CHALMERS
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



BB-8 - konstruktion och reglering av sfärisk robot

Kandidatarbete inom signaler och system

Almér, Oscar
Andersson, Henrik
Boquist, Gustav
Forsström, Erik
Hansegård, Petter
Johansson, Linus

Institutionen för Signaler och System
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige, 2017

SSYX02-17-86

Kandidatarbete 2017: SSYX02-17-86

BB-8 - konstruktion och reglering av sfärisk robot

Oscar Almér, Henrik Andersson, Gustav Boquist
Erik Forsström, Petter Hansegård, Linus Johansson



CHALMERS
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Institutionen för Signaler och System
Avdelningen för System- och Reglerteknik SSYX02-17-86
Chalmers Tekniska Högskola
Göteborg, Sverige 2017

BB-8 - konstruktion och reglering av sfärisk robot

Almér, Andersson, Boquist, Forsström, Hansegård, Johansson

© Almér, Andersson, Boquist, Forsström, Hansegård, Johansson, 2017.

Handledare: Nikolce Murgovski, Institutionen för Signaler och System
Examinator: Paolo Falcone, Institutionen för Signaler och System

Kandidatarbete 2017: SSYX02-17-86
Institutionen för Signaler och System
Avdelningen för System- och Reglerteknik
SSYX02-17-86
Chalmers Tekniska Högskola
SE-412 96 Göteborg
Telephone +46 31 772 1000

Omslag: Replika av roboten BB-8 från Star Wars franchisekoncept. Foto av Stefan Schweihofer.

Typeset in LaTeX
Göteborg, Sverige 2017

BB-8 - konstruktion och reglering av sfärisk robot

Oscar Almér, Henrik Andersson, Gustav Boquist
Erik Forsström, Petter Hansegård, Linus Johansson
Institutionen för Signaler och System
Chalmers Tekniska Högskola

Abstract

The spherical droid BB-8 is a robot that originated in the movie *Star Wars: The force awakens*. An advantage with a spherical robot, compared to robots on wheels, is that it has its driving unit inside of the sphere, which protects it from dust and dirt but also from shocks. This makes such a mobile robot very practical for exploration of hostile environments such as other planets. This study focuses on buildning a robot which resembles the BB-8 and designing a driving unit. The project also includes studies regarding how to control the sphere to avoid wobbling and clumsy movement.

Sammandrag

Den sfäriska roboten BB-8 har sitt ursprung i filmen *Star Wars: The force awakens*. En fördel med sfäriska robotar, jämnfört med robotar på hjul, är att den drivande enheten sitter inuti sfären och är således skyddad från dels smuts och damm men även stötar. Detta gör att en sfärisk robot är praktisk för att utforska fientliga och främmande miljöer som andra planeter. Det här projektet fokuserar på att konstruera en robot som efterliknar BB-8 och designa en inre drivande enhet. Projektet lägger även stor kraft på att reglera och kontrollera sfären för att minimera oscillerande rörelser.

Tillkännagivanden

Först och främst skulle vi vilja tacka vår handledare, Nikolce Murgovski, Institutionen för Signaler och System, Chalmers, för all hjälp och vägledning han regelbundet givit oss under projektets gång. Vi skulle även vilja tacka Forskningsingenjör Reine Nohlborg, Tillämpad mekanik/Teknisk support, Chalmers, och Forskningsingenjör Jan Bragee, Tillämpad mekanik/Teknisk support, Chalmers, för deras expertis och hjälp med utformning av innanmätet samt för hjälpen med att skära ut nödvändiga kompontenter i deras maskiner. Utöver det så skulle vi vilja rikta ett tack till Forskningsingenjör Göran Stigler, Produkt- och produktionsutveckling/Produktionssystem, Chalmers, för all hjälp med att skriva ut alla våra delar till sfären i Prototyplabbets 3D-skrivare samt Steele Smith för att vi får använda modellerna av huvudet.

Innehåll

Figurer **xiii**

Tabeller **xv**

Förkortningar **xvii**

1 Introduktion **1**
1.1 Bakgrund . . . 1
1.2 Syfte . . . 2
1.3 Problemformulering . . . 3
1.4 Avgränsningar . . . 3

2 Koncept **5**
2.1 Kravspecifikation och delfunktioner . . . 5
2.2 Identifiering av delfunktioner . . . 5
2.3 Konceptgenerering . . . 6
2.4 Konceptval . . . 7
2.4.1 Beskrivning av valt koncept . . . 7

3 Matematisk modellering **9**
3.1 Förenklad modell för dimensionering av motorer . . . 9
3.2 Dynamisk modell för framåtdrivning . . . 11
3.3 Riktningsförändring . . . 13
3.4 Magnetisk upphängning för huvud . . . 14
3.5 Tolkning av sensordata . . . 15
3.5.1 IMU . . . 15
3.5.2 Hall-sensor . . . 17

4 Val av motor och växellåda **19**
4.1 Beräkning av maximal utväxling . . . 19
4.2 Moment-varvtalskurvor . . . 19
4.3 Vald motor . . . 21
4.4 Valda hjul . . . 22

5 Konstruktion, tillverkning och elektronik **23**
5.1 Konstruktion och tillverkning av sfär . . . 23
5.2 Konstruktion och tillverkning av huvud . . . 26

5.3 Konstruktion och tillverkning av IDE . . . 27
5.3.1 Aluminumram . . . 28
5.3.2 Bottenplatta i stål . . . 29
5.3.3 Kulrullar . . . 29
5.3.4 Tiltram . . . 30
5.4 Elektronik . . . 31
5.4.1 Motorer . . . 31
5.4.2 Utvecklingskort - Arduino Mega . . . 31
5.4.3 IMU . . . 31
5.4.4 Batteri . . . 32
5.4.5 Bluetooth . . . 32
5.4.6 Motor shield . . . 32
5.4.7 Kopplingsschema . . . 33

6 Reglering och mjukvara 35
6.1 Reglering . . . 35
6.1.1 Egenskaper . . . 35
6.1.2 Linjärisering av rörelseekvationer . . . 36
6.1.3 Motormodell . . . 36
6.1.4 Överföringsfunktion från motorspänning till robothastighet . . . 37
6.1.5 Tillståndsbeskrivning . . . 38
6.1.6 Svängning . . . 39
6.1.7 Reglersystemet . . . 39
6.1.8 Simulering . . . 40
6.2 Mjukvara . . . 42
6.2.1 App för styrning av robot . . . 42
6.2.2 Arduinokod . . . 43

7 Resultat 45
7.1 Simulering . . . 45
7.2 Konstruktion och montering . . . 47
7.3 Verifiering av ställda krav . . . 49

8 Diskussion 51
8.1 Konstruktion . . . 51
8.1.1 Sfär . . . 51
8.1.2 IDE . . . 52
8.2 Sensordata . . . 53
8.3 Reglering . . . 53
8.4 Applikationens gränssnitt . . . 54

9 Slutsats 55

Litteratur 57

A Appendix I
A.1 Pughmatris . . . I

A.2 Kravspecifikation II
A.3 Morfologisk matris III
A.4 GANTT-schema V
A.5 Kopplingschema VI

Figurer

2.1 Funktionsträd över delfunktioner. 6
2.2 Konceptskiss av BB-8. 7

3.1 Roboten sedd från sidan. Det sfäriska skalet och den inre robotens drivaxel och hjul samt relevanta mått är markerade. 9
3.2 Friläggning av sfär inklusive inre robot. F_N är normalkraft, F_g tyngdkraft och F framdrivande friktionskraft. 10
3.3 Vinkelkoordinater vid modellering för framåtdrivning. Masscentrum för sfär och drivande enhet och tillhörande mått markerade. 11
3.4 Robot i genomskärning vid rotation med vinkelhastigheten Ω runt en fast axel z. Sfären roterar med vinkelhastigheten ω runt sin rotationsaxel som bildar vinkeln γ med horisontalplanet. 13
3.5 Huvudupphängning i genomskärning. 14
3.6 Robotens tre olika referenssystem. XYZ är ett yttre referenssystem. xyz är robotens referenssystem orienterat så att x-axeln ligger i robotens rörelseriktning. $\xi\eta\zeta$ är drivenhetens referenssystem (där sensorn är monterad) vridet vinkeln α jämfört med xyz. 16

4.1 Moment-varvtalkurvor för utväxlingar mellan 19:1 och 70:1 20
4.2 Kurvor över vald motors egenskaper och prestanda 21

5.1 CAD-modell över komponenter och sammansättning. 24
5.2 Färdiga komponenter och sammansättning. 26
5.3 Huvudets delar. 27
5.4 Rendering av sammansatt modell av fullständig IDE. 28
5.5 Aluminumram. 28
5.6 Rendering av bottenplatta med monterade hjul, batteri och tyngder. . 29
5.7 Kulrulle för kontakt mellan sfär och IDE. 29
5.8 Rendering av tiltram i olika vinklar. 30
5.9 Kopplingsschema för robotens elektronik. 33

6.1 Blockschema över ett av de två delsystemen, där G(s) representerar systemet och hastigheten regleras med negativ återkoppling. 39
6.2 Schematisk skiss över robotens regulatorfunktion. Spänningen till respektive motor regleras med en PID-regulator som återkopplas med uppmätt hastighet från sensorerna. 40

6.3 Den del av SIMULINK-modellen som med hjälp av styrsignalen samt de nuvarande tillstånden beräknar de nya tillstånden utifrån differentialekvationerna som beskriver hur systemet uppför sig. 41
6.4 En bild av den fullständiga SIMULINK-modellen med två referenssignaler längst till vänster som översätts till referenshastigheter för respektive hjul. Faktiskt hjulhastighet återkopplas för att bilda felet som är input till PID-regulatorerna. Styrsignalerna begränsas till ± 12,6 V då batteriet i prototypen har denna begränsning. Styrsignalen matas in i tillståndsmodellen tillsammans med tillståndsvektorn $\boldsymbol{x}$ som beräknar de nya värdena för $\dot{\boldsymbol{x}}$. $\dot{\boldsymbol{x}}$ integreras och återkopplas varpå $x_1 = \omega_s$ multipliceras med sfärens radie och återkopplas. 42
6.5 Gränsnittet av androidapp som utvecklats för att styra roboten. . . . 43
6.6 Flödesdiagram som visar programstrukturen för appen till vänster och arduinon till höger. De är sammanhängande genom att referensvärden skickas via bluetooth, representerat som den streckade pilen i bilden. 44

7.1 Referenssignaler för att få roboten att röra sig som en åtta i xy-planet. 45
7.2 Referenshastighet i form av ett enhetssteg och referens-rotationshastighet i form av en fyrkantsvåg gör att roboten svänger i en cirkel, först moturs och därefter medurs. 46
7.3 Tidsutveckling av tillståndsmodellen då referenssignalen är ett enhetssteg med start vid $t = 1$ s. 46
7.4 Simulerat stegsvar samt uppmätt hastighet vid ett enhetssteg vid $t = 1$. 47
7.5 En komplett BB-8 med huvudet monterat på toppen. 48
7.6 Den inre drivande enheten (IDE) som monteras i sfären. Arduino och Motorshield ligger ovanpå det vita batteriet i nedre mitten delen av figuren. Den övre ringen är fäst i två halvringar till den undre delen. 49

A.1 Kopplingschema illustrerat m.h.a. FRITZING. VI

Tabeller

2.1 Exempel på krav och kravställare. 5
2.2 Utdrag ut morfologisk matris. 6

4.1 Lämpligt arbetsvarvtal för de kvarvarade växellådsalternativen 20

6.1 Uppmätta egenskaper. 36
6.2 Parametervärden för PID-regulatorn och egenskaper för systemets stegsvar. 41

A.1 Pugh-matriser för jämförelse mellan olika koncept. I
A.2 Kravspecifikation II
A.3 Morfologisk matris över de framtagna koncepten. IV
A.4 Gantt-schema över projektets tidsplan. Observera att den grafiska representationen är bortklippt av utrymmesskäl. V

Förkortningar

CAD	Computer Aided Design
IDE	Inre drivande enhet
IMU	Inertial measurement unit
LiPo	Lithium ion polymer
PID	Proportionell, integrerande, deriverande
PLA	Polylaktid

1

Introduktion

Detta kapitel syftar till att presentera en bakgrund kring projektet. Vidare presenteras en allmän beskrivning av sfäriska robotar och forskning kring dessa. Därefter följer en redogörelse för syftet med detta projekt. En mer förklarande problemformulering som ger en tydligare definition av vad som skall göras gås igenom och sist presenteras de faktorerna som avgränsar projektet.

1.1 Bakgrund

Intresset för mobila robotar, robotar som kan röra sig i rummet, ökar och kommer troligtvis spela en stor roll i framtiden. I takt med att teknikutvecklingen går framåt och priset på elektronik sjunker blir både efterfrågan högre och utbudet ökar. Exempelvis har Prisjakt och Handelns utredningsinstitut (2017) visat att köpintresset för robotgräsklippare ökat med 737 % mellan 2011 och 2015. I framtiden är det sannolikt att robotar kommer ha en naturlig plats i hemmet och assistera med olika funktioner, exempelvis att laga mat eller städa, vilket leder till en massa tid frigörs, vilket kan utnyttjas till mer produktiva arbeten. Idag finns det redan robotdammsugare och robotgräsklippare som hjälper till i hemmet. Inom industrin kan robotar hjälpa till att transportera föremål som är tunga, vilket sparar tid och man undviker att skada sig vid tunga lyft.

För vissa tillämpningar av mobila robotar kan stora krav på adaptivitet ställas. I situationer där en människa lätt kan ta sig fram löper en mobil robot risken att fastna eller att falla. Detta särskilt i miljöer som inte är anpassade för mobila robotar, t.ex. i en industriell miljö eller på en annan planet. Halme, Schonberg och Wang (1996) argumenterar att en sfärisk robot löser många problem relaterade till framkomlighet i sådana miljöer. En sfär löper ingen risk att välta och har en minskad benägenhet att fastna jämfört med andra geometrier, exempelvis människoliknande robotar eller robotar på hjul. Enligt Halme m. fl. (1996) presterar en sådan konstruktion även bättre vid kollisioner med exempelvis hinder eller andra robotar.

Under 2000-talet började Ångströmslaboratoriet vid Uppsala Universitet undersöka möjligheterna för att använda sfäriska robotar vid utforskning av Mars och Merkurius, vilket senare resulterade i ett avknoppningsföretag med fokus på sfäriska

robotar i övervakningssyfte (Ryberg, 2015). Detta mottogs med stort intresse och sfäriska övervakningsrobotar vann även priset *Best of Whats New* av den populärvetenskapliga tidningen Popular Science. Tyvärr räckte inte uppmärksamheten för att få tekniken att lyfta.

I filmen *Star Wars: The Force Awakens* presenterades en sfärisk robot vid namn BB-8 som fick stor uppmärksamhet och intresset för sfäriska robotar väcktes åter till liv. Roboten har, utöver den sfäriska kroppen, ett separat huvud som rör sig till synes oberoende av kroppen. Ett flertal patent kring styrningen av en sfärisk robot har registrerats, bland annat av produktionsbolaget Disney (Magnetic spherical balancing robot drive, 2011). Patentet avslöjar dock inte detaljerna om hur roboten i filmen fungerar, vilket har skapat ett stort intresse bland Star Wars-fans och andra teknikintresserade. Ett helt community (BB-8BuildersClub, 2015) har skapats kring sfäriska robotar och hur de fungerar.

Flera prototyper av sfäriska robotar har även byggts i forskningssyfte. Gemensamt för huvuddelen av lösningarna är att de har ett sfäriskt skal med en inre drivande enhet som styr roboten genom att variera tyngdpunkten. Ett intressant motexempel är Bhattacharya och Agrawal (2000), som använder 2 rotorer, vilket ger ett drivande moment till sfären när rotorernas hastighet ändras. Halme m. fl. (1996) använder en lösning med ett drivhjul längst ned i sfären som driver roboten. Roboten svänger genom att rotera hjulet kring vertikalaxeln. Även lösningar med flera hjul används, till exempel Alves och Dias (2003) eller Bicchi, Balluchi, Prattichizzo och Gorelli (u. å) som modellerar sin robot som en enhjuling i en boll.

Nagai (2008) och Lee och Park (2013) utnyttjar ett koncept där drivenheten är fäst i sfärens rotationsaxel och roterar en pendel, vilket flyttar robotens tyngdpunkt. Pendeln kan även vinklas i sidled, vilket får roboten att svänga om den samtidigt rör sig framåt. Ett liknande koncept används av Chen, Ye, Sun och Jia (2016), där drivenheten sitter längst ut på den roterande pendeln och har med ett hjul kontakt mot sfärens insida. Ghariblu (2015) och Sadeghian och Masouleh (2016) modellerar ett koncept med omnihjul, hjul med små rullar istället som däck som gör att de kan rulla även i hjulaxelriktningen. Detta koncept har fördelen att det utan inställningstid kan röra sig i alla riktningar.

1.2 Syfte

I detta arbete skall en sfärisk robot likt den vid namn BB-8 som återfinns i *Star Wars: The Force Awakens* konstrueras. Denna skall i så stor mån som möjligt bete sig som den riktiga BB-8. Detta inkluderar att kunna rulla i alla riktningar med så stor smidighet som möjligt. Huvudet på roboten skall behålla sin position på toppen av kroppen samtidigt som den rullar. Ett stort fokus läggs på att ta fram metoder för regleringen av robotens styrsystem, vilket förväntas ge nyvunna kunskaper inom området.

1.3 Problemformulering

För att uppnå målet med projektet har det delats upp i ett antal delsteg.

- Framtagning av matematiska modeller för reglering.
  - Matematiska modeller för hur sfären rör sig behövs för att ta fram en relation mellan spänningen över motorerna som driver hjulen och sfärens hastighet, detta för att kunna kontrollera sfären.
- Undersöka bästa metod för implementering av styrsystem samt koppling mellan sfär och huvud.
- Konstruera och välja komponenter baserat på matematisk modell.
  - Med hjälp av den matematiska modellen bestäms vilken hjulhastighet som krävs för att driva sfären i hastighet enligt kravspecifikationen, se tabell A.2 i appendix.
- Bygga en prototyp av roboten med tillhörande huvud.
  - En prototyp i skala 1:1 byggs för att i största möjliga mån efterlikna den riktiga BB-8.
- Reglera och kontrollera roboten.
  - De framtagna matematiska modellerna implementeras för att reglera roboten. Vidare testas de framtagna systemet för styrning för en fungerande robot.

1.4 Avgränsningar

Roboten i filmen har en utstickbar arm med olika verktyg, något som skulle vara mycket svårt att implementera. Därför bestämdes det att inte försöka bygga en komplett BB-8. Huvudfokus har legat på att bygga en sfär utan huvud och reglera så att den kan starta, stanna och svänga så balansera och stabilt som möjligt. Lösningar för implementering av huvud har undersökts och delvis genomförts. Möjligheten att ha sensorer eller annan teknik i huvudet undersöks ej då det bedömdes vara utanför tidsramen.

