CHALMERS
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Vidareutveckling och konstruktion av sfärisk robot

Kandidatarbete

Vincent Adler
David Johansson
Anton Olsson
Sebastian Simmons
Natasha Svensson

Institutionen för Signaler och System
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2018

Vidareutveckling och konstruktion av sfärisk robot

Författare
Vincent Adler
David Johansson
Anton Olsson
Sebastian Simmons
Natasha Svensson

Chalmers tekniska högskola

14 maj 2018

Sammanfattning

Den runda roboten från de senaste *Star Wars*-filmerna kallas BB-8 och dess funktioner kan vara mycket användbara inom flertalet områden och miljöer. Denna rapport fokuserar på en fjärrstyrd sfärisk robot med en inre drivenhet på hjul som åker inuti sfären och till funktion kan liknas med en radiostyrd bil. Rapporten fokuserar även på att konstruera ett magnetiskt fasthållet huvud som kompenserar sin position med färdriktningen samt kan rotera runt sin egen axel. Rapporten samt prototypen bygger vidare på tidigare arbeten inom samma ämne där problem fanns med bland annat reglering och åtkomlighet.

Resultaten gav en fungerande huvudupphängningsmekanism skapad genom konstruktion av 3D-printade komponenter, servomotorer och magneter. Dessutom tillverkades en servicelucka för lättare åtkomst till den inre drivenheten. Reglering och styrning förbättrades genom simuleringar, programmering och förändrad fjärrstyrningsapplikation. Förbättringsmöjligheter finns dock gällande reglering, funktioner och sfärens ytjämnhet.

Abstract

The spherical robot from the latest *Star Wars*-movies is called BB-8 and its functions could be very useful in many fields and environments. This report focuses on a remote-controlled spherical robot with an internal drive unit on wheels that drives inside the sphere and has functions similar to a remote-controlled car. The report also focuses on constructing a magnetically applied head that compensates its position to the spheres direction and can rotate around its own axis. The report and the prototype continues building on previous works within the same subject where there were problems including control and access to the internal drive unit.

The results gave a functional head-mechanism that was created using 3D-printing, servomotors and magnets. A service hatch was also created for easier access to the internal drive unit. Control and steering was improved through simulations, programming and an altered remote-control application. There are still some improvement opportunities regarding control and the spheres surface.

Innehåll

1 Inledning **1**
- 1.1 Bakgrund . . . 1
- 1.2 Syfte . . . 1
- 1.3 Avgränsningar . . . 1

2 Teoretisk referensram **3**
- 2.1 Teorin bakom den inre drivenheten . . . 3
- 2.2 Teorin bakom huvudet . . . 4
- 2.3 Teorin bakom regleringen . . . 5

3 Utgångsläge **6**

4 Konstruktion av robot **9**
- 4.1 Sfär . . . 9
- 4.2 Huvud och dess upphängningsmekanism . . . 9
  - 4.2.1 Servoberäkningar . . . 13
  - 4.2.2 Magnetkraftsberäkningar . . . 16

5 Reglering och mjukvara **18**
- 5.1 Undersökning av reglering och mjukvara . . . 18
- 5.2 Simulering . . . 18
  - 5.2.1 Kroppen . . . 18
  - 5.2.2 Huvudet . . . 23
- 5.3 Programmering av Arduino . . . 25
- 5.4 Fjärrstyrning . . . 26

6 Resultat **29**
- 6.1 Konstruktion . . . 29
  - 6.1.1 IDE och huvudupphängningsmekanism . . . 29
  - 6.1.2 Sfär . . . 30
- 6.2 Reglering och mjukvara . . . 31
  - 6.2.1 Programmering och tester . . . 31
  - 6.2.2 Fjärrstyrning . . . 33
- 6.3 Verifiering av ställda krav . . . 33
  - 6.3.1 Sfär och huvud ska kunna balansera stillastående på plan mark . . . 33
  - 6.3.2 Huvudet ska kunna luta 20 grader i alla riktningar . . . 34

6.3.3 Roboten ska kunna framföras i 1.5 m/s 35
6.3.4 Hela konstruktionen ska kunna framföras 35
6.3.5 Roboten ska kunna ändra och behålla färdriktning . . . 36
6.3.6 Huvudet ska följa med vid ändrad färdriktning 36
6.3.7 Stanna kontrollerat utan oscillation inom 5 m 36
6.3.8 Huvudet ska kunna rotera 360° runt sin egen axel . . . 36
6.3.9 Huvudet ska kunna styras oberoende av färdriktning . 37
6.3.10 Önskemål att roboten ska kunna rotera huvudet 360° från stillastående på 1s och att roboten ska kunna rotera huvudet med hastigheten 60 rpm 37
6.3.11 Designkrav och önskemål 37

7 Diskussion **38**
7.1 IDE 38
7.2 Sfär 38
7.3 Huvud 39
7.4 Reglering och programmering 40
7.5 Fjärrstyrning 41
7.6 Reflektion kring behovet av ytterligare kunskap 42

8 Slutsats **43**

Referenser **44**

A Bilagor **46**
A.1 Kravspecifikation 46
A.2 Kod 47
A.3 CAD-filer 47

Beteckningar

k_p	Proportionell förstärkning
k_i	Integrationsförstärkning
k_d	Deriveringsförstärkning
N_{filter}	Filterkonstant
θ	Vinkel (°)
I_{rot}	Tröghetsmoment för huvudet runt dess centrumaxel (kgm^2)
I_h	Tröghetsmoment huvudarmen vid lutning (kgm^2)
R, r	Radie (m)
$\dot{\omega}$	Vinkelacceleration (m/s^2)
ω	Vinkelhastighet (m/s)
c	Integrationskonstant
T	Moment (Nm)
a	Acceleration (m/s^2)
g	Tyngdaccelerationen (m/s^2)
μ	Friktionstal
μ_0	Permeabilitet i vakuum (H/m)
m	Massa (kg)
l	Längd (m)
F	Kraft (N)
M	Magnetisk flödestäthet (T = Wb/m^2)
IDE	Inre Drivenhet
FDM	Fused Deposition Modeling
SLS	Selective Laser Sintering

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Filmindustrin har givit mycket inspiration till ingenjörsindustrin med olika bilder av framtiden. I de senaste Star Wars-filmerna har det inkluderats en sfärisk robot (kallad BB-8) som utan problem rullar fram över såväl plana golv som sand och gräs. Det finns många personer som återskapat roboten från filmen varav några är studenter på Chalmers [1] [2]. Robotarna som skapats har varit mycket olika rent konstruktionsmässigt, och det finns mycket kvar att göra för att de ska leva upp till filmernas presentation av en sfärisk robot. Det genomgående problemet har varit att få huvudet att sitta kvar på sfären under drift och att kunna ändra orientering.

Att skapa en sfärisk robot med ett balanserande, styrbart huvud har många praktiska applikationer, som att ta sig fram över ett stort mängd olika terränger och ha verktyg applicerade i det styrbara huvudet för diverse arbetsuppgifter.

För Chalmers kan en välutvecklad sfärisk robot användas i marknadsföring för att kunna locka nya studenter samt kunna ligga till grund för projekt med robotar inom produktionsindustrin likväl som landfarkoster inom rymdindustrin.

1.2 Syfte

Syftet med kandidatarbetet är att utveckla en sfärisk robot med fjärrstyrning som med gånghastighet kan rulla kontrollerat i önskad riktning på plant underlag. Roboten ska vara utrustad med ett huvud som behåller stationärt tillstånd på kroppen under färd. Huvudet ska kompensera sin position med färdriktningen och kunna roteras via fjärrstyrning.

1.3 Avgränsningar

För att projektet ska vara genomförbart måste vissa avgränsningar göras. Valda avgränsningar för detta arbete är följande:

1. Roboten behöver inte kunna interagera med sin omgivning och behöver därmed inte ha några sensorer för att känna av sin omgivning.

2. Roboten behöver endast kunna köras på ett plant underlag.

3. Roboten behöver ej tåla väder och vind.

4. Huvudets position behöver bara kunna placeras på övre delen av sfären (dvs t.ex ej vid 90 graders vinkel från Y axeln).

5. Robotens kropp behöver ej kunna göra någonting autonomt utan ska endast kunna reagera på kommandon via fjärrstyrning. Fjärrstyrningen skall reglera hastighet hos sfären och accelerationer hos sfären skall regleras för att få jämna rörelser vid hastighetsförändringar.

6. Robotens huvud behöver ej kunna göra någonting autonomt utan ska endast kunna reagera på kommandon via fjärrstyrning.

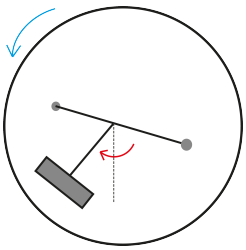
2 Teoretisk referensram

Viktig teori som behövs för ökad förståelse för val och antaganden som gjorts i rapporten. Det innefattar teori gällande inre drivenhet, huvud på en sfärisk robot samt formler använda vid regleringsutvecklingen.

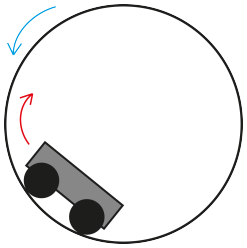
2.1 Teorin bakom den inre drivenheten

Att få en sfär att röra sig med endast en inre drivenhet (IDE) är ett problem som har lösts på flera olika sätt. Genom att flytta på tyngdpunkten hos sfären kan det skapas en acceleration men också genom att driva ett eller flera hjul mot sfärens insida. Förflyttning av tyngdpunkten hos en sfärisk robot kan göras med hjälp av en tyngdplatta upphängd i en axel genom sfärens centrum, som med en motor kan flyttas som en pendel. Se Figur 1. Ett exempel på denna typ av robot är den svensktillverkade GroundBot [3]. Designen gör att två punkter (på sidorna av sfären) där axeln för pendeln är fäst blir stationära i höjd vilket utnyttjas för att placera sensorer där.

En annan design av drivenheten gjord av J. Alves och J. Dias, två masterstudenter från ett universitet i Portugal, fungerar med en bil inuti sfären som med fyra hjul driver sfären i önskad riktning [4]. Denna typ av drift gör det möjligt för sfären att rulla i alla riktningar oberoende på åt vilket håll sfären är riktad eftersom drivenheten inte har något fäste i sfären. Se Figur 2.



Figur 1: Pendel- där förflyttning av tyngpunkten ger rörelse hos sfären.



Figur 2: Bil- där drivenheten kan rulla sfären i alla riktningar.

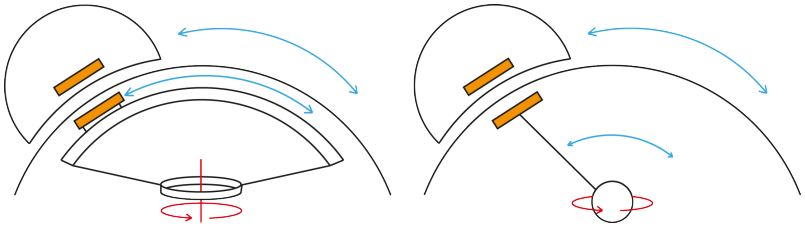
2.2 Teorin bakom huvudet

Teorin bakom huvudet innefattar olika lösningar för att hålla uppe någonting med eller utan magnetism runt en konvex yta, samt kunna förflytta denna till önskad position.

