



# CHALMERS

---



© & ™ Lucasfilm Ltd.

## BB-8

### Konstruktion och reglering av sfärisk robot

Kandidatarbete inom System- och Reglerteknik

David Benjaminsson  
Edvin Bengtsson  
Erica Lundberg  
Jonathan Lundström  
Johannes Lampela  
Oskar Wångdahl



KANDIDATUPPSATS 2019:EENX15-19-27

## BB-8

Konstruktion och reglering av sfärisk robot

David Benjaminsson, Edvin Bengtsson, Erica Lundberg,  
Jonathan Lundström, Johannes Lampela & Oskar Wångdahl



Institutionen för Elektroteknik  
*Avdelningen för System- och Reglerteknik*  
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA  
Göteborg, Sverige 2019

---

BB-8

Konstruktion och reglering av sfärisk robot

David Benjaminsson, Edvin Bengtsson, Erica Lundberg, Jonathan Lundström, Johannes Lampela & Oskar Wångdahl

© David Benjaminsson, Edvin Bengtsson, Erica Lundberg, Jonathan Lundström, Johannes Lampela & Oskar Wångdahl, 2019

Handledare: Jonas Sjöberg, institutionen för Elektroteknik.

Examinator: Paolo Falcone, institutionen för Elektroteknik.

Institutionen för Elektroteknik

Chalmers Tekniska Högskola

SE-412 96 Göteborg

Telefon +46 31 772 1000

Framsida: BB-8 av Lucasfilm Ltd. via pngimg.com CC BY-NC 4.0

Skriven i L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X

Göteborg, Sverige 2019



---

## Sammanfattning

BB-8 är den sfäriska roboten känd från de två senaste Star Wars filmerna som tog publiken med storm. Robotens utformning, ett klot med ett huvud på, är intressväckande och ovanlig bland robotar. Dess runda former gör att den ser snäll och trevlig ut men väcker också en stor nyfikenhet över hur roboten faktiskt fungerar.

I detta projekt har en prototyp av roboten tagits fram och dess fysikaliska egenskaper beräknats. Genom konstruktion av en modell samt simuleringar i programmet Simulink togs en regulator fram till roboten eftersom den sfäriska kroppen lätt ger upphov till svängningar vid till exempel inbromsning.

Projektet resulterade i en delvis fungerande robot då den var körbar via fjärrstyrning utan huvudet på plats. Styrningen av huvudet fungerade delvis men på grund av friktionen mellan huvudet och sfären orkade inte motorerna som positionerar huvudet med.

---

## Abstract

BB-8 is the spherical robot known from the two latest Star Wars movies, that since has gained a lot of popularity. The shape of the robot, a sphere with a head on top, is compelling and unusual among robots. The round shapes make the robot look friendly and jolly, but also raises thoughts and interest in how it is constructed.

This project has resulted in a prototype of the robot and its physical properties has been calculated. Since the spherical shape is prone to cause oscillations when breaking to standstill, a regulator was constructed by modeling and simulating the robot in Simulink.

The project ultimately resulted in a partly working robot that was drivable via radio control without the head on the sphere. The positioning and control of the head was also partly working, but the motors controlling its position were not strong enough to overcome the friction between sphere and head.

# Innehåll

|                                                     |           |
|-----------------------------------------------------|-----------|
| Sammanfattning . . . . .                            | iv        |
| Abstract . . . . .                                  | v         |
| Nomenklatur . . . . .                               | viii      |
| <b>1 Inledning</b>                                  | <b>1</b>  |
| 1.1 Bakgrund . . . . .                              | 1         |
| 1.2 Syfte . . . . .                                 | 2         |
| 1.3 Avgränsningar . . . . .                         | 2         |
| 1.4 Genomförande . . . . .                          | 2         |
| 1.5 Kravspecifikation . . . . .                     | 2         |
| <b>2 Teori</b>                                      | <b>4</b>  |
| 2.1 Konceptbeskrivning . . . . .                    | 4         |
| 2.2 Dynamik . . . . .                               | 5         |
| 2.3 Motordynamik . . . . .                          | 7         |
| 2.4 PID-regulatorn . . . . .                        | 8         |
| <b>3 Tillhandahållet material</b>                   | <b>9</b>  |
| 3.1 Fysisk prototyp . . . . .                       | 9         |
| 3.1.1 Sfär . . . . .                                | 9         |
| 3.1.2 Inre drivenhet . . . . .                      | 9         |
| 3.1.3 Huvud . . . . .                               | 10        |
| 3.1.4 Lösa delar . . . . .                          | 10        |
| 3.2 Mjukvara . . . . .                              | 11        |
| <b>4 Reglerteknik</b>                               | <b>12</b> |
| 4.1 Simulering i Simulink . . . . .                 | 12        |
| 4.1.1 Implementering av matematisk modell . . . . . | 12        |
| 4.1.2 Validering av matematisk modell . . . . .     | 13        |
| 4.1.3 Första reglersystemet . . . . .               | 14        |
| 4.1.4 Andra reglermodellen . . . . .                | 15        |
| <b>5 Konstruktion</b>                               | <b>19</b> |
| 5.1 Sfär . . . . .                                  | 19        |
| 5.2 Inre drivenhet . . . . .                        | 19        |
| 5.2.1 Vagga . . . . .                               | 20        |
| 5.2.2 Magnetarm . . . . .                           | 22        |

|           |                                               |           |
|-----------|-----------------------------------------------|-----------|
| 5.2.3     | Ram . . . . .                                 | 23        |
| 5.3       | Huvud . . . . .                               | 23        |
| <b>6</b>  | <b>Elektronik</b>                             | <b>24</b> |
| 6.1       | Spänningsregulator . . . . .                  | 24        |
| 6.2       | Arduinokort . . . . .                         | 24        |
| 6.3       | Radiokort . . . . .                           | 25        |
| 6.4       | Bluetoothkort . . . . .                       | 25        |
| 6.5       | Motorer . . . . .                             | 25        |
| 6.6       | Servomotorer . . . . .                        | 26        |
| 6.7       | IMU . . . . .                                 | 26        |
| <b>7</b>  | <b>Mjukvaruutveckling</b>                     | <b>28</b> |
| 7.1       | Androidapplikation . . . . .                  | 28        |
| 7.2       | Arduinoprogram för sfär . . . . .             | 29        |
| 7.3       | Arduinoprogram för huvud . . . . .            | 29        |
| 7.4       | Kommunikation mellan sfär och huvud . . . . . | 29        |
| <b>8</b>  | <b>Resultat</b>                               | <b>30</b> |
| 8.1       | Reglering . . . . .                           | 30        |
| 8.2       | Konstruktion . . . . .                        | 31        |
| 8.2.1     | Omkonstruktion av inre drivenhet . . . . .    | 31        |
| 8.2.2     | Omkonstruktion av huvud . . . . .             | 32        |
| 8.3       | Mjukvara . . . . .                            | 33        |
| 8.3.1     | Androidapplikation . . . . .                  | 33        |
| 8.3.2     | Arduinoprogram för sfären . . . . .           | 35        |
| 8.3.3     | Arduinoprogram för huvudet . . . . .          | 35        |
| 8.3.4     | Kommunikation mellan sfär och huvud . . . . . | 36        |
| 8.4       | Testning och verifikation . . . . .           | 36        |
| <b>9</b>  | <b>Diskussion</b>                             | <b>38</b> |
| 9.1       | Reglering . . . . .                           | 38        |
| 9.2       | Konstruktion . . . . .                        | 39        |
| 9.3       | Mjukvara . . . . .                            | 39        |
| 9.4       | Elektronik . . . . .                          | 40        |
| 9.5       | Reflektion . . . . .                          | 40        |
| <b>10</b> | <b>Slutsats</b>                               | <b>41</b> |
| <b>A</b>  | <b>Appendix</b>                               | <b>43</b> |
| A.1       | Kravspecifikation . . . . .                   | 43        |
| A.2       | Komponenters mått och vikt . . . . .          | 44        |
| A.3       | Simuleringsfiler . . . . .                    | 45        |
| A.4       | Kopplingsschema för huvud . . . . .           | 45        |
| A.5       | Kopplingsschema för sfär . . . . .            | 46        |
| A.6       | Mjukvara . . . . .                            | 46        |

# Nomenklatur

| Beteckning            | Beskrivning                                                     | Enhet            |
|-----------------------|-----------------------------------------------------------------|------------------|
| $M_{huvud}$           | Momentet huvudet påverkar sfären med                            | Nm               |
| $F_{huvud}$           | Huvudets tyngdkraft                                             | N                |
| $\theta_1$            | Vinkel mellan vertikala centrumaxeln och huvudet                | °                |
| $r$                   | Sfärens radie                                                   | m                |
| $l_{huvud}$           | Avstånd från sfärens yta till huvudets tyngdpunkt               | m                |
| $m_{huvud}$           | Huvudets massa                                                  | kg               |
| $g$                   | Gravitationskonstanten                                          | m/s <sup>2</sup> |
| $M_{inre}$            | Momentet den inre drivenheten skapar på sfären                  | Nm               |
| $F_{inre}$            | Innanmätets tyngdkraft                                          | N                |
| $l_{inre}$            | Avstånd från sfärens centrum till innanmätets tyngdpunkt        | m                |
| $m_{inre}$            | Inre drivenhetens massa                                         | kg               |
| $\dot{\omega}_{sfär}$ | Vinkelaccelerationen på sfären                                  | °/s <sup>2</sup> |
| $m_{sfär}$            | Sfärens massa                                                   | kg               |
| $\theta_2$            | Vinkel mellan vertikala centrumaxeln och innanmätets tyngdpunkt | °                |
| $\dot{x}$             | Sfärens linjära hastighet                                       | m/s              |
| $\omega_{sfär}$       | Vinkelhastigheten på sfären                                     | m/s              |
| $N$                   | Utväxling                                                       | -                |
| $l_{cc}$              | Avstånd, centrum inre drivenhetens hjul till sfärens centrum    | m                |
| $r_{hjul}$            | Radie inre drivenhetens hjul                                    | m                |
| $\omega_{motor}$      | Vinkelhastigheten på drivmotorn                                 | m/s              |
| $T_{sfär}$            | Sfärens vridmoment                                              | Nm               |
| $T_{motor}$           | Motorns vridmoment                                              | Nm               |
| $\ddot{x}$            | Sfärens linjära acceleration                                    | m/s <sup>2</sup> |
| $E_{potentiell}$      | Potentiell energi                                               | J                |
| $E_{kinetisk}$        | Kinetisk energi                                                 | J                |
| $E_{rotation}$        | Rotationsenergi                                                 | J                |
| $I_{sfär}$            | Sfärens tröghetsmoment                                          | Nm               |
| $\theta_{ref}$        | Önskad vinkel mellan drivenhet och lodaxel i sfären             | °                |
| $k_p$                 | Proportionell regulatorkonstant                                 | -                |
| $k_i$                 | Integrerande regulatorkonstant                                  | -                |
| $k_d$                 | Deriverande regulatorkonstant                                   | -                |
| $N_f$                 | Filterkonstant                                                  | -                |

| <b>Förkortning</b> | <b>Beskrivning</b> |
|--------------------|--------------------|
|--------------------|--------------------|

|          |                                                                                             |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| CAD      | Computer Aided Design, Ritverktyg och programvara för att modellera i 2 eller 3 dimensioner |
| 3D-print | Småskalig additiv tillverkning                                                              |
| PID      | Proportionell, integrerande och deriverande                                                 |
| RHP      | Right half-plane                                                                            |
| LHP      | Left half-plane                                                                             |
| IMU      | Inertial measurement unit                                                                   |
| DC-motor | Likströmsmotor                                                                              |

# 1

## Inledning

Detta projekt riktade sig till att utveckla och konstruera en sfärisk robot känd som BB-8 (uttalas be-be-ate). Som utgångspunkt för projektet användes en robot som konstruerats under tidigare års kandidatarbete men näst intill alla dess delar har modifierades eller omkonstruerats helt. För att projektet skulle rymmas i tidsplanen krävdes det att avgränsningar och mål sattes kring roboten då den i filmerna är av mycket hög komplexitet. Fokusområdena under årets projekt var optimering av den sfäriska robotens konstruktion, ökad funktionalitet för robotens huvud samt att tillämpa regelsystem för att kontrollera oönskade rörelsemönster.

### 1.1 Bakgrund

Den sfäriska roboten BB-8 introducerades för första gången år 2015 i science-fiction filmen *Star Wars: Episode VII - The Force Awakens*. På grund av sin underliga form och rörelsemönster blev roboten snabbt en favorit bland Star Wars-fansen. BB-8 består utseendemässigt av en större sfär samt ett huvud som balanseras ovanpå sfären. Det som gör roboten speciell är dess rörelsemönster då BB-8 rör sig genom att rulla den sfäriska kroppen samtidigt som huvudet balanserar ovanpå. På grund av den sfäriska kroppen kan roboten röra sig i vilken riktning som helst till synes utan svängradie, samtidigt som huvudet kan rotera i fri riktning.

Vid filmningen av filmen *Star Wars: Episode VII The Force Awakens* användes aldrig en fullt fungerande prototyp av BB-8. Istället användes modeller och CGI (Computer-Generated Imagery). Själva idén med robotens utformning inspirerade dock många personer att själva ta fram och utveckla verkliga robotar utefter detta koncept. Filmskaparna lät efter att den första filmen spelats in konstruera en fungerande BB-8 som sedan har använts i PR-syfte och är nu antagligen den mest välkända prototypen av roboten. Denna robot var senare med på alla de stora premiärerna för filmen världen över [1].

Robotens sfäriska utformning resulterar i en minimal kontaktyta med marken, något som innebär att minsta ojämnheter i dess väg kan vrida sfären och därmed ändra robotens kurs. Att hela kroppen roterar när roboten tar sig fram gör det även svårt för roboten att använda någon typ av verktyg då dessa inte kan fästas på utsidan av kroppen.

Ett användningsområde för roboten skulle kunna vara inom PR-branschen eftersom

att robotens tekniska lösningar väcker intresse. Roboten skulle till exempel kunna användas på mässor för att locka besökare till montern. Ett annat användningsområde skulle vara att frakta gods ovanpå roboten istället för ett huvud.

## 1.2 Syfte

Projektets syfte var att konstruera en robot liknande BB-8 från Star Wars filmerna som på plant underlag kan framföras i gånghastighet genom fjärrstyrning. Roboten skulle bestå av en sfärisk kropp och ett huvud som kunde både röra sig samt rotera ovanpå sfären. Huvudets position skulle även automatiskt regleras beroende på färdriktningen för att efterlikna rörelsemönstret roboten har i filmerna.

## 1.3 Avgränsningar

För att minska ner komplexiteten i projektet och därmed göra arbetet genomförbart inom den givna tidsramen har ett antal avgränsningar gjorts. Delar av avgränsningarna togs från tidigare års projekt [2], andra avgränsningar sattes baserat på vilken hårdvara som fanns tillgänglig och skulle finnas kvar.

Dessa avgränsningar är:

- Interagering mellan robot och omgivning är förutom fjärrstyrning inte nödvändig. Roboten behöver alltså inte ha någon egen uppfattning om hur omgivningen ser ut.
- Roboten behöver endast kunna framföras på plant underlag. Anledningen är att ojämn terräng kräver annorlunda reglering av balans och acceleration.
- Huvudet skall kunna luta på sfären med en vinkel på  $15^\circ$ .
- Robotens skall endast kunna styras via fjärrstyrning. Roboten ska själv reglera balans samt hastighet baserad på mottagna kommandon.

