



CHALMERS

Ryggradsliknande robot

För autonom laddning av elbil



Kandidatarbete vid institutionen för Elektroteknik

Philip Anderberg
Fanny Liesén Gullmander
Viktor Ingemarsson
Oscar Lundström
Jakob Nilsson
Rickard Persson

Abstract

Electric vehicles have in recent years been gaining ground. These vehicles require daily charging if used frequently. Today this is done manually. In order for the autonomous electric vehicles of the future to be able to operate without relying on human intervention to charge, the process of charging will require automation as well. This can be achieved in a multitude of ways but this project aims to evaluate the use of continuum robots to solve the problem.

Initially previous designs of continuum robots were studied to build an understanding of their structure and design. A preliminary design of the robot was then specified based on the findings in the research. On this preliminary design a number of calculations were made to determine the final design of the robot. From the final design a continuum robot was produced.

The robotic arm was modeled and Matlab code was written for an open control system. The aim of the code is to find the closest path from the current position of the robot to a defined point in space. Then integrating with a sensor to get a closed loop system. The sensor meant to be used in the closed loop system did not work as intended, therefore the robot was only controlled by an open loop system at the end of the project. This loop could be controlled either by a hand held controller or by predifining a point for the robot to navigate towards.

The robotic arm was evaluated in the end of the project to confirm that it achieved the set requirements. The requirements that dealt with the mechanical and actuator system were to a large extent met. However the requirements dealing with the control system were not met which included the demand on autonomy and precision. This was because the sensor that was meant to be used was not accurate enough.

Sammandrag

Elbilar blir allt mer populära och behöver laddas dagligen om de används frekvent. Detta görs i dagsläget manuellt. För att bilar i framtiden ska bli helt autonoma behövs det även en lösning för autonom laddning. Det kan lösas på en mängd olika sätt och projektet ämnar att undersöka lösningar för detta problem med ryggradsliknande robotar.

Arbetet började med litteraturstudier kring olika sorter av ryggradsliknande robotar för att få en övergripande förståelse för deras uppbyggnad och design. Utifrån detta skapades en preliminär design. Ett antal beräkningar utfördes för att fastställa den slutgiltiga designen för roboten. Utifrån den slutliga designen tillverkades en robot.

Samtidigt som roboten byggdes modellerades robotarmen och ett Matlabprogram för ett öppet reglersystem skapades. Programmet hittar den närmaste vägen till en punkt i rymden. För att hitta punkten i rymden och således få återkopplad styrning utvärderades en sensor. Sensorn fungerade inte tillräckligt väl för att användas och robotens slutliga styrning blev ett öppet system där den antingen kunde styras med en handkontroll eller genom att ange den punkt som roboten skulle styra till.

I projektets slutliga skede utvärderades robotarmen för att se hur den klarade av givna krav och mål. De krav som behandlade aktuator och mekaniska system, hur väl roboten kunde hålla upp sin egentyngd samt dess räckvidd, uppnåddes till stor del. Däremot uppnåddes ej de krav som relaterar till reglersystemet, så som autonomi och precision, eftersom den sensor som skulle användas ej var tillräckligt tillförlitlig och noggrann.

Förord

Rapporten är en del av ett kandidatarbete som är utfört på avdelningen för System- och reglerteknik, vilket tillhör institutionen för Elektroteknik vid Chalmers tekniska högskola. Arbetet är utfört av studenter från civilingenjörsprogrammen i maskinteknik, automation och mekatronik samt elektroteknik.

Ett stort tack riktas till vår handledare Jonas Fredriksson som under arbetets gång gett återkoppling och kommit med idéer som har fört arbetet framåt. Vi vill även tacka Prototypplabbets personal för konstruktiv kritik gällande robotens utformning och den maskinkompetens de har bidragit med. Ett sista tack riktas till Chalmers Robotförening för att vi har fått tillgång till deras lokaler och verktyg.

Göteborg, Maj 2018

Innehåll

1	Inledning	1
1.1	Syfte	2
1.2	Problemformulering	2
1.3	Avgränsningar	3
1.4	Metod	3
2	Förstudier om ryggradsliknande robotar	5
2.1	Ryggradsliknande robotars uppbyggnad	5
2.2	Utformning av segment	5
2.2.1	Kuddar	5
2.2.2	Fjäderbelastade plattor.	6
2.2.3	Mekaniska leder	6
2.3	Utformning av styrning	7
3	Mekaniskt system	8
3.1	Preliminär design	8
3.1.1	Segment	8
3.1.2	Längd och antal segment	8
3.1.3	Sektioner	9
3.1.4	Styrning	9
3.1.5	Avsmalning	9
3.2	Beräkning av moment och vajerkrafter	9
3.2.1	Egentyngder	10
3.2.2	Vajerkrafter	11
3.2.3	Slutgiltiga vajerkrafterberäkningar	11
3.2.4	Beräkning för val av vajer	12
3.3	Slutgiltig design	12
3.3.1	Utformning av robotarm	12
3.3.2	Utformning av basen	14
4	Aktuatorsystem	18
4.1	Motorer	18
4.2	Drivkort och kraftkälla	19
4.3	Val av elektriska komponenter	19
5	Reglersystem	20
5.1	Direkt kinematik	20
5.1.1	Kinematiskt samband mellan motorpositioner och sektionsvinklar	20
5.1.2	Analytiskt uttryck för robotarmens kinematik	24
5.2	Invers kinematik	25

5.2.1	Framtagning av styrsignaler	25
5.3	Öppen styrning	27
5.3.1	Manuell styrning med handkontroll	27
5.3.2	Öppen styrning med invers kinematik	27
5.4	Återkopplad styrning	28
5.4.1	Kamerasensor	28
5.4.2	Återkopplad styrning med kamerasensor	29
6	Verifiering	31
6.1	Krafter i vajrarna	31
6.2	Armens rörelseförmåga	31
6.3	Räckvidd	31
6.4	Sensors prestanda	33
6.4.1	Avstånd till måltavla	33
6.4.2	Måltavlas normal	33
6.5	Armens precision	34
6.6	Tid för navigering till målpunkt	35
6.7	Dockningskraft	35
7	Diskussion	37
7.1	Matematiska modeller och antaganden	37
7.2	Kravuppfyllnad	38
7.3	Samhälleliga och etiska aspekter	39
8	Slutsats och rekommendationer	40
	Litteraturförteckning	42
	Bilagor	44
A	Kravspecifikation	44
B	Specifikation för motor och växellåda	45
C	Specifikation för drivkort och nätaggreat	46
D	Kopplingsschema för måltavla	47

Kapitel 1

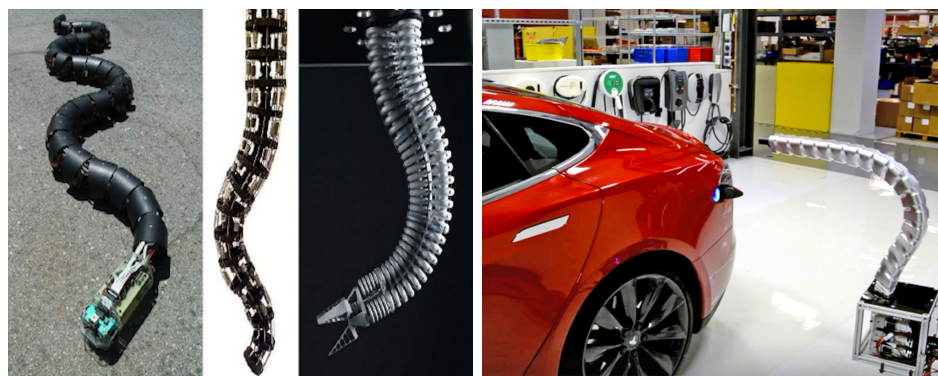
Inledning

Elbilar har på senare tid genererat stort allmänt intresse. En av anledningarna är elbilarnas miljömässiga fördelar över transportmedel drivna av fossila bränslen. Elbilar medför inga lokala föroreningar i form av avgaser och bidrar därför inte till växthuseffekten under drift om elen de laddas med är producerad med miljövänliga energikällor[1]. Det finns dock fortfarande utmaningar som behöver lösas för att göra elbilar till ett ännu mer attraktivt val. Ett problem är att de behöver laddas mer eller mindre dagligen, vilket idag utförs manuellt.

Ett flertal elbilar har idag funktioner som gör dem självkörande upp till nivå 3, enligt SAEs automatiseringsgradering, då bilen kan köra själv under vissa förhållanden men förlitar sig på att kunna falla tillbaka på föraren [2]. Helt självkörande bilar, de på nivå 4 och 5 enligt samma gradering, blir också allt mer aktuella och många samhällsplanerare samt företagsledare förutspår att framtidens transportsektor kommer domineras av autonoma fordon[3]. För att dessa fordon ska bli helt autonoma och färdas längre sträckor utan förare måste inte bara driften vara autonom, utan även laddningen.

Om dagens trend fortsätter och elbilar övertar en större marknadsandel kommer efterfrågan på laddningsstationer samt intresset för olika laddningsmetoder att öka. I dagsläget finns inga kommersiellt lanserade alternativa laddningsmetoder och majoriteten laddar manuellt. Det finns dock ett antal tekniska lösningar till detta, induktionsladdning och autonom robotladdning. Induktionsladdning har fördelen att anslutning av laddningskabeln inte behöver ske men medför signifikanta energiförluster vid laddning[4].

Med avseende på laddning med robotarm finns ett antal koncept gjorda. Ett av dessa koncept är skapat av elbillstillverkaren Tesla och kan ses till höger i Figur 1.1b. Det består av ett antal segment, liknande kotor i en ryggrad som styrs av motorer i botten via vajrar upp i armen, en så kallad ryggradsliknande robot. Detta projekt avser att undersöka möjligheten för autonom laddning av elbilar med någon typ av robotarm. Mycket inspiration hämtas från denna lösning och andra typer av liknande koncept av ryggradsliknande robotar, se Figur 1.1a.



(a) Diverse robotar[5].

(b) Teslas koncept [6].

Figur 1.1: Existerande ryggradsliknande robotar.

1.1 Syfte

Syftet med projektet är att modellera, konstruera och tillverka en ryggradsliknande robotarm med förmågan att autonomt finna och navigera till en markerad punkt i dess omgivning.

1.2 Problemformulering

För att uppfylla syftet bryts problemet ned i ett antal delproblem vilka identifierades som de mest vitala att lösa under projektets gång.

Mekaniskt system

Flertal beslut med avseende på designparametrar behövde tas och till stöd finns redan kända utformningar men också möjlighet att utveckla till nya lösningar. Det gäller främst armens utformning men också den bas robotarmen byggs på där elektriska komponenter monteras, sedd längst ned till höger i Figur 1.1b. Olika lösningar behöver undersökas för att hitta den mest lämpade utformningen för arbetet roboten ska utföra. Krafterna som uppkommer i armen samt deras påverkan på armens dynamik är inte kända. Uppkomna krafter är de som beror av egentygnd och styrningen. Dessa krafter behöver beräknas för att möjliggöra val av komponenter i både det mekaniska- och aktuatorsystemet.

Aktuatorsystem

Det är möjligt att driva armen med många olika typer av aktuatorer samt att implementera dessa på en mängd olika sätt. Vilken typ av aktuatorer samt hur implementering av dessa optimalt utförs ska bestämmas med avseende på de moment de ska utföra. Andra komponenter såsom styrkort till aktuatorer samt drivkälla behöver också väljas.

Reglersystem

Då robotarmen skall styras mot en punkt, ej given på förhand, behöver en lösning konstrueras för att hitta denna punktens position. Denna lösning kommer innefatta sensorer vilka behöver undersökas. Ett system för att navigera robotarmen till den givna punkten ska utformas samt programmeras. För att möjliggöra modellering och således programmering behöver en förståelse för robotens kinematik erhållas.

1.3 Avgränsningar

En avgränsning som kommer från kravställaren är att armen ska vara en ryggradsliknande robot, därför kommer endast robotar av denna typ att undersökas.

Då projektet endast syftar till att ta fram en konceptuell robotarm som navigerar till en punkt i sin omgivning kommer aspekter kring laddningskontakten samt aspekter berörande framtagandet av en fullständig produkt inte behandlas. Dessa aspekter innefattar saker som vilken typ av kontakt som ska användas, tillverkningsmetoder och kostnader, miljömässiga aspekter samt aktivt undvikande av kollision med människa.

För att projektet inte ska bli för omfattande och genomföras inom given tidsram kommer tillverkning utav elsystem endast att använda sig av befintliga komponenter där styrningen kommer att ske med elmotorer.

För styrning av armen, implementering av reglersystem, används en mikrokontroller av typen Arduino Uno. Valet baseras på att kompetens finns internt samt att en mikrokontroller av denna typ tillhandahålls av uppdragsgivare.

Sensorn som kommer användas är en kameran sensor, Pixy Cam. Kamerans sensor tillhandahålls av uppdragsgivaren och anses uppfylla de tilltänkta uppgifterna.

1.4 Metod

Arbetet har utformats utifrån problemformuleringens delproblem vilka var utformning av det mekaniska systemet, aktuatorsystemet och reglersystemet med avgränsningar i beaktning. Innan arbetet med dessa utfördes krävdes kunskap inom de olika områdena och framförallt generell kompetens om ryggradsliknande robotar, förstudier genomfördes därför.

Förstudier

Studierna grundade sig i undersökningar av befintliga lösningar, tekniker och patent. Här beaktades en stor bredd med material, allt ifrån Youtubevideor och bloggar om hemmabyggen till vetenskapliga texter. Detta då det avsågs att undersöka ryggradsliknande robotars fundamentala uppbyggnad och styrsystem, för att inspirera och ge en klar bild av vad som var möjligt samt lämpligt att arbeta mot.

Kravspecifikation

Utifrån förstudierna skapades en kravspecifikation. Detta för att i slutet av projektet utvärdera hur väl syftet och kraven uppfylldes. Kraven ställda av projektgruppen hade utgångspunkten att armen fysiskt skulle klara av att ladda en bil. Den innefattar krav gällande hur nära den givna punkten roboten ska styra, hur lång tid det ska ta att styra dit och hur stort avsökningsområde roboten ska ha. Det definierades även några önskemål som att robothuvudet skall ha separat styrning och att armen skall applicera en dockningskraft för att ansluta en laddningskontakt. Kravspecifikationen återfinns i Bilaga A.

Mekaniskt system

För att hitta den mest lämpade designen för robotarmen var det nödvändigt att göra beräkningar. Dessa beräkningar innefattar framför allt kraftberäkningar för att optimera krafterna i vajrarna och minska belastning på aktuatorsystemet. För att utföra beräkningar skapades en preliminär design utifrån de krav som angivits i kravspecifikationen. Resultatet av beräkningarna skapade den slutliga designen. Utifrån designen genomfördes kraftberäkningar på nytt för att fastslå de tidigare resultaten och de krav som ställts på komponenterna i aktuatorsystemet.

Aktuatorsystem

Utifrån de beräkningar som utfördes för det mekaniska systemet kunde elmotorer väljas. För att alla elektriska komponenter skulle fungera tillsammans valdes dessa så att de var kompatibla med den givna elmotorn. Delar av kravspecifikationen relaterar till aktuatorsystemet vilket togs hänsyn till vid utformningen.