Disney har ett patent som innefattar flera lösningar på problemet. Vad gäller magnetism omfattar patentet en lösning med ett huvud bestyckad med magnetiska hjul som har olika magnetisk polaritet. Dessa ligger en emot sfärens yta genom att magneterna attraheras till matchande magnetiska hjul på insidan av sfären, alternativt magneter som är fästa på en hållare på IDE:n. Det här gör att magneterna inte behöver vara lika starka som i fallet utan matchande polariseringar. Dessa två lösningar använder båda stark magnetism för att fungera. [5]

Det tredje fallet som omnämns i patentet kräver ej magnetism utan förlitar sig på reglerteknik. Grundidén är att sfären ska balansera huvudet själv med sin egen framdrift. Om huvudet börjar rulla av sfären så ska sfären själv 'fånga upp' huvudet, ungefär som när en cirkuskonstnär balanserar en pinne på näsan. Det här medför att om roboten ska röra sig i en önskad riktning kan det först krävas att roboten rör sig i motsatt riktning för att tippa ner huvudet, för att sedan kontinuerligt 'fånga upp' huvudet längs sträckan den färdas i den önskade riktningen. [5]

Vid användning av magneter för att fästa huvudet finns det olika lösningar för att flytta huvudet på sfären. Detta sker genom att flytta magneterna på insidan till önskad position. Hemsidan 'How Does BB-8 Work?' [6] har två exempel på hur detta görs. Det ena använder en skena med magneten placerad på en vagn som rör sig fram och tillbaka över skenan. För att flytta huvudet runt sfärens vertikala axel så roteras skenan runt samma axel, se vänstra modellen i Figur 3. Det andra exemplet har en led i centrum av sfären som styr en arm i alla riktningar över sfären. Magneten är fäst på armens ände, se högra modellen i Figur 3.



Figur 3: Modell över två olika anordningar för magnetininfästning (orange), deras rörelse (blå) över och under sfären, samt hur de når samtliga vinklar runt sfärens övre del i tre dimensioner (röd).

2.3 Teorin bakom regleringen

Teorin bakom regleringen innefattar formeln för hur PID-regulatorer beräknas i Simulink, vilket är vad som i denna rapport användes för att bestämma regulatorerna.
Formeln för beräkning av en PID-regulator som är implementerad i Simulink ges av Ekvation 1:

$$F_{PID} = k_p + \frac{k_i}{s} + k_d \cdot \frac{N_{filter}}{s + N_{filter}} \tag{1}$$

Där k_p är den proportionerliga förstärkningen, k_i integralförstärkningen, k_d deriveringsförstärkningen och N_{filter} filterkonstanten. Filterkonstanten bestämmer positionen av polen i derivatan. [7]

3 Utgångsläge

De val som tagits har grund i två tidigare parallella projekt som utförts för att lösa delar av problemet [1] [2]. Hårdvaran från båda projekt fanns till förfogande för vidareutveckling.

Det första projektet behandlar en lösning med en inre drivenhet som driver fram sfären enligt bilprincipen som visas i avsnitt 2.1 i Figur 2. Under detta projekt framställdes enbart hårdvara för framdrift men ej för en huvudupphängningsmekanism. [1]

Det andra projektet valde att följa pendelprincipen som visas i avsnitt 2.1 i Figur 1. Under det här projektet framställdes hårdvaran för både framdrift och huvudupphängning, som var beroende av varandra då tyngden som för roboten framåt är monterad på samma axel som huvudets magnetupphängning. [2]

Utgående från denna information fanns det tre möjliga val: att helt börja om från början eller fortsätta arbetet med antingen pendelnroboten eller bilroboten. Det uteslöts att börja om från början eftersom mycket tid skulle läggas på sådant det redan fanns lösningar till. När koncepten ställdes mot varandra gjordes valet att fortsätta arbeta på bilroboten eftersom den gav en snabbare acceleration samt ett snabbare styrsvar med premissen att det även behövdes utvecklas en upphängningsmekanism för huvudet.

Från det valda konceptet kunde en redan framställd IDE användas. Denna består av en aluminiumram, en bottenplatta i stål, två utslitna hjul, två oanvända inlineshjul samt kulrullar. Monterat i IDE:n fanns samtlig hårdvara installerad. För specifikationer av hårdvaran, se Tabell 1.

Tabell 1: Tabell över vilka modeller av elektriska komponenter som använts och finns monterade på IDE:n.

Komponent	Modell
Elmotorer (2st)	Metal Gearmotor 37Dx70L mm with 64 CPR Encoder
Arduino-kort	Arduino Mega
Motorkort	Pololu Dual VNH5019 Motor Driver Shield
Gyroskop	LSM9DS1
Bluetooth-enhet	HC-06

Kroppen som fanns tillgänglig var en 3D-printad sfär, samt CAD-ritningar för dessa, som skapats genom att dela upp sfären i mindre sektioner och limmats ihop till två halvsfärer [1]. Det fanns även redan två 3D-printade huvuden där huvudet som tillhörde pendelroboten bedömdes vara av bättre kvalitet och design, och därmed användes denna vid fortsatt utveckling. Tillhörande det här huvudet fanns även en inre hållare med fyra magneter som var konstruerad för att fästas på änden av en axel likt teorin i avsnitt 2.2. [2]

Det tidigare projektet tillhandahöll även programmeringskod och fjärrstyrningsapp för att kunna styra IDE:n som i sin tur styr kroppen. Programkoden är skriven i Arduino IDE för att enkelt kunna ladda upp koden till Arduino-kortet. Kodens funktion är i enkla drag att ta emot signaler som skickas till bluetooth-enheten via fjärrstyrningsappen för att sedan omvandla och skicka vidare dessa signaler till motorerna som styr hjulens hastighet. Insignalen till systemet är därmed vad användaren gör i fjärrstyrningsappen och utsignalen är hastigheten på hjulen som är monterade på IDE:n. Fjärrstyrningsappen som fanns tillgänglig bestod av en joystick som styr roboten åt alla riktningar. Den skickar sedan kommandon via bluetooth till Arduinon. Dessa kommandon är joystickens position i planet. Den är skapad för Android-telefoner och är skriven i Java. Till förfogande fanns även en simuleringsmodell över kroppens rörelser som använder sig av en framberäknad överföringsfunktion och tillståndsmodell. [1]

Problemen som tidigare projekt stött på var bland annat avsaknad av någon form av servicelucka, ett huvud som inte kunde sitta kvar på sfären samt svårstyrd robot. För mer information se [1]. Denna rapport syftar till att fortsätta arbetet med och lösa dessa problem. Utifrån information tillgänglig

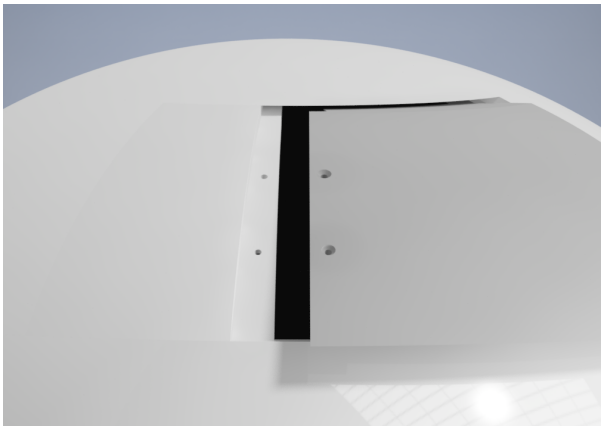
i rapporten skapades en kravspecifikation över vad den färdiga roboten ska och bör klara av, se A.1.

4 Konstruktion av robot

En servicelucka togs fram för att monteras på den befintliga sfären samt en huvudupphängningsmekanism. Beräkningar för vridmoment utfördes även för att finna vilka servomotorer som skulle användas samt beräkningar för krafterna som verkar på huvudet för att se hur starka magneter som behövdes.

4.1 Sfär

En servicelucka, se Figur 20, var önskvärd för att lättare ge åtkomst till IDE:n eftersom det vid tidigare konstruktion behövde lossas på sex långa skruvar för att sära på sfärhalvorna. Serviceluckan (se Figur 4) dimensionerades utefter att två vuxna händer ska få rum genom hålet och kunna utföra enkla justeringar som exempelvis lossa på en sladd eller trycka på en knapp. Denna lucka monterades på den redan befintliga sfären genom att ta bort fyra sektioner på den undre sfärhalvan där det redan fanns en skada.

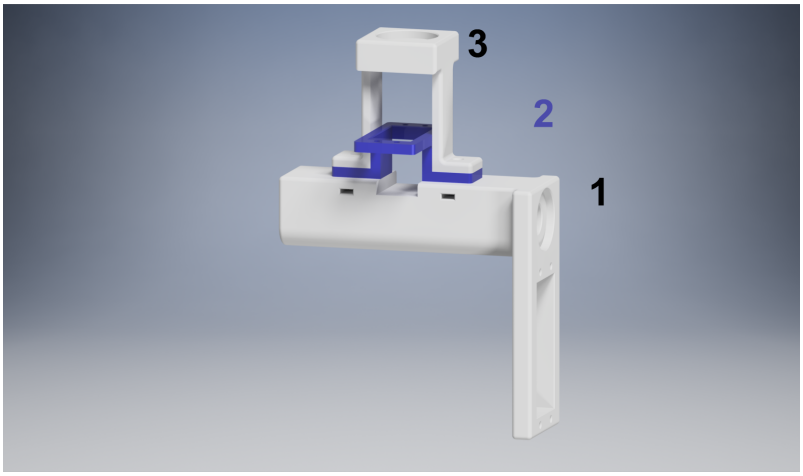


Figur 4: Närbild på den öppnade serviceluckan.

4.2 Huvud och dess upphängningsmekanism

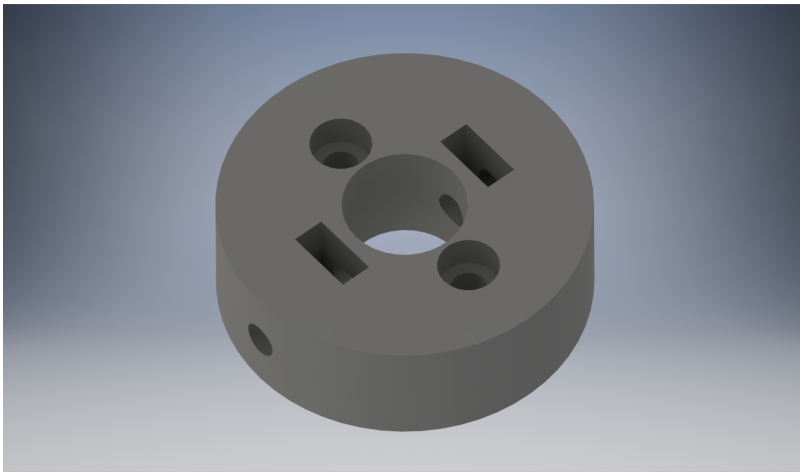
Då tidigare projekt ej hade implementerat ett huvudfäste för sfären fanns enbart en rundstång i IDE:n där en axel för huvudet skulle fästas. För att huvudet ska hållas på plats ovanpå sfären designades en arm som fästes på rundstången i IDE:ns mitt, se del 1 i Figur 5. På denna axel fästes även

ett kugghjul och ett mindre kugghjul fästes på en servomotor som i sin tur fästes på armen. Det här möjliggör en utväxling mellan servomotorns rotation och huvudets rörelse samt även en ökning i momentet som servomotorn kan utöva på armen. Huvudets rörelse är begränsad till riktning framåt och bakåt i enlighet med IDE:ns riktning. Vinkelrätt på axeln fästes en annan mindre servomotor med en 3D-printad servohållare, se del 2 i Figur 5, som möjliggör rotation av huvudet i två dimensioner då denna är utrustad med en axel som hålls fast av del 3 i Figur 5 för rotation runt sin egen axel. På axelns yttre ände fästes magnethållaren för att hålla kvar huvudet på plats utanpå sfären.