## 1.4 Genomförande

Detta arbete är ett kandidatarbete vid Chalmers tekniska högskola och har sträckt sig över en vårtermin. Utöver denna rapport så består arbetet av en planeringsrapport samt presentationer av planeringsrapporten och slutrapporten.

## 1.5 Kravspecifikation

I projektets startskede togs en kravspecifikation fram baserad på projektets syfte. I denna kravspecifikation fastställdes vilka krav som den färdiga prototypen skulle



klara för att projektet skulle anses som lyckat. Kravspecifikationen innehöll även vissa önskemål som inte var obligatoriska för att projektet skulle anses lyckat, däremot hade de bidragit till ett mer utvecklat resultat än baserat endast på kraven. I appendix A.1 återfinns kravspecifikationen i sin helhet.

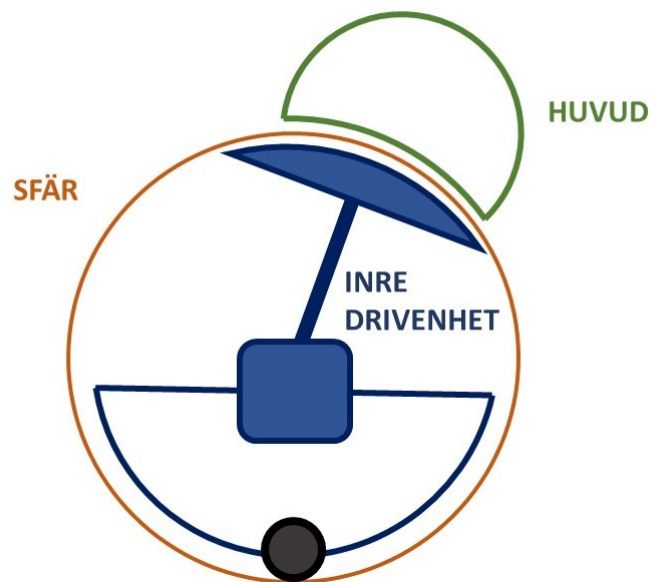
# 2

## Teori

I detta kapitel beskrivs konceptet på hur roboten skall fungera. En matematisk modell för sfärens dynamik tas fram som sedan används för att göra en Simulink-modell i kapitel 4. Här beräknas även motordynamiken som används för att ta fram de krav som sätts vid inköp av nya motorer. Mått och vikt på komponenter återfinns i appendix A.2.

### 2.1 Konceptbeskrivning

Roboten består huvudsakligen av tre större komponenter vilka alla illustreras i figur 2.1, dessa består av sfären, den inre drivenheten och huvudet.

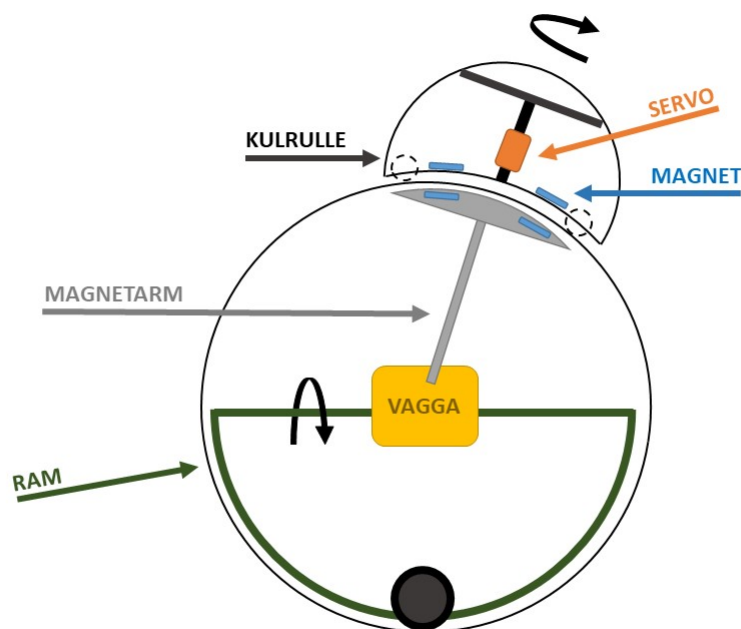


Figur 2.1: Konceptskiss för roboten

Sfären är ett 3D-printat klot som omsluter den inre drivenheten. Den kan ses som karossen för roboten och håller de andra komponenterna på rätt plats gentemot varandra.

Den inre drivenheten innesluts helt av sfären och är den del som driver roboten. Med hjälp av DC-motorer kan den inre drivenheten röra sig längs insidan av sfären och på så sätt förflytta robotens tyngdpunkt. När tyngdpunkten förskjuts i sfären kommer denna att börja rulla och därmed ge roboten en linjär rörelse.

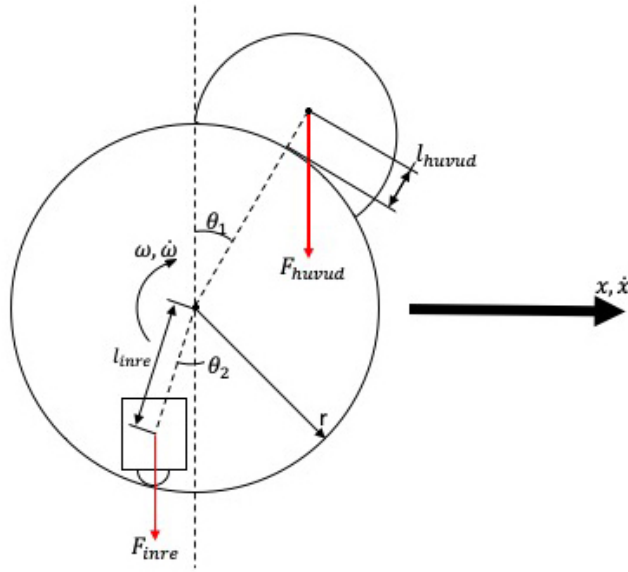
Huvudet hålls på plats utanpå sfären av starka magneter, se figur 2.2. Magneter inuti huvudet svarar mot magneter på en arm på insidan av sfären, härnå efter refererad till som magnetarmen. Magnetarmen sitter i sin tur sitter fast i den inre drivenheten och kan med hjälp av två ortogonala servon vinklas i både färdriktningen och sidled för att styra huvudet på sfärens utsida. Huvudet är även utrustat med en egen servomotor som kan rotera huvudet.



Figur 2.2: Konceptskiss med inre komponenter

## 2.2 Dynamik

För att ta fram en matematisk modell att basera regleringen på frilades en grundläggande BB-8 med huvud och inre drivenhet. Friläggningen kan ses i figur 2.3.



Figur 2.3: Friläggning av en förenklad BB-8.

Utifrån denna friläggning kunde momenten på roboten som skapas av huvudet samt inre drivenheten beräknas. Momentet räknas ut kring sfärens centrum och är beroende av huvudets samt inre drivenhetens vikt och position. Momentet från huvudet blir

$$M_{huvud} = F_{huvud} \cdot \sin(\theta_1) \cdot (r + l_{huvud}) \quad (2.1)$$

där kraften  $F_{huvud}$  ges av

$$F_{huvud} = m_{huvud} \cdot g. \quad (2.2)$$

För den inre drivenheten blir momentet istället

$$M_{inre} = F_{inre} \cdot \sin(\theta_1) \cdot l_{inre} \quad (2.3)$$

där  $F_{inre}$  ges av

$$F_{inre} = m_{inre} \cdot g. \quad (2.4)$$

Dessa moment skapar i sin tur vinkelaccelerationer som får sfären att rotera. Främst är det momentet som den inre drivenheten skapar som kommer driva sfären men eftersom momentet från huvudet bidrar med en störande vinkelacceleration måste även hänsyn tas till denna. Noteras bör att vid ekvationen för den totala vinkelaccelerationen försummas eventuella friktionskrafter i systemet. Den totala vinkelaccelerationen för hela systemet är beräknad enligt

$$\dot{\omega}_{sfär} = \frac{3}{2m_{sfär}r^2}(F_{huvud} \sin(\theta_1)(r + l_{huvud}) - F_{inre} \sin(\theta_2)l_{inre}). \quad (2.5)$$

För att bilda en bättre uppfattning kring hur snabbt sfären färdas räknas vinkelhastigheten om till linjär hastighet enligt

$$\dot{x} = 2\pi r \omega_{sfär} \quad (2.6)$$

med antagandet att sfären aldrig slirar på underlaget.

## 2.3 Motordynamik

Följande beräkningar visar kraven som ställdes på motorerna som driver den inre drivenheten. Motorerna måste klara av att förflytta sfären med önskad hastighet och acceleration.

För att förenkla görs beräkningarna endast med avseende på en rätlinjig rörelse och modellen blir då

$$N = \frac{l_{cc} + r_{hjul}}{r_{hjul}} \quad (2.7)$$

där  $l_{cc}$  är avståndet från centrum på inre drivenhetens hjul till sfärens centrum och  $r$  är radien på inre drivenhetens hjul. Med uppmätta värden på  $l_{cc} = 0.205$  meter samt  $r_{hjul} = 0.05$  meter, kan utväxlingen beräknas till  $N = 5.1$ .

Eftersom vinkelhastigheten  $\omega_{motor} = N \times \omega_{sfär}$  och  $\dot{x} = r\omega_{sfär}$  kan en ekvation tas fram där man beräknar minsta möjliga vinkelhastighet som krävs för motorerna vid önskad hastighet  $\dot{x}_{max}$  på sfären vars radie är  $r = 0.255$  meter. Det ger oss

$$\omega_{motor,max} = N \frac{\dot{x}_{max}}{r} \quad (2.8)$$

Beräkning utav motorns minsta möjliga moment gjordes för de önskade hastigheterna  $\dot{x}_1 = 1.0$  meter per sekund samt  $\dot{x}_2 = 1.5$  meter per sekund. Med dessa värden insatta i ekvation 2.8 blir resultatet att  $\omega_{motor1} = 20$  radianer per sekund och  $\omega_{motor2} = 30$  radianer per sekund. Vilket motsvarar 190 varv per minut samt 286 varv per minut för  $\omega_{motor1}$  respektive  $\omega_{motor2}$ .

Sfärens vridmoment beror på utväxlingen samt vridmomentet för motorerna och kan skrivas som  $T_{sfär} = NT_{motor}$  eller uttryckas som kraften  $F$  applicerad på sfären med radie  $r$ ;  $T_{sfär} = r \cdot F$ . Efter ytterligare omskrivningar blir ekvationen

$$T_{motor,max} = \frac{R}{N} m_{inre} \ddot{x}_{max} \quad (2.9)$$

vilket ger kravet på motorns vridmoment.

Med en önskad acceleration på 1.0 meter per sekundkvadrat, så beräknas det totala vridmomentet till  $T_{motor,max} = 0.44$  Newtonmeter. Då den inre drivenheten drivs av två motorer så leder det till att kravet av vridmoment på varje motor blir 0.22 Newtonmeter.

## 2.4 PID-regulatorn

Vid regleringen utav reglersystemet så används PID-regulatorn som finns i Simulink. PID-regulatorn använder sig utav regulatorparametrarna för proportionell förstärkning  $k_p$ , integrerande förstärkning  $k_i$ , deriverande förstärkning  $k_d$ , samt filterkonstanten  $N_f$ . Polplaceringen i derivering bestäms utav filterkonstanten [3]. Dessa parametrar används i formeln för att ta fram följande ekvation

$$F_{PID} = k_p + k_i \frac{1}{s} + k_d \frac{N_f}{1 + \frac{N_f}{s}} \quad (2.10)$$

# 3

## Tillhandahållet material

Här presenteras vad som tillhandahållits vid projektets start. Sedan tidigare fanns både mjukvara och hårdvara av varierande skick och i detta avsnitt presenteras dess skick, funktion samt för och nackdelar.

### 3.1 Fysisk prototyp

Från tidigare års projekt fanns en fysisk prototyp att tillgå. Denna bestod av en sfär, en inre drivenhet samt ett huvud [2]. Prototypen var vid projektets start demonterad, vissa komponenter saknades och andra var trasiga. Det var därför inte möjligt att testa funktionen av prototypen i sin helhet.

#### 3.1.1 Sfär

Sfären bestod av två halvklot varav ett hade en servicelucka för enklare åtkomst till sfärens insida när sfären var monterad. De båda halvkloten var i sin tur uppbyggda av 3D-printade mindre delar som limmats ihop men på flera ställen fanns sprickor och nivåskillnader i dessa limfogar.

#### 3.1.2 Inre drivenhet

Den inre drivenheten är ett samlingsnamn för samtliga komponenter som finns inuti sfären. Drivenheten bestod av en ram som resterande delar var monterade på. Ramen var tillverkad i aluminium samt stål och var i gott skick. På nedre delen av ramen satt drivmotorerna samt hjulen monterade. Hjulen var i gott skick men den ena motorn fungerade ej. Kablarna till ena motorn hade smält bort sin isolering och kortslutits vid sista körningen.

Högre upp på ramen satt en fixerad axel varpå en konstruktion var monterad som möjliggjorde huvudets rörelse. Med hjälp av en servomotor samt två kugghjul, det ena fäst vid servomotorn och det andra låst på axeln, kunde huvudet vinklas fram och tillbaka.

En stor skillnad mellan detta projekts koncept som beskrevs i avsnitt 2.1 och prototypen som mottogs var hur rotationen av huvudet utfördes. På den mottagna prototypen roterades huvudet inifrån drivenheten genom att med en servomotor rotera magnetarmen, något som medfört att denna gått sönder. Vissa komponenter

så som servomotor och magneter kunde dock återanvändas.

På den inre drivenheten fanns flera elektriska komponenter. Dessa var ett Arduino Mega kort med programvara, ett POLOLU VNH5019 motorkort, en spänningsregulator, ett 12V LiPo-batteri samt ett HC-06 Bluetoothkort. Utöver de brända kablarna som nämndes tidigare så saknades också de flesta kablar mellan Arduino-kortet och komponenterna. Inget kopplingsschema fanns att tillgå vilket ytterligare försvårade provkörning.

#### **3.1.3 Huvud**

Huvudet bestod av en basplatta samt en halvsfär som var fästa med skruv. I basplattan fanns kulrullar monterade som minskade friktionen mellan huvudet och sfären när huvudet rörde sig ovanpå sfären. Basplattan innehöll även magneter som tillsammans med magneterna på magnetarmen inuti sfären höll huvudet på plats. Samtliga komponenter på huvudet var i gott skick men vissa mindre designdetaljer saknades. Ögat som skulle vara monterat på huvudet hade lossat och även antennen som ska sitta på huvudets ovansida.

#### **3.1.4 Lösa delar**

Utöver dessa delar som nämnts fanns även en låda med gamla delar som inte längre användes på prototypen, bland dessa fanns ytterligare en servomotor samt en Arduino Uno som båda var i gott skick.



## 3.2 Mjukvara

Från tidigare projekt tillhandahölls en Androidapplikation samt ett Arduinoprogram till robotens Arduinokort. Med Androidapplikationen, som var skriven i JAVA, kunde en användare skapa en Bluetooth-koppling till roboten och styra denna med hjälp av två styrspakar. Den vänstra styrspaken kunde endast röras i höjdlid och kontrollerade robotens framåt- och bakåtrörelse medan den högra styrspaken endast kunde röras i sidled och gjorde det möjligt att svänga. Utöver detta fanns även två knappar via vilka man kunde luta huvudet längs sfären framåt och bakåt.