Reglersystem

För att ta fram ett reglersystem behövde robotens kinematik vara känd. Analytiska samband för kinematiken togs fram, implementerades och ett program för att beräkna de motorvinklar som motsvarar en viss punkt skapades. Innan detta program kunde tillämpas testades manuell öppen styrning. Styrningen skedde med en handkontroller för att verifiera att roboten uppförde sig som önskat. En punkt som roboten skulle styra till definierades genom mjukvaran. Slutligen implementerades en sensor så att en punkt kunde identifieras och robotens position kunde förändras kontinuerligt för att komma så nära punkten som möjligt, ett återkopplat system.

Verifiering

I slutet av projektet validerades roboten för att undersöka hur väl syftet och de krav som ställts hade uppnåtts. För att åskådliggöra detta utformades ett flertal tester med avseende på kravspecifikationen.

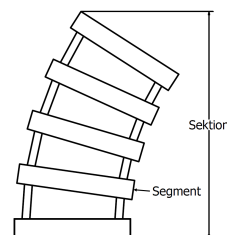
Kapitel 2

Förstudier om ryggradsliknande robotar

Utan grundläggande kunskap om vad för typ av robot som projektet ämnat att skapa kan missförstånd uppstå. Med anledning av detta presenteras ryggradsliknande robotars uppbyggnad, olika grundläggande utföranden samt benämning och utformning av dess byggstenar.

2.1 Ryggradsliknande robotars uppbyggnad

En ryggradsliknande robot består av sektioner som kan styras. Dessa sektioner är uppbyggda av segment som bildar en kontinuerlig struktur, se Figur 2.1 [7]. Styrningen av roboten sker genom att längden av sektionernas sidor ändras relativt varandra. Längdskillnaderna kan uppnås med hjälp av bland annat hydraulik [7], pneumatik [9] eller vajrar [8]. Det existerar även ryggradsliknande robotar som har individuell styrning på varje segment [10]. I det fallet är varje segment också en sektion.



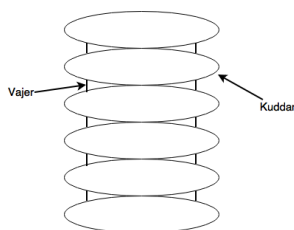
Figur 2.1: Principiella uppbyggnad av arm.

2.2 Utformning av segment

Vajerstyrda segments rörelse kan ske på ett antal olika sätt. Tre vanligt förekommande sätt att göra det på är att utforma segmenten som kuddar[11], med fjäderbelastade plattor[7] eller mekaniska leder[8].

2.2.1 Kuddar

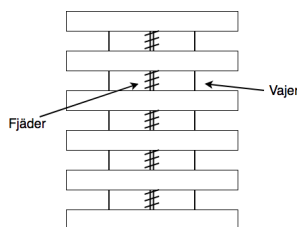
Varje segment vilar ovanpå segmentet under och genom eliptiskt tvärsnitt kan dessa rulla ovanpå varandra vilket möjliggör rörelse, se Figur 2.2. Friheten i varje segment går att begränsa genom de radier som används för kuddarna. Då segmenten rullar ovanpå varandra är positionerna inte exakta och precisionen blir lidande.



Figur 2.2: Uppbyggnad med elliptiska segment.

2.2.2 Fjäderbelastade plattor.

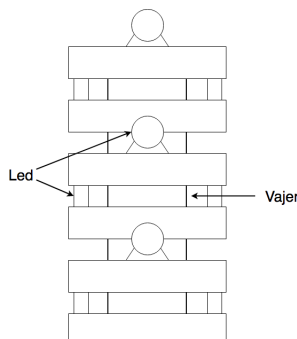
Mellan varje segment kan en fjäder, eller material med motsvarande funktion, installeras, se Figur 2.3. Den fjädrande effekten gör att roboten går tillbaka till sitt ursprungliga läge vilket är användbart. Dock uppstår problem vid laster i armen då fjäderstyvhetera måste ökas för att bära lasterna. Motorerna som behövs för att styra fjädrarna behöver då vara starkare eftersom att motorerna jobbar mot fjädrarna.



Figur 2.3: Arm av fjäderstruktur.

2.2.3 Mekaniska leder

Segmenten kan kopplas ihop med mekaniska leder. Armen balanseras då upp med vajrar som låser armen i en position. De mekaniska lederna möjliggör en begränsning av vinkelrörelsen i varje segment. Det finns flera olika typer av mekaniska leder och varianter för sammanfogning av segmenten. Två av dessa är integrerade mekaniska leder och fristående mekaniska leder, se Figur 2.4. Skillnaden är att i integrerande mekaniska leder är leden integrerad i designen på segmenten. För fristående mekaniska leder skapas rörelsen genom att varje par av segment är kopplade till en axel eller ett gängjärn.



Figur 2.4: Integrerade mekaniska leder mellan segmenten.

2.3 Utformning av styrning

För ryggradsliknande robotar finns det ett flertal olika styrningsmöjligheter. Tidigare har en typ nämnts men två väsentligt skilda sätt presenteras, lokalt eller centralt styrda leder. Med lokalt styrda leder placeras motorn i leden som skall styras, likt en industrirobot eller som i Figur 1.1a till vänster. Motorn kopplas då via sin axel direkt till leden. Alternativt kan central styrning användas, då placeras motorerna i anknytning till armen men ej i den. Vajrar leds då upp genom roboten och med dessa styrs armen, se Figur 1.1a. Fördelen med att ha lokalt styrda leder är att precisionen blir bra, förutsatt att stegmotor eller liknande används där motorns läge är känt. Största nackdelen är att när motorerna flyttas upp i armen blir armen genast mycket tyngre. Denna viktökning leder till att helt andra krav ställs på systemet. Omvänt är fördelen med central styrning att vikten på armen blir avsevärt lägre vilket ger rum för en arm som är mer lättstyrd och således ofta billigare. Precisionen blir vid denna typ av styrning ofta lidande av flera anledningar. Felkällor uppkommer som glapp i vajrarna och om de tvinnas runt varandra förändras längderna.

Kapitel 3

Mekaniskt system

Det mekaniska systemet syftar på konstruktionen av robotarmen samt basen den är monterad på. Kapitlet ämnar att presentera det mekaniska systemet samt motivera de val som gjorts. Första delen presenterar de konceptuella val som kom att bli den preliminära designen. För att ta fram en slutlig design genomfördes beräkningar på denna design. Dessa beräkningar ger således en grund för de slutliga designvalen för det mekaniska systemet men även för det elektriska systemet.

3.1 Preliminär design

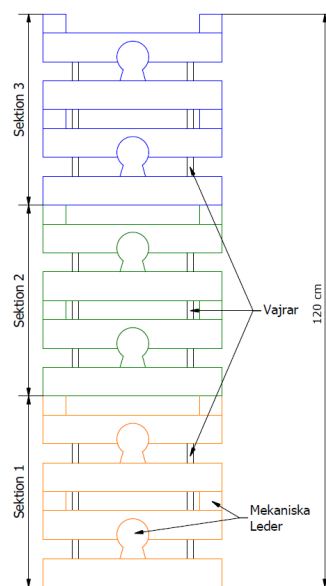
För att ha en design att utgå ifrån i modellering och beräkningar valdes en typ av segment och styrsystem samt dimensioner på roboten. Dessa val gjordes med avseende på förstudier och kom att revideras då den inte uppfyllde kraven. Den preliminära designen illustreras i Figur 3.1.

3.1.1 Segment

Den typ av segment som ansågs mest lämplig för denna kategori av robot och arbetet den skulle utföra är ett cirkulärt tvärsnitt. Cirkulära tvärsnitt ger samma kinematik i alla olika riktningar från monteringsplats. De olika segmenten sitter i varandra med hjälp av integrerade mekaniska leder. Dessa segment kan med lätthet tillverkas med additiv tillverkning.

3.1.2 Längd och antal segment

Efter analys av befintliga lösningar kring ryggradsliknande robotar bestämdes det att armens längd bör vara 120 cm för att möta kravspecifikationens krav angående räckvidd. För att inte överstiga budget vid köp av motorer byggdes roboten ovanifrån med ett segment i taget. Detta för att kontinuerligt göra tester för att se vad för krafter som uppstår i vajrarna beroende på antal segment. Då krafterna för ett antal segment var kända kunde det bestämmas vad för typ av motorer som behövs för att dra i vajrarna. Denna iteration kom att



Figur 3.1: Preliminär design.

genomföras fram tills att det största antal segment som kunde användas med avseende på motorerna.

3.1.3 Sektioner

Antalet sektioner som armen delas upp i avgör rörelsemönstret armen kan uppnå men påverkar även komplexitet och kostnad till följd av sektionernas individuella styrning. Armen delades därför upp i tre lika långa sektioner, vilket bedömdes ge tillräckliga styrningsmöjligheter samtidigt som komplexitet och kostnader hölls inom rimliga gränser. Rörligheten påverkas även av hur mycket varje sektion kan böjas, för att specificera rörligheten analyserades återigen befintliga lösningar och en maximal utböjning av 90 grader per sektion valdes.

3.1.4 Styrning

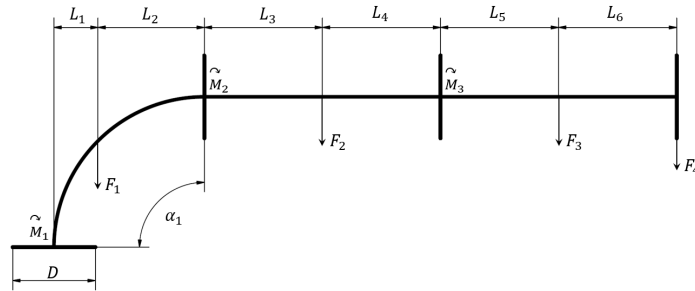
I detta projekt valdes vajrar för styrning av roboten. Detta för att använda vad som kallats central styrning eftersom det ger önskad effekt på vikt samt för att det är en simpel metod [12]. Vajrarna styrs av elmotorer, vilka är placerade i den bas roboten är monterad på.

3.1.5 Avsmalning

Massan som är placerad längre ut i armen utövar ett större moment på basen till följd av dess hävarm. Således bör denna massa minimeras för att minska de krafter som krävs för att styra roboten. För att minska massan kan en successiv minskning av radien på segmenten användas. Volymen för varje segment minskar och således också dess massa, utan att påverka höjden på segmenten. Den eventuella minskning av radien reducerar dock också de moment vajrarna verkar med. Detta leder till att vajerkrafterna ökar vilket är en negativ effekt av radieminskningen. Det var således önskvärt att optimera armens avsmalning.

3.2 Beräkning av moment och vajerkrafter

Utifrån de satta specifikationerna i den preliminära designen kunde en beräkningsmässig modell ställas upp. I modellen förenklas armen till två dimensioner och sektionerna approximeras till cirkelbågar, se Figur 3.2. Den förenklade modellen placerades i ett läge där den analytiskt bedömdes utsättas för störst påfrestningar i form av moment vid sektionernas mötespunkter till följd av egentyngden. Läget kan ses i Figur 3.2 då $\alpha_1 = 90^\circ$, här placerades egentyngderna med längsta möjliga hävarm till momentpunkterna, största moment uppstår således i denna position.



Figur 3.2: Friläggning av sektioner och matematisk modell.

Utifrån Figur 3.2 kan momenten tecknas som

$$M_1 = \sum_{i=1}^6 L_i \cdot F_4 + \sum_{i=1}^5 L_i \cdot F_3 + \sum_{i=1}^3 L_i \cdot F_2 + L_1 \cdot F_1, \quad (3.1)$$

$$M_2 = \sum_{i=3}^6 L_i \cdot F_4 + \sum_{i=3}^5 L_i \cdot F_3 + L_3 \cdot F_2, \quad (3.2)$$

$$M_3 = \sum_{i=5}^6 L_i \cdot F_4 + L_5 \cdot F_3. \quad (3.3)$$

3.2.1 Egentyngder

Krafterna F_1 , F_2 och F_3 kan härledas till armens egentyngd. Kraften F_4 uppkommer till följd av den massa, m_h , som ett potentiellt huvud till armen innebär,

$$F_4 = m_h \cdot g. \quad (3.4)$$

Massorna i sektionerna optimerades genom avsmalningsfaktorn, benämnd a . Faktorn är ett mått på hur stor andel av armens initiala radie som toppen av armen har. Segmentens massa delas upp i två, en konstant massa som representerar de kanaler som går centrerat i segmenten där geometrin inte ändras, m_b , och en massa som uppkommer av radieminskningen, m_g . Egentyngden för första sektionen blir då

$$F_1 = (m_g + m_b) \cdot g. \quad (3.5)$$

Till följd av radieminskning minskar den del av massan som inte är konstant från första till sista segment med avsmalningsfaktorn i kvadrat, det följer direkt av volymminskningen,

$$F_3 = (m_g \cdot a^2 + m_b) \cdot g. \quad (3.6)$$

Tyngden för mellersta sektionen är genomsnittet av sektion ett och tre,

$$F_2 = F_1 - \frac{F_1 - F_3}{2}. \quad (3.7)$$

Avstånden till tyngdpunkterna, L_1 , L_3 och L_5 i Figur 3.2, ansattes till mitten av sektionerna. Detta ledde till att beräkningarna av momenten är konservativa då hävarmen egentligen är mindre till följd av avsmalningsfaktorn som koncentrerar masscentrum närmare botten av sektionen.

3.2.2 Vajerkrafter

Momenten M_1 , M_2 och M_3 ger upphov till vajerkrafter som kan beräknas, se Figur 3.2. Mötespunkten mellan segmenten kan modelleras och friläggas enligt Figur 3.3. Ekvationer för vajerkrafterna i den första punkten kan då tecknas enligt

$$\uparrow : S_1 + S_2 - F = 0, \quad (3.8)$$

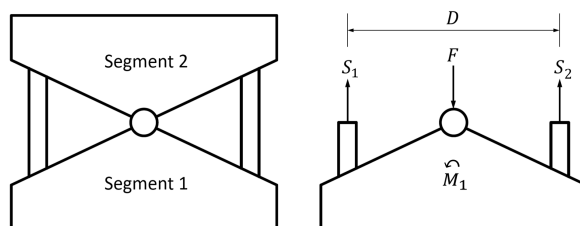
$$M_1 - S_1 \frac{D}{2} + S_2 \frac{D}{2} = 0. \quad (3.9)$$

Vid analys av problemet framgår det att en av vajrarna måste vara i kompression. Dessa tar ej upp kompression och således ansätts en av vajerkrafterna till 0, i detta fall $S_2 = 0$. Ekvationerna förenklas då till

$$F = S_1, \quad (3.10)$$

$$M_1 = S_1 \frac{D}{2}. \quad (3.11)$$

Insättning av Ekvation (3.11) i Ekvation (3.1) ger vajerkraften uttryckt i egentyngden och avståndet mellan vajrarna. Denna uppställning repeteras för att ta fram momenten M_2 och M_3 .



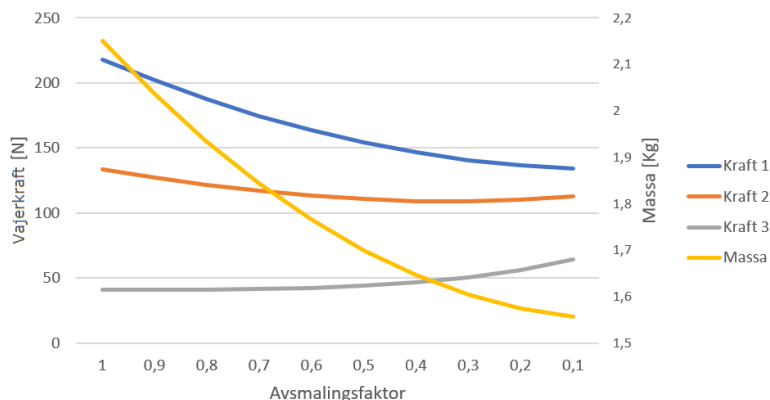
Figur 3.3: Friläggning av ett segment.