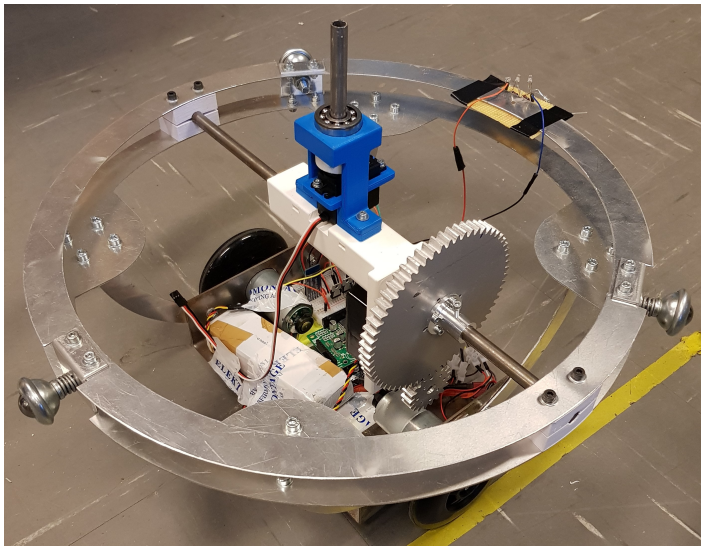
Figur 5: Rendering av axel för förflyttning av huvud med påmonterade hållare för servomotor och magnethållarens axel.

Den större servomotorn som styr huvudets position monterades i den designade hållaren med hjälp av skruvar och fästes sedan på axeln med hjälp av en bussning samt ett sfäriskt självinställande kullager. Lagret kompenserar för snedställning av axeln och möjliggör att den inte behöver vara helt rak för att huvudet ska kunna flytta sig. För att motverka att armen förflyttades på axeln så låstes denna fast. Den mindre servomotorn monterades i sin hållare med hjälp av små skruvar. Även i hållaren där axeln för magnethållaren sitter, monterades ett självinställande sfäriskt kullager. De tre delarna monterades samman med två skruvar som går igenom båda hållarna och skruvas fast i muttrar, som sitter i hålen som syns i Figur 5. För hela konstruktionen utom magnethållaren se Figur 7.



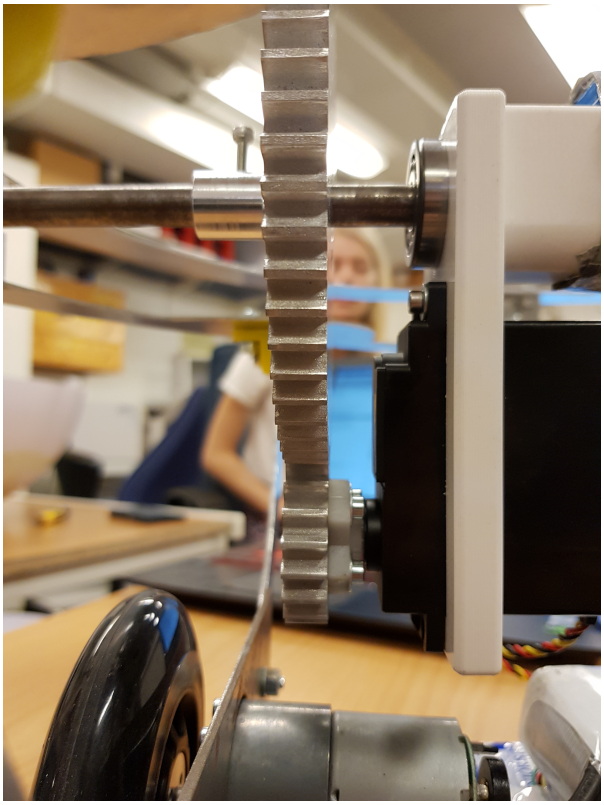
Figur 6: Rendering av axelfäste.

Eftersom att magnethållaren var konstruerad för en servomotor som monterades närmare sfärens vägg och har anpassats för att monteras direkt på servomotorn konstruerades en adapter. Adaptern består av två stycken 3D-printade fästen och ett 10mm stålrör, varav fästena ses i Figur 6. Muttrar placerades i de rektangulära hålen och stålröret placerades i fästenas mitt. Därefter användes skruvar för att låsa fast stålröret i fästena via de tvärsgående hålen och adaptern skruvades på både servomotorn och magnethållaren med skruvar genom de vertikala hålen. För den monterade adaptern utan det övre fästet eller magnethållaren, se Figur 7.



Figur 7: Upphängningsmekanismen monterad på den befintliga IDE:n där vit del är hållaren för den stora servomotorn och blå del är fästena för den mindre servomotorn samt adaptern.

Kugghjulen valdes till 19 och 61 kuggar vilket ger en utväxling på ca 3.21 som används för att få ut ett högre vridmoment för att kunna flytta huvudet. Det stora kugghjulet låstes fast åt ena hållet på axeln och det mindre skruvades fast direkt i den stora servomotorn, se Figur 8.



Figur 8: Kugghjulen monterade på axeln.

4.2.1 Servoberäkningar

Den mindre servomotorn för rotation av huvudet valdes utifrån beräkningar av vridmomentet hos huvudet. För att göra dessa beräkningar gjordes vissa antaganden: Friktionskraften är låg nog att kunna försummas och huvudets tröghetsmoment kan approximeras till ett halvsfäriskt skal på en tunn cirkulär skiva där skalet har 10% och skivan har 90% av huvudets massa. Det är även antaget att vinkelaccelerationen ökar linjärt och har samma negativa acceleration vid inbromsning av huvudet. Även om det är en förenkling av verkligheten möjliggör det att kunna göra beräkningarna på huvudets rotation över 180°, alltså halva sträckan vid framtagning av dynamiska samband. Huvudets beräknade massa m är 1.5kg och dess radie r_h är 0.16m.
Först beräknades tröghetsmomentet för huvudets båda delar enligt Ekvation

2 och 3 samt summerades i Ekvation 4.

$$I_1 = \frac{2}{3} m_1 r_h^2 = 0.0020 kgm^2 \tag{2}$$

$$I_2 = \frac{m_2 r_h}{4}(1 - \frac{\sin 4\pi}{2}) = 0.0066 kgm^2 \tag{3}$$

$$I_{rot} = I_1 + I_2 = 0.0086 kgm^2 \tag{4}$$

Därefter bestämdes Ekvationerna för vinkelacceleration, vinkelhastighet och vinkel fram i Ekvationer 5-7.

$$\dot{\omega}_{rot}(t) = c_0 t + c_1 \tag{5}$$

$$\omega_{rot}(t) = \frac{c_0 t^2}{2} + c_1 t + c_2 \tag{6}$$

$$\theta_{rot}(t) = \frac{c_0 t^3}{6} + \frac{c_1 t^2}{2} + c_2 t + c_3 \tag{7}$$

Till sist togs sambandet mellan vinkelacceleration och moment fram enligt Ekvation 8

$$T_{rot}(t) = I_{rot} \cdot \dot{\omega}_{rot}(t) \tag{8}$$

Utifrån Ekvation 8 ansattes en konstant T_0 för startmomentet i nollläget, vilket är det lägsta momentet som servomotorn ska kunna leverera för att rotera huvudet enligt kravspecifikationen, se bilaga A.1.
För att kunna bestämma de okända konstanterna bestämdes randvillkor baserade på följande antaganden enligt nedanstående tabell:

Tabell 2: Tabell över randvillkor, där A innebär antaganden och Ö innebär önskemål från kravspecifikationen.

Uttryckt randvillkor	Matematiskt randvillkor
(A) Huvudets acceleration beror endast på momentet från servomotorn	$\dot{\omega}(0) = \frac{T_0}{I_{rot}}$
(A) Huvudet startar från vila	$\omega_{rot}(0) = 0$
(A) Huvudet startar med 0° rotation	$\theta_{rot}(0) = 0$
(Ö) Huvudet roterar 360° från stillastående på 1s	$\theta_{rot}(0.5) = \pi$ rad
(Ö) Huvudet roterar med 60 RPM	$\omega_{rot}(0.5) = 2\pi$ rad/s

Med de givna randvillkoren bestämdes konstanterna c_0, c_1 c_2 och c_3 och momentet löstes ut från Ekvation 7.

$$T_0 = 16\pi \cdot I = 0.4310 Nm \tag{9}$$

Servomotorns momentkraft bör alltså vara minst 0.4310Nm för att möta de fastställda önskemålen men förslagsvis högre än så för att kompensera för eventuella förluster i systemet.

Rotationsservomotorn som valdes är Luxorparts DS04-NFC som har kontinuerlig rotation likt en vanlig motor vilket gör att den kan uppfylla kravet på att huvudet ska rotera 360°. Servomotorn ger ett vridmoment på 0.5401Nm och rotationshastighet på 45 RPM vilket innebär att den klarar det dimensionerade minsta momentet men uppfyller inte önskemålen om att kunna rotera huvudet med 60 RPM eller förflytta huvudet 180° på 0.5s.

För att kunna välja servomotor för förflyttning av huvudet i färdriktningen utfördes även beräkningar för minsta motormoment som behövs för denna rörelse. För att utföra dessa beräkningar så togs data från tidigare rapport, [1], samt att vissa antaganden gjordes:

Tabell 3: Tabell över konstanter för beräkningar av vridservomotorn, där A innebär antaganden och resten är tagna från tidigare projekt.