Vidare fanns även knappar och funktioner som inte verkade ha något ändamål. Exempelvis möjligheten att skapa konto eller ändra ringsignal mm. Vid inspektion av källkoden för applikationen kunde man se att dokumentationen varierade mycket mellan de olika klasserna vilket innebar att det var svårt att tolka vilka kodstycken som gjorde vad och vilka som faktiskt användes.

Arduinoprogrammet till robotens Arduinokort var mycket sparsamt kommenterad och precis som i Androidapplikationen användes vissa delar av koden inte alls. Koden krävde exempelvis tre olika extra programpaket för att kompilera, något som inte nämndes i kodens kommentarer. Avsaknaden av ett kopplingsschema till Arduinokortet gjorde det också svårt att förstå vad som gjorde vad i Arduinokoden.

# 4

## Reglerteknik

I detta kapitel beskrivs konstruerandet och valideringen av de reglertekniska modeller implementerade i Simulink. Vilka byggde på användandet av den framtagna matematiska modellen beskriven av ekvation 2.5 för att ta fram ett effektivt styrsystem till roboten.

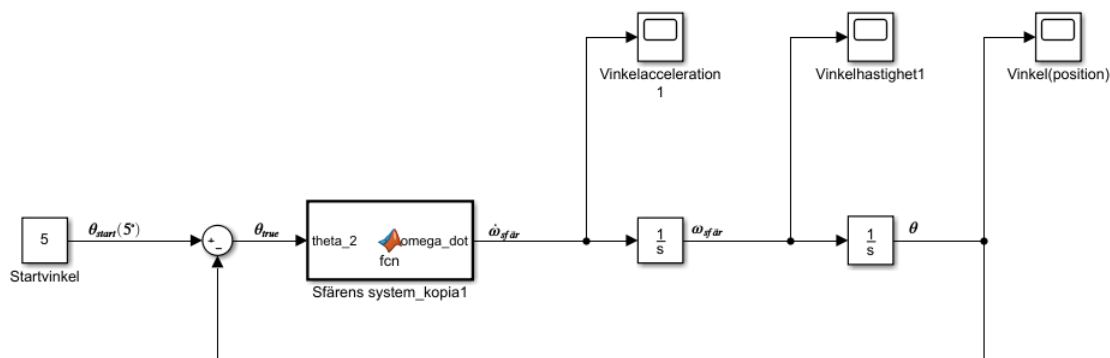
Vid framdrivning av roboten finns det satta krav, se appendix A.1, för hur mycket roboten får avvika från sin körväg, hur snabbt sfären skall kunna stanna samt att den skall stå stilla på planmark efter inbromsning. För att uppnå dessa krav kan ett reglertekniskt system implementeras vilket autonomt reglerar systemet mot en önskad hastighet eller position. Detta reglersystem styr en avläst parameter, exempelvis hastighet eller position, mot en från användaren begärd rörelse. En virtuell systemmodell skapades i Matlab och Simulink utifrån de systemegenskaper som var önskvärda. Systemet testades samt verifierades senare med hjälp av denna modell.

### 4.1 Simulering i Simulink

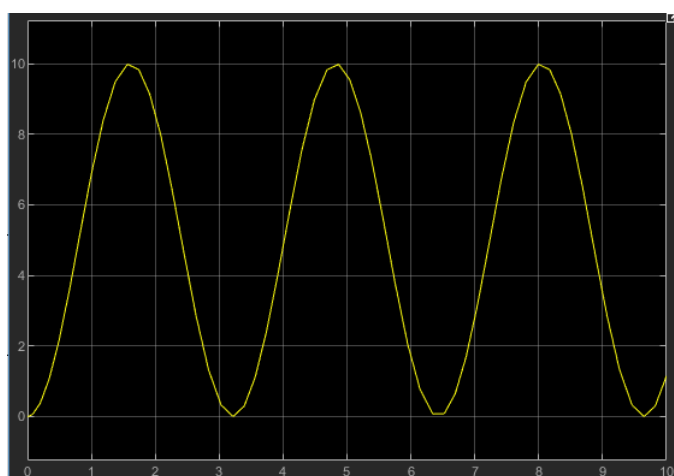
I detta kapitel så beskrivs de simuleringar som gjorts utefter den valda matematiska modellen. Kapitlet behandlar de olika tillämpningar av virtuella modeller i Simulink samt dess resultat.

#### 4.1.1 Implementering av matematisk modell

En första Simulinkmodell konstruerades för att implementera det framtagna matematiska uttrycket, ekvation 2.5. Simulinkmodellen som togs fram visas i figur 4.1. Denna modell använder ett Matlabblock benämnt "Sfärens system" för att med vinkeln den inre drivenheten har gentemot lodvinkeln ( $\theta_2$ ) beräkna vilket vridmoment som påverkar sfären och därigenom vilken vinkelacceleration som uppstår. Simulinkmodellen användes för att verifiera Matlabblocket genom simuleringar. I figur 4.1 har den inre drivenheten placerats med fem graders vinkel gentemot lodaxeln vilket utan förluster i modellen ger upphov till att sfären pendlar från sida till sida med en amplitud på fem grader.



Figur 4.1: Simulinkmodell för verifikation av matematisk modell



Figur 4.2: Vinkel-tid graf över modell ovan

I grafen i figur 4.2 pendlar vinkeln mellan  $0^\circ$  och  $10^\circ$  vilket är det förväntade resultatet. På grund av att modellen inte räknar med några förluster av energi, exempelvis friktion, avtar inte pendelrörelsen över tid utan fortsätter med samma amplitud som drivenheten hade vid utgångsläget. Denna modell användes vidare vid framtagandet av ett återkopplat reglersystem för sfärens vinkel samt vinkelacceleration. Systemet visas i figur 4.3.

#### 4.1.2 Validering av matematisk modell

För att bekräfta att den framtagna matematiska modellen stämmer genomfördes en kontrollberäkning där modellen jämfördes med energiberäkningar för hand. Modellen är baserad på Newtons lagar och som validering valdes att räkna på energiprincipen, lagen om energins bevarande. Ett jämviktssystem mellan den potentiella, kinetiska och rotationsenergin sattes upp där

$$E_{\text{potentiell}} = m_{\text{inre}} \cdot g \cdot \sin(\theta_2) \cdot r = E_{\text{kinetisk}} \cdot E_{\text{rotation}} \quad (4.1)$$

$$E_{kinetisk} = (m_{sfär} + m_{inre}) \cdot \frac{\dot{x}^2}{2} \quad (4.2)$$

samt

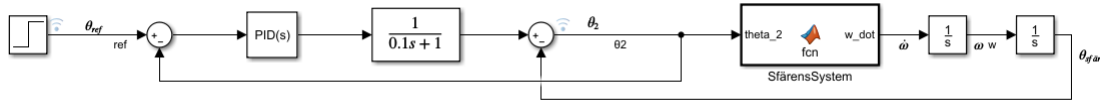
$$E_{rotation} = I_{sfär} \cdot \frac{\omega^2}{2}. \quad (4.3)$$

Ur dessa uttryck kan ekvationen för hastigheten brytas ut

$$\dot{x} = \sqrt{\frac{m_{inre} \cdot g \cdot r}{\frac{1}{2}m_{inre} + \frac{12\pi^2+2}{24\pi^2}}} \quad (4.4)$$

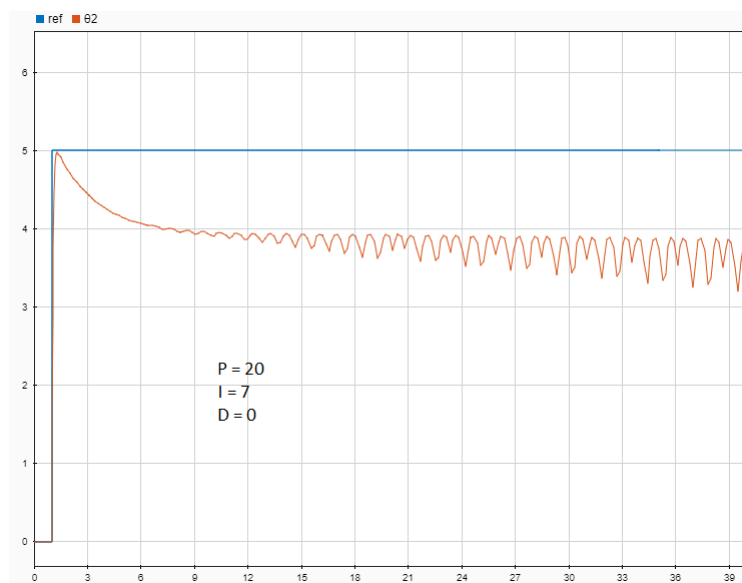
vars resultat jämfördes med framtagen matematisk modell. För alla vinklar som testas erhålls samma värde i båda beräkningstyperna. Slutsatsen av beräkningarna visar att både den matematiska modell och energiberäkningarna resulterar i samma hastighet och modellen anses verifierad.

### 4.1.3 Första reglersystemet



Figur 4.3: Simulink-modell för systemet i 2 dimensioner med ideal motor med fördröjning på 0.1s

Reglersystemet i figur 4.3 regleras genom att först beräkna differensen mellan den önskade vinkeln  $\theta_{ref}$  som går mellan drivenheten och lodaxeln i sfären gentemot den faktiska vinkeln  $\theta_2$ . Skillnaden skickas i form av en signal till en PID-regulator, regulatorn skickar en signal till en motormodell för att minska nämnd skillnad. Motormodellen driver i sin tur den inre drivenheten upp längs sfärens insida och ökar vinkeln mellan drivenheten och lodaxeln. Detta ger upphov till ett moment hos sfären som sätter den i rullning och därmed minskar vinkeln då inre drivenheten förflyttas tillbaka mot lodaxeln. Regulatorns uppgift blev att hela tiden öka styrsignalen till motormodellen då eftersom systemet är teoretisk och utan förluster så kommer sfären fortsätta öka i hastighet så länge tyngdpunkten är förskjuten.

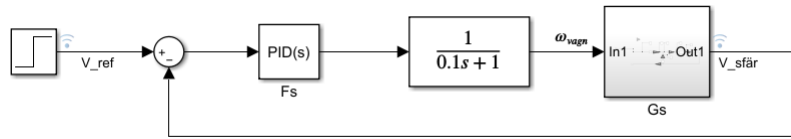


Figur 4.4: Simuleringsresultat för första reglersystemet. Referenssignalen är önskad vinkel och  $\theta_2$  är verklig vinkel. Systemet visas vara marginellt stabilt.

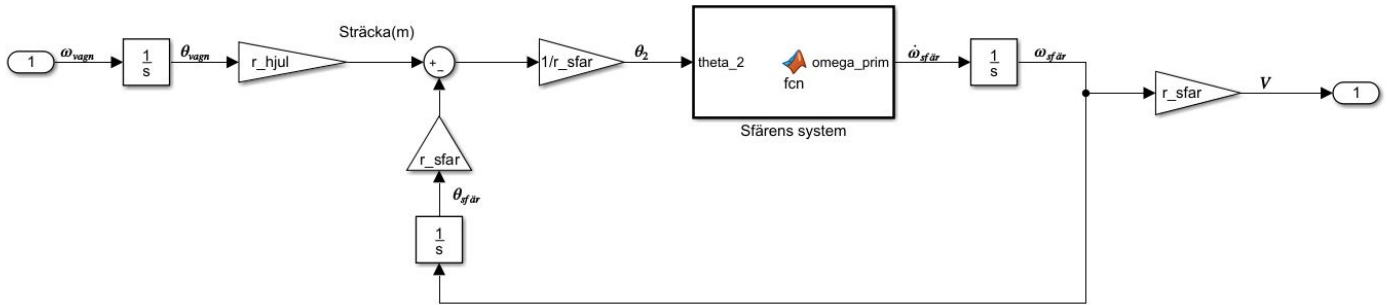
Vid verifikation utav systemet som visas i figur 4.4 uppmärksammades att systemet endast var marginellt stabilt. Stabilitetsvillkoret att det strikt inte får finnas poler i det högra halvplanet (RHP - Right Half Plane) uppnåddes endast devis då det vid linjäranalys visade sig finnas poler på imaginär-axeln, vilket är varför stegsvarets oscillationer ökar över tid. Vid undersökning av grafen i figur 4.4 så synes att det kvarstående felet växer. För att få systemet att uppträda stabilare kunde regulatorparametrarna ökas mycket, ungefär 200 gånger de nuvarande parametrarna samt lägga till en deriverande regulatorverkan. Ökade man parametrarna blir systemet känsligt för störningar. Detta gör att vid små störningar skickar regulatorn styr-signalen som är långt över önskade styrvärden, vilket i sin tur kan göra det svårt att kontrollera systemet när man implementerar det i den fysiska prototypen. På grund av dessa problem valdes att inte arbeta vidare med denna modell som reglerar efter vinkel.

#### 4.1.4 Andra reglermodellen

Ett nytt system togs fram vilket visas i figur 4.5 och i figur 4.6 visas dess undersystem. Detta simuleringssystem använder sig av samma matematiska modell (Matlabblock) som i den tidigare modellen. För att räkna ut vilken vinkel den inre drivenheten har gentemot lodvinkeln ( $\theta_2$  i figur 2.3) beräknas inre drivenhetens tillryggalagda sträcka framåt och subtraheras med sfärens tillryggalagda sträcka. Genom sfärens system uttrycks sedan den på sfären genererade vinkelaccelerationen från den inre drivenhetens vinkel  $\theta_2$ . Denna vinkelacceleration integreras i två steg, först till vinkelhastighet för återkoppling till PID-regulatorn som synes i figur 4.5 och sedan integreras till total vridning för att jämföras med den inre drivenhetens totala färdade sträcka i sfären.