2

Koncept

I detta kapitel presenteras metoder och resultat gällande framtagning och evaluering av koncept. Koncepten som åsyftas är helhetskoncept som inkluderar lösningar rörande robotens alla olika delfunktioner.

2.1 Kravspecifikation och delfunktioner

I ett inledande skede identifierades krav och önskemål från olika källor och intressenter. Kraven och önskemålen delades i underkategorierna *Ekonomi, Material, Storlek, Prestanda, Konstruktion, Utseende* och *Reglering* för att medföra en bättre överblick. Dessa ger underlag för evaluering av framtagna koncept, men även för verifiering och testning av färdig prototyp. Exempel på krav och kravställare kan ses i tabell 2.1.

Tillverkningskostnad max 5000 kr	*Instutitionen för Signaler och System*
Diameter på sfär 40 - 60 cm	*Projektgrupp*
Batteritid vid full effekt 15 minuter	*Projektgrupp*

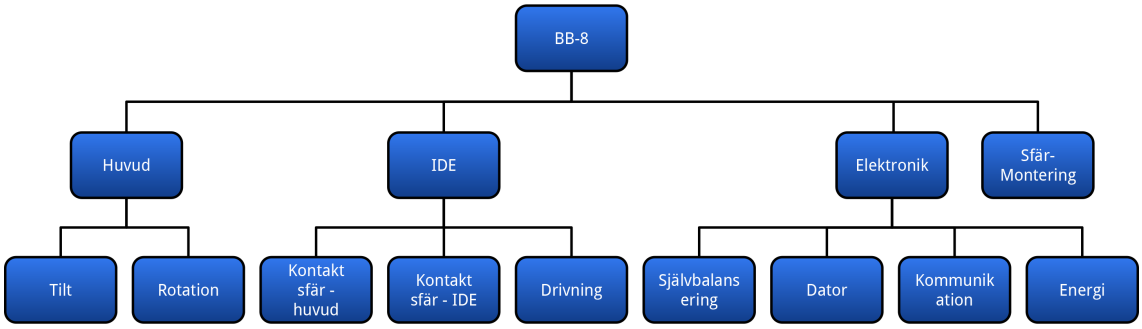
Tabell 2.1: Exempel på krav och kravställare.

Samtliga krav och önskemål sammanställdes i dokumentet *Kravspecifikation* som kan läsas i sin helhet i tabell A.2 i appendix.

2.2 Identifiering av delfunktioner

I syfte att hitta det mest lämpade konceptet för vidareutveckling analyserades de olika beståndsdelarna i roboten. Delsystemen bestämdes till *Huvud, Inre drivande enhet (IDE), Elektronik* och *Sfär*. Olika klipp och bilder på BB-8 analyserades för att dela upp delsystemen i ytterligare delfunktioner. Gällande till exempel huvudrörelsen konstaterades att BB-8s huvud kan röra sig i minst två frihetsgrader. En videoanalys (Lindgren, 2015) styrker detta, och således delades delsystemet *Huvud*

upp i delfunktionerna *Tilt* och *Rotation*. Under diskussion delades de övriga delsystemens funktioner upp i delfunktioner och dessa samt de olika delsystemen illustreras i funktionsträdet i figur 2.1.



Figur 2.1: Funktionsträd över delfunktioner.

Detta funktionsträd görs för att ge underlag till identifiering av alternativa lösningar till delfunktionerna i vidare konceptgenerering.

2.3 Konceptgenerering

För att kunna identifiera alternativa lösningar till delfunktionerna redovisade i figur 2.1 gjordes en undersökning på hur befintliga koncept fungerar. Bland annat hemsidor gjorda av entusiaster och tidigare akademiska projekt gällande sfäriska robotar analyserades vilket gav upphov till ett flertal lösningar. Exempel på dessa är lösningar för framdrivning som innefattar s.k. *Omnihjul* (Sánchez (2017)) och framdrivning m.h.a. en skiftande tyngdpunkt (Nagai (2008)). Ett flertal lösningar definerades av projektgruppen själva under brainstorming och diskussion, några av dem presenteras i tabell 2.2 .

Delfunktion	Lösning	
Tilt	Rörligt	Statiskt
Framdrivning	Fristående motor	Ändra tyngdpunkten
Kontakt Sfär - IDE	Omnihjul	Vanliga hjul

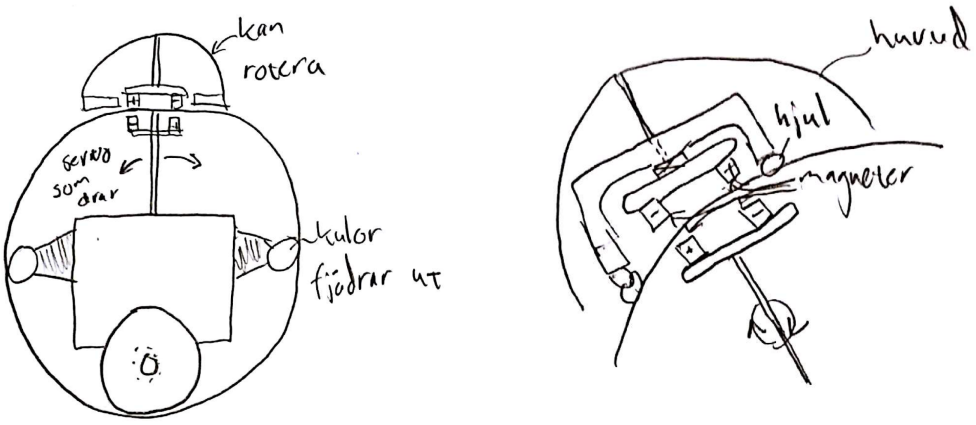
Tabell 2.2: Utdrag ut morfologisk matris.

De olika dellösningarna sammanställdes i en morfologisk matris. Vidare byggdes fullständiga koncept i en kombinatorisk process där en lösning per delfunktion väljs för att resultera i ett koncept. Då olika val görs gällande lösningar på delfunktioner skapades fem koncept för vidare evaluering. Konceptkatalogen och den morfologiska matrisen ses i sin helhet i appendix A.3.

2.4 Konceptval

När ett flertal koncept tagits fram sållades de förslag som inte uppfyller kraven i kravspecifikationen bort i en eliminationsmatris. Ett av de kvarvarande koncepten utsågs som referens och de andra koncepten utvärderades mot referensen i en Pughmatris. Det mest lämpade förslaget enligt Pughmatrisen sattes som ny referens och processen upprepades för att säkerställa att den mest lämpade lösningen valdes för vidareutveckling.

2.4.1 Beskrivning av valt koncept



(a) Inre struktur sett från sidan. Skissen visar hjulen längst ner i kontakt med sfären och kulor som fjädrar ut.

(b) Gränssnitt sfär och huvud. Skissen illustrerar hur huvudet sitter ihop med sfären med hjälp av magneter.

Figur 2.2: Konceptskiss av BB-8.

En skiss över det valda konceptet för vidareutveckling presenteras i figur 2.2. Konceptet använder sig av två stycken hjul för framdrivning och svänger genom att hjulen roterar med olika vinkelhastighet. Rotation på platsen runt sin egen vertikalaxel möjliggörs genom att hjulen roterar åt olika håll. Huvudet kopplar till sfären med hjälp av magneter och kan rotera genom att axeln de inre magneterna sitter fast i roterar med hjälp av en servomotor. Vidare kan huvudet tippas fram och tillbaka med hjälp av ytterligare en servomotor som drar huvudet framåt och bakåt. Ett antal stabiliserande kontaktpunkter mellan den inre drivande enheten och insidan av sfären åstadkoms genom fritt roterande kulor som fjädrar utåt.

Konceptet utgörs av ett flertal ingående komponenter som utvärderades och inhandlades i ett senare skede. Ingående komponenter listas nedan:

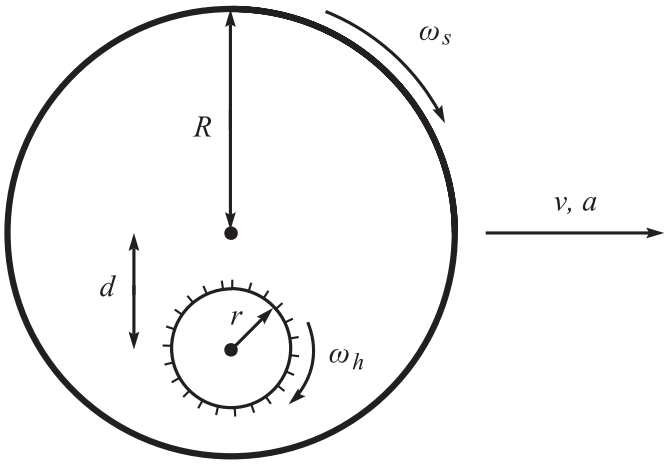
- Likströmsmotorer
- Servomotorer
- Mikrokontroller
- Batteri
- Hjul
- IMU (inertial measurement unit)
- Encoder för att läsa av vinkelhastighet på hjul

3

Matematisk modellering

I detta avsnitt behandlas ett par olika matematiska modeller. Först behandlas en förenklad modell för dimensionering av motorer. Sedan behandlas robotens dynamik för framåtdrivning och svängning. Till sist behandlas de magneter som skall hålla huvudet på plats och hur sensordata tolkas i enighet med tidigare introducerade variabler.

3.1 Förenklad modell för dimensionering av motorer



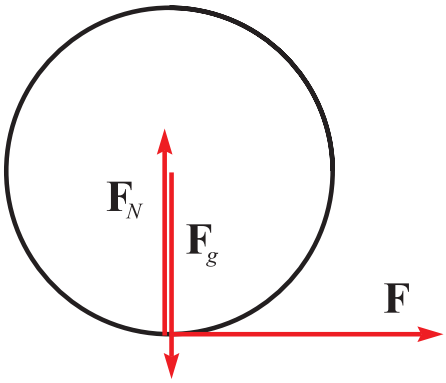
Figur 3.1: Roboten sedd från sidan. Det sfäriska skalet och den inre robotens drivaxel och hjul samt relevanta mått är markerade.

För att uppskatta vilka egenskaper som robotens motorer behövde, användes ett förenklat matematiskt resonemang. Endast rätlinjig rörelse studerades. Roboten i genomskärning från sidan syns i figur 3.1. Sfärens radie benämns R, avståndet mellan sfärens mittpunkt och en tänkt hjulaxel d och hjulens radie r. Utväxlingen N relaterar hjulens rotationhastighet ω_h till sfärens, ω_s.

$$N = \frac{d+r}{r}, \ \omega_h = N\omega_s \tag{3.1}$$

Sfärens hastighet ges av $v = R \cdot \omega_s$. Detta ger en uppskattning på den maximala vinkelhastigheten som krävs av motorn för att uppnå önskad hastighet för roboten.

$$\omega_{h,max} = \omega_{motor,max} = N\frac{v_{max}}{R} \tag{3.2}$$



Figur 3.2: Friläggning av sfär inklusive inre robot. F_N är normalkraft, F_g tyngdkraft och F framdrivande friktionskraft.

Ett vridmoment T_m appliceras av motorn på hjulen. Detta ger ett vridmoment T_s på sfären runt dess centrum relaterat med utväxlingen enligt $T_s = NT_m$. Detta vridmoment kan representeras som en drivande (friktions-) kraft, F, vid sfärens botten enligt $T_s = RF$. Hela roboten friläggs i figur 3.2. Newtons andra lag appliceras på roboten i rörelseriktningen, vilket ger villkoret (3.3) där m är robotens massa och a_{max} önskad maximal acceleration.

$$T_{motor,max} = \frac{R}{N}ma_{max} \tag{3.3}$$

Med uppskattningarna $R = 0{,}25$ m, $N = 4$, $m = 8$ kg och $a_{max} = 1$ m/s^2 tillsammans med kravet $v_{max} = 1$ m/s erhölls minimikrav för motorerna

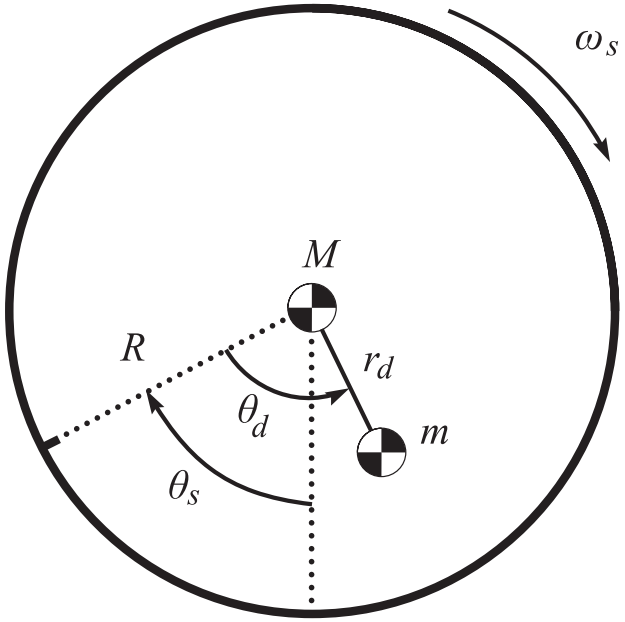
$$\begin{aligned} \omega_{motor,max} &= 150 \text{ rpm} \\ T_{motor,max} &= 0{,}48 \text{ Nm} \end{aligned} \tag{3.4}$$

där vridmomentskravet gäller båda motorerna och en motor alltså behövde minst 0,24 Nm.

3.2 Dynamisk modell för framåtdrivning

För att förenkla modelleringen modellerades dynamiken för framåtdrivning och riktningsförändring för sig. Framåtdrivning avser robotens rätlinjiga rörelse.

Roboten drivs framåt genom att den inre drivande enheten flyttar sin tyngdpunkt genom att rulla upp i sfären. Detta skapar ett drivande moment som gör att roboten rullar framåt. Dynamiken tas fram med hjälp av analytisk mekanik. Tillvägagångssättet liknar det i Nagai (2008), men med motsatt riktning på sfärens rotationsvinkel för att få naturligare tecken på flera storheter, vilket även Bicchi m. fl. (u. å) använder. I figur 3.3 definieras mått och vinkelkoordinater. Roboten ses här från sidan med positiv rotationsriktning åt höger.



Figur 3.3: Vinkelkoordinater vid modellering för framåtdrivning. Masscentrum för sfär och drivande enhet och tillhörande mått markerade.

M	sfärens massa
m	drivande enhetens massa
R	sfärens radie
r_d	avståndet från drivenhetens masscentrum till sfärens centrum
θ_s	vinkel mellan vertikalaxeln och en referenslinje mellan en punkt på sfärens yta och medelpunkt
θ_d	vinkel mellan den drivande enhetens masscentrum och referenslinjen
$\omega_s = \dot{\theta}_s$	sfärens vinkelhastighet
$\omega_d = \dot{\theta}_d$	drivenhetens vinkelhastighet

Följande energier identifierades (I_s och I_d är tröghetsmoment för sfär och drivenhet):

$$
\begin{aligned}
V_s &= 0 \\
V_d &= -mgr_d \cos(\theta_d - \theta_s) \\
K_s &= \frac{1}{2} M R^2 \omega_s^2 \\
K_d &= \frac{m}{2}\Big(\omega_s^2 R^2 + 2\omega_s R r_d(\omega_d - \omega_s)\cos(\theta_d - \theta_s) + r_d^2(\omega_d - \omega_s)^2\Big) \\
R_s &= \frac{1}{2} I_s \omega_s^2 \\
R_d &= \frac{1}{2} I_d(\omega_d - \omega_s)^2
\end{aligned}
$$

V_s	potentiell energi för sfären
V_d	potentiell energi för drivenheten
K_s	kinetisk energi för sfären
K_d	kinetisk energi för drivenheten
R_s	rotationsenergi för sfären
R_d	rotationsenergi för drivenheten

där de potentiella energierna avser endast konservativa krafter (tyngdkraften). Lagrangefunktionen formulerades enligt

$$L = K_s + K_d + R_s + R_d - V_s - V_d \tag{3.5}$$

Lagranges rörelseekvationer blir då

$$
\begin{aligned}
\frac{d}{dt}\Big(\frac{\partial L}{\partial \omega_s}\Big) - \frac{\partial L}{\partial \theta_s} &= T - T_f \\
\frac{d}{dt}\Big(\frac{\partial L}{\partial \omega_d}\Big) - \frac{\partial L}{\partial \theta_d} &= T
\end{aligned}
\tag{3.6}
$$

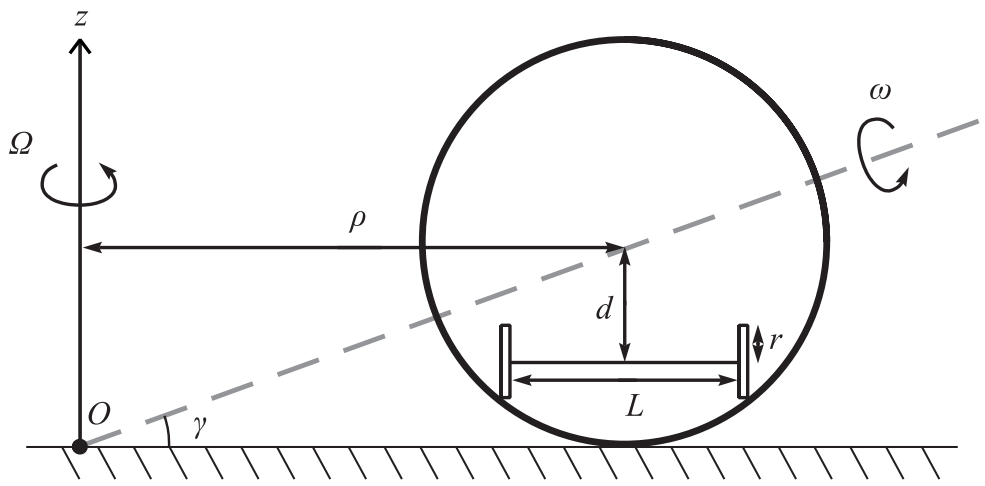
där vridmomenten i högerleden är generaliserade krafter motsvarande ickekonservativa krafter. I likhet med Nagai (2008) är dessa drivande moment mellan sfär och drivande enhet, T och friktionsmoment mot underlag, T_f. Detta gav

$$\begin{cases} T - T_f = & \alpha_s\Big[(M+m)R^2 + mr_d^2 + I_s + I_d - 2mRr_d\cos(\theta_d - \theta_s)\Big] \\ & +\alpha_d\Big[mRr_d\cos(\theta_d - \theta_s) - mr_d^2 - I_d\Big] \\ & -(\omega_d - \omega_s)^2 mRr_d\sin(\theta_d - \theta_s) - mgr_d\sin(\theta_d - \theta_s) \\ T = & \alpha_s\Big[mRr_d\cos(\theta_d - \theta_s) - mr_d^2 - I_d\Big] + \alpha_d\Big[mr_d^2 + I_d\Big] \\ & +mgr_d\sin(\theta_d - \theta_s) \end{cases} \tag{3.7}$$

Där $\alpha = \dot{\omega} = \ddot{\theta}$ är respektive vinkelacceleration. Friktionsmomentet antogs vara försumbart då en sfär rullar bra på hårda jämna underlag.