Konstant	Värde (enhet)
Sfärens radie, r_s	0.25 (m)
Huvudets radie, r_h	0.16 (m)
Axelns massa, m_a	0.2 (kg)
Huvudets massa, m	1.5 (kg)
Tyngdaccelerationen, g	9.82 (m^2/s)
Huvudets maxvinkel, θ	$(\pi \cdot 20)/180(rad)$
(A) Magnetisk kraft mot huvudet, F_m	15 (N)
(A) Motorns tröghetsmoment, I_m	0.5 (kgm^2)
(A) Friktionskoefficient, μ	0.1
(A) Önskad vinkelacceleration, $\dot{\omega}$	1 (s^{-2})
Beräknad utväxling på kugghjulen, i	$\frac{61}{19}$

Axeln och huvudets tyngdkraft beräknades enligt Ekvation 10 och 11.

$$F_{ag} = m_a \cdot g = 1.964N \tag{10}$$

$$F_{hg} = m \cdot g = 14.730N \tag{11}$$

Friktionskraften beräknades enligt Ekvation 12, där magnetkraften och huvudets tyngdkraft utgör normalkraften.

$$F_\mu = (F_m + F_{hg} \cdot \sin\theta) \cdot \mu = 2.004N \quad (12)$$

För att kunna beräkna motormomentet behövdes även totala tröghetsmomentet, alltså summan av huvudets, axelns och motorns tröghetsmoment, se Ekvation 13. Det här beräknades genom att anta att axeln är en solid stång och att huvudet kan approximeras till en punktmassa med tyngdpunkt i centrum av halvsfären.

$$I_h = m \cdot (r_s + \frac{r_h}{2})^2 + \frac{1}{3} \cdot m_a \cdot r_s^2 + I_m = 0.6392kgm^2 \quad (13)$$

Med all denna information kan då minsta motormomentet beräknades enligt Ekvation 14.

$$T_m = (\frac{r_s}{2} \cdot F_{ag} + (r_s + \frac{r_h}{2}) \cdot F_{hg}) \cdot \sin\theta + r_s \cdot F_\mu + I_h \cdot \dot{\omega} = 2.7355Nm \quad (14)$$

Motormomentet bör alltså minst vara omkring 2.74 Nm för att kunna flytta huvudet med önskad vinkelacceleration. Då kugghjulen ger en utväxling på ca 3.21:1 kan en svagare servomotor väljas om nödvändigt eller låta utväxlingen vara en marginal för att kompensera för förluster i systemet. Den servomotor som valdes var HS-805BB+ som har en rotation på 0–180°, vridmoment på 2.42 Nm samt en rotationshastighet, vid ingen last, på $\frac{0.14s}{60°}$.

Då båda servomotorerna har en driftspänning på 4.8-6V införskaffades spänningsregulatorer av modellen Luxorparts 7805, som reglerar ned spänningen från 11.1V batterispänning till 5V. Då dessa endast ger 1.5A parallellkopplades 5 st för att kunna ge tillräckligt mycket ström till båda servomotorerna. För att ge nödvändig kylning till spänningsregulatorerna monterades dessa på en 2mm stålplatta som agerar kylfläns för komponenterna.

4.2.2 Magnetkraftsberäkningar

För att dimensionera magneterna som håller huvudet på plats behövdes krafterna som verkar på huvudet vid drift beräknas:

Den maximala kraften (F_h) som verkar på huvudet är summan av den maximala gravitationskraften och den maximala skjuvkraften som sfärens

acceleration utövar på huvudet. Med antagandet att rullarna som skiljer huvud och sfär åt är friktionslösa blir uttrycket enligt Ekvation 15.

$$F_h = m \cdot g \cdot sin(\theta) + m \cdot a_s \tag{15}$$

där m är massan hos huvudet, g gravitationsaccelerationen, θ vinkeln på huvudet från centrum ovanpå sfären och a_s accelerationen hos sfärens rörelse.

Magnetkraften (F_m) mellan huvud och arm måste överstiga F_h för att huvudet ska sitta kvar vid framåtdrift av roboten. Den nödvändiga magnetkraften kan beräknas enligt Ekvation 16 som behandlar förhållandet mellan två cirkulära magneter med identiska proportioner [8]. Den approximerade nödvändiga kraften blir

$$F_m \approx -\frac{\pi \mu_0 M^2 R^4}{4} \left[\frac{1}{x^2} + \frac{1}{(x+2h)^2} - \frac{2}{(x+h)^2} \right] \tag{16}$$

där μ_0 är permeabiliteten i vakuum, M magnetiska flödestätheten, R radien på magneterna, x avståndet mellan magneterna och h höjden på magneterna.

5 Reglering och mjukvara

En undersökning på tidigare projekts reglering och mjukvara utfördes vilket gav att ett nytt reglersystem behövdes samt att det fanns flera förbättringsmöjligheter. Nya simuleringar för både huvud och kropp utvecklades för att få fram nya regulatorparametrar, och fjärrstyrningsappen förändrades för att underlätta styrning samt kunna rotera huvudet.

5.1 Undersökning av reglering och mjukvara

För att få en bild av hur roboten betedde sig i verkligheten utfördes ett test av tidigare Arduino-kod, se tidigare projekt [1, s. 42-43], som är till för att styra roboten. Denna kod hade ingen reglering implementerad och testet visade även att roboten inte uppfyllde uppställda krav. Därmed framkom det att koden både behövde ändras och utvecklas, samt få en fungerande implementering av regulatorparametrarna.

En undersökning utfördes även av tidigare projekts överföringsfunktion där insignalen är motorspänningen och utsignalen är hastigheten på hjulen och tillståndsmodell. Undersökningen visade att dessa kunde anses korrekta. För att se beräkningar och mer detaljer gällande dessa, se tidigare projekt [1, s. 35-40].

Vid undersökning av framtagen simulering, gjord i programmet Simulink, framkom det att regulatorn som tagits fram inte klarade de uppsatta kraven. Det här kan även varit en bidragande faktor till varför implementeringen av regulatorn inte fungerade vid tidigare projekt. Därmed behövde dessa regulatorparametrar bytas ut.

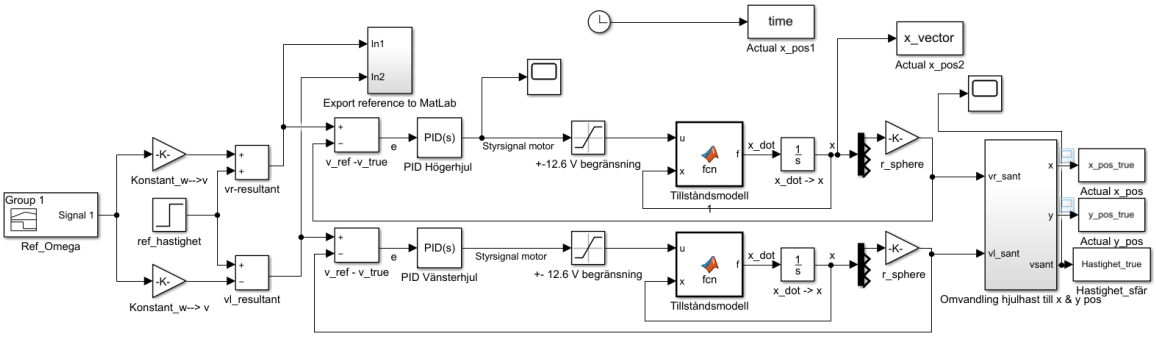
5.2 Simulering

Det har konstruerats en simulering i två delar i programmet Simulink: en för kroppen samt en simulering av huvudets rörelse.

5.2.1 Kroppen

Kortfattat är tidigare projekts simuleringsmodell (se Figur 9) uppbyggd på så sätt att hjulens faktiska hastigheter återkopplas mot referenshastigheten,

vilket ger ett fel mellan dessa som regleras med hjälp av regulatorn. Styrsignalen är motorns spänning och denna förs in i tillståndsmodellen tillsammans med en tillståndsvektor. Tillståndsmodellen baseras på en dynamisk modell för framåtdrivning. För mer ingående detaljer, se tidigare projekt [1, s. 41-42].



Figur 9: Simulinkmodell för att simulera regleringen av sfären

I denna modell så är dock inte hjulen sammankopplade utan har enskilda system. Det här speglar inte helt verkligheten eftersom hjulen drivs samtidigt i samma system. Simuleringen är alltså en förenkling av det verkliga systemet.

Den tidigare regulatorn hade följande parametrar [1, s. 41]:

$$k_p = 3.986$$

$$k_i = 15.630$$

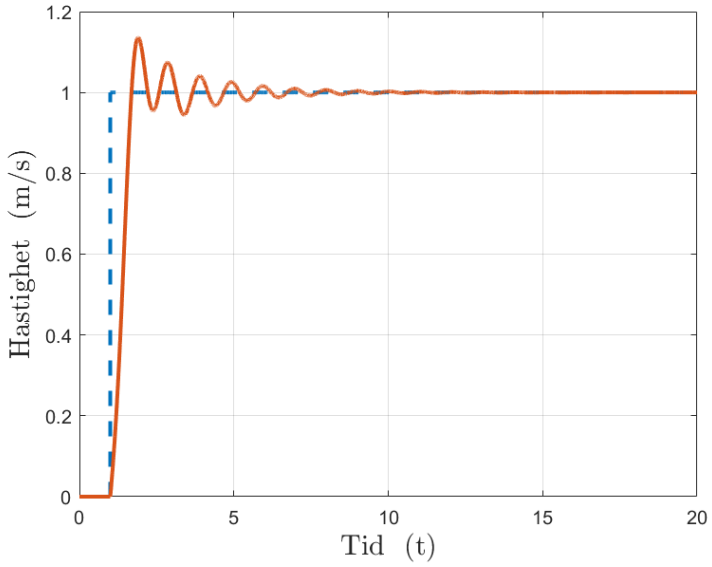
$$k_d = -0.374$$

$$N_{filter} = 3.211$$

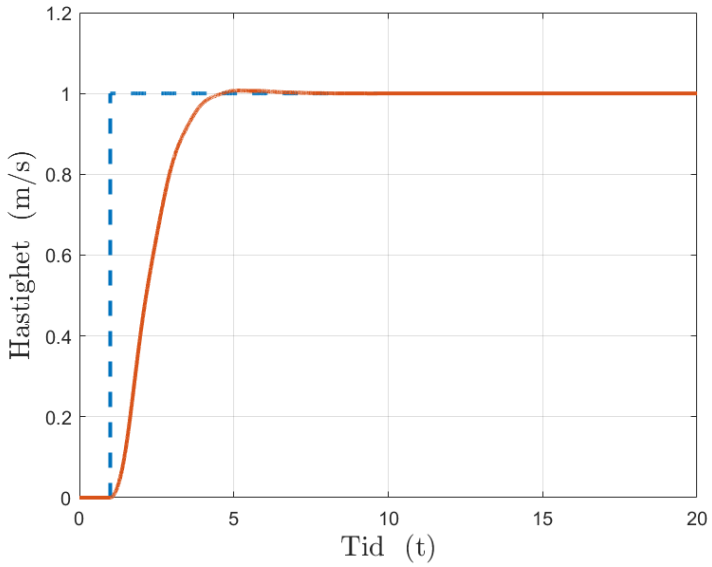
Simulinks inbyggda tune-verktyg användes för att få fram bättre regulatorparametrar än tidigare. Denna fungerar på så sätt att parametrarna ställs in enligt regulatorns önskade snabbhet och stabilitet. Det gav att det inte behövdes en proportionell förstärkning eller deriveringsförstärkning på PID-regulatorn. Värdena på den integrerande förstärkningen togs fram till:

$$k_i = 4.2$$

Vid jämförelse mellan den gamla regulatorn och den nya simulerade regulatorn så gav det att den nya regulatorn hade mindre översläng och kortare insvängningstid, medan den gamla regulatorn hade en kortare stigtid, se Figur 10 och Figur 11. Den nya regulatorn var långsammare därför att systemet redan är stabilt och behöver då ingen aggressiv reglering. Då regulatorn reglerar hastigheter så kan insvängningstiden inte vara för lång eftersom det innebär att systemet tar längre tid på sig att gå till ett stabilt läge. I detta fall innebär det att hastigheten inte blir jämn och att roboten därmed oscillerar vid styrning, vilket var ett problem med tidigare regulator.

