

Självbalanserande motorcykel

Kandidatrapport inom civilingenjörsprogrammet Automation & Mekatronik

Nils Blomqvist 870826-5593
Stefan Edmonds 901028-4850
Robert Freiholtz 850613-5592
Rasmus Lindberg 871024-3513
Johan Lövgren 840520-0471

Institutionen för Signaler och System
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2012
SSYX02-12-40

Sammanfattning

En självbalanserande motorcykel har designats och konstruerats. Balanseringen åstadkoms av ett svänghjul, som inducerar ett vridmoment vid acceleration. Detta vridmoment styrs för att påverka motorcykelns lutning, och därigenom hålla balansen. Denna metod valdes på grund av dess enkelhet att realisera jämfört med andra metoder som studerades, och var möjlig att implementera inom projektets tidsavgränsning.

Motorcykeln konstruerades åt Intab Interface-Teknik AB i Stenkullen, ett företag inom elektronikbranschen, och skulle användas för att dra intresse till deras monter under mässor. Krav på motorcykeln inkluderade att den skulle kunna balansera stillastående, köras framåt och styras. Det fanns även krav på att utveckla ett grafiskt gränssnitt, som skulle presentera data från motorcykeln och dess sensorer.

Förutom det grafiska gränssnittet har projektet inte lyckas uppfylla de uppsatta kraven, och hade endast framgång med en prototyp vilken kan balansera med varierande förmåga. Motorcykeln har konstruerats och har de essentiella komponenterna som behövs för framåtdrivning och styrning, men ingen balansering har lyckats implementeras.

I denna rapport beskrivs samtliga moment i utvecklingen av motorcykeln. Dessa inkluderar val av balanseringsmetod, modellering, simulering och tester på prototypen. I rapportens diskussionsavsnitt diskuteras skillnader mellan simulering- och de verkliga resultaten, samt vad de kan bero på. Det tas även upp potentiella ändringar som kan göras i framtiden för att lyckas balansera motorcykeln.

Abstract

A self-balancing motorcycle has been designed and constructed. The balancing of the motorcycle is achieved with a flywheel which, when accelerated, will induce a torque. This torque is manipulated to steer the lean angle of the motorcycle, and thus balancing the bike is possible. This method was chosen due ease of implementation compared to the other methods studied, and that it was possible to fulfil within the projects restricted time schedule.

The motorbike has been built on request from Intab Interface-Teknik AB located in Stenkullen, a company in the electronics industry, and would be used to attract passersby to their stand at exhibitions. The requirements for the motorcycle composed by the company included that it must be able to balance at a standstill, move forward and steer. They also requested for a graphical interface that would present data from the motorcycle and its sensors.

The project unfortunately has failed to satisfy the demands requested, and has only had success in the developing of a graphical interface. A prototype, built to simulate a stationary motorcycle, has been able to balance itself with a fluctuating capability, but this has yet to be implemented on the motorcycle. However, a motorcycle has been constructed, and has the essential components for forward motion and steering.

This report describes the development of the entire project. This includes the processes of deciding the method of balancing, modeling, simulations and tests on the prototype. The report also includes a discussion section, where thoughts concerning differences between the simulations and the prototype tests are considered, and reflections to why the project has not succeeded. This section also includes potential changes and modifications to the motorcycle that might be possible to fulfill in the future, to achieve a fully functional balancing motorcycle.

Förord

Denna rapport skrevs som en del av kandidatarbetet *Självbalanserande - motorcykel* som utfördes under våren 2012 på Chalmers Tekniska Högskola i Göteborg. Projektgruppen vill tacka framförallt Torsten Wik för handledning inom reglerteknik och mekatronik. Tack till Stefan Lundberg för handledning inom bl.a. induktansmätningar på motorer. Vi vill även tacka CRF, Chalmers Robot Förening, för hjälp med diverse mätningar.

Nomenklatur

PWM = Pulse With Modulation

XML = eXtensible Markup Language

RC = Radio Control

IEEE = Institute of Electrical and Electronics Engineers

Tachometer = vartalsräknare

SPI = Serial Peripheral Interface

UART = Universal Asynchronous Receiver/Transmitter

Innehåll

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Inledning | 1 |
| 1.1 | Bakgrund | 1 |
| 1.2 | Syfte | 1 |
| 1.3 | Metoder för balansering | 1 |
| 1.4 | Delproblem | 4 |
| 1.5 | Avgränsningar | 5 |
| 1.6 | Rapportens upplägg | 5 |
| 2 | Teori | 7 |
| 2.1 | Fysikaliska samband | 7 |
| 2.2 | Reglering | 9 |
| 3 | Metod | 14 |
| 3.1 | Fysikaliska samband | 14 |
| 4 | Genomförande | 16 |
| 4.1 | Konstruktion | 16 |
| 4.2 | Programmering | 20 |
| 4.3 | Reglering | 27 |
| 4.4 | Simuleringsresultat | 32 |
| 4.5 | Implementering | 37 |
| 5 | Resultat | 40 |
| 5.1 | Prototyp: PD-regulator | 40 |
| 5.2 | Grafiskt interface | 42 |
| 6 | Diskussion | 43 |
| 6.1 | Jämförelse mellan simuleringsresultat och prototyptester | 43 |
| 6.2 | Oväntat beteende | 43 |
| 6.3 | Projektutvärdering | 43 |
| 6.4 | Potentiella ändringar som kan göras i framtiden | 44 |
| 7 | Slutsats | 46 |
| | Referenser | 47 |
| | Appendix | 49 |
| A | Budget | 49 |

| | | |
|----------|--------------------------------|-----------|
| B | Stabilitet | 50 |
| C | Intab - specifikationer | 51 |
| D | Ritningar - Prototypen | 52 |
| E | Ritningar - Motorcykeln | 59 |

1 Inledning

1.1 Bakgrund

Att balansera en cykel är något de flesta lär sig i tidig ålder. Människor lyckas med detta genom en kombination av förflyttad tyngdpunkt, pedaltryck och styrutslag. Detta är ett bra exempel på hur välfungerande regulator människan verkligen är. Reglering av en motorcykel kan därför vara ett betydligt svårare problem för oss än att i själva verket cykla.

En cykel som kan balansera sig själv kan vara användbar från ett säkerhetsperspektiv, genom att implementera ett självbalanseringssystem som kan hjälpa föraren att återfå balansen om han eller hon skulle börja falla. Systemet skulle bland annat kunna vara användbart för barn eller personer som ska lära sig cykla eller köra motorcykel.

1.2 Syfte

Syftet med det här projektet har varit att konstruera en fullt fungerande självbalanserande motorcykel åt företaget Intab Interface-Teknik AB i Stenkullen. Företaget kommer använda motorcykeln som utställningsobjekt på mässor, en s.k. ”eyecatcher”, och har därför uttryckt önskemål om produkten. Motorcykeln ska bland annat kunna balansera stillastående då den är tänkt att visas upp på exempelvis ett bord där personer kan gå fram och stöta till den. Motorcykeln skall också kunna styras trådlöst från en dator så att uppvisningar av motorcykeln möjliggörs. Det finns dessutom en önskan om ett grafisk gränssnitt där intressanta mätdata kan presenteras för åskådare. Se hela specifikationen i bilaga C.

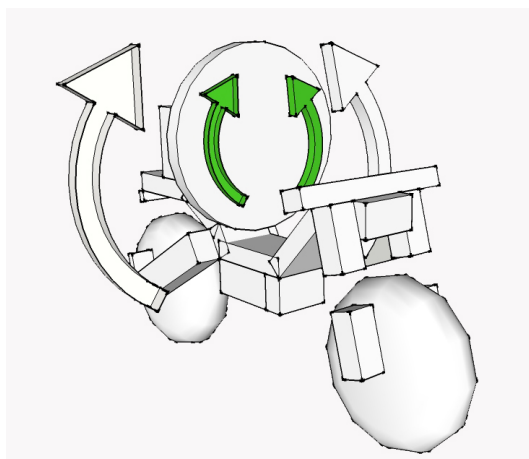
1.3 Metoder för balansering

Den mest centrala delen i projektet var att ta fram en balanseringsmetod som uppfyllde Intabs krav för motorcykeln. Därför gjordes det tidigt observationer och dokumentering av liknande projekt för att finna potentiella metoder för balansering av motorcyklar. Följande tre metoder valdes ut och ansågs vara möjliga lösningsförslag för att balansera systemet.

- Balansering med hjälp av ett vertikalt balanseringshjul
- Balansering med hjälp av framhjulsstyrning
- Balansering med hjälp av två horisontella reglerbara balanseringshjul

Balansering med hjälp av ett vertikalt balanseringshjul

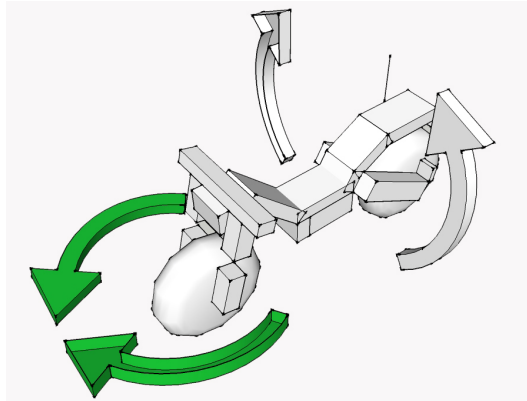
Denna metod består av en traditionell motorcykel på vilken en motor med svänghjul monteras, se figur 1. Betraktat framifrån kan systemet ses som en inverterad pendel. Motorn med svänghjulet monteras mellan främre och bakre hjulet. Vid momentpålägg från motorn accelereras svänghjulet vilket resulterar i ett vridmoment verkande på pendeln. Detta vridmoment kan användas för att fysiskt ändra vinkeln på pendeln [9].



Figur 1: Balansering med hjälp av en inverterad pendel med vertikalt balanseringshjul.

Balansering med hjälp av framhjulsstyrning

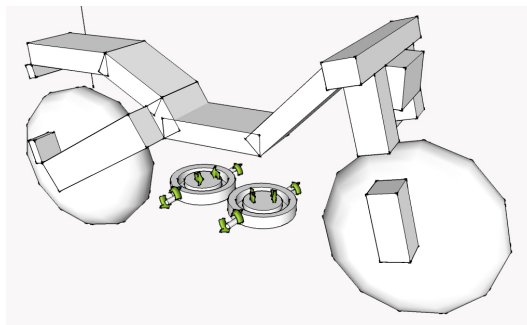
Denna metod kan framstå som den mest naturliga av alla tre, eftersom det huvudsakligen är samma metod som vi människor använder. En motor kopplas till framgaffelns axel och styr framhjulets vinkel, se figur 2. För att hålla balansen ska motorn styra framhjulen i samma riktning som motorcykeln faller. De variabler som är viktigast för att bibehålla balansen är fallvinkeln, fallhastighet och hastigheten framåt. Fördelar med denna metod är dess potentiella enkelhet att reglera i högre hastigheter. Nackdelen med denna metod är att regleringen blir mer komplicerad om motorcykeln skall kunna stå still [10].



Figur 2: Balansering med hjälp av styrutslag.

Balansering med hjälp av två horisontella reglerbara balanseringshjul.

Denna metod använder sig av gyroeffekten från två stycken balanseringshjul. Dessa sitter i rad på motorcykelns undersida, se figur 3. Hjulens hastighet är konstant, och gyroeffekten som skapas motverkar förändringar i axeln som hjulen snurrar runt. Ett exempel på denna gyroeffekt är en klassisk leksakssnurra, som håller sig uppe så länge rotationshastigheten på snurran är tillräckligt hög. Metoden använder sig av denna kraft och reglerar vinklarna på hjulen för att uppnå önskad balansering [11].



Figur 3: Balansering med hjälp utav två horisontella reglerbara balanseringshjul.

1.4 Delproblem

För att uppnå målet att balansera en motorcykel efter Intabs krav har arbetet delats in i följande delproblem:

1.4.1 Balansera stillastående

Motorcykeln skall, utan hastighet i något riktning, klara av att hålla balansen och vid en eventuell mindre störning motsvarande cirka 5 grader vara kapabel att kompensera och återfinna balansen. För att åstadkomma detta ska tre delmoment genomföras;

- En matematisk modellering av motorcykeln baserad på balansekvationer och de konstitutiva samband som beskriver de fysiska fenomenen som motorcykelns uppförande påverkas av.
- Verifiering av de matematiska modellerna sker genom simuleringar. Programvarorna som utnyttjas till detta är MATLAB och Simulink. De olika simuleringarna var grunden till dimensioneringen av elmotor samt svänghjul. Simuleringarna skall utvärderas och läggs grunden till valet lämplig regleringsmetod.
- En enklare prototyp i form av en inverterad pendel konstrueras i syfte att utföra tester på. Detta för att validera och utvärdera samstämmighet mellan teori och praktik.

1.4.2 Framåt drift

Motorcykeln skall drivas framåt med hjälp av en elmotor monterad vid motorcykelns bakhjul. Motorn styrs med PWM-signal direkt från microcontrollern.

1.4.3 Styrning

Implementering av styrning görs genom att reglera vinkeln på framhjulet/framgaffeln. Vridningen kan åstadkommas genom en motor monterad på framgaffeln som styrs via microcontrollern. Vid val av motor är motorns styrka och vikt avgörande.

1.4.4 Trådlös kommunikation

För att kunna reglera styrning och framåtdrift, samt leverera aktuella data till en dator, måste en modul för trådlös kommunikation implementeras. Modulen skall fungera som en länk mellan microcontrollern och datorn.

1.4.5 Grafisk interface

Ett grafiskt interface behövs för att möjliggöra fjärrstyrning och presentation av intressanta mätdata från motorcykeln.

1.5 Avgränsningar

Ett projekt i storleksordning av ett kandidatarbete har begränsningar både utifrån ett ekonomiskt- och ett tidsperspektiv. Detta medför att allt för kostsamma och komplicerade lösningsalternativ kan bli mycket svåra att genomföra. Efter utvärdering av lösningsalternativen i kapitel 1.3 ansågs konstruktionen med två balanseringshjul inte vara genomförbar på grund av dess komplexitet.

Eftersom motorcykeln också bör uppfylla kunden Intabs önskemål och krav, medför även detta begränsningar på valet av balanseringsmetod. Önskemålet att motorcykeln skulle kunna balanseras stillastående gör även en renodlad version av balansering med endast framhjulet till en alltför komplex lösning. Valet föll därför på lösningsalternativet med ett roterande svänghjul som ansågs vara genomförbart.

1.6 Rapportens upplägg

Syftet med denna text är att förklara rapportens upplägg och ge läsaren möjligheten att förstå varför det har valts att skriva rapporten på denna form. Rapporten börjar med ett teoriavsnitt vilket behandlar fysikaliska samband som använts och reglerstrategier som utvärderats och hur dessa designas. Därefter följer ett metodavsnitt där en beräkningsmetod baserad på vridmoment presenteras. Denna metod är basen för simuleringsmodellen och är därför viktiga att förklara.

Upplägget i de följande delarna av rapporten styrs av projektets syfte, vilket är att tillverka en självbalanserande motorcykel. Resultatavsnittet ska därför endast visa resultat från prototypen, med den reglering och de

inställningar som har valts för den slutgiltiga produkten. Simuleringsresultat och jämförelser mellan olika regleringsmetoder presenteras inte i resultatavsnittet, eftersom de representerar steg till slutprodukten och presenteras därför i genomförandeavsnittet. Genomförandeavsnittet beskriver därför hela processen, som inkluderar konstruktion av prototypen och motorcykeln, programmering, val av hårdvara och dimensionering av regulatorerna. Förutom simuleringsresultat kommer även ett mindre implementeringsavsnitt inkluderas i genomförandet, där det diskuteras val av regulator till slutprodukten och varför andra lösningar inte valdes.

De resultat som presenteras i resultatavsnittet är endast de viktigaste för slutprodukten och är därför enklare att överskåda och dra slutsatser från. I diskussionen som följer finns en jämförelse mellan simuleringsresultat och de verkliga resultaten.

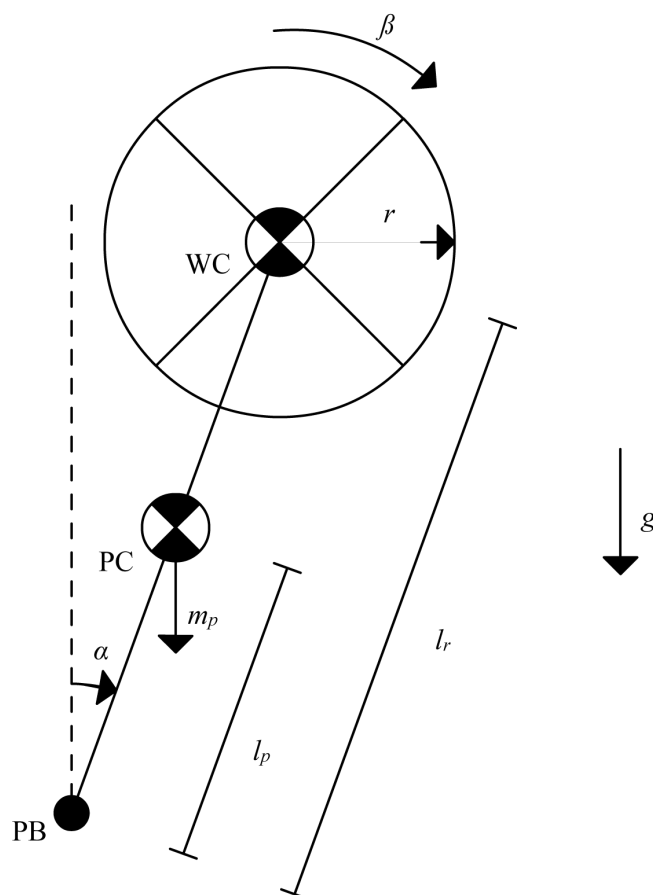
2 Teori

I det här avsnittet beskrivs teorin bakom de underliggande fysikaliska samband som används vid den matematiska beskrivningen av systemet. Den metod som har valts för att beskriva systemet är en jämviktsmetod baserad på systemets olika vridmoment.