3.3 Riktningsförändring

Roboten svänger genom att rotera hjulen med olika vinkelhastigheter. Geometrin visas i figur 3.4.



Figur 3.4: Robot i genomskärning vid rotation med vinkelhastigheten Ω runt en fast axel z. Sfären roterar med vinkelhastigheten ω runt sin rotationsaxel som bildar vinkeln γ med horisontalplanet.

Sfären roterar kring sin rotationsaxel med en rotationshastighet ω och rör sig i en precessionsrörelse runt origo med en hastighet Ω med en rotationsradie ρ. Vinkelhastigheterna relateras enligt $\Omega = \omega\sin\gamma$. Sfären antas svänga med liten Ω jämfört med sfärens hastighet, vilket gör att centripetalaccelerationen kan antas vara liten. Sfärens hastighet kan uttryckas som

$$v = R\omega\cos\gamma = \rho\Omega \tag{3.8}$$

Hastigheten (relativt sfären) för kontaktpunkterna mellan hjul och sfär kan uttryckas på två olika sätt, dels i termer av vänster och höger hjuls vinkelhastighet, ω_v och ω_h och dels i termer av sfärens rotation och det vinkelräta avståndet som beror på rotationsradien ρ.

$$\begin{aligned} v_v^{'} &= \omega_v r = \Big((d+r)\cos\gamma - \frac{L}{2}\sin\gamma\Big)\omega \\ v_h^{'} &= \omega_h r = \Big((d+r)\cos\gamma + \frac{L}{2}\sin\gamma\Big)\omega \end{aligned} \tag{3.9}$$

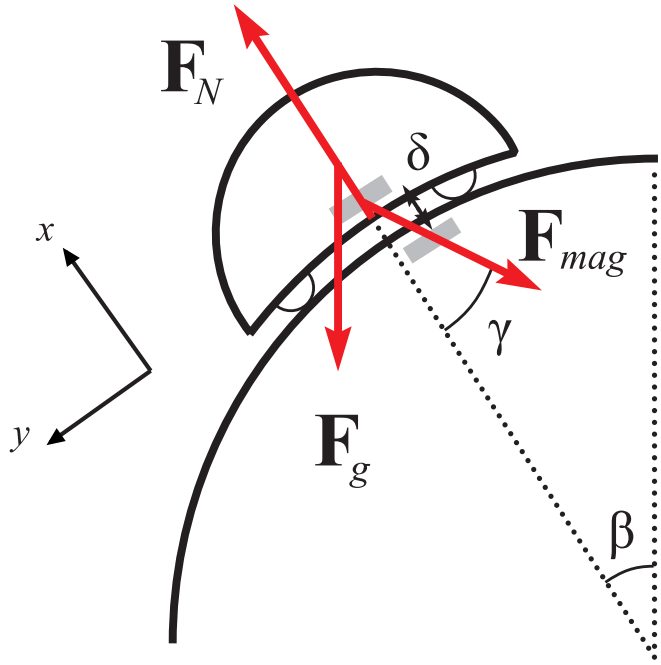
vilket kan skrivas om som

$$\begin{aligned} \omega_v &= \frac{N}{R}v - \frac{L}{2r}\Omega \\ \omega_h &= \frac{N}{R}v + \frac{L}{2r}\Omega \end{aligned} \tag{3.10}$$

Detta samband omvandlar alltså rotationshastighet och hastighet för sfären till vinkelhastigheter för de två hjulen.

3.4 Magnetisk upphängning för huvud

Krafter involverade i huvudets upphängning visas i figur 3.5.



Figur 3.5: Huvudupphängning i genomskärning.

Huvudet rullar friktionslöst på sfären och påverkas av tre krafter, normalkraft, tyngdkraft och magnetisk kraft. Magneterna i sfär och huvud antas vara något

förskjutna jämfört med en linje mellan sfärens centrum och huvudet. Detta ger kraftbalans i y-led vid jämvikt

$$F_g \sin\beta - F_{mag} \sin\gamma = 0 \tag{3.11}$$

För små γ har vi approximativt $F_{mag}(x) \propto 1/x^4$ (Vokoun, Beleggia, Heller & Šittner, 2009). Avståndet är $x = \delta/\cos\gamma$. Vi har alltså

$$F_{mag}(\delta) \approx \frac{\sin\beta}{\cos^4\gamma \sin\gamma} F_g \tag{3.12}$$

Detta minimeras för $\gamma \approx 27°$ då nämnaren blir ungefär 0,286. En rimlig huvudvinkel kan vara $\beta = 30°$, vilket ger

$$F_{mag}(\delta) \approx 1{,}7 F_g \tag{3.13}$$

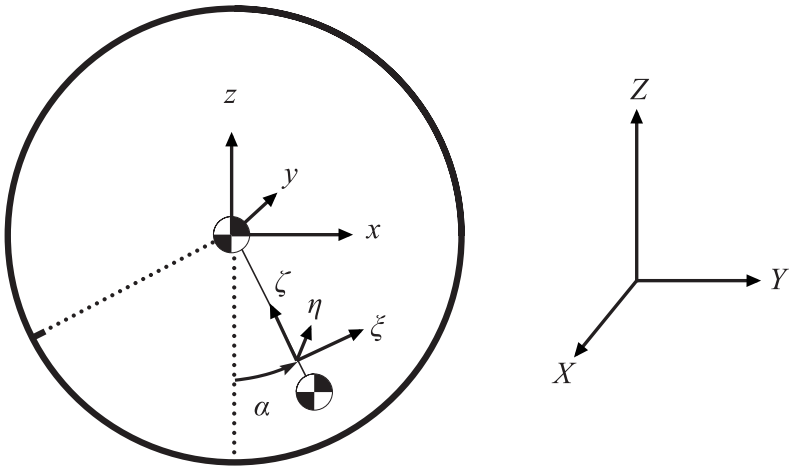
Huvudet skall alltså utan problem kunna hänga upp och ned under sfären utan att trilla av för att magneterna skall kunna hålla önskad huvudvinkel.

3.5 Tolkning av sensordata

Roboten har två typer av sensorer, en IMU och två Hall-sensorer. Detta avsnitt tolkar mätvärden från dessa i enighet med tidigare indroducerade variabler och hur dessa kan användas för återkoppling i robotens reglersystem.

3.5.1 IMU

En IMU-sensor monterad på innanmätet mäter accelerationer, vinkelhastigheter och magnetfält i sitt referenssystem ($\xi\eta\zeta$), alltså måste dessa data omvandlas till robotens referenssystem (xyz), se figur 3.6.



Figur 3.6: Robotens tre olika referenssystem. XYZ är ett yttre referenssystem. xyz är robotens referenssystem orienterat så att x-axeln ligger i robotens rörelseriktning. $\xi\eta\zeta$ är drivenhetens referenssystem (där sensorn är monterad) vridet vinkeln α jämfört med xyz.

Koordinatsystemen relateras enligt

$$\begin{aligned}\hat{\boldsymbol{\xi}} &= \cos\alpha\hat{\boldsymbol{x}} + \sin\alpha\hat{\boldsymbol{z}} \\ \hat{\boldsymbol{\eta}} &= \hat{\boldsymbol{y}} \\ \hat{\boldsymbol{\zeta}} &= -\sin\alpha\hat{\boldsymbol{x}} + \cos\alpha\hat{\boldsymbol{z}}\end{aligned} \tag{3.14}$$

Vinkeln α uppskattas genom att anta att accelerationen i x-led är liten jämfört med tyngdaccelerationen, som också registreras av accelerometern. Accelerometern kan alltså tänkas mäta acceleration relativt jordens centrum. Vi har då

$$\frac{a_\xi}{a_\zeta} \approx \frac{a_z \sin\alpha}{a_z \cos\alpha} = \tan\alpha \tag{3.15}$$

alltså

$$\alpha \approx \arctan(\frac{a_\xi}{a_\zeta}) \tag{3.16}$$

Sensorn mäter vinkelhastighet i sitt koordinatsystem

$$\boldsymbol{\omega} = \omega_\xi\hat{\boldsymbol{\xi}} + \omega_\eta\hat{\boldsymbol{\eta}} + \omega_\zeta\hat{\boldsymbol{\zeta}} \tag{3.17}$$

vilket i xyz-systemet blir

$$\boldsymbol{\omega} = \hat{\boldsymbol{x}}(\omega_\xi\cos\alpha - \omega_\zeta\sin\alpha) + \hat{\boldsymbol{y}}\omega_\eta + \hat{\boldsymbol{z}}(\omega_\xi\sin\alpha + \omega_\zeta\cos\alpha) \tag{3.18}$$

Robotens vinkelhastighet, Ω, ges av z-komponenten av $\boldsymbol{\omega}$, alltså

$$\Omega = \omega_\xi \sin\alpha + \omega_\zeta \cos\alpha \tag{3.19}$$

Även robotens hastighet går (i teorin) att uppskatta med hjälp av sensordata från IMUn. Hastigheten är integralen över accelerationen i x-led. Hastighetens begynnelsevärde är lämpligen noll, då roboten normalt står stilla då den startas.

$$v = \int_0^t a_z \mathrm{dt} = \int_0^t (a_\xi \cos\alpha - a_\zeta \sin\alpha)\mathrm{dt} \tag{3.20}$$

Diskret kan detta approximeras

$$v_k = v_{k-1} + (a_\xi \cos\alpha - a_\zeta \sin\alpha)(t_k - t_{k-1}), \quad v_0 = 0 \tag{3.21}$$

vilket kan utnyttjas i mikrokontrollern.

3.5.2 Hall-sensor

På respektive motor sitter en Halleffektsavkodare som mäter motorns vinkelhastighet genom att känna av magnetfält från små magneter monterade på motoraxeln. Ekvation (3.10) kan inverteras, vilket ger hastighet och vinkelhastighet vid konstant drivvinkel.

$$\begin{aligned} v &= \frac{R}{2N}(\omega_v + \omega_h) \\ \Omega &= \frac{2r}{L}(\omega_h - \omega_v) \end{aligned} \tag{3.22}$$

där uppmätt Ω kan jämföras med data från IMUn. Termen $(\omega_v + \omega_h)/2N$ motsvarar ω_d i avsnitt 3.2. Genom att derivera drivinkeln $\alpha = \theta_s - \theta_s$ fås $\dot{\alpha} = -\omega_\eta$, där ω_η mäts av IMUn. Alltså

$$\omega_s = \omega_d - \omega_\eta \tag{3.23}$$

Korrektionen till hastigheten i ekvation (3.22) blir alltså $-R\omega_\eta$. Det vill säga

$$v = \frac{R}{2N}(\omega_v + \omega_h) - R\omega_\eta \tag{3.24}$$

Position i det yttre referenssystemet fås genom att integrera hastighetskomponenterna

$$\begin{aligned} \dot{X} &= v\cos\phi \\ \dot{Y} &= v\sin\phi \\ \dot{\phi} &= \Omega \end{aligned} \tag{3.25}$$

med lämpliga initialvärden. ϕ är körvinkel i XY-planet utgående från X-axeln.

4

Val av motor och växellåda

Detta kapitel redovisar beräkningar för att identifiera en lämplig motor och växellåda. För val av motor med tillhörande växellåda fattades ett beslut att initialt undersöka motorer med tillhörande encoder från tillverkaren *Pololu*. Detta då en första sållning av motorer påvisade att dessa har en relativt hög effekt till en låg kostnad samtidigt som de levereras med en monterad encoder för mätning av vinkelhastigheten.

4.1 Beräkning av maximal utväxling

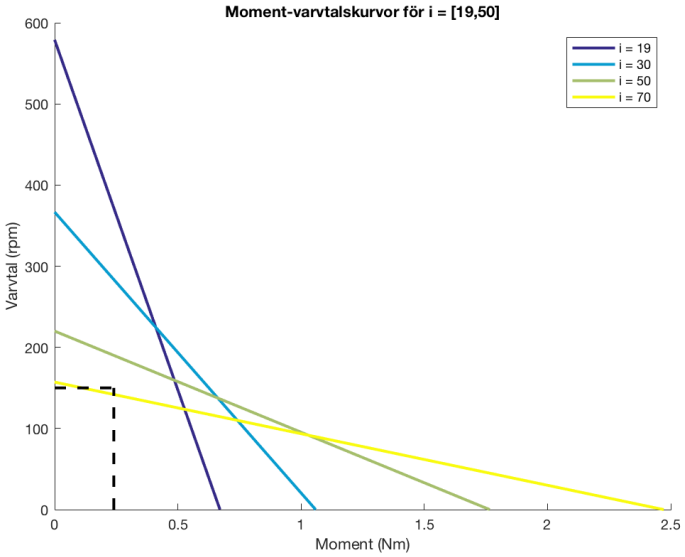
Pololus växelmotorer med encoder har enligt datablad $\omega_{motor} = 11\,000\,\text{rpm}$ på ingående axel till växellådan. Växellådorna har utväxlingar från 19:1 till 131:1 med tomgångsvarvtal mellan 500 rpm till 80 rpm. Enligt den förenklade matematiska modellen beskriven i kapitel 3.1 ekvation (3.4) krävs ett maximalt varvtal på utgående axel på 150 rpm. Då växellådorna har ett varvtal på 11 000 rpm på ingående axel kan den maximala utväxlingen i_{max} beräknas enligt

$$i_{max} = \frac{11000}{150} \approx 73 \tag{4.1}$$

Detta lämnade alternativen 19:1, 30:1, 50:1 och 70:1. Dessa utvärderades vidare genom analys av moment-varvtalskurvor.

4.2 Moment-varvtalskurvor

Enligt Alciatore och Histand (2012, s. 442) är förhållandet mellan moment och varvtal för en DC-motor med permanenta magneter linjärt. Detta linjära förhållande illustrerades i en moment-varvtalskurva med hjälp av MATLAB (figur 4.1). Kurvorna skapades med grund i tekniska datablad av *Pololu*.



Figur 4.1: Moment-varvtalkurvor för utväxlingar mellan 19:1 och 70:1

I figur 4.1 är streckade linjer plottade för att påvisa det krävda momentet och varvtalet i den förenklade matematiska modellen (ekvation (3.4)). Dessa utgörs per motor av $\omega = 150\,\text{rpm}$ och $T = 0{,}24\,\text{N m}$. Motorn med utväxling 70:1 klarar ej av att leverera det krävda momentet vid maximalt varvtal och förkastas således.

Vidare är en tumregel att en DC-motor arbetar som bäst vid $\approx 0{,}7 \cdot \omega_{max}$. Dessa arbetsvarvtal beräknas enligt

$$\omega_{arb} = 0{,}7 \cdot \omega_{max} = \frac{0{,}7 \cdot \omega_{motor}}{i} \tag{4.2}$$

Beräkningar utfördes för de kvarvarande växellådsalternativen i MATLAB och dess arbetsvarvtal redovisas i tabell 4.1.

Utväxling i	Arbetsvarvtal ω_{arb}
19:1	405,26 rpm
30:1	256,67 rpm
50:1	154 rpm

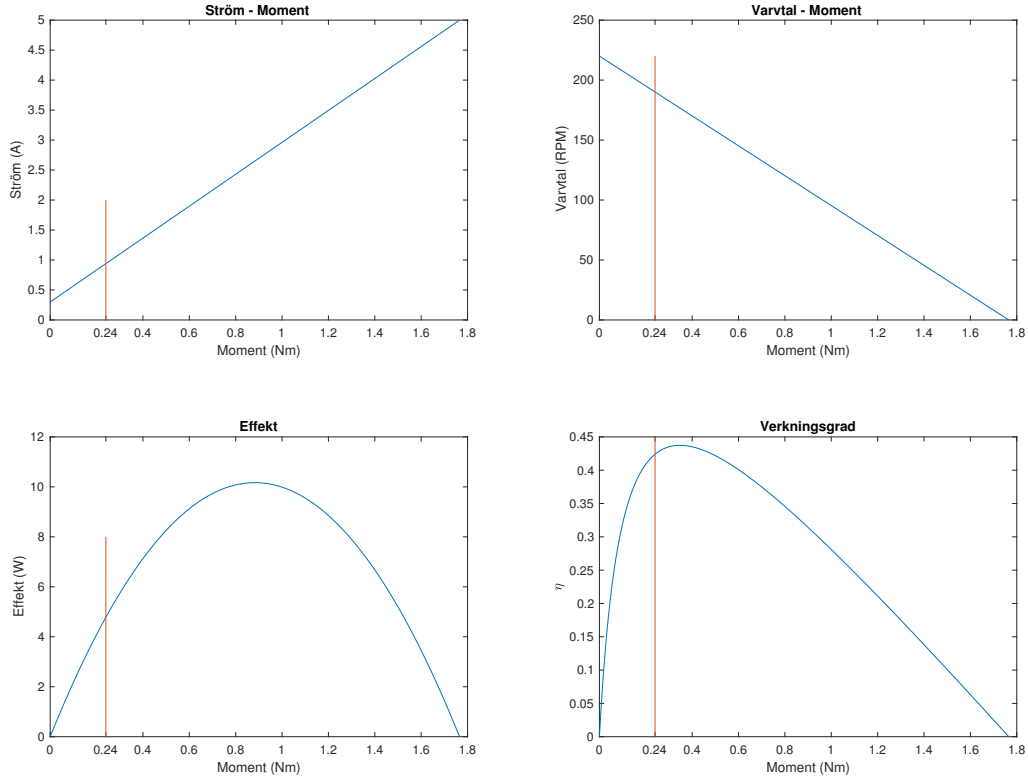
Tabell 4.1: Lämpligt arbetsvarvtal för de kvarvarade växellådsalternativen

Av de kvarvarande motoralternativen var det växelmotorn med utväxlingen 50:1 som har sitt arbetsvarvtal närmast det dimensionerande arbetsvarvtalet 150 rpm varpå den valdes.

4.3 Vald motor

Den valda motorn heter *Metal Gearmotor 37Dx70L mm with 64 CPR Encoder* och är tillverkade av *Pololu*. Exakta specifikationer för dessa följer nedan

- Driftspänning DC: 6 eller 12V
- Max varvtal: 220 rpm
- Vridmoment, Max: 250 oz-in = 1,77 N m
- Utväxling: 50:1
- Vikt: 225g
- Storlek: 37Ø x 70 mm
- Stoppström: 5 A



Figur 4.2: Kurvor över vald motors egenskaper och prestanda

Den valda motorns egenskaper och prestanda illustreras med data från tekniskt datablad i grafer gjorda i MATLAB (figur 4.2). En linje $x = 0{,}24$ plottas i samma fönster för att illustrera det maximala krävda momentet beräknat enligt den förenklade matematiska modellen beskriven i kapitel 3.1 s. 9. Den krävda effekten i den punkten vid maximalt varvtal beräknas enligt

$$P_{krav,max} = \omega_{motor,max} \cdot T_{motor,max} = 15{,}7 \cdot 0{,}24 = 3{,}77\,\mathrm{W} \tag{4.3}$$

Då moment och varvtal har ett linjärt samband interpoleras värdet på momentet motorn kan leverera vid 150 rpm till $T = 0{,}56\,\mathrm{N\,m}$. Med detta kan effekten motorn kan leverera bestämmas som

$$P_{max,motor} = 15{,}7 \cdot 0{,}56 = 3{,}92\,\mathrm{W} \tag{4.4}$$

Systemet kräver således mindre effekt vid arbetspunkten än vad motorerna kan leverera och fungerar således att använda.