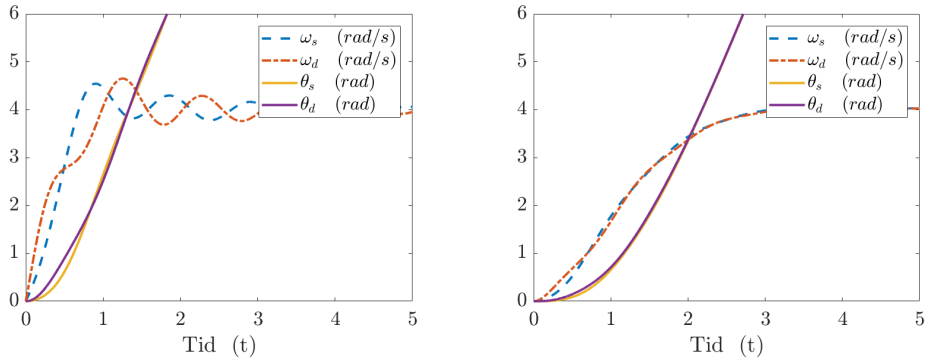


Figur 10: Tidigare projekts PID-regulator.



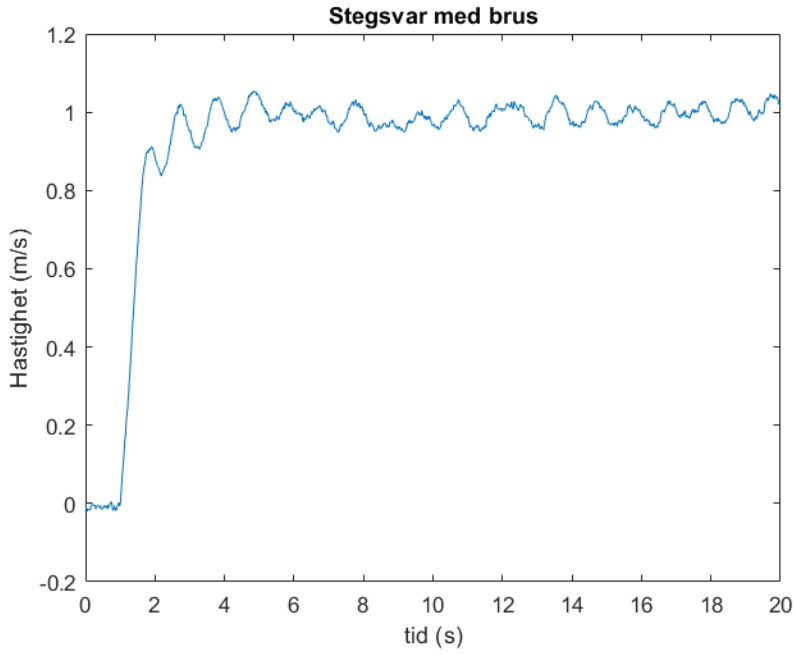
Figur 11: Den nya simulerade PID-regulatorn med endast en integrerande inverkan och filterkonstant.

Simuleringen inkluderade också en jämförelse av vinklar och vinkelhastigheter på IDE:n och själva sfären. Det här gjordes för att se hur bra dessa två sammanfaller med varandra. Är dessa väldigt olika betyder det att det är svårt att styra sfären eftersom vinklarna/vinkelhastigheterna på sfären inte sammanfaller med IDE:n som är vad som faktiskt styr roboten. Denna simulering gjordes på både den gamla och nya regulatorn för se om det blivit en förbättring. Jämförelse i Figur 12 visar att den nya regulatorn har nästan identiska vinklar (gula och lila heldragna linjer i Figur) och vinkelhastigheter (blåa och röda streckade linjer i Figur) för IDE och sfär medan den gamla hade liknande vinklar men helt olika vinkelhastigheter.



Figur 12: Gamla regulatorparametrar till vänster och nya regulatorparametrar till höger.

Den nya regulatorn simulerades även med brus, som då simulerade störningar som kan uppkomma i det verkliga systemet. Bruset valdes till 0,001 vilket gav en graf enligt Figur 13. Det visade att regulatorn skulle klara av störningar relativt bra, då det inte blir så hög över- och undersläng hos stegsvaret.



Figur 13: Simulering av ett steg med ett brus på 0.001.

Simuleringarna gav alltså att den nya regulatorn bör minska wobblandet och även förenkla styrningen av roboten när denna väl implementeras i programmeringen.

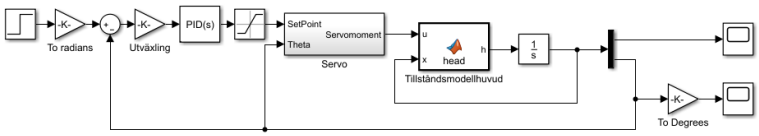
5.2.2 Huvudet

För att kunna implementera huvudet krävdes att en ny simuleringsmodell utvecklades för att välja en regulator för att styra huvudets position så att huvudet behåller kontakten med magneterna.

Simuleringsmodellen för huvudet gjordes i två delar. Först gjordes en tillståndsmodell av huvudet baserat på de antaganden som gjordes i 4.2.1 där huvudets position och hastighet är de tillstånd som studerades. Tillståndsmodellen har servomotorns moment som insignal. Ekvationerna för tillståndsmodellen kan ses i Ekvation 17.

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2 \\ (U - (r_s/2 \cdot F_{ag} + (r_s + r_h) \cdot F_g) \cdot \sin(x_1) + rs \cdot F_f r)/I \end{bmatrix} \tag{17}$$

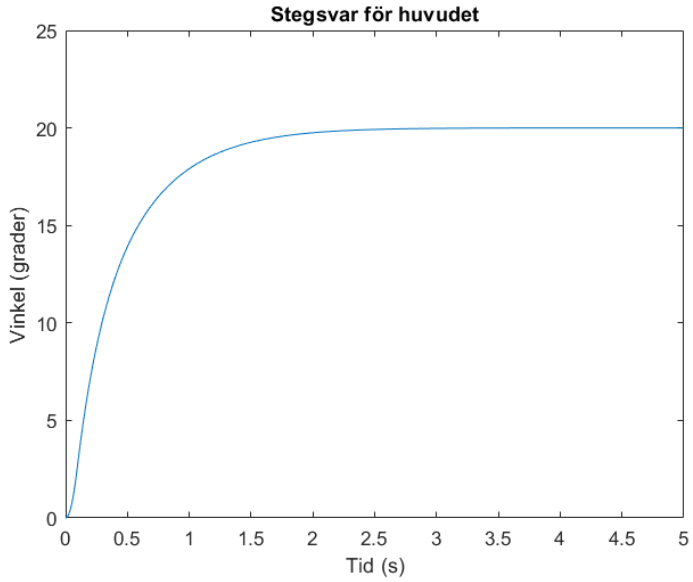
Den andra delen av simuleringen var att skapa en modell för servomotorn. Servomotorns dokumentation saknar data om motorns egenskaper men eftersom en försiktig reglering eftersträvas för att huvudet ska stanna kvar på kroppen antogs att servomotorns reglering är snabb jämfört med mekaniken och därför kunde servomotorns inre elektriska tröghet försummas. Därefter satts modellerna ihop till en Simulinkmodell enligt Figur 14.



Figur 14: Simulinkmodell för att simulera regleringen av huvudets vridning

En regulator togs sedan fram med hjälp av Matlab:s tune-verktyg. En ren I-reglering med regulatorparameter enligt nedan valdes för en stabil reglering utan översläng vilket ger ett stegsvar enligt Figur 15.

$$Ki = 2.245519$$



Figur 15: Stegsvar för vridning 0°-20°med reglering

För att styra huvudet i sfären på ett sätt som ger ett realistiskt intryck används robotens hastighet som styrsignal för huvudets position. Detta gör att huvudet lutar framåt när roboten kör framåt och tvärtom om roboten kör bakåt.

5.3 Programmering av Arduino

Den befintliga koden som använts som bas för utvecklingen innehöll en fungerande metod för att kunna ta emot data via Bluetooth och en fungerande implementation utav styrning för motorstyrkortet. Regleringen utav motorerna sker med hjälp av Arduinos PID-klass för att hantera reglerparametrar och insignaler där motorerna regleras med var sin regulator. Utsignalen från regulatorerna skickas sedan till den befintliga motorstyrningen.

Hastighetsmätning av motorerna till regleringen sker med två hallgivare per motor via ett avbrottsbaserat system. En hallgivares signaler genererar ett avbrott och den andra används för att avgöra vilken riktning rotationen sker och inkrementerar eller dekrementerar en räknare beroende på rikting.

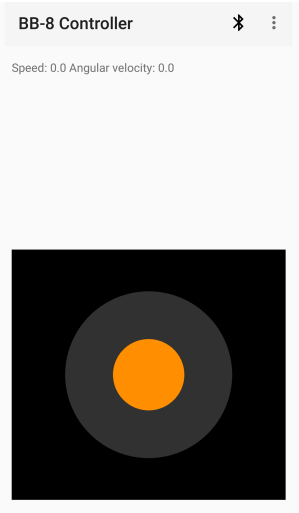
Därefter samplas räknarens värde med en samplingstid på 10 ms och motorernas hastighet kan beräknas.

Regleringen av huvudets lutning sker med en enkel implementering av en I-regulator där styrsignalen ges av motorernas hastighet och där vinkeln begränsas så att huvudet inte lutar mer än 20° för att inte riskera att huvudet faller av.

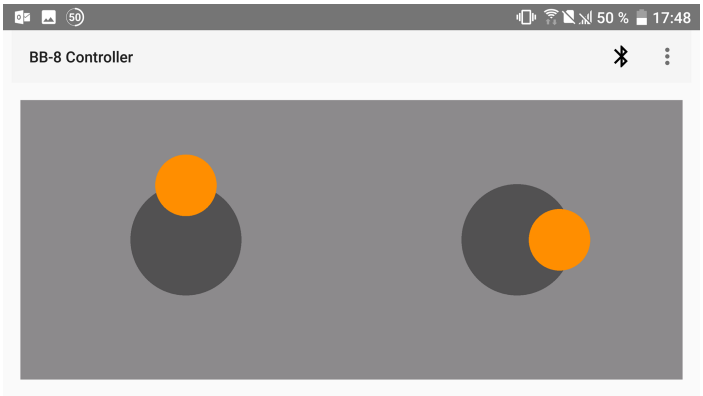
Styrningen av huvudets rotation via fjärrstyrning krävde mindre modifieringar utav koden för att ta emot data genom att ytterligare en parameter tas emot. Regleringen utav rotationshastigheten sker enbart genom en snabb linjär ökning av rotationshastigheten för att minska belastningen på servomotorn och inte ge för snabba momentändringar.

5.4 Fjärrstyrning

Valet gjordes att fortsätta bygga vidare på tidigare projekts Android-applikation som använde sig av en ensam joystick för att styra all rörelse för roboten, se Figur 16. Eftersom appen endast hade en joystick så blev roboten svår att kontrollera och framförallt svår att testa prestandan på då det exempelvis var problematiskt att ge den ett exakt gaspådrag utan att även orsaka någon förflyttning i sidled. Så att exempelvis testa hur mycket roboten drev åt sidorna vid rent gaspådrag i en riktning blev nästan omöjligt att verifiera utan att orsaka felkällor som användare. Det här problemet löstes genom att implementera en till joystick vilket separerar förflyttning i sidled från gaspådrag för att underlätta styrningen av roboten. För att detta skulle fungera behövdes koden skrivas om för att få stöd för multitouch så att det går att styra båda joysticksen samtidigt. Dessutom begränsades deras rörelser så att vänster joystick bara kunde kontrolleras på Y-axeln, dvs ökad och minskat gaspådrag och höger joystick begränsades på X-axeln för att sköta robotens svängning, se Figur 17.