2.1 Fysikaliska samband

Jämviktsmetod baserad på systemets vridmoment

Jämviktsmetoden går ut på att ställa upp systemets olika momentekvationer och bestämma sambanden mellan dessa. Modelleringen i detta avsnitt följer beskrivningen av Chetouane. S m.fl [3]. Nettomomentet τ_s på svänghjulet



Figur 4: En inverterad pendel med svänghjul.

relateras till vinkelhastigheten enligt Newtons lag

$$\tau_s = J_s \ddot{\beta}, \quad (1)$$

där J_s är svänghjulets tröghetsmoment och $\ddot{\beta}$ är svänghjulets vinkelacceleration.

Momentet beskrivs även av motormodellen

$$\tau_s = K_t i - b \dot{\beta}, \quad (2)$$

där K_t är motorns strömkonstant, b är motorns friktionskraft och $\dot{\beta}$ är svänghjulets vinkelhastighet.

För att beräkna konstanten b används följande formel

$$K_t i = \dot{\beta}_{max} b, \quad (3)$$

där i är den uppmätta strömmen och $\dot{\beta}_{max}$ är svänghjulets maximala vinkelhastighet när den roterande massan inte utsätts för något belastande moment.

Det totala momentet skapat av gravitationskraften är

$$\tau_g = m_{tot} g l_p \sin \alpha, \quad (4)$$

där m_{tot} är den totala massan, g är gravitationskonstanten, l_p längden till pendelns tyngdpunkt och α är lutningen på pendeln. Momentjämvikt ger sedan

$$\tau_g - \tau_s = J_s \ddot{\beta}, \quad (5)$$

där J_s är svänghjulets tröghetsmoment och $\ddot{\beta}$ är dess acceleration.

Ekvationerna (1) och (2) ger

$$\ddot{\beta} = \frac{1}{J_s} (K_t i - b \dot{\beta}). \quad (6)$$

Den elektriska delen av motormodellen beskrivs av

$$V_{in} = R_m i + L_m \frac{di}{dt} + K_e \dot{\beta}, \quad (7)$$

där V_{in} är den pålagda spänningen, R_m är motorns resistans, L_m är motorns induktans och K_e är motorns spänningskonstant. Ur denna ekvation kan $\frac{di}{dt}$ lösas ut vilket resulterar i

$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{L_m} (V_{in} - R_m i - K_e \dot{\beta}). \quad (8)$$

Ekvationerna (1), (2), (4) och (5) leder till

$$\ddot{\alpha} = \frac{1}{J_p}(m_{tot}gl_p \sin \alpha - K_t \dot{i} + b\dot{\beta}). \quad (9)$$

Tröghetsmomentet J för de olika delarna, systemet består av, måste beräknas för sig själva och förflyttas till samma punkt (PB) enligt Steiners sats [2]. Svänghjulets tröghetsmoment beräknas enligt

$$J_s = \frac{1}{2}m_s r_s^2, \quad (10)$$

där m_s är massan för svänghjulet och r_s är radien för svänghjulet. Ramens tröghetsmoment beräknas enligt

$$J_1 = \frac{1}{3}m_r l_r^2, \quad (11)$$

där m_r är massan på ramen och l_r är längden på ramen. Enligt Steiners sats förflyttas tröghetsmomentet för motorn till pendelns bas (PB) enligt

$$J_2 = \frac{1}{2}m_m r_m^2 + m_m l_m^2, \quad (12)$$

där m_m är massan på motorn, r_m är radien på motorn och l_m är längden till motorns och svänghjulets tyngdpunkt. Svänghjulets förflyttade tröghetsmoment beräknas enligt

$$J_3 = \frac{1}{2}m_s r_s^2 + m_s l_m^2. \quad (13)$$

Pendelns totala tröghetsmoment med avseende på PB beräknas enligt

$$J_p = J_1 + J_2 + J_3. \quad (14)$$

2.2 Reglering

För att åstadkomma en fungerande reglering av ett system måste förutsättningarna vara sådana att det är möjligt att reglera. Ett sätt att avgöra detta är att studera systemets s.k. styrbarhet, som t.ex. Glad och Ljung [8] definierar på följande vis:

”**Definition 3.1 (Styrbarhet)** Tillståndet x^* säges vara **styrbart** om det finns en insignal som på ändlig tid ger sluttillståndet x^* från begynnelsestillståndet $x(0) = 0$. Systemet sägs vara **styrbart** om alla tillstånd är styrbara.”

Anta att vi kan beskriva vårt system med en linjär tidsinvariant tillståndsmodell

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}}(t) &= A\mathbf{x}(t) + B\mathbf{u}(t) \\ \mathbf{y}(t) &= C\mathbf{x}(t) + D\mathbf{u}(t)\end{aligned}\tag{15}$$

Då kan följande sats [8] användas för att avgöra styrbarhet:

“Sats 3.1 *De styrbara tillstånden för systemet (15) utgör ett linjärt rum, nämligen värdeförrådet till matrisen (styrbarhetsmatrisen)*

$$S(A, B) = [B \quad AB \quad A^2B \dots A^{n-1}B]\tag{16}$$

där n är systemets ordningstal. Systemet är alltså styrbart precis då S har full rang.”

För att åstadkomma ett välfungerande reglersystem har tre typer av regulatorer undersökts och analyserats: PID-reglering, Kaskadreglering (PI+PD) och Linjärvadratiskreglering (LKR).

2.2.1 PID-reglering

PID-reglering är en metod där styrsignalen, $u(t)$, idealt ges av [6]

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{d}{dt} e(t),\tag{17}$$

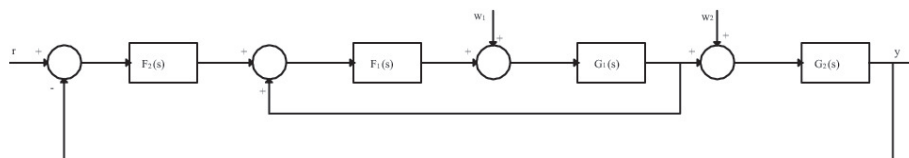
där $e(t) = r(t) - y(t)$ är reglerfelet, d.v.s skillnaden mellan börvärdet $r(t)$ och ärvärdet $y(t)$. Integralverkan används för att undvika kvarstående fel och derivata-verkan för att åstadkomma snabbare reglering, alternativt förbättra stabilitetsmarginalerna. PID reglering hanterar normalt endast Single Input Single Output (SISO) system, d.v.s. system som endast har en insignal och en utsignal. Laplacetransformering av PID-regulator ger i frekvens planet den matematiska beskrivningen [6]

$$F(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s.\tag{18}$$

Kaskadreglering

Kaskadreglering är en metod där fler än en regulator används för system som kan delas upp i delsystem i serie (kaskad) där mätvärden mellan delsystemen

är tillgängliga, se figur 5. Systemet består oftast av en inre återkoppling (sekundärreglering) som generellt är snabbare än den yttre återkopplingen (primärreglering).



Figur 5: Kaskadreglering [13]

Design och stabilitet vid PID-reglering

Enligt Lennartson [6] dimensioneras PID regulatorer för att erhålla önskad prestanda och robusthetsegenskaper. Dock motstrider dessa två egenskaper varandra, och problemet blir att optimera regulatorn för systemet i fråga, d.v.s. ha tillräckligt hög prestanda utan att äventyra robusthet och stabilitet. Prestandan begränsas även av styrsignalen som inte får vara för högt. MATLABs egen funktion *pidtune* använder dessa principer för att beräkna de optimala regulatorparametrarna för ett givet system och därigenom åstadkomma tillräcklig prestanda och robusthet [17].

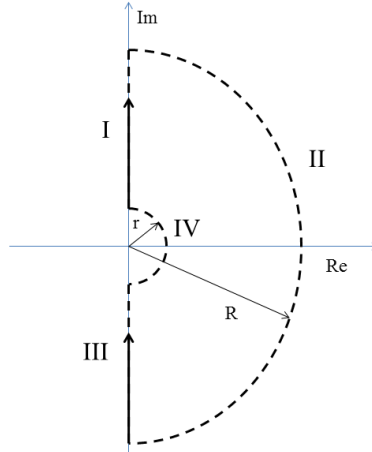
För att avgöra stabilitet och robusthet för instabila system, det vill säga ett system med minst en pol i högra halvplanet, används ofta Nyquists fullständiga stabilitetskriterium. Eftersom en inverterad pendel är instabil är det nödvändigt att använda denna metod. För att analysera ett sådant system, enligt Lennartson [6], beräknas kretsöverföring $L(s) = F(s)G(s)$, och sedan räknas antalet instabila poler. Därefter ritas en avbildning av $L(s)$ med hjälp av Nyquistkonturen. Konturen är en sluten kurva, som består av fyra delar som beskrivs nedan och visas i figur 6:

I/ $s = j\omega$ där $0 < \omega < \infty$

II/ $s = Re^{j\theta}$ där $R \rightarrow \infty$ & $\frac{\pi}{2} \geq \theta \geq \frac{-\pi}{2}$

III/ $s = -j\omega$ där $-\infty < \omega < 0$

IV/ $s = re^{j\theta}$ där $r \rightarrow 0$ & $\frac{-\pi}{2} \leq \theta \leq \frac{\pi}{2}$



Figur 6: Nyquistkonturen

Den kritiska punkten i avbildningen är punkten $(-1,0)$, där antalet varv N runt denna punkt räknas, där ett medurs varv medför en positiv ökning i N . Antalet instabila poler för det återkopplade systemet benämns P . Antalet instabila nollställen, det vill säga antalet nollställen som finns i högra halvplanet, för $1 + L(s)$ benämns som Z . Kriteriet för en stabil återkopplat system är följande villkor [6]:

$$Z = P + N = 0 \quad (19)$$

Med andra ord, antalet instabila poler ska vara lika med antalet moturs varv kring punkten $(-1,0)$, så att det inte finns några instabila nollställen i den karakteristiska ekvationen $1 + L(s)$.

2.2.2 Linjärkvadratisk-reglering

Linjärkvadratisk-reglering är, till skillnad från PID-reglering, inte en SISO-metod utan kan användas för Multi Input Multi Output (MIMO)-system. I denna reglermetod återkopplas alla systemets tillståndsvariabler.

Betrakta systemet

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Nv_1(t) \quad (20)$$

$$e = Cx(t) - r(t) \quad (21)$$

$$y = Cx(t) + v_2(t) \quad (22)$$

där e är variabeln som skall regleras mot noll och $[v_1^T v_2^T]^T$ är gaussiska vita brus med intensiteten

$$\begin{bmatrix} R_1 & R_{12} \\ R_{12} & R_2 \end{bmatrix}. \quad (23)$$

LKR syftar nu till att minimera variansen hos e med en i någon mening minimal variation i u . För att lösa detta reglerproblem ställs en generaliserad kostnadsfunktion upp som minimeras m.a.p. en styrlag för u , d.v.s

$$\min_u \int_0^\infty e^T(t)Q_1e(t) + u^T(t)Q_2u(t)dt, \quad (24)$$

där förhållandet mellan Q_1 och Q_2 bestämmer kompromissen mellan styrsignalsaktivitet och prestanda.

Den optimala regulatorn som minimerar kostnadsfunktionen ges av [8]

$$u(t) = -L\hat{x}(t) \quad (25)$$

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + K(y(t)) - C\hat{x}(t). \quad (26)$$

Där ekvation (26) är det så kallade Kalmanfiltret för systemet, som bestäms genom att lösa Ricatti-ekvationerna

$$0 = AP + PA^T + NR_1N^T - (PC^T + NR_{12})R_2^{-1}(PC^T + NR_{12}) \quad (27)$$

$$K = (PC^T + NR_{12})R_2^{-1}, \quad (28)$$

där P är den symmetriska positivt semidefinita lösningen till ekvation (27). L ges av

$$L = Q_2^{-1}B^T S, \quad (29)$$

där S är den entydiga, positiva, semidefinita och symmetriska lösningen till Ricatti-ekvationen

$$0 = A^T S + SA + M^T Q_1 M - SBQ_2^{-1}B^T S. \quad (30)$$

Ett Kalmanfilter används för att skatta systemets tillståndvariabler utifrån den antagna modellen, styrsignaler u och mätsignaler y . Om alla tillstånd är mätbara och brusnivåerna är mycket låga, d.v.s R_1 , R_{12} och R_2 mycket små, så att $y(t) = x(t)$ så har vi att $\hat{x}(t) = x(t)$ vilket betyder det att Kalmanfiltret ej är nödvändigt. Då är den optimala regulatorn en ren tillståndåterkoppling, $u = -Lx(t)$, enligt [8].

3 Metod

Jämviktsmetoden baserad på systemets vridmoment beskrivs i detta avsnitt.

3.1 Fysikaliska samband

Jämviktsmetod baserad på systemets vridmoment

Utifrån teorin presenterad i kapitel 2 har följande ekvationer härletts som tillsammans utgör det mekaniska och elektriska systemet sett ur ett momentjämvikts perspektiv. Ekvationerna (1), (2), (4) och (5) ger

$$\ddot{\alpha} = \frac{1}{J_p}(m_{tot}gl_p \sin \alpha - K_t i + b\dot{\beta}). \quad (31)$$

Ekvationerna (1) och (2) ger

$$\ddot{\beta} = \frac{1}{J_s}(K_t i - b\dot{\beta}). \quad (32)$$

Ur ekvation (7) löses $\frac{di}{dt}$ ut vilket resulterar i

$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{L_m}(V_{in} + R_m i + K_e \dot{\beta}). \quad (33)$$

Om tillståndsvektorn väljs till

$$x(t) = \begin{bmatrix} \alpha(t) \\ \dot{\alpha}(t) \\ \dot{\beta}(t) \\ i(t) \end{bmatrix} \quad (34)$$

och vi gör approximationen $\sin \alpha = \alpha$ får vi följande linjära tillståndsmodell

$$\begin{bmatrix} \dot{\alpha}(t) \\ \ddot{\alpha}(t) \\ \ddot{\beta}(t) \\ \dot{i}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{m_{tot}gl_p}{J_p} & 0 & \frac{b}{J_p} & \frac{K_t}{J_p} \\ 0 & 0 & -\frac{J_s}{b} & \frac{K_t}{J_s} \\ 0 & 0 & -\frac{K_e}{L_m} & \frac{R_m}{L_m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha(t) \\ \dot{\alpha}(t) \\ \dot{\beta}(t) \\ i(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L_m} \end{bmatrix} u(t) \quad (35)$$

$$y(t) = [1 \ 0 \ 0 \ 0] \begin{bmatrix} \alpha(t) \\ \dot{\alpha}(t) \\ \dot{\beta}(t) \\ i(t) \end{bmatrix}. \quad (36)$$

Det är viktigt att förstå att tillståndmodellen ovan inte är en modell för en självbalanserande motorcykel utan för en inverterad pendel. En modell för en självbalanserande motorcykel skulle vara mer komplicerad då den skulle inkludera fler variabler, såsom motorcykelns hastighet framåt och riktning den kör åt. Det ska också tilläggas att luftmotståndet i systemet har bortsetts ifrån eftersom det anses vara försumbart. Även friktionskraften i pendelbasen har bortsetts ifrån på grund utav att låga vinkelhastigheter resulterar i låga friktionskrafter.

4 Genomförande

I det här avsnittet beskrivs hela processen som inkluderar konstruktion av prototypen och motorcykeln, programmering, val av hårdvara och dimensionering av regulatorerna. Förutom simuleringsresultat kommer även ett mindre implementeringsavsnitt inkluderas.

4.1 Konstruktion

4.1.1 Prototyp

En prototyp i form av en inverterad pendel konstruerades i syfte att utföra tester på och simulera instabiliteten hos en stillastående motorcykel. Kraven som ställdes på prototypen var:

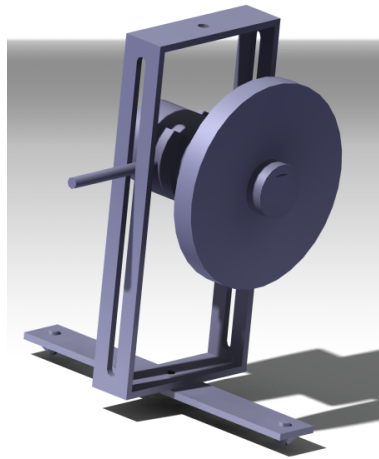
- Möjlighet att balansera med ett svänghjul.
- Positionen på motorn skall kunna ändras så att pendelns tyngdpunkt kan justeras.
- Prototypen ska byggas i samma storleksordning som den slutgiltiga motorcykeln.
- Pendeln skall vara sådan att den enbart kan röra sig i en dimension.
- Svänghjul och motorinfästning ska vara kompatibelt med flera olika motorer.

