	
Beräkna puckens framtida position	K.3.1	Inom klubbans råde	K	5	Fysisk provning	
Beräkning av rvy vektor	K.3.2	Max 20 ms för att utföra beräkningen av rvy vektor	K	5	Fysisk provning	
Framräkning av vektor	K.3.4	Max 60 ms från tillslag från spelarens sida	K	5	Fysisk provning	
Framräkning av vektor	O.3.1	Max 40 ms från tillslag från spelarens sida	O	3	Fysisk provning	
Formfaktorn						
Forhållning av klubbans x-tid	K.4.1	300 mm från startposition med 0,9 m/s medelhastighet	K	5	Fysisk provning	
Forhållning av klubbans y-tid	K.4.2	150 mm från startposition med 0,5 m/s medelhastighet	K	5	Fysisk provning	
Aktuatorernas förhållningssäkerhet	K.4.3	Får inte ställas med mer än 9 mm från utsatt punkt	K	5	Fysisk provning	
Forhållning av klubbans x-tid, hög hastighet	O.4.1	150 mm från startposition med 2,5 m/s medelhastighet	O	3	Fysisk provning	
Forhållning av klubbans y-tid, hög hastighet	O.4.2	75 mm från startposition med 1,5 m/s medelhastighet	O	3	Fysisk provning	
Övriga systemkrav						
K.5.1	K.5.1	Ingen prestandeställning med icke-utsläppta spelarens påslagen	K	4	Fysisk provning/simulering	
K.5.2	K.5.2	Tillfälligt nedlagd för att styra spelare	K	5	Fysisk provning	
K.5.3	K.5.3	Fungera till vald motor	K	5	Fysisk provning/simulering	
O.5.1	O.5.1	Ja	O	3	Litteratursökning	
O.5.2	O.5.2	Färdig, enkel och stöd för flera operativsystem	O	3	Fysisk provning	
Hållbarhet						
Vika på konstruktion	K.6.1	Bordet skall klara vikten av konstruktionen	K	5	Verkligt test	
Wiko						
Lätt att separera materialet	K.7.1	Skall gå att separera och återvinna med endast handkraft	K	3	Ritning	
Lustig	K.8.1	3 år	K	4	Verkligt test	
Onskvärd lustig	O.8.1	10 år	O	3	Verkligt test	
Systemet ska inte skada bordet	K.8.2	Monteringen ska ej göra skador som minskar funktionen av bordet	K	5	Verkligt test	
Storlek						
Prototypens storlek monterad på bordet	K.9.1	Max 2 m i hög, 1 m bred och 1,1 m djup	K	4	Test/simulering	
Modulering på system	K.9.2	Skall gå att ändra kamerans position i höjdlag	K	4	Test/simulering	
Lätt att montera	K.9.3	Skall gå att ta ihop bordet efter monteringen av prototyp	K	4	Test/simulering	
Konstruktionen bör vara underhållbar	O.10.1	Inget personligt underhåll	O	4	Test/simulering	
Säkerhet						
Konstruktionen skall vara totalt elektrisk	K.11.1	Späddata/avsvalda elektroniska komponenter	K	5	Fysisk kontroll/ritning	

B. Alternativa mekaniska koncept

Här presenteras de koncept som fanns som alternativ i konceptvalsfasen men som inte uppfyllde kraven på ett eller annat sätt.

Kulskruvsaktuator, en aktuator bestående av en gängad axel som roteras av en motor. På axeln monteras komponenten som ska förflyttas likt en mutter på en skruv. När axeln roteras förflyttas då komponenten tack vare gängorna på axeln. Denna lösning ger hög noggrannhet och tillförlitlighet men för att åstadkomma snabb förflyttning måste axeln roteras i väldigt höga hastigheter vilket medför att konceptet valdes bort.

Kedjedriven linjäraktuator, en aktuator som fungerar på samma sätt som den valda remdrivna linjäraktuatorn med skillnaden att remmen byts ut mot en kedja. Denna lösning ger hög noggrannhet och möjliggör hög hastighet i förflyttningarna. Nackdelarna är att kedjan tillför extra massa som måste accelereras vilket leder till högre krav på motorn än för en remdriven linjäraktuator och valdes därför bort.

Tvåledad robotarm, en lösning som syftade till att återskapa rörelsen hos en mänsklig arm. Principen var att en motor placeras på bordets kortsida där ena änden av en arm fästs och roterar kring motorns axel. I andra änden av denna arm placeras ytterligare en motor och en arm som simulerar armbågsleden hos en människa. I den andra armens ände monteras klubban. Denna lösning skapar efterliknar en människas rörelser på ett bra sätt men lösningen blir instabil och tekniskt komplicerad, vilket medförde att konceptet valdes bort.