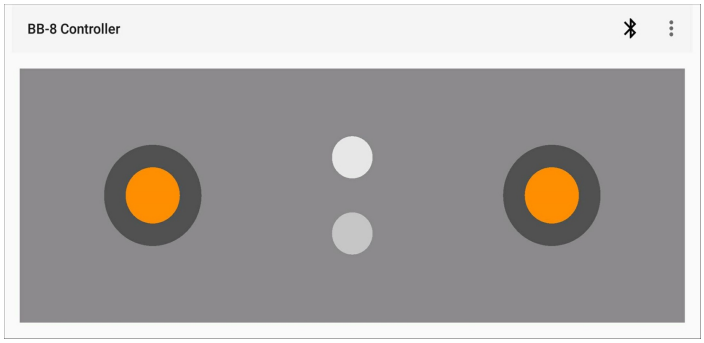
Figur 16: Tidigare projekts androidapplikation för fjärrstyrning.



Figur 17: Dubbla joysticks med multitouch implementerad och joysticks begränsade till rörelse på Y- respektive X-axeln för underlättad kontroll.

När huvudupphängningen började konstrueras och simuleras så bestämdes det att huvudet inte behövde kunna kontrolleras manuellt annat än för rotation när kroppen är stillastående. Huvudets lutning skulle ske automatiskt och regleras utifrån hjulens hastighet, men önskemålet att huvudet skulle kunna rotera fritt ledde till att appen även behövde någon form av kontroll för rotation medsols respektive motsols. Av platsbesparande

skäl och även för ökad användarvänlighet valdes två statiska knappar över ytterligare en joystick. Dessa knappar placerades centralt på skärmen för att undvika att användaren råkar komma åt dem när denne förflyttar joysticks. Se Figur 18.



Figur 18: Knappar för rotation av huvud implementerade

För att möjliggöra enklare testning och kunna följa viktiga reglerparametrar under körning utvecklades även en enkel Windowsapplikation i C#. Från applikationen kan specifika kommandon ges och relevant data från körning, som exempelvis mätvärden och styrsignaler för motorer, inhämtas via bluetooth. Denna data kan sedan ge tydliga grafer över robotens funktioner och på så vis möjliggöra felsökning och verifiering av funktioner.

6 Resultat

I detta avsnitt beskrivs resultaten som uppnåtts med hjälp av tidigare kapitels genomföranden. Först listas samtliga delmoment som utvecklats och deras slutgiltiga resultat följt av en lista bestående av resultaten som verifierats och testats från kravspecifikationen.

6.1 Konstruktion

Utgångspunkten för konstruktionen var som beskrivet i tidigare kapitel en IDE som tillverkats vid tidigare projekt. Denna IDE gav basen som sedan kunde vidareutvecklas och byggas på med ytterligare komponenter för att uppnå den önskade funktionaliteten utifrån kravspecifikationen.

6.1.1 IDE och huvudupphängningsmekanism

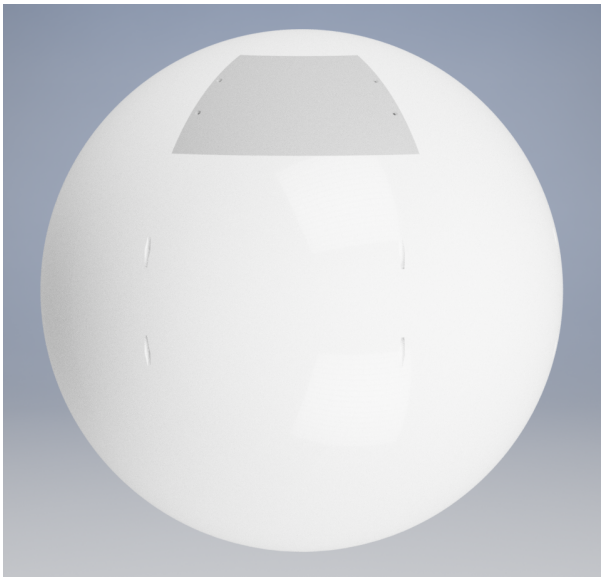
IDE:ns grundutförande ändrades ej förutom att hjulen har bytts ut till inlineshjul som fanns att tillgå från tidigare projekt då de andra var utslitna och inlineshjulen gav bättre grepp mot insidan av sfären. Däremot hade IDE:n ingen upphängningsmekanism förutom att den var försedd med en rundstång i stål som korsade IDE:n. [1] På denna axel monterades en upphängning med en servomotor placerat under axeln för att kunna luta huvudet och en servomotor ovanför axeln för att kunna rotera huvudet runt sin egen axel. Se Figur 5. Med huvudupphängningen monterad kan roboten hålla uppe huvudet även vid lutning vilket kan ses i Figur 19.

Figur 19: Sfären med huvudet monterat genom magnetkraft.

IDE:n hade även ett monterat gyroskop vars funktionalitet verifierades till en början men då det inte används i den implementerade regleringen monterades detta bort av platsbesparande skäl.

6.1.2 Sfär

En ursprunglig sfär fanns att tillgå från tidigare projekt men för att kunna utföra underhåll och reparationer togs fyra sektioner bort och ersattes med en servicelucka. Denna går att öppna upp genom att skruva loss fyra skruvar så att insidan går att komma åt snabbare och enklare utan att behöva montera isär de två halvorna av sfären. Detta gjordes för att uppfylla önskemålet i kravspecifikationen att IDE:n ska gå att komma åt inom loppet av två minuter.



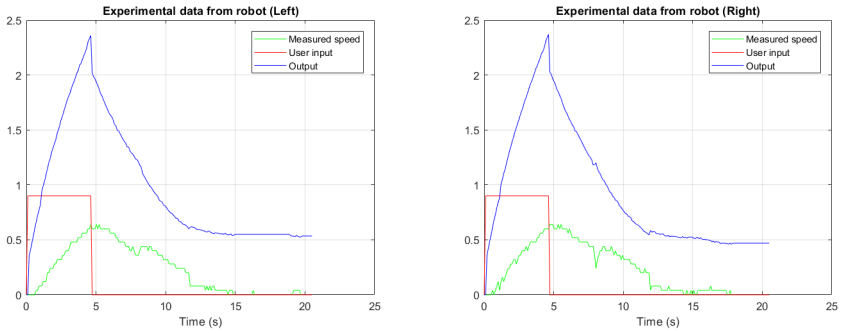
Figur 20: Sfären med servicelucka implementerad.

6.2 Reglering och mjukvara

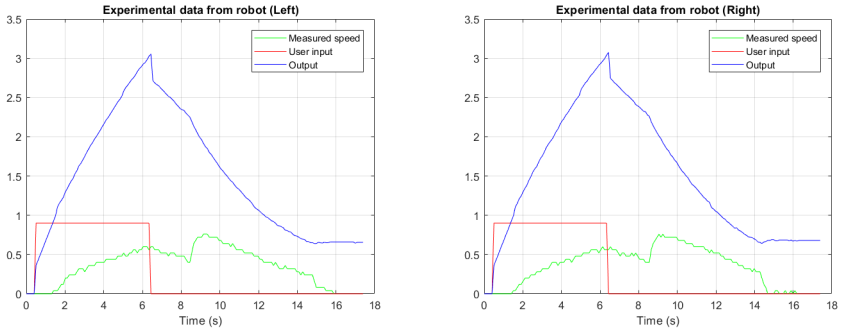
Tester utfördes för att få resultat om tidigare utförda simuleringar överensstämde med verkligheten och om regleringen fungerade som det var tänkt. Robotens olika funktioner och egenskaper testades också, så som hastighet och styrbarhet.

6.2.1 Programmering och tester

Test av regulatorerna med och utan huvud utanför sfären som ses i Figur 21 samt 22, visar att roboten accelererar något långsammare än simuleringen anger, framförallt med huvudet monterat. Motorerna följs åt mycket väl vilket tyder på att roboten borde hålla riktningen bra. Det finns inte heller någon tendens till oscillation vilket tyder på att en kraftigare reglering skulle kunna vara möjlig.

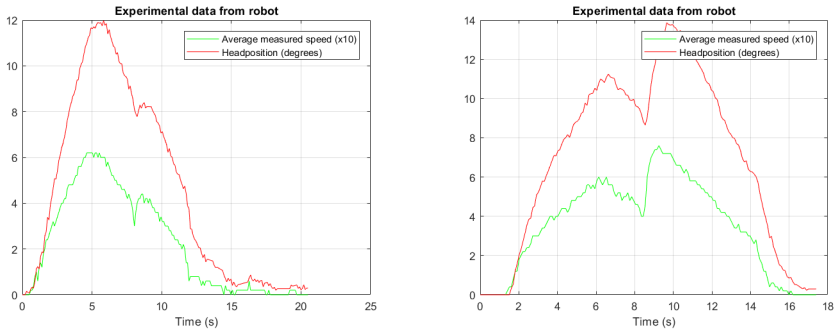


Figur 21: Test av motorregleringen med enbart IDE:n utan sfär eller huvud monterat.



Figur 22: Test av motorregleringen med enbart IDE:n utan sfär men med huvudet monterat.

Test av huvudets reglering (Figur 23) med och utan huvud monterat ger liknande resultat där vinkeln tydligt följer robotens hastighet både med och utan huvud. Kurvan följer också med då hastigheten plötsligt ökar utan att ge för snabb acceleration och riskera att huvudet ska lossna.



Figur 23: Test av huvudregleringen utan (vänster) och med (höger) huvudet monterat

6.2.2 Fjärrstyrning

Fjärrstyrningen skedde framförallt genom en androidapplikation enligt Figur 18. Denna applikation byggde på tidigare års applikation men fler funktioner implementerades. Två joysticks för styrning av IDE:n användes och två knappar implementerades för att ge användaren möjlighet att rotera huvudet utan att påverka robotens övriga rörelser. Appen fungerade väl och gav ett enkelt sätt att styra all funktionalitet som roboten hade.

6.3 Verifiering av ställda krav

I kravspecifikationen, A.1, ställdes krav och önskemål för roboten som behövde verifieras genom tester. Nedan listas resultaten av testerna för alla krav och önskemål.

6.3.1 Sfär och huvud ska kunna balansera stillastående på plan mark

Roboten hölls upprätt både med och utan sfären runt IDE och på grund av den låga tyngdpunkten så fick inte huvudets vikt roboten att välta i någon situation.

När IDE:n befann sig utanför sfären så kom dock viktplattorna som placerats under konstruktionen i kontakt med underlaget då enheten inte

kunde balansera sig själv på två hjul utan skrapade istället ena hörnet på vikterna i marken vid körning utanför sfären.

När IDE:n placerades i sfären så skedde inte detta då hjulen tillsammans med rullagren runt sidorna, Se Figur 7, stabiliserade hela konstruktionen så att den omöjligen kunde skrapa någon komponent på insidan av sfären.