Höjden är vald så att alla lägen den slutgiltiga motorcykeln kan tänkas ha ska vara möjliga att utföra tester på. För att flera olika motorer ska passa, konstruerades ett justerbart motorfäste så att motorer med en diameter på upp till 36 mm kunde monteras. Detta var den maximala storleken på de motorer som var planerade att införskaffas. Svänghjulet dimensionerades utifrån simuleringar så att vinkelkompenseringen blev tillfredsställande.

Eftersom radien påverkar tröghetsmoment i kvadrat och massan påverkar tröghetsmomentet proportionellt är stor radie i förhållande till tjockleken på svänghjulet att föredra enligt ekvation (10). För att erhålla en tillfredsställande radie i förhållande till massa valdes därför att tillverka ett inre svänghjul i aluminium med en yttre ring av stål. För att svänghjulet ska kunna monteras på flera motorer konstruerades även ett nav till varje motor, då motoraxelns storlek och form varierar från motor till motor. Navet monterades på motorns axel, och i svänghjulet, där båda fästes på plats med var

sin stoppskruv.

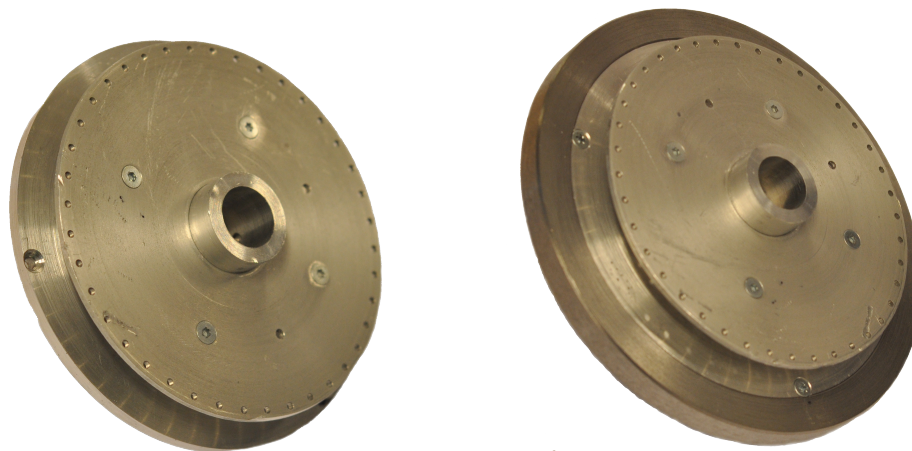
Prototypen designades först på dator i CAD-programet CATIA V5, där den ritats upp skalenligt. CAD-programmet ger även möjligheten att skapa ritningar som är måttsatta, vilket underlättade byggprocessen i prototyp-labbet, där alla maskiner som behövdes fanns att tillgå. Se figur 7.



Figur 7: CAD-modell av prototypen

4.1.2 Simulering och dimensionering av svänghjul

För att dimensionera svänghjulet gjordes simuleringar med olika radier, tjocklekar och material. Vid simuleringarna studerades styrsignalen, hastigheten på svänghjulet, masströghetsmomentet, vikten och vinkelkompenseringen. Efter olika svänghjulsp parametrar studerats och simulerats tillverkades ett svänghjul med två konfigurationer, ett svänghjul i aluminium och en stålring som kan monteras på svänghjulet i aluminium. Figur 8a och figur 8b visar svänghjulet med och utan stålring. Egenskaperna från de två svänghjuls konfigurationerna presenteras i tabell 1.



(a) Aluminium

(b) Stål/Aluminium

Figur 8: Svänghjulen

Tabell 1: Fakta om de två olika svänghjulen

| Svänghjul | Material | Radie [mm] | Vikt [kg] | Tröghetsmoment kring motoraxeln [kgm^2] |
|-----------|--------------------|----------------|---------------|---|
| 1 | Aluminium | 54.5 | 0.2723 | 0.0003674 |
| 2 | Stål/ Aluminium | 65 | 0.6977 | 0.001653 |

4.1.3 Tachometer

I LK-regleringen återkopplas alla tillstånd vilket ledde till att en varvtalsmätare (tachometer) behövdes för att kunna mäta svänghjulets vinkelhastighet. För att hålla kostnaden nere byggdes en egen enklare tachometer. Denna konstruerades av en IR-emitter och en optotransistor, samt några resistanser. Resistanserna dimensionerades för en matning på 5 volt.

När IR-emittern lyser på optotransistorn kommer transistorn att släppa igenom ström och mätvärdet ut kommer då att vara noll. För att implementera detta skapades en rund skiva med fyrtio hål, som monterades fast på svänghjulet med en distans på ca 1 cm, se figur 9. Dioderna monterades på var sida av skivan. För varje varv ges 40 pulser och utifrån dessa och samplingstiden kan man räkna ut rotationshastigheten på hjulet. Vid låga rotationshastigheter krävs en längre samplingstid annars uppstår risken att

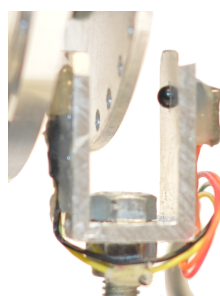
samplingen sker mellan två hål vilket leder till en beräknad rotationshastighet lika med noll, när svänghjulet i själva verket roterar. Att tachometern fungerade verifierades m.h.a ett oscilloskop där periodtiden beräknades vid höga varvtal och jämfördes med den rotationshastighet som beräknats fram.

$$f = \frac{1}{\text{Periodtiden}} \quad (37)$$

$$\text{Varv/s} = \frac{f}{40} \quad (38)$$



Figur 9: Hålskivan fastmonterad på svänghjulet.

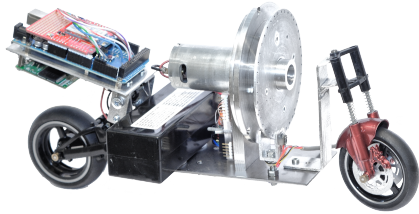


Figur 10: Implementerad tachometer.

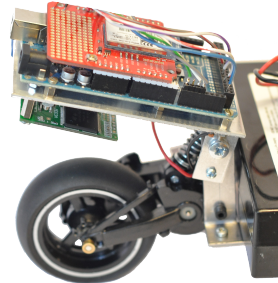
4.1.4 Motorcykel

När prototypen var i slutfasen av testerna påbörjades konstruktionen av den färdiga produkten, motorcykeln. Till detta köptes en färdig RC-motorcykel (Motor Rocket R8 HT-6555) in, denna monterades isär så att användbara delar kunde extraheras för användning på den nya konstruktionen, samt för att spara tid och pengar. Specifikt användes delarna med fram- och bakhjul. Dock var det många andra delar som krävde tillverkning och då fick dessa specifikt anpassas. Bakhjulets del hade en motor infäst vilken skulle användas till framdrivning av motorcykeln. Fästen konstruerades till hjulupphängningarna sådana att det var möjligt att implementera styrning samtidigt som dämpningarna kunde användas.

En bottenplatta till konstruktionen stansades ut, i denna stålplatta fästes elektronik och motorfäste. Microcontroller samt motorstyrningen upptog stor yta. För att lösa detta tillverkades en sving, där dessa kunde fästas. Svingen tillverkades i aluminium eftersom den inte beräknades uppta någon större belastning. Den monterades med en viss lutning för att förhindra att bakhjulet slår i motorstyrningen vid full kompression av bakhjulsdämparen. Motorstyrningen monterades på undersidan av svingen och microcontroller på



Figur 11: Motorcykeln



Figur 12: Svingen

ovansidan.

Valet av motor grundades främst på tester av liknande motorer som fanns tillgängliga. De tre motorer som testats och utvärderats är;

- Mabuchi-RS555 12 Volt DC, 5 poler
- Mabuchi-RS550 12 Volt DC, 3 poler
- Dunkermotoren GR42x25 24 Volt DC, okänt antal poler

Motorn, Mabuchi-RS550, ansågs vara för hackig vid låga varvtal, vilket inte är önskvärt vid den valda sortens reglering. Detta antogs vara på grund utav att den endast hade tre poler i motorn. Därför införskaffades en motor av märket Maibuchi, modellen RS555. Den motorn har fem poler som ger en mjukare gång vid låga varvtal. Den fungerar också bra på 12V DC, som gör att den kan drivas med ett relativt litet batteri. Dunkermotoren kunde inte användas då den krävde för hög spänning.

4.2 Programmering

4.2.1 Gränssnitt till persondator

Val av programmeringsspråk och programutvecklingsmiljö

Valet av programmeringsspråk föll på C#. Strukturen i C# liknar Java då båda programmeringsspråken bygger på C++. En fördel med att C# påminner om Java är att deltagarna i projektet har gått minst en kurs i Java, vilket medför att hela projektgruppen har kunnat sätta sig in i koden. En skillnad som gör C# till ett bättre alternativ än Java är att C# är ett sant

objektorienterat språk medan Java har undantag. Ett exempel på ett sådant undantag är datatyper. Detta medför att inbyggda metoder och funktioner endast kan hantera kopior på data. I C# finns inte denna problematik då dessa kan hanteras som objekt [4].

C# är en del av Microsoft Visual Studio 2010. Microsofts Visual Studio innehåller ett kraftfullt grafiskt användargränssnitt för att skapa Windowsapplikationer. Detta verktyg lämpar sig väl till vår uppgift och programvaran finns även tillgänglig gratis för studenter på Chalmers. Med dessa anledningar föll valet av programutvecklingsmiljö på Microsofts Visual Studio 2010.

Kodstandard

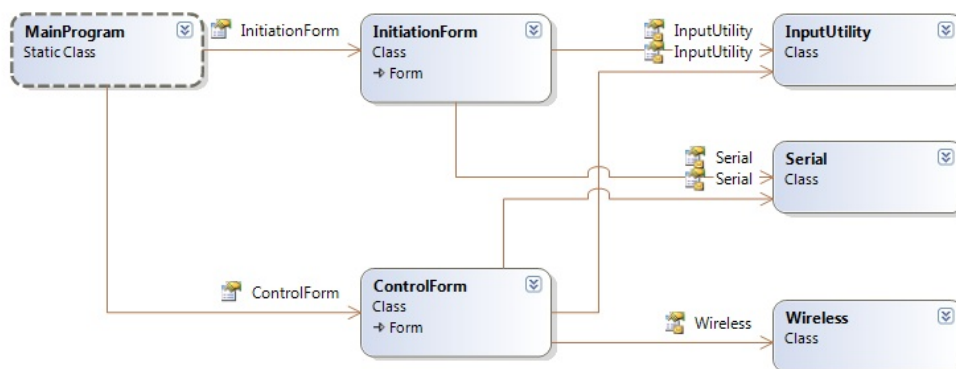
Programvaran och dess källkod skall levereras till en kund. Kunden kan komma att behöva redigera eller uppdatera koden i framtiden. Det ställer krav på att källkoden måste vara begriplig och enkel att sätta sig in i. För att underlätta för kunden har modifierad ungersk notation använts i så stor utsträckning som möjligt. Ungersk notation är en av de vanligaste metoderna inom många programmeringsspråk [7], vilket förhoppningsvis underlättar tolkningen av objekt.

Utöver modifierad ungersk notation har även XML-baserad dokumentation av metoder och funktioner i källkoden använts. Dokumentationen skall ge kunden information om vad metoden eller funktionen är ämnad att göra och instruktioner i hur de används. Dokumentationen har genomförts löpande under projektets gång för att underlätta arbetet och överskådligheten även för deltagarna i projektet [4, 7].

För att strukturera källkoden har klasserna grupperats i namespaces. Genom att gruppera klasserna i namespaces är det enklare att hitta sökta klasser samt att uppdatera specifika funktioner.

Kodstruktur

Strukturen för delarna som hanterar det grafiska gränssnittet framgår av figur 13. De olika klasserna är



Figur 13: Klassdiagram med dem viktigaste klasserna för det grafiska gränssnittet

- *MainProgram*
Denna klass exekveras vid uppstart av applikationen och innehåller programmets main-klass. Hanterar uppstarten av nya fönster och nedstängningen av applikationen.
- *InitiationForm*
Startas av *MainProgram* vid uppstart av applikationen och skall ge användaren möjlighet att initiera en trådlös och/eller en seriell förbindelse med motorcykeln.
- *ControlForm*
Denna klass skall startas först efter att *InitiationForm* har stängts och uppfyllt kraven för att *ControlForm* skall kunna öppnas. Annars stänger *MainProgram* ner applikationen. Från *ControlForm* kommer användaren kunna styra och presentera data från motorcykeln.
- *InputUtility*
Denna anropas av *InitiationForm* och *ControlForm* för att säkerställa att inmatad data från användare är av rätt typ, form och inom önskade gränser.
- *Serial*
Den här klassen sköter all kommunikation som skall skickas och tas emot via den seriella länken.

- *Wireless*

Klassen sköter all kommunikationen som skall skickas och tas emot trådlöst.

4.2.2 Microcontroller

Val av microcontroller och programutvecklingsmiljö

Microcontrollern skall utöver att kunna kommunicera trådlöst med en dator även kunna styra, köra och balansera motorcykeln. Detta ställer bland annat krav på processorhastighet, antalet I/O-portar och kommunikationsmöjligheter. Valet föll på en microcontroller av typen Arduino Mega 2560. Microcontrollern har enligt observationer av andra projekt en mer än tillräcklig processorhastighet. Arduino Mega 2560 har även tillräckligt högt antal digitala och analoga I/O-portar för att kunna hantera antalet motorer, sensorer och kommunikationsmoduler. Lättare undersökningar hos svenska detaljhandlare visade på att moduler och sensorer till microcontrollern även klarade budgetkraven. Möjligheten att låna denna modell av microcontroller från Institutionen för signaler och system bidrog även till beslutet, då detta medförde en potentiellt snabbare uppstart av projektet.

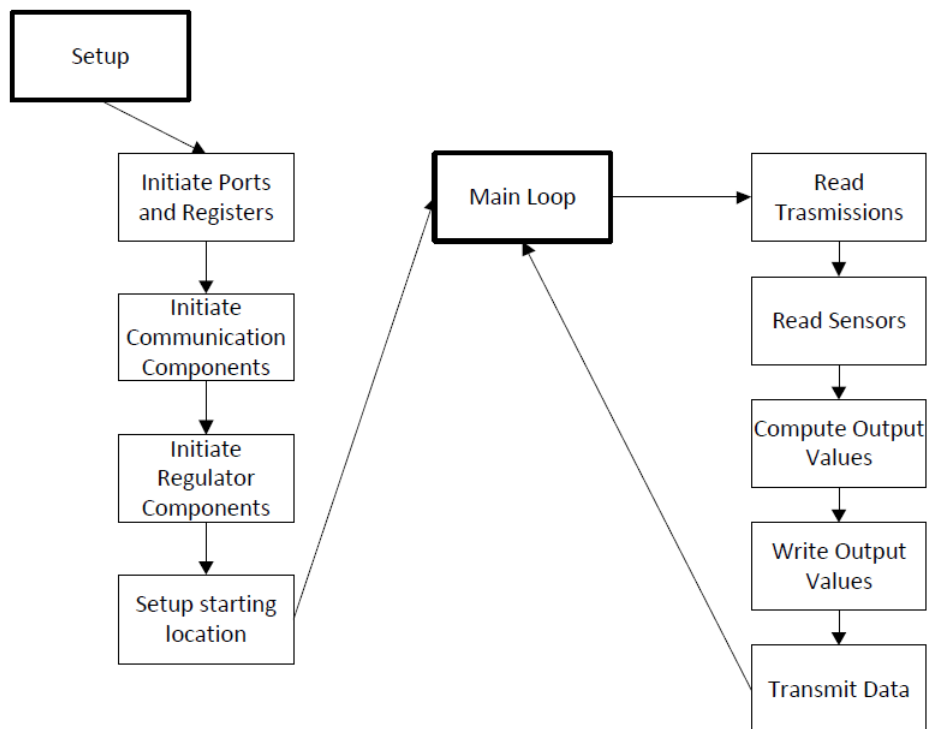
Valet av programutvecklingsmiljö föll på Arduinos egna mjukvara med samma namn. Programvaran är gratis och innehåller exempelkod för att underlätta för programmerare med begränsad erfarenhet av microcontrollers. Programmeringsspråket liknar C/C++ vilket alla deltagare i projektet har kunskaper om från en tidigare kurs.

Kodstandard

Den valda programutvecklingsmiljön stödjer inte någon avancerad form av koddokumentation. Därför har standardmetoden för att kommentera källkod använts. Dokumentationen ger kunden information om vad metoden eller funktionen är ämnad att göra och instruktioner i hur de används.

Kodstruktur

De viktigaste rutinerna för microcontrollern illustreras i figur 14.



Figur 14: Rutindiagram över de viktigaste rutinerna för microcontrollern

- *Setup*
Rutinen exekveras vid microcontrollerns uppstart och innehåller programmets initieringsrutiner.
- *Initiate Ports and Registers*
Subrutin i *Setup*. Initierar microcontrollerns portar och register.
- *Initiate Communication Components*
Subrutin i *Setup*. Initierar kommunikation med kommunikationsmoduler via protokoll så som SPI och UART. Med hjälp av information från användaren via det grafiska interfacet skall även en trådlös förbindelse upprättas mellan microcontrollern och persondatorn.