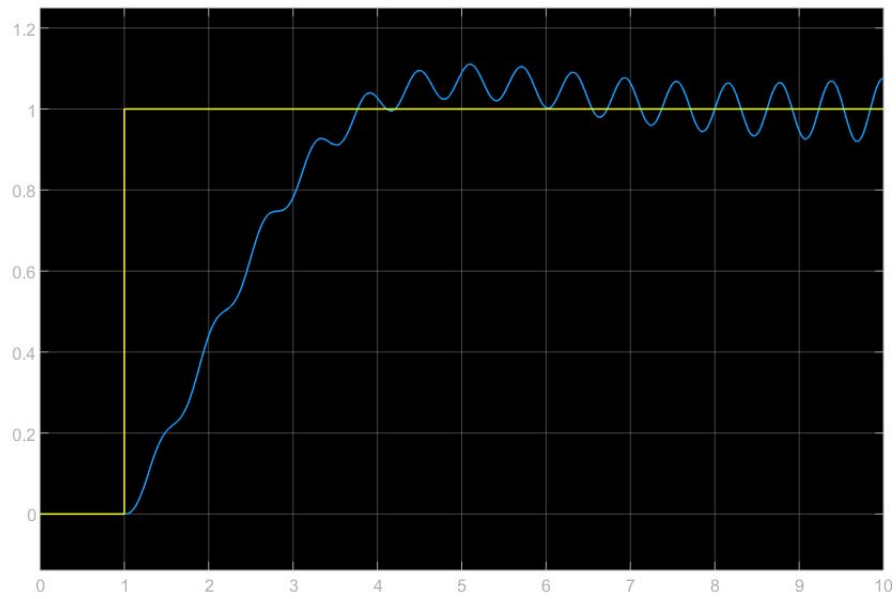


Figur 4.5: Modell på systemet som är marginellt stabilt

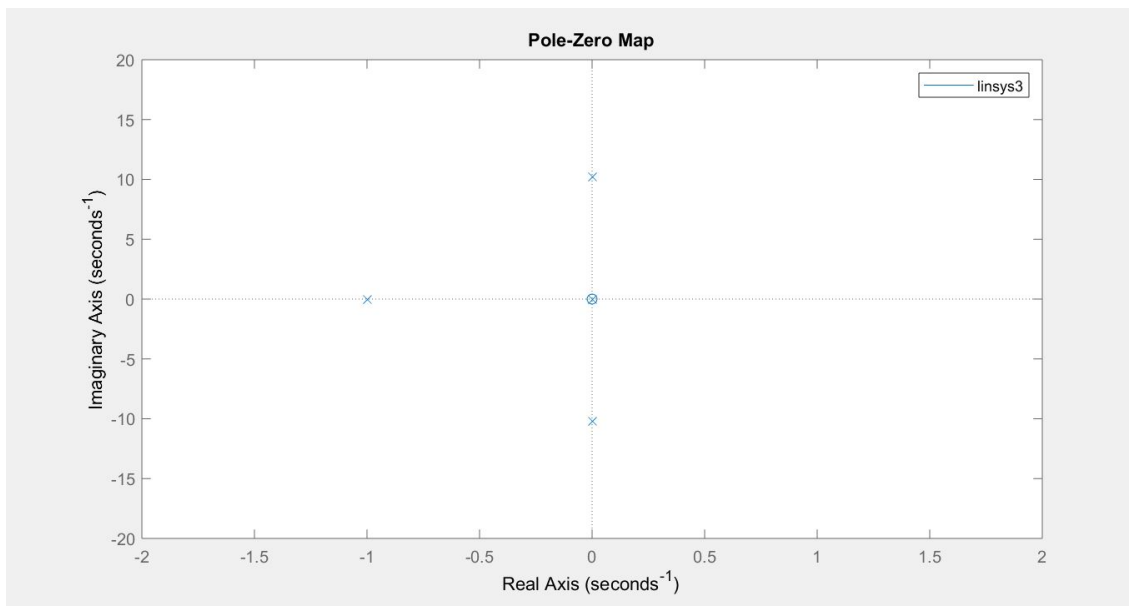


Figur 4.6: Undersystemet till modellen, som visar den övre modellens Plant-block (Gs).

Med Simulink verktyget Control System Design-Linear Analysis undersöktes systemets stegsvar, poler och nollställena [4]. Stegsvaret visas i figur 4.7 och är till synes långsammare än det föregående. Fördelen med det nya systemet att man har gått från instabilt system till ett marginellt stabilt system. Här befinner sig polerna exakt på imaginäraxeln och uppfyller därför delvis stabilitetsvillkoret att inte finnas i RHP. Vilket kan ses i figur 4.8. Polerna befinner sig i  $(-1,0)$ ,  $(0,0)$ ,  $(0,-9.76i)$ ,  $(0,+9.76i)$ . Nollstället finns i  $(0,0)$ .

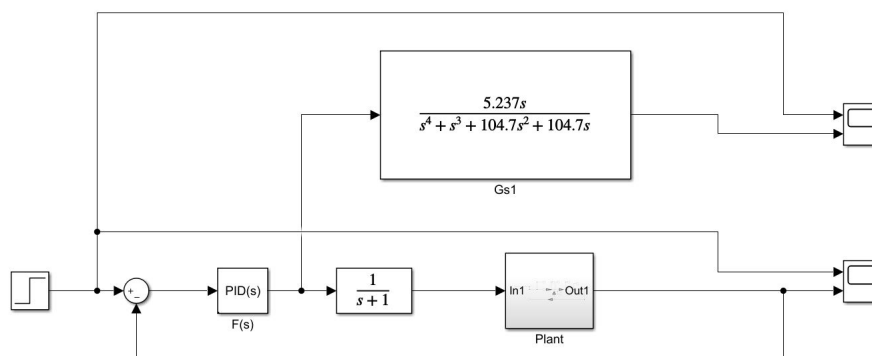


Figur 4.7: Stegsvär över systemet med hastighetsreglering, hastighet-tidsgraf



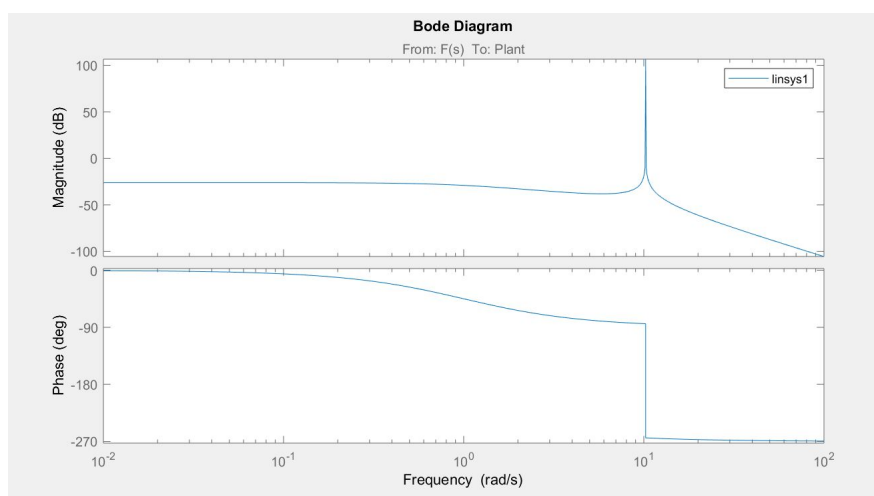
Figur 4.8: Graf över imaginär och realdelen. Marginellt stabilt system kan läsas av då poler finns villkorligt på RHP.

Polplaceringen visade sig vara ett problem då som man ser i figur 4.7 ökar reglerfelet vid varje översläng när utsignalen oscillerar. Detta är ej önskvärt och en överföringsfunktion togs fram med verktyget linear analysis i Matlab. Den framtagna överföringsfunktionen är ekvivalent med Plant-blocket tillsammans med överföringsfunktionen som skall motsvara fördröjningen av motorn. I Simulinkmodellen benämns överföringsfunktionen som Gs1. Systemet och dess motsvarande överföringsfunktion åskådliggörs i figur 4.9.



Figur 4.9: Simulinkmodell på det marginellt stabila systemet.  $G_{s1} = \frac{1}{s+1} \cdot \text{Plant}$

Bodédiagramet för det marginellt stabila systemet visas i figur 4.10. Här observeras det att resonanstoppet går mot oändligheten. En annan notering är att i fasdiagrammet ser man att det sker en långsam förändring på  $90^\circ$  vilket motsvarar motorns del i systemet. Denna förändring visar att överföringsfunktionen som skall motsvara motorfördröjningen är långsam jämfört med övriga systemet. Det vill säga funktionen  $\frac{1}{s+1}$  är en långsam approximation utav motorn. Då de verkliga motorerna reagerar tillräckligt snabbt så kan detta block försummas.



Figur 4.10: Bodédiagram för överföringsfunktionen Gs1.



# 5

## Konstruktion

För att uppnå de nya krav som ställts på roboten var det nödvändigt att den fysiska konstruktionen omkonstruerades. Viss reparation av roboten var även nödvändig även på grund av slitage av prototypen sedan tidigare projekt vilket beskrivs i kapitel 3. Årets arbete siktade mot andra mål än tidigare projekt vilket innebar att fungerande komponenter omkonstruerades för att klara kraven som är satta i appendix A.1. Dessa konstruktionsförbättringar redovisas nedan under tre huvudrubriker som är robotens centrala delar; sfär, inre drivenhet och huvud.

### 5.1 Sfär

Sfären är en viktig komponent av roboten då den utgör kroppen och omsluter drivenheten. Att sfären håller ihop och fungerar väl är väsentligt för prototypen. I kapitel 3 nämns att sfären har nivåskillnader och sprickor mellan sfärhalvornas olika beståndsdelar. Dessa nivåskillnader leder till att hjulen på den inre drivenheten kan fastna och skapa ryckiga rörelser och plötsliga vridningar som försämrar stabiliteten på roboten och försvårar riktningssnlig körning.

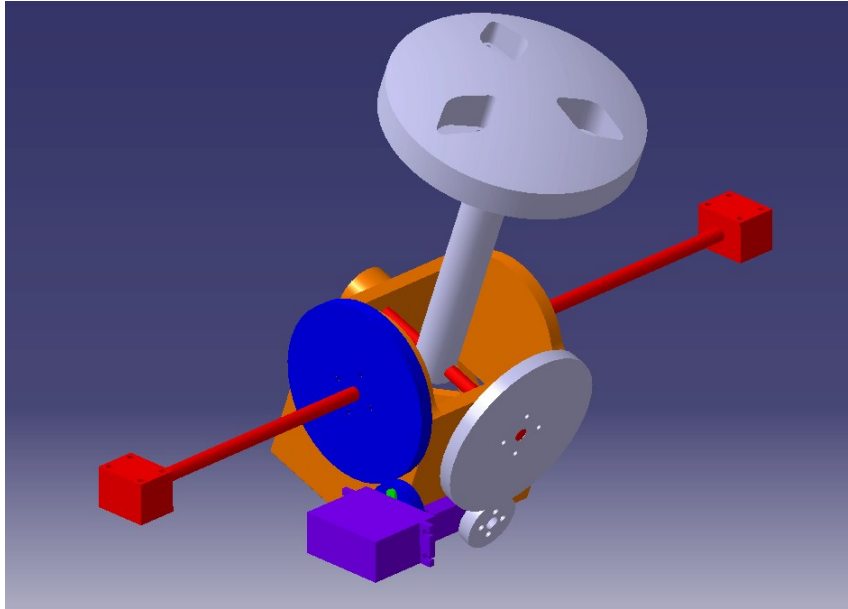
Ett sätt att lösa detta är att fylla ut nivåskillnaderna med spackel så att det blir mindre nivåskillnader mellan plattorna än vad det är i dagsläget. Att fylla nivåskillnaderna med spackel leder också till att plattorna kommer hålla ihop bättre då det binder samman plattorna och fyller ut sprickorna som skapats. Detta kommer bidra till en stabilare prototyp. Att ha i åtanke är att med ett sprött spackel blir styvt och hårt, medan ett segt spackel är mer elastiskt. Hårda och spröda material är mer känsliga för stötar än sega material.

### 5.2 Inre drivenhet

Den inre drivenheten är ett samlingsnamn för samtliga komponenter på insidan av sfären. Komponenterna benämns i fortsättningen som vagga, magnetarm och ram som presenteras vidare i kapitlet, utöver dessa ett antal mindre komponenter. I figur 5.1 visas CAD-modellen av den inre styrarmen. Styrarmen fästs i ramen och bildar tillsammans den inre drivenheten.

Ett av kraven som ställs i kravspecifikationen, se appendix A.1, var att kunna röra huvudet både fram och bak på sfären samt höger och vänster sett till färdriktning-

en. Den befintliga styrningen av magnetarmen kunde endast röra huvudet fram och bak på sfären så en omkonstruktion krävs för att möjliggöra hela rörelsen. Den nya lösningen baseras på samma princip som den gamla, med servomotorer som via kugghjul vrider magnetarmen till önskad vinkel. En CAD-modell på lösningen kan ses i figur 5.1.

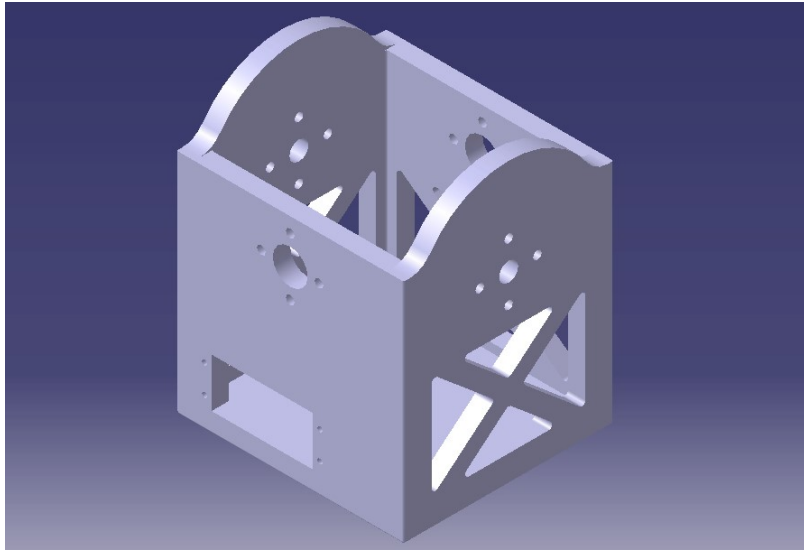


Figur 5.1: Magnetarmen som håller huvudet på plats på utsidan av sfären.

Lösningen består av vaggan, magnetarm, längs- och tvärgående axlar samt två servon som styr två kugghjulspär. Kugghjulen möjliggör användning av svagare och mindre servomotorer vilket är gynnsamt då de väger mindre och tar mindre plats. Styrarmens funktion är att skapa önskad förflyttning av huvudet både längs färdriktningen samt tvärs färdriktningen. Huvudet styrs av magnetarmens vinkel och är fäst i sfärens centrum. Magnetarmen vinklas genom att den ena axeln roterar magnetarmen i sidled i vaggan och den andra axeln roterar vaggan i färdriktningen vilket möjliggör rörelse i två led.

### 5.2.1 Vaggan

Vaggan är det som i figur 5.1 visualiseras i orange vars uppgift är att hålla fast komponenter och rotera dessa kring den tvärgående axeln vaggan är fäst i. I figur 5.2 nedan finns en bild på vaggan utan komponenter monterade.

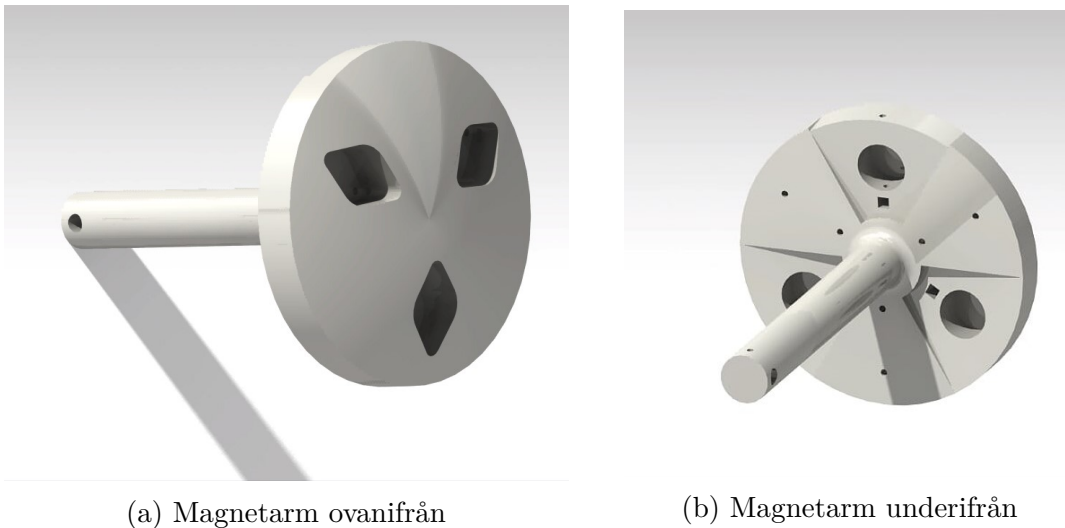


Figur 5.2: Vagga till inre styrarm utan monterade komponenter.