C. Komponentlista

Nedan finns en komponentlista, tabell C.1 med namn på alla i konstruktionen ingående komponenter. Komponenterna är numrerade med samma nummer som används i de tre sprängskissarna, figur 3.1 - 3.3.

Tabell C.1: Lista över de i konstruktionen ingående komponenter med namn och nummer för identifiering i figur 3.1 och 3.2

Nummer	Antal	Namn
Övre aktuatorn, y-led		
6	1	Motor
8	1	Rem y-led
9	6	Kulbussning
10	1	Spårkullager
11	2	Skena y-led
12	1	Motorfäste y-led
14	1	Ändkloss
15	1	Klubbhållare
16	1	Klubba
18	1	Remhjul 60 x 6,35mm
23	1	Remhjul 60 x 22mm
26	1	M8 skruv
27	12	Låsring
Undre aktuatorn, x-led		
2	1	Plåt kortsida V
3	1	Plåt kortsida H
4	1	Lagerlage
5	1	Drivaxel
6	1	Motor
7	2	Rem x-led
10	2	Spårkullager
13	2	Skena x-led
19	1	Remhjul adapter
20	1	Bortre plåt H
21	1	Bortre plåt V
22	2	Remhjul 51 x 22mm
24	1	Remhjul 51 x 8mm drivet
26	2	M8 skruv
Kameraställ		
25	1	Båge
28	2	Stag
29	1	PIXY

D. Test av krav

Nedan presenteras krav och önskemål och hur prototypen har klarat av att uppfylla dessa.

Huvudfunktioner

Krav 1.1, Klubban ska kunna blockera puckar som rör sig i 2 m/s, 300 mm från startposition när pucken utgår från andra planhalvan. Vid test av detta krav klarade klubban av att förflytta klubban sig cirka 300 mm varje gång då pucken rörde sig runt 2 m/s.

Krav 1.2, Systemet ska kunna klara sig utan en extern dator som utför beräkningskraften. Systemet använder en Arduino som mikrokontroller som endast behöver få programmet uppladdat till sig och därefter klarar den sig utan en extern dator.

Önskemål 1.1, Klubban bör kunna blockera puckar som utgår från andra planhalvan och rör sig i 8 m/s, 40 mm från startposition. Vid test av detta önskemål tog klubban 3 av 10 puckar men mycket av felet låg i koden vid detta tillfälle.

Önskemål 1.2, Systemet bör kunna utöva strategierna anfall, försvar och försvar med anfall. Flertalet strategier testades för systemet men endast försvar med anfall används som slutstrategi.

Önskemål 1.3, Systemet bör kunna göra mål. Klubban får inte upp pucken i så höga hastigheter i x-led och det är därför svårt för den att göra mål.

Önskemål 1.4, Prototypen bör vara enkel att starta upp och ej kräva inställningar. Prototypen kan tappa objekt då ljusförhållanden ändras.

Lokalisering av objekt på spelplan

Krav 2.1, Ska gå att identifiera pucken på spelplanen inom 5 mm i vila Enligt testet i avsnitt 7.1.1 kunde en maximal feluppskattning på 10,5 mm uppmätas. Kravet på att identifiera pucken i vila är därför inte uppnått för någon del av spelplanen

Krav 2.2, Ska gå att identifiera pucken på spelplanen inom 10 mm i rörelse. Enligt testet i avsnitt 7.1.1 kunde en maximal feluppskattning på 6 mm uppmätas. Kravet på att identifiera pucken i rörelse är därför uppnått för testad del av spelplanen.

Krav 2.3, Ska identifiera klubban på spelplanen inom 5 mm i vila Då klubban identifieras på samma sätt som pucken klarar klubban inte heller av kravet för hela spelplanen. Utöver det här kan felaktigheter i höjdkorrigerig av klubba orsaka större osäkerheter. Den största uppmätta avvikelser blev 21 mm.

Krav 2.4, Ska identifiera klubban på spelplanen inom 10 mm i rörelse. Då klubban ej identifieras i rörelse utan endast i vila anses det att detta krav vara irrelevant.

Beräkna puckens framtida position

Krav 3.1, Beräkning av klubbans tillslagspunkt mot pucken ska vara inom klubbans radie. Kravet verifieras i avsnitt 7.2 där beräknad position visas. Det finns flera dåliga värden men positionen uppskattas bättre när pucken närmar sig slutpositionen. Beräknad puckposition vid tillslagspunkt är därför inom klubbans radie, 48 *mm*. Den uppmätta osäkerheten belv 40 *mm*.

