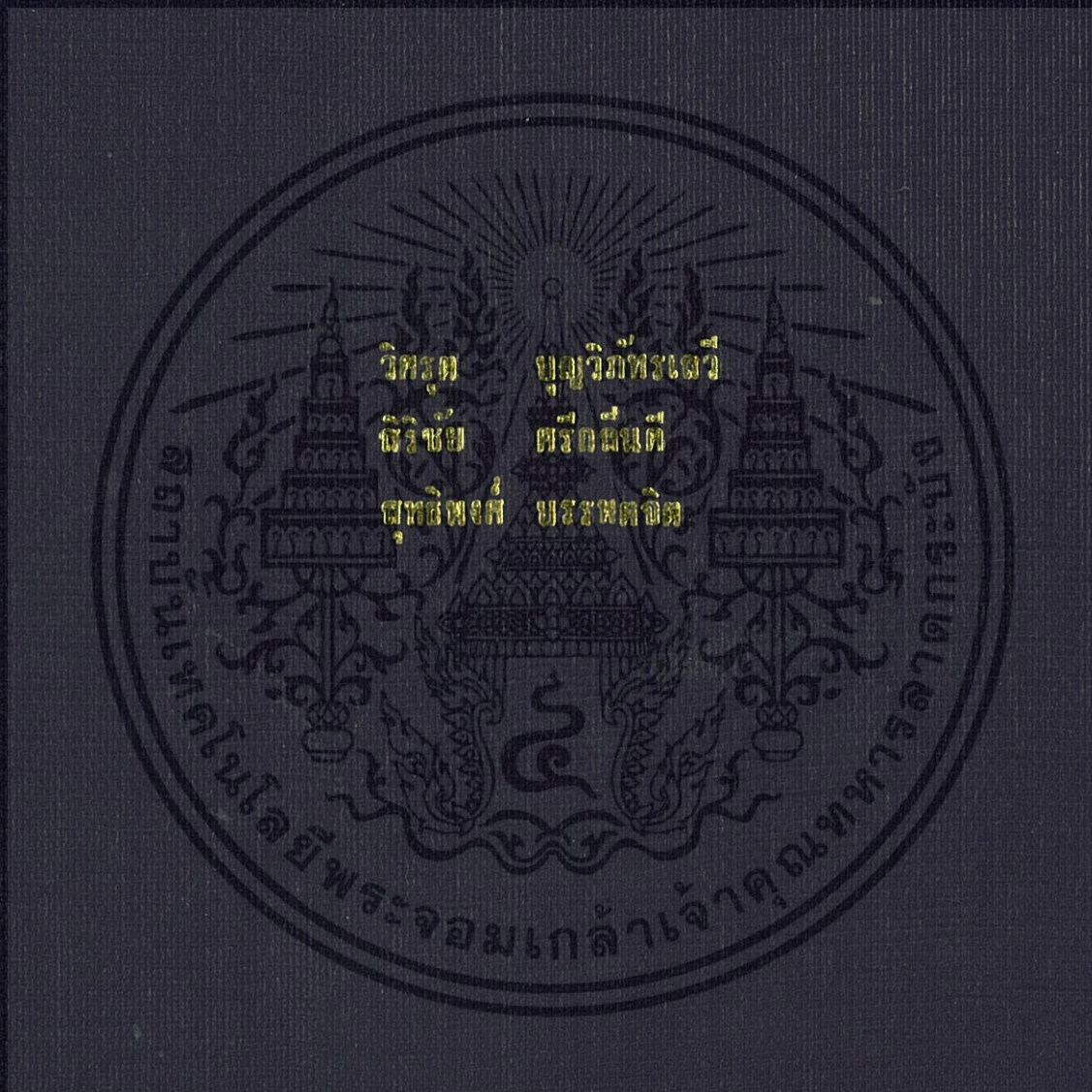


การสร้าง Segway เพื่อใช้ศึกษาในวิชาการควบคุมอัตโนมัติ
Building Segway for Studying in Automatic Control Course



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาค้นคว้าหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2556

การสร้าง Segway เพื่อใช้ศึกษาในวิชาการควบคุมอัตโนมัติ

Building Segway for Studying in Automatic Control Course



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Building Segway for Studying in Automatic Control Course



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIRMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2013

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2556

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การสร้าง Segway เพื่อใช้ศึกษาในวิชาการควบคุมอัตโนมัติ

Building Segway for Studying in Automatic Control Course

ผู้จัดทำ

- | | |
|-----------------------------|-----------------------|
| 1. นาย วิศรุต บุญวิภัทรเสวี | รหัสประจำตัว 53011495 |
| 2. นาย สิริชัย ศรีกลิ่นดี | รหัสประจำตัว 53011702 |
| 3. นายสุทธิพงษ์ บรรพตจิต | รหัสประจำตัว 53011738 |



อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์

(ผศ.ดร.ณัฐฉา เตไปวา)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสร้าง Segway เพื่อใช้ศึกษาในวิชาการควบคุมอัตโนมัติ

นาย วิศรุต บุญวิภัทรเสวี 53011495

นาย สิริชัย ศรีกลิ่นดี 53011702

นาย สุทธิพงษ์ บรรพตจิต 53014738

ผศ.ดร. ณัฐภูมิ เตไปวา อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2556

บทคัดย่อ

โครงการเรื่องการสร้าง Segway เพื่อใช้ศึกษาในวิชาการควบคุมอัตโนมัติจะเป็นการศึกษาเกี่ยวกับการออกแบบโครงสร้างและระบบควบคุมให้กับยานพาหนะสองล้อที่เรียกว่า Segway ซึ่งเป็นระบบทางกลที่ไม่เสถียรและไม่เป็นเชิงเส้นซึ่งมีลักษณะคล้ายกับระบบทางกลที่เป็นที่รู้จักกันดีคืออินเวอร์ทเพนดูลัม และเพื่อความสะดวกต่อการวิเคราะห์ระบบจึงอาศัยทฤษฎีพื้นฐานของอินเวอร์ทเพนดูลัมที่เป็นเชิงเส้นมาพิจารณาในส่วนที่เป็นสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อนำไปสู่การออกแบบตัวควบคุมและการวิเคราะห์การตอบสนองของระบบต่อไป โดยในโครงการนี้จะใช้ตัวควบคุมขั้นพื้นฐานคือตัวควบคุมแบบพีไอดีมาช่วยควบคุมการทำงานของระบบให้ตอบสนองตามความต้องการ นอกจากนี้ยังมีการใช้เซนเซอร์แอกเซลเลอโรมิเตอร์เข้ามาช่วยในการสร้างเสถียรภาพและวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆของระบบอีกด้วย ตลอดจนมีการเขียนโปรแกรมควบคุมการทำงานของ Segway ด้วยภาษาซีและการใช้โปรแกรม MATLAB ในการวิเคราะห์การตอบสนองของระบบด้วย

คำสำคัญ: อินเวอร์ทเพนดูลัม, ตัวควบคุมพีไอดี, แอกเซลเลอโรมิเตอร์

Building Segway for Studying in Automatic Control Course

Widsarud Bunwipatsewee 53011495

Sirichai Sriklindee 53011702

Sutthipong Banphotchit 53011738

Asst.Prof.Dr.Nattawoot Depaiwa Advisor

Year 2556

ABSTRACT

This project, building Segway for studying in automatic control course, is to design a structure and a control system for a two-wheeled vehicle called Segway. The system is similar to the classical unstable, non-linear mechanical control problem of an inverted pendulum on a cart. For convenient to system analysis, this project derives the linearized system dynamics equations and approaches the control problem to stabilize the Segway. In this project, PID controller is used to improve the control system both in the simulation and real system. In addition, an accelerometer is used to control the stability and measure the important parameters of the Segway. In the other hand, the C language is used to control the Segway and MATLAB is used to analyze the response of the system.

Keywords: Inverted Pendulum, PID Controller, Accelerometer

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เนื่องด้วยได้รับการอนุเคราะห์และช่วยเหลือในทุกๆด้านจากอาจารย์ที่ปรึกษา จึงขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ณัฐวุฒิ เดไปวา รวมทั้งอาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลทุกท่านตลอดจนรุ่นพี่ที่ให้ความเมตตาประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และคำแนะนำอันเป็นประโยชน์ต่อการทำวิชาปริญญานิพนธ์ฉบับนี้

และต้องขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่สุดที่ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้ก็คือ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งได้เลี้ยงดูผู้เขียนมาเป็นอย่างดี พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ และยังให้กำลังใจเอาใจใส่เสมอมาในทุกๆด้านอันหาที่เปรียบมิได้ ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณอันสุดประมาณและขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