- *Initiate Regulator Components*
Subrutin i *Setup*. Initierar regulatorn och dess parametrar.
- *Setup starting location*
Skall kontrollera att motorcykeln står upprätt. Om så inte är fallet ska rutinen ge en felsignal.
- *Main Loop*
Rutinen körs efter *Setup* och itereras så länge microcontrollern är påslagen.
- *Read Transmissions*
Läser buffertarna för ingående kommunikation och lagrar data som globala variabler.
- *Read Sensors*
Läser av sensorerna och lagrar värden som globala variabler.
- *Compute Output Values*
Beräknar nya värden för regulatorn och sparar dessa som globala variabler.
- *Write Output Values*
Skriver beräknade data från *Compute Output Values* till utportarna.
- *Transmit Data*
Skickar data till persondatorn.

4.2.3 Val av trådlöst kommunikationsprotokoll

För att kommunicera trådlöst utan att behöva installera ny hårdvara på Intabs datorer undersöktes de standarder som redan stöds. Dessa var IEEE 802.11 och IEEE 802.15 som båda ligger i det licensfria radiobandet vid 2,4 GHz. Dessa standarder som är allmänt kända som WiFi respektive Blåtand [5].

Blåtands-enheter delas i dagsläget in i tre olika effektklasser beroende på dess maximala räckvidd och sändningseffekt. Den enda klassen som uppfyller Intabs önskemål om en räckvidd på 10 meter var klass 1, som har en räckvidd på upp till 100 meter vid fri sikt. Klass 1, till skillnad från klass 2 och 3, är inte utvecklad för batteridrift då den har mycket högre effektförbrukning vid sändning. För att kunna använda sig av klass 1 som kommunikationsverktyg måste både motorcykeln och datorn vara utrustade med hårdvara som

stödjer klass 1. Intabs datorer är inte utrustade med klass 1 enheter. Blåtand kan endast kopplas upp genom adhoc-nät och kan på så vis inte använda sig av existerande infrastruktur i till exempel utställningslokaler [5].

WiFi-enheter kategoriseras genom de protokoll enheten stödjer. De protokoll som främst används idag är 802.11b, 802.11g och 802.11n. Alla dessa protokoll klarar Intabs önskemål på räckvidd för trådlös kommunikation med minst 10 meter vid fri sikt. WiFi-enheter har fördelen att kunna använda sig av existerande accesspunkter under utställningar eller upprätta eget adhoc-nät för direktkoppling [5].

För att använda sig av existerande hårdvara hos Intab samt uppfylla Intabs önskemål valdes WiFi av dessa alternativ. Kommunikationen sköts via port 80 då denna port antas vara öppen på de flesta nätverk som Intab kommer komma i kontakt med under sina utställningar.

4.2.4 Val av sensorer

För att bestämma vinkeln på ett system kan man enligt Colton [14] använda sig av en accelerometer och ett gyroskop. Med hjälp av accelerometern avläses accelerationen från jordens dragningskraft och via trigonometriska beräkningar erhålls vinkeln för systemet. För att filtrera bort accelerationer i systemet som inte beror på jordens dragningskraft används ett digitalt lågpasfilter. En vinkel som beräknas endast på lågpasfiltrerade mätvärden från accelerometern resulterar i detta fall i en oönskad fördröjning. För att kompensera för lågpasfiltreringens fördröjningseffekt kan ett gyroskop användas för snabbare beräkningar av vinkeln. För att erhålla vinkeln via ett gyroskop integreras vinkelhastigheten. Vinkeln som erhålls via gyroskopet måste högpasfiltreras för att inte driva på grund av integration. Lågpasfiltreringen av accelerometern och högpasfiltreringen kan förenklas till ett komplementärfilter enligt följande rad kod, där "filter" är filterkonstanten.

$$\text{angle} = (1 - \text{filter}) * (\text{angle} + (\text{angularVelocity} * \text{dt} / 1000)) + \text{filter} * \text{angleAccelerometer};$$

The diagram shows the code line with three brackets below it. The first bracket, labeled "Integration", spans the term $(\text{angularVelocity} * \text{dt} / 1000)$. The second bracket, labeled "Lågpasfiltrering", spans the term $\text{filter} * \text{angleAccelerometer}$. The third bracket, labeled "Högpasfiltrering", spans the entire right-hand side of the equation.

Figur 15: Kod för digital filtrering av vinkeln.

Valen av accelerometer och gyroskop föll på Triple Axis Accelerometer Breakout-ADXL345 och Gyro Breakout Board-LY530AL, båda från SPARK-FUN. Sensorerna klarade budget samt ansågs ha tillräckligt hög upplösning för uppgiften. Mätvärdesvariationen beroende på temperatur- och matnings-spännings ansågs vara försumbara [15, 16].

Efter implementering av sensorerna visade tester på att det förekom störningar i kommunikationen mellan microcontrollern och sensorerna. Störningarna uppträdde när balanseringsmotor kördes och visade sig i felvärden från accelerometer och gyroskop. För att minska mängden störning, isolerades sensorerna elektriskt genom att ersätta fästansordningen för sensorerna, som var i metall, till en plexiglasskiva samt införa gemensam jord för all elektronik. Åtgärderna reducerade störningarna till en acceptabel nivå.

4.3 Reglering

4.3.1 PID-reglering

PID-design

Designmetoden som använts utgår ifrån att systemet beskrivs av en överföringsfunktion $G(s)$. Med hjälp av matriserna A , B , C , och D bestämdes därför motsvarande överföringsfunktion som beskriver det mekaniska och elektriska systemet och har insignalen u i [V] och utsignalen α i [rad]. Regulatorn antas vara en parallell PID-regulator som beskrivs av

$$F(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s. \quad (39)$$

För varje kombination av regulatorparametrar beräknas kretsöverföringen

$$L(s) = F(s)G(s). \quad (40)$$

För att bestämma regulatorparametrarna användes MATLABs inbyggda funktion *pidtune* och Nyquists fullständiga stabilitetskriterium för att avgöra stabilitet. Simuleringarna användes för att undersöka prestandan för olika regulatorparametrar vilka sedan korrigerades under simuleringen för att erhålla önskad snabbhet och styrsignal.

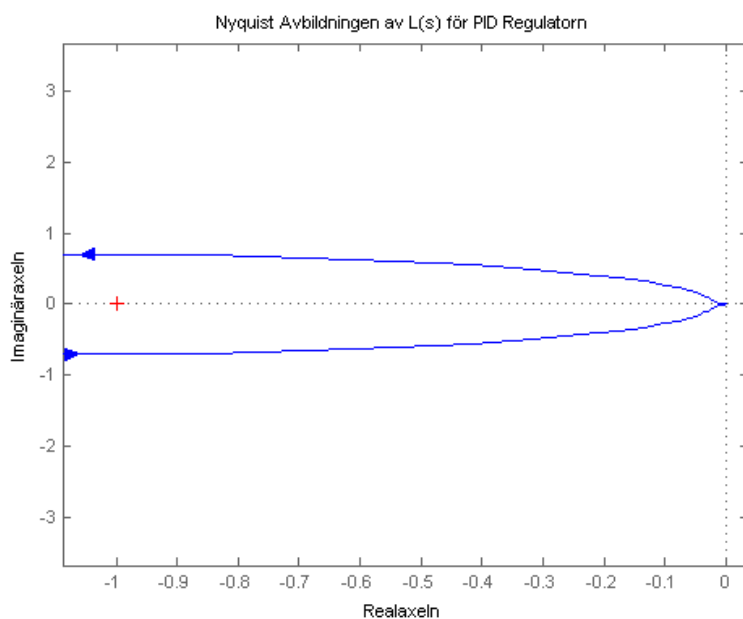
PID-stabilitet

Resultat från stabilitetsanalysen visas med hjälp av Nyquistdiagram. Tabell 2 visar antal instabila poler P och antalet medurs varv N runt punkten $(-1,0)$, vilket ges av avbildningen i Nyquistkurvan som visas i figur 16. Enligt

(41) ska P vara lika med $-N$, och därmed ge $Z = 0$, vilket visas stämma i sista kolumnen i tabell 2.

$$Z = P + N = 0 \quad (41)$$

I bilaga B figur 43 presenteras polerna och nollställerna för $1 + L(s)$, i form av en pole-zero map figur från MATLAB.



Figur 16: Nyquistkurvan för PID-regleringen

Tabell 2: Nyquistanalys för PID-reglering

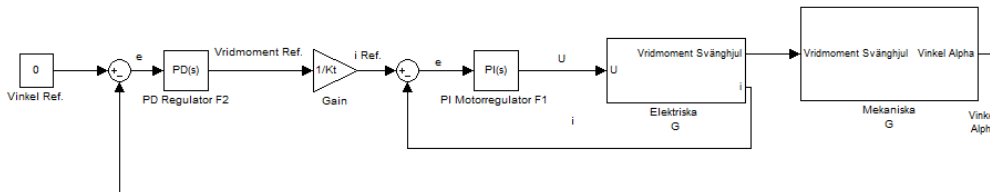
| Instabila Poler (P) | Antal medurs varv (N) (N) kring (-1,0) | Instabila nollställen (Z) $1 + L(s)$ |
|---------------------|---|---|
| 1 | -1 | 0 |

4.3.2 Kaskadreglering

Kaskad-design

För att reglera systemet med kaskadmetoden delades systemet upp i två mindre system. Därefter kunde en överföringsfunktion för varje delsystem

beräknas och dimensioneringen av regulatorerna påbörjas. Systemet delades upp i en elektrisk del $G_1(s)$ som beskriver motorns karaktäristik och svänghjulets vridmoment, från i till τ_s . Det andra delsystemet som beskriver den mekaniska delen $G_2(s)$, från τ_s till α , det vill säga en inverterad pendel. Dessa delsystem regleras av var sin regulator, $F_1(s)$ för motorn och $F_2(s)$ för det mekaniska, vilket visas i figur 17.



Figur 17: Det kaskadreglerade systemet i sin helhet.

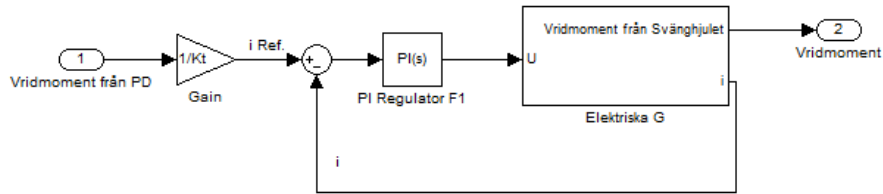
Regulatorparametrarna kunde därefter bestämmas med samma metod som beskrevs i PID-design avsnittet. *Pidtune* gav parametrar att börja ifrån som sedan justerades under simuleringar för att erhålla önskad snabbhet och styr-signal. En stabilitetsanalys genomfördes med hjälp av Nyquists fullständiga kriterium, som också finns i MATLABs standardbibliotek. Regulatorn för den yttre återkopplingen är en PD-regulator

$$F_2(s) = K_p + K_d s \quad (42)$$

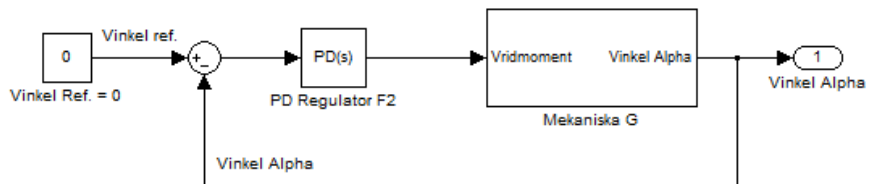
eftersom korrigering av kvarstående fel inte är nödvändigt utan korrigering mot snabba förändringar är prioriterat. Den inre regulatorn är en PI-regulator

$$F_1(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (43)$$

som ska reglera strömmen i systemet. Figur 18 och 19 visar det elektriska respektive det mekaniska systemet.



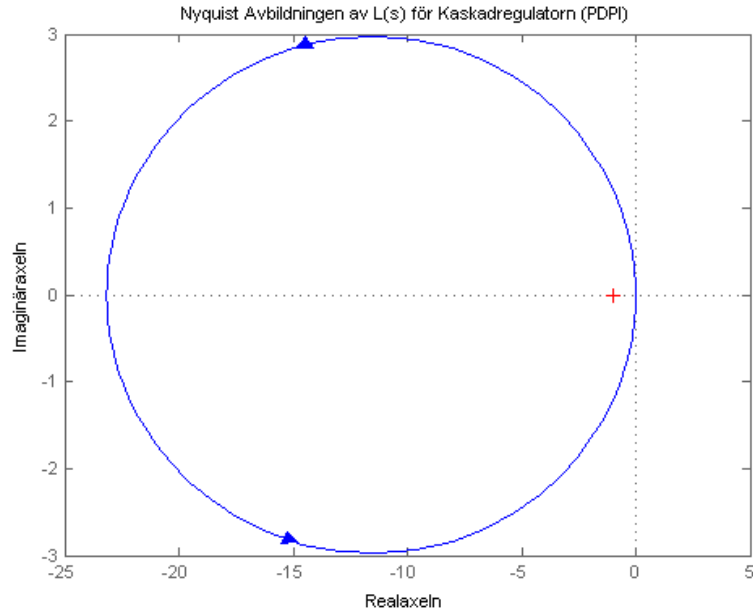
Figur 18: Elektriska systemet



Figur 19: Mekaniska systemet

Kaskad-stabilitet

För att presentera kaskadregleringens stabilitet följs samma förfarande som genomfördes i PID-stabilitetsavsnittet. Tabellen 3 visar antalet instabila polerna P , antalet medurs varv N kring punkten $(-1,0)$ och antalet ostabila nollställen som ska vara lika med noll. Figur 20 presenterar Nyquistdiagrammet för systemet, och i bilaga B 44 uppvisas polerna och nollställarna för $1 + L(s)$.



Figur 20: Nyquistkurvan för kaskadregleringen

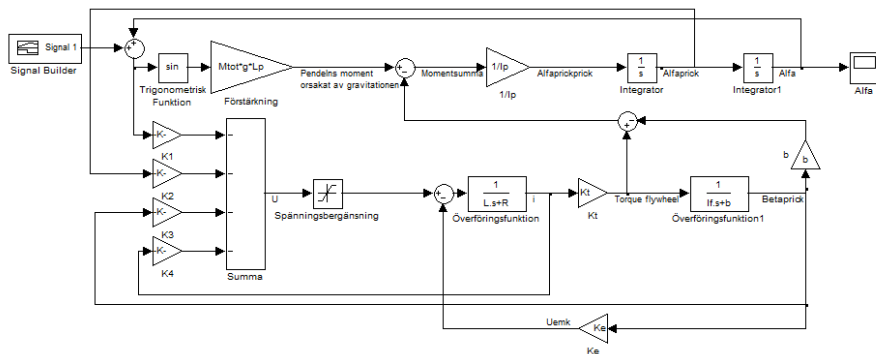
Tabell 3: Nyquistanalys för kaskadreglering

| Instabila Poler (P) | Antal medurs varv (N) (N) kring (-1,0) | Instabila nollställen (Z) $1 + L(s)$ |
|---------------------|---|---|
| 1 | -1 | 0 |

4.3.3 Linjärkvadratisk-reglering

Linjärkvadratisk design

Tillståndsmodellen (34) i Simulink användes för att simulera det elektriska och mekaniska systemet, se figur 21. I MATLAB beräknades de konstanta förstärkningarna till tillståndsåterkopplingen som är nödvändig till den linjärkvadratiske regleringen. Det kontrollerades om systemet först och främst var styrbart enligt teorin om styrbarhet från kapitel 2.2. För ett styrbart system resulterar linjärkvadratisk-reglering teoretiskt alltid i ett stabilt system [8].

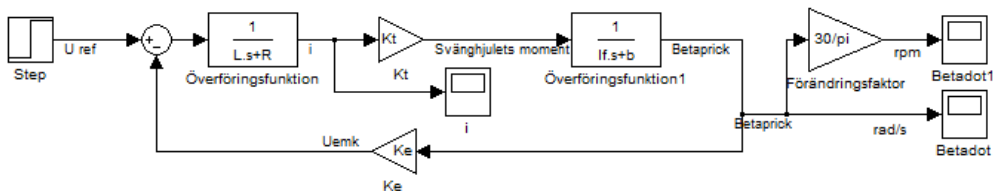


Figur 21: LKR Simulink modell

4.4 Simuleringsresultat

4.4.1 Motorvalidering

Motorn (Mabuchi RS-555) har en mycket central roll i projektet och därför har simuleringar utförts i syfte att verifiera de matematiska modeller som formulerats. Vid simuleringar används blockschemat enligt figur 22. Denna simuleringmodell testades med olika motorparametrar och olika körningstider för att utvärdera stegsvaret.