Krav 3.2, Beräkning av nya vektorer ska max ta 20 *ms*. Beräkningstiden begränsas av mikrokontrollern där uträkningarna för den totala koden avgör exekveringstiden. Enligt avsnitt 7.2 tar beräkningen 4-7 *ms* plus 20 *ms* från en fördröjning. Kravet uppfylls därför inte för samtliga fall.

Krav 3.3, Framtagning av vektor ska max ta 60 *ms* från tillslag av människa. Eftersom det endast krävs två punkter för att beräkna riktningen på pucken klaras kravet med en liten marginal enligt avsnitt 7.2.

Önskemål 3.1, Framtagning av vektor bör max ta 40 *ms* från tillslag av människa. Önskemålet klaras inte av då det förekommer fall där en korrekt riktning inte kan räknas ut. I nuläget beräknas ett medelvärde av de senaste riktningarna och därför kan fel förekomma i det fall när pucken ändrar riktning åt motsatt håll.

Förflytta klubban

Krav 4.1, Klubban ska kunna förflyttas 300 *mm* med en medelhastighet på 0,9 *m/s* längs med *y*-axeln. Kravet uppfylls då motorerna uppnår ett medel på 1,55 *m/s*.

Krav 4.2, Klubban ska kunna förflyttas 150 *mm* med en medelhastighet på 0,5 *m/s* längs med *x*-axeln. Kravet uppfylls då motorerna uppnår ett medel på 0,9 *m/s*.

Krav 4.3, Klubban får inte skilja med mer än 5 *mm* från utsatt position. Kravet uppfylls då motorerna har en osäkerhet på 1 *mm*.

Önskemål 4.1, Klubban bör kunna förflyttas 150 *mm* med en medelhastighet på 2,5 *m/s* längs med *y*-axeln. Önskemål uppfylls inte då motorerna uppnår ett medel på 1,54 *m/s*.

Önskemål 4.2, Klubban bör kunna förflyttas 75 *mm* med en medelhastighet på 1,5 *m/s* längs med *x*-axeln. Önskemålet uppfylls inte då motorerna uppnår ett medel på 0,82 *m/s*.

Hållfasthet

Krav 5.1, bordet ska klara av konstruktionens vikt. Verifiering är gjord genom fysisk provning. Konstruktionen är monterad på bordet och provkörd och bordet visar inga tecken på att vara högt belastat och kravet anses därför vara uppfyllt.

Miljö

Krav 6.1, Lätt att separera materialen. Alla ingående komponenter har sammanfogats genom skruvförband eller med hjälp av tejp vilken lätt kan demonteras med handkraft och kravet anses därför vara uppfyllt.

Livslängd

Krav 7.1, Bordet ska ha en livslängd på 3 år. Verifiering av kravet har varit svårt att göra men konstruktion har gjorts med livslängden i åsikt, kravet har därför inte kunnat verifieras.

Krav 7.2, konstruktionen ska inte skada bordet. Kravet har omprioriterats och anses inte längre viktigt eftersom en lösning där bordet lämnas oskadat skulle vara betydligt mer resurskrävande. Detta krav har ställts av gruppmedlemmarna själva och det har tagits fram en lösning där den åverkan som görs på bordet är minimal och inte påverkar bordets funktion. På grund av detta har krav 7.2 valts att bortse från.

Önskemål 7.1, Bordet bör ha en livslängd på 10 år. Verifiering av önskemålet har varit svårt att göra men konstruktion har gjorts med livslängden i åsikt, önskemålet är därför inte verifierats.

Storlek

Krav 8.1, konstruktionen monterad på bordet ska vara max 2 m hög, 1 m bred och 1,1 m djup. Kravet är uppnått och har verifierats genom mätning.

Krav 8.2, ska gå att ändra kamerans position i höjddled. Kamerastället har konstruerats så att det går att anpassa efter det avstånd som är optimalt för att Pixy-kameran skall kunna se hela spelplanen och samtidigt vara så nära planen som möjligt. Därför behöver inte kamerans höjd kunna justeras. Kravet är därför inte uppnått.

Krav 8.3, Ska gå att fälla ihop efter montering av system. Då bordet går att fälla ihop efter att konstruktionen har monterats anses kravet uppfyllt. Detta har verifierats genom att fysiskt testa att fälla ihop bordet.

Underhåll

Önskemål 9.1, Konstruktionen bör vara underhållsfri. På grund av hur systemet har konstruerats krävs inget periodiskt underhåll för att det ska fungera. Det enda underhåll som krävs är utifall att någonting skulle gå sönder. Kravet syftar dock på periodiskt underhåll vilket därför är uppnått.