I bilden ser man samtliga monteringshål för komponenter samt de triangelformade öppningarna som är skapade för att lätta vikten på konstruktionen. Förutom minskad vikt så är även minskad friktion gynnsamt. För att minska friktionen mellan axel och vagga så tillverkades bussningar som skruvades fast på vaggan. Dessa bussningar klarar av att ta upp radiella laster bättre än vad tillexempel kullager skulle göra samtidigt som de minskar friktionen vid rotation. Likadana bussningar används även för den andra axeln där magnetarmen är monterad. Vaggan är tillverkad med additiv tillverkning vilket möjliggör snabb småskalig tillverkning trots komplexa strukturer.

### 5.2.2 Magnetarm

En helt ny konstruktion av magnetarmen behövde skapas då tidigare ej var funktionsduglig som omnämns i kapitel 3. Magnetarmen är till för att hålla magneter på plats i sfärens insida. Dessa magneter är placerade i håligheterna i figur 5.3b och hålls på plats med tvärgående skruvar. Magneterna i armen har motsvarande magneter i huvudet, var emellan magnetkraft skapas och huvudet därmed hålls på plats. I figur 5.3a visas ytterligare tre rombliknande hål vilka hade till uppgift att hålla kulrullar på plats. Kulrullarna rullar mot sfärens insida för minskad friktion.



Figur 5.3: Magnetarmens ursprungliga utformning

Originalidén var att skapa hela magnetarmen med hjälp av additiv tillverkning. På grund av mått-begränsningar i maskinen som fanns att tillgå var det tvunget att minska delarnas storlek. Den förlängda axeln till magnetarmens huvud fick uteslutas och ersattes av ett aluminiumrör. Huvudet separerades diagonalt, rakt över centrum för att skapa två halvor som efter tillverkning monteras samman, se figur 5.4. En bit av axeln behölls i mindre diameter för att passa i aluminiumröret. De två tvärgående hålen genom magnetarmens axel är till för att fästa aluminiumröret med hjälp av skruvar och låsmuttrar.



Figur 5.4: Separerat huvud av magnetarm

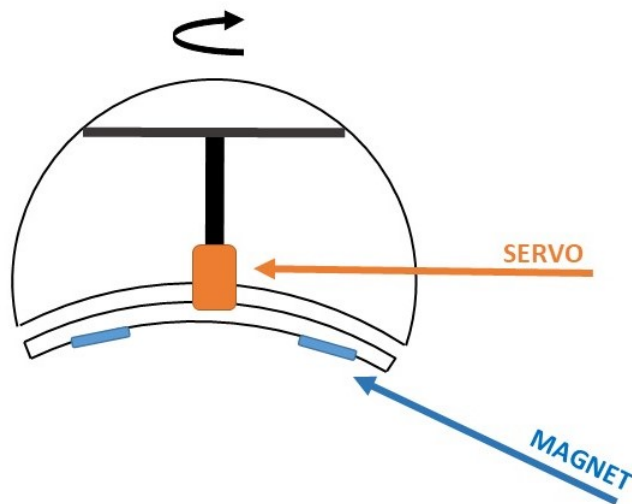
### 5.2.3 Ram

I kapitel 3 nämns att ramen är i ett gott skick men för att möjliggöra rörelsen i två led för huvudet behövdes ett nytt fäste tillverkas. Fästet är till för att montera en servomotor vars uppgift är att via ett kugghjulspår vrida vaggan. Fästet tillverkades av aluminiumplåt för att hålla ner vikten och dess enkla utformning gjorde den enkel att tillverka. Utöver detta fäste utfördes inga ytterligare förändringar av ramen då det ej krävdes förbättringar för att uppfylla kraven som listas i appendix A.1.

## 5.3 Huvud

Huvudet är en fristående del och hålls kvar ovanpå sfären med hjälp av magnetkraft. Tidigare roterades huvudet genom att magnetarmen på sfärens insida roterade. I kapitel 3 så nämns det att denna magnetarm har brutits av vilket troligtvis berott på höga vridlastmoment. För att förhindra detta flyttades rotationsmekanismen upp i huvudet istället. Förflyttningen ledde till ökad vikt i huvudet vilket påverkar sfärens stabilitet men stämmer bättre överens med hur huvudet roterar i filmen.

För att möjliggöra detta implementerades en motor, ett batteri samt ett Arduino-kort i huvudet. Ett fäste för att montera dessa komponenter konstruerades samt ett fäste mellan motorns drivaxel och övre delen av huvudet. Den nya konstruktionen visualiseras i figur 5.5.



Figur 5.5: Huvudets konstruktion

Servomotorn är monterad på bottenplattan och då servomotorn roterar överförs rotationen till huvudets övre del med hjälp av den lodräta axeln. Mellan den lodräta axeln och den övre delen på huvudet sitter en balk monterad. Denna balk möjliggör rotation av övre delen på huvudet utan att bottenplattan roterar.

# 6

## Elektronik

De elektroniska komponenter som användes vid bygget av robotens innanmäte kommer att redogöras i detta kapitel och dess funktionalitet förklaras. De elektroniska komponenterna som roboten består av är som följer; ett Arduinokort MEGA, ett Arduinokort UNO, ett Motorkort Pololu Dual VNH5019 Motor Driver Shield, en spänningsregulator, ett 12V LiPo-batteri, ett HC-06 Bluetoothkort, två NRF24L01 Radiokort, en Adafruit LSM9DS1 IMU, tre servomotorer och två DC-motorer med encoders.

### 6.1 Spänningsregulator

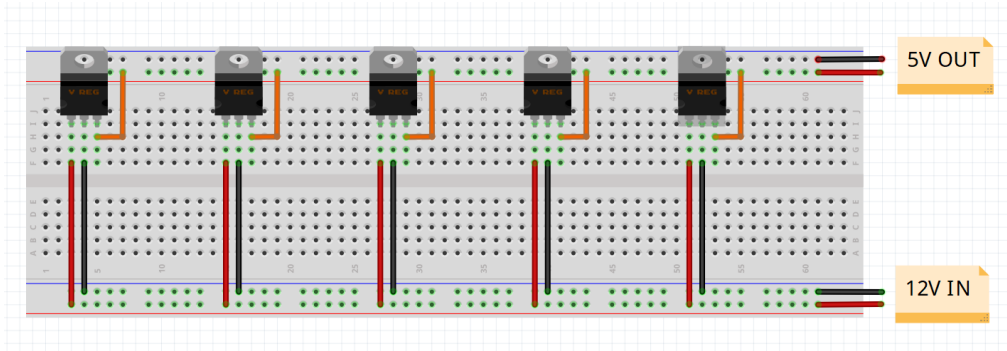
Roboten drivs av ett LiPo-batteri på 12 volt. För vissa komponenter så som motor-kortet och motorerna är denna spänning mycket lämplig men de flesta andra komponenter kräver en lägre spänning. Den inre drivenhetens Arduinokort reducerar själv ner spänningen till både 5 volt och 3.3 volt vilket möjliggör strömförsörjning av både gyroskopet, Bluetoothkortet samt radiokortet.

För att styra huvudets position på sfären används som tidigare nämnt två stycken servomotorer och även dessa vill ha en spänning på cirka 5 volt. Dessa servomotorer drar mer ström än komponenterna som strömförsörjs av Arduinokortet, så pass mycket att Arduinokortet inte klarar av att strömförsörja dem ordentligt. Servomotorerna måste därför strömförsörjas från batteriet och för att möjliggöra detta krävs en reduktion av spänningen. Förra årets kandidatarbete genomförde detta genom att parallellkoppla fem stycken linjära spänningsregulatorer av typen Voltage Regulator L7805CV - 5V 1.5A enligt figur 6.1 [2].

Under projektets gång har det endast verifierats att denna krets fortfarande fungerar, det vill säga att spänningen ut från spänningsregulatorn ligger på cirka 5 volt när kretsen strömsätts med 12 volt.

### 6.2 Arduinokort

För att kunna kontrollera alla motorer och servon i roboten behövdes någon form av logisk enhet. Tidigare projekt använde sig av ett Arduino MEGA 2560 och kandidatgruppen fann ingen anledning att byta ut det. Däremot skulle årets robot kunna rotera på huvudet separat och eftersom det inte går att dra en kabel från



Figur 6.1: Kopplingsplatta med spänningsregulatorer som gör om batteriets 12 V till 5 V vilket kan användas till att strömförsörja servomotorerna.

insidan av sfären till huvudet krävdes trådlös kommunikation samt en logisk enhet i huvudet. Eftersom det fanns tillgång till en Arduino UNO från tidigare projekt beslöts det att det skulle bli huvudets logiska enhet.

### 6.3 Radiokort

Eftersom huvudet och den inre drivenheten inte kunde kommunicera med varandra via kabel förseddes båda med var sitt radiokort av modellen NRF24L01 som används för kommunikation via 2,4GHz radiovågor. Dessa var av typen transceiver vilket innebär att korten kunde agera både som sändare (Transmitter) och mottagare (Receiver) och skickar meddelandena till respektive Arduinokort via en seriell anslutning.

### 6.4 Bluetoothkort

För att kunna kommunicera med Androidapplikationen som styr roboten användes tidigare ett HC-06 Bluetoothkort. Eftersom Bluetooth är väldigt lättillgängligt och finns på alla nyare telefoner och surfplattor fanns det ingen anledning att byta ut modulen. Bluetooth har även ett väldigt välutvecklat bibliotek och var därmed en bra kandidat som kommunikationskanal mellan Arduinokortet och en Androidenhet.

### 6.5 Motorer

Det valdes att köpas in DC-motorer med planetväxellådor och encoders eftersom dessa uppfyllde kraven på rotationshastighet samt moment som beräknades i kapitel 2.3. Momentkravet på motorerna var beräknat till 0.22 Newtonmeter, något som motorerna uppfyller då de på grund av växellådans utväxling på 43:1 kommer upp i 0.56 Newtonmeter. I kapitel 2.3 visas även att det krävs en rotationshastighet på minst 286 varv per minut för att framföra roboten i 1.5 meter per sekund enligt

kravspecifikationen i appendix A.1, vilket motorerna uppfyller då de kan rotera med 350 varv per minut (utan belastning).

En encoder är en komponent som noterar motorns position och kan användas till att räkna ut hur många varv motorerna roterat för att vidare beräkna hastighet och distanser. Den encoder som sitter på dessa motorer registrerar 3 olika punkter per roterat varv vilket ger en hög upplösning på hastighet och färdad sträcka.

### 6.6 Servomotorer

Roboten använder två olika typer av servomotorer, två stycken vanliga servomotorer och en kontinuerlig servomotor. En vanlig servomotor kan endast rotera cirka 180 grader men vet hur långt den har roterat och kan därmed positionera sig vid specifika gradtal.

Det kontinuerliga servot kan istället rotera hur många varv som helst men känner inte till sin position. På ett kontinuerligt servo ställer man därmed in önskad rotationshastighet istället för önskad position.

### 6.7 IMU

Eftersom BB-8 har en rund kropp uppstår lätt gungande rörelser vid acceleration och retardation. För att kunna upptäcka och kompensera för dessa oönskade rörelser hos roboten används en Inertial Measurement Unit (IMU) vilket är en komponent som består av ett gyroskop, en accelerometer samt en magnetometer. Modellen som användes under projektet var Adafruit LSM9DS1 och alla beräkningar utfördes av Arduinokortet.

Gyrot på IMU:n mäter vinkelacceleration och dess avläsningar måste alltså integreras dubbla gånger för att räkna fram vinkeln.

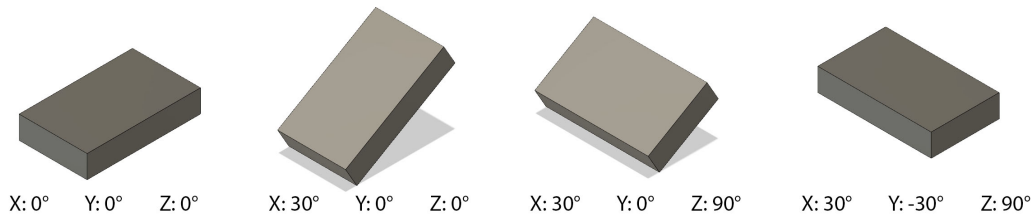
Vid uppstart av roboten används accelerometern för att mäta upp jordens gravitation och med hjälp av trigonometri kan lodvinkeln beräknas. Detta gör att roboten därefter vet vad som är vågrätt och lodrätt oavsett vilken vinkel gyrot hade vid uppstart.

Gyrot som användes i vårt projekt uppvisade små variationer i avläsningarna av vinkelaccelerationen även i helt stillastående läge, något som kompenserades för genom att subtrahera alla avläsningar under körning med ett medelvärde som beräknas vid varje uppstart.

Eftersom gyrot inte avläses och integreras kontinuerligt uppstår efter ett tag en avvikelse mot verkliga vinklar, vilket gör att gyrot inte är helt optimalt för att mäta vinkeln på drivenheten. Precis som vid uppstarten av roboten kan accelerometern med hjälp av jordens gravitationskraft räkna ut vinkeln på IMU:n men eftersom



accelerationen påverkas vid körning av roboten är detta inte heller optimalt. Lösningen är att till största delen använda data från gyrot men att addera en liten påverkan från accelerometern för att motverka avvikelser hos gyrot.



Figur 6.2: När gyron roteras kring flera av sina axlar uppkommer lätt oväntade resultat.

Gyrot mäter rotation kring 3 axlar som kallas stigning, rullning respektive girning. I vårt fall motsvarar stigningen drivenhetens vinkel i färdriktningen, rullning dess vinkel i sidled samt girning dess rotation kring lodaxeln. När roboten körs kommer alltså girning att uppstå när färdriktningen ändras. När gyrot är vågrätt är girning inget problem eftersom detta inte påverkar de andra axlarna, däremot kommer dessa påverkas vid girning om drivenheten inte är vågrät, se figur 6.2. Detta kompenseras genom att räkna om uppmätt girning till förändringen i de andra axlarna.

# 7

## Mjukvaruutveckling

I kapitel 3 beskrevs den mjukvaran som projektet utgick ifrån. Nedan beskrivs den vidareutveckling som gjordes på mjukvaran för att projektet skulle nå sina krav som kan ses i appendix A.1.

### 7.1 Androidapplikation

För att uppnå kraven satta på roboten behövde Androidapplikation vidareutvecklas. Beslut fattades att det skulle vara lättare att skapa en ny applikation och använda de delar från den föregående applikationen som man visste fungerade. Dessa delar visade sig vara gränssnittet med de två styrpakarna och de två knapparna samt en del av Bluetooth-hanteringen.

Enligt krav skulle robotkroppens rörelse och huvud kunna styras separat samt skulle roboten också kunna köra förprogrammerade körningsrutter. På grund av dessa krav gjordes valet att dela upp applikationen i fyra olika gränssnitt.