นาย วิศรุต บุญวิภัทรเสวี

นาย สิริชัย ศรีกลิ่นดี

นาย สุทธิพงศ์ บรรพตจิต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

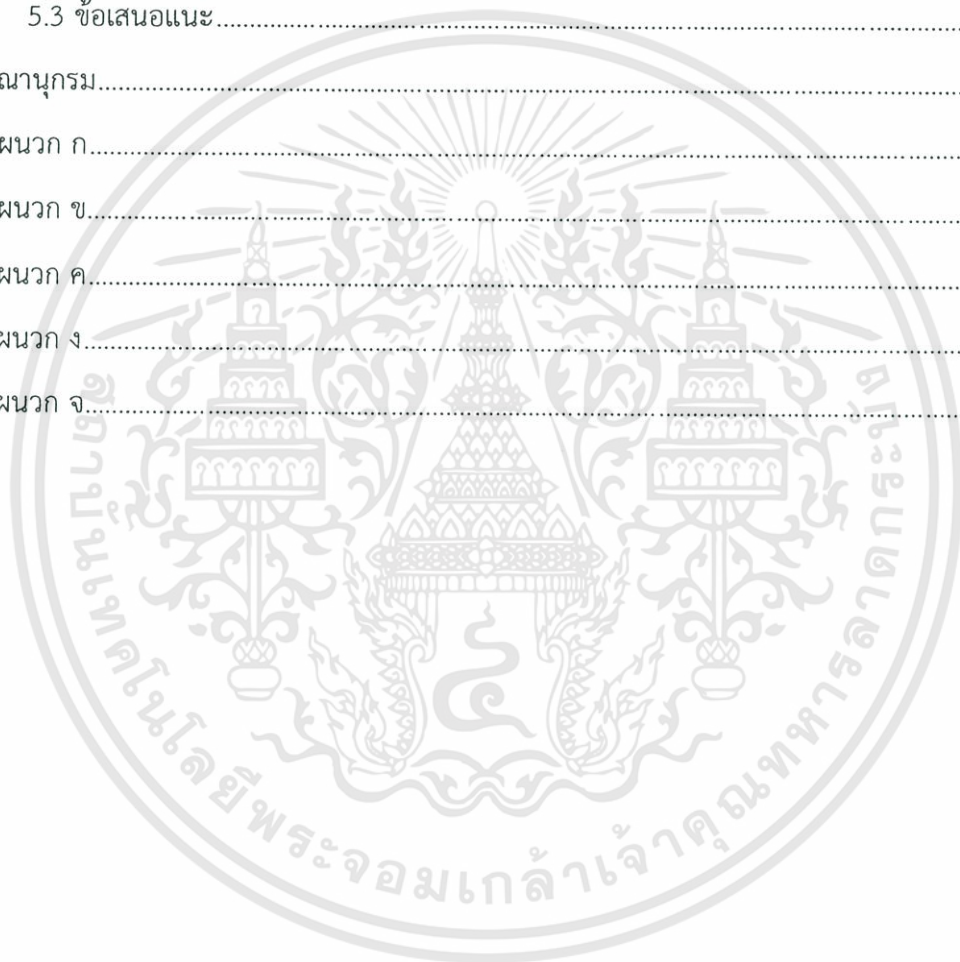
หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญรูป.....	V
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมติฐานของปัญหา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	2
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....	2
บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.2 กลศาสตร์ของ Segway.....	7
2.3 ทฤษฎีของ Inverted Pendulum.....	9
2.4 ทฤษฎีของมอเตอร์กระแสตรง.....	17
2.5 ทฤษฎีการควบคุมอัตโนมัติ.....	21
2.5.1 ประวัติความเป็นมาและพัฒนาการของระบบควบคุม.....	21
2.5.2 ความหมายและคำนิยามของระบบควบคุม.....	22
2.5.3 รูปแบบของการควบคุม.....	22
2.5.3.1 ระบบควบคุมแบบวงรอบเปิด (Open Loop Control).....	22
2.5.3.2 ระบบควบคุมแบบวงรอบปิด (Closed Loop Control).....	23
2.5.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ.....	24
2.5.4.1 การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Modeling).....	24
2.5.4.2 ฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer Function).....	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.5	ข้อกำหนดคุณลักษณะของผลตอบสนองเชิงเวลา.....	25
2.5.5.1	กลุ่มของข้อกำหนดคุณลักษณะ.....	25
2.5.5.2	ข้อกำหนดคุณลักษณะของผลตอบสนองในสภาวะชั่วคราว.....	26
2.5.6	ตัวควบคุมแบบพีไอดี.....	26
2.5.6.1	ตัวควบคุมแบบสัดส่วน.....	27
2.5.6.2	ตัวควบคุมแบบปริพันธ์.....	27
2.5.6.3	ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์.....	28
2.6	โครงสร้างการทำงานของ Segway.....	30
2.7	ต้นแบบของการสร้าง Segway.....	30
2.7.1	ปัญหาที่เกิดขึ้นกับหุ่นยนต์ขับเคลื่อนสองล้อสมดุด้วยตัวเอง.....	31
2.7.1.1	ปัญหาทางด้านโครงสร้าง.....	31
2.7.1.2	ปัญหาทางด้านอิเล็กทรอนิกส์.....	31
บทที่ 3	วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้าง Segway.....	33
3.1	แผ่นอลูมิเนียม.....	33
3.2	ล้อขับเคลื่อน.....	33
3.3	มอเตอร์กระแสตรง.....	34
3.4	แบตเตอรี่.....	34
3.5	บอร์ดควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์.....	35
3.6	บอร์ดควบคุมมอเตอร์.....	35
3.7	เซนเซอร์แอกเซลเลอโรมิเตอร์.....	36
3.8	การพัฒนาของ Segway จากหุ่นยนต์ต้นแบบ.....	37
3.8.1	ทางด้านโครงสร้างของ Segway.....	37
3.8.2	ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์.....	38
3.9	การติดตั้งล้อและมอเตอร์ของ Segway.....	39
3.10	การติดตั้งอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์.....	40
3.11	การติดตั้งโครงสร้างของ Segway.....	40
3.12	การใช้งาน Segway.....	41