Vidare är verkningsgraden mellan den elektriska och mekaniska effekten för motorn beräknad enligt

$$\eta = \frac{P_{mek}}{P_{el}} = \frac{T \cdot \omega}{U \cdot I} \tag{4.5}$$

Denna verkningsgrad är beräknad för hela intervallet motorn verkar i och illustrerad i figur 4.2. Enligt figur är verkningsgraden i arbetspunkten väldigt nära den maximala verkningsgraden vilket även detta bekräftar att motorn är ett lämpligt val.

4.4 Valda hjul

I beräkningarna gällande framdrivningen har en hjuldiameter på 90 mm använts. Med detta i åtanke inhandlades ett par *Pololu Wheel 90×10mm Pair - Black* tillsammans med adaptrar för att kunna montera dessa på en 6 mm axel. Utan någon tillgänglig data angående däcken friktionskoeffiecient görs ett antagande att friktionen är tillräcklig mot sfärens insida.

5

Konstruktion, tillverkning och elektronik

I detta kapitel beskrivs arbetet med framtagning av den fysiska roboten samt den ingående elektriska hårdvaran. Med grund i konceptvalet konstrueras och tillverkas sfär, huvud samt IDEn.

5.1 Konstruktion och tillverkning av sfär

En CAD-modell av sfären skapades först och sedan skrevs denna ut med hjälp av 3D-skrivare. För att få få plats i volymen på 3D-skrivarna delades sfären upp i mindre komponenter som sedan limmades ihop. I datormodellen beräknades och ritades sfärens komponenter upp i syfte att få plats med så stora delar som möjligt i 3D-skrivarna och därmed minimera utskrivningstiden. I och med sfärens relativt stora storlek och 3D-skrivarnas utskriftsvolym delades sfären upp i 44 delar. I designen av delarna togs även hänsyn till hållfasthet och monteringsordning så att inga problem uppstod vid monteringen eller efter denna, då en trasig sfär under arbete med reglering skulle orsaka mycket oönskat extraarbete.

Själva monteringen av sfären gjordes med hjälp av lim och bitar av metalltråd. Syftet med metalltråden var att underlätta sammanfogandet av bitarna på så sätt att endast tryck normalt mot de sammanfogade ytorna behövde läggas. Detta genom att metalltråden sitter i hål på sidorna av sfärens komponenter, se figur 5.2d och 5.2e.

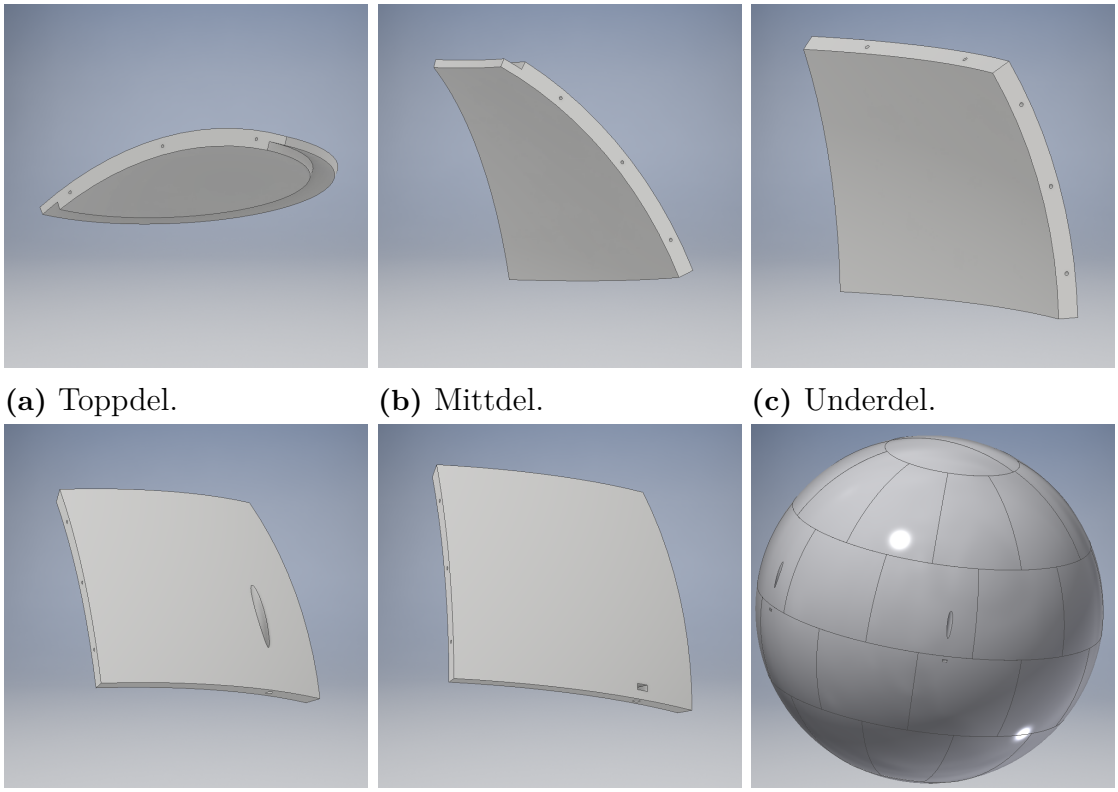
Sfären delades in i två halvor och därmed limmades inte de fogar som möts i mitten för att enkelt kunna plocka isär den vid arbete med reglering. Några delar designades därmed på så sätt att det går att sammanfoga halvorna med hjälp av skruv och mutter kring mitten av sfären. För förtydligande, se figur 5.1e och 5.1d.

De 44 komponenterna delades in i 3 olika sorters komponenter enligt följande:

- Toppdel: 4 bitar

- Mittdel: 20 bitar
- Underdel: 20 bitar

Varav 8 av underdelarna har hål för skruv eller mutter som kan ses i figur 5.1e och 5.1d.



(a) Toppdel. **(b)** Mittdel. **(c)** Underdel.

(d) Underdel med skruvhål. **(e)** Underdel med mutterhål. **(f)** Fullständig sammansättning till sfär.

Figur 5.1: CAD-modell över komponenter och sammansättning.

Alla dessa delar bildar två halva sfärer. Varje halvsfär består av två toppdelar (se figur 5.1a), 10 mittendelar (figur 5.1b) och 10 underdelar (figur 5.1c), varav fyra av underdelarna har hål för skruv eller mutter (figur 5.1d och figur 5.1e). De båda halvorna är identiska så när som på de delar med hål för skruv eller mutter. Ena halvan har fyra hål för skruv och andra halvan har fyra hål för mutter. När halvorna är fästa ligger dessa hål i samma symetrilinje.

Alla delar gavs en tjocklek på 1 cm och en ytterradie på 25 cm. Sammanfogade bildar de en sfär som har en ytterdiameter på 50 cm (figur 5.1f), precis som vår referensmodell av Disney troligtvis har.

Toppdelen (figur 5.1a) har, utgående från vertikalaxeln, en lutning på 20 grader med en överlappande del som slutar efter en lutning på 23 grader. Kring vertikalaxeln är den roterad 180 grader vilket är ett halvt varv runt axeln. Den platta ytan har tre

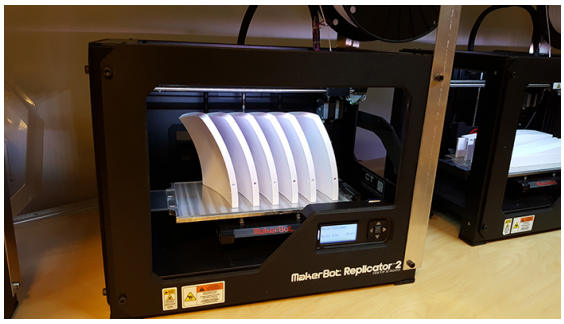
jämnt fördelade hål. Dessa hål har en diameter på 2 mm och ett djup på 8 mm och är avsedda för metallpluggar. Två av toppdelarna monterade mot varandra bildar tillsammans överdelen av en halvsfär (figur 5.2b).

Mittendelen (figur 5.1b) börjar, utgående från vertikalaxeln, 23 grader ut och har en lutning på 37 grader, eller 40 grader om överlappningen som börjar efter 20 grader är medräknad. Kring vertikalaxeln är delen roterad 36 grader vilket är en tiondels varv kring axeln. På båda sidor sätts tre jämnt fördelade hål och på nedre ändan sätts två jämnt fördelade hål istället för en överlappning. Dessa hål har en diameter på 2 mm och ett djup på 8 mm och är avsedda för metallpluggar. Tio av mittendelarna monterade mot varandra bildar tillsammans "mittenringen" av en halvsfär (figur 5.2b).

Underdelen (figur 5.1c) börjar, utgående från vertikalaxeln, 60 grader ut och har en lutning på 30 grader. Kring vertikalaxeln är delen roterad 36 grader grader vilket är en tiondels varv kring axeln. På båda sidor sätts tre jämnt fördelade hål och på den övre ändan sätts två jämnt fördelade hål. Dessa hål har en diameter på 2 mm och ett djup på 8 mm och är avsedda för metallpluggar. Tio av underdelarna monterade mot varandra bildar tillsammans "underringen" av en halvsfär (figur 5.2c). På nedre delen av underdelen sätts inga hål då denna yta inte behöver några metallpluggar.

Åtta av underdelarna fick ytterligare modifikationer. Fyra underdelar har var sitt vertikalt hål för skruv och fyra andra underdelar har var sitt horisontellt hål för inskjuvning av mutter, se figur 5.1d och figur 5.1e.

Alla delar skrivs ut i 3D-skrivaren Makerbot Replicator i PLA-plast (figur 5.2a). PLA-plast valdes för att det är naturligt nedbrytbart och därmed uppfyller kravet på icke miljöfarligt material. En infill density på 10 % valdes och utskriftstiden beräknades till 120 timmar. På grund av de mindre ojämnheter som uppstod när plasten gick från smält till fast form kontrollerades alla delar. De hål (5.2d) som var för små borrades upp. Metallpluggarna (5.2e) som sitter i varje del är utklippta bitar tig-svetstråd med en diameter på 1,6 mm och en längd på 16 mm. Ett lim med hög viskositet valdes för att uppnå bra kontakt även med ojämnheter i ytorna som limmades mot varandra.



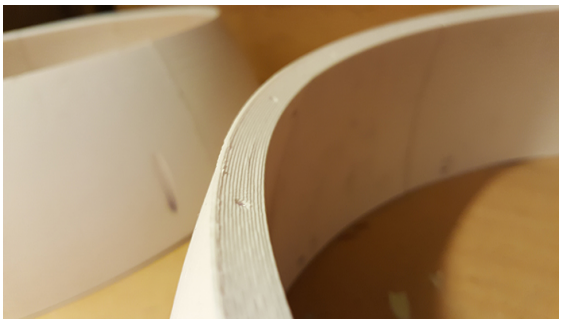
(a) Färdigutskrivna delar i 3D-skrivaren.



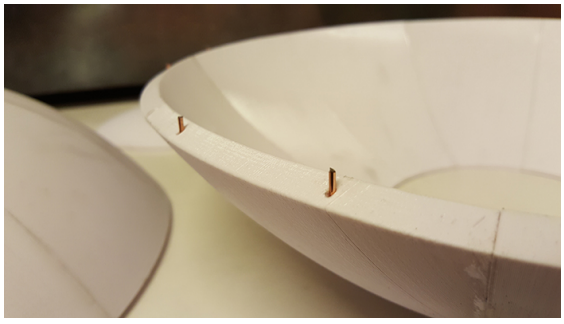
(b) Sammansatta topp- och mittendelar.



(c) Sammansatta underdelar.



(d) Hål avsett för metallplugg.



(e) Metallpluggar monterade.



(f) Den färdigmonterade sfären.

Figur 5.2: Färdiga komponenter och sammansättning.

Hög noggrannhet mellan delarna inom varje ring uppnåddes med hjälp av planering av monteringsordning. Dock uppstod ojämnheter mellan ringarna på grund av de felmarginaler som finns vid limning för hand. Dessa jämnades ut med en latexfog som applicerades och sedan slipades till. För monterad och fogbehandlad sfär, se figur 5.2f.

5.2 Konstruktion och tillverkning av huvud

Då konstruktionen och implementeringen av huvudet inte varit av större prioritet för detta projekt valdes att inte konstruera huvudet från början. Istället hämtades filer gjorda av Steele Smith som är färdiga att skriva ut direkt (se figur 5.3a). På så sätt fås en mer komplett robot utseendemässigt utan att för mycket tid behöver

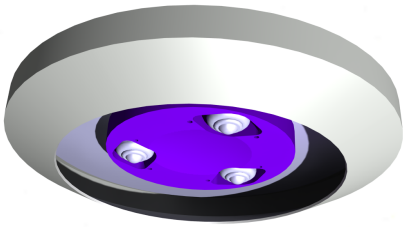
läggas på något med låg prioritet. Endast de största delarna av huvudet valdes att skriva ut och därmed saknas till exempel resterande delar till robotens ögon.

För sammanfogning av de utskrivna delarna användes samma teknik som i konstruktionen av sfären. Metallpluggar sitter i fogarna och samma lim användes för att limma ihop delarna.

För att få huvudet att rulla utmed sfärens utsida köptes tre stycken kulrullar in som monterades under huvudet enligt figur 5.3b. Dessa monterades med ett skruvförband i en 3D-printad magnethållare i PLA-plast. Då huvudet inte har direkt kontakt med insidan behövdes sex stycken supermagneter för att möjliggöra att huvudet rör sig tillsammans med tiltramen som pekar från sfärens centrum radiellt mot sfärens innervägg. Tre av magneterna placerades i magnethållaren på tiltramen och tre på magnethållaren på undersidan av huvudet. På så sätt hålls huvudet kvar mot kroppen och rullar utmed kroppen när denna är i rörelse.



(a) Huvud med underdel.



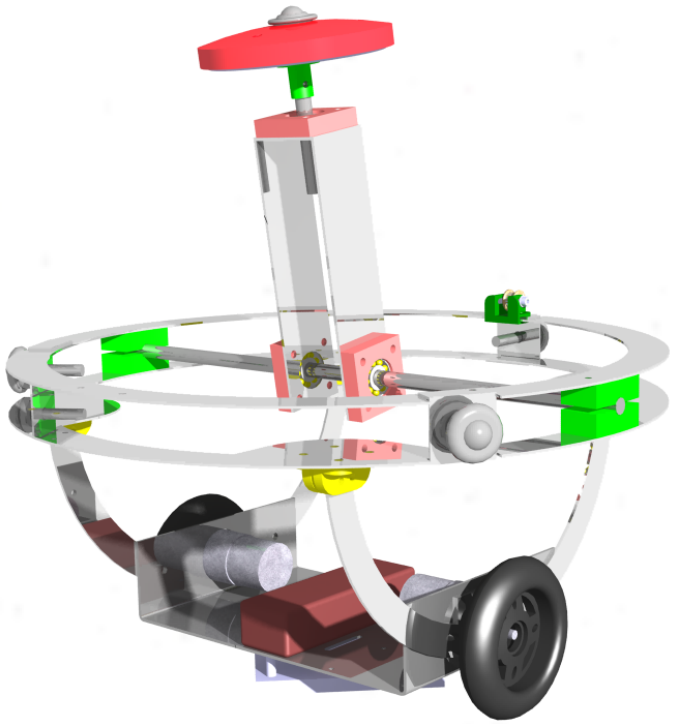
(b) Tre kulrullar på huvudets underdel.

Figur 5.3: Huvudets delar.

5.3 Konstruktion och tillverkning av IDE

Konstruktionen av IDEn grundade sig främst i konceptskisserna och kravspecifikationen. Initialt fattades ett beslut att avståndet mellan axeln som utgör hjulens rotationsaxel och sfärens insida ska vara 80 mm. Detta för att möjliggöra placering av tyngder under hjulens rotationsaxlar i syfte att sänka tyngdpunkten.

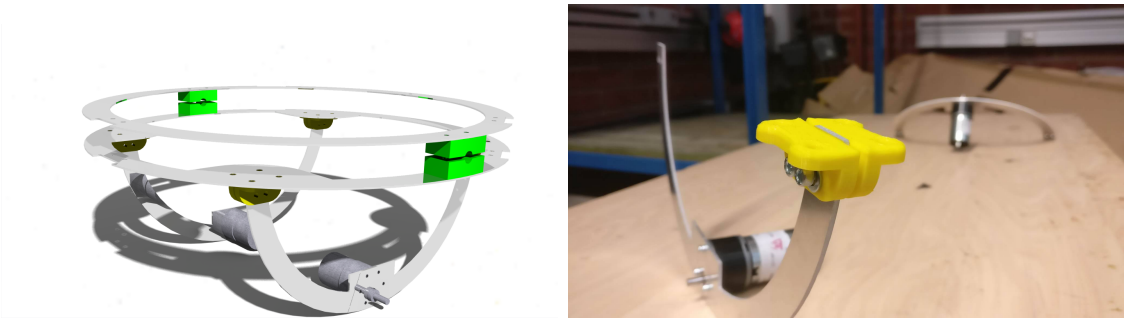
Vidare valdes hjul med en diameter på 90 mm. Med dessa parametrar i åtanke kunde avståndet mellan hjulen bestämmas och kring detta började delarna konstrueras. En assembly modellerades upp med hjälp av CAD-programvara tillsammans med en sfär för att kontrollera att de olika ingående komponenterna var positionerade på de ställen som var tänkt. En rendering av en total assembly ses i figur 5.4.



Figur 5.4: Rendering av sammansatt modell av fullständig IDE.

5.3.1 Aluminumram

Motorerna modellerades i CAD-programvara för att ge en överblick hur de skall fästas. Vidare konstruerades de övriga komponenterna med avseende på motorernas position för att säkerställa att huvudets tiltaxel sammanfaller med sfärens horisontella centrumaxel. Ett beslut fattades att fästa de olika komponenterna med hjälp av skruvförband som möjliggörs genom 3D-utskrivna fästen. Detta för att möjliggöra snabb ihop- och isärmontering jämförtvis med t.ex. ett svetsförband. En rendering av 3D-modellen ses i figur 5.5a.