Det första gränssnittet skulle fungera som en meny för att navigera sig till de olika körvyerna samt att skapa Bluetooth-kopplingen till roboten. Den andra vyn skulle kunna kontrollera allt som skulle finnas på roboten; kroppsrorelse, huvudrorelse och huvudrotation. För att kunna göra detta programmerades föregående projekts gränssnitt om så att styrpakarna inte längre var låste i höjd- respektive sidled. Detta ledde till att robotens kroppsrorelser gavs från den ena styrspaken och robotens huvudrorelse gavs av den andra. De två knapparna i mitten av gränssnittet programmerades till att kontrollerade huvudets rotation.

För att kunna ge förbestämda körningsrutter till roboten skapades ytterligare ett gränssnitt med fem olika knappar. Vid tryck på någon av dessa skulle förinställda rörelseprogram köras av roboten. På grund av föregående projekts tester av styrningen skapades också ett gränssnitt som fungerade likadant som i den tidigare applikationen med styrpakarna låsta i höjd och sidled. Detta för att föregående grupp kommit fram till att roboten blev som mest lättstyrd då man gasade och bromsade med ena spaken och svängde med den andra [5]. Detta kunde även verifieras efter testkörning av roboten.

### 7.2 Arduinoprogram för sfär

Eftersom de flesta av komponenterna på drivenheten var nya valdes att programmera ett nytt Arduinoprogram istället för att bygga vidare på det program som fanns sedan tidigare års kandidatarbeten. Bland annat behövde funktionalitet för radiomodul, IMU och de nya motorerna implementeras.

För att göra koden lättläst och lätt att testa gavs varje komponent en separat fil. Enkla program skrevs för att verifiera varje komponents funktionalitet och för att testa dessa innan hela robotens program implementerades. Detta Arduinoprogram hade till uppgift att styra båda robotens motorer, huvudets position på sfären samt kommunicera med både robotens huvud samt Androidapplikationen. Viss hänsyn togs även till vinkeln på drivenheten för att undvika oscillation.

### 7.3 Arduinoprogram för huvud

Eftersom Arduinoprogrammet i huvudet endast skulle ansvara för rotationen av en servomotor behövde det inte vara särskilt komplicerat. För att lämna plats till vidareutveckling bestämdes det att kommunikationen till Arduinoprogrammet i sfären skulle hanteras med hjälp av en avbrottshanterare. På detta sätt kunde det försäkras att kommunikationen mellan Arduinoprogrammen skedde snabbt samt att inga meddelanden missades på grund av att programmet i huvudet utförde andra uppgifter.

### 7.4 Kommunikation mellan sfär och huvud

På grund av att roboten tar sig fram genom att rulla sin sfär och balansera huvudet ovanpå var det inte möjligt att sköta kommunikationen mellan huvud och kropp via kabel. Kommunikationen var alltså tvungen att ske trådlöst. Som lösning valdes att två radiomoduler skulle sköta kommunikationen mellan de två Arduinokorten. Till skillnad från Bluetoothkortet som användes för kommunikationen mellan användarens telefon och roboten där färdiga bibliotek fanns att tillgå behövde ett kommunikationsprotokoll utvecklas för radiomodulerna.

# 8

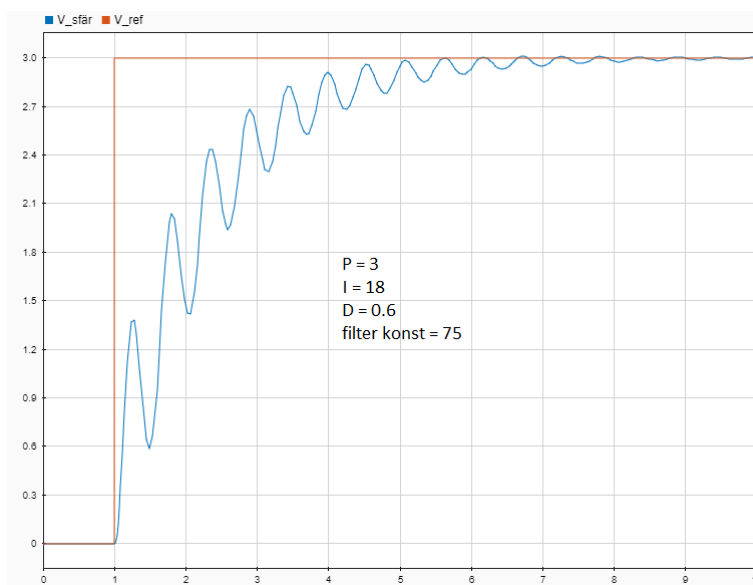
## Resultat

Detta kapitel innehåller de slutgiltiga resultat som blivit uppnådda under projektet och presenteras inom sitt tillhörande delmoment. Delmomenten listas utefter avsnittens ordning i rapporten och innehåller delavsnitt som redogör för hur resultaten verifierades samt testades utefter kravspecifikationen.

### 8.1 Reglering

Från det system, som visas i figur 4.5, som simulerats i Simulink har ett regler-system för BB-8 tagits fram som reglerar hastigheten för sfären. Detta system har med hjälp av analysverktyg i Simulink bekräftats till att vara marginellt stabilt som konstaterat i kapitel 4.1.4.

I figur 8.1 så visas det slutgiltiga stegsvaret från systemet efter det att PID-regulatorns parametrar justerats samt att fördröjningen från motorn minimerats. Som figuren visar uppnås den efterfrågade hastigheten dock sker detta med viss oscillering. Systemets regulatorparametrar minskades ner till  $k_p = 3$ ,  $k_i = 18$ ,  $k_d = 0.6$  och  $N_f = 75$ .



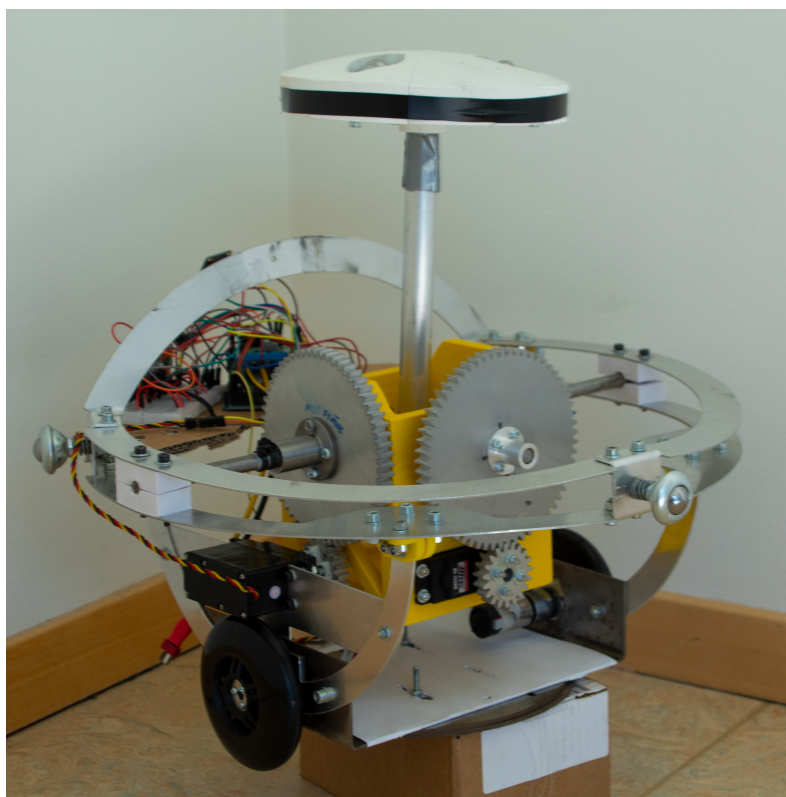
Figur 8.1: Stegsvär för systemet med approximationen att motorfördröjningen är försumbar.

## 8.2 Konstruktion

Detta avsnitt behandlar de resultat som omkonstruktionerna i kapitel 5 ledde till. Här beskrivs hur de nya konstruktionerna fungerar samt om de klarar de krav som är satta i projektets kravspecifikationer som återfinns i appendix A.1.

### 8.2.1 Omkonstruktion av inre drivenhet

För att möjliggöra att huvudet skulle kunna röra sig både längs färdriktningen samt tvärs färdriktningen så behövde den inre styrarmen omkonstrueras. Den nya konstruktionen kan ses i figur 8.2 nedan.



Figur 8.2: Den färdiga konstruktionen av den inre drivenheten

Konstruktionen består av två servomotorer som via kugghjul och axlar möjliggör vridning av magnetarmen. Den ena servomotorn är monterad på ett fäste på ramen precis ovanför en av drivmotorerna. Kugghjulet som är monterat på denna servomotor överför rotationen till ett större kugghjul som är monterat på vaggan. När servomotorn roterar leder det till att hela vaggan vrider sig och huvudet lutar antingen fram eller bak beroende på vilket håll servomotorn roterar.

Den andra servomotorn är istället monterad i vaggan och även på denna servomotor är ett litet kugghjul monterat. Då servomotorn roterar överförs kraften från det lilla kugghjulet till ett stort som är monterat på en axel fäst via två bussningar på

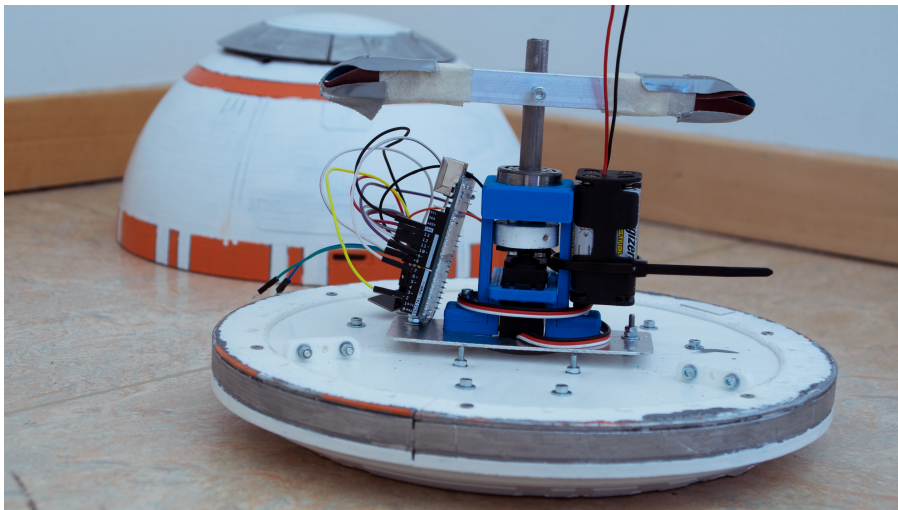
vaggan. På axeln sitter magnetarmen monterad vilket leder till att magnetarmen vrids då motorn roterar. När denna servomotor roterar leder det till att huvudet rör sig höger eller vänster på sfären beroende på riktningen som servomotorn roterar.

Kravet som sattes då projektet startades var att huvudet skulle klara av att luta 15 grader i båda riktningar. Vid test klarade konstruktionen av att luta huvudet 27 grader fram och bak samt 27.5 grader åt höger och vänster.

Någonting som upptäcktes vid testerna var att kopplingen mellan de mindre kugg-hjulen och servomotorerna eller servomotorernas inbyggda växellåda kuggade över vid drift. Detta ledde till att huvudets nolläge flyttade sig från att vara högst upp på sfären till att vara lite på sidan av sfären.

### 8.2.2 Omkonstruktion av huvud

Mekanismen som roterar huvudet nu är monterad i huvudet istället för att den inre magnetarmen roterar. Rotationen uppstår genom att en servomotor som är monterad på bottenplattan av huvudet roterar, se figur 8.3.



Figur 8.3: Den färdiga konstruktionen av huvudets rotationsmekanism

Den roterande axeln från servomotorn är sedan kopplad till ett stag som den övre delen av huvudet vilar på, när axeln roterar leder detta till att den övre delen av huvudet roterar. Servomotorn styrs av ett Arduinokort med en radiomottagare som möjliggör att man kan styra huvudrotation via Arduinokortet i sfären och i sin tur genom appen.

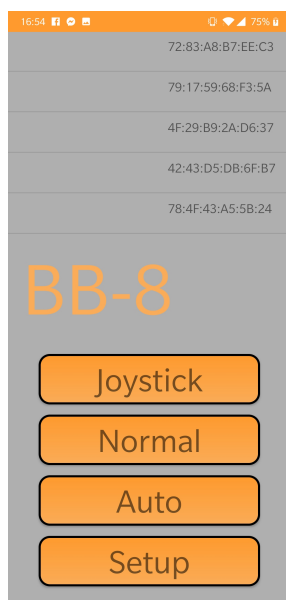
Validering av funktionen utfördes genom att placera hela huvudet på ett bord och sedan via appens funktioner för huvudrotation få huvudet att rotera. Vid testerna fungerade rotationen och huvudet snurrade utan att övre delen åkte av.

## 8.3 Mjukvara

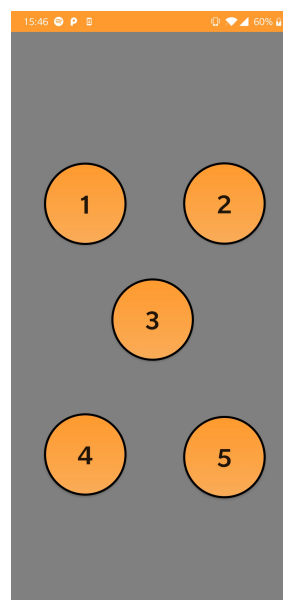
I kapitel 7 nämndes vilken vidareutveckling som skulle ske av mjukvaran. Nedan beskrivs de resultat som denna vidareutveckling ledde fram till.

### 8.3.1 Androidapplikation

Roboten kan fjärrstyras med hjälp av en Androidapplikation som har fyra huvudsakliga gränssnitt; Meny, Joystick, Normal och Auto, se figur 8.4 - 8.7. Menygränssnittet är det gränssnitt som först introduceras för användaren och består av fyra olika knappar. De tre första knapparna tar användaren till Joystick-, Normal- eller Autogränssnittet och den fjärde knappen är en setupknapp för att koppla applikationen till roboten via Bluetooth.



Figur 8.4: Menygränssnittet



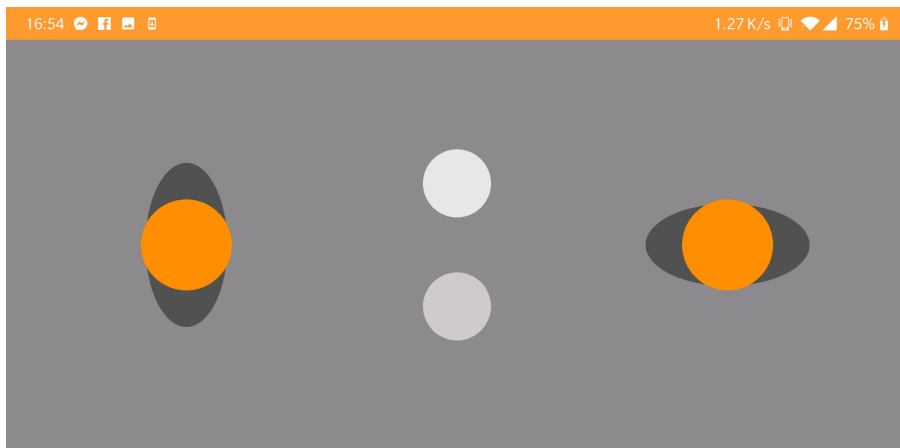
Figur 8.5: Autogränssnittet

Joystickgränssnittet består av två styrspakar som kontrolleras med förslagsvis höger- respektive vänstertumme. Med den vänstra styrspaken kontrollerar användaren robotens kroppsrörelseörelse och med den högra styrspaken kontrolleras robotens huvudrörelser. Utöver detta finns också två knappar i mitten av gränssnittet som kontrollerar rotationen av robotens huvud.