บทที่ 4 รูปแบบและผลการทดลอง.....	43
4.1 รูปแบบการทดลอง.....	43
4.2 วิธีการทดลอง.....	43
4.3 ผลการทดลอง.....	43
บทที่ 5 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง.....	46
5.1 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง.....	46
5.2 ปัญหาที่เกิดขึ้นในขณะทำการทดลอง.....	46
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	47
บรรณานุกรม.....	48
ภาคผนวก ก.....	50
ภาคผนวก ข.....	51
ภาคผนวก ค.....	55
ภาคผนวก ง.....	56
ภาคผนวก จ.....	58



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ยานพาหนะขับเคลื่อนสองล้อ Segway.....	1
2.1 งานวิจัยของ Khalil Sultan เรื่อง Inverted Pendulum.....	4
2.2 หุ่นยนต์ขับเคลื่อนสองล้อสมดุลด้วยตัวเอง.....	5
2.3 รถสกู๊ตเตอร์สองล้อ EDGAR	6
2.4 หนังสือ Arduino Robotics.....	6
2.5 แสดงการวิเคราะห์แรงที่กระทำต่อ Segway.....	7
2.6 ระบบ Inverted Pendulum.....	9
2.7 แผนภาพวัตถุอิสระ (FBD) ของระบบ Inverted Pendulum.....	10
2.8 แผนภาพวัตถุอิสระของตัวรถสองล้อ.....	10
2.9 แผนภาพวัตถุอิสระของ Pendulum	11
2.10 แผนภาพมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	17
2.11 แผนภาพระบบเชิงกลแบบหมุน.....	19
2.12 ส่วนประกอบของระบบควบคุม.....	22
2.13 ระบบควบคุมแบบวงรอบเปิด.....	22
2.14 ระบบควบคุมแบบวงรอบปิด.....	23
2.15 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ.....	23
2.16 ฟังก์ชันถ่ายโอน.....	25
2.17 ผลตอบสนองของระบบควบคุม.....	25
2.18 ตัวควบคุมแบบพี.....	27
2.19 ตัวควบคุมแบบไอ.....	28
2.20 ตัวควบคุมแบบดี.....	28
2.21 ผลตอบสนองจากการนำเอาตัวควบคุมพีไอดีแบบต่างๆ ไปใช้กับระบบหลายๆแบบ.....	29
2.22 แสดงรูปแบบการทำงานของ Segway.....	30
2.23 หุ่นยนต์ขับเคลื่อนสองล้อสมดุลด้วยตัวเอง.....	30
2.24 ปัญหาที่เกิดขึ้นกับหุ่นยนต์ขับเคลื่อนสองล้อสมดุลด้วยตัวเอง.....	31
2.25 ปัญหาการต่อสายไฟฟ้ากับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์.....	31

2.26 ปัญหาการวางตำแหน่งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ไม่ดี.....	32
3.1 แผ่นลูนีเยียมเกรดหนา.....	33
3.2 ล้อ Segway.....	33
3.3 มอเตอร์กระแสตรง.....	34
3.4 แบตเตอรี่.....	34
3.5 บอร์ดควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mega ADK R3.....	35
3.6 บอร์ดควบคุมมอเตอร์.....	35
3.7 เซนเซอร์แอกเซลเลอโรมิเตอร์.....	36
3.8 ปัญหาที่เกิดกับโครงสร้างของ Segway.....	37
3.9 การแก้ปัญหาที่เกิดกับโครงสร้างของ Segway.....	37
3.10 ปัญหาทางอิเล็กทรอนิกส์ของหุ่นยนต์.....	38
3.11 การวางอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อย่างเหมาะสม.....	38
3.12 การต่อสายไฟที่เป็นระเบียบเรียบร้อย.....	39
3.13 การติดตั้งมอเตอร์และล้อ.....	39
3.14 การติดตั้งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์.....	40
3.15 การติดตั้งโครงสร้างของอุปกรณ์ทั้งหมด.....	40
3.16 Segway ที่ได้ทำการประกอบเรียบร้อยแล้ว.....	41
3.17 จุดเชื่อมต่อเพื่อ upload โปรแกรมการทำงานให้กับ Segway.....	41
3.18 สวิตช์ที่ใช้ในการเปิดเครื่องและชาร์จไฟของ Segway.....	42
3.19 สวิตช์ฉุกเฉิน.....	42
4.1 แผนภาพ Block Diagram ของระบบ Inverted Pendulum.....	43
4.2 แสดงผลการตอบสนองของระบบ Inverted Pendulum.....	44
4.3 แสดงกราฟการตอบสนองเมื่อเทียบกับ Step input ของระบบ Inverted Pendulum.....	44
4.4 แสดงค่าการตอบสนองของระบบ Inverted Pendulum.....	45
4.5 แสดงกราฟค่ามุม Input กับ เวลาที่ได้จากการทดลอง.....	45