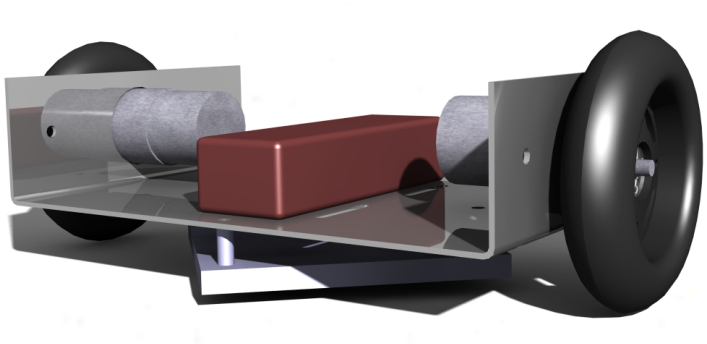
(a) Rendering av bärande aluminumram. **(b)** Utskuren komponent med fäste.

Figur 5.5: Aluminumram.

De olika metallkomponenterna skars ut i aluminumplåt med vattenskärning medan

fästena skrevs ut i PLA-plast. Alla ingående delar monterades med skruvar vilket illustreras i figur 5.5b.

5.3.2 Bottenplatta i stål



Figur 5.6: Rendering av bottenplatta med monterade hjul, batteri och tyngder.

En bottenplatta konstruerades som dels har syfte att ta upp horisontella krafter från motorerna men även att agera fästplatta för batteri och övrig elektronik. Denna platta skars ut i 2 mm stålplåt för att sedan bockas. Plattan har även hål för att möjliggöra montering av tyngder på undersidan. Ett antal kvadratiska tyngder med en vikt på 250 gram styck tillverkades för att variera den totala vikten efter behov. En rendering gjordes för att illustrera hjulens position samt tyngernas och batteriets montering i förhållande till bottenplattan (figur 5.6).

5.3.3 Kulrullar

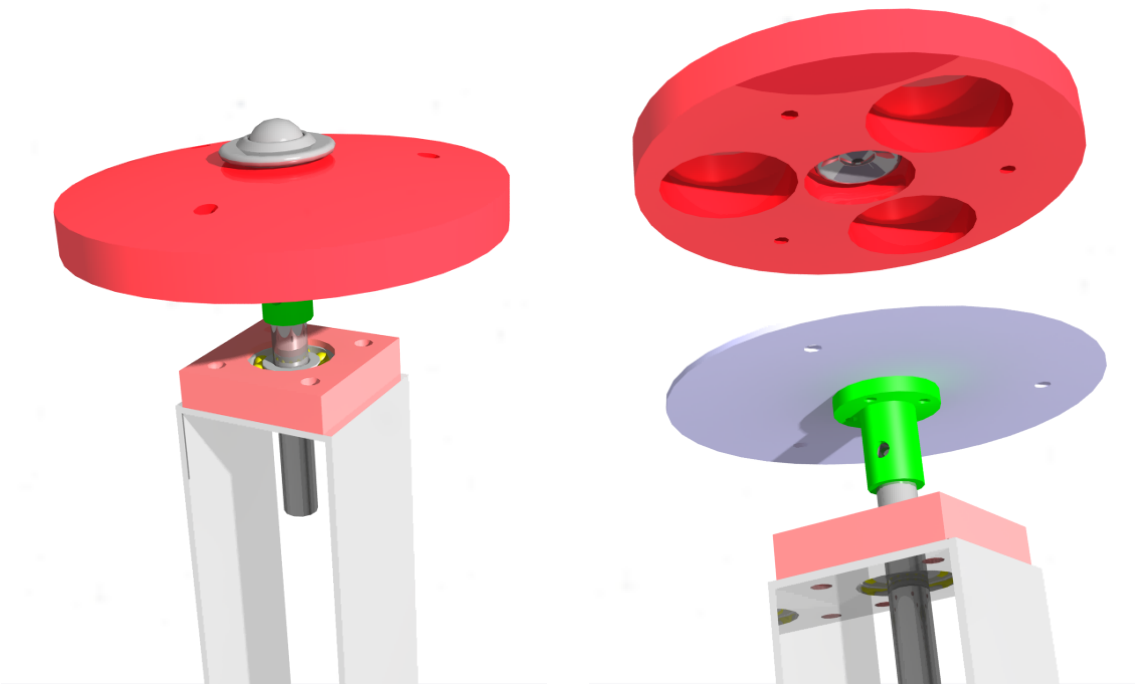
För att säkerställa låg friktion mot sfärens insida och god balans hos IDEn inhandlades tre stycken kulrullar vars egentliga syfte är att underlätta materialhantering i industrin. För att kompensera för ojämnheter på sfärens insida och upprätthålla konstant kontakt används en fjäder tillsammans med ett skruvförband. Ett foto på en kulrulle ses i figur 5.7.



Figur 5.7: Kulrulle för kontakt mellan sfär och IDE.

5.3.4 Tiltram

För att möjliggöra huvudrörelse konstruerades en tiltram att montera på en axel parallel till sfärens horisontella symmeteriaxel. Tiltramen är lagrad med sfäriska rullager av modell SKF 1200 ETN9 för att möjliggöra tilt för huvudet. En kuggrem monterad i tiltramen är kopplade till två stycken kuggremshjul varav den ena är kopplad till en servomotor i syfte att dra ramen framåt och bakåt vilket i sin tur medför att huvudet rör sig.



(a) Rendering av övre del av tiltram. Bilden visar hur axeln sitter fast i ramen.

(b) Magnetfäste sett underifrån. I bilden syns hålen för magneterna.

Figur 5.8: Rendering av tiltram i olika vinklar.

De sfäriska rullagren monteras i lagerhus 3D-utskrivna i PLA-plast vilket i sin tur monteras på aluminiumramen i konstruktionen. I toppen av ramen finns ännu en axel lagrad (illustrerad i figur 5.8a) med samma lagertyp som i sin tur är monterad på en magnethållare liknande den beskriven i avsnitt 5.2. En servomotor (ej i figur) roterar axeln i syfte att även huvudet ska rotera. I likhet med huvudets magnethållare monteras tre stycken supermagneter i syfte att huvudet ska följa tiltramens rörelse (se figur 5.8b). Magnethållaren innefattar även denna en kulrulle, dels i syfte att minska friktionen mot sfärens insida men även för att bidra till stabiliteten i och med IDEns kontaktpunkter mot sfären ökar.

5.4 Elektronik

Ett antal elektriska komponenter köptes in baserat på kravspecifikationen och det valda konceptet. Dessa komponenter samt deras prestanda beskrivs nedan.

5.4.1 Motorer

Två stycken DC-motorer används för att rotera hjulen för att dislokera masscentrum från z-axeln och få sfären i rörelse. Motorerna och dess egenskaper samt egenskaper beskrivs i detalj i kapitel 4.

5.4.2 Utvecklingskort - Arduino Mega

I projektets konceptgenerering gjordes ett val att använda en Arduino som styrenhet, då det är billigare än andra enkortsdatorer men klarar våra prestandakrav. Av de olika Arduinos som finns fastställdes att en Arduino Mega var nödvändig för att ha tillräckligt många I/O portar. Arduino Mega är ett utvecklingskort för en mikrokontroller ATmega1280. Denna har följande specfikationer:

- Driftspänning: 5V
- Inspänning(rekommenderad): 7-12V
- Inspänning(max): 6-20V
- Klockhastighet: 16Mhz
- Vikt: 37 g
- Storlek: 101,52 × 53,3 mm

5.4.3 IMU

Ett beslut fattades om att använda en LSM9DS1 som mätsystem. En IMU av detta slag använder en accelerometer, ett gyroskop och en magnetometer med tre frihetsgrader vardera. Dessa används för att mäta krafter, vinkelhastigheter och magnetiska fält. Mätdatan kommer framförallt brukas för att ge Arduinon indata för regleringen. Specifikationer LSM0DS1:

- Känslighet accelerometer: $\pm 2/ \pm 4/ \pm 8/ \pm 16$ g
- Känslighet magnetometer: $\pm 4/ \pm 8/ \pm 12/ \pm 16$ gauss
- Känslighet vinkelhastighet: $\pm 245/ \pm 500/ \pm 2000$ dps
- Driftspänning: 3,3 V
- Gränssnitt: SPI/I^2C

5.4.4 Batteri

Batteriet i bruk är ett LiPo 3-cells batteri. Enklare beräkningar och uppskattningar gällande körtid vid användning påvisade att valt batteri var lämpligt för användning.

- Spänning: 11,1-12,6 V
- Typ: LiPo(litium-jon polymer-batteri)
- Kapacitet 5000 mAh
- Storlek: 140 × 44 × 32 mm

5.4.5 Bluetooth

Då IDEn kör inuti en sfär finns det ingen möjlighet att styra den genom kabel och därför har ett trådlöst kommunikationssätt valts. De metoder som undersökts är WiFi, Bluetooth och en generisk 2,4GHz sändare. Då det är en strikt budget valdes alternativet av en generisk 2,4GHz sändare bort, i förmån av att använda en telefon som kontroll, istället av att behöva konstruera en egen prototyp. På så vis kan kostnaden av delar till en kontroll undvikas mot tid för framtagning av en app. Bluetooth valdes som kommunikationssätt framför WiFi då det drar mindre ström i aktivt läge. Bluetoothenheten HC-06 valdes till kommunikation mellan robot och kontroller eftersom den använder ett seriellt gränssnitt och kan drivas direkt av arduinon.

- Driftspänning: 3,3 V
- Strömförbrukning: 8 mA, ca 40 mA vid parning
- Frekvens: 2,4 Ghz
- Känslighet: -80dB$_{mW}$
- Storlek: 28 × 15 × 2,35 mm

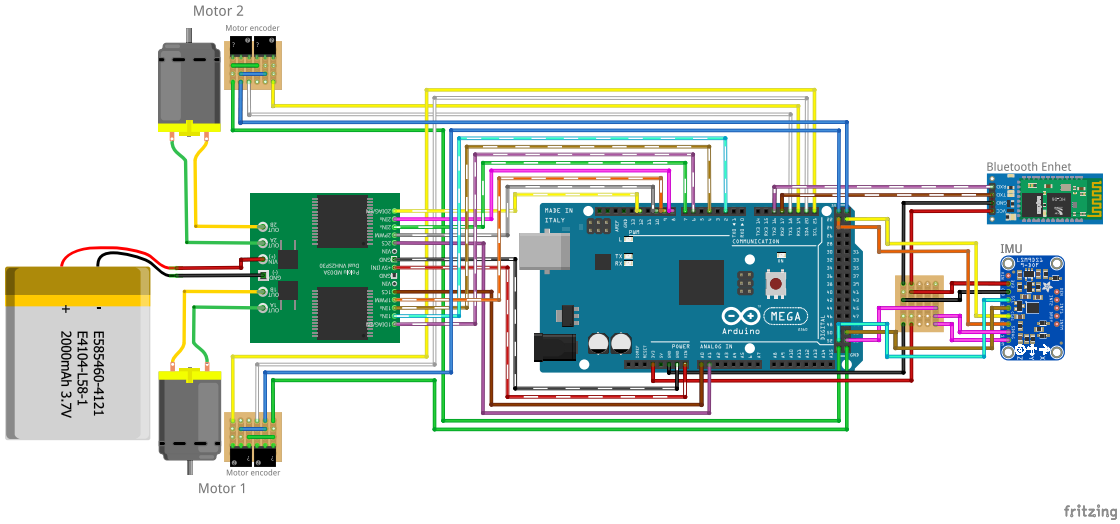
5.4.6 Motor shield

En Arduino Mega kan ej leverera krävd spänning och ström för att driva de valda motorerna. På grund av detta behövs en så kallad *motor shield* vilket är ett utbyggnadskort för Arduino. För att styra motorerna används ett Pololu Dual VNH5019 Motor Driver Shield, vilket är det rekommenderade för de valda motorerna.

- Driftspänning: 5,5-24 V
- Motorkanaler: 2 st
- Kontinuerlig ström: 12 A per kanal
- Strömmätning: 1,40 mV/A
- Vikt: 18 g

5.4.7 Kopplingsschema

Komponenterna kopplades ihop enligt figur 5.9. Ett mer detaljerat kopplingsschema finns i sin helhet i appendix A.1.



Figur 5.9: Kopplingsschema för robotens elektronik.

6

Reglering och mjukvara

Detta kapitel syftar till att beskriva robotens reglersystem samt all framtagen mjukvara. Mjukvaran innefattar programmet som körs på Arduino samt en egenutvecklad android-app skriven i JAVA för att styra roboten.

6.1 Reglering

I denna del presenteras robotens reglersystem. Först listas numeriska värden på robotens egenskaper. De matematiska modeller som tagits fram linjäriseras och motorerna modelleras för att ta fram systemets överföringsfunktion. Systemet skrivs på tillståndsform. Denna kan användas för att simulera robotens rörelser. Reglersystemets struktur byggs upp och parametrar för regulatorer beräknas.

6.1.1 Egenskaper

Robotens olika parametervärden mättes och uppskattades på flera olika sätt. Längder mättes på prototypen. Massor bestämdes med en dynamometer. Motorresistans mättes med multimeter och övriga motorparametrar bestämdes med hjälp av motorernas produktblad.

I_s uppskattades med hjälp av formeln för tröghetsmoment för ett sfäriskt skal med tjocklek 1 cm.

$$I_s = \frac{2}{5} M \frac{r_a^5 - r_b^5}{r_a^3 - r_b^3} \tag{6.1}$$

med $r_a = R$ och $r_b = R - 1$ cm. I_d approximerades som en punktmassa i masscentrum.

$$I_d = m r_d^2 \tag{6.2}$$

$K_e =$	0,308 Vs/rad	elektrisk motorkonstant
$K_t =$	0,155 Vs/rad	vridmoment-motorkonstant
$R_m =$	2,4 Ω	motorresistans
$M =$	3,3 kg	sfärens massa
$m =$	4,6 kg	drivenhetens massa
$r_d =$	0,14 m	avstånd mellan sfärens och drivenhetens masscentrum
$R =$	0,25 m	sfärens radie
$L =$	0,28 m	drivaxelns längd
$r =$	0,045 m	hjulradie
$N =$	4,1	utväxling från hjul till robothastighet
$I_d =$	0,090 kgm^2	tröghetsmoment för drivenhet
$I_s =$	0,132 kgm^2	tröghetsmoment för sfär
$g =$	9,82 m/s^2	tyngdacceleration

Tabell 6.1: Uppmätta egenskaper.

6.1.2 Linjärisering av rörelseekvationer

Rörelseekvationerna i ekvation (3.7) linjäriserades genom att anta att den drivande vinkeln $\theta_d - \theta_s$ samt dess derivata $\omega_d - \omega_s$ är liten.

$$\begin{cases} T = & \alpha_s\Big[(M+m)R^2 + mr_d^2 + I_s + I_d - 2mRr_d\Big] \\ & +\alpha_d\Big[mRr_d - mr_d^2 - I_d\Big] - mgr_d(\theta_d - \theta_s) \\ T = & \alpha_s\Big[mRr_d - mr_d^2 - I_d\Big] + \alpha_d\Big[mr_d^2 + I_d\Big] \\ & +mgr_d(\theta_d - \theta_s) \end{cases} \tag{6.3}$$

6.1.3 Motormodell

De elektriska motorerna modellerades enligt Alciatore och Histand (2012)

$$T_m = \frac{K_t}{R_m}(u - K_e\omega_m) \tag{6.4}$$

där T_m är motormoment, K_t och K_e är motorkonstanter, u är motorspänning och ω_m är motorns vinkelhastighet. Motormodellen kopplades till rörelseekvationerna enligt

$$\begin{aligned} \omega_m &= N\omega_d \\ T_m &= \frac{T}{2N} \end{aligned} \tag{6.5}$$

där N är utväxlingen mellan hjul och sfär enligt ekvation (3.1), och det drivande momentet T delas i två eftersom roboten har två motorer. Alltså

$$T = \frac{2NK_t}{R_m}(u - K_e N\omega_d) \tag{6.6}$$

6.1.4 Överföringsfunktion från motorspänning till robothastighet

De tre ekvationerna för T (ekvation (6.3) och (6.6)) Laplacetransformerades under antagandet att systemet initialt befinner sig i vila (alla begynnelsevärden är noll).

$$\begin{cases} \mathcal{T} = & s^2\Theta_s\Big[(M+m)R^2 + mr_d^2 + I_s + I_d - 2mRr_d\Big] \\ & +s^2\Theta_d\Big[mRr_d - mr_d^2 - I_d\Big] - mgr_d(\Theta_d - \Theta_s) \\ \mathcal{T} = & s^2\Theta_s\Big[mRr_d - mr_d^2 - I_d\Big] + s^2\Theta_d\Big[mr_d^2 + I_d\Big] \\ & +mgr_d(\Theta_d - \Theta_s) \\ \mathcal{T} = & 2NK_t/R_m(U - K_e N s\Theta_d) \end{cases} \tag{6.7}$$

där $\mathcal{T} = \mathcal{L}\{T\}$, $U = \mathcal{L}\{u\}$ och $\Theta = \mathcal{L}\{\theta\}$.

$\mathcal{T}$ och Θ_d eliminerades, vilket gav överföringsfunktionen mellan motorspänning och sfärvinkel

$$\frac{\Theta_s}{U} = \frac{as^2 + b}{cs^4 + ds^3 + es^2 + fs} \tag{6.8}$$

med

$$\begin{aligned} a &= 2NK_t\Big(2(mr_d^2 + I_d) - mRr_d\Big)/R_m \\ b &= 4mgr_dNK_t/R_m \\ c &= mr_d^2(MR^2 + I_s) + I_d\Big((m+M)R^2 + I_s\Big) \\ d &= 2N^2K_tK_e\Big((M+m)R^2 + 2mr_d^2 + I_s + 2I_d - 3mRr_d\Big)/R_m \\ e &= mgr_d\Big((M+m)R^2 + I_s\Big) \\ f &= 4mgr_dN^2K_tK_e/R_m \end{aligned} \tag{6.9}$$

Hastigheten för roboten är $v = R\omega_s$. Detta Laplacetransformerades enligt $V = Rs\Theta_s$. Alltså

$$\frac{V}{U} = \frac{R(as^2 + b)}{cs^3 + ds^2 + es + f} \tag{6.10}$$

Med parametrar enligt tabell 6.1 fås poler i

$$\begin{matrix} -2{,}327 \\ -0{,}778 \pm 6{,}427\ \mathrm{i} \end{matrix} \tag{6.11}$$

Polerna ligger i vänstra halvplanet och visar därmed på stabilitet. Skillnaden gentemot överföringsfunktionen i (6.8) är att $\frac{\Theta_s}{U}$ har integralverkan och därmed en pol i origo. Överföringsfunktionen i ekvation (6.8) är alltså marginellt stabil.