Normalgränssnittet består också av två styrspakar. Till skillnad från joystickgränssnittet är styrspakarna i detta gränssnitt låsta i höjd- respektive sidled där den vänstra styrspaken kontrollerar robotens hastighet och den högra kontrollerar robotens riktning. Precis som i joystickgränssnittet finns också två knappar i mitten av gränssnittet som kontrollerar rotationen av robotens huvud, dock styrs huvudets övriga rörelser automatiskt i detta gränssnitt.



Figur 8.6: Joystickgränssnittet



Figur 8.7: Normalgränssnittet

Autogränssnittet består av fem knappar och fungerar främst som ett utvecklarverktyg samt valideringsverktyg men kan också användas för att på ett automatiskt sätt härma BB-8:s rörelser från filmerna. Vid tryck på någon av knapparna kommer roboten försöka efterlikna ett förinställt rörelsemönster som bestäms i Androidkoden av utvecklarna.

Applikationen kommunicerar med BB-8 genom att först skapa en Bluetoothkoppling mellan roboten och Androidenheten. Detta görs när man trycker på setupknappen i menygränssnittet och efter lyckad koppling kan kommandon skickas via Bluetooth. Applikationen kan ge roboten tre olika typer av kommandon; förflyttning, rörelse av huvud och rotation av huvud.

Förflyttningskommandon representeras som önskad kraft till DC-motorerna där 100 betyder full fart, 0 betyder stanna och -100 betyder full fart bakåt. För att kunna svänga måste DC-motorerna rotera i olika hastigheter och ibland även olika riktning. På grund av detta är kommandot tvådelat där ena delen är kommandot till vänster motor och den andra delen är kommandot till höger motor.



Huvudets rörelsekommandon representeras av två önskade vinklar hos två olika servomotorer i sfären. Dessa servon är placerade ortogonalt mot varandra och bestämmer magnetarmens position vilken i sin tur bestämmer huvudets position.

Huvudets rotationskommando kan vara ett av tre olika värden: rotation vänster, rotation höger eller ingen rotation.

### 8.3.2 Arduinoprogram för sfären

Arduinoprogrammet som styr Arduinokortet på drivenheten har många uppgifter och kortet kan ses som robotens hjärna. Det är genom detta kort och dess periferienheter som användaren kan kontrollera robotens förflyttning och huvudets position samt rotation.

Arduinokortets huvuduppgift är att kontrollera motorernas hastighet baserat på olika faktorer. Beroende på vilket läge användaren valt i Androidapplikationen skickas olika kommandon till Arduinokortet i sfären men användarens kommandon är alltid största faktorn till sfärens rörelser. När användaren använder sig av joystickgränssnittet tas det hänsyn till att användaren inte har möjlighet att svänga och ge full gas samtidigt, ett samband mellan joystickens position och robotens agerande arbetades därför fram. Det visade sig kräva betydligt mer gas vid riktningssändring än de värden joystickens position gav för att få en naturlig känsla i styrningen med en enda joystick.

Om användaren däremot använde normalgränssnittet i applikationen för att manövrera roboten krävdes ingen påverkan av joystickarnas värden för att få styrningen att kännas naturlig och smidig. I normalgränssnittet reglerar Arduinokortet även huvudets position på sfären beroende på hastighet och färdriktning.

Utöver användarens kommandon tas även hänsyn till drivenhetens vinkel inuti sfären i förhållande till horisontalplanet och används för att minimera oscillation vid förändring av hastighet. När vinkeln blir för stor ändrar Arduinokortet drivenhetens hastighet för att hålla accelerationen av klotet relativt liten. En för stor acceleration skulle innebära att roboten var högt upp i sfären och en gungande rörelse uppstår då lätt om roboten ska börja accelerera åt något annat håll eller drivmotorerna når sin toppfart.

### 8.3.3 Arduinoprogram för huvudet

Arduinokortet som sitter i robotens huvud har till uppgift att kontrollera den servomotor som styr huvudets rotation. Till skillnad från en vanlig servomotor är huvudets servomotor inte proportionell utan kontinuerlig, vilket innebär att den kan rotera kontinuerligt utan begränsning på antal roterade grader. Servomotorn kon-

trolleras genom en inkommande pulserande signal där skiftande pulsintervall resulterar i olika rotationshastigheter och riktningar.

Förutom att kontrollera servomotorers rörelser kommunicerar Arduinokortet i robotens huvud även med Arduinokortet i robotens kropp vilket beskrivs senare i detta kapitel.

### 8.3.4 Kommunikation mellan sfär och huvud

Arduinokortet i sfären skickar kommandon via radiolänk till Arduinokortet i sfärens huvud som då roterar huvudet. Arduinokortet i huvudet skickar hela tiden signaler till servomotorn som roterar eller håller huvudet stilla och när dess radiomodul får en inkommande signal kastas ett avbrott som ändrar utgående signal till servomotorn för att ändra dess hastighet eller riktning.

För varje kommando som skickas till Arduinokortet i huvudet skickas en bekräftelse tillbaka till Arduinokortet i sfären att den efterfrågade ändringen av huvudets rotation har genomförts. Om Arduinokortet i sfären inte får denna bekräftelse inom en tiondels sekund skickas samma kommando iväg igen. Dessa upprepade försök utförs upp till fyra gånger, har då inte någon bekräftelse framkommit görs inga fler försök att skicka meddelandet eftersom kommunikationen för tillfället inte fungerar.

## 8.4 Testning och verifikation

Första körtestet med inre drivenheten i sfären genomfördes utan huvudet. Testet genomfördes i en korridor då golvet var slätt och gav möjlighet till att köra en lång sträcka. Vid testet noterades att roboten inte började röra på sig förrän kommandon om högre hastighet skickades från Androidapplikationen. Vid tillfället bestod Androidapplikationen endast av ett textfält där användaren var tvungen att skriva varje kommando innan detta kunde skickas vilket gjorde att varje kommando tog lång tid att arbeta fram. Det uppstod under testet mindre oscillering än förväntat vid acceleration men vid full inbromsning uppstod stor oscillering. Det verifierades under testet att roboten kunde framföras i 1,5 meter per sekund men testet avslutades abrupt då roboten krockade med en vägg och sfären sprack. Under testet visades att kravet från kravspecifikationen, appendix A.1, på hastighet uppfylldes.

Ett test av huvudstyrningen med hjälp av magnetarmen genomfördes med blandade resultat. När huvudet placerades direkt på drivenhetens magnetarm, utan sfären emellan, funkade konstruktionen som väntat och huvudet gick att styra. När drivenheten placerades inuti sfären och huvudet ovanpå blev testresultatet dock sämre då servomotorerna inte klarade av att hålla sin position. Anslutningen mellan servomotorerna och dess kugghjul eller kugghjulen i servomotorernas växellådor började kugga över vilket innebär att servomotorerna trodde att de höll huvudet rakt upp efter avslutat test trots att huvudet stod snett. Detta innebär att kraven angående

huvudet från kravspecifikationen inte uppfylldes när drivenheten var placerad inuti sfären, men dessa uppfylldes när systemet provkördes utanför sfären. Detta visade även att kraven på att hela konstruktionen ska kunna framföras inte skulle komma att uppfyllas.

En andra provkörning genomfördes när projektet närmade sig sitt slut, åter igen utan huvud på grund av ovan nämnt problem. Denna gång valdes en större lokal och roboten kördes runt och utvärderades. Roboten uppfyllde vid testet kraven på svängradie, bromssträcka och färdriktningsavvikelse som satts i kravspecifikationen men att oscillerandet vid full inbromsning var fortfarande stor.

# 9

## Diskussion

I kapitlet så följs samma upplägg som tidigare kapitel. Här behandlas vad som gick bra med projektet, vilka problem som stöttes på och vilka förbättringsmöjligheter som finns för fortsatt vidareutveckling. Kapitlet avslutas med ett kapitel som reflekterar över om ytterligare kunskap behövs vid fortsatt arbete.

### 9.1 Reglering

Under arbetet så har många reglertekniska utmaningar och problem uppstått. Det första systemet som syns i figur 4.3 antogs vara instabilt vid granskning av dess resulterande graf, figur 4.4, eftersom denna oscillerar kring ett avtagande värde. Det har senare med hjälp utav Linear Analysis verktyget upptäckts att systemet istället var marginellt stabilt [4]. Anledningen till att värdet i grafen oscillerar kring sjunker trots att systemet borde vara marginellt stabilt tros vara på grund av avrundningsfel i Matlab. Den nuvarande lösningen består av ett marginellt stabilt system, se figur 4.5 och 4.6 i kapitel 4.1.4.

Anledningen till framtagandet av överföringsfunktionen var i första hand att utföra polynomdivision för att sedan identifiera hur dämpningskonstanter skulle kunna användas för att flytta de poler som gör systemet marginellt stabilt. Men på grund av numeriska fel som sker i Matlab vid strykning av termer kunde detta inte genomföras med ett tillfredsställande resultat.

Vid analys av Bodédiagram misstänks det att inget kunde göras i denna modell för att gå från marginellt stabil till stabil med hjälp utav en enkel PID-regulator. Om förstärkningen ökas kommer mer problem att uppstå eftersom grafens oscillationer då kommer att öka. För att arbeta vidare med den framtagna systemmodellen rekommenderar gruppen att titta vidare på andra regulator typer såsom LQR-regulatorer.

Reglersystemet som arbetats fram genom simuleringar testades aldrig i den fysiska prototypen då det upptäcktes att motorerna för roboten inte klarade av att rotera vid låga hastigheter vilket gör det omöjligt att reglera med små rörelser.

## 9.2 Konstruktion

Resultaten från konstruktionsändringarna kan anses som delvis lyckade. Förflyttningen av rotationen till huvudet är lyckat i den aspekt att huvudet kan rotera. Konstruktionsändringen leder dock till att huvudet blir tyngre än vad de var innan vilket leder till att huvudet inte hålls kvar på sfärens ovansida lika lätt som tidigare. Viktökningen påverkar också sfärens stabilitet då masscentrum på hela roboten hamnar högre upp. Hur mycket detta påverkar roboten vid drift har dock ej kunnat undersökas då roboten inte fungerat vilket nämns i kapitel 8.4.

Anledningen till att konstruktionsförändringarna endast anses som delvis lyckade beror främst på omkonstruktionen av den inre styrarmen. I kravspecifikationen, appendix A.1 finns kravet att huvudet skall klara av att lutas 15 grader vid stillastående samt vid framdrift. Konstruktionen klarar av att luta huvudet cirka 27 grader i alla riktningar men tester vid körning har ej kunnat genomföras på grund av problem med servomotorerna. Vid stillastående tester uppmärksammades att kopplingen mellan servomotorn och det mindre kugghjulet slirade vilket ledde till att huvudet inte alltid förflyttades. Om detta är orsakat av tidigare slitage eller om påfrestningarna blivit för stora är oklart. Då motorerna klarar av att vrida magnetarm och huvud utan några problem när det inte slirar tyder mycket på att tidigare slitage orsakat detta problem.

Fortsatt arbete skulle kunna innebära att exakt räkna ut momentet som huvudet och magnetarmen skapar och på så sätt införskaffa nya servomotorer som klarar påfrestningarna med större säkerhetsmarginaler. Även skaffa starkare magneter som håller kvar huvudet så att det lättare håller sig kvar på sfären vid drift.

Det nya fästet på ramen där servomotorn som vrider vaggan är monterad är ej centrerad vilket leder till att tyngdpunkten förflyttas till åt vänster sett till färdriktningen. Detta kan leda till att sfären blir sned och kan tendera att svänga åt vänster vid drift. För att åtgärda detta bör en motvikt monteras som balanserar ut vikten av servomotorn och fästet.

## 9.3 Mjukvara

Det var redan från början planerat att uppgradera och vidareutveckla den programvara som redan fanns vid projektets början. Anledningen till detta var att många komponenter behövde bytas ut samt att roboten enligt krav skulle kunna utföra fler rörelser än tidigare, exempelvis rotera och röra huvudet under körning. Under projektets gång lades dock också tid på optimering samt struktur för att underlätta nästkommande projekts vidareutveckling. Detta för att vi själva kände att vi var tvungna att lägga ned alldeles för mycket tid bara på att tolka sedan tidigare befintlig programvara.

Vidareutvecklingen av mjukvaran anses överlag lyckad men utrymme för fortsatt

utveckling finns. Främst bör en fungerande PID-regulator implementeras vilket var något vi inte lyckades med då de motorer vi använde ej kunde utföra små justeringar. Utöver det kan Androidapplikationen också förbättras, till exempel skulle hanteringen av Bluetoothkopplingen kunna förbättras. I nuläget måste man manuellt avsluta den aktiva Bluetoothkopplingen innan man kan skapa en ny koppling via applikationen. En förbättring skulle då vara att när användaren väljer en ny enhet avslutas den aktiva Bluetoothkopplingen och en ny skapas automatiskt. För att göra roboten ännu mer BB-8-lik skulle man kunna installera högtalare och lampor i huvudet som skulle kunna styras från Androidapplikationen.

### 9.4 Elektronik

När roboten togs emot så var ena motorn skadad och klarade inte av att hålla den efterfrågade hastigheten. Vissa av motorns kablar hade smält sin isolering och kortslutits under sista testkörningen i förra årets projekt eftersom kablarna var underdimensionerade. Med den motorn som fortfarande fungerade testades motorkortet och bedömdes fungera, därför beställdes endast två nya motorer. Under vår sista testkörning upptäcktes att roboten drog åt ena hållet och vid närmare undersökning visade det sig att även en av de nya motorerna gick betydligt långsammare än tidigare. Precis som efter tidigare projekt bekräftas att motorkortet fortfarande resulterar i samma rotationshastighet med den fungerande motorn i både kanal ett och två. Att två motorer nu har gått sönder från samma kanal på motorkortet gör att en stark misstanke riktats mot motorkortet och om detta tagit skada under kortslutningen. Under våra tester har vi dock inte kunnat uppmäta spänningar eller strömmar som är större än vad motorerna skulle klara av. Vi tror att det är en god idé att byta kortet om projektet ska fortsätta för att förhindra fler förstörda motorer.

Eftersom konstruktionen också förändrats så behövdes fler viktplattor att läggas till för att sänka tyngdpunkten på roboten. Den ökade vikten ledde till ökade krav på motorerna och dessa blev därmed underdimensionerade och klarade inte längre av att driva konstruktionen i låga hastigheter.

### 9.5 Reflektion

För att vidareutveckla roboten så krävs det goda kunskaper inom reglerteknik och Simulink, Kunskaper inom C-programmering för Arduinokorten, kunskaper inom CAD-modellering samt kunskaper inom elektronik för att koppla samman konstruktionens elektriska komponenter.