3.2.3 Slutgiltiga vajerkraftsberäkningar

Beräkningarna implementerades i ett Matlabprogram med indatan; armlängd, avsmalning, massor, maximal vinkel per sektion och antal segment. Värden på indatan bestämdes enligt Tabell 3.1. Då avsmalningen skulle optimeras, itererades beräkningarna för olika värden på denna, resultatet kan ses i Figur 3.4.

Tabell 3.1: Värden på indatan och vajerkrafter.

m_g	0,4 Kg		
m_a	0,25 Kg	S_1	154 N
m_2	0,2 Kg	S_2	111 N
L	120 cm	S_3	44 N
a	0,5		



Figur 3.4: Avsmalningsinverkan på vajerkrafterna.

Utifrån beräkningarna valdes en avsmalningsfaktor på 0,5 då detta ger en minskning i S_1 med nästan 30%, revision från preliminär design. Det bedömdes att en kraftigare avsmalningsfaktor inte vore rimlig då detta skulle göra armen för tunn i toppen för eventuell laddsladd. Med denna avsmalningsfaktor och övriga värden enligt vänstra kolonnerna i Tabell 3.1, genereras värden för linkrafterna som kan ses till höger i tabellen.

3.2.4 Beräkning för val av vajer

Vajern behöver väljas för att den klara de maximala krafter som kan uppkomma. Det innebär alltså vajern har en brottgräns som är högre än den maximala kraften i vajern dividerat med vajerns area.

$$R_{m,vajer} > \frac{F_{max}}{A_{vajer}} [N/mm^2], \quad (3.12)$$

där R_m är brottgränsen, F kraften i vajern och A_{vajer} är arean för vajern.

3.3 Slutgiltig design

Robotens design bestämdes utifrån den preliminära designen samt med de beräknade värdena på krafter och designfaktorer i beaktning. Roboten delades upp i två distinkta delar, arm och bas, se Figur 3.5. Basen ackommoderar komponenterna för styrning, armen monteras ovanpå och vajar leds ned genom armen till basen. Utformningen av arm och bas gör det möjligt att enkelt göra armen längre eller kortare samt förändra antalet styrda sektioner. Basen är byggd i nivåer, kallade moduler, som separat sköter styrning av varje sektion.

3.3.1 Utformning av robotarm

Armen består av 60 segment som är uppdelade i tre lika långa sektioner å 40 cm. Segmenten, tillverkade av plasten PLA, producerades med additiv tillverkning. Ifyllnadsgraden i de översta 10 segmenten samt den nedersta sektionen är 20%. Resterande segment har ifyllnadsgraden

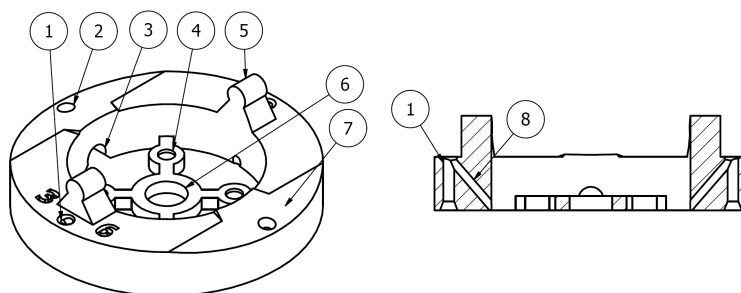


Figur 3.5: Roboten i sin helhet.

15%. Avsmalningsfaktorn är 0,5 för att egentygden i armen ska minimeras samtidigt som krafterna i vajrarna skall minskas.

Segment

Storleken på robotens segment blir mindre längre ut på roboten. Givet avsmalningsfaktorn 0,5, 60 segment och att största segmentet har diametern 10 cm, blir varje segment 0,083 cm mindre i diameter än det tidigare segmentet.



Figur 3.6: Segmentens utformning.

Segmenten är konstruerade på ett sådant sätt att de har iklickande mekaniska leder (3) och (5), se Figur 3.6. Segmenten monteras med 90 graders vridning mot det föregående, se Figur 3.7. Således är rörelsen för varje segment begränsad till en frihetsgrad. Rörelsen är i varje enskilt segment, genom designen, begränsad till 9° vridning (7). Med tjugo segment i varje sektion, tio som vrider åt samma håll, som alla är begränsade till 9° vridning möjliggörs totalt 90° vridning för varje sektion.

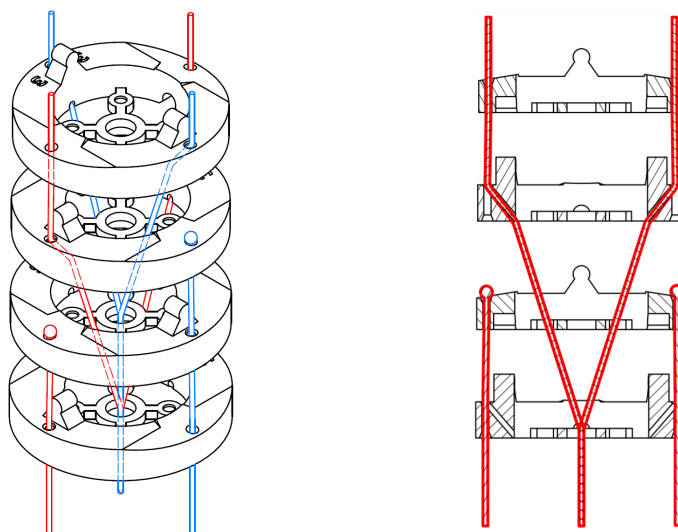
Varje segment har fyra hål till styrvajrarna (1), (2) och ett större hål i mitten (6) där styrvajrarna till sektionerna högre upp i konstruktionen dras. Styrvajrar till de övre sektionerna är placerade i centrum av segmenten för att minimera det moment som uträttars på de sektioner de inte är ämnade att verka på. På två av hålen för vajrarna finns det hål som går snett in och sammanfogas med vajerhålet (8). Dessa två hål är till för att styra in vajern från hålet i mitten på segmenten till guidehålen på de segment som ska styra roboten. De sneda hålen finns på alla segment för att sektionerna ska kunna modifieras till godtyckligt antal segment under projektets gång.

Vajrar

Vajrarna som används för att styra roboten har en diameter på 0,12 cm och är gjorda av rostfritt stål. De har en specificerad brottgräns från leverantör på 1 GPa. De största spänningarna som uppkommer är 0,15 GPa. Mer om dessa krafter samt brottgräns kan läsas i Kapitel 3.2.

Varje sektion kan styras i två led med hjälp av två vajerpar, det blåa respektive röda i Figur 3.7. Vajerparen består av två vajrar som båda är fästa till samma spole. Således förkortas den ena när den andra förlängs. Vid övergång mellan sektioner dras de centrala vajrarna ut för att på samma sätt som hos den tidigare sektionen dras till sektionens två

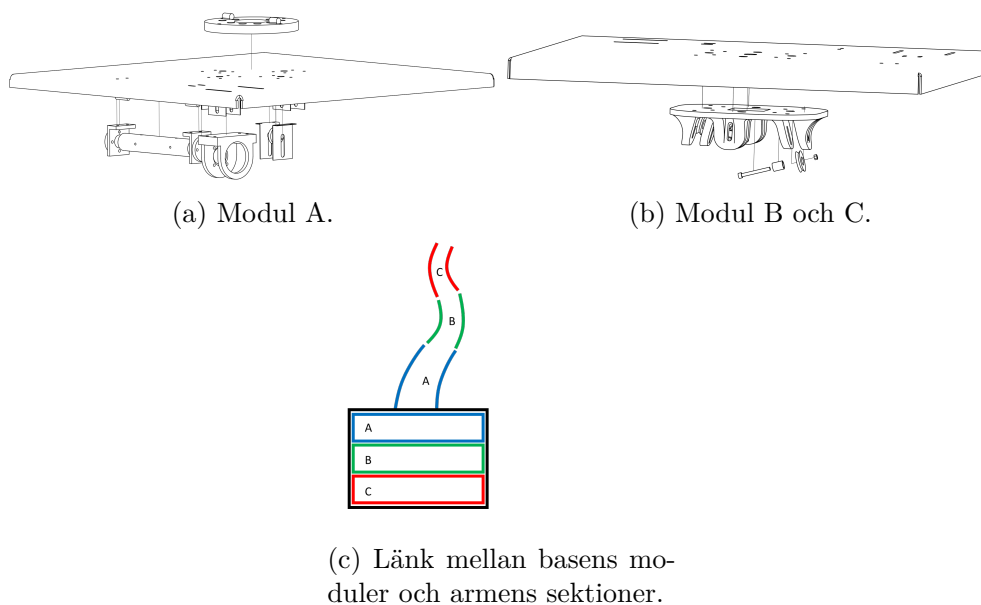
toppsegment. Detta görs i överlapp mellan de två paren som beskrivs av högra bilden i Figur 3.7.



Figur 3.7: Vajrarnas dragning vid byte av sektion.

3.3.2 Utformning av basen

Basen till roboten innehåller all elektronik och mekaniska element som krävs för att driva armen, stegmotorer, växellådor, drivare till motorer och nätaggregat. För att få en bas som går att anpassa till varierande antal sektioner byggs basen upp i moduler, som separat styr en sektion i armen, se Figur 3.8c. Översta modulen ser annorlunda ut jämfört med de andra då armen fästs i dess översida samt att styrvajrar ansluts vinkelrätt mot modulen, i övriga moduler ansluts styrvajrarna med vinkel, se Figur 3.8a och 3.8b. Modulerna monteras till en låda med L-profil i hörnen och bildar tillsammans basen i Figur 3.8c.



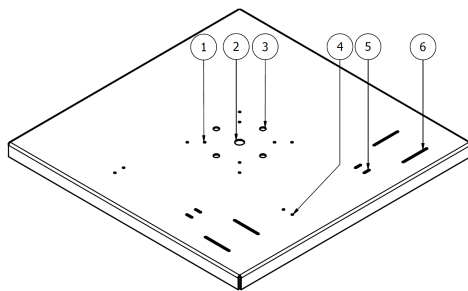
Figur 3.8: Moduler och de sektioner de styr.

Modulerna

De tre modulerna innehåller vardera två stegmotorer med tillhörande styrspolar och guiderullar för vajrar. Beroende på antalet sektioner som behöver styrning monteras lika många basmoduler ovanpå varandra. Modulerna är uppbyggda med en monteringsplatta i toppen, på vilkens undersida alla komponenter fästes. Övriga komponenter monteras längst ned i basen. Monteringsplattor sammanfogas med vinkelprofiler i hörnen.

Monteringsplatta

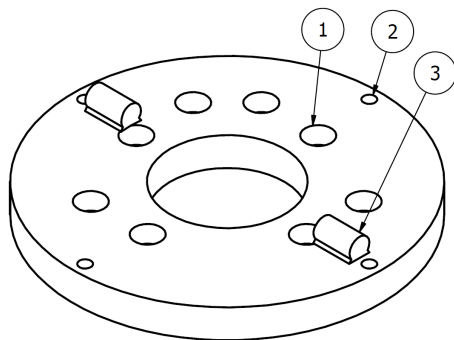
I toppen av varje modul sitter en monteringsplatta, i denna fästes alla komponenter, som krävs för att styra en sektion. I plattan finns ett antal hål och skårar som möjliggör montering av alla komponenter, se Figur 3.9. Hål (4), (5) och (6) avser montering utav styrspole, växellåda och motor, där motor och växellåda monteras som ett paket med möjlighet till justering till följd av skårorna (6). Guiderullarna monteras vid de mindre hålen (1) där styrvajrarna för den aktuella sektionen kommer ner genom (3). Övriga styrvajrar leds ner igenom (2).



Figur 3.9: Topplatta för en modul.

Adapter

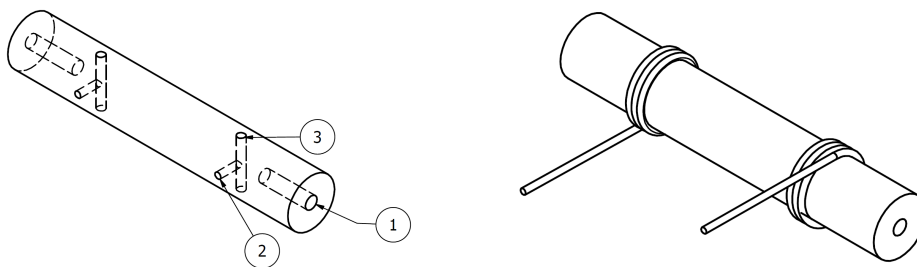
Ovanpå den översta modulen monteras en adapter med skruvar, se Figur 3.10. Adaptern möjliggör montering av det nedersta segmentet av armen till basen. Adaptern monteras direkt till översta modulen via befintliga hål (1), resterande armsegment kan vara generella. Precis som de övriga segmenten klickas det nedersta segmentet i armen i adaptern för att på så sätt fästas (3). Vajrarna leds ner till basen genom kanaler (2).



Figur 3.10: Adapter mellan arm och bas.

Styrspole

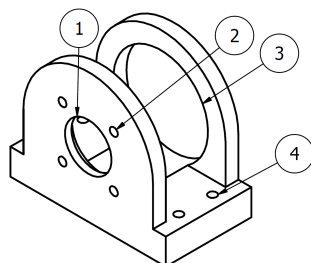
Styrspolarnas uppgift är att med hjälp av motorerna rulla in eller ut vajrarna och således styra roboten. Vajrarna monteras i par så att den ena rullas ut när den andra rullas in, se Figur 3.11. Vajern lindas några varv runt spolen och dras genom ett hål (3) och säkrades med en stoppskruv som drogs åt genom ett anliggande hål (2). I vardera ände av spolarna monterades en axel i ett hål (1) och fästes med lim. Dessa axlar går genom varsin bussning som lagrar upphängningen och möjliggör montering.



Figur 3.11: Styrspolens utformning och funktion.

Motorfäste

Motorfäste i Figur 3.12 håller motor och växellåda, montering skedde genom att växellådan fördes genom det stora hålet (3) och fästa motorn i de små hålen (2). Motoraxeln går då genom hålet (1) mellan skruvhålen. Detta fäste monterades i topplattan via monteringshål (4) i linje med styrspole.

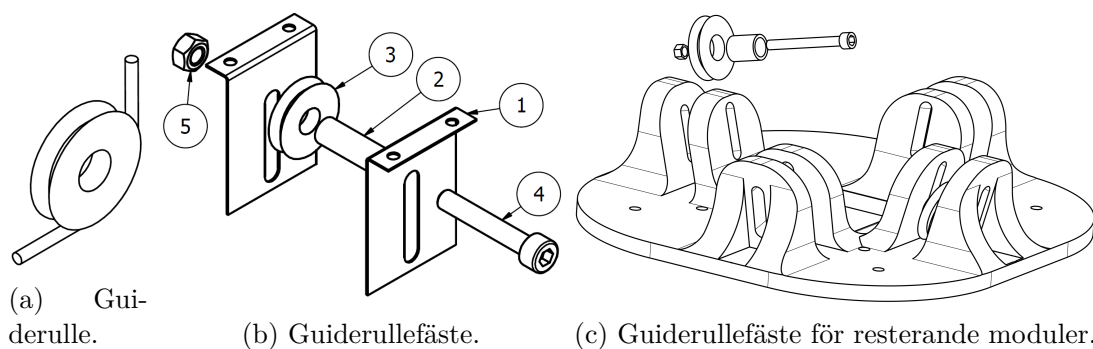


Figur 3.12: Motorfäste.