6.1.5 Tillståndsbeskrivning

Systemet kan även beskrivas på tillståndsformen

$$\dot{\boldsymbol{x}} = \boldsymbol{f}(u,\boldsymbol{x}), \quad y = v = Rx_1 \tag{6.12}$$

där u är insignal, y utsignal och $\boldsymbol{x}$ är tillståndsvektor, som väljs till

$$\boldsymbol{x} = \begin{bmatrix} \omega_s \\ \omega_d \\ \theta_s \\ \theta_d \end{bmatrix} \tag{6.13}$$

vilket motiverar utsignalen då $v = R\omega_s$. Tillståndsfunktionen $\boldsymbol{f}(u,\boldsymbol{x})$ bestäms genom att lösa ut $\dot{\omega}_s = \alpha_s$ och $\dot{\omega}_d = \alpha_d$ ur Ekvation (3.7) och (6.6). Detta ger

$$\boldsymbol{f}(u,\boldsymbol{x}) = \begin{bmatrix} \alpha_s \\ \alpha_d \\ \omega_s \\ \omega_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1(u,\boldsymbol{x}) \\ f_2(u,\boldsymbol{x}) \\ x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} \tag{6.14}$$

$$f_1(u,\boldsymbol{x}) = \frac{T(AE - B^2) - (A(T - F) + B(C - T))B - C(AE - B^2)}{A(AE - B^2)}$$

$$f_2(u,\boldsymbol{x}) = \frac{A(T - F) + B(C - T)}{AE - B^2}$$

$$
\begin{aligned}
A &= (M+m)R^2 + mr_d^2 + I_s + I_d - 2mRr_d\cos(\theta_d - \theta_s) \\
B &= mRr_d\cos(\theta_d - \theta_s) - mr_d^2 - I_d \\
C &= -(\omega_d - \omega_s)^2 mRr_d\sin(\theta_d - \theta_s) - mgr_d\sin(\theta_d - \theta_s) \\
E &= mr_d^2 + I_d \\
F &= mgr_d\sin(\theta_d - \theta_s) \\
T &= \frac{2NK_t}{R_m}(u - K_e N\omega_d)
\end{aligned}
\tag{6.15}
$$

6.1.6 Svängning

Robotens svängning kontrolleras genom att reglera hjulen var för sig. Ekvation (3.10) kan multipliceras med R/N vilket är faktorn mellan hjulvinkelhastighet och robothastighet vid konstant drivvinkel.

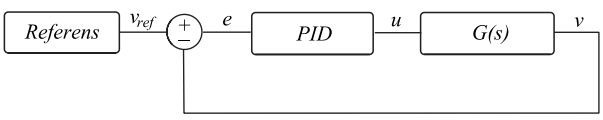
$$
\begin{aligned}
v_v &= v - \frac{RL}{2Nr}\Omega \\
v_h &= v + \frac{RL}{2Nr}\Omega
\end{aligned}
\tag{6.16}
$$

dessa är alltså ”virtuella” hastigheter, motsvarande robotens hastighet vid samma hjulhastighet på båda hjul.

6.1.7 Reglersystemet

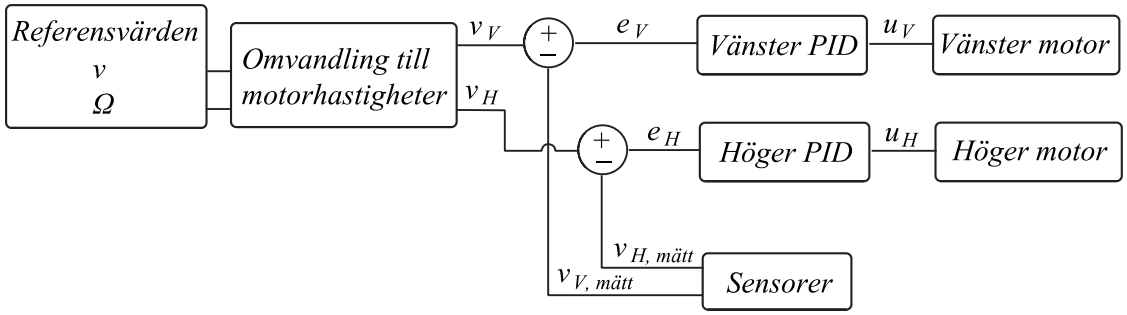
Reglersystemet består av två parallella delar där allt som skiljer sig mellan de två delarna är referenssignalen. Den ena delen av systemet styr högerhjulet och den andra styr vänsterhjulet. Detta för att möjliggöra att de två hjulen ska kunna rotera olika snabbt och åt olika håll för att sfären ska kunna svänga och rotera på stället.

Systemet reglerar mot hastigheten och således kommer referenssignalen till delsystemen bestå av önskad hastighet på respektive hjul. I figur 6.1 åskådliggörs en skiss över ett av delsystemen.



Figur 6.1: Blockschema över ett av de två delsystemen, där G(s) representerar systemet och hastigheten regleras med negativ återkoppling.

Det i roboten realiserade reglersystemet visas i figur 6.2. Den egenutvecklade appen som är beskriven i avsnitt 6.2.1 skickar den önskade hastigheten samt den önskade rotationshastighet för sfären (referensvärden) till mikrokontrollern och med hjälp av ekvation (6.16) översätts referenssignalerna från appen till två referenssignaler för de två delsystemen. Den faktiska hastigheten på respektive hjul mäts med en hallsensor, se avsnitt 3.5.2, och återkopplas för att kunna reglera på önskvärt sätt.



Figur 6.2: Schematisk skiss över robotens regulatorfunktion. Spänningen till respektive motor regleras med en PID-regulator som återkopplas med uppmätt hastighet från sensorerna.

6.1.8 Simulering

För att kunna simulera hur systemet uppför sig byggdes en modell upp i SIMULINK. Modellen utgår ifrån den linjäriserade överföringsfunktionen i ekvation (6.10). Den valda regulatorn har formen

$$F_{PID}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d \frac{N_{filter}}{1 + \frac{N_{filter}}{s}}$$

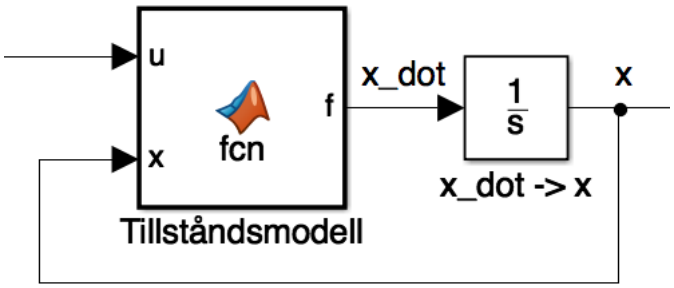
och för att bestämma regulatorparametrarna K_p, K_i, K_d och filterkonstanten N_{filter} användes MATLABs inbyggda verktyg för att ställa in parametrarna för att få ett system som har ett stegsvar med en begränsad översläng och insvängningstid under 6 sekunder. I tabell 6.2 presenteras de erhållna parametervärdena för PID-regulatorn och egenskaperna för systemets stegsvar.

K_p	3,986
K_i	15,630
K_d	-0,374
N_{filter}	3,211
Stigtid	0,51 s
Insvängningstid	4,0 s
Översläng	12,7 %
Amplitudmarginal	6,16 dB vid 6,13 rad/s
Fasmarginal	62,5 grader vid 2,7 rad/s

Tabell 6.2: Parametervärden för PID-regulatorn och egenskaper för systemets stegsvar.

När värdena på regulatorparametrarna var bestämda byggdes den tidsberoende icke-linjäriserade modellen upp utifrån tillståndsmodellen i avsnitt 6.1.5, som beskriver hur systemet utvecklar sig med tiden.

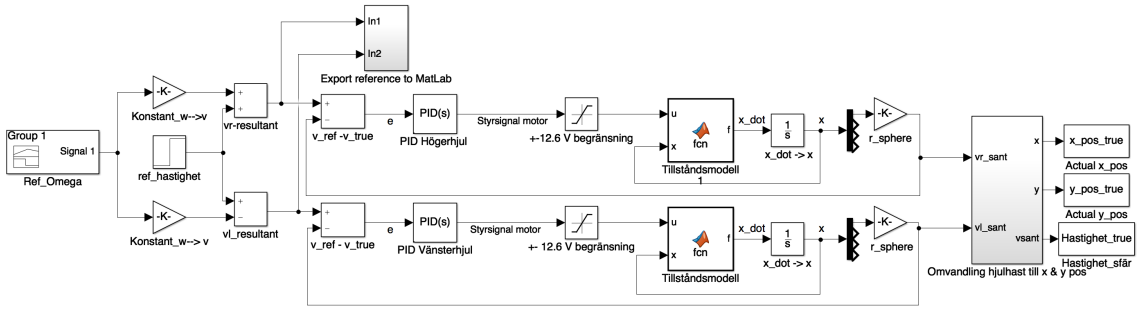
I figur 6.3 åskådliggörs den del av systemet som beräknar hur systemets tillstånd uppdateras beroende på styrsignalen och nuvarande tillstånd. Blocket som heter ”Tillståndsmodell” är en MATLAB-funktion som beräknar $\dot{\boldsymbol{x}} = \boldsymbol{f}(u,\boldsymbol{x})$, se avsnitt 6.1.5. Tillståndsvektorn $\dot{\boldsymbol{x}}$ integreras för att återkopplas samt för att kunna använda nödvändiga tillstånd ur $\boldsymbol{x}$.



Figur 6.3: Den del av SIMULINK-modellen som med hjälp av styrsignalen samt de nuvarande tillstånden beräknar de nya tillstånden utifrån differentialekvationerna som beskriver hur systemet uppför sig.

I figur 6.4 är hela systemet åskådliggjort. Systemet består av två parallella delar där den enda skillnaden för de två delarna är referenssignalens uppbyggnad. Systemet har två referenssignaler, en önskad rotationshastighet och en önskad hastighet. Rotationshastigheten multipliceras med en konstant enligt (6.16) för att översättas till en hastighet. Denna hastigheten adderas till högerhjulets referenshastigheten och subtraheras ifrån vänsterhjulets referenshastighet för att sfären ska svänga. Respektive delsystem innehåller en PID-kontroll återkopplad mot hastighet, en 12,6 V begränsning motvarande batteriets maxspänning och tillståndsmodellen. För att

översätta hastigheten på respektive hjul till sfärens hastighet och position i xy-planet används ekvation (3.25).



Figur 6.4: En bild av den fullständiga SIMULINK-modellen med två referenssignaler längst till vänster som översätts till referenshastigheter för respektive hjul. Faktiskt hjulhastighet återkopplas för att bilda felet som är input till PID-regulatorerna. Styrsignalerna begränsas till ± 12,6 V då batteriet i prototypen har denna begränsning. Styrsignalen matas in i tillståndsmodellen tillsammans med tillståndsvektorn $\boldsymbol{x}$ som beräknar de nya värdena för $\dot{\boldsymbol{x}}$. $\dot{\boldsymbol{x}}$ integreras och återkopplas varpå $x_1 = \omega_s$ multipliceras med sfärens radie och återkopplas.

Med MATLABs inbyggda verktyg för att ställa in regulatorparametrar verifierades att de regulatorparametrar som togs fram med samma verktyg utifrån den linjäriserade modellen var tillfredsställande och verktyget föreslog samma regulatorparametrar för de två modellerna.

När det verifierats att regulatorparametrarna ger ett stegsvar med begränsad översläng och en insvängningstid under 6 sekunder även för modellen i figur 6.4 simulerades hur systemet uppför sig vid olika referenssignaler. Dessa simuleringar presenteras i avsnitt 7.1.

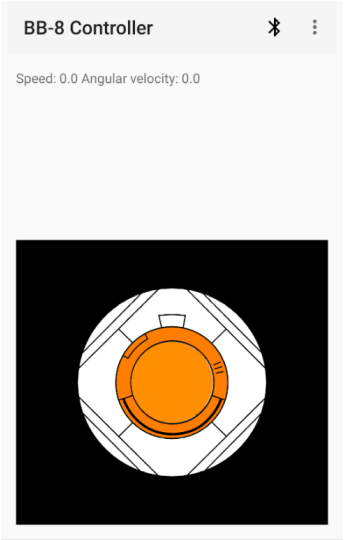
6.2 Mjukvara

För att hantera roboten har en del mjukvara tagits fram. Dels en androidapp skriven i JAVA för styrning av roboten och ett program för Arduino.

6.2.1 App för styrning av robot

För styrning av roboten används en egenutvecklad app till android, skriven i JAVA. Figur 6.5 illustrerar dess gränssnitt som utgörs av en rörlig joystick i ett kartesiskt koordinatsystem med origo i mitten av fältet. Då joysticken (den orangea cirkeln i fältet) manipuleras avläses dess koordinater i koordinatsystemet. Y-koordinaten

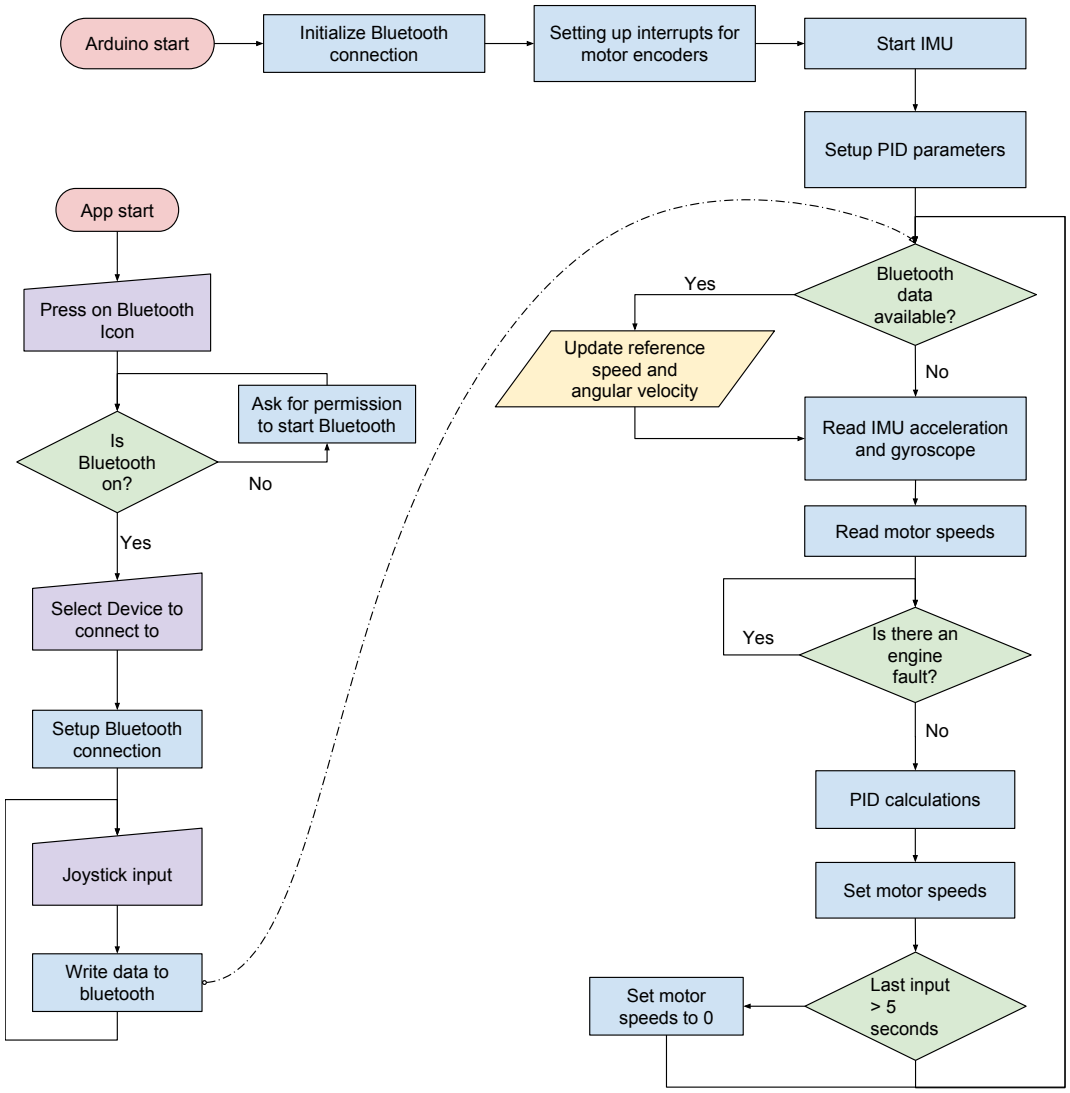
skickas som en referenshastighet medan x-koordinaten är en referens för rotationshastighet. Dessa parametrar skickas via bluetooth till Arduinon där de behandlas i regleringen. Ett flödesschema finns i figur 6.6.



Figur 6.5: Gränsnittet av androidapp som utvecklats för att styra roboten.

6.2.2 Arduinokod

Arduinokoden skrevs i C och utförde beräkningarna för PID-regulatorn. Arduinon i sig kommunicerar med appen via bluetooth. Appen skickar referensvärden till PID-regulatorn. Det återkopplade värdet, i form av hjulens rotationshastighet, mäts ifrån sensorerna på motorerna. Om arduinon inte får någon data via bluetooth på fem sekunder kommer motorerna att stängas av för att undvika att roboten kör iväg om kommunikationen bryts. Se figur 6.6 där programmets struktur presenteras.



Figur 6.6: Flödesdiagram som visar programstrukturen för appen till vänster och arduinon till höger. De är sammanhängande genom att referensvärden skickas via bluetooth, representerat som den streckade pilen i bilden.

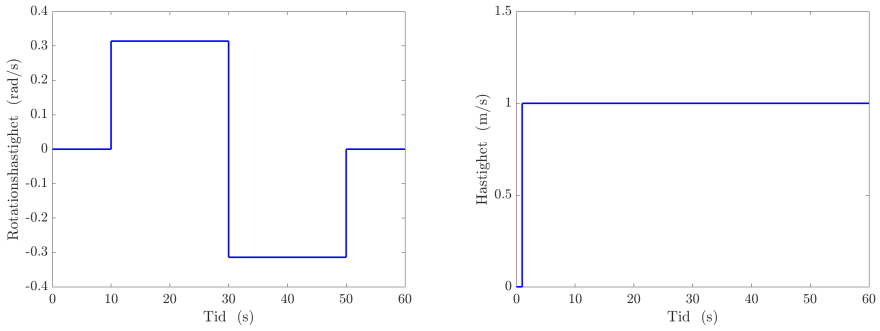
7

Resultat

Resultatkapitlet behandlar genomförda simuleringar och jämförelser med uppmätta hastigheter. Kapitlet tar också upp verifiering av kravspecifikation och monteringen.

7.1 Simulering

En serie simuleringar har genomförts för att testa regleringen. Dessa är en simulering av rutt liknande en åtta i xy-planet, en visualisering av tillståndsmodellens variabler vid ett enhetsteg och till sist en jämförelse mellan simulerat och uppmätt stegsvar.