6.3.2 Huvudet ska kunna luta 20 grader i alla riktningar

Huvudets möjliga lutning verifierades till 20 graders lutning från toppen på sfären och sedan tillbaka igen utan att huvudet ramlade av utsidan av sfären eller att servomotorn inte orkade förflytta huvudet till sin ursprungsposition igen, se Figur 24 nedan.

Figur 24: Sfären med servicelucka implementerad.

För att utesluta felkällor och störningar från instabilitet och oscillationer av IDE vid framdrift genomfördes testet med roboten stillastående genom att koppla ifrån elmotorerna till hjulen så att konstruktionen av huvudet kunde testas individuellt.

6.3.3 Roboten ska kunna framföras i 1.5 m/s

Robotens hastighet verifierades till 0.86m/s utan att ha IDE monterad i sfären. Hastigheten sänktes medvetet från de ursprungliga 1.5m/s genom att lägga in ett tröskelvärde på elmotorerna i mjukvaran då roboten blev mycket svårare att kontrollera vid högre hastigheter, samt att små felkällor och störningar gjorde verifieringarna svåra att utföra då roboten var svårare att styra.

Verifieringen utfördes genom att mäta upp en sträcka på ett jämnt och plant underlag på fem meter för att sedan köra robotens IDE utan sfär i sin maximala hastighet och ta tiden hur lång tid det tog för roboten att färdas fem meter. Testet utfördes endast utan sfären på grund av att instabiliteten som uppkommer när roboten körs i sfären, vilket skulle göra testet praktiskt taget omöjligt att genomföra då sfärens färdriktning inte kan hållas på en rak linje.

6.3.4 Hela konstruktionen ska kunna framföras

Konstruktionen med IDE och huvud gick att framföra kontrollerat utan sfär. Detta verifierades genom att testa att köra roboten i olika situationer, svänga runt olika hinder. För att kontrollera hur mycket roboten avviker tack vare störningar och variationer i elmotorerna när det ges ett rent gaspådrag på båda motorerna så användes samma metodik som i testet ovan, en sträcka på fem meter mättes upp och roboten placerades fem meter bort för att sedan köras in så rakt som möjligt till den markerade sträckan och sedan bara ge rent gaspådrag utan att korrigera manuellt för avvikelser. I slutet av sträckan mättes hur långt den hade avvikit åt något håll.

Resultatet blev att roboten körde i en lätt bågformad rörelse med en total avvikelse på ungefär 80 cm över fem meter, vilket ger en vinkelförändring på ungefär 9.09 ° på 5.85 sekunder, eller 1.55 °/s.

Detta test utfördes aldrig med IDE:n monterad i sfären då det inte går att framföra den ihopmonterade roboten rakt fram fem meter utan någon form av manuell kompensation. På grund av det här skulle avvikelserna bli så stora och varierande från varje körning vilket gör testet icke repeterbart och datan skulle inte ha någon mening.

6.3.5 Roboten ska kunna ändra och behålla färdriktning

IDE kan ändra färdriktning både i och utanför sfären. Utanför sfären behåller den även riktningen väl med endast 1.55 °/s avvikelse vid körning rakt fram (se tidigare avsnitt). När sfären monteras runt IDE:n så kan riktningen fortfarande ändras men på grund av instabilitet så går det inte att fortsätta köra i den riktning som valts.

6.3.6 Huvudet ska följa med vid ändrad färdriktning

Körs IDE:n utan sfären så uppfylls kravet att huvudet ska följa med vid ändrade färdriktningar. Magnetkraften är även stark nog att hålla huvudet stabilt om sfären monteras mellan huvud och upphängningen. Precis som det beskrivs i föregående verifieringsavsnitt så går testerna ej att genomföra på ett bra sätt för att få ut värdefull data med sfären monterad.

6.3.7 Stanna kontrollerat utan oscillation inom 5 m

När roboten framförs utan sfär stannar den kontrollerat utan oscillation inom ett fem meters spann. Dessa tester gjordes på samma sätt som tidigare med ett uppmätt fem meter-avstånd på plan yta där roboten avviker marginellt från en rak bana. När reglaget för framåtdrift släpps och får återgå till sitt ursprungsläge stannar roboten med en deaccelerationssträcka på ca. 40 cm.

Sfären ger roboten oscillation som inte nullifieras med reglering i dagsläget, utan operatören får korrigera med manövrering. Som nämnts i tidigare verifieringsavsnitt så är avvikelserna så stora vid test med sfären att det inte ger någon konsekvent eller värdefull data. Vid framfart i sfären stannar roboten tack vare dess låga tyngdpunkt, men på olika sträckor och i olika riktningar.

6.3.8 Huvudet ska kunna rotera 360° runt sin egen axel

Huvudets rotation verifierades med tester vid dess extremvinklar och direkt lodrätt ovanpå sfären. Huvudet kan vrida 360° på grund av rotationsservomotorn som tillåter full rotation samt applikationen för fjärrstyrning där det implementerats två knappar för styrning av rotation i

två riktningar; medsols och motsols.

Dessa tester gjordes både med och utan sfär, och i båda fall kunde det verifieras att det fungerade. Vid testerna med sfären var serviceluckan öppen så att den inre funktionaliteten kunde verifieras. Servomotorn driver magnetarmens rotation utan att huvudets fyra magneter tappar kontakt med överrensstämmande magneter på armen inuti sfären.

6.3.9 Huvudet ska kunna styras oberoende av färdriktning

Huvudets vinkel kan ej styras oberoende av färdriktning. Detta då dess vinkel bestäms av robotens hastighet och färdriktning. Vid drift framåt lutas huvudet framåt enligt en reglering beskriven i kapitel 5.2.2. Likadant vid bakåtdrift så lutas huvudet bakåt.

Det går att införa en ny kod som tillåter applikationen för fjärrstyrning att styra huvudets riktning vid stillastående. Med denna kod implementerad går det inte att köra roboten utan endast att styra huvudets riktning och rotation då reglagen för dessa används för att kontrollera huvudet istället. Därför uppfyller detta inte kravet gällande huvudets styrning under framdrift.

6.3.10 Önskemål att roboten ska kunna rotera huvudet 360° från stillastående på 1s och att roboten ska kunna rotera huvudet med hastigheten 60 rpm

Det här önskemålet uppfylldes ej då den valda servomotorn har en maxhastighet på 45 rpm och kan därför ej uppfylla de specificerade önskemålen.

6.3.11 Designkrav och önskemål

Ingen av designkraven uppfylldes, roboten har rätt form och utseende på huvudet men saknar en målad kropp. Sfären är inte heller tillräckligt jämn som det ställda kravet vilket också medfört att några av ovannämnda krav inte heller uppfyllts.

Den byggda serviceluckan förenklade både laddning av batteri och annat underhåll, och önskemålet med att få upp denna på mindre än två minuter uppnåddes.

7 Diskussion

Diskussionen är uppdelad i samma följd som tidigare kapitel. Den innehållar vad som gick bra, vilka problem som uppmärksammas samt vilka eventuella förbättringar som kan utföras vid en fortsatt utveckling av roboten. Det avslutas med ett delkapitel om behovet av ytterligare kunskap.

7.1 IDE

Basen för designen av IDE:n var redan given då det valdes att bygga vidare på ett tidigare projekts arbete. Denna bas förändrades inte nämnvärt under projektets gång utan byggdes framförallt på med nya komponenter. Då de gamla hjulen var utslitna och gav dåligt grepp byttes dessa ut mot ett par inlineshjul. Fördelen med dessa är att de är designade för att kunna få grepp även vid belastning och förslitning i sneda vinklar.

Ett annat problem som inte upptäcktes förrän IDE:n monterades för testkörning i sfären var att vikten i botten av IDE:n var för låg vilket ledde till att tyngdpunkten var för högt upp från botten och IDE:n ofta upplevdes som för lätt för att negera de oscillationer som uppkom på grund av ojämnheter på sfärens ytor och motorernas avvikelser.

7.2 Sfär

Från tidigare projekt [1] framkom det att det hade varit önskvärt att kunna komma åt robotens IDE på ett snabbt och lätt sätt utan att behöva skruva isär hela sfären. Därför konstruerades en servicelucka för att ge bättre åtkomst till robotens inre delar. Denna lucka förenklade arbetet när IDE:n varit inmonterad i sfären eftersom sfären inte längre behövdes skruvas upp i sina två halvsfärer.

Sfärens ojämnheter gjorde roboten mycket svårstyrd och påverkade även huvudets rörelse negativt. Då serviceluckan var 3D-printad med inställningar som gav låg precision hade den dålig passning med resten av sfären och orsakade ännu en ojämn kant på sfären. En ny servicelucka och någon form av ytbehandling är helt nödvändig vid fortsatt utveckling av roboten med nuvarande sfären. Ett annat alternativ är att göra om sfären på nytt och undersöka alternativa tillverkningsmetoder. 3D-skrivare av typen

FDM (fused deposition modeling) kan ha höga tillverkningsvariationer och komponenterna kan deformeras under tillverkningen vilket försvårar montering, inpassning och ytjämnhet, så om tekniken ska användas rekommenderas det att undersöka andra varianter av 3D-printning så som SLS (selective laser sintering) och eventuellt att få komponenter tillverkade på beställning.

7.3 Huvud

Från det tidigare projektet där magnethållaren konstruerades, [2], framkom det att magneterna var för underdimensionerade för att hålla fast huvudet. Därför lades mycket tid på att undersöka detta. Det tidigare projektet använde sig dock av en annan sfär med flera lager av tjockare paneler vilket ökade avståndet mellan magneterna. Det minskade avståndet som uppkom efter val av sfär medförde då att magneterna inte längre blev underdimensionerade och var tillräckliga för att hålla uppe huvudet i den tänkta vinkeln. Det var istället sfärens ytjämnhet som blev ett problem eftersom de fanns flera ojämnheter som huvudet och magnethållaren passerade över och temporärt kunde fastna på. Det ledde i vissa fall att huvudets och hållarens magneter inte längre hamnade i linje med varandra varav inte hela magnetkraften och därmed kunde huvudet ramla av.

Från start var målet att huvudet skulle kunna röra sig fritt i två dimensioner på övre halvan av sfären. Det här valdes dock bort senare i projektet då det skulle leda till en avsevärt mycket tyngre konstruktion med dubbla servomotorer och någon form av led för huvudet samt en svårare reglering som i så fall måste inkludera ett gyroskop och accelerometer för att kunna positionera huvudet. Istället blev valet att huvudet skulle kunna lutas endast parallellt med hjulens riktning för att kunna motverka friktionskraften som uppstår mellan huvud och sfär vid framdrift av IDE:n. På grund av detta val kunde en simplare konstruktion för huvudets upphängning tas fram och där stor vikt lades vid att försöka hålla tyngdpunkten så låg som möjligt genom att t.ex placera servomotorn under den genomgående axeln. Se Figur 5.

Möjligheten att kontrollera huvudets lutning oberoende av kroppens rörelse var också en idé som valdes bort under utvecklingen framförallt på grund av användarvänlighet i applikationen för fjärrstyrning då en till joystick på den

begränsade yta som en mobiltelefon erbjuder skulle göra det väldigt enkelt att råka komma åt fel joystick vid styrning och av misstag luta huvudet åt fel håll eller börja driva roboten framåt när huvudet ska lutas. Istället regleras huvudets lutning automatiskt utifrån hjulens hastighet och lutas automatiskt långsamt i den riktning som IDE:n kör.