Guiderulle

Guiderullar har i uppgift att guida styrvajrarna från ett vertikalt läge där de ansluter till armen, till ett horisontellt läge för att ansluta till styrspolarna, se Figur 3.13a:A. Guiderullen (3) glider på en ihålig axel (2) varigenom det går en skruv (4) som kilar fast axeln mellan de två plattor (1) som möjliggör montering. Plattorna (1) har skårar som möjliggör justering av rullens position och därigenom möjliggör förspänning av vajern. Guiderullarna för den översta våningen i basen, kopplad till nedersta sektionen, har fästen utformade enligt Figur 3.13b. Översta modulen har fyra stycken likadana monterade för att hantera de fyra styrvajrarna. De två nedre modulerna har endast ett guiderullefäste med plats för fyra guiderullar, se Figur 3.13c. I dessa monteras guiderullar med en vinkel för att minska friktion och slitage på vajrarna då dessa ansluter till rullarna med vinkel.

Dessa fästen är tillverkade i ett stycke genom additiv tillverkning tillskillnad från fästena för den övre modulen som är tillverkade i böckad stålplåt.



Figur 3.13: Guiderulle och dess fästen.

Kapitel 4

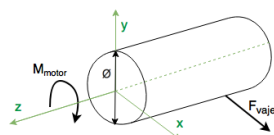
Aktuatorsystem

Rörelsen i armen möjliggörs av ett aktuatorsystem som med hjälp av elmotorer verkar på det mekaniska systemet och på så sätt utför det som reglersystemet har beräknat. I kapitlet nedan presenteras och motiveras de val som gjorts för aktuatorsystemet. Val av motorer motiveras och utifrån dessa valdes även drivkort och spänningskälla. Samtliga valda komponenter köptes in från leverantör och monterades i basen.

4.1 Motorer

Styrning av vajrarna sker med stegmotorer till följd av deras goda precision vid styrning. Detta medför även att behovet av positionsmätare ansågs överflödigt då antalet steg tagna är känt. Två motorer per sektion, totalt sex motorer, möjliggör styrning i alla riktningar.

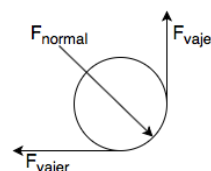
Då priset för stegmotorer ökar kraftigt med hållmoment valdes stegmotorer i kombination med en växellåda. Valet gör att precisionen förbättras medan hastigheten minskar. Största uppkomna kraft i någon vajer är dimensionerande, se tidigare kapitel samt Figur 4.1. Vajern leds ned på styrspolen där de utövar ett moment på spolen. Stegmotorn arbetar emot detta moment,



Figur 4.1: Kraft och momentuppställning.

$$M_{motor} > F_{vajer} \cdot \frac{\varnothing}{2}. \quad (4.1)$$

I vajerkrafterna, F_{vajer} , är även friktionskrafter inkluderade. Friktionskrafterna som uppkommer över guiderullarna antas vara små i förhållande till övriga krafter. Antagandet baseras på att vajern leds ned på rullar som är lagrade i utförandet i roboten. Om det antas att dessa rullar är stela uppkommer ett värsta scenario. Friktionskoefficienten är mellan mässing och stål 0,3[15] vilket ger uttryck för den maximala glidfriktionen som



Figur 4.2: Kraft över guiderulle.

$$0.3 \cdot F_{normal} = F_{friktion}. \quad (4.2)$$

Normalkraften kan tecknas som

$$F_{normal} = 2 \cdot \frac{F_{vajer}}{\cos(\alpha)}, \quad (4.3)$$

där $\alpha = 45^\circ$, se Figur 4.2. Friktionskraften, $F_{friktion}$, som i detta värsta scenario uppstår är till storleken 100 N förutsatt att $F_{vajer} = 120$ N.

4.2 Drivkort och kraftkälla

Drivkorten valdes utifrån de maxströmmar som motorerna kräver,

$$I_{\text{ut: drivkort}} \geq I_{\text{märkström: motor}}. \quad (4.4)$$

Flertalet drivkort för stegmotorer är utformade för att hantera CNC-system. Således har dessa generellt tre utgångar och beroende på valet av antal motorer, här kallat n , inhandlades motsvarande antal drivkort. Kraftkällan, kallat nätaggregat, valdes utifrån drivkortens märkspänning samt maximalt utgående effektkrav som behöver vara större än maxeffekten för robotens samtliga motorer,

$$P_{\text{nätaggregat}} > n \cdot I_{\text{motor}} \cdot U_{\text{motor}}. \quad (4.5)$$

4.3 Val av elektriska komponenter

Valet av motorer utfördes utifrån de största beräknade vajerkrafterna. Kravet på märkmoment beräknades till,

$$160 \text{ N} \cdot \frac{0.02 \text{ m}}{2} = 1.6 \text{ Nm}, \quad (4.6)$$

utifrån beräknat krav på kraft, se Kapitel 3.2. Motorvalet föll på stegmotor med tillhörande planetväxellåda, med märkmoment 0,44 Nm och med utväxling på 19:1. Med effektförluster i motor att ta hänsyn till ger detta en säkerhetsmarginal på ungefär 400%,

$$0.44 \text{ Nm} \cdot 19 \cdot 0,81 = 6.77 \text{ Nm}, \quad (4.7)$$

$$\frac{6,77}{1,6} \approx 4. \quad (4.8)$$

Se Bilaga B för fullständig specifikation. Utifrån de friktionskrafter som specificerats tidigare ansågs detta vara en rimlig säkerhetsmarginal.

De två drivkorten, av typen för CNC-system kontrollerar tre motorer var. Utgångarna hanterar upp till 3.5 A vilket är mer än kravet på 1.8 A för motorerna. Systemet kräver ungefär 10 A medan effektkravet uppgick till 30 W. Nätaggregat med maxeffekten 250 W valdes då leverantör saknade bättre alternativ, se Bilaga C för hela specifikationen.

Kapitel 5

Reglersystem

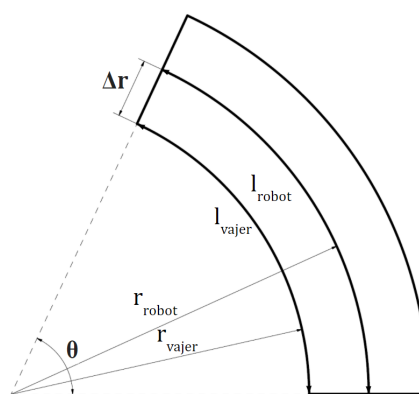
Reglersystemet skickar styr signaler till aktuatorsystemet och styr således roboten. För att utforma detta system behövdes initialt en förståelse för hur robotens rörelse relaterar till kontrollen av vajrarna. Detta gjordes i två steg, med direkt kinematik där det undersöktes hur motorpositioner påverkar robotens rörelse och slutpunkt. Därefter användes invers kinematik för att vid en given målpunkt hitta de motorpositioner som motsvarar denna målpunkt. Sensordatan som behövs för den återkopplade styrningen av roboten behövdes tas i beaktning och den kommer från de sensorer som har valts.

5.1 Direkt kinematik

För att styra roboten behövs en förståelse för dess kinematik. Kinematiken beskriver matematiskt en kropps rörelse och dessa matematiska uttryck utgör en modell av roboten.

5.1.1 Kinematiskt samband mellan motorpositioner och sektionsvinklar

För att styra roboten används motorer kopplade till spolar vilka vajrarna är anslutna till. Då motorerna körs kommer vajrarna att matas in och ut på spolen vilket resulterar i att vajerns längd i roboten minskar respektive ökar. Då spolen matas en vajer, böjs en sektion en vinkel θ enligt Figur 5.1. Ett antagande om att sektionerna böjer sig enligt en cirkelbåge gjordes med förstudierna av ryggradsliknande robotar som grund. För att möjliggöra styrning av armen behövdes ett uttryck för sektionernas lutningsvinkel tas fram, vilket gjordes med beteckningarna givna i Figur 5.1.



Figur 5.1: Vajers påverkan på sektions lutningsvinkel.

Eftersom sektionen enligt antagande böjer sig med konstant radie kan vajerns längd l_{vajer} beskrivas som en cirkelbåge enligt

$$l_{\text{vajer}} = \theta \cdot r_{\text{vajer}} \quad (5.1)$$

där r_{vajer} är radien för den cirkel som cirkelbågen beräknas från och vinkeln θ är given i radianer. På liknande sätt kan robotsektionens längd l_{robot} beskrivas enligt

$$l_{\text{robot}} = \theta \cdot r_{\text{robot}}, \quad (5.2)$$

där r_{robot} är radien för den cirkel som cirkelbågen beräknas från. Avståndet mellan vajerns fästpunkt och centrum av roboten, Δr , ges av skillnaden mellan robotens och vajerns radie enligt

$$\Delta r = r_{\text{robot}} - r_{\text{vajer}} \quad (5.3)$$

vilket kan skrivas om till

$$r_{\text{robot}} = \Delta r + r_{\text{vajer}}. \quad (5.4)$$

Genom att substituera r_{robot} i Ekvation (5.2) med (5.4) fås uttrycket

$$l_{\text{robot}} = \theta(\Delta r + r_{\text{vajer}}) \quad (5.5)$$

vilket kan skrivas om till

$$r_{\text{vajer}} = \frac{l_{\text{robot}}}{\theta} - \Delta r. \quad (5.6)$$

Genom att substituera r_{vajer} i (5.1) med (5.6) fås

$$l_{\text{vajer}} = l_{\text{robot}} - \theta \cdot \Delta r. \quad (5.7)$$

Detta kan skrivas om till ett uttryck för θ

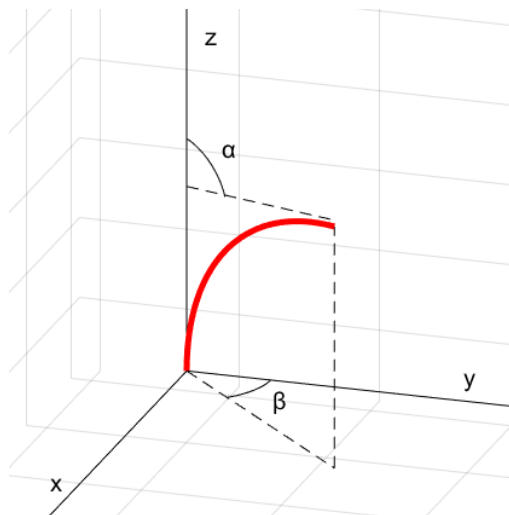
$$\theta = \frac{l_{\text{robot}} - l_{\text{vajer}}}{\Delta r}. \quad (5.8)$$

Längden på en vajer kan beskrivas enligt

$$l_{\text{vajer}} = l_0 - \phi \cdot \frac{d_{\text{styrspole}}}{2}, \quad (5.9)$$

där l_0 är vajerns ursprungliga längd, $d_{\text{styrspole}}$ är styrspolens diameter och vinkeln ϕ är motoraxelns vridning i radianer. Vajerns ursprungliga längd l_0 är definierad som den längd en vajer har då motoraxelns vridning ϕ är noll och ett positivt värde på ϕ motsvarar en vridning på motoraxeln som förkortar vajerlängden.

För att bestämma sektionernas position i rymden behöver vinklarna beskrivas i ett tredimensionellt koordinatsystem. Då varje sektion har två vajrar som var för sig kan orsaka en vridning vinkelrätt mot varandra så vrids sektionen i både x- och y-riktning. Dessa två vridningar kan beskrivas av två vinklar θ_x och θ_y som ges av Ekvation (5.8) för respektive vajerlängd. Vinklarna θ_x och θ_y kan skrivas om till två motsvarande vinklar, α och β , som beskriver sektionens konfiguration i ett tredimensionellt koordinatsystem enligt Figur 5.2.

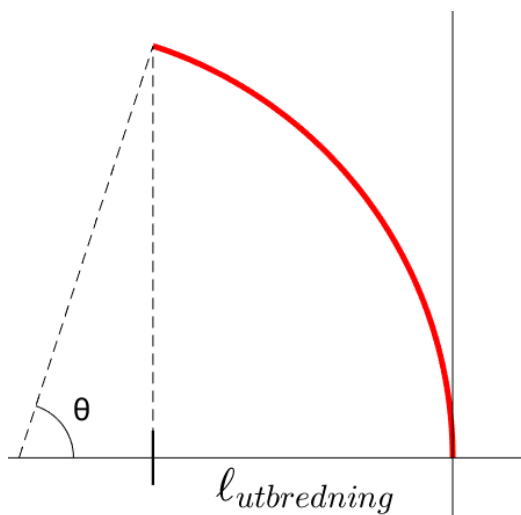


Figur 5.2: Vinklarna α och β som beskriver en sektion.

Med antagandet att sektionen böjer sig i en cirkelbåge, ger en vridning av sektionen i två riktningar θ_x och θ_y två längdutbredningar, en i x-led och en i y-led. Dessa längdutbredningar resulterar i en koordinat för slutsegmentet i xy-planet och koordinatens x- och y-komponenter behöver då bestämmas. Vridningarna av sektionen med vinklarna θ_x och θ_y i x- respektive y-led beskrivs av en cirkelbåge enligt Figur 5.3 och x- och y-komponenterna kan därför beskrivas enligt

$$\ell_{\text{utbredning}} = r - r \cdot \cos \theta = r(1 - \cos \theta) = \frac{l_{\text{robot}}}{\theta}(1 - \cos \theta), \quad (5.10)$$

där r är radien på cirkelbågen och θ är cirkelbågens vinkel. Genom att substituera θ_x och θ_y i Ekvation (5.10) fås x- respektive y-koordinaten för sektionens position.



Figur 5.3: Längd som en sektion sträcker sig ut från origo för en vinkel θ .

Med hjälp av dessa x- och y-koordinater kan vinkeln β bestämmas enligt

$$\beta = \arctan2\left(\frac{l_{\text{robot}}(1 - \cos \theta_x)}{\theta_x}\right) = \arctan2\left(\frac{\theta_y}{\theta_x} \left(\frac{1 - \cos \theta_x}{1 - \cos \theta_y}\right)\right). \quad (5.11)$$

Med hjälp av x- och y-koordinaterna kan även längden som sektionen sträcker sig ut från origo i xy-planet bestämmas enligt Pythagoras sats

$$a = \sqrt{\left(\frac{l_{\text{robot}}}{\theta_x}(1 - \cos \theta_x)\right)^2 + \left(\frac{l_{\text{robot}}}{\theta_y}(1 - \cos \theta_y)\right)^2} \quad (5.12)$$

Denna längd kan då relateras till vinkeln α enligt Ekvation (5.10) vilket ger

$$\frac{l_{\text{robot}}}{\alpha}(1 - \cos \alpha) = \sqrt{\left(\frac{l_{\text{robot}}}{\theta_x}(1 - \cos \theta_x)\right)^2 + \left(\frac{l_{\text{robot}}}{\theta_y}(1 - \cos \theta_y)\right)^2}, \quad (5.13)$$

där vinkeln α kan bestämmas genom en numerisk lösning av ekvationen.