บทที่ 1

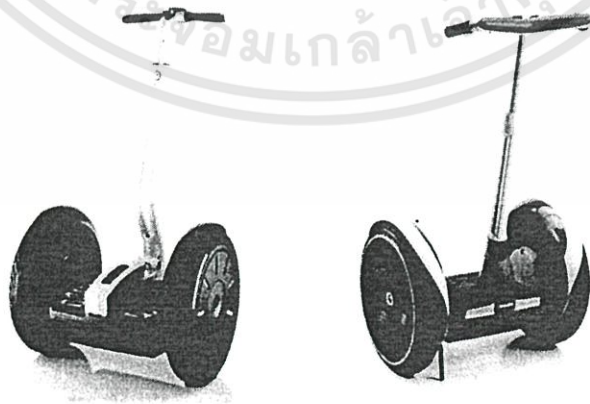
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ยานพาหนะสองล้อขับเคลื่อนส่วนบุคคลหรือที่เรียกว่า Segway นั้นถูกประดิษฐ์คิดค้นโดย Dean Kamen ชาวอเมริกัน ซึ่งถือได้ว่าเป็นนวัตกรรมใหม่ซึ่งคาดว่าจะเข้ามาแทนที่รถยนต์ในอนาคตอันจะทำให้เกิดการปฏิวัติด้านการคมนาคมในเมืองหลวงครั้งใหญ่และอาจจะเป็นนวัตกรรมสำคัญยิ่งกว่าอินเทอร์เน็ตที่เคยปฏิวัติระบบการสื่อสารของชาวโลกมาก่อนหน้านี้

Dean Kamen ได้ประดิษฐ์นวัตกรรมด้านยานยนต์นี้ โดยมีรูปทรงคล้ายคลึงกับเครื่องตัดหญ้า ซึ่งติดตั้งเครื่องยนต์โรตารีผสมผสานกับสปีดเตอร์ สามารถเคลื่อนที่เดินหน้า ถอยหลัง เลี้ยวซ้ายเลี้ยวขวา หมุนตัวและหยุดโดยไม่ต้องพึ่งพาเครื่องยนต์ เกียร์ พวงมาลัย และเบรก โดยอาศัยแหล่งกำเนิดพลังงานจากกระแสไฟฟ้าจากแบตเตอรี่จึงไม่ก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศเหมือนกับควีนพิษจากรถยนต์ [8]

เนื่องจากว่า Segway เป็นยานพาหนะขับเคลื่อนสองล้อซึ่งสามารถนำมาใช้ได้ในชีวิตประจำวัน ดังนั้นสิ่งที่น่าสนใจสำหรับการทำโครงการนี้ก็คือการเขียนโปรแกรมและออกแบบระบบควบคุมให้กับ Segway ตลอดจนการออกแบบโครงสร้างของ Segway อย่างไรเพื่อที่จะทำให้ Segway นั้นสามารถที่จะทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและมีการตอบสนองตามที่ต้องการโดยไม่ก่อให้เกิดอันตรายกับผู้ใช้งาน ซึ่งในการที่จะสร้าง Segway ขึ้นมาใช้งานนั้นจะต้องมีการวางแผนการทำงานอย่างรัดกุม ตลอดจนการเลือกใช้วัสดุอุปกรณ์ต่างๆจะต้องล้วนแต่มีคุณภาพเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดตลอดจนเพื่อให้เกิดความปลอดภัยต่อผู้ใช้งานอีกด้วย



รูปที่ 1.1 ยานพาหนะขับเคลื่อนสองล้อ Segway

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

โครงการนี้มีความมุ่งหมายที่จะสร้าง Segway ที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อนและมีต้นทุนที่ไม่สูงมากนักให้สามารถทำงานได้จริงอย่างมีประสิทธิภาพและมีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะนำ Segway ที่สร้างขึ้นนี้ไปใช้ในการเรียนการสอนวิชาการควบคุมอัตโนมัติต่อไปเพื่อให้ผู้ที่ศึกษาในวิชานี้เกิดความเข้าใจในเนื้อหาวิชาและสามารถที่จะมองเห็นถึงการประยุกต์ใช้ความรู้ที่ได้ศึกษามาชัดเจนมากยิ่งขึ้น