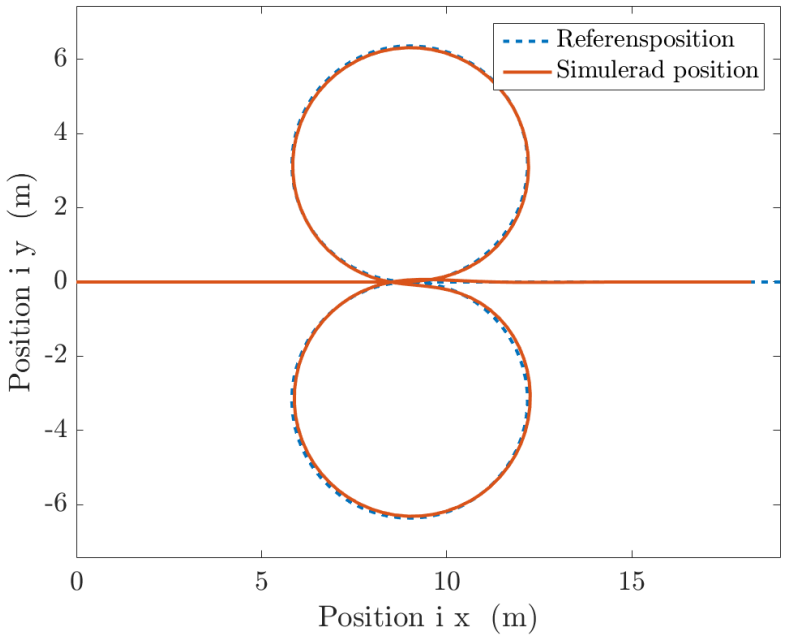


(a) Önskad rotationshastighet för sfären i form av en fyrkantsvåg.

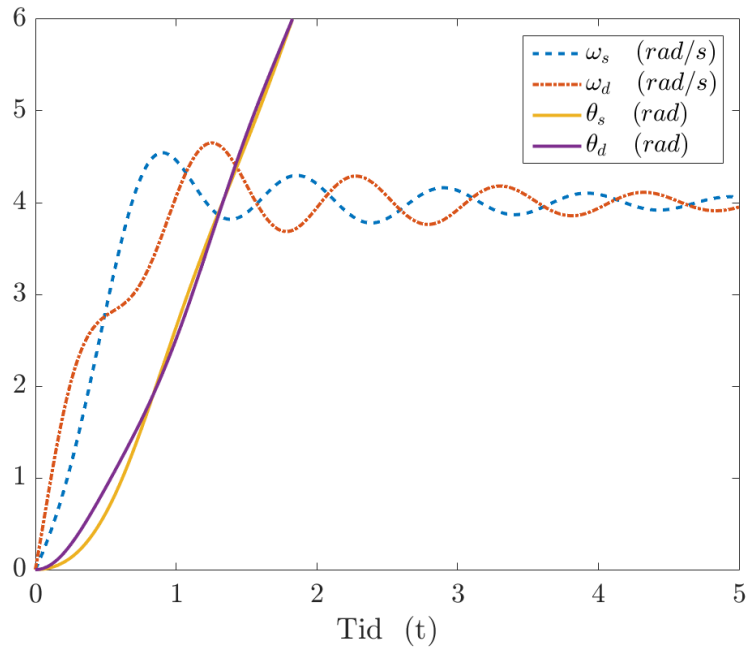
(b) Önskad hastighet för sfären i form av ett enhetssteg.

Figur 7.1: Referenssignaler för att få roboten att röra sig som en åtta i xy-planet.

Referenssignalerna i figur 7.1 valdes för att få sfären att åka i en åtta. Referensrotationshastigheten valdes till en fyrkantsvåg med amplitud $\frac{2\pi}{20}$ för att roboten ska åka i en cirkel på 20 sekunder, först moturs och därefter medurs. I figur 7.2 visas den simulerade positionen i xy-planet för sfären. Som förväntat avviker den simulerade positionen något ifrån referenspositionen.



Figur 7.2: Referenshastighet i form av ett enhetssteg och referens-rotationshastighet i form av en fyrkantsvåg gör att roboten svänger i en cirkel, först moturs och därefter medurs.

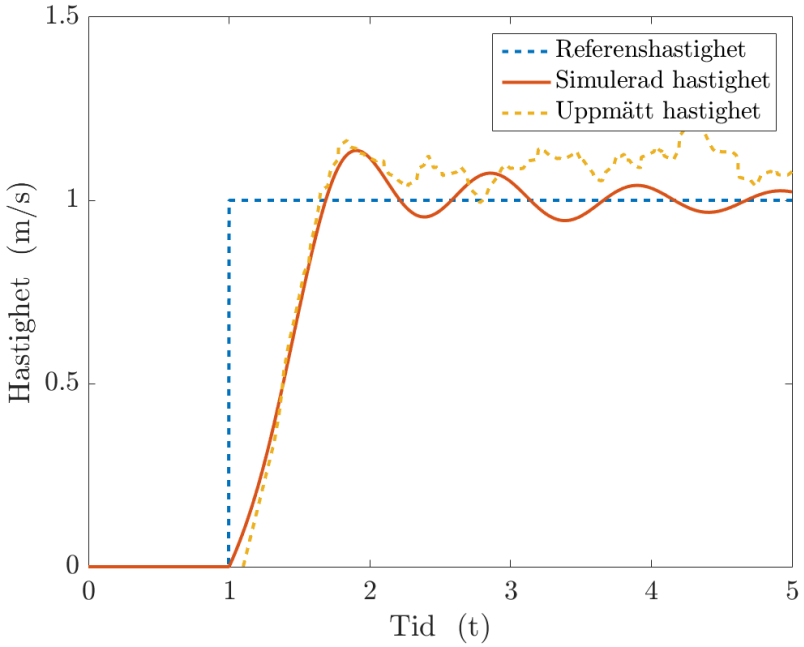


Figur 7.3: Tidsutveckling av tillståndsmodellen då referenssignalen är ett enhetssteg med start vid $t = 1$ s.

Figur 7.3 visar en simulering av tillståndsmodellens variabler. När roboten startar

vid $t = 1$ s ökar drivenhetens vinkelhastighet. Drivenheten klättrar alltså upp i sfären och drivvinkeln, skillnaden mellan θ_d och θ_s, ökar. Drivenheten oscillerar något kring jämviktsläget i accelerationsfasen och drivvinkeln minskar när hastigheterna börjar stabilisera sig.

Till sist simulerades systemets stegsvar och plottades med robotens uppmätta stegsvar i figur 7.4. Robotens hastighet vid referenssignal i form av ett enhetssteg mättes manuellt (genom att ta tid på fasta längdintervall i en slowmotionfilmning av en testkörning) och är alltså inte samma mätdata som återkopplas i systemet.



Figur 7.4: Simulerat stegsvar samt uppmätt hastighet vid ett enhetssteg vid $t = 1$.

7.2 Konstruktion och montering

I ett inledande skede monterades de två halvorna(5.2b och 5.2c) av sfären för att säkerställa att dessa passade ihop samt gick att fästa i varandra med hjälp av skruvförbandet. Efter de skruvats ihop konstaterades att skruvförbandet är tillräckligt starkt och att de två delarna passar tillräckligt bra ihop för att inte bidra med för stora yttre ojämnheter för att störa sfärens körning.

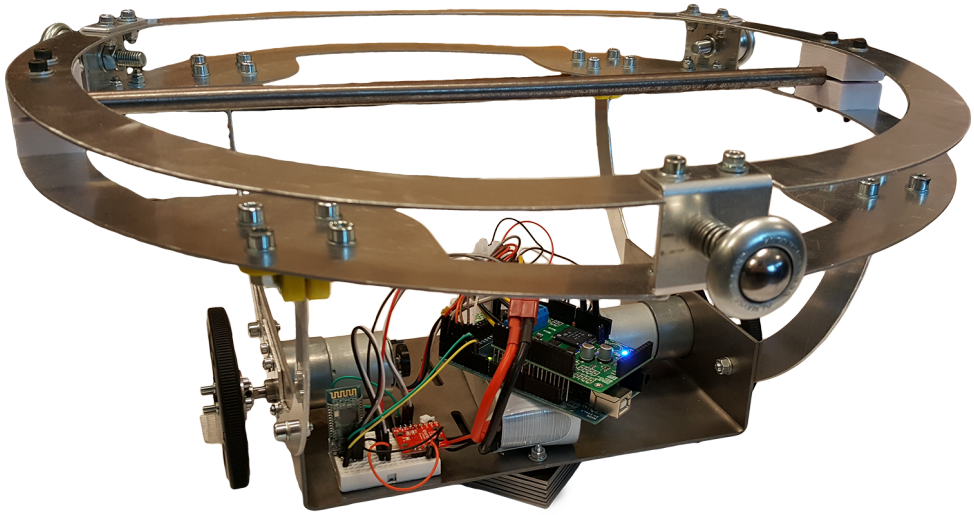
Vid test av huvudet påvisades en magnetisk attraktion mellan huvudet och inre magnethållare. Då det inre magnetfästet rördes för hand följde huvudet med upp till en lutning av ungefär 15° innan det släppte. Huvudet kunde precis lyftas upp-ochner vid kontakt med sfärens magneter, alltså stämmer resultatet bra överens med beräkningarna i ekvation 3.13. Vid vissa ojämnheter i sfärens utsida blev de skjuvande krafterna för stora för magneterna, vilket även det ledde till att huvudet

lossnade. Vid upprätt position som syns i figur 7.5 sitter huvudet stadigt ovanpå kroppen.

Då IDEn, vilken kan ses i figur 7.6, monterats placerades den i sfären och den skruvades igen. Ett första test visade på att den hade stora svårigheter att röra sig oberoende av sfären. Detta då de fjädrande kulrullarna och ojämnheterna av sfären orsakade för stor friktion för motorerna. Fjädrarna kapades och gjorde att kulrullarna inte satt lika hårt mot sfären och var därmed inte lika beroende av ojämnheterna på sfärens insida. Detta ledde till att körningen framåt fungerade väldigt bra, medan rotation fungerade sämre.



Figur 7.5: En komplett BB-8 med huvudet monterat på toppen.



Figur 7.6: Den inre drivande enheten (IDE) som monteras i sfären. Arduino och Motorshield ligger ovanpå det vita batteriet i nedre mitten delen av figuren. Den övre ringen är fäst i två halvringar till den undre delen.

7.3 Verifiering av ställda krav

Den konstruerade prototypen testkördes och dess egenskaper uppmättes. Nedan listas de resultat som erhölls för de krav och önskemål som sattes upp i början av projektet. För detaljerad kravspecifikation, se A.2 i appendix.

Ekonomi

Både kravet på totalkostnad på 5000 kronor och önskemålet om kostnad per enskild komponent på max 1000 kronor uppfylldes, där de dyraste komponenterna var motorerna som kostande 600 kronor styck.

Material

De material som roboten består av är PLA, aluminium och stål. Den innehåller även ett lithiumjon-batteri. PLA (polylaktid) är en naturligt nedbrytbar termoplast och klarar således ställda krav rörande miljöfarliga ämnen. Huruvida lithiumjon-batterier är miljöfarliga eller ej är något som skulle kunna vara subjektivt. Med medveten återvinning i åtanke skulle det kunna konstateras att de valda materialen allihopa uppfyller kravet om att inte vara miljöfarliga. All materiell borde ha gått att handskas med i robotföreningens lokal men då ingen tid spenderats där kan detta krav försummas. Under de testkörningar som gjorts har det konstaterats att sfären inte är för spröd samt att den har tillräcklig friktion mot marken.

Storlek

Sfären dimensionerades efter en diameter på 50 centimeter och därmed uppfylldes både krav och önskemål på denna punkt.

Prestanda

Vid full elektrisk effekt (på 60 W) uppmättes en strömförbrukning på 5 A per motor vilket med batteriets specifikation på 5000 mA h ger en drifttid på $\frac{5000\,\text{mA h}}{2 \cdot 5\,\text{A}} = 0{,}5\,\text{h} = 30$ minuter. Därmed uppfylls både kravet och önskemålet för batteritiden. Vid testkörning uppnåddes en hastighet på cirka 1,3 m/s vilket uppfyller kravet på 1 m/s men inte önskemålet på 2 m/s. Roboten testkördes i backe och kunde rulla uppför en backen med 5 graders lutning. Att få den självbalanserande i 5 graders lutning kräver vidare testning. Med den konstruktion roboten har kan den röra sig i alla riktningar från ett godtyckligt utgångsläge eftersom innanmätet kan rotera utan att sfären roterar vid tillräckligt hög friktion mellan sfären och underlaget.

Konstruktion

Då sfären kan delas i två halvor genom att skruva loss 4 skruvar uppfylls kravet om att regelbundet kunna öppna och stänga sfären. Dock krävs en insexnyckel till detta och därmed uppfylls inte önskemålet om att slippa använda verktyg för att öppna och stänga roboten.

Utseende och design

Då inte tillräckligt med tid fanns att implementera någon teknik i huvudet kan roboten inte ge ifrån sig något ljud. Önskemålet för att se ut som BB-8 och röra sig som BB-8 gick inte in under tidsramen och är därför inte uppfyllt.

Reglering

En app utvecklades för att kunna styra roboten via bluetooth och med de tester som gjorts har det verifierats att roboten går att styra trådlöst med över 10 meters räckvidd. På grund av att nästan all reglering sitter internt i roboten och det enda som appen gör är att skicka referensdata beslutades det att de parametrar som bestäms till PID:en inte ändras från appen.

8

Diskussion

Här diskuteras de resultat som erhållits. Eventuella problem som uppstod under projektets gång och tankar som uppstått vid olika moment presenteras.

8.1 Konstruktion

Detta avsnitt syftar till att belysa och diskutera aspekter rörande robotens ingående delar samt resultatet av tester av dessa.

8.1.1 Sfär

När sfären skulle konstrueras uppstod problem med dimensioneringen av delarna. Första versionen av sfären var uppdelad i åtta delar - något som både gav en stadig struktur och var enkelt att räkna på tack vare geometrin på en åttondels sfär. Tyvärr var den volym som de tillgängliga 3D-printarna kunde skriva ut en begränsande faktor, vilket ledde till en del extrajobb. Sfären fick delas upp i långt fler än åtta delar (44 delar) vilket både försämrade stadgan i strukturen och tog bort det intuitiva med att rita upp delar av en sfär i ett CAD-program.

I början skrevs några få delar ut i syfte att testa hållfastheten med olika sorters lim. I samband med detta upptäcktes några brister i designen. Ett exempel var att stadgan inte var tillräckligt hög mellan varje enskild komponent och därför lades fler hål för metallpluggar till. Toppdelarnas passform med ”mellanringen” reviderades för att få bättre fäste med varandra vilken innebär att den överlappning som beskrivs under konstruktionen i avsnitt 5.1 lades till.

En större nackdel med designen på sfären är att vid testkörning går det inte att se hur IDE beter sig eftersom sfären är gjord i vit PLA. Det går därför inte att se igenom skalet och det blir svårt att tolka resultatet av olika insignaler. En lösning hade kunnat vara att konstruera sfären i genomskinlig PLA istället och då vänta med att måla sfären tills regleringen var klar. Alternativt hade mer tid kunnat läggas på att hitta någon som tillverkar genomskinliga plastsfärer, något som avfärdades

i början av projektet efter lite efterforskningar då det verkade svårt. Istället löstes problemet genom att montera på röda lysdioder längst bak på IDEn som riktades utåt och lös genom sfären. Med hjälp av dessa var det möjligt att se en punkt av IDEn vid testkörning och därmed möjliggjordes enklare tolkning av IDEns beteende.

8.1.2 IDE

IDEn genomgick ett antal iterationer innan den slutgiltiga konstruktionen kunde fastställas. Initalt bestod den av ett flertal stora 3D-utskrivna komponenter, men en majoritet av dessa komponenter ersattes med detaljer tillverkade i aluminum. Detta för att minska tidsåtgången vid tillverkning men också för att kunna inneha liknande styvhetsegenskaper med en lägre totalvikt.

Den valda designen för IDEn har både styrkor och brister. Till styrkorna hör att den är modulär vilket medför att förändringar i konstruktionen kan göras utan att behöva modifiera mer än den berörda komponenten. Istället för användning av t.ex. svetsförband skruvas merparten av IDEn ihop vilket medför en flexiblare design samtidigt som komplexiteten och antal rörliga delar är förhållandevis lågt. Att justera antalet tyngder möjliggör en justering av tyngdpunkten vilket kan medföra bättre resultat vid körning.

Däremot är roboten svår att kontrollera på grund av IDEns konstruktion. Då hjulen inte kan glida i sidled börjar IDEn svänga när den frångår sitt horisontella läge. Huruvida en ökning av vikten hade kunnat bidra till att motverka detta fenomen bör undersökas vid en eventuell vidareutveckling. Vidare kan inte roboten kontrolleras att svänga åt önskat håll under körning. Detta kan bero på att ingen centripetalkraft kan skapas med vårt koncept och att friktionen mot marken är liten. Samtidigt svänger roboten tillfredsställande när den står stilla utan att sfären roterar, något som tyder på att friktionen är tillräcklig för att svänga. Ett annat koncept med t.ex. en i sidled skiftande massa hade kunnat lösa detta problem genom att orsaka en centripetalkraft.

För att bättre efterlikna den faktiska BB-8 hade en tiltram behövt tillverkas. Denna tillverkades inte eftersom fokus låg på att få sfären att köras och regleras. Detta hade möjliggjort att köra roboten med huvudet monterat. Däremot, vid manuellt testande, tenderade huvudet att släppa vid ojämnheter på utsidan av sfären då skjuvkrafterna blir större än den magnetiska attraktionskraften. Orsaken till detta är främst tre stycken problem som hade behövt undersökas vid en eventuell vidareutveckling. Dels är magneterna placerade för långt från varandra för att medföra en tillräcklig kraft, vilket innebär att tjockleken på sfären hade behövt vara mindre alternativt att magneterna hade behövt vara starkare. Ett annat problem är att kulrullarna har relativt små diametrar och är väldigt styva, vilket gör dem känsliga för höjdskillnader i skarvarna på sfärens utsida. Mjukare kulrullar med större dimension hade kunnat medföra en förbättrad prestanda. Slutligen är ojämnheterna i sfärens skarvar ett problem i sig. För vidareutveckling borde alternativa tillverk-

ningsmetoder undersökas samt huruvida att spackla/behandla sfären i syfte att öka ytfinheten hade varit lämpligt.

8.2 Sensordata

Regleringen sker lämpligen mot robotens hastighet. IMU-sensorn mäter inte hastigheten direkt men denna kan i teorin integreras fram enligt ekvation (3.21). Detta visade sig fungera dåligt. Hastighetsvärdena är mycket opålitliga och felet ackumuleras till följd av integrationen. Accelerationsmätvärdena är dels brusiga och varierar dels betydligt snabbare än mikrokontrollerns tidssteg tillåter. Ett annat problem är att drivvinkeln som används för att transformera koordinatsystemen inte är tillförlitlig vid rörelse, detta då tyngdaccelerationen antas vara den dominerande termen. Delar av tyngdaccelerationen antas då vara i den horisontella rörelseriktningen vilket ger ett opålitligt hastighetsvärde. Problemet löstes genom att istället mäta motorernas hastighet med halleffektsavkodare, vilket ger tillfredsställande noggrannhet för ändamålet.