Förbättring av vajerlängdsberäkningar

På grund av att armen har en avsmalningsfaktor är modellen av sektionen som beskrivs i Figur 5.1 bristfällig eftersom de verkliga sektionerna inte har en konstant radie. En förbättring av vajerlängdsberäkningarna görs därför för att den öppna styrningen med invers kinematik ska fungera korrekt. Genom att uttrycka radien med ett linjärt uttryck där radien avtar kontinuerligt kan vajerlängden approximeras bättre än med en konstant radie. Om r_{vajer} beskrivs med ett linjärt uttryck resulterar det i att även Δr kan beskrivas med ett linjärt uttryck. För att bestämma detta uttryck behöver sektionen delas upp i n antal partitioner där varje partition har en viss radie. Summan av dessa partitioner ger då den totala vajerlängden. Med en uppdelning av Ekvation (5.7) i n stycken partitioner och med ett linjärt beroende Δr kan summan beskrivas enligt

$$\begin{aligned} l_{\text{vajer}}(n) &= \sum_{i=0}^n \left(\frac{l_{\text{robot}}}{n} - \frac{\theta}{n} \left(a - b \frac{i}{n} \right) \right) = \frac{l_{\text{robot}}}{n} - \frac{\theta}{n} a + \sum_{i=1}^n \left(\frac{l_{\text{robot}}}{n} - \frac{\theta}{n} \left(a - b \frac{i}{n} \right) \right) \\ &= \frac{l_{\text{robot}}}{n} - \frac{\theta}{n} a + l_{\text{robot}} - \theta a + \frac{\theta b}{n^2} \sum_{i=1}^n i \\ &= \frac{l_{\text{robot}}}{n} - \frac{\theta}{n} a + l_{\text{robot}} - \theta a + \frac{\theta b}{2} \left(1 + \frac{1}{n} \right), \end{aligned} \quad (5.14)$$

där a är det maximala värdet på Δr och b beskriver förändringen av Δr på grund av sektionens avsmalning. Genom att låta antalet partitioner n gå mot oändligheten kan vajerlängden för en sektion med kontinuerligt minskande radie bestämmas enligt

$$\lim_{n \rightarrow \infty} l_{\text{vajer}}(n) = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(\frac{l_{\text{robot}}}{n} - \frac{\theta}{n} a + l_{\text{robot}} - \theta a + \frac{\theta b}{2} \left(1 + \frac{1}{n} \right) \right) = l_{\text{robot}} - \theta \left(a - \frac{b}{2} \right). \quad (5.15)$$

Alltså ges Δr i Ekvation (5.7) av

$$\Delta r = a - \frac{b}{2} \quad (5.16)$$

för en sektion med kontinuerlig avsmalning.

5.1.2 Analytiskt uttryck för robotarmens kinematik

För att kunna lösa den inversa kinematiken togs ett analytiskt uttryck fram för robotarmens kinematik, se Ekvation (5.23). Detta som en funktion av sektionernas vinklar A (5.17) och deras längder L (5.18). Uttrycket bygger på antagandet att armens sektioner kan betraktas som cirkelbågar.

A består av vinklarna som beskriver armens konfiguration, där indexet indikerar vilken sektion vinklarna hör till och α och β motsvarar vinklarna i Figur 5.2. L består av respektive sektionens längd, samtliga var 40 cm.

$$A = [\alpha_1 \quad \alpha_2 \quad \alpha_3 \quad \beta_1 \quad \beta_2 \quad \beta_3]^T \quad (5.17)$$

$$L = [40 \quad 40 \quad 40] \quad (5.18)$$

Rotationsmatrisen R beskriver rotationstransformen kring vektorn u med θ grader

$$R(u, \theta) = (\cos \theta)I + (\sin \theta)[u]_{\times} + (1 - \cos \theta)uu^T. \quad (5.19)$$

P är ett uttryck som beskriver slutpositionen av en sektion relativt dess infästning i origo.

$$P(\theta, \phi, l) = \frac{l}{\theta} \begin{bmatrix} \sin(-\phi)(\cos \theta - 1) \\ \cos(-\phi)(\cos \theta - 1) \\ \sin \theta \end{bmatrix} \quad (5.20)$$

R_{s1} , R_{s2} och R_{s3} är de rotationsmatriser som utgör den transform som krävs för att rotera en sektion, beskriven av P , så att dess orientering stämmer överens med normalen till den föregående sektionen.

$$\begin{aligned} R_{s1}(A) &= R(\hat{z}, \beta_1)R(\hat{x}, \alpha_1) \\ R_{s2}(A) &= R(R_{s1}\hat{z}, \beta_1)R(R_{s1}\hat{x}, \alpha_1)R_{s1} \\ R_{s3}(A) &= R(R_{s2}\hat{z}, \beta_1)R(R_{s2}\hat{x}, \alpha_1)R_{s2} \end{aligned} \quad (5.21)$$

P_{s1} , P_{s2} och P_{s3} är uttrycken för respektive sektionens slutpunkt, tillika nästkommande sektionens infästning.

$$\begin{aligned} P_{s1}(A, L) &= P(\alpha_1, \beta_1, L_1) \\ P_{s2}(A, L) &= P_{s1}(A, L) + R_{s1}P(\alpha_2, \beta_2, L_2) \\ P_{s3}(A, L) &= P_{s2}(A, L) + R_{s2}P(\alpha_3, \beta_3, L_3) \end{aligned} \quad (5.22)$$

Slutligen sammanställs uttrycken i en vektorfunktion, $p(A, L)$, som beskriver både den sista sektionen på armens position och riktning

$$p(A, L) = \begin{bmatrix} P_{s3x}(A, L) \\ P_{s3y}(A, L) \\ P_{s3z}(A, L) \\ \arctan2(R_{s3}(A) \cdot \hat{x}, R_{s3}(A) \cdot \hat{y}) \\ \arctan2(\sqrt{R_{s3}^2(A) \cdot \hat{x} + R_{s3}^2(A) \cdot \hat{y}}, R_{s3}(A) \cdot \hat{z}). \end{bmatrix} \quad (5.23)$$

5.2 Invers kinematik

För att hitta de motorlägen som ger upphov till den konfiguration som når en viss målpunkt och orientering användes Gauss-Newton metoden. Med hjälp av denna metod förändras värden på parametrar, i detta fall vinklarna, iterativt för att hitta ett utfall med tillräckligt liten avvikelse. När denna avvikelse uppnåtts avslutas iterationen. Istället för att använda Jacobianens psuedoinvers användes Jacobianens transponat. Anledningen till att transponatet används är för att spara beräkningstid, då inversen av Jacobianen är tidskrävande att beräkna, samt att Jacobianen kan gå mot att vara en singular matris, vilket innebär att den inte kan inverteras. Inversen ger ett noggrannare resultat än transponatet [13] men Samuel R. Buss[14] menar att för system med endast en arm fungerar transponatet väl. Då robotarmen i detta arbete uppfyller de kraven anses transponatet ge tillräcklig noggrannhet.

Gauss-Newton med Jacobianens transponat ger följande ekvation

$$\Delta\boldsymbol{\theta} = J^T \Delta\mathbf{e}. \quad (5.24)$$

Där $\Delta\boldsymbol{\theta}$ är förändring av vinkelparameterna. Felet $\Delta\mathbf{e}$ är skillnaden mellan robotens slutpunkt $\mathbf{p}_{end} = P_{s3}$ och punkten som vill nås \mathbf{g} och beräknas genom

$$\Delta\mathbf{e} = \mathbf{g} - \mathbf{p}_{end}. \quad (5.25)$$

De nya vinklarna $\boldsymbol{\theta}$ kan nu beräknas genom att lägga på en förändring enligt

$$\boldsymbol{\theta} = \boldsymbol{\theta} + \alpha\Delta\boldsymbol{\theta}. \quad (5.26)$$

För att bestämma värdet för α används Ekvation (5.27)[14].

$$\alpha = \frac{\langle \mathbf{e}, J J^T \mathbf{e} \rangle}{\langle J J^T \mathbf{e}, J J^T \mathbf{e} \rangle} \quad (5.27)$$

5.2.1 Framtagning av styrsignaler

Med sektionernas önskade vinklar bestämda behövs de motoraxelförändringar som motsvarar dessa vinklar beräknas. För en viss konfiguration av armen böjer sig sektionerna ut en viss längd i både x- och y-led. Dessa utsträckningar i x- och y-led kan bestämmas enligt

$$x_0 = \frac{l_{robot}}{\alpha} (1 - \cos \alpha) \sin \beta \quad (5.28)$$

$$y_0 = \frac{l_{robot}}{\alpha} (1 - \cos \alpha) \cos \beta, \quad (5.29)$$

där vinklarna α och β är de vinklar som beskrivs i Figur 5.2. Eftersom tidigare sektioners rotation runt z-axeln har en påverkan på en sektionens orientering behöver både x- och y-koordinaten roteras enligt de vinklar β som tidigare sektioner har. Denna rotation krävs för att x- och y-koordinaterna ska stämma överens med det globala koordinatsystemet som armen följer. Rotationen görs med hjälp av en rotationsmatris som beskrivs enligt

$$R(\beta) = \begin{bmatrix} \cos(-\beta) & -\sin(-\beta) \\ \sin(-\beta) & \cos(-\beta) \end{bmatrix}. \quad (5.30)$$

Beroende på hur många föregående sektioner den aktuella sektionen har behöver flera rotationer utföras,

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = R(\beta_1)R(\beta_2) \dots R(\beta_n) \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix}. \quad (5.31)$$

där n är antalet föregående sektioner. Dessa x- och y-positioner motsvarar då en vridning θ av sektionen i x- respektive y-led enligt Ekvation (5.10) och följande ekvationer kan ställas upp

$$\frac{l_{robot}}{\theta_x}(1 - \cos \theta_x) = x \quad (5.32)$$

$$\frac{l_{robot}}{\theta_y}(1 - \cos \theta_y) = y \quad (5.33)$$

där x och y ges av matriselementen i Ekvation (5.31). Ekvationerna kan lösas med funktionen `fzero` i Matlab för att bestämma vinklarna θ_x och θ_y . Med hjälp av Ekvation (5.7) och uttrycket (5.16) för Δr kan vajerlängder som motsvarar vinklarna θ_x och θ_y beräknas. Eftersom utgångskonfigurationen av roboten är känd från den matematiska modellen av roboten och en önskad konfiguration av roboten är känd från lösningen av den inversa kinematiken kan de två vajerlängderna för varje sektion både för utgångskonfigurationen ($l_{x,utgångsläge}$, $l_{y,utgångsläge}$) och den önskade konfigurationen ($l_{x,önskad}$, $l_{y,önskad}$) bestämmas. Skillnader mellan dessa längder kan då definieras enligt

$$\Delta l_{x,vajer} = l_{x,önskad} - l_{x,utgångsläge} \quad (5.34)$$

$$\Delta l_{y,vajer} = l_{y,önskad} - l_{y,utgångsläge}. \quad (5.35)$$

Genom en omskrivning av Ekvation (5.9) kan motorvinkeln ϕ beskrivas enligt

$$\phi = \frac{2}{d_{styrspole}} \cdot l_{vajer}. \quad (5.36)$$

Två motorvinklar, ϕ_x och ϕ_y , motsvarande $\Delta l_{x,vajer}$ och $\Delta l_{y,vajer}$ kan då beräknas med hjälp av Ekvation (5.36). Dessa motorvinklar motsvarar ett visst antal steg för stegmotorerna vilket beskrivs av

$$n_{steg,x} = \frac{\phi_x}{k} \quad (5.37)$$

$$n_{steg,y} = \frac{\phi_y}{k}, \quad (5.38)$$

där $n_{steg,x}$, $n_{steg,y}$ är antalet steg för motorerna som styr i x- respektive y-led och k är den motorvinkelförändring motorerna gör när de tar ett steg vilket fås från drivkortens inställning av mikrostegning samt specifikationen av motorerna, se Bilaga B.

5.3 Öppen styrning

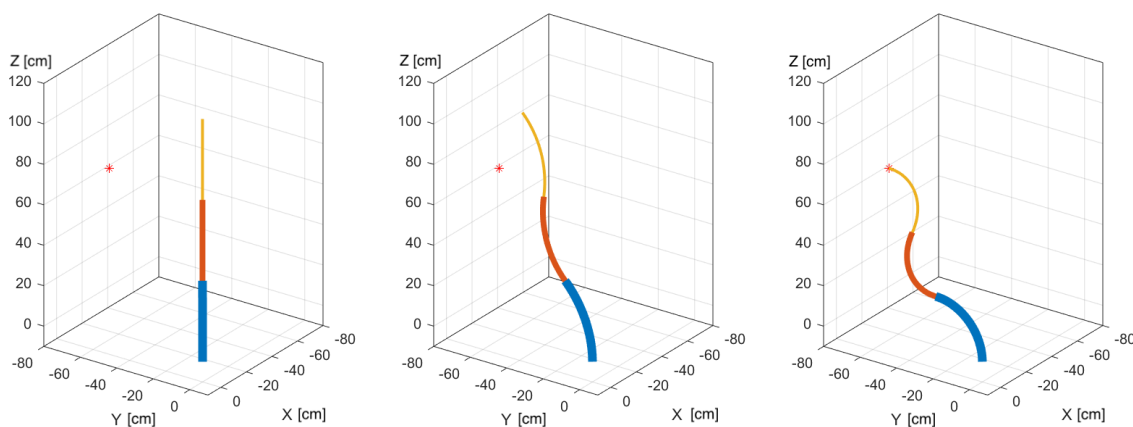
För att möjliggöra för autonom styrning behöver en öppen styrning först fungera. Detta för att se hur mekaniken stämmer överens med de analytiska uttrycken för kinematiken. Två reglersystem för öppen styrning skapades, ett som manuellt styr roboten med en handkontroll och ett som med hjälp av en angiven målpunkt och invers kinematik navigerar roboten.

5.3.1 Manuell styrning med handkontroll

Ett program som styr stegmotorerna med hjälp av en handkontroll skapades för att möjliggöra prov av olika rörelser med robotarmen och genom det verifiera det mekaniska systemet. Detta program är skrivet i C++ och skickar styrkommandon från kontrollen genom en USB-kabel som kopplas mellan dator och Arduino. Ett API kallat Xinput användes för att ta emot data från kontrollen i programmet. För att kunna kommunicera med Arduino genom en USB-kabel användes ytterligare ett bibliotek kallat SerialPort för att skicka vidare styrkommandon till Arduino. Genom att använda ett kommunikationsgränssnitt (flödeskontroll) som markerade när ett datameddelande började och slutade kunde den skickade datan mottas korrekt. Ett Arduino-program skapades som styr motorerna med hjälp av styrsignalerna från kontrollen. Genom att då flytta den analoga spaken på handkontrollen upp eller ned kunde en stegmotor styras med- eller moturs.

5.3.2 Öppen styrning med invers kinematik

Öppen styrning av roboten med hjälp av invers kinematik åstadkoms genom att sätta \mathbf{p}_{end} i Ekvation (5.25) till $p(A,L)$, definierat i Ekvation (5.23). Detta kräver kända ursprungsvinklar, vilka måste kalibreras för hand då robotarmen saknar sensorerna som krävs för att göra det automatiskt. Målpunkten \mathbf{g} i Ekvation (5.25) måste även anges manuellt av samma anledning. Den öppna styrningen implementerades i ett Matlab-program där den önskade noggrannheten av lösningen sattes till 0,05 cm för att möjliggöra den precision som anges i kravspecifikationen, se Bilaga A. Händelseförlopp från initiering av roboten till nådd punkt återges i Figur 5.4.