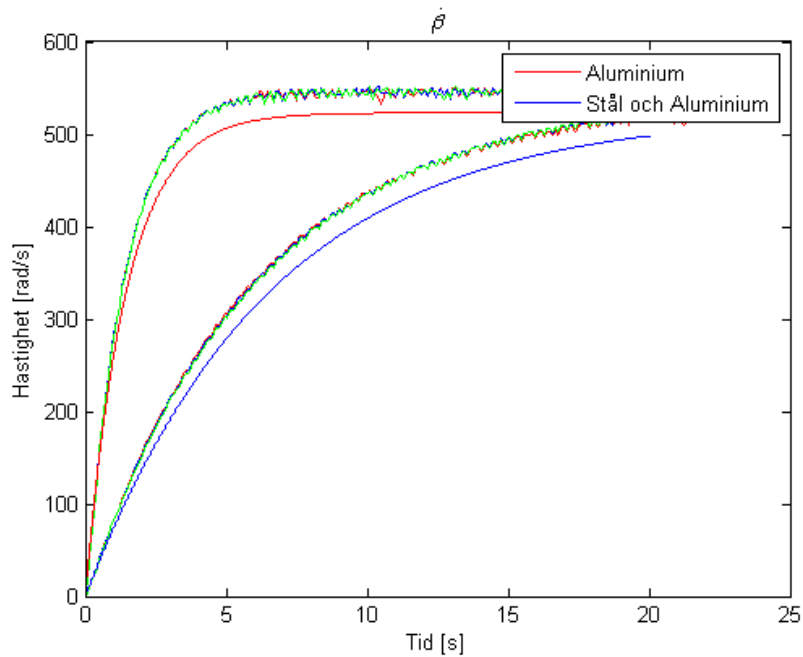
Figur 22: Blockschemat för motorns karakteristik med svänghjul.

För att få signifikans i simuleringarna mättes motorparametrarna R_m , L_m , och b upp och parametrarna K_i , K_t beräknades med hjälp utav dessa. Detta för att erhålla möjligheten att använda parametrarna i simuleringen och se hur bra det simulerade systemet överensstämmer med verkligheten.

Resistansen beräknades genom att mäta likström och likspänning över motorn samtidigt som motoraxeln hölls stilla, detta för att sedan beräkna resistansen med ohms lag. Vid uppmätning av induktansen användes $j\omega$ -metoden då en växelspanning med känd frekvens kopplades över motorn

samtidigt som ström och spänning dokumenterades, därefter beräknades induktansen då alla parametrar som krävdes enligt $j\omega$ -metoden var kända. Parametern b uppmättes genom att mata motorn med nominell spänning och vänta tills motorn uppnått stationärtillstånd för att då mäta strömmen samt rotationshastigheten, med dessa beräknades motorns friktionsfaktor enligt ekvation (3). Rotationshastigheten uppmättes med tachometern, se avsnitt 4.1.3.

För att validera den matematiska modell och de parametrar som använts jämfördes simuleringar med mätdata från det verkliga systemet, se figur 23. Uppmätningen av det verkliga systemet gjordes genom att ett steg applicerades motsvarande 12 V på motorn. För att mäta hastigheten på svänghjulet användes tachometern. Som synes i figuren finns en bra överensstämmelse mellan stegsvaren från simuleringarna och verkligheten.



Figur 23: Stegsvår på 12 V under en period av 20 s.

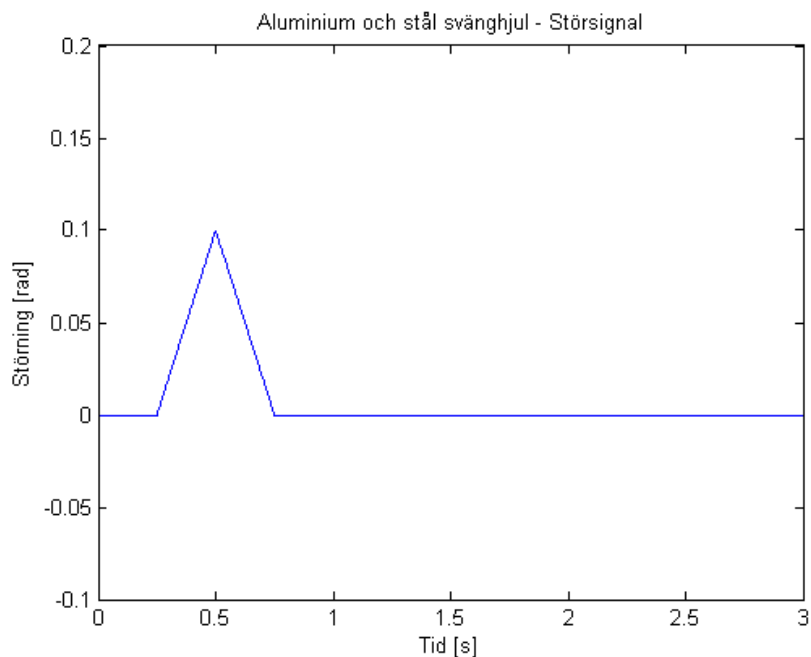
Grafen visar hastigheten på motorn vid ett stegsvar på 12 V under en period av 20 s. Den självständiga röda kurvan motsvara resultatet från simulering med aluminiumsvänghjulet och strax ovanför finns de 3 kurvor som motsvarar mätningar i det verkliga systemet där de är 3 kurvorna ligger ovanpå varandra för att påvisa stegsvarens repeterbarhet. Analogt presenteras simuleringen med aluminium och stålsvänghjulet och dess mätdata strax intill.

4.4.2 Prototyp simuleringar

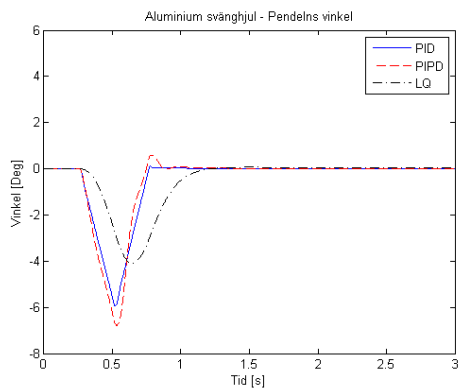
Resultaten från simuleringar presenteras med figurer som visar grafer från totalt sex simuleringar, där tre olika regleringsmetoder och två olika svänghjul jämförs. De regleringsmetoder som presenteras är en PID-, kaskad- och LK-reglering, där simuleringensresultaten representerar resultaten som har erhållits från de olika metoderna. De svänghjul som har använts i simuleringarna presenteras i avsnitt 4.1.2. De egenskaper som presenteras är vinkeln, styrsignalen till motorn och vinkelhastigheten på svänghjulet. Dessa figurer tillsammans ger en bra uppfattning av vilken regleringsmetod som kombinerat med rätt svänghjul ger den mest optimala regleringen. För att underlätta jämförelser har PID-, kaskad- och LK-regleringen redovisat i samma figurer. I alla simuleringar har samma störsignal använts, en vinkelökning på sex grader, som ska simulera en tillstötning av prototypen.

Vinkeln på prototypen

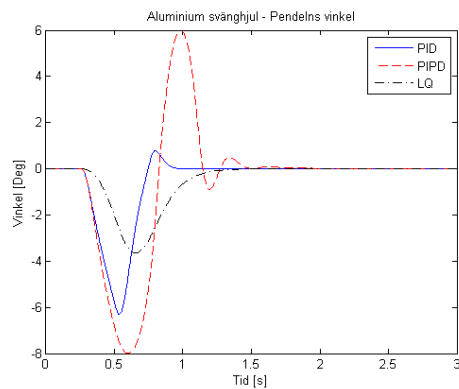
Bild 25 och 26 visar att samtliga modeller lyckas balansera prototypen, där olika regleringsmetoder och svänghjul är inkluderade. Noll grader representerar när prototypen står rakt upp, vid 0.25 sekunder tillkommer en störning på sex grader som ska kompenseras av systemet. Resultaten påvisar att PID regleringen har snabbare insvängning med båda svänghjulen, och har dessutom mindre översväng än kaskadregleringen. Av svänghjulen påvisar aluminiumhjulet de mest tillfredställande resultaten. Grunder till detta påstående ligger i simuleringensfigurerna, som visar att aluminiumsvänghjulet kan kompensera vinkeln lika bra som svänghjulsconfigurationen med aluminium och stål med PID reglering, och bättre än stålsvänghjulet med kaskadreglering samtidigt som regleringen är nästintill likvärdig för LK-regleringen. När endast vinkeln studeras så uppvisar LK-regleringen lite långsammare reglering trots detta lyckas den kompensera vinkelfelet bättre än båda de övriga regulatorerna.



Figur 24: Störning



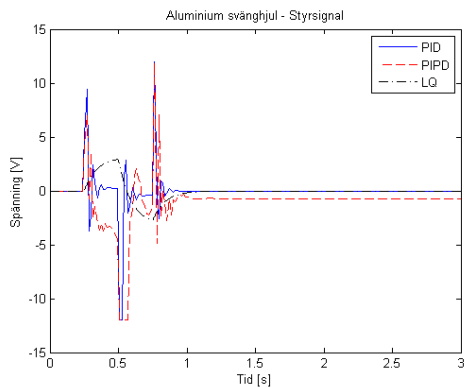
Figur 25



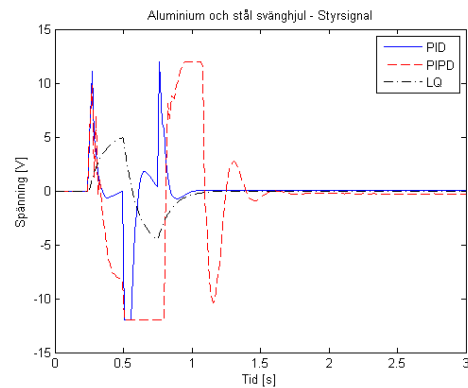
Figur 26

Styrsignal till motorn

I figur 27 jämförs styrsignalen mellan de olika regleringsmetoderna med svänghjulet i aluminium, och i figur 28 visas jämförelser med svänghjulsconfigurationen av aluminium och stål. Styrsignalen till motorn är begränsad till 12 volt, vilket är den maximala spänning som motorn matas med. Resultaten visar att både PID och kaskadregleringen kräver maximal spänning för att



Figur 27

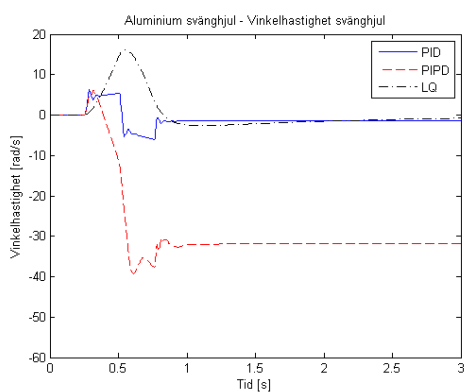


Figur 28

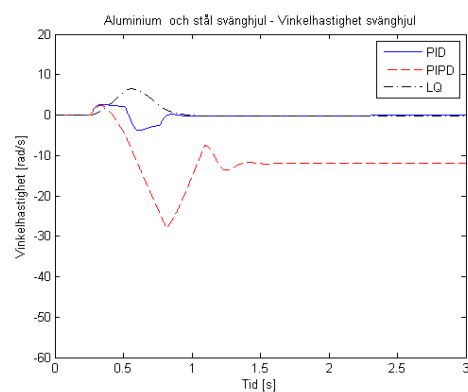
kompensera vinkelstörningen samtidigt som LK-regleringen endast kräver ca 3 V med aluminiumsvänghjulet och 5 V med stål/aluminiumkonfigurationen. Styrsignalen för PID- och kaskadregleringen är lika i utseendet, dock svänger PID- och LK-regulatorn in snabbare med stålringskonfigurationen än den kaskadkopplade regulatorn. I båda fallen är styrsignalen mycket jämnare för LK-regleringen än de andra regulatorerna.

Vinkelhastighet

Jämförelsen fortsätter med vinkelhastigheten på svänghjulet, som visas i figur 29 och 30. Vinkelhastigheten anses vara en viktig egenskap, då svänghjulet inte får rotera för snabbt ur ett säkerhetsperspektiv, då det vid hög hastighet lagrar en stor mängd kinetisk energi.



Figur 29



Figur 30

Den mest uppenbara skillnaden mellan de olika regleringarna är att för

kaskadregleringen fortsätter svänghjulet rotera efter kompenseringen, medan för PID- och LK-regleringen går vinkelhastigheten tillbaka till noll. Detta anses vara ofördelaktigt för kaskadregleringen, och anledningen till detta förklaras i teoriavsnittet 2.1. Enligt teorin behöver svänghjulet accelerera för att skapa ett vridmoment vilket vrider tillbaka den inverterade pendeln. Som konstaterades ovan så stannar vinkelhastigheten för kaskadreglering på en konstant nivå skild från noll. Om systemet utsätts för en ny störning, skulle det därför vara svårare för kaskadregleringen att skapa samma acceleration som tidigare på grund av begränsningar i motorn. PID och LK regulatorerna skulle däremot ha samma förutsättningar som tidigare. Skillnader mellan de båda svänghjulen kan även urskiljas, där aluminium svänghjulet kräver en högre vinkelhastighet för att kompensera vinkelstörningen. Denna skillnad anses dock i sammanhanget vara oväsentligt för PID regulatorn, eftersom skillnaden är så liten. Samtidigt blir den inte försumbar för de andra regulatorerna där vinkelhastigheten accelereras upp till 18 rad/s för LK-regulatorn och 31 rad/s för kaskadregleringen.

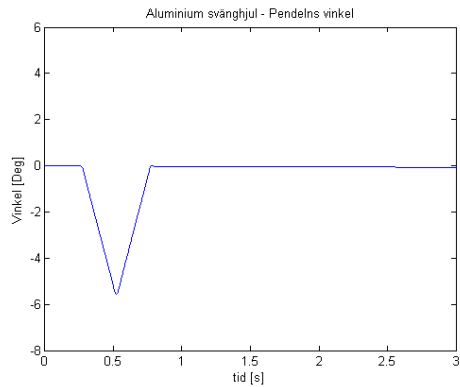
För att sammanfatta de viktigaste resultaten ska det nämnas att LK-regulatorn tillsammans med aluminiumsvänghjulet ger det bästa förhållande vi kan testa. Detta för att vinkelfelet blir som minst i detta fall även om vinkelhastigheten blir lite högre än de fall med stål/aluminiumkonfigurationen.

4.5 Implementering

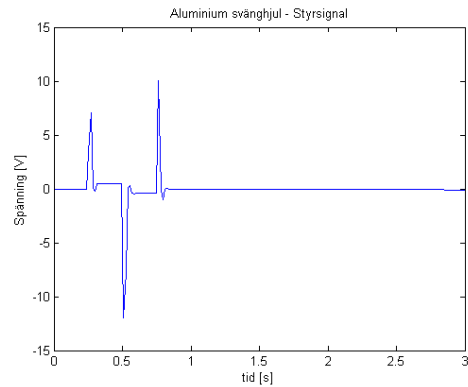
Utifrån simuleringsresultaten kunde potentiella regulatorer erhållas för implementering på prototypen. Regleringsmetoderna som implementerades var PID- och kaskadregleringen medan LK-reglering inte kunde implementeras på grund utav tidsbrist och implementeringssvårigheter. I detta avsnitt förklaras vad som skedde under testerna och hur de ledde till ändringar i regulatorerna och prototypen.

4.5.1 PID-reglering

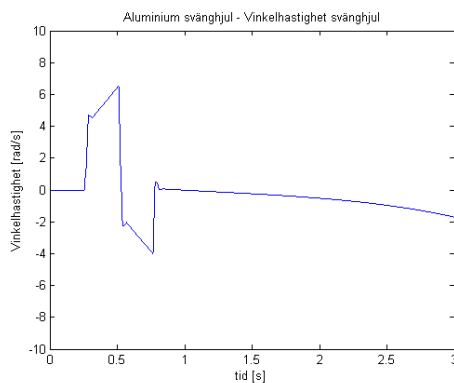
Under tester på den implementerade PID-regulatorn uppförde sig prototypen okontrollerbart med parametrarna från simuleringsresultaten. Flera tester utfördes vilket pekade på att integralverkan hade en förödande effekt på prototypens beteende. Eftersom integralverkan inte kunde användas på prototypen bestämdes att en PD-regulator skulle användas. MATLABs inbyggda funktion *piddtune* användes även här för att beräkna regulatorns parametrar. Simuleringen av den nya PD regulatorn, med svänghjulet av aluminium, presenteras i figurerna 31, 32 och 33.



Figur 31: Vinkeln på pendeln.



Figur 32: Styrsignalen



Figur 33: Svänghjulets vinkelhastighet

Från figur 31 kan man se att regulatorn klarar att återhämta systemet från en störning på sex grader i kombination med styrsignalens begränsningar, men börjar sedan falla. Detta antas bero på att ingen integralverkan kunde användas vilket resulterar i svårigheter att kompensera för det kvarvarande felet. Detta observerades även på prototypen, och en lösning genomfördes genom att skapa en enklare reglering kring noll graders vinkelfel. Detta genom att installera gummifötter vilka skulle representera däckerna på den slutgiltiga motorcykeln. Detta förenklade processen att balansera nära noll grader, utan att påverka pendelns uppförande vid större vinkelfel.

4.5.2 Kaskadreglering

Kaskadregleringen valdes bort från de möjliga lösningarna. Detta beror dels på simuleringsresultaten, som visade på att PID-regulatorn hade bättre prestanda och lägre styrsignal, samt svårigheter med att implementera metoden i verkligheten. Svårigheterna låg bland annat i att programmera två regulatorer med två olika tidsskalor, och att justera två regulatorer för att uppnå önskade resultat.