7.4 Reglering och programmering

Då valet gjordes på att fortsätta på ett tidigare projekts programmering så behövdes tid läggas på undersökningar för bättre förståelse. Den kod som gavs tillgång till saknade ordentlig implementering av regulator vilket gjorde den mycket svårstyrd, men det här berodde troligen på efterkonstruktioner då koden kan varit anpassad för andra ändamål.

Simuleringarna som gjordes gav en reglering som i slutändan fungerande tillräckligt bra för att styra roboten enligt uppställda krav. Programmeringen av Arduino-kortet blev dock ett hinder med tanke på att programkoden som redan implementerats inte fungerade enligt specifikation utan gav fel som krävde omfattande felsökning för att hitta och åtgärda.

Styrningen av huvudet var oproblematisk då servomotorer användes vilket gjorde positionsregleringen enkel. Utmaningen låg istället i att inte göra för häftiga utslag för att varken störa balansen av roboten eller tappa kontakten med huvudet. Detta problemet blev dock betydligt mindre när regleringen gjordes efter hastigheten då den inte förändras ryckigt och de ryck som uppstod kontrollerades av regulatorn. Då det ställs lägre krav på rotationsservomotorn gällande positions- och hastighetskontroll räckte det med en enkel linjär reglering av detta för att skona servomotorn och undvika ryck.

Regleringen och programmeringen fungerade bättre efter utvecklingen men det finns fortfarande vissa förbättringsmöjligheter. Simuleringar som har tagits fram kan implementeras närmare den verkliga konstruktionen och även få in fler av robotens funktioner. Det här skulle kunna leda till en bättre approximerad reglering och möjligen lösa nya problem. För att göra dessa behövs det dock mer än endast en grundläggande kunskap i programmet Simulink. Det finns även förbättringsmöjligheter i programmeringen av Arduinon som exempelvis att använda gyroskop för att kompensera för

oscillationer i sfären. ,

7.5 Fjärrstyrning

När projektet påbörjades så fanns inga planer på att uppgradera applikationen för fjärrstyrning som tidigare projekt hade skapat. Den fungerade för att styra roboten och högre krav än så fanns inte för den från start. Det som upptäcktes efter att sfären och regleringen fått några uppgraderingar så att de var i körbart skick var att applikationen var en begränsande faktor i hur exakt det gick att kontrollera roboten. Den var svår att svänga kontrollerat med men framförallt nästan omöjlig att styra i en rak linje. Då tidigare applikation bara hade en joystick för både gaspådrag i Y-led och rotation i X-led var det nästan omöjligt att ge den ett rent gaspådrag utan att framkalla någon grad av rotation i X-led.

Det här sågs som ett stort problem då några typer av verifieringar som planerats byggde på att roboten kan styras i en rak linje i Y-led för att mäta möjlig förskjutning i X-led som orsakats av störningar i systemet. När det inte gick att ge den ett gaspådrag utan att själv introducera stora störningar i systemet så blev dessa tester i princip helt omöjliga att genomföra.

Till följd av detta så bestämdes det att utveckla applikationen och därmed implementera två joysticks, en för rent gaspådrag (Y-led) och en för att svänga roboten (X-led), det här ledde till en större omarbete än väntat då den ursprungliga applikationen inte var anpassad för att kunna hantera flera pekpunkter samtidigt (så kallad multitouch). Så den grundläggande koden för hur data skickas via Bluetooth och dylikt lämnades mer eller mindre orörda medan hanteringen av joysticks på skärmen förändrades avsevärt.

När huvudets rotation sedan implementerades så framkom behovet av en möjlighet att rotera huvudet oberoende av robotens rörelser i övrigt, därför implementerades även två knappar för att rotera huvudet medsols respektive motsols.

Det största problemet med applikationen idag är att det är väldigt enkelt att komma åt fel reglage när roboten kontrolleras. Om fullt utslag åt vänster på joysticken för att svänga roboten ska uppnås så är det väldigt lätt att råka komma åt knapparna för rotation av huvudet och på så sätt släpps

joysticken och svängen avbryts då abrupt och istället börjar huvudet rotera. Det här skulle kunna åtgärdas genom att antingen lägga in avgränsningar i appen som begränsar övergångarna mellan olika reglage utan att släppa fingret alternativt byta ut applikationen helt mot t.ex en fysisk handkontroll för spelkonsol eller liknande där en helt annan taktil feedback kan uppnås och på så sätt underlätta styrningen.

Valet att skapa en Windows-applikation grundades i problemet att det var svårt att övervaka robotens signaler under färd då det antingen var nödvändigt att följa efter roboten med en USB-kabel, vilket inte är möjligt i sfären och kan påverka systemet, eller implementera övervakning i androidapplikationen vilket är opraktiskt då det blir problematiskt att lagra och överföra datan till en dator för vidare behandling. Eftersom det relativt snabbt och enkelt går att skapa ett användargränssnitt och skapa virtuella seriella portar i C# användes detta för ändamålet.

7.6 Reflektion kring behovet av ytterligare kunskap

Grundläggande kunskap inom reglerteknik samt C-programmering (för Arduino-kodning) är ett krav för att utveckla en robot av denna typ. Grundläggande kunskap om elektronik och hur elektriska komponenter kopplas ihop är också av stor vikt. Beroende på hur komponenterna är planerade att tillverkas kan även kunskap i CAD-modellering vara till stor hjälp både vid konstruktion och verifiering.

8 Slutsats

Syftet med projektet var att utveckla en sfärisk robot med fjärrstyrning som kan rulla kontrollerat i önskad riktning, vilken är utrustad med ett huvud som behåller sin position på övre halvan av den sfäriska kroppen under framdrift av roboten och kan flyttas i olika riktningar över sfärens yta. Roboten uppfyller flera av de uppsatta kraven och önskemålen när IDE:n samt huvudet körs utanför sfären. Sfärens ojämna yta ger både problem med styrning av kroppen och huvudet.

En applikation för att kunna styra roboten via Bluetooth vidareutvecklades från tidigare projekts , [1], applikation för att underlätta kontroll och verifiering av funktionaliteten hos roboten. Det vore dock önskvärt att ersätta även denna vidareutveckling med en fysisk kontroll för ytterligare underlättnad av kontrolleringen tack vare en taktil respons från de olika reglagen.

Komponenter för att kunna magnetiskt fästa ett huvud på sfären konstruerades, tillverkades samt monterades på IDE:n vilket möjliggör körning av roboten med fastsatt huvud vid vidareutveckling. Den nuvarande designen tillämpar av designskäl enbart rörelse av huvudet i färdriktningen.

Det finns flera förbättringsmöjligheter vid en eventuell vidareutveckling som exempelvis en jämnare sfärisk kropp och bättre reglering. Det finns också möjliga förbättringar för att roboten ska efterlikna BB-8 gällande design och funktioner. Vid vidareutveckling behövs det också ytterligare kunskap gällande reglerteknik, elektronik samt kunskap av CAD-modellering.

Referenser

[1] O. Almér, H. Andersson, G. Boquist, E. Forsström, P. Hansegård & L. Johansson. "BB-8 - konstruktion och reglering av sfärisk robot". Kandidatuppsats, Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg, 2017.

[2] A. Andersson, C. Andersson, G. Andersson, J. Andrén, J. Laurell & F. Åvall. "Design och konstruktion av sfärisk robot". Kandidatuppsats, Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg, 2017.

[3] Rotundus. Internet: `http://www.rotundus.se/`, 2008 [21 februari 2018].

[4] J Alves & J Dias. "Design and control of a spherical mobile robot," International Conference on 'Mechatronics', Loughborough University, Leicestershire, UK, 18–20 Juni 2003.

[5] Disney Enterprises, Inc. (Burbank, CA), 'Magnetic spherical balancing robot drive', US8269447B2, 2012.

[6] How Does BB-8 Work?. Internet: `https://howbb8works.com/`, 2015.

[7] "PID Controller, Discrete PID Controller" *Mathworks* [Online] Tillgänglig: `https://se.mathworks.com/help/simulink/slref/pidcontroller.html`

[8] David Vokoun, Marco Beleggia, Luděk Heller & Petr Šittner. "Magnetostatic interactions and forces between cylindrical permanent magnets", *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol. 321, November 2009.

A Bilagor

A.1 Kravspecifikation

Tabell 4: Kravspecifikation med krav (K) samt önskemål (Ö) med verifieringspunkter.

K/Ö	**Kravbeskrivning**	**Verifiering**
	Ekonomi	
K	Kostnaden för inköp ska inte överskrida budgeten på 5000 kr.	Bokföring.
	Prestanda	
K	Sfären och huvudet ska kunna balansera stillastående på plan mark.	Verifiera med tester.
K	Ska kunna luta huvudet 20 grader i färdriktningen, både stillastående och vid körning.	Verifiera med mekaniska beräkningar och testa hur många graders lutning som är möjligt.
K	Ska kunna framföras i $1.5m/s$ på plan yta.	Tidtagning på uppmätt sträcka.
K	Hela konstruktionen måste kunna framföras.	Verifera med tester.
K	Roboten ska kunna fjärrstyras via bluetooth.	Skicka enkla instruktioner som t.ex. stegsvar.
K	Kunna ändra färdriktning.	Verifiera med tester.
K	Huvudet ska följa med när sfären ändrar färdriktning.	Verifiera med tester.
K	Ska kunna stanna kontrollerat utan att wobbla inom $5m$ från $1.5m/s$.	Verifera med tester.
Ö	Huvudet ska kunna rotera 360 grader runt sin egen axel.	Verifiera med tester.
Ö	Kunna förflytta huvudet 20 grader åt alla riktningar.	Verifiera med tester.
Ö	Ska kunna styra huvudet oberoende av färdriktning.	Verifiera med tester.

Ö	Ska kunna behålla samma färdriktning.	Testa att roboten kan följa en linje.
Ö	Kunna ändra färdriktning utan att stanna.	Verifiera med tester.
Ö	Ska kunna rotera huvudet 360° från stillastående på 1s	Verifiera med tester
Ö	Ska kunna rotera huvudet med hastigheten 60 RPM	Verifiera med tester
	Design	
K	Sfären ska ha en jämn yta utan skarvar och kanter större än 1 mm.	Mäta synliga skarvar med skjutmått.
K	Ska likna BB-8 till utseendet enligt filmerna.	Verifiera med undersökning av källmaterial.
Ö	Ska kunna komma åt att ladda och underhålla roboten på mindre än två minuter från en körfärdig robot.	Tidtagning.

A.2 Kod

Robotens Arduinokod finns tillgänglig på github: https://github.com/MrOlsson/BB-8-Arduino

Androidapplikationen för att styra roboten finns tillgänglig på github: https://github.com/MrOlsson/BB-8-android-controller

Programmet som använts för att kommunicera med roboten via bluetooth för att få fram data vid drift finns tillgängligt på github: https://github.com/MrOlsson/PC-styrprogram-robot

A.3 CAD-filer

De komponenter som konstruerades under projektet finns tillgängliga på thingiverse: https://www.thingiverse.com/thing:2909498