Figur 5.4: Från vth, händelseförlopp från ursprungsläge till funnen punkt.

5.4 Återkopplad styrning

Målet med projektet var att roboten skulle styra autonomt till en given punkt. För att utföra detta behövdes en återkopplad styrning där roboten evaluerar sin position i förhållande till målpunkten. Detta uppnås med indata från en kamerasensor som räknas om till styrsignaler för motorerna för att korrigera robotens position för att vidare komma närmre punkten.

5.4.1 Kamerasensor

För att kunna identifiera målpunkten samt robotens förhållande till densamma behövs en kamerasensor. Antingen måste kamerasensorn kunna identifiera själva målet, alltså en laddningsport eller några kännetecken som är fastsatta runt denna vilka företrädesvis har någon distinkt färg eller form som sensorn har lätt att identifiera.

Pixy Cam

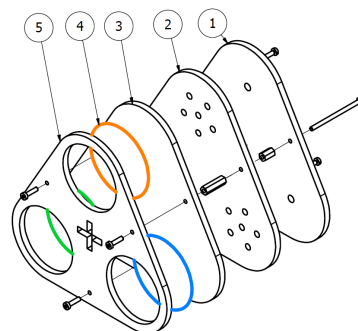
Pixy Cam är en kamerasensor som kan kopplas direkt till en Arduino och kan registrera upp till sju unika färger som ska följas. Ur Pixy Cam kan objekt med den registrerade färgen identifieras utifrån storlek och position i bilden. Det är möjligt att beräkna robotens förhållande till målpunkten med triangulering om ett flertal punkter används som måltavla.

Sensors räckvidd

Vid test av sensorn upptäcktes att avståndet för identifiering var begränsad till ca 30 cm vid urskiljandet av en cirkel med 5,5 cm i diameter. Den miljö som färgen registrerades i hade en stor inverkan på räckvidden då ljussättningen påverkade den upplevda färgnyansen för kamerasensorn. Problem med färgnyans och räckvidd kunde dock kompenseras genom att belysa punkten, då kunde cirkeln identifieras på upp till 100 cm avstånd.

Måltavlans kännetecken

För att uppnå räckvidden på upp till 100 cm valdes det att bygga en måltavla med egenskaper som kompenserar för kamerans brister. Måltavlan innehåller tre distinkta färger för att ge möjlighet till triangulering där varje färg är upplyst bakifrån. Enheten är uppbyggd i fem lager, se Figur 5.5. Lager (1) är en bakplatta för att möjliggöra montering av måltavlan och innesluter (2) som håller 18 LED-lampor på plats. Framplattan (5) håller tillsammans med ljusspridaren (3), färgbitarna (4) på plats. Lamporna kopplas samman enligt Bilaga D. Korset i måltavlans mitt representerar målpunkten.



Figur 5.5: Måltavlans utformning.

Avståndsbedömning och vinkelberäkning till måltavla

Utöver att nå en räckvidd av 100 cm och upptäcka var i bildrutnan som målpunkten befinner sig var det även önskvärt att bedöma avstånd till samt vinkel mot måltavlan.

Avståndet beräknades genom att ta fram förhållandet mellan färgpunkternas genomsnittliga area och kamerans totala bildarea. Då kan ett exponentiellt förhållande användas enligt

$$L = c \cdot e^{kx}, \quad (5.39)$$

där c och k är konstanter och L är avståndet från kameran till målpunkten. x är förhållandet mellan den genomsnittliga arean på färgprickarna och bildrutans totala area, vilket kan beskrivas enligt

$$x = \frac{\sum_{i=1}^n b_i h_i}{n \cdot 64000}. \quad (5.40)$$

Där b och h är bredden respektive höjden för en färgpunkt räknat i pixlar, n är det totala antalet färgpunkter och 64000 är upplösningen för kameran. Genom att placera kameran på olika, kända avstånd från kameran gavs olika värden på x . Dessa värden kan användas för att beräkna konstanterna c och k , vilket ger en formel för avståndet

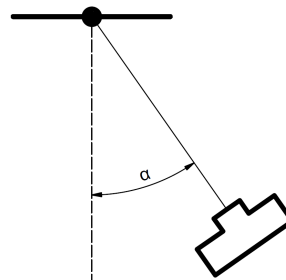
$$L = 62,436 \cdot e^{-201x}, \quad x = \frac{\sum_{i=1}^n b_i h_i}{n \cdot 64000}. \quad (5.41)$$

När kameran vinklas mot måltavlans normal i ett horisontellt läge, se Figur 5.6, uppfattas bredden på färgpunkterna olika av kameran, där den punkten som är längst bort uppfattas som smalare än den som är närmst. Ett enkelt förhållande mellan bredderna kan ställas upp som $r = B_R/B_L$. Där B_R och B_L är bredden på punkten längst till höger respektive längst till vänster. Förhållandet mellan kameravinkeln α och r kan beskrivas linjärt enligt

$$\alpha = kr + m. \quad (5.42)$$

Konstanterna k och m bestäms genom mätning av värden på r vid kända α och beräknas, vilket ger

$$\alpha = -150 \cdot \frac{B_R}{B_L} + 150. \quad (5.43)$$

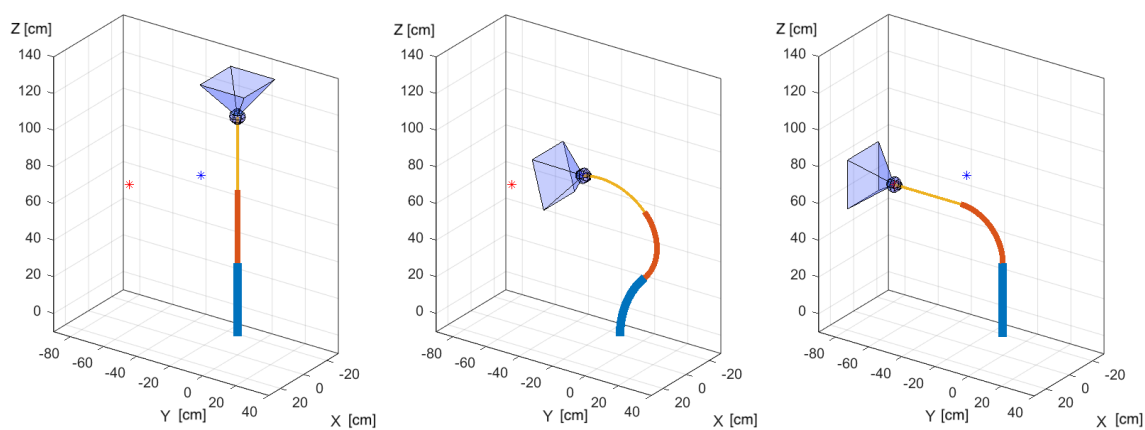


Figur 5.6: Kamerans vinkel mot måltavlans normal.

5.4.2 Återkopplad styrning med kameran sensor

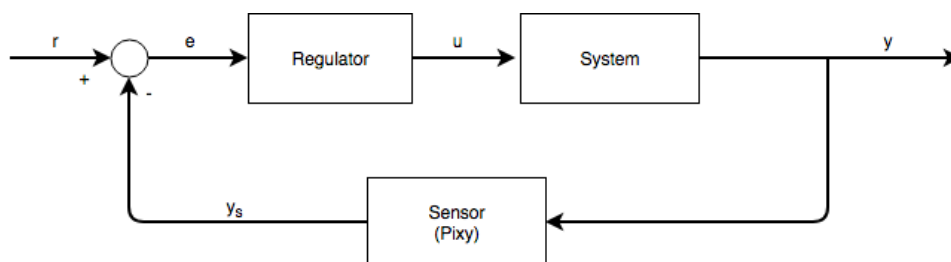
Den återkopplade kontrollsekvensen startar med öppen styrning till en förbestämd punkt. Efter det att den förbestämda punkten är nådd täcker kamerans synvinkel måltavlans om den befinner sig inom avsökningsområdet. Om måltavlans identifieras övergår reglersystemet till slutna styrning, där e i Ekvation (5.25) ges av kameran som beskrivet i avsnitt 5.4.1. Förloppet kan ses i Figur 5.7.

Det återkopplade systemet beskrivs av blockschemat i Figur 5.8. Det visar vad som sker efter att den intermediära punkten har nåtts, se Figur 5.7. Här är insignalen r den offset som vill åstadkommas mellan kameran och målpunkten då kontakten som ska anslutas inte ligger i linje med kameran. Signalen y_s är utsignalen från kameran,



Figur 5.7: Blå punkt representerar hårdkodad intermediär punkt och röd punkt måltavlan. Geometrin på armens topp representerar kameran och dess synfält. Till vänster: Armen i kalibreringsläge. Mitten: armen har navigerat till den intermediära positionen med öppen styrning och kan nu se måltavlan, återkopplad styrning tar över. Höger: Armen har nått sin slutposition.

vilket är det avstånd som är kvar till målpunkten från linsen. Det faktiska felet, e , blir således skillnaden mellan den offset som vill åstadkommas och avståndet mellan kameran och målpunkten. Felet beräknas om till en styrsignal u som går till systemet för att kompensera för felet.



Figur 5.8: Blockschema för det återkopplade systemet.

Kapitel 6

Verifiering

Genom att bilda en uppfattning av prototypens prestanda via den objektiva data som presenteras genereras bakgrund för diskussion. Datan är resultat från de tester som utförts som kopplar till de krav som fastställts i kravspecifikation, se Bilaga A. Även resultat från tester utifrån vissa underliggande krav, ej angivna i kravspecifikationen, presenteras. Varje delkapitel beskriver testernas utförande och måluppfyllnad för att ge en överblick över resultaten.

6.1 Krafter i vajrarna

För att bekräfta att beräkningen av krafterna i vajrarna stämde mättes de verkliga krafterna i robotarmen. Genom att ställa robotarmen i läget som skulle ge det största utslaget i kraft, vilket var när den första sektionen hade en vinkel på 90° och de andra två sektionerna 0° . Med en dynamometer, fäst i styrvajern för nedersta sektionen, mättes den största kraften. Uppmätt kraft var 120 N, vilket är under den analytiskt beräknade kraften på 154 N. Resultatet var väntat utifrån de förenklingar som gjorts vilket med avsikt lett till att de analytiska krafterna överskridit de i verkligheten, för förtydligande se Kapitel 3.2.

6.2 Armens rörelseförmåga

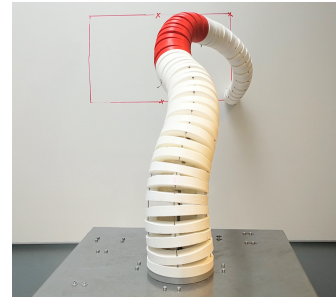
De krafter som uppkommer till följd av armens och huvudets egetyngd måste kompenseras för av styrvajrarna för att styrning av armen skall vara möjlig, för förtydligande se Kapitel 3.2. Den slutliga verifikationen på kravuppfyllnad utfördes vid fullt montage av arm och bas. Det är tidigare noterat att kraven på krafter i styrvajrarna kommer vara störst på de som möjliggör styrning i nedersta sektionen. Genom att styra den nedre sektionen de 180° som sektionerna är begränsade till kontrollerades rörelseförmågan. Full rörelse verifierades och kravuppfyllnad är nåddes.

6.3 Räckvidd

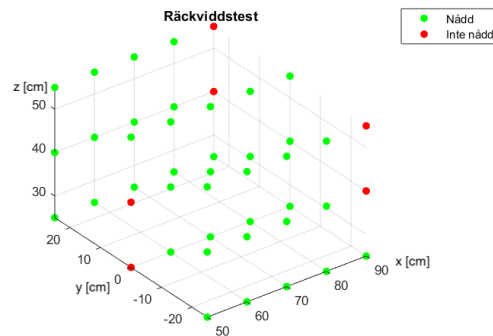
Specificerat i projektets syfte är att en markerad punkt skall kunna nås, denna punkt skall enligt kravspecifikationen vara placerad godtyckligt inom ett definierat område. Detta då en elbil ej skall behöva parkeras perfekt utan en viss felmarginal skall tillåtas.

Två olika områden är måttbestämda, se Bilaga A. Områdena är bestämda som rätblock i rummet där kravet är att armens huvud skall kunna nå alla positioner i dessa rätblock.

För att kunna testa om alla punkter kunde nås i detta rätblock valdes ett antal punkter för att kontrollera räckvidden. Punkternas position i figuren anger hur de befann sig i förhållande till robotens bas mätt i cm. De gröna punkterna var de som roboten kunde nå under testet och de röda kunde den inte nå, se Figur 6.2. Testet genomfördes genom att placera roboten framför en whiteboardtavla där ett lager av punkter vid ett visst djup hade ritats ut, se Figur 6.1. Roboten styrdes sedan till dessa. Detta upprepades för djup på 50 cm till 90 cm med ett intervall på 10 cm.

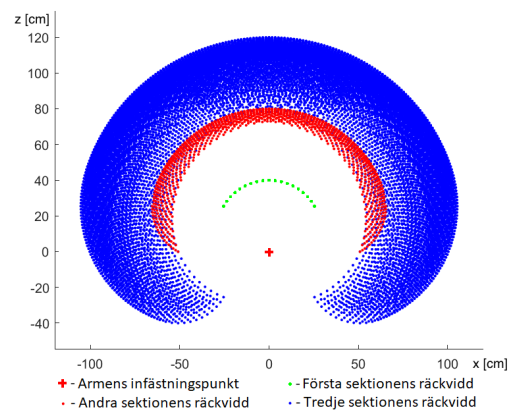


Figur 6.1: Räckviddstest.



Figur 6.2: Resultat från räckviddstest.

Med hjälp av den kinematiska modellen av roboten beräknades tidigare dess teoretiska räckvidd. I Figur 6.3 ses räckvidden för en arm med tre stycken 40 cm långa sektioner med en rörlighet på 90° .



Figur 6.3: Armens räckvidd kring godtyckligt vertikalt plan som skär dess infästningspunkt.

Då planet som Figur 6.3 visar ligger på är på en höjd av 50 cm över robotens bas kan det konstateras att resultatet från räckviddstestet överensstämmer med den matematiska modellen. Dessvärre är inte kravet om att ett rätblock med djupet 50 cm ska täckas av armens räckvidd uppfyllt och inte heller önskemålet om en större räckvidd som definierades av ett större rätblock i kravspecifikationen. Räckvidden på djupet var cirka 40 cm vilket framgår av Figur 6.2.

6.4 Sensors prestanda

Sensorn ska, för att ge användbar data, distinkt identifiera måltavlans tre punkter till storlek och position på ett avstånd upp till 60 cm. Pixy uppfattar punkternas position och separerar dem på ett tydligt sätt inom det. Störningar uppstår dock till följd av att sensorn identifierar andra mindre objekt i bildrutans område utöver de ordinarie punkterna. Vidare problem uppstår vid identifiering av objektens storlek som kan variera med upp till 16% mellan sekventiella mätningar och olika punkter. Detta resulterar i att kameran inte uppfyllde kraven för att användas på tilltänkt sätt.

6.4.1 Avstånd till måltavla

En punkt, motsvarande ladduttaget på en bil, skall upptäckas av armens integrerade sensor och dess avstånd bestämmas. Detta mål har specificerats i kravspecifikationen och kravet på noggrannhet, e_{krav} , sattes till 1 cm. Målet specificerades för att i verkligheten kunna lokalisera ladduttaget på en bil vid avsökning för att möjliggöra laddning.