# 10

## Slutsats

Projektets syfte som beskrivs i kapitel 1.2 var att konstruera en robot som liknade BB-8 från Star Wars. Utifrån detta syfte skapades en kravspecifikation över vad den färdiga prototypen skulle uppnå, se appendix A.1. Den fysiska prototypen har tyvärr många brister vilket leder till att flera funktioner inte kan valideras genom funktionstester. För att kunna utföra dessa funktionstester måste flertalet komponenter bytas ut. Bristande kunskap i gruppen kring reglering och reglersystem leder också till att en stabil Simulinkmodell inte kan tas fram. Modellen blir i dagsläget endast marginellt stabil och en mer avancerad regulator krävs för att klara av att stabilisera systemet.

En Androidapplikation samt två Arduinoprogram utvecklades för att kunna fjärrstyra roboten med hjälp av Bluetooth. Androidapplikationen är en vidareutveckling från tidigare års projekt medan sfärens samt huvudets Arduinoprogram är nytt för detta år. Sfärens Arduinoprogram utvecklades från grunden då i princip alla tidigare elektriska komponenter bytts ut samt ett flertal nya tillkommit. Huvudets Arduinoprogram utvecklades för att kunna rotera robotens huvud på ett sätt som är mer likt det från filmerna än tidigare version.

# Litteraturförteckning

- [1] Dan Brooks, “DROID DREAMS: HOW NEAL SCANLAN AND THE STAR WARS: THE FORCE AWAKENS TEAM BROUGHT BB-8 TO LIFE,” *Star Wars*, 25 aug 2015, [Online]. Tillgänglig: <https://www.starwars.com/news/droid-dreams-how-neal-scanlan-and-the-star-wars-the-force-awakens-team-brought-bb-8-to-life>, hämtad: 2019-02-03.
- [2] V. Adler, D. Johansson, A. Olsson, S. Simmons & N. Svensson, “Vidareutveckling och konstruktion av sfärisk robot,” kandidatuppsats, Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg, Sverige, 2018.
- [3] Mathworks, “PID Controller: Continuous-time or discrete-time PID controller,” [Online]. Tillgänglig: <https://se.mathworks.com/help/simulink/slref/pidcontroller.html>, hämtad: 2019-05-16.
- [4] Mathworks, “Linearize Simulink Model at Model Operating Point: Linearize Simulink Model Using Linear Analysis Tool,” [Online]. Tillgänglig: <https://se.mathworks.com/help/slcontrol/ug/linearize-simulink-model.html?searchHighlight=Control>, hämtad: 2019-05-16.
- [5] O. Almér *et al.*, “BB-8 - konstruktion och reglering av sfärisk robot,” kandidatuppsats, Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg, Sverige, 2017.



# A

## Appendix

### A.1 Kravspecifikation

| Kravspecifikation                                                                                        |                 |                                      |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|--------------------------------------|
| Beskrivning                                                                                              | Krav/<br>Önskan | Verifiering                          |
| Budget under 5000 kr                                                                                     | K               | Bokföring                            |
| Sfär och huvud ska kunna balansera relativt stillastående på plan mark                                   | K               | Tester och simuleringar              |
| Huvudet ska kunna luta 15 grader vid stillastående samt i färdriktning vid körning                       | K               | Tester och simuleringar              |
| Hela konstruktionen måste kunna framföras                                                                | K               | Tester                               |
| Roboten ska kommunicera via Bluetooth                                                                    | K               | Tester                               |
| Lägga in auto-läge i kontrollern                                                                         | K               | Tester                               |
| Kunna ändra färdriktning utan att behöva stanna, och köra i en cirkel med 5m diameter.                   | K               | Körtester och mätning                |
| Sfären ska ha en stoppsträcka på 1m                                                                      | K               | Testa genom mätning av stoppsträcka. |
| Huvudet ska kunna styras oberoende av färdriktning och hastighet                                         | K               | Tester och simulering                |
| Huvudet ska kunna rotera 360 grader runt sin egen axel i 45 rpm.                                         | K               | Tidtagning och mätning               |
| Roboten ska kunna färdas 5m i valfri riktning med en maximal avvikelse på 0.5m från förväntad slutpunkt. | K               | Testning och mätning                 |
| Ska framföras i 1.5m/s på plant underlag                                                                 | Ö               | Test med mätning                     |
| Ska kunna accelerera och retardera med minimal oscillering                                               | Ö               | Tester och simulering                |
| Design                                                                                                   |                 |                                      |
| Ska likna en BB-8 till utseende enligt filmerna                                                          | K               | Jämföra med filmerna                 |
| Sfärens yta ska vara jämn utan kanter och skarvar över 2 mm                                              | Ö               | Mätning                              |
| Huvudet ska kunna ge ifrån sig ett bb-8 ljud vid körning och kommando.                                   | Ö               | Tester                               |

## A.2 Komponenters mått och vikt

Mått och vikt från projektstarten, vilka används vid beräkningar.

| Sfär           |       |              |          |                                        |
|----------------|-------|--------------|----------|----------------------------------------|
| Del            | Antal | Mått         | Vikt (g) | Övrig info                             |
| Sfär           |       | 50 ut, 49 in | 1626     | Måttet är diameter, insida/utsida sfär |
| Sfär med lucka |       |              | 1545     |                                        |
|                |       |              | 3171     |                                        |

| Huvud                  |       |            |          |                                     |
|------------------------|-------|------------|----------|-------------------------------------|
| Del                    | Antal | Mått       | Vikt (g) | Övrig info                          |
| Övre halvan av huvudet |       | D = 28,5cm | 383      |                                     |
| Nedre halva av huvud   |       |            | 362      |                                     |
| Topplöck huvud         |       |            | 78       |                                     |
| Öga + Skruvar          |       |            | 57       |                                     |
| Kulrulle utan arm      | 3     |            | 40       |                                     |
| Magnetfäste            |       |            | 118      |                                     |
| Magnet                 | 3     |            | 60       |                                     |
| Arduino Uno            | 1     |            | 32       |                                     |
|                        |       |            |          |                                     |
| Batteri                |       |            | 380      | Om samma batteri som för resterande |
| Motorfäste + motor     |       |            | 145      |                                     |
|                        |       | Total vikt | 1855     |                                     |

| Innanmäte            |       |            |          |                                                                      |
|----------------------|-------|------------|----------|----------------------------------------------------------------------|
| Del                  | Antal | Mått       | Vikt (g) | Övrig info                                                           |
| Viktplatta           | 6     | D = 21cm   | 770      | Finns en extra                                                       |
| Hjul                 | 2     | D = 10cm   | 144      |                                                                      |
| Batteri              |       |            | 380      |                                                                      |
| Styrssystem          |       |            | 180      | Inkluderar, Arduino maxI, Motorkort samt kopplingsdon och div kabel. |
| Drivmotor            | 2     |            | 204      |                                                                      |
| Retserande innanmäte |       | D = 42cm   | 2747     | Inkluderat: 2 st servo, Strukturella delar, Kulrullar, Kugghjul      |
| Magneter             | 3     | D = 35mm   | 60       |                                                                      |
| Magnetfäste          |       |            |          | ytterkant magnet till CC fäste = 7,7                                 |
|                      |       | Total Vikt | 8803     |                                                                      |

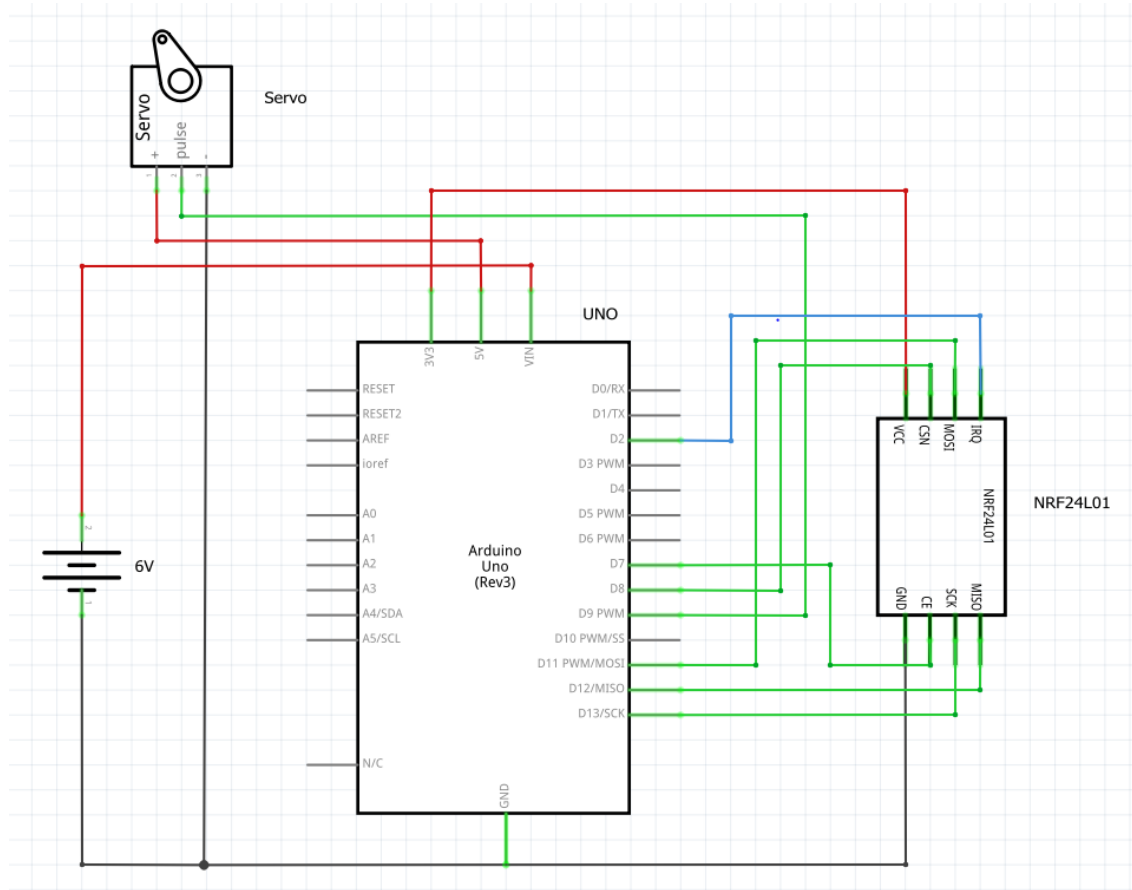
Total Vikt 13,829  
Utan Huvud 11,974

| Elektronik     |       |                                         |  |                                |
|----------------|-------|-----------------------------------------|--|--------------------------------|
| Del            | Antal | Modell                                  |  | Övrig info                     |
| Batteri        | 1     | CS-LP5003C35RT                          |  | 11.1 VDC 5000mAh / 55.50Wh 35C |
| ArduinoMega    | 1     |                                         |  |                                |
| ArduinoUno     | 1     |                                         |  |                                |
| Bluetoothmodul | 2     | zs-040                                  |  | hc (något)                     |
| Gyroskop/IMU   | 1     |                                         |  |                                |
| Motorkortet    | 1     | Pololu Dual VNH5019 Motor Driver Shield |  |                                |

## A.3 Simuleringsfiler

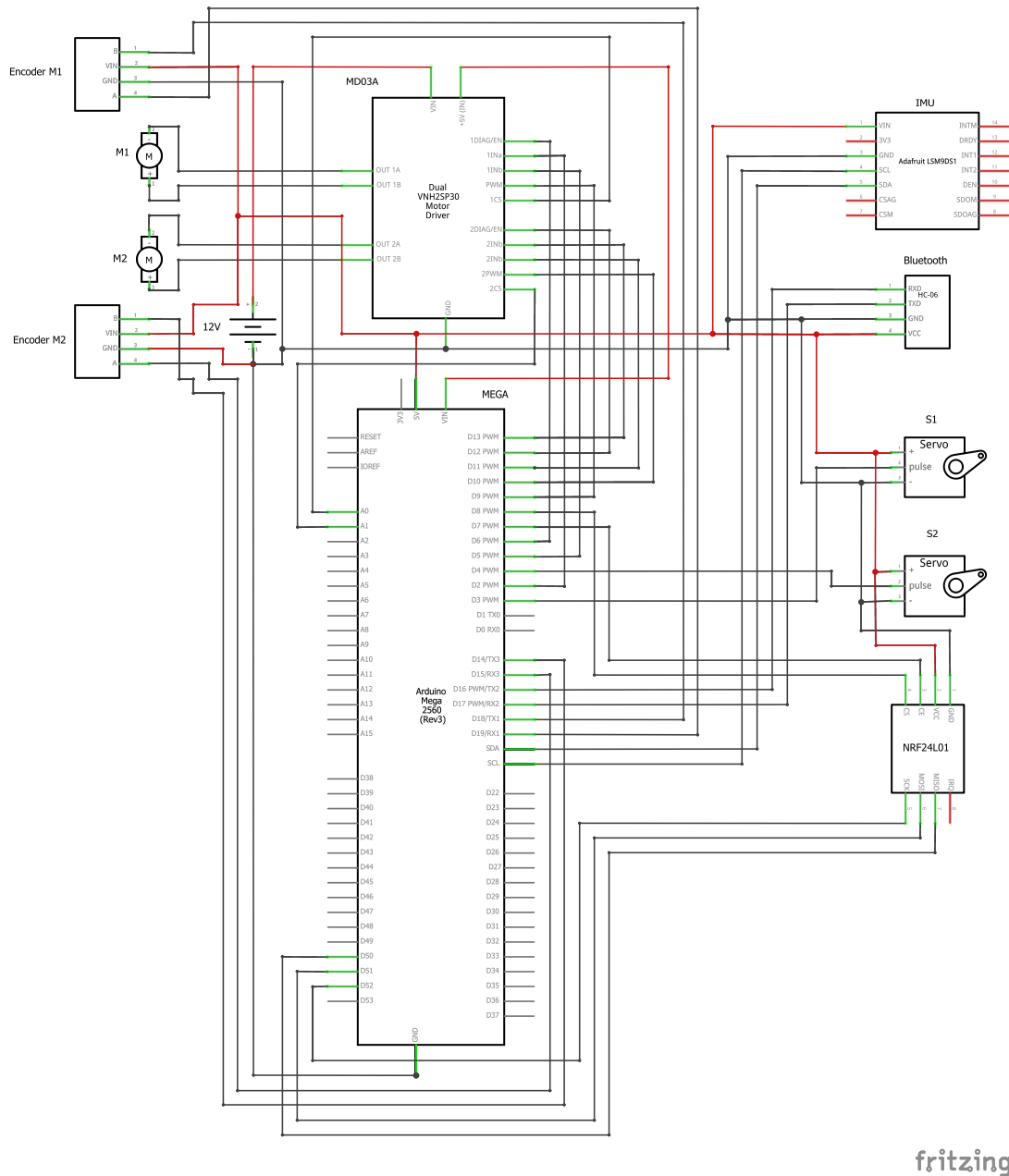
De slutgiltiga simuleringsfilerna finns att hämta på Github:  
<https://github.com/Alpaccacino/workJL>

## A.4 Kopplingsschema för huvud



Figur A.1: Kopplingsschema för huvudets komponenter, gjord m.h.a. fritzing.

## A.5 Kopplingsschema för sfär



Figur A.2: Kopplingsschema för sfärens komponenter, gjord m.h.a. fritzing.

## A.6 Mjukvara

Robotens två olika Arduinoprogram samt Androidapplikationen för att kontrollera roboten kan hittas på github: [https://github.com/Siffran/BB8\\_Kandidat.git](https://github.com/Siffran/BB8_Kandidat.git).