4.5.3 Linjärkvadratisk-reglering

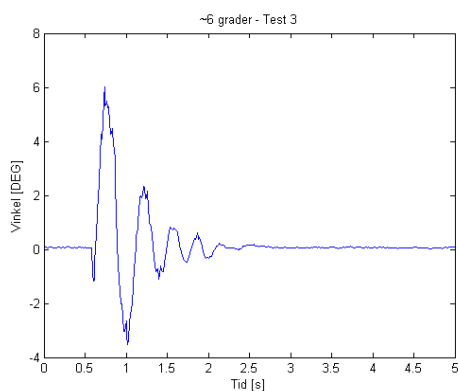
Insignalerna som krävdes för att reglera med LK-reglering var vinkeln och vinkelhastigheten på pendeln, vinkelhastigheten på svänghjulet och strömmen till motorn. Varav avläsning av vinkelhastigheten på svänghjulet krävde för mycket kapacitet av microcontrollern för att få tillräckligt hög noggrannhet för att realisera i prototypen. Det konstaterades att en möjlig lösning skulle vara två microcontrollers, en för mätning av vinkelhastigheten och en för regleringen, för att man skulle kunna mäta vinkelhastigheten på svänghjulet. Utifrån detta valdes LK-reglering bort som alternativ.

5 Resultat

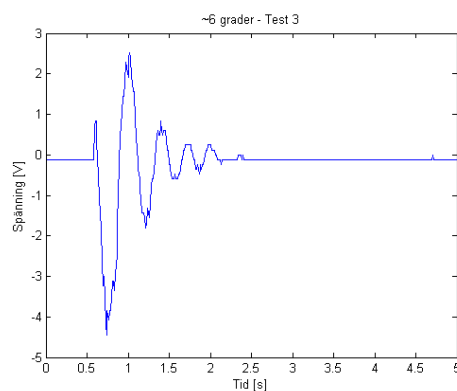
Resultaten från simuleringarna av PD-regleringen jämförs här både för på prototypen och den färdiga produkten.

5.1 Prototyp: PD-regulator

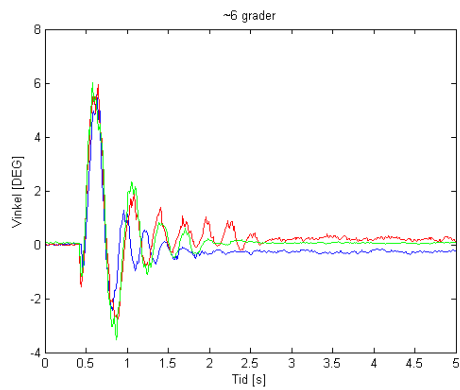
Tester utförda på prototypen med den valda PD-regulatorn gav resultaten presenterade i figur 34 och figur 35. I figur 34 visas hur vinkelfelet kompenseras vid en störning i det verkliga systemet och figur 35 visar styrsignalen under motsvarande test. Under testerna användes motorn Mabuchi-RS555 samt svänghjulet i aluminium. Störnsignalen genererades genom att stöta till prototypen så önskat vinkelfel uppstod. I figur 36 och 37 presenteras data från tre stycken liknande tester för att påvisa repeterbarhet. Vinkelfelet som undersöktes under dessa tester var cirka 6 grader.



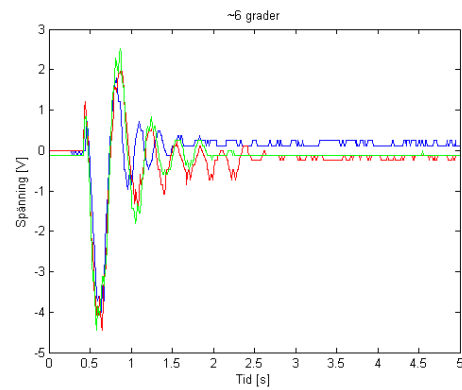
Figur 34: Vinkeln på prototypen under störningen, 6 grader



Figur 35: Pålagda spänningen som korrigerar störningen, 6 grader

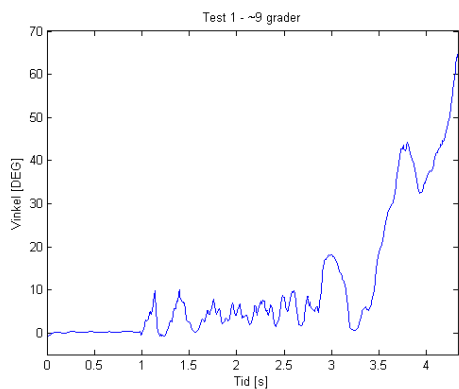


Figur 36: Påvisad repeterbarhet, 6 grader

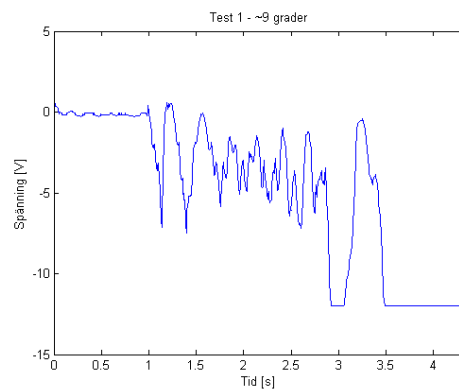


Figur 37: Påvisad repeterbarhet, 6 grader

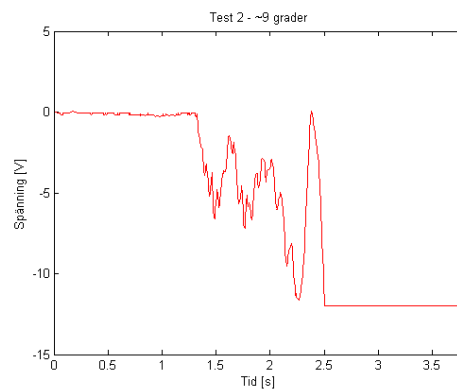
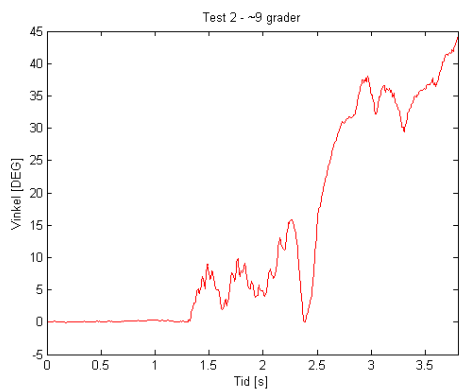
För att finna systemets begränsningar ökades vinkelfelet successivt tills systemet inte längre kunde återhämta sig. Den funna begränsningen i vinkelfelet var cirka 9 grader. Data på systemets uppförande under två tester med detta vinkelfel presenteras i figur 38 till och med figur 41.



Figur 38: Vinkeln på prototypen under störningen



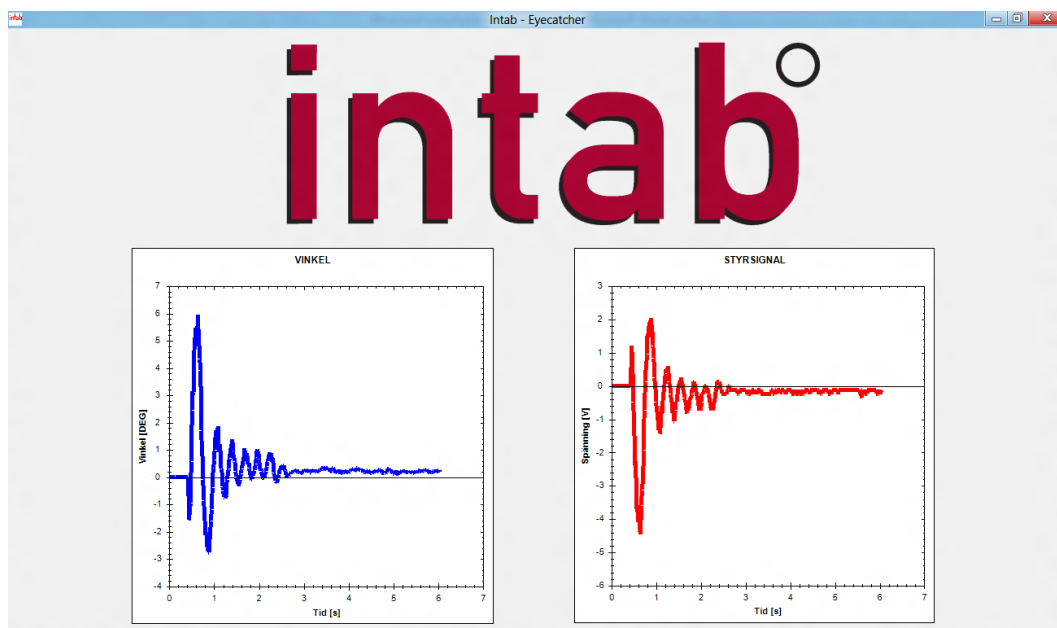
Figur 39: Pålagda spänningen som försöker korrigera störningen



Figur 40: Vinkeln på prototypen under störningen
 Figur 41: Pålagda spänningen som försöker korrigera störningen

5.2 Grafiskt interface

Figur 42 visar hur det grafiska interfacet till motorcykeln ser ut. De mätdata som presenteras i exemplet är styrsignalen och vinkeln på motorcykeln.



Figur 42: Exempelbild på det grafiska interfacet

6 Diskussion

6.1 Jämförelse mellan simuleringsresultat och prototyptester

Vinkeltester på ca 6 graders störning klarar prototypen att kompensera, dock sker kompensationen av felet inte med samma karaktäristik som vid simuleringar. Detta kan bero på att faktorer som finns i det verkliga systemet saknas eller är felberäknade i simuleringarna. Exempel på parametrar av denna karaktär kan vara att vi har dämpat systemet genom att placera gumfötter på botten av pendeln i syfte att simulera däck, detta finns ej med i simuleringarna.

Vid vinkeltester på 9 graders störsignal, uppvisar pendeln en tendens att kompensera vinkeln, men med tiden orkar inte motorn kompensera det kvarstående felet och faller då. Varför den först motverkar störningen, men sedan faller kan vara för att motorn inte har kraft nog i slutskedet. Eftersom det är accelerationen på svänghjulet som orsakar momentet, kan motorn ha uppnått maxhastighet innan pendeln stabiliserats. Motorn kan då antas vara för svag.

6.2 Öväntat beteende

Resultaten från prototypen visade att prototypen föll vid en vinkelstörning på 9 grader. Den ser ut att klara vinkelstörningen först, men sedan genereras ett ryck som resulterar i att prototypen faller tillbaka åt samma håll. Gruppen misstänker att detta beror på att PD-regulatorn, när prototypen kommer tillbaka och över nollläget, skickar ut en motsatt spänning vilket resulterar i en snabb deceleration av svänghjulet. Möjligheter att programmera bort ett sådant beteende genom att till exempel implementera en algoritm som tillåter pendeln att översvinga istället har diskuterats, men på grund av tidsbrist aldrig testats.

6.3 Projektutvärdering

Utifrån de åtta punkterna på kravlista som företaget Intab presenterade i sin beskrivning av projektet har endast följande krav uppfyllts:

- Den bör vara trådlös och klara av att kommunicera på minst 10 m radie.
- Intressant mätdata bör kunna visualiseras på en display.

Resterande punkter har inte eller endast delvis uppfyllts. Anledningen är projektets karaktär, bristande hårdvara samt problematiken vid implementering av regulatorerna. Projektet innehöll flertalet komplexa delmoment som krävde mer tid än beräknat. Hårdvaruproblem, så som felaktigt inköp av motormodell till drivning av svänghjulet samt upptäckten av att det förekom kraftiga störningar av sensorerna, gjordes först slutet av projektet försvårade och försenade arbetet ytterligare.

6.4 Potentiella ändringar som kan göras i framtiden

För att förbättra balanseringsförmåga har följande lista tagits fram med åtgärder eller ändringar som kan göras.

- Konstruera ett nytt svänghjul, som är lätt och har en stor radie, med det av mesta vikten längst ut på svänghjulet.
- Införskaffa en ny motor som har jämnare lågvarvtals karaktäristik och kan leverera mer vridmoment.
- I simuleringarna generera en vinkelstörning med en kraft i Newton, istället för en vinkelstörning i grader.
- Producera egen kod istället för att använda Arduinos standardbibliotek för PID-reglering.

Förslaget om att konstruera ett nytt svänghjul kommer ifrån önskemålet att ha mer tröghetsmoment. Svänghjulet i aluminium var det som fungerade bäst i testerna, men det krävs mer tröghetsmoment för att systemet ska kunna återhämta sig från större vinkelstörningar. Svänghjulet i aluminium med stålringen monterad har mer tröghetsmoment men är istället för tungt. Detta resulterar i en högre tyngdpunkt för systemet vilket gör att motorn får anstränga sig mer för att få accelerationen som krävs på grund av den högre massan. Om ett nytt svänghjul konstrueras kommer det vara mycket lättare än den med stålringen och ha en större radie än svänghjulet i aluminium. Detta ska enligt ekvation (1) leda till ett högre tröghetsmoment utan att det blir för tungt.

Andra förslaget behandlar svänghjulsmotorn och dess lågvarvtalskaraktäristik. Det observerades vid tester på prototypen att motorn hade ojämn

gång vid låga varvtal. Det vill säga att det inte gick att köra motorn jämnt och långsamt, vilket krävs vid mindre vinkelkompensering. För att förbättra jämnheten kan en motor med fler poler införskaffas. En motor som kan leverera mer vridmoment skulle också vara önskvärt, men detta problem kan också lösas med ett nytt svänghjul enligt första förslaget.

Under de simuleringar som redovisades i genomförandeavsnittet, genererades en störsignal i grader. Det vill säga att en tillstötning simulerades på prototypen till sex grader, oavsett massan på prototypen. Istället tros det att ett mer informativt resultat hade erhållits om det hade genererats en stöt i Newton. Det vill säga att varje stöt hade haft samma kraft, istället för samma vinkelutslag. Då skulle det vara möjligt att observera hur mycket kraft som krävs för att stöta ner prototypen och kunnat ta hänsyn till masskillnader.

Sista förslaget har egentligen redan genomförts, men det kan förklara varför det har varit närmast omöjligt att implementera en regulator på microcontrollern tills de senare veckorna i projektet. Under största delen av projektets gång har Arduinos egna PID bibliotek använts utan några funderingar på dess kvalitet och utan större framgångar. Till slut misstänktes det att biblioteket var bristande och en egen algoritm producerades, vilket genast genererade bättre resultat.

7 Slutsats

Med förutsättningarna som beskrevs i kapitel 4, klarade systemet att återhämta sig efter en störning på sex grader, vilket är en grad mer än det utsatta målet. Dock lyckades inte detta implementeras på motorcykeln, vilket var huvudmålet med projektet. Konstruktionen av motorcykeln har dock genomförts, och alla essentiella komponenterna som krävs har införskaffats eller byggts för att den ska kunna köras framåt och styras. Utvecklingen av motorcykeln har mött svårigheter och problem som har hindrat projektets gång.

Modelleringen och simuleringarna gav till slut regulatorparametrar som fungerade i verkligheten, dock inte lika bra som simuleringarna antydde. Det är därför klart att det finns större skillnader mellan modell och verkligheten vilket förklarar olikheterna mellan simuleringarna och verkligheten, som kan vara allt från fel parametervärden till fel i systembeskrivningen.

Svårigheter med hårdvara och implementeringen av regulatorn ligger också delvis bakom misslyckandet av att konstruera en fullt fungerande självbalanserande motorcykel. Exempel på detta kan vara en alldeles för sen upptäckt av att accelerometern och gyroskopet stördes av motorn samt att motorn inte var optimal till ändamålet. Implementeringen av regulatorn visade sig också vara svårt och Arduinos egna PID bibliotek fungerade inte lika bra som det var tänkt.

Projektet avslutas med påståendet att balansera en inverterad pendel har visat sig vara svårare än vad som först uppskattades. Prototypen kan dock balansera till viss del, men på grund utav tidsbrist har detta inte implementeras på motorcykeln.

Referenser

- [1] Goldstein, H. (1980). *Classical Mechanics 2:a upplagan*. Addison-Wesley ISBN:0201029189/9780201029185/0-201-02918-9
- [2] Nordling, C. Osterman, J (2006)*Physics Handbook for Science and Engineering 8th ed*. Sverige. Studentlitteratur AB ISBN10: 9144044534 ISBN13: 9789144044538
- [3] F. Chetouane; S. Darenfed; P. K. Singh (2010) Fuzzy Control of a Gyroscopic Inverted Pendulum. *Engineering Letters*. Volym 18, Nummer 1, pp. 10 - 17
- [4] Farrell, J. (2010) *Microsoft® Visual C# 2010: An Introduction to Object-Oriented Programming, 4th ed*. United States of America: Cengage Learning
- [5] Kurose, J. Ross, K. (2010) *Computer Networking, A top-down approach. 5th ed*. United States of America. Addison-Wesley
- [6] Lennartson, B. (2000) *Reglerteknikens grunder*. Sverige, Malmö. Holmbergs AB.
- [7] Willis, T. Newsome, B. (2010) *Beginning Visual Basic 2010*. Indianapolis. Wiley Publishing, Inc.
- [8] Glad, T. Ljung, L. (2000) *Control theory; Multivariable and Nonlinear Methods*. USA och Kanada. Taylor och Francis.
- [9] F. Chetouane; S. Darenfed; P. K. Singh (2010) Fuzzy Control of a Gyroscopic Inverted Pendulum. *Engineering Letters*. Volym 18, Nummer 1, pp. 10 - 17
- [10] Nenner, Uri; Linker, Raphael; Gutman, Per-Olof (2010) Robust feedback stabilization of an unmanned motorcycle. *Control Engineering Practice*, volym 18, nummer 8, s 970 - 978
- [11] Formalskii, A M (2010) Stabilization of Unstable Mechanical Systems. *Journal of Optimization Theory and Applications*, Volym 144, Nummer 2, pp. 227 - 253
- [12] Enqvist, M. TSRT91 Reglerteknik: Föreläsning 12.
<http://www.control.isy.liu.se/student/tsrt15/oh/lecture11.pdf>
(2012-03-04).