Mätning av noggrannheten utfördes genom att sensorn placerades på ett känt avstånd från en måltavla. Det av roboten beräknade avstånden jämfördes med det faktiska avståndet, således kunde måluppfyllnad avgöras. Det utfördes tjugo tester med en vinkel relativt sensorns normal, α , mellan -30° och 30° samt ett avstånd från sensor till måltavla mellan 0 och 50 cm. Ett medelvärde för felet, \bar{e} , avgör måluppfyllnad,

$$|\bar{e}| < e_{krav}. \quad (6.1)$$

Kravet på en noggrannhet om 0,5 cm uppfylldes ej utan \bar{e} uppmättes till 2,8 cm vid vinkeln $\alpha = 0$. Då vinkeln gick mot 30° gick felet mot 20 cm. Det undermåliga resultatet vid $\alpha \neq 0$ beror på valet av sensor och övriga fel hänförs till metoden som användes för att beräkna avståndet.

6.4.2 Måltavlas normal

För att armen skall kunna docka i en kontakt krävs att den förs in vinkelrätt mot kontakten. Detta verifieras genom att sensorn mäter en vinkel relativt måltavlans normal. Likt tidigare test för avståndsbedömning placeras sensorn på 20 olika mätpunkter med olika vinklar, α_F , relativt måltavlans normal. Mätpunkterna placerades mellan -45° och 45° relativt måltavlans normal och på ett avstånd av 30 cm. Positionernas faktiska vinkel jämförs med det av sensorns identifierade värde, α_I .

Inget krav är satt tidigare utan endast resultat presenteras för detta test. Testerna avslöjade att den valda metoden för vinkelavläsning inte fungerade som önskvärt. Detta då vinkelavläsningen varierade med $\pm 10^\circ$ när $\alpha = 0^\circ$ och upp mot $\pm 30^\circ$ vid $\alpha = \pm 45^\circ$.

6.5 Armens precision

För att möjliggöra dockning krävs att armen ska kunna navigera till målpunkten. Kravet återfinns i kravspecifikationen och har ett målvärde på 1 cm, se Bilaga A.

Testet utfördes med Matlab-programmet för öppen styrning där tre utvalda målpunkter användes. Dessa punkter var intressanta för testet då de var placerade på olika positioner i första kvadranten vilket var önskvärt på grund av robotens symmetri kring z-axeln. Två av testerna (test 1 och 2) hade båda samma riktning i xy-planet, detta för att se hur z-koordinaten berodde på robotens slutpunkt. Positionerna sattes som slutpunktens indata \mathbf{g} . Programmet löser den inversa kinematiken för att bestämma den konfiguration av roboten som motsvarar att målpunkten blir nådd. Då skickas styrsignaler till aktuatorsystemet som styr roboten till dess slutpunkt. Den riktiga slutpunkten för robotens ände \mathbf{p}_{end} noterades, se Tabell 6.1. Varje målpunkt testades fem gånger för att ta ut ett medelvärde på slutvärdet.

Tabell 6.1: Slutpunkter för tester av armens precision.

Test	Målpunkt \mathbf{g} ($x; y; z$) [cm]	$\mathbf{p}_{end,1}$ ($x; y; z$) [cm]	$\mathbf{p}_{end,2}$ ($x; y; z$) [cm]
1	(56,4; 56,4; 56,8)	(31,5; 27,5; -32,0)	(30,0; 28,9; -34,7)
2	(54,0; 54,0; 38,2)	(50,0; 43,8; -2,0)	(43,8; 41,5; -5,9)
3	(65,8; 36,1; 50,8)	(56,8; 19,7; 5,5)	(65,0; 30,2; 0,4)
	$\mathbf{p}_{end,3}$ ($x; y; z$) [cm]	$\mathbf{p}_{end,4}$ ($x; y; z$) [cm]	$\mathbf{p}_{end,5}$ ($x; y; z$) [cm]
1	(27,8; 30,6; -33,8)	(28,1; 23,2; -30,8)	(26,8; 27,7; -32,9)
2	(47,0; 37,3; -12,2)	(45,0; 38,7; -10,3)	(57,7; 35,8; -8,5)
3	(65,9; 39,6; -1,2)	(59,1; 30,2; 1,8)	(58,6; 29,7; 2,6)

Med mätdata från Tabell 6.1 kunde ett medelvärde $\bar{\mathbf{p}}_{end}$ för slutpunkten samt ett medelfel $\bar{\mathbf{e}} = \mathbf{g} - \bar{\mathbf{p}}_{end}$ tas fram, se Tabell 6.2.

Tabell 6.2: Medelvärden och medelfel för slutpunkt.

Test	Målpunkt \mathbf{g} ($x; y; z$) [cm]	Medelvärde $\bar{\mathbf{p}}_{end}$ ($x; y; z$) [cm]	Medelfel $\bar{\mathbf{e}}$ ($x; y; z$) [cm]
1	(56,4; 56,4; 56,8)	(28,84; 27,58; -32,84)	(27,56; 28,82; 89,64)
2	(54,0; 54,0; 38,2)	(48,70; 39,4200; -7,7800)	(5,3; 14,58; 45,98)
3	(65,8; 36,1; 50,8)	(61,08; 29,88; 1,82)	(4,72; 6,22; 48,98)

Standardavvikelsen för varje test kunde även beräknas från mätdata, se Tabell 6.3.

Tabell 6.3: Standardavvikelsen för slutpunkt.

Test	Målpunkt \mathbf{g} ($x; y; z$) [cm]	Standardavvikelse σ ($x; y; z$) [cm]
1	(56,4; 56,4; 56,8)	(1,88; 2,74; 1,52)
2	(54,0; 54,0; 38,2)	(5,55; 3,23; 3,98)
3	(65,8; 36,1; 50,8)	(4,09; 7,04; 2,51)

Målet att ha ett fel på 1 cm uppnåddes ej.

6.6 Tid för navigering till målpunkt

För att processen inte ska ta för lång tid ställdes ett krav för tiden från robotens startpunkt fram tills den nått sin slutpunkt. Kravet är 300 sekunder enligt kravspecifikationen.

För att kontrollera att kravet uppfylldes användes olika positioner som målpunkt. Dessa positioner är samma punkter som användes i testerna för armens precision, se kapitel 6.5. Positionerna angavs som slutpunkt i Matlab-programmet för öppen styrning. Tiden togs från att programmet börjat beräkna fram tills att roboten nått sin slutpunkt. Det tar för Matlab olika lång tid att beräkna styrningen för olika punkter samt för roboten att styra till dessa. Således testas flera olika punkter för att säkerställa kravuppfyllnad.

Följande tabeller visar resultaten från mätningarna. Tabell 6.4, innehåller den totala tiden t för navigering till målpunkt, från lösningen av den inversa kinematiken tills det att armen har styrts klart. Tabell 6.5, visar endast tiden för Matlab-programmet t_p att lösa den inversa kinematiken och bestämma armens konfiguration.

Tabell 6.4: Totala tiden.

Test	Målpunkt g ($x; y; z$)[cm]	t_1 [s]	t_2 [s]	t_3 [s]	t_4 [s]	t_5 [s]	Medelvärde \bar{t} [s]
1	(56,4; 56,4; 56,8)	42,05	40,67	40,98	40,32	41,33	41,07
2	(54,0; 54,0; 38,2)	48,18	47,78	48,36	48,55	48,67	48,308
3	(65,8; 36,1; 50,8)	49,45	50,13	50,97	50,67	50,43	50,33

Tabell 6.5: Tiden för Matlab-programmet att lösa den inversa kinematiken.

Test	Målpunkt g ($x; y; z$)[cm]	$t_{p,1}$ [s]	$t_{p,2}$ [s]	$t_{p,3}$ [s]	$t_{p,4}$ [s]	$t_{p,5}$ [s]	Medelvärde \bar{t} [s]
1	(56,4; 56,4; 56,8)	5,91	6,01	6,12	5,95	5,93	5,984
2	(54,0; 54,0; 38,2)	6,07	6,06	6,06	6,13	6,05	6,074
3	(65,8; 36,1; 50,8)	2,59	2,55	2,58	2,63	2,58	2,586

Kravet att tiden för navigering till målpunkt skulle vara mindre än 300 sekunder uppfylldes.

6.7 Dockningskraft

När måltavla identifierats i avsökningsområdet och armens normal är i linje med måltavlas normal skall roboten kunna utöva en specifik tryckkraft med sitt huvud, likt anslutandet av en laddningskontakt. Detta önskemål återfinns i kravspecifikationen och är satt till $F_{\circ} = 50$ N, se Bilaga A. Detta utifrån den ungefärliga kraft som krävs för att föra in en laddkontakt i dess hona, således en verifikation på att roboten kan utföra tilltänkt uppdrag.

För att säkerställa att önskemålet är uppfyllt testades roboten. Detta utfördes genom att i yttersta segmentet fästa en dynamometer vars vinkel mot roboten är 20 grader. Därefter styrdes robotarmen, med manuell öppen styrning, till fem olika positioner i avsökningsområdet. Positionerna som robotarmen styrdes mot var punkter i en kvadrant kring basen, då robotens kinematik är symmetrisk i kvadranterna i xy-planet. Den kraft, $F_{mät}$, som uppkom då roboten helt hade stoppats av dynamometern läses av. Denna kraft är en komponent till den verkliga kraften roboten utför till följd av att dynamometern hade en vinkel mot armens rörelse. Den verkliga kraften beräknas med omvänd komponentuppdelning enligt

$$F = \frac{F_{mät}}{\cos(20^\circ)}. \quad (6.2)$$

De fem noterade krafterna och den genomsnittliga kraften kan läsas av i tabellen nedan, Tabell 6.6.

Tabell 6.6: Dockningskraft .

Test	1	2	3	4	5	Medelvärde \bar{F}
Kraft F [N]	16	16	10	12	7	12

Den genomsnittliga kraften från de fem olika punkterna var $\bar{F} \approx 12$ N vilket inte uppfyller önskemålet, $F_{\ddot{o}}$.

Kapitel 7

Diskussion

Diskussionen utgår från hur väl de antaganden som gjordes i början av projektet stämde och hur stor kravuppfyllnaden var. Många av projektets brister kan härledas till den tidsbrist som byggandet av robotens mekaniska system ledde till. Tiden det faktiskt tog var fem gånger så lång som den planerade. I den uppkomna situationen sköts deadlines fram och antalet arbetspass ökades. I efterhand är det uppenbart att arbetet borde ha delats upp i två delar. En del med fokus på reglersystemet och andra delen med färdigställandet av robotens mekaniska system. Att byggtiden underskattats kan härledas till den bristande erfarenhet som fanns i gruppen med avseende på verkstadsarbete. Kunskap borde ha tagits in utifrån redan i planeringstadiet av projektet för att tidigt revidera tidsplaneringen.

7.1 Matematiska modeller och antaganden

Vanligtvis har ryggradsliknande robotar en fjäderbelastad ryggrad som gör att sektionerna antar den form där kompressionen är som minst. Antagandet om att armens sektioner antar formen av cirkelbågar stämmer då. En ytterligare effekt av att armen ej har en fjäderbelastad ryggrad är att en viss vajerlängd inte motsvarar en entydig konfiguration av roboten. Denna effekt påverkar armens styrningsmöjligheter då det inte är möjligt att styra armens position till en definierad punkt genom att endast förändra vajerlängderna. Det användes inte fjädrar i detta projekt då ryggradsliknande robotar vanligtvis är mindre och tillåter fjädrar med små fjäderkonstanter. I detta projekt har roboten skalats upp jämfört med liknande robotar, vilket lett till omfattande ökning av de krav som hade ställts på eventuella fjädrar. Fjädrar med dessa specifikationer och fjäderkonstanter blir betydligt mycket dyrare vilket inte fick plats i projektets budget. Detta har lett till att antagandet om att armens sektioner böjer sig i cirkelbågar inte stämmer.

När problemet identifierats togs beslutet att inte revidera designvalet utan istället lösa problemet med mjukvara. Intentionen var att vid styrning ge återkoppling till systemet genom att en sensor kontrollerar armens konfiguration och även om armens sektioner inte antog formen av cirkelbågar, skulle återkopplingen komplettera det felaktiga antagandet och minska felet. Inget återkopplat system har integrerats och således har konceptet ej testats men förutsätts fungera vid integration. Antagandet av sektionerna som cirkelbågar används i den inversa kinematiken, vilken i sin tur används vid generering av de styrsignaler som skickas till motorerna. Då antagandet inte stämmer skapar detta även problem för

den inversa kinematiken eftersom den kinematiska modellen av roboten inte är korrekt.

7.2 Kravuppfyllnad

Kraven som ställdes på roboten i projektets start är uppspaltade i kravspecifikationen, Bilaga A. Kravet gällande robotens förmåga att klara de moment som uppkommer till följd av robotens egen tyngd uppnåddes vilket var en förutsättning för att möjliggöra styrning, krav 3.2.

Krav och önskemål på räckvidd, 3.2 och 3.3, uppnåddes inte då djupet på det definierade målområdet var större än området roboten kunde nå. I efterhand kan det konstateras att kraven på räckvidd var överdrivna. Prototypens nuvarande räckvidd är tillräcklig för att ladda en elbil vid förutsättningen att elbilen parkerats med rimlig precision. Med rimlig precision menas att fordonet skall ha precision nog att parkeras inom en parkeringsruta. Vad som istället konstateras är att studierna vid utformningen av kravet var undermåliga. Därmed kan ändå kravet anses uppnått utifrån syftet.

Kravet på att robothuvudet skall ha separat styrning, 3.6, har delvis uppnåtts. Istället för separata aktuatorer som styr huvudet har det i mjukvaran möjliggjorts att välja riktning på översta segmentet. Syftet med kravet har uppnåtts men inte med den utformning som initialt var tänkt. Fördelen med detta är att den massa som annars koncentrerats nära toppen av armen eliminerats vilket minskar krafterna i styrvajrarna.

Fördelen med att ha separat styrning för huvudet vore att roboten hade kunnat navigera till en punkt och därifrån endast vinklat huvudet i olika riktningar för att söka efter målet. Nuvarande lösning kräver istället upprepade beräkningar gällande den inversa kinematiken för hela armen. Om målet då ej identifierats av armen kunde en ny punkt navigeras till och processen itereras. Beräkningarna av den inversa kinematiken tar lång tid och antalet gånger detta utförs bör minimeras. Tiderna som presenterats påvisar ej denna problematik då de endast representerar ungefär 10% av den tid det faktiskt tar att nå punkten, se Tabell 6.5. Om toleransen minskas ökar dock beräkningstiden samtidigt som beräkningar utfördes på en dator med relativt god processorkraft. En integrerad processors pris ska hållas låg vid eventuell kommersialisering. Tiden det tar att utföra beräkningarna för den inversa kinematiken beror vilka punkter som roboten ska navigera mellan. Genom att spara vinklar på sektionerna för olika punkter i matriser att utgå ifrån när beräkningar genomförs kan tiden reduceras.