1.3 สมมติฐานของปัญหา

เมื่อทำการเขียนโปรแกรมควบคุมการทำงานของ Segway อย่างสมบูรณ์แล้วจะสามารถควบคุมการทำงานและผลตอบสนองของ Segway ได้ โดยจะมีการใช้ตัวควบคุมแบบ PID ที่ได้ทำการออกแบบไว้มาช่วยเพื่อทำให้เกิดประสิทธิภาพในการตอบสนองมากขึ้น

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

1. การออกแบบโครงสร้าง Segway และการเลือกใช้ อุปกรณ์ได้อย่างเหมาะสม
2. การออกแบบระบบควบคุมให้กับมอเตอร์ เซนเซอร์ และ Segway
3. ทฤษฎีของ Inverted Pendulum
4. ทฤษฎีการควบคุมอัตโนมัติ
5. ทฤษฎีและหลักการทางานมอเตอร์กระแสตรง

1.5 ขอบเขตการวิจัย

สามารถทำยานพาหนะสองล้อที่เรียกว่า Segway ออกมาใช้งานได้โดยมีลักษณะการทำงานที่ใกล้เคียงกับของจริง

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

1. เรียนรู้ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง เช่น ทฤษฎีของ Inverted Pendulum ทฤษฎีการควบคุมอัตโนมัติ และทฤษฎีมอเตอร์กระแสตรง เป็นต้น
2. ออกแบบโครงสร้างของ Segway และจัดเตรียมอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องอาทิ มอเตอร์ เซนเซอร์ และบอร์ดควบคุม เป็นต้น
3. ศึกษาอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องอาทิ มอเตอร์ เซนเซอร์ และบอร์ดควบคุมว่ามีคุณลักษณะและการทำงานเป็นอย่างไร

4. ทำการออกแบบระบบควบคุมและเขียนโปรแกรมในการควบคุมการทำงานของอุปกรณ์อาทิ มอเตอร์ เซนเซอร์ เพื่อให้ Segway สามารถทำงานได้
5. ทำการ Simulation และปรับค่าต่างๆของ Segway เพื่อเก็บและรวบรวมข้อมูลไปใช้ในการวิเคราะห์แล้วนำไปแก้ไขเพื่อให้ระบบให้มีประสิทธิภาพดียิ่งขึ้น



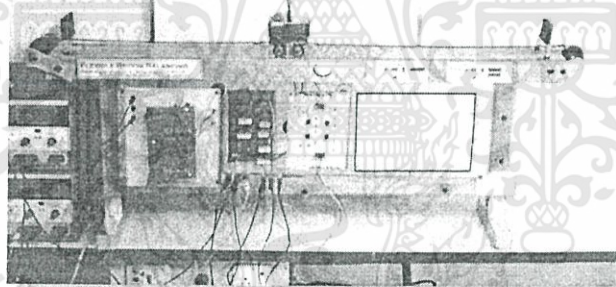
บทที่ 2

งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทำ Segway นั้นจะมีอยู่มากมาย ไม่ว่าจะเป็นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ Inverted Pendulum และการสร้างหุ่นยนต์ขับเคลื่อนสองล้อที่สมดุลด้วยตัวเอง (Two-wheeled balancing robot) ดังนั้นในส่วนนี้จะกล่าวถึงเฉพาะงานวิจัยที่นำมาใช้ในการศึกษาและสร้าง Segway เท่านั้น โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. งานวิจัยของ Khalil Sultan, the Instrumentation and Control Lab at the Institute of Industrial Electronics Engineering, Karachi, Pakistan