- [13] B. Wittenmark, K.J. Åström och S.B. Jørgensen. (2012) *Process Control*. Lunds Universitet.
<http://www.control.lth.se/media/Education/EngineeringProgram/FRT110/2011/F10-fourslides.pdf>
(2012-05-07)
- [14] Colton, S. (2007) The Balance Filter. Massachusetts Institute of Technology.
<http://web.mit.edu/scolton/www/filter.pdf> (2012-05-07).
- [15] ADXL345 Data Sheet Rev C (2011) ANALOG DEVICES.
http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/ADXL345.pdf
(2012-05-07).
- [16] MEMS motion sensor: high performance $\pm 300deg/s$ analog yaw-rate gyroscope (2009)
STMicroelectronics. http://www.st.com/internet/com/TECHNICAL_RESOURCES/TECHNICAL_LITERATURE/DATASHEET/CD00237186.pdf
(2012-05-07).
- [17] Mathworks (2012) <http://www.mathworks.se/help/toolbox/control/ref/pidtune.html>
(2012-05-11)

A Budget

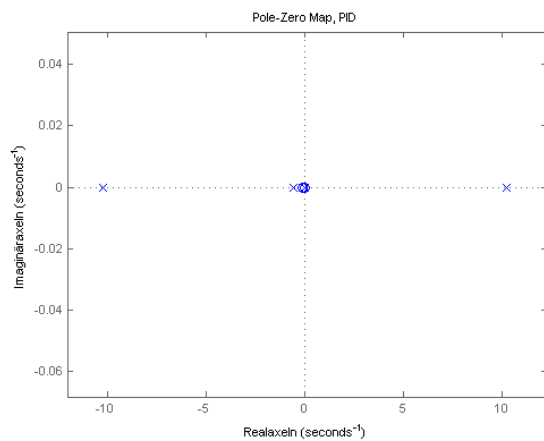
Tabell 4: Budget - Elektronik

| Enhet | Pris [kr] | Antal | Område |
|--|-----------|-------|-------------------|
| Motor | 150 | 1 | Styrning |
| Motor | 250 | 1 | Drivning |
| Motor | 800 | 1 | Balansering |
| Microcontroller Arduino Mega 2560 R3 | 400 | 1 | Programvara |
| Motorstyrning | 500 | 1 | Drivning/styrning |
| Motorstyrning | 300 | 1 | Balansering |
| Trådlöskommunikation WiFly Shield for Arduino | 600 | 1 | Kommunikation |
| Gyro + Accelerometer | 200 | 1 | Balansering |
| Strömförsörjning | 100 | 1 | Balansering |
| Strömförsörjning | 100 | 1 | Krets |

Tabell 5: Budget - Ram/Chassi

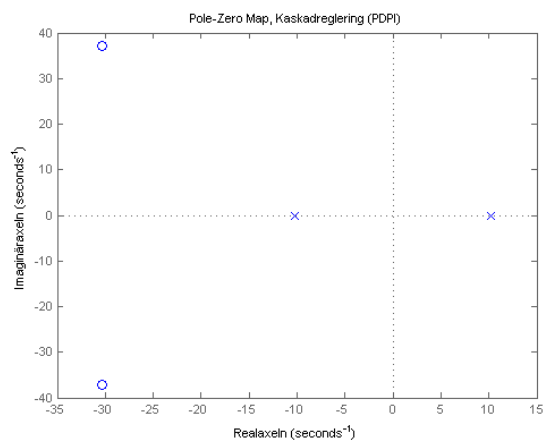
| Del | Pris [kr] | Antal | Område |
|-------------------|-----------|-------|-------------------|
| Däck - bak | 150 | 1 | Styrning |
| Däck - fram | 129 | 1 | Drivning |
| Fälg - bak | 150 | 1 | Balansering |
| Fälg - fram | 150 | 1 | Programvara |
| Kedja | 120 | 1 | Drivning/styrning |
| Drev | 100 | 1 | Balansering |
| Balanseringhjul | 300 | 1 | Kommunikation |
| Ram - aluminium | 0 | 1 | Balansering |
| Alternativ | | | |
| Färdig modell | 300 | 1 | |

B Stabilitet



Figur 43: Graf över poler och nollställen, PID

Där x är polerna och o nollställena. En pol i figur 43 syns ej på bilden eftersom den ligger för långt ut åt vänster.



Figur 44: Graf över poler och nollställen, PI+PD

C Intab - specifikationer

intab^o

Stenkullen 2012-03-08

Projekt : Eyecatcher Modell-MC

Vi på Intab önskar att öka dragkraften till vår monter under de mässor vi deltar i. Produkten vi önskar är en självbalanserande modellmotorcykel. Då det oftast inte finns mycket utrymme på bordet i montern som denna modell skall stå på, skall den kunna balansera stillastående. Vid visningar önskar vi gärna att denna skall gå att köra, men detta är inget krav då den mestadels kommer stå stilla på ett bord. På grund av det begränsade utrymmet under mässor skulle det vara fördelaktigt om hela motorcykeln var trådlös. Vid visningar kan de tänkas att motorcykeln lyfts ner på golvet och körs, därav kan en längre räckvidd på den trådlösa kommunikationen vara önskvärt. Då vi på Intab säljer mätutrustning skulle det även vara passande att kunna visa mätdata från motorcykelns sensorer på en skärm i montern.

För att modellen skall uppfylla en funktion åt företaget eftersträvas följande egenskaper:

- Storlekskrav ca 20 - 30 cm lång.
- Den skall kunna balansera stillastående.
- Produkten skall kunna köras framåt.
- Den skall kunna styras manuellt.
- Den bör vara trådlös och klara av att kommunicera på minst 10 m radie.
- Intressant mätdata bör kunna visualiseras på en display.
- Den skall klara av körning 10 min
- Den bör klara av körning 45 min

Vårt ansvar begränsas till materialkostnaden - dock högst 5.000,-+MOMS


Jan Arnfjorden
Styrelseordförande

Medlem i Svenska Elektronikindustriföreningen

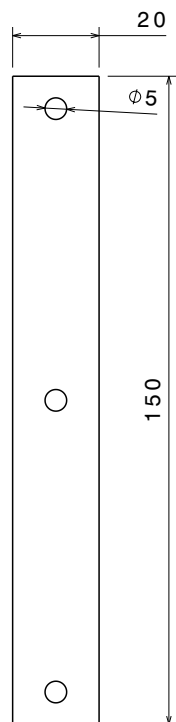
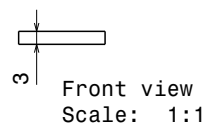
INTAB Interface-Teknik AB
Gjutarevägen 1
SE-443 61 Stenkullen
Sweden

Phone: +46-(0)302-246 00
Fax No: +46-(0)302-246 29
E-mail: info@intab.se
Internet: www.intab.se

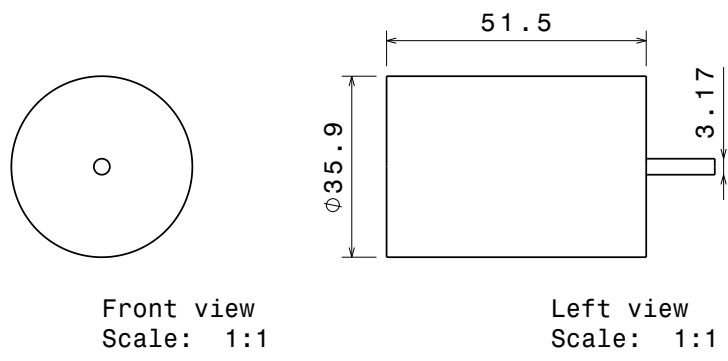
Corp.id.No: 556100-2337
VAT No: SE556100233701
Postal giro service: 82 84 60-6
Bank giro transfer: 234-0859

Figur 45: Intab - specifikationer

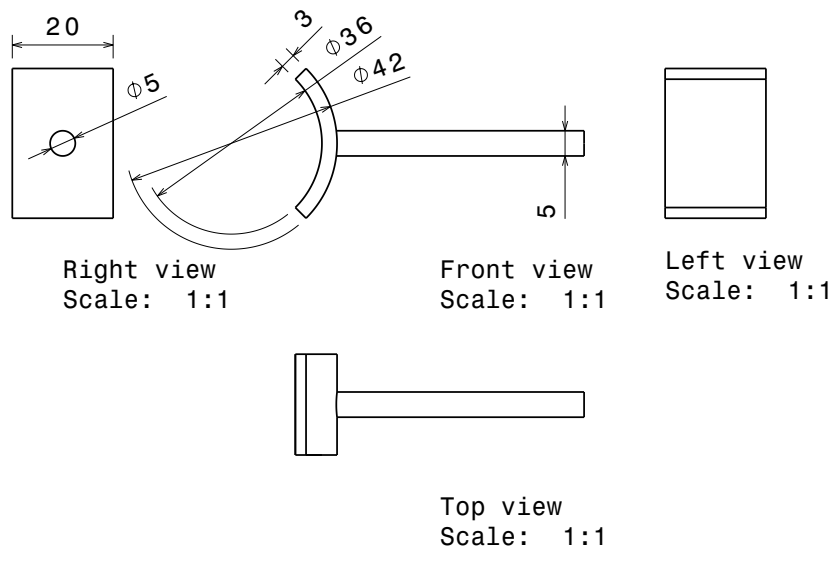
D Ritningar - Prototypen



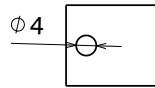
Figur 46: Botten



Figur 47: Motor



Figur 48: Motorfäste



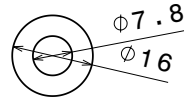
Bottom view
Scale: 1:1



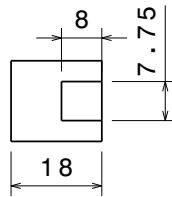
Right view
Scale: 1:1



Front view
Scale: 1:1

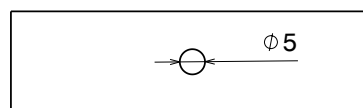
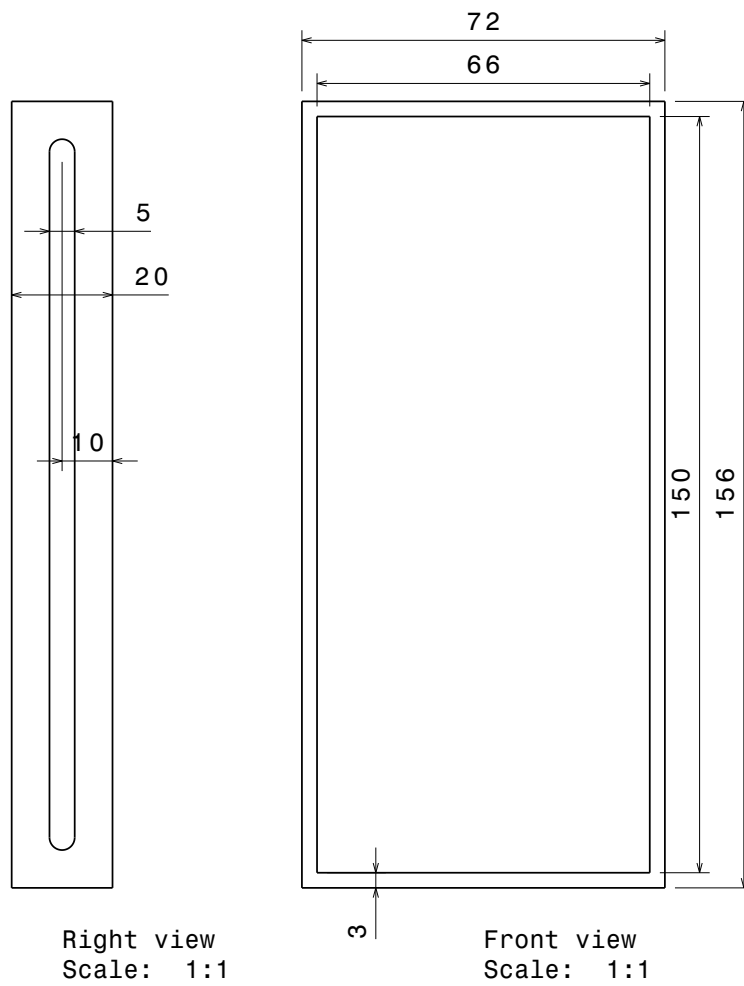


Left view
Scale: 1:1

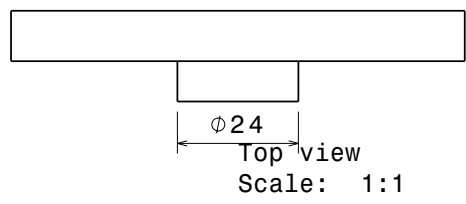
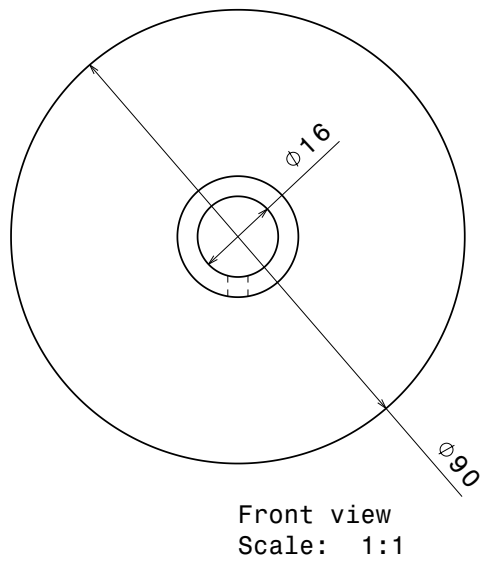
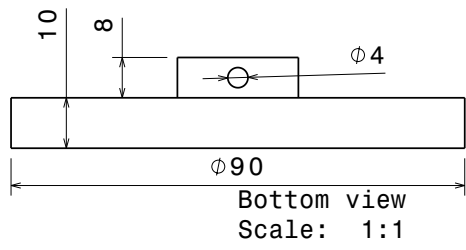