Kravet angående armens precision vid förflyttning till en målpunkt, 1.1, uppfylldes ej. Mätresultaten visar att armen rörde sig i rätt riktning i xy-planet mot den satta målpunkten men avvikelser i position var signifikant. Felet var betydligt större för z-koordinaten jämfört med x- och y-koordinaterna, se Tabell 6.1. Anledningen till att styrningen ej var precis hänvisas till problemet med att en viss vajerlängd ej motsvarade en entydig konfiguration av roboten. Fastän vajerlängderna förändrades till en önskad längd föll roboten på grund av egen tyngden och avsaknaden av fjädrar till ett slutläge. Denna tendens att falla är orsaken till de stora avvikelserna för z-koordinaten. De relativt små avvikelserna i xy-planet antas gå att kompensera för då standardavvikelsen var liten, resultat från tester kan ses i Tabell 6.3. Två faktorer som även påverkade mätresultaten var kalibreringen av armens vajerlängder samt armens ursprungsposition. Dessa faktorer påverkan var dock försum-

bara jämfört med de mätskillnader mellan faktisk och önskad armposition som uppmättes.

Önskemålet för dockningskraften från kravspecifikationen uppfylldes inte av projektets lösning. Önskemålet sattes i början av projektet och målvärdet togs fram genom att estimerade kraften för att föra in en laddkontakt i dess hona. För att ha uppfyllt målet skulle robotens motorer vara starkare. Detta hade inte bara löst önskemålet för dockningskraften utan även troligtvis hjälpt armens precision då laddkontakten och honan hade dragits mot varandra om de var tillräckligt nära.

Roboten var inte autonom i projektets slut och den kunde inte hitta en punkt i dess omgivning, således var inte huvudfunktionen uppnådd, se kravspecifikation Bilaga A. Den främsta anledningen till att roboten inte kunde göras autonom var att den sensor som utvärderats, Pixy Cam, ej gav tillförlitlig data. Att huvudfunktionen ej var uppfylld ledde till att två andra krav inte uppfylldes, 2.2 samt 3.5.

7.3 Samhälleliga och etiska aspekter

Det finns alltid risk att skapandet av nya produkter kan resultera i en negativ påverkan på samhället eller människor. En aspekt som togs hänsyn till i projektet var hurvida det verkligen är nödvändigt att använda resurser på en basal uppgift som automatiskt laddning av elbilar. Resurser är ur ett globalt perspektiv begränsade och istället för att använda dessa till att ladda en bil, vilket är en mycket enkel uppgift för en människa att genomföra, kan de läggas på att lösa samhällsproblem.

Argument för koncept likt projektet är främst elbilarnas miljömässiga fördelar. Detta då de under drift inte bidrar till lokala föroreningar eller växthuseffekten om elen de laddas med är producerad med miljövänliga energikällor. Det förutspås att den framtida transportsektorn kommer att domineras av autonoma elbilar vilket gör det viktigt att hela kedjan är autonom, även laddningen.

Automatisering har lett till minskat behov av arbetsstyrka i flertal branscher vilket har gjort att företag behövt säga upp arbetskraft[16]. Men då det inte finns människor som direkt arbetar med att ladda elbilar anses detta inte vara ett etiskt problem som behöver tas hänsyn till.

Kapitel 8

Slutsats och rekommendationer

Olika matematiska modeller av en ryggradsliknande robots mekaniska system skapades. Dessa gav en bred kunskap om ryggradsliknande robotars kinematiska och statiska samband. De statiska sambanden låg till grund för de kraftberäkningar som utfördes och tillät konstruktion av roboten. Robotens arm är uppbyggd av cirkulära segment vars diameter minskar längre ut i armen och genom det minimerar de krafter som krävs för styrning.

Aktuatorsystemets uppbyggnad utgick ifrån de stegmotorer som valts för att styra armen, från dess specifikationer valdes drivkort och nätaggregat. Motorerna är kopplade till spolar som rullar in och ut styrvajrarna och således tillåter rörelse av roboten.

De kinematiska samband som erhållits när reglersystemet utvecklats gjorde att ett Matlab-program för öppen styrning kunde skapas. Programmet använde de inversa kinematiska sambanden för beräkning av styrsignaler som tillät roboten att nå en given punkt. Det sensorsystem som skulle tillåta återkoppling har ej skapats, armen kan således ej finna en punkt i rymden. Att roboten för en given längd på styrvajrarna ej når en distinkt punkt anses bäst lösas med ett återkopplat reglersystem som verifierar armens verkliga position. Sensorsystemet kräver då förbättringar för att möjliggöra projektets huvudfunktion, problemet med att robotens faktiska position är okänd kan då lösas.

Den tilltänkta sensorn, i form av Pixy Cam, installerades inte i projektet. Förslagsvis kan kameran i framtiden integreras på huvudet av armen för finjustering när avståndet till målet är relativt litet och vinkeln mot målets normal är nära noll. Utöver detta behövs bättre avståndsbedömning i huvudet vid längre avstånd.

Inget system för återkoppling om maximal utböjning är nådd har integrerats, detta medför att motorerna kan dra sönder komponenter. För att kommersialisera roboten måste ett system för att åtgärda detta skapas. Ett minne som lagrar information om stegmotorernas position kan ge roboten möjligheten att vid varje uppstart känna till sin position och risken för skador elimineras. För att få ett koncept som går att kommersialisera måste också en dator integreras för beräkningar av styrsignaler, dessa beräkningar har utförts på extern dator i projektet. Beroende på dess lagringskapacitet kan punkter och motsvarande sektionsvinklar förutbestämmas och användas som utgångsläge. Detta gör att kravet på den integrerade datorkapaciteten minskar.

Vid implementering av rekommendationer i den befintliga roboten kan denna finna och

nå en punkt i rymden. Detta gör att en lösning för att ladda elfordon med roboten är fullt möjlig vilket hade underlättat livet för många redan befintliga användare av elfordon. När autonoma bilar får sitt genomslag blir robotar av detta slag en del av ett helt autonomt transportsystem.

Litteraturförteckning

- [1] Rachael Nealer, David Reichmuth, Don Anair, 2015
Cleaner Cars from Cradle to Grave,
Union of Concerned Scientists
- [2] SAE J3016_201401, 2014, *Taxonomy and Definitions for Terms Related to On-Road Motor Vehicle Automated Driving Systems*, SAE International
https://doi.org/10.4271/J3016_201401
- [3] Trafikverket, 2017, *Autonoma bilar- en pusselbit i morgondagens transportsystem*
<https://www.trafikverket.se/resa-och-trafik/forskning-och-innovation/aktuellt-om-forskning-och-innovation/autonoma-bilar--en-pusselbit-i-morgondagens-transportsystem/> (Hämtad 2018-01-23)
- [4] Johnson I. Agbinya, 2016 *Wireless Power Transfer*, 2a upplaga, River Publisher, sid. 398
- [5] Bayani Salar et al, 2015,
Design of Hyper Redundant Robot using Ball screw Mechanism Approach
<https://www.researchgate.net/publication/281621219> (Hämtad 2018-04-18)
- [6] Tesla, 2015, *Charger prototype finding its way to Model S*
<https://www.youtube.com/watch?v=uMM01RfX6YI/> (Hämtad 2018-02-01)
- [7] William S. Rone & Pinhas Ben-Tzvi 2014
Continuum Robot Dynamics Utilizing the Principle of Virtual Power
IEEE Transactions on Robotics, vol. 30, no. 1, pp. 275-287, Feb. 2014.
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6613525&isnumber=6730969> (Hämtad 2018-05-03)
- [8] Kato, Takahisa, et al. 2015
Tendon-driven continuum robot for endoscopic surgery: Preclinical development and validation of a tension propagation model. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics 20.5 (2015): 2252-2263. <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6998082> (Hämtad 2018-05-03)
- [9] J.D. Greer et.al 2017
Series pneumatic artificial muscles (sPAMs) and application to a soft continuum robot
<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1302467/> (Hämtad 2018-05-03)

- [10] Marais, Wilhelm Johan & Ali Haydar Göktogan. 2017
Design and Control of CRAM: A Highly Articulated Cable-driven Remote Access Manipulator for Confined Space Inspection. Australasian Conference on Robotics and Automation (ACRA-2017), page 9pg. 2017. <http://www.araa.asn.au/acra/acra2017/papers/pap155s1-file1.pdf> (Hämtad 2018-05-03)
- [11] Jiang, Z., Luo, Y., Jin, Y. 2018
New Cable-Driven Continuum Robot with Only One Actuator
https://pure.qub.ac.uk/portal/files/138698238/New_Cable_Driven_Continuum_Robotwith_Only_One_Actuator.pdf (Hämtad 2018-05-04)
- [12] Minhan Li et al., 2017
Design and control of a tendon-driven continuum robot
 Transactions of the Institute of Measurement and Control
<http://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/0142331216685607> (Hämtad 2018-02-09)
- [13] Ming Yao, 2013
Mathematics for Inverse Kinematics
 Carnegie Mellon University, School of Computer Science
<http://www.cs.cmu.edu/~15464-s13/lectures/lecture6/IK.pdf> (hämtad 2018-02-12)
- [14] Samuel R. Buss , 2009,
Introduction to Inverse Kinematics with Jacobian Transpose, Pseudoinverse and Damped Least Squares methods
 Department of Mathematics, University of California, San Diego
<http://graphics.cs.cmu.edu/nsp/course/15464-s17/lectures/iksurvey.pdf>
 (Hämtad 2018-03-20)
- [15] Carl Nordling och Jonny Österman, 2006,
Physics Handbook for Science and Engineering, 8. uppl., Studentlitteratur AB
- [16] Annakaisa Suni, 2017, *Ökad automatisering hotar kontorsjobb*
<https://www.svd.se/okad-automatisering-hotar-kontorsjobb>
 (Hämtad 2018-01-23)

Bilagor

A Kravspecifikation

Tabell 8.1: Kravspecifikation

Chalmers		Dokumenttyp		Kravspecifikation valt koncept			
		Projekt		Continuum robot			
Utfärdare :		Projektgrupp		Skapad: 2018-01-30			
				Modifierad: 2018-01-30			
	Kriterier	Mätetal	Enhet	Målvärde för valt koncept	Krav / Önskemål	Testmetod	Kravställare
1.	Huvudfunktion						
	1.1 Autonomt styra sig till en punkt	Avstånd mellan målpunkt och robot	m	0,01	K	Mätning	Chalmers Tekniska Högskola
2.	Tilläggsfunktioner						
	2.1 Dockningskraft	Kraft	N	50	Ö	Kraftmätning	Projektgrupp
	2.2 Byta laddkontakt autonomt		Ja/Nej	Ja	Ö	Okulär besiktning	Projektgrupp
	2.3 Tid till punkt	Tid	s	300	K	Tidtagning	Projektgrupp
	2.4 Bestämma målområdets normal	[x,y,z]	m	<5% fel	Ö	Mätning	Projektgrupp
3.	Stödfunktioner						
	3.1 Hitta position på en punkt i rymden	[x,y,z]	m	0,005	K	Avståndsmätning i förhållande till sensorn	Projektgrupp
	3.2 Klara givna moment		Ja/Nej		K		
	3.3 Avsökningsområde	Djup x Längd x Höjd	m*m*m	0,5*0,5*0,3	K	Modellering	Projektgrupp
	3.4 Avsökningsområde	Djup x Längd x Höjd	m*m*m	0,5*0,8*0,6	Ö	Modellering	Projektgrupp
	3.5 Följa bana till position	Avstånd från planerad bana	m	0,05	K	Spåra bana och jämföra med beräknad	Projektgrupp
	3.6 Möjliggöra styrning av robothuvud	Vinkel mot slutsegment	°	45	Ö	Modellering/test	Projektgrupp

B Specifikation för motor och växellåda

Tabell 8.2: Specifikation av motor

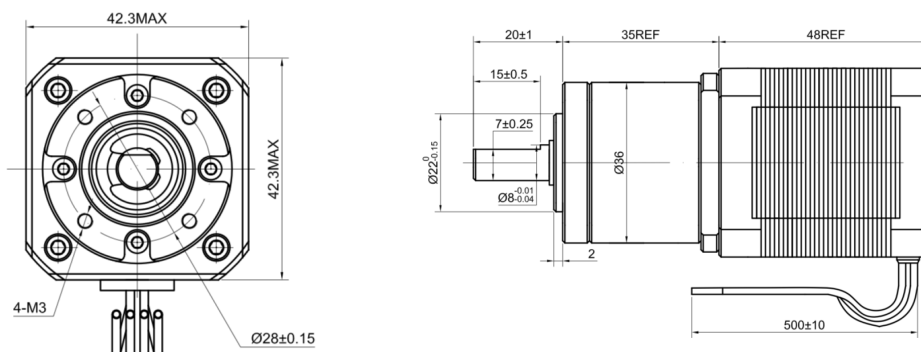
Stegvinkel	0.094°
Hållmoment	0.44Nm
Märkström	1.68A
Resistans	1.65Ω
Spänning	2.8V
Induktans	2.8mH ± 20%(1KHz)

Tabell 8.3: Specifikation av växellåda

Typ	Planetväxel
Utväxling	19.19:1
Verkningsgrad	81%
Spel	±1°
Maximal kontinuerlig last	3Nm
Maximal momentan last	5Nm
Maximal axiell last	50N
Maximal radiell last	100N

Tabell 8.4: Vikt av motor och växellåda

Vikt	560g
------	------



Figur 8.1: Motorernas dimensioner.

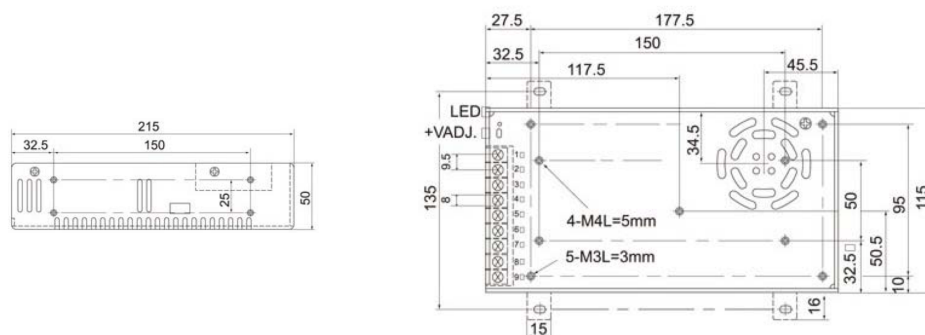
C Specifikation för drivkort och nätaggreat

Tabell 8.5: Drivkort

Maxström	3.5A
Märkspänning	24V
Vikt	1000g

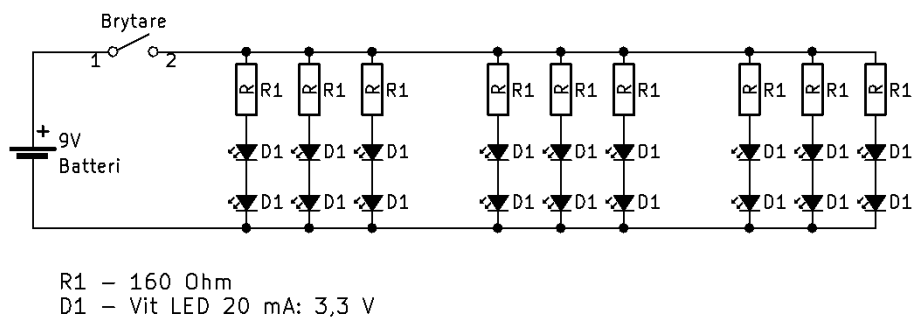
Tabell 8.6: Nätaggreat

Utgående spänning	24V
Effekt	250W
Maximal utgående ström	10A
Ingående spänning	115/230V
Vikt	1100g



Figur 8.2: Nätaggreatets dimensioner.

D Kopplingschema för måltavla



Figur 8.3: Kopplingschema för måltavlan.