

## **English title of the thesis**

MIKAEL SJÖSTEDT  
ALEXANDER RAMM

Bachelor's Thesis in Mechatronics

Supervisor: Daniel Frede (Is this correct?)

Examiner: Martin Edin Grimheden

Approved: TBA 2015-month-day

TRITA xxx yyyy-nn



# Abstract

Today the use of automated control is growing in a rapid pace and is being implemented more and more in consumer related products. This thesis is about implementing automated control and balance a simple construction using a reaction wheel commonly used in satellites?

To be filled in:

Problem (

Approach (On the premiss of constructing a small box shaped robot "Items" with desired properties were chosen....)

Results ( Hopefully something that looks cool )

Conclusion

(The thesis is written in English and it has both a Swedish and an English *Abstract* page. An English thesis has English *Cover* and *Title* pages. This template, which has no bookmarks or other automation features, defines the layout of a bachelor thesis in Machine Design (MF123X) or Industrial Engineering (MF105X). The chapter structure that is presented here is just an example. The abstract is maximum one page long. The abstract page is followed by a blank page. The preceding title page, which preferably contains an illustrative picture, is also followed by a blank page. All chapters start at the top of a right hand page, i.e. a page with an odd number.)



# Sammanfattning

## Rapporttitel på svenska

Som abstract fast på engelska

Examensarbetet skrivs på engelska och har alltid både en svensk och en engelsk sammanfattningssida. Denna skrivmall, som inte har “bookmarks” eller några avancerade “features”, definierar layouten för ett examensarbete i Maskinteknik (MF123X) eller Industriell ekonomi (MF105X). I detta kapitel sammanfattas examensarbetet. Sammanfattningens omfattning är högst en sida. Sammanfattningen åtföljs av en blank sida. Den föregående titelsidan, som lämpligen också innehåller en illustrativ bild, följs också av en blank sida. Alla kapitel börjar längst upp på en högersida, dvs på ett udda sidonummer.



# Preface

Detta är rätt ställe att tacka för hjälp, råd, samarbete och inspiration för det presenterade projektet. Detta kapitel är valfritt. Förordet avslutas lämpligtvis med de båda raderna Namn och Plats, månad och år.

Alexander Ramm  
Mikael Sjöstedt  
KTH, månad, 2015





# Contents

<b>Abstract</b>	<b>iii</b>
<b>Sammanfattning</b>	<b>v</b>
<b>Preface</b>	<b>vii</b>
<b>Contents</b>	<b>ix</b>
<b>Nomenclature</b>	<b>xi</b>
<b>1 Introduction</b>	<b>1</b>
1.1 Background . . . . .	1
1.2 Purpose . . . . .	1
1.3 Scope . . . . .	3
<b>2 Method</b>	<b>5</b>
2.1 Contruction . . . . .	5
2.2 Motor Control . . . . .	5
2.3 Sensor reading . . . . .	5
2.4 System Control . . . . .	5
<b>3 Theory</b>	<b>7</b>
<b>4 Demonstrator</b>	<b>9</b>
4.1 Problem Formulation . . . . .	9
4.2 State space model . . . . .	9
4.3 Software . . . . .	11
4.4 Electronics . . . . .	11
4.5 Hardware . . . . .	11
4.6 Results . . . . .	11
<b>5 Discussion and conclusions</b>	<b>13</b>
5.1 Discussion . . . . .	13
5.2 Conclusions . . . . .	13

<b>6</b>	<b>Recommendations and future work</b>	<b>15</b>
6.1	Recommendations . . . . .	15
6.2	Future work . . . . .	15

## Appendices

<b>A</b>	<b>Additional information</b>	<b>17</b>
<b>B</b>	<b>Proofs</b>	<b>19</b>

# Nomenclature

## Symbols

Symbol	Description
$E$	Elasticity module (Pa)
$r$	Radius (m)
$t$	Thickness (m)
$L$	Lagrange (fixa)
$\theta$	Kubvinkel
$\phi$	Flywheel angle
$Q$ och $q$	Lagrange operator
$E_k$	Kinetic energy
$E_p$	Potential Energy
$I_c$	Inertia of the cube
$I_f$	Inertia of the flywheel
$M_c$	Total mass of the cube
$i$	Current
$K_t$	Torque constant
$E_{emf}$	Induced voltage
$K_{emf}$	Induced voltage constant ???
$U$	Voltage over motor ?
$R_m$	Motor resistance
$\eta_m$	Motor efficiency
...	...

## Abbreviations

Abbreviation	Description
CAD	Computer Aided Design
CAE	Computer Aided Engineering
PLM	Product Lifecycle Management
PWM	Pulse With Modulation
DOF	Degrees of freedom
...	...



# Chapter 1

## Introduction

Beskriv bakgrund, syfte, avgränsning för det utförda examensarbetet, samt även de metod(-er)som använts för att lösa uppgiften. Skriv exempelvis: Detta kapitel beskriver bakgrund, syfte, avgränsning och metod för det utförda examensarbetet.

This chapter describes the background, purpose, scope, and method of the thesis.

### 1.1 Background

Balancing an inverted pendulum can be a challenging task. It requires knowledge of closed loop control systems and their stability, electronics and...

### 1.2 Purpose

(insert RQ here) "What improvements can be made to the control system to better cope with an applied external force to the cube"

The purpose was to examine what affected the stability of the mechanical system, (specially) the control system. Many parameters go into the state space control system and their effect on the mechanical system behaviour is not trivial. The purpose was to determine if some of the parameters had an extra importance and if the conclusions were applicable on other mechanical systems. Sample frequency and clock frequency were other parameters which were to be examined as well. Also the results were to be contributed to the open source community. All results are available online, open source (reference to MIT license here), on GitHub (reference to GitHub link)(summer 2015).

Figures in the thesis should be centered and figure captions should be centered. Figures are numbered Fig. 1.1, Fig. 1.2, and so on.

Table headings should be centered. Tables are numbered Table 1.1, Table 1.2, and so on. Table text should be centered. Below is an example of a table with a table heading.



Figure 1.1. Logo of the ITM school.

Table 1.1. Table header

Rubrik	Rubrik
råd 1, kolumn 1	råd 1, kolumn 2
råd 2, kolumn 1	råd 2, kolumn 2
...	...
råd n, kolumn 1	råd n, kolumn 2

- Onummerade listor skrivs lämpligtvis med i punktform (“bullets”)

1. Numrerade listor numreras 1,2,3 etc.

Ekvationer centras. Varje ekvation numreras konsekutivt genom hela rapporten med arabiska siffror inom parantes: eq. (1.1), (1.2), etc. Ekvationsnumret högerjusteras på raden.

$$R = \frac{N_F}{N_F - N_R} \quad (1.1)$$

Referenser bör göras med namn och år, som exempel, [?] hävdar att ..., eller ick-elinjär finita element analys förutsätter såväl specialkunskaper som erfarenhet [?]. Observera också lilla skillnaderna mellan referenser till tidskrifter [?] och [?], en bok [?] och en konferens [?]. Ett exempel på en Internetreferens är [?]. Huvudrubriken för referenskapitlet behandlas som en helt vanlig huvudrubrik.

#### *Angående forskningsfrågor och vetenskaplig frågeställning*

Beskriv, med utgångspunkt i den bakgrund som presenterats i föregående avsnitt, den frågeställning som rapporten undersöker, diskuterar och drar slutsatser runt. Själva frågeställningen ska beskrivas i 1-2 meningar som tydligt pekar ut vad som ska mätas inom de begränsningar och med de metoder som presenteras i efterföljande avsnitt. Med andra ord, undvik vaga formuleringar (“Går det att...”), kriterier som egentligen är funktioner (“Ska kunna...”) eller subjektiva formuleringar (“...ska vara bra/acceptabel/tillräckligt snabb/etc.”)

### 1.3. SCOPE

## 1.3 Scope

Det är god sed att definiera och beskriva projektets/uppgiftens avgränsning i det introducerande kapitlet.

The scope were to examine the parameters, of a state space controller and other electronical desitions, affect on the behaviour of a balancing "1-DOF" inverted pendulum.





## Chapter 2

# Method

Den metod eller de metoder, som huvudsakligen används för att angripa den uppgift eller det problem som definieras ovan, kan antingen definieras i introduktionskapitlet eller förklaras mera ingående i ett följande metodkapitel.

The engineering task was divided into smaller problems (In med punktlista?). (Behandlade) separately to later assemble the entire system. The chosen subproblems where:

- Construction
- Motor Control
- Sensor Reading
- System Control

### 2.1 Construction

The main construction problem where deciding the size of the cube and reaction wheel. A too big reaction wheel for the motor has a large affect on the cubes ability to balance. The problem where (uppställt) with Newtonian mechanics.

### 2.2 Motor and Motor Control

The motors nominal and stall torque are very important for the system blaha

### 2.3 Sensor Reading

The IMU's parameters and filtering of the signals

## 2.4 System Control

The chosen control method where state space. The problem is to linearise and discretise with good enough precision.

## Chapter 3

# Theory

*Den teoretiska fördjupningen är en sammanfattning av tillgänglig kunskap och resultat från forskning som tidigare har utförts inom examensarbetets område. Detta kapitel presenterar den teoretiska referensramen som utgör utgångspunkten för den utförda forskningen, produktutvecklingen eller konstruktionsuppgiften.*

Här måste det köttas på mycket inför tisdag 9/3

Balancing 1-DOF inverted penelum type strucktures using reaction wheels is no new concept, and became common with the introduction to cheap microcontrollers. A lot work has been done on the topic but it's still no easy task due tu the instabillity of pendulums. The latest development is on "2-DOF" pendelum structures unsing multiple orthogonal reaction wheels. This method is commonly used to rotate sattelites and maintaining their attitude so incerease performance and allign solar panels. Allso creating transversal movement using only the reaction wheels is a recent topic for research ie not only changeing direction of something but actually moving it. This is of course impossible in orbit, but could possibly be usefull for land/sea based machines to overcome various obstacles without a seperate system for balanceing and movement.



## Chapter 4

# Demonstrator

*Detta kapitel beskriver både den utvecklade demonstratorn och den aktuella arbetsprocessen som demonstratorn utvecklats enligt, dvs resultatet och vägen dit.*

### 4.1 Problem Formulation

Beskriv din problemställning för demonstratorn.

Create ze cube, balance it, go home

### 4.2 State space model

To create a state-space model the physical model has to be translated to a mathematical model. To do this, *Euler-Lagrange* equations is used where a system in motion can be described by:

$$Q_i = \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \left( \frac{\partial L}{\partial q_i} \right) \quad (4.1)$$

In this case the cube's angular momentum (Rätt ordval?) is counteracted by the flywheel and the system can be then be written as follows

$$M_a = \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} \right) - \left( \frac{\partial L}{\partial \theta} \right) \quad (4.2)$$

$$- M_a = \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{\phi}} \right) - \left( \frac{\partial L}{\partial \phi} \right) \quad (4.3)$$

Whereas  $\theta$  represents the angle of the cube and  $\phi$  is the position of the flywheel. The Lagrange equation is derived from the difference in kinetic energy and potential energy of the cube

$$L = E_k - E_p \quad (4.4)$$

$$E_k = \frac{I_c \cdot \dot{\theta}^2}{2} + \frac{I_f \cdot \dot{\phi}^2}{2} \quad (4.5)$$

$$E_p = \frac{M_c \cdot g \cdot l \cdot \cos \theta}{\sqrt{2}} \quad (4.6)$$

Equation (4.3) and (4.2) with (4.4) gives

$$I_k \cdot \ddot{\theta} - \frac{M_c \cdot g \cdot l \cdot \sin \theta}{\sqrt{2}} = -M_a \quad (4.7)$$

$$I_s \cdot \ddot{\phi} = M_a \quad (4.8)$$

It is now plain to see that (Jävligt slentriant skrivet)  $M_a$  is the torque (utövat ??) needed by the flywheel which is wielded by the motor torque  $\tau$ , it can be described by a relation between a motor constant and the current flowing through the motor.

$$\tau = K_t \cdot i_m \quad (4.9)$$

The current can be described by the voltage (över motorn?)

$$\tau = K_t \cdot \frac{U - E_{\text{emf}}}{R_m} \quad (4.10)$$

The induced voltage is related to the 'random constant' and the rotor rotation

$$E_{\text{emf}} = K_{\text{emf}} \cdot \dot{\phi}_r \quad (4.11)$$

$$\phi_r = \dot{\phi} - \dot{\theta} \quad (4.12)$$

$$\tau = \frac{K_t}{R_m} U - \frac{K_t K_{\text{emf}}}{R_m} \dot{\phi} + \frac{K_t K_{\text{emf}}}{R_m} \dot{\theta} \quad (4.13)$$

The torque on the (hur fan blir det här bra ? ) flywheel can then be described with the efficiency of the motor

$$M_a = \tau \cdot \eta_m \quad (4.14)$$

Based on equation (4.3), (4.2) and (4.14) the system can be described by

$$\ddot{\theta} = -\frac{K_t \eta_m}{R_m I_c} U + \frac{K_t K_{\text{emf}} \eta_m}{R_m I_c} \dot{\phi} - \frac{K_t K_{\text{emf}} \eta_m}{R_m I_c} \dot{\theta} + \frac{M_t g l}{\sqrt{2} I_c} \sin \theta \quad (4.15)$$

$$\ddot{\phi} = \frac{K_t \eta_m}{R_m I_f} U + \frac{K_t K_{\text{emf}} \eta_m}{R_m I_f} \dot{\phi} - \frac{K_t K_{\text{emf}} \eta_m}{R_m I_f} \dot{\theta} \quad (4.16)$$

based on equations (4.15) and (4.16) the system can be described with a state space model with a states  $x^T = [\theta, \dot{\theta}, \dot{\phi}]$ . The system is hence described by

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (4.17)$$

where

### 4.3. SOFTWARE

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ \frac{M_t g l}{\sqrt{2} I_c} & -\frac{K_t K_{emf} \eta_m}{R_m I_c} & \frac{K_t K_{emf} \eta_m}{R_m I_c} \\ 0 & \frac{K_t K_{emf} \eta_m}{R_m I_f} & -\frac{K_t K_{emf} \eta_m}{R_m I_f} \end{bmatrix}$$
$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{K_t \eta_m}{R_m I_c} \\ \frac{K_t \eta_m}{R_m I_f} \end{bmatrix}$$

## 4.3 Software

Beskriv hur din mjukvara fungerar. Använd bl.a. flödesscheman för att åskådliggöra programmets struktur.

## 4.4 Electronics

Beskriv din elektroniska konstruktion. Använd figurer och förenklade blockschema. Motivera dina lösningar.

Sensors

Motor

arduino

Motor control

## 4.5 Hardware

Beskriv din mekaniska konstruktion (om du har någon) Testar att ändra direkt i GitHub The motor is fixed through the middle wall in the cube, the shaft on one side and the body on the other. The flywheel is directly mounted to the motor shaft. All other componets are mounted on the motor-body side of the cube.

Basic construction

## 4.6 Results

Beskriv resultatet.





## Chapter 5

# Discussion and conclusions

*I detta kapitel diskuteras och sammanfattas de resultat som presenterats i föregående kapitel. Sammanfattningen baseras på en resultatanalys och syftar till att svara på den fråga eller de frågor som formuleras i kapitel i.*

### 5.1 Discussion

Bla bla bla

### 5.2 Conclusions

Bla bla bla



## Chapter 6

# Recommendations and future work

*I detta kapitel ges rekommendationer för mera detaljerade lösningar och/eller framtida arbete.*

### 6.1 Recommendations

Lorem ipsum dolor sit amet, consetetur sadipscing elitr, sed diam nonumy eirmod tempor invidunt ut labore et dolore magna aliquyam erat, sed diam voluptua. At vero eos et accusam et justo duo dolores et ea rebum. Stet clita kasd gubergren, no sea takimata sanctus est Lorem ipsum dolor sit amet.

### 6.2 Future work

An extention of the project would be balancing the cube not only in it's edbe but it's corner. To achieve this multiple reaction wheels must be used and a more complicated control system due to changes in moment of inertia caused by angular velocities in the other reaction wheels.



## **Appendix A**

### **Additional information**



## **Appendix B**

### **Proofs**