8.3 Reglering

Uppmätt och simulerat stegsvar för hastighet visade sig vara relativt lika. Detta tyder på att modelleringen är verklighetstrogen. Särskilt stigtiden stämmer mycket bra. Det simulerade ocillerande beteendet syns inte i det uppmätta stegsvaret, men detta beror nog mer på mätmetodens onoggrannhet.

För en radiostyrd robot ger hastighetsreglering intuitivt naturlig visuell återkoppling och att reglera mot hastigheten är ett bra val då den är lätt att mäta och återkoppla.

Att dela upp systemet i två parallella delar där varje del reglerar hastigheten på respektive hjul till önskad hastighet blir korrekt i simuleringarna givet att modellen är korrekt. Detta då fel i hastighet och rotationshastighet är proportionella mot höger och vänster återkopplad hastighet.

För den verkliga roboten leder denna uppdelningen till ett visst fel, då ett flertal approximationer har gjort i modelleringen. Exempelvis kan glidning ske mot golvet och en centripetalkraft behöver skapas. Roboten kommer alltså inte vara helt centrerad i sfären, vilket ger vissa fel i hastighet och rotationshastighet även om reglerfelen är små i de två delsystemen.

Att reglera mot sfärens position i rummet hade varit ett annat alternativ, särskilt vid autonom navigation där det oftast är viktigare att nå önskad position än att göra detta på en specificerad tid. Praktiska problem med att mäta position gjorde att detta alternativ bortsågs från. Något som däremot är enkelt att mäta är acceleration.

Denna skulle sannolikt vara fördelaktig att reglera efter, men skulle vara mindre intuitivt som referenssignal när roboten radiostyrs.

8.4 Applikationens gränssnitt

Appen är utformad som en joystick som i figur 6.5. Joysticken skickar data i form av x- och y-koordinater där x-koordinaten är rotationshastighet och y-koordinaten är hastigheten. Eftersom joysticken är begränsad till en cirkel med radie 1 kan appen inte skicka maxhastighet samtidigt som maxrotationshastighet. Genom att istället utnyttja två reglage, en för hastighet och en för rotation hade problemet med att inte kunna skicka maximalt utslag på båda hastigheterna. Ett annat sätt är att låta användaren skriva in direkta värden, detta hade gett mer precision till kostnad av att det tar lång tid att ge ny data jämfört med att flytta något på skärmen. Detta alternativ är bättre för testning.

9

Slutsats

Syftet med detta projekt har varit att bygga en fjärrstyrd robot med en sfärisk kropp som efterliknar roboten BB-8 från från filmen *Star Wars: The Force Awakens*. Att designa en mobil robot formad som en sfär med den drivande enheten på insidan är en process som inte liknar den att göra en klassisk fyrhjuling eller ens något som överhuvudtaget har sin drivande enhet i direktkontakt med omgivningen. Arbetet med styrning och reglering av en sfärisk robot innehar inte samma intuition och det är fler fenomen, så som friktion, tyngdpunkt och tröghet, som spelar en större roll och behövs ta mer hänsyn till eftersom den drivande enheten har kontakt med sfären som i sin tur har kontakt med omgivningen. På så sätt fås en mer komplex struktur med fler fel som kan uppstå och ett högre krav på tolerans fås. Att dessutom montera ett huvud som magnetiskt skall attraheras mot insidan och behålla en tillräckligt korrekt position relativt sfären skapar ytterligare en svårighetsgrad när det kommer till reglering.

Förutom huvudet finns det en rad fördelar med sfäriska robotar. Trots att den reglering som åstadkoms under detta projekt inte riktigt uppnådde önskad grad sågs en potential hos roboten. Som nämnt i bakgrunden skulle en robot av sfärisk typ klara sig väldigt bra i fientliga miljöer eftersom alla känsliga delar sitter på insidan. Sfäriska robotar skulle kunna göras vattentäta och väldigt stöttåliga. Dessutom har de möjligheten att omedelbart ändra rikting utan att vara alltför beroende av eventuella hinder från omgivningen.

Med dessa fördelar i åtanke rekommenderas och uppmuntras vidare undersökning kring sfäriska robotar för att ytterligare upptäcka potentiella fördelar med dessa. I diskussionsavsnittet behandlas ett flertal problem relaterade till funktionen som bör undersökas vid en eventuell vidareutveckling.

Litteratur

Halme, A., Schonberg, T. & Wang, Y. (1996). Motion control of a spherical mobile robot. I *Advanced motion control, 1996. amc'96-mie. proceedings., 1996 4th international workshop on* (Vol. 1, s. 259–264). IEEE.

Bhattacharya, S. & Agrawal, S. (2000). Spherical rolling robot: a design and motion planning studies. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, *16*(6), 835–839. doi:10.1109/70.897794

Alves, J. & Dias, J. (2003). Design and control of a spherical mobile robot. *Proceedings of the I MECH E Part I Journal of Systems & Control Engineering*, *217*(6), 457–467. doi:10.1243/095965103322747061

Nagai, M. (2008). Control System for a Spherical Robot, 108. Hämtad från http://epubl.ltu.se/1653-0187/2008/116/

Vokoun, D., Beleggia, M., Heller, L. & Šittner, P. (2009). Magnetostatic interactions and forces between cylindrical permanent magnets. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, *321*(22), 3758–3763.

Smoot, L. & Ruiken, D. (2011 september). *Magnetic spherical balancing robot drive*. Google Patents. US Patent App. 12/726,136. Hämtad från https://www.google.com/patents/US20110231013

Alciatore, D. G. & Histand, M. B. (2012). *Introduction to mechatronics and measurement systems*. McGraw-Hill. Hämtad från http://chans.lib.chalmers.se/record=b1567127

Lee, J. & Park, W. (2013). Design and path planning for a spherical rolling robot. *Proceedings of the ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. doi:10.1115/IMECE2013-64994

BB-8BuildersClub. (2015). Hämtad från http://bb8builders.club/

Ghariblu, H. (2015). A new mobile ball robot-dynamic modeling and simulation. *Applied Mathematical Modelling*, *39*(10), 3103–3115. doi:10.1016/j.apm.2014.11.020

Lindgren, J. (2015). Bb-8 rotation analysis. Hämtad: 2017-04-07. Hämtad från https://www.youtube.com/watch?v=MpiayPUGaog

Ryberg, J. (2015 december). Star wars bb-8 ger draghjälp åt svensk robotboll på mars. Hämtad från http://www.nyteknik.se/fordon/star-wars-bb-8-ger-draghjalp-at-svensk-robotboll-pa-mars-6343104

Chen, J., Ye, P., Sun, H. & Jia, Q. (2016 november). Design and motion control of a spherical robot with control moment gyroscope. I *2016 3rd international conference on systems and informatics (icsai)* (s. 114–120). IEEE. doi:10.1109/ICSAI.2016.7810940

Sadeghian, R. & Masouleh, M. T. (2016 november). Controller tuning based on optimization algorithms of a novel spherical rolling robot. *Journal of Mechanical Science and Technology*, *30*(11), 5207–5216. doi:10.1007/s12206-016-1038-0

Prisjakt och Handelns utredningsinstitut. (2017 april). Rekordstarkt köpintresse för robotgräsklippare. Hämtad från http://www.hui.se/nyheter/rekordstarkt-kopintresse-for-robotgrasklippare

Sánchez, G. (2017 april). How does bb-8 work? Hämtad från http://howbb8works.com/

Bicchi, A., Balluchi, A., Prattichizzo, D. & Gorelli, A. (u.å). Introducing the SPHERICLE": an experimental testbed for research and teaching in nonholonomy. I *Proceedings of international conference on robotics and automation* (Vol. 3, s. 2620–2625). IEEE. doi:10.1109/ROBOT.1997.619356

A

Appendix

A.1 Pughmatris

Funktioner	Howbb8works	1	2	5
Självbalansering	0	0	0	0
Framdrivning	0	0	0	0
Kontakt sfär/drivning	0	0	0	0
Kommunikation	0	1	1	1
Sfäraccess	0	1	1	1
Reglering sfär	0	1	1	1
Huvudrörelse	0	0	0	-1
Huvudrotation	0	0	0	0
Infästning huvud/sfär	0	0	0	0
Energitillförsel	0	0	0	0
Ekonomi	0	1	1	1
Komplexitet	0	1	1	1
Summa	0	5	5	4
Rank	REF	1	1	3

1 (REF)	2	5
0	0	0
0	0	0
0	0	1
0	0	0
0	0	0
0	0	0
0	0	-1
0	0	0
0	0	0
0	0	0
0	0	1
0	0	1
0	0	2
3	3	1

1	2	5 (REF)
0	0	0
0	0	0
-1	-1	0
0	0	0
0	0	0
0	0	0
1	1	0
0	0	0
0	0	0
0	0	0
-1	-1	0
-1	-1	0
-2	-2	0
3	3	1

Tabell A.1: Pugh-matriser för jämförelse mellan olika koncept.

A.2 Kravspecifikation

Ekonomi	K/Ö	Kravställare
Kosta max 5000 kr	K	Institution
Inga enskilda komponenter över 1000 kr	Ö	Grupp
Material		
Inte tillverkas i miljöfarliga ämnen	K	Grupp
Tillverkad i material som man får handskas med på robotföreningen	K	Grupp
Inte för sprött material	K	Grupp
Tillräcklig friktion mellan sfär och mark	K	Grupp
Storlek		
Diameter på sfär 40-60 cm	K	Grupp
Diameter på sfär 50 cm	Ö	Grupp
Prestanda		
Batteritid vid full effekt 15 minuter	K	Grupp
Batteritid vid full effekt 30 minuter	Ö	Grupp
Maxhastighet 1 m/s	K	Grupp
Maxhastighet 2 m/s	Ö	Grupp
Stillastående på plan med lutning <5 grader	K	Grupp
Stillastående på plan med lutning <10 grader	Ö	Grupp
Rörelse i alla riktningar	K	Grupp
Konstruktion		
Kunna regelbundet öppna och stänga robot	K	Grupp
Kunna öppna robot utan verktyg	Ö	Grupp
Utseende/design		
Se ut som BB-8	Ö	Grupp
Huvudet agerar som i filmen	Ö	Grupp
Roboten låter som BB-8	Ö	Grupp
Reglering		
Användare kan styra robot trådlöst upp till 5 meter	K	Grupp
Användare kan styra robot trådlöst upp till 10 meter	Ö	Grupp
Användare kan styra robot med mobilapp	Ö	Grupp
Användare kan ändra parametervärden i app	Ö	Grupp

Tabell A.2: Kravspecifikation

A.3 Morfologisk matris

[h] Självbalansering	Accelerometer / Givare / sensorer	Tyngdpunkt över kontaktytan	Gyro		
Framdrivning	Fristående motor i egen konstruktion	Radiostyrd bil	Förändra tyngdpunkten	Roterande grej som driver pga rörelsemängdsmoment	
Kontakt mellan sfär och drivande enhet	Omnihjul	Vanliga hjul	Larvband	Vanliga hjul / sfär	Vanliga hjul / omni
Kommunikation mellan robot och förare	Bluetooth	Wifi	RF-signaler	IR	
Sfär	Kluven längs symmetriaxel	Ha ett mindre hål			
Reglering - sfär	Microcontroller (arduino, raspberry pi, annan)	Dator			
Huvud	Rörligt	Direkt ovanför tyngdpunkten			
Huvud Rotation	Ingen rotation	Microcontroller med servomotor			
Infästning huvud-sfär	Magneter	Hjul	Supraledning	Fläkt	
Energitillförsel	Batteri	Reaktor	Solcell		

Koncept 1	**Koncept 2**	**Koncept 3**	**Koncept 4**	**Koncept 5**	**howbb8works**
Accelerometer / Givare / sensorer	Accelerometer / Givare / sensorer	Tyngdpunkt under mitten	Accelerometer / Givare / sensorer	Accelerometer / Givare / sensorer	Accelerometer / Givare / sensorer
Fristående motor i egen konstruktion	Fristående motor i egen konstruktion	Fristående motor i egen konstruktion	Roterande grej som driver pga rörelsemängdsmoment	Fristående motor i egen konstruktion	Fristående motor i egen konstruktion
Omnihjul	Omnihjul	Omnihjul	Larvband	Vanliga hjul / sfär	Omnihjul
Wifi	Bluetooth	Bluetooth	IR	Bluetooth	Wifi
Kluven längs symmetriaxel	Kluven längs symmetriaxel	Kluven längs symmetriaxel	Ha ett mindre hål	Kluven längs symmetriaxel	Ha ett mindre hål
Microcontroller (arduino, raspberry pi, annan)	Microcontroller (arduino, raspberry pi, annan)	Microcontroller (arduino, raspberry pi, annan)	Dator	Microcontroller (arduino, raspberry pi, annan)	Microcontroller (arduino, raspberry pi, annan)
Rörligt	Rörligt	Direkt ovanför tyngdpunkten	Rörligt	Direkt ovanför tyngdpunkten	Rörligt
Microcontroller med servomotor	Microcontroller med servomotor	Ingen rotation	Ingen rotation	Microcontroller med servomotor	Microcontroller med servomotor
Magneter	Magneter	Magneter	Supraledning	Magneter	Magneter
Batteri	Batteri	Batteri	Reaktor	Batteri	Batteri

Tabell A.3: Morfologisk matris över de framtagna koncepten.

A.4 GANTT-schema

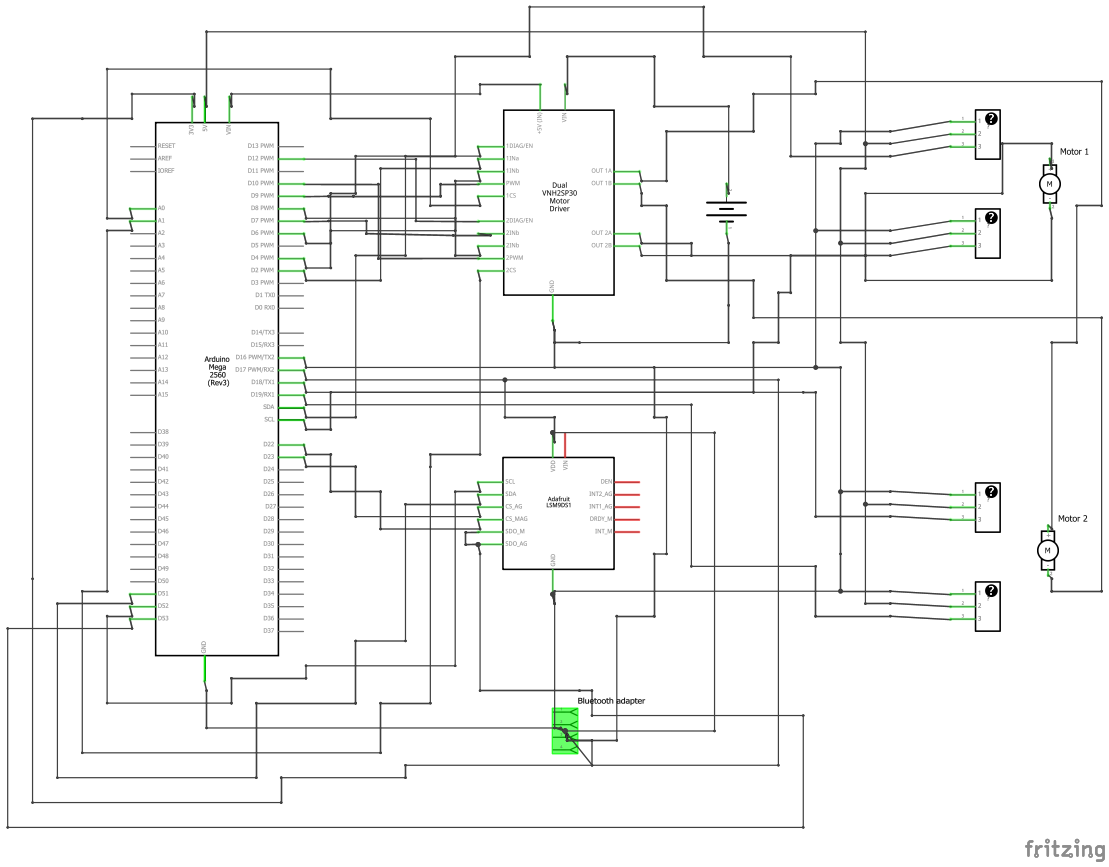
GANTT-schema
BB-8 Grupp 3

Projektledare:	Bytes löpande
Startdatum:	2017-01-16
Start projektvecka:	1

Aktivitet	Ansvarig	WBS	Ber.	Startdat.	Slutdat.
Aktivitet 1 - Etablera projeket	Grupp	1		2017-01-16	2017-02-09
Skapa projektplan - milstolpar och ganttschema		1.1		2017-01-27	2017-01-31
Skriva gruppdokument - fastställa spelregler	Grupp	1.2		2017-01-24	2017-01-24
Utforma kontroll- och uppföljningsrutiner	Grupp	1.3	1	2017-01-24	2017-01-24
Färdigställa planeringsrapport		1.4		2017-01-16	2017-02-06
Redovisa planeringsrapport - Deadline 1		1.5		2017-02-09	2017-02-09
Aktivitet 2 - Konceptgenerering		2		2017-01-31	2017-02-06
Skriva preliminär kravspecifikation		2.1		2017-01-31	2017-02-03
Konceptgenerering		2.2		2017-01-31	2017-02-03
Konceptval		2.3		2017-01-31	2017-02-03
Konceptgenerering klar - Deadline 2					
Aktivitet 3 - Konstruktion		3		2017-01-31	2017-03-10
Bygga upp en simplifierad matematisk modell		3.1		2017-01-31	2017-02-05
Utveckla den matematisk modellen		3.2		2017-02-05	2017-03-17
Val av konstruktionsparametrar (dimensionering av motorer, material osv)		3.3		2017-02-05	2017-02-15
CADa		3.4		2017-02-05	2017-02-15
Mittredovisning - Deadline 3		3.7		2017-03-28	2017-03-28
Aktivitet 4 - Rapport		4		2017-02-10	2017-05-12
Slutrapport - Deadline 4		4.1		2017-05-12	2017-05-12
Aktivitet 5 - Byggnation av robot		5		2017-02-15	2017-03-10
Robot färdig - Deadline 5		5.1		2017-03-10	2017-03-10
Reglera robot		6		2017-03-10	2017-05-24
Minimässa - Deadline 6		6.1		2017-05-24	2017-05-24

Tabell A.4: Gantt-schema över projektets tidsplan. Observera att den grafiska representationen är bortklippt av utrymmesskäl.

A.5 Kopplingschema



Figur A.1: Kopplingschema illustrerat m.h.a. FRITZING.