Top view
Scale: 1:1

Figur 49: Nav



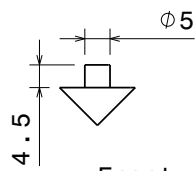
Figur 50: Ram med reglering



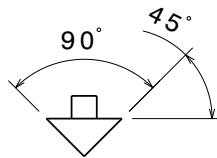
Figur 51: Svänghjul



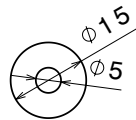
Bottom view
Scale: 1:1



Front view
Scale: 1:1



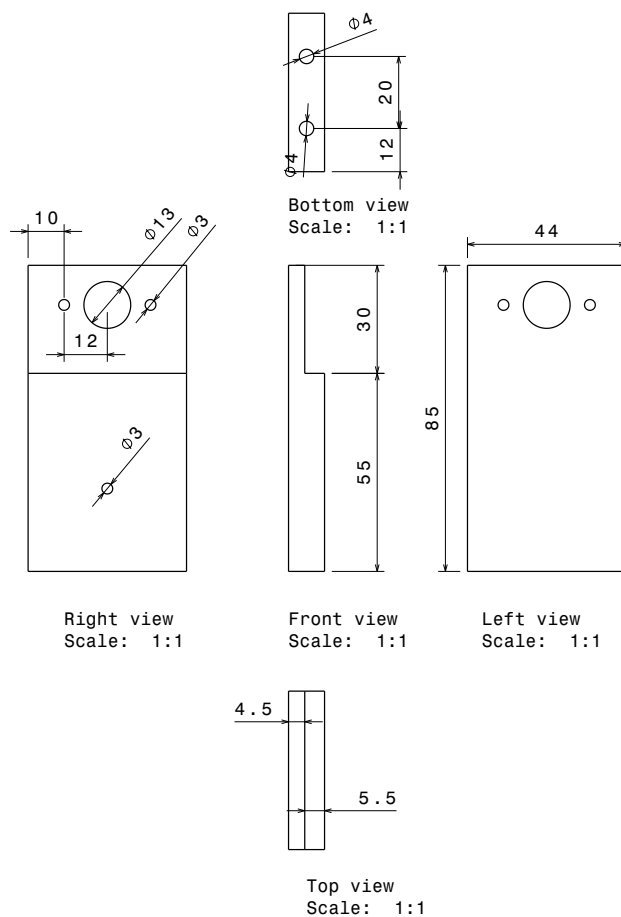
Left view
Scale: 1:1



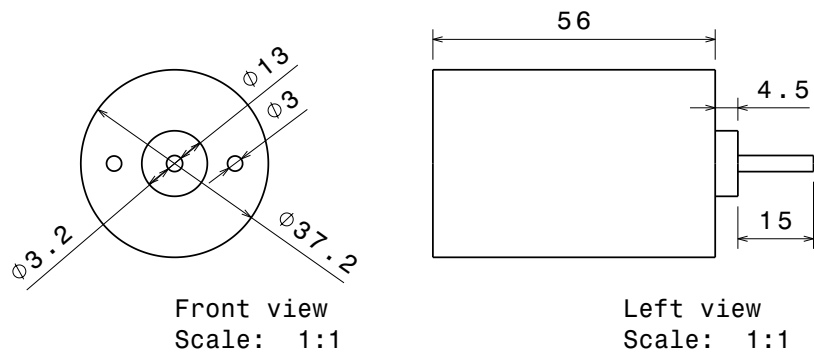
Top view
Scale: 1:1

Figur 52: Balansknopp

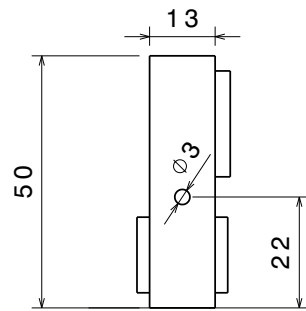
E Ritningar - Motorcykeln



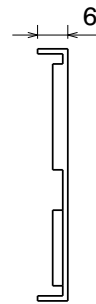
Figur 53: Motorfäste



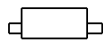
Figur 54: Motor



Front view
Scale: 1:1

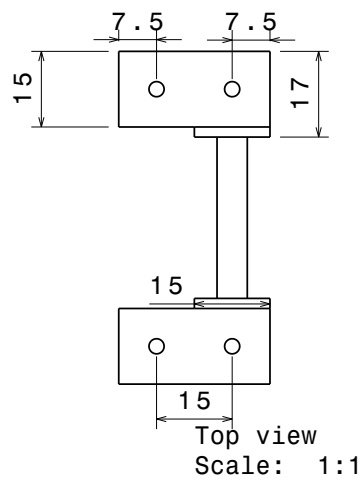
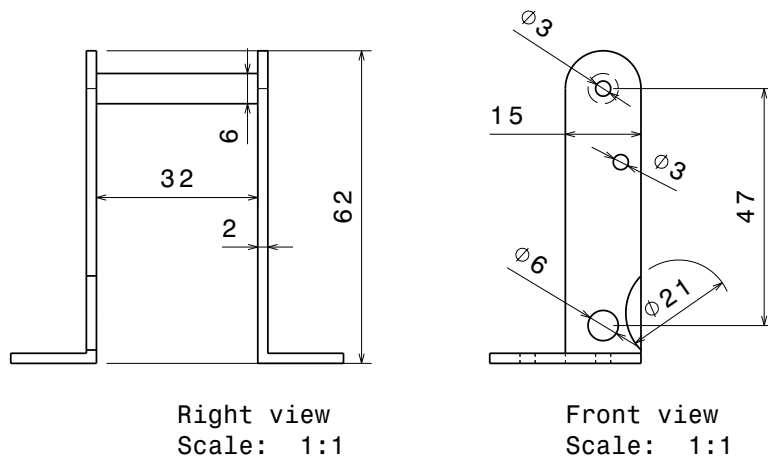


Left view
Scale: 1:1

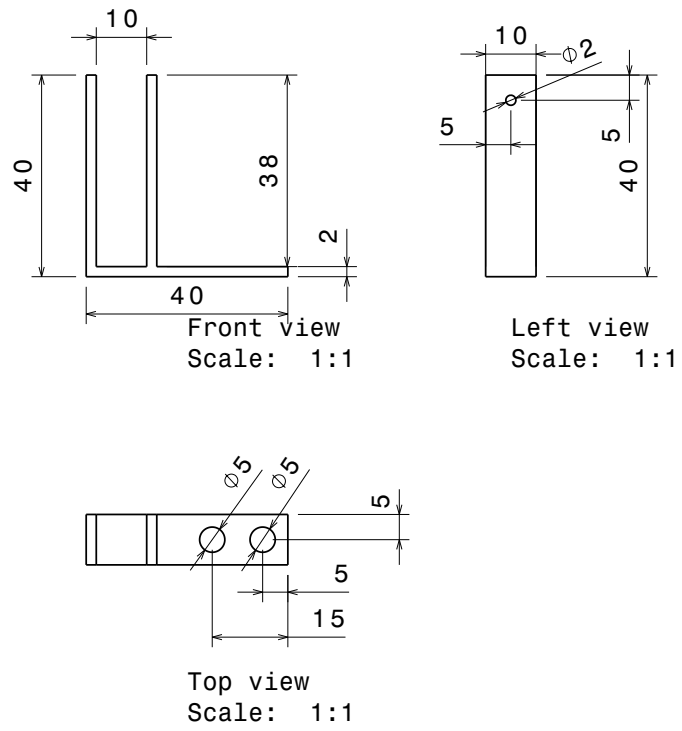


Top view
Scale: 1:1

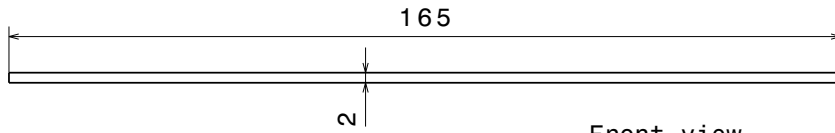
Figur 55: Sensorfäste



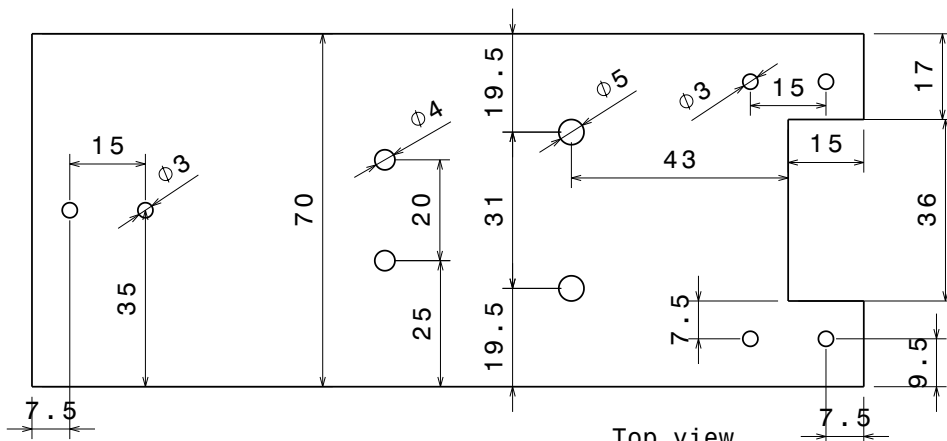
Figur 56: Ram - bak



Figur 57: Tachometer

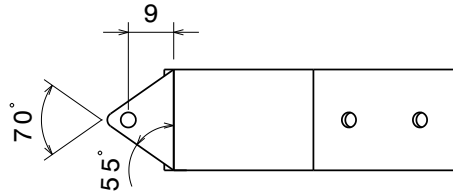


Front view
Scale: 1:1

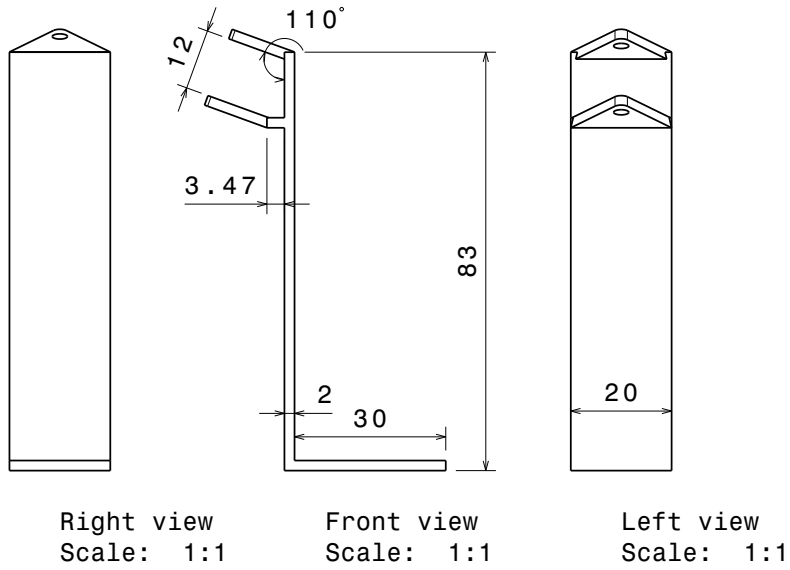


Top view
Scale: 1:1

Figur 58: Ram - Botten



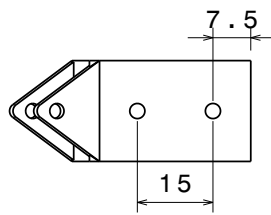
Top veiw with angle
Scale: 1:1



Right view
Scale: 1:1

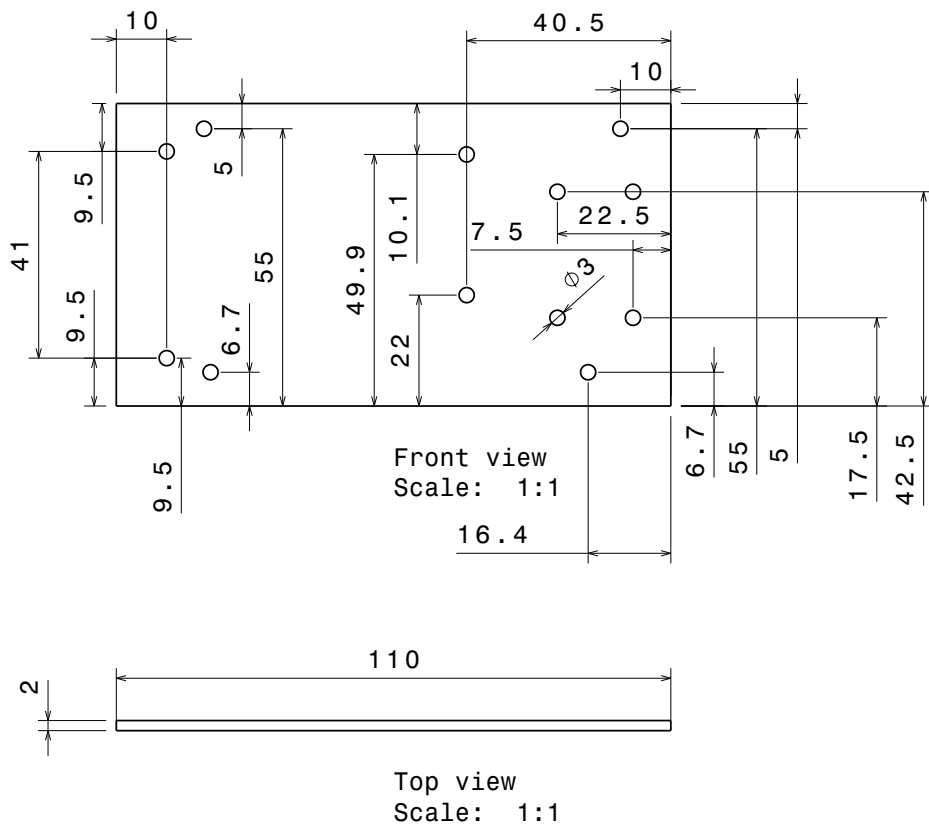
Front view
Scale: 1:1

Left view
Scale: 1:1

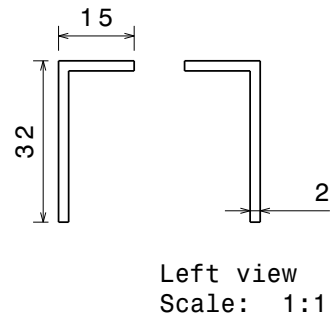
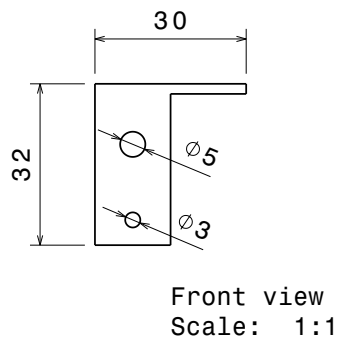
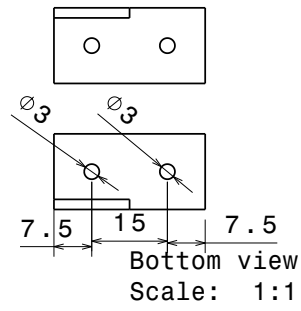


Top view
Scale: 1:1

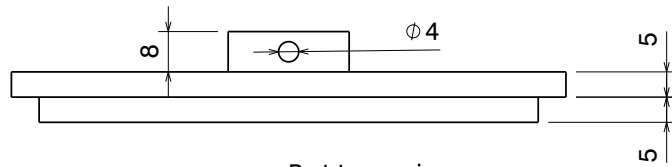
Figur 59: Ram - fram



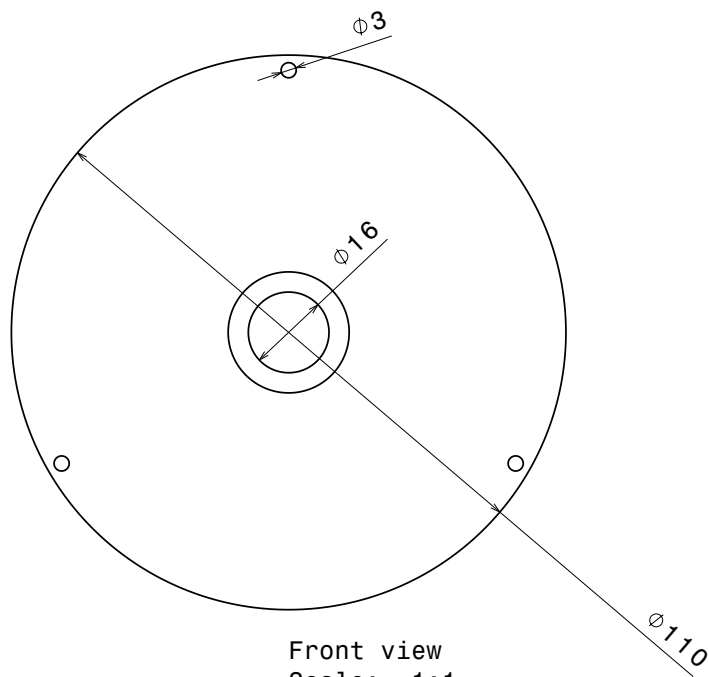
Figur 60: Stänkskärm



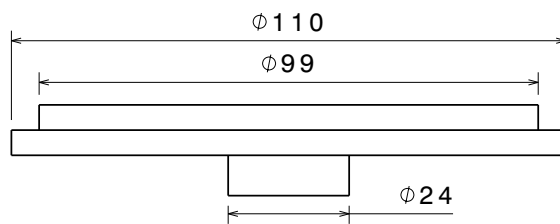
Figur 61: Stänkskärnfäste



Bottom view
Scale: 1:1

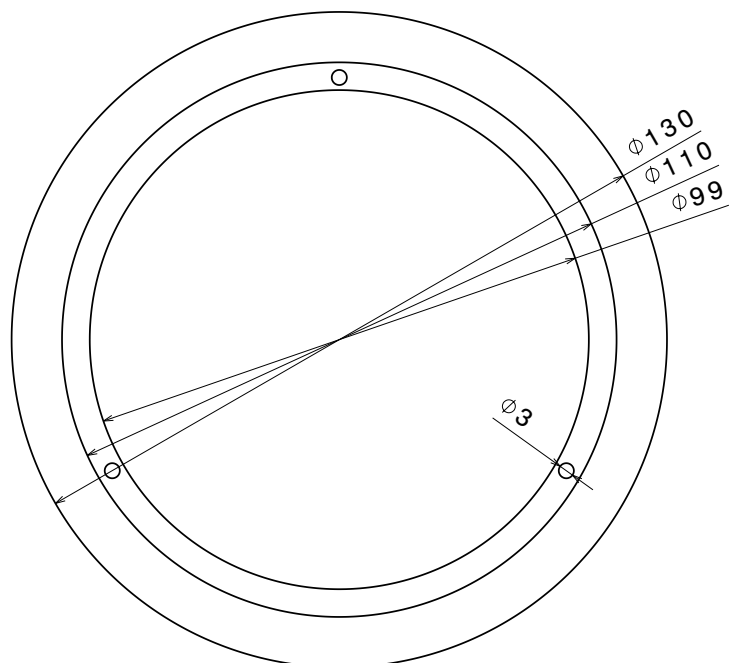


Front view
Scale: 1:1

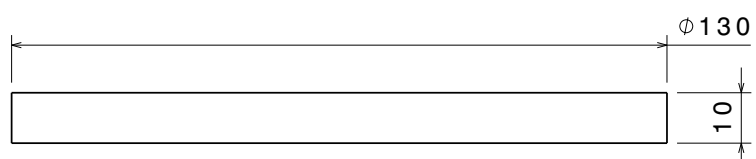


Top view
Scale: 1:1

Figur 62: Svänghjul



Front view
Scale: 1:1



Top view
Scale: 1:1

Figur 63: Svänghjulsring