Säkerhet

Krav 10.1, Konstruktionen ska vara totalt elsäker och ha skyddade/avskilda elektroniska komponenter. Detta krav prioriterades bort då det inte fyllde någon praktisk funktion och det inte hanteras några hälsofarliga strömmar.

E. Komponentbeskrivning

Här visas priserna och mer ingående information för de komponenter som ingår i lösningen.

Mikrokontroller

Mikrokontrollern som används är ett Arduino Mega kretskort baserat på ATmega 2560 mikrokontroller. Programmeringen sker i C++ där utökad funktion adderas via olika funktionsbibliotek och Arduinons egna IDE (Integrated Development Environment) sköter kompileringen för valt mikrokontroller typ, [15].

Stegmotor

Stegmotorn är tillverkad av RS med artikelnummer 535-0423 och är en 1.8° hybrid high torque stepper. Med hybrid menas detta att den klarar av att använda halvsteg och därmed använder sig av 400 *steg* istället för 200 *steg* per varv. Därav 0.9° stepper. Motorn väger 650 *gram*, [13].

Kostnaden för två av dessa motorer är 909 kr tillsammans.

Styrenhet

Styrenheterna är baserade på en L297 stegkontroll med dubbel H-brygga L298. Kombinationen är robust, beprövad och relativt lätt att dimensionera med tillhörande komponenter anpassade för höga strömmar, [14].

Kostnaden för två av dessa styrenheter är 1160 kr tillsammans.

Kamera

Kameran är en CMUcam5 Pixy som filmar i 50Hz och har en dedikerad beräkningsenhet för att lokalisera objekt, [10]. Kameran filmar med en upplösning på 640x400 *pixelar* men efter bildbehandling levereras valda objekts position mellan 0-320 respektive 0-200 *pixelar*, det vill säga en upplösning på 320x200 *pixelar*. Kameran används med en lins med 75° horisontell bildvinkel och 46° vertikal bildvinkel.

Kostnaden för denna kameran är 630 kr.

Kullager

Radiallagerna är spårkullager av modell 608 ZZ med en innerdiameter på 8 *mm* och en ytterdiameter på 22 *mm*.

Linjärlagerna är kulbussningar av modell LM8UU med en innerdiameter på 8 *mm* och en ytterdiameter på 15 *mm*.

Kostnaden för 20 spårkullager är 10 Euro. Dessa inhandlades via Ebay från en säljare som kallade sig Sprinter1212.

Kostnaden för 10 linjära kulbussningar är 13 brittiska pund.

Den totala kostnaden för lager blev 340 svenska kronor inklusive frakt.

Silverstålstänger och aluminiumrör

Silverstålstängerna som används är tillverkade av stål av kvalitet SS2140 från slipat verktygsstål och kommer i 1 meters längder med ett styckpris på 174 kronor.

Aluminiumröret är eloxerat 10x8mm rör av legeringen AlMgSi0,5 och kommer i 1 meters längder med ett styckpris på 53 kronor.

Kostnaden för 5 meter silverstålstänger och 1 meter aluminiumrör är 923 kr.

Rem

För remaktuatorerna används en 9 mm bred kuggrem med en kuggprofil kallad GT2. Denna rem kommer som metervara med ett meterpris på 4 Euro. Remmen köptes via Ebay från ett företag i Tyskland kallat LocalFAB.

Kostnaden för 8 meter rem i svenska kronor inklusive frakt är 380 kr.

VP-rör

För konstruktionen köptes 8 meter VP-rör med ytterdiameter 20 *mm* och 2 meter med ytterdiameter 16 *mm*. 2 meter 20 *mm* rör kostade 15 kr och 2 meter 16 *mm* rör kostade 9 kr.

Det köptes även ett paket med rörböjar för 45 kr.

Alla VP-rör och böjar inhandlades från Clas Ohlson.

Totala kostnaden blev 118 kr.

Skruv

Skruv till projektet tillhandahölls delvis från Chalmers prototypplabb. För de skruvdimensioner som inte fanns att få tag på där inhandlades resterande skruv och mutter från Swedol AB.

Kostnaden för skruvar är totalt 66 kr.

Totala kostnaden

Tabell E.1: Den totala kostnaden för prototypen

Namn	Preliminärt pris
Kamera	630
Motorer	909
Stålstänger	870
Aluminiumrör	53
Linjärkullager	240
Spårkullager	100
Rem	380
Drivers	1258
VP-rör	118
skruv	66
Totalt:	4508
Bord	2200
Totalt:	6708