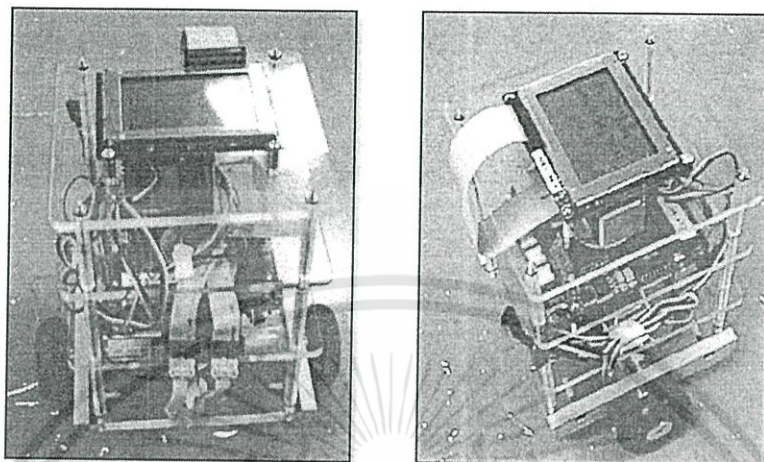


รูปที่ 2.1 งานวิจัยของ Khalil Sultan เรื่อง Inverted Pendulum

ในงานวิจัยนี้จะมีการกล่าวถึงตั้งแต่พื้นฐานของระบบ Inverted Pendulum จนพัฒนาการมาเป็นการหาวิธีการที่จะควบคุมการทำงานของระบบ Inverted Pendulum จากนั้นจะเป็นการวิเคราะห์ทางกลศาสตร์เพื่อหาสมการของระบบอันจะเป็นประโยชน์ต่อการออกแบบตัวควบคุมแบบ PID เพื่อใช้เป็นแนวทางในการที่จะควบคุมผลตอบสนองของระบบ Inverted Pendulum ต่อไป นอกจากนี้ยังมีการแสดงถึงวิธีการใช้โปรแกรม MATLAB ที่ช่วยในการออกแบบตัวควบคุมแบบ PID ให้ง่ายขึ้นอีกด้วย [7]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. งานปริญญาานิพนธ์ของ Rich Chi Ooi, University of Western Australia, School of Mechanical engineering เรื่อง “Balancing a Two-Wheeled Autonomous Robot”



รูปที่ 2.2 หุ่นยนต์ขับเคลื่อนสองล้อสมดุลด้วยตัวเอง

เป็นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสร้างหุ่นยนต์ขับเคลื่อนสองล้อที่สมดุลด้วยตนเอง ซึ่งได้กล่าวถึงทฤษฎีและขั้นตอนตลอดจนอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยรวมถึงมีการกล่าวถึงการออกแบบตัวควบคุมเพื่อใช้ในการสร้างเสถียรภาพให้กับหุ่นยนต์ขับเคลื่อนสองล้อสมดุลด้วยตัวเองพร้อมทั้งผลการวิเคราะห์ที่เกิดขึ้นจากการทดลองอีกด้วย [10]

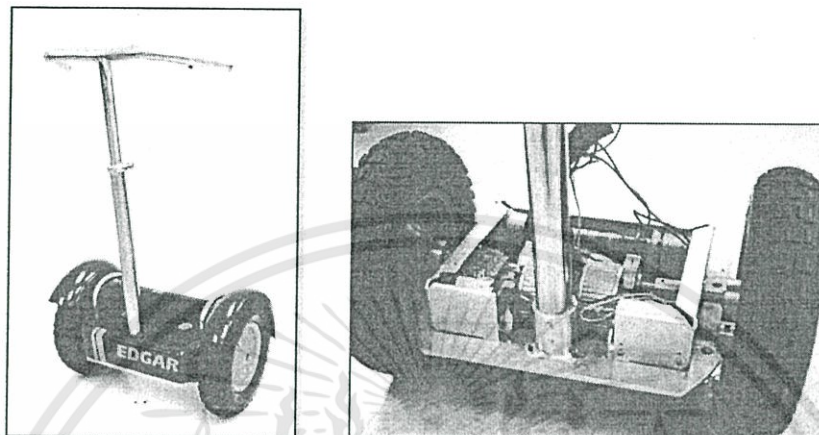
3.งานปริญญาานิพนธ์ของ Ayça GÖÇMEN, THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF ATILIM UNIVERSITY เรื่อง “DESIGN OF TWO WHEELED ELECTRIC VEHICLE”

เป็นปริญญาานิพนธ์ที่จัดทำขึ้นเพื่อที่จะทำการออกแบบและสร้างยานพาหนะขับเคลื่อนสองล้อ โดยมีการกล่าวนำตั้งแต่วิธีการคิด และกระบวนการต่างๆที่จะนำไปสู่การสร้างเป็นยานพาหนะจริงคือการเลือกใช้อุปกรณ์ การคำนวณค่าต่างๆรวมถึงการทดลองและการสร้างแบบจำลองเพื่อหาตัวควบคุมที่เหมาะสมอีกด้วย [1]

4. งานปริญญาานิพนธ์ของ M. A. Clark, J. B. Field, S. G. McMahon และ P. S. Philips, University of Adelaide, Faculty of Engineering, Computer & Mathematical Sciences, School of Mechanical Engineering เรื่อง “EDGAR, A Self-Balancing Scooter”

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

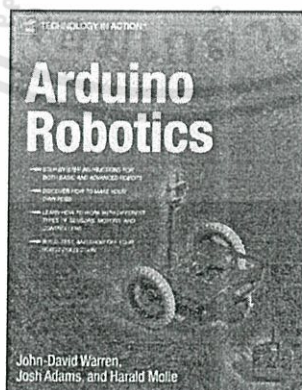
โดยในงานวิจัยนี้จะเป็นการสร้างรถสกู๊ตเตอร์ สองล้อที่มีลักษณะคล้ายคลึงกับ Segway มาก และมีการกล่าวถึงขั้นตอนและกระบวนการในการทำตั้งแต่การออกแบบโครงสร้างจนถึงการออกแบบระบบควบคุมและการคำสั่งโปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของสกู๊ตเตอร์สองล้อด้วย [8]



รูปที่ 2.3 รถสกู๊ตเตอร์สองล้อ EDGAR

2.1.4 หนังสือ “Arduino Robotics” ซึ่งเขียนโดย John-David Warren โดยเนื้อหาภายในเล่มจะกล่าวถึงขั้นตอนการทำ การเตรียมอุปกรณ์ตลอดจนโปรแกรมที่ใช้เขียนเพื่อควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์แบบต่างๆ ซึ่งในส่วนของโครงงานนี้ได้มีการนำเนื้อหาในส่วนของหุ่นยนต์ Seg-Bot มาประยุกต์ใช้ในการสร้าง Segway ด้วยเนื่องจากมีลักษณะที่คล้ายคลึงกันมาก

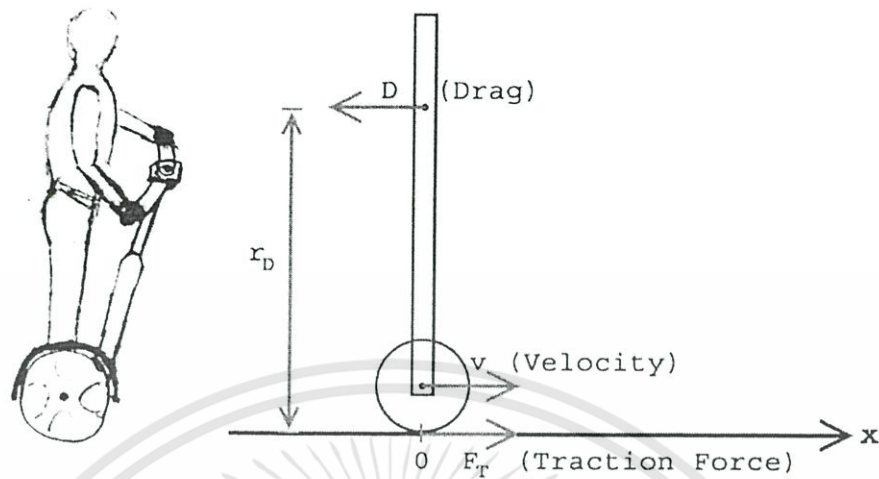
ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าหนังสือเล่มนี้ถือว่ามีบทบาทสำคัญในการทำโครงงานนี้เป็นอย่างมาก เนื่องจากการเลือกอุปกรณ์ตลอดจนโปรแกรมที่นำมาใช้ในการควบคุมการทำงานของ Segway นั้นก็ได้ประยุกต์มาจากหนังสือเล่มนี้ [6]



รูปที่ 2.4 หนังสือ Arduino Robotics

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 กลศาสตร์ของ Segway



รูปที่ 2.5 แสดงการวิเคราะห์แรงที่กระทำต่อ Segway

ในส่วนต่อไปนี้จะกล่าวถึงกลศาสตร์ของ Segway นั่นคือการพิจารณาแรงที่กระทำกับ Segway ซึ่งส่วนนี้เองที่จะมีความสำคัญต่อการเลือกใช้มอเตอร์โดยรายละเอียดมีดังนี้

จากรูปที่ 2.5 จะเห็นว่าแรงขับเคลื่อน (F_T) จะเป็นแรงรวมทั้งหมดที่เกิดจากแรงต่างๆที่กระทำกับ Segway ซึ่งประกอบไปด้วย

2.2.1. แรงที่กระทำเนื่องจากอากาศ (Aerodynamics Force)

$$F_{air} = \frac{1}{2} \rho v^2 A C_D \quad (2.1)$$

เมื่อ ρ คือความหนาแน่นของอากาศที่ระดับน้ำทะเลซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.225 kg/m^3

v คือความเร็วสูงสุดของ Segway มีหน่วยเป็น เมตรต่อวินาที (m/s)

A คือพื้นที่ผิวปะทะด้านหน้าของสเกเวียร์รวมกับคนขี่ (Frontal surface area) มีหน่วยเป็น ตารางเมตร (m^2)

C_D คือสัมประสิทธิ์การดูด สำหรับ Segway มีค่าเท่ากับ 1.5

หมายเหตุ

สำหรับ Segway พื้นที่ผิวปะทะด้านหน้า (A_{Front}) คือ 0.2 m^2

สำหรับคนขี่ (FSA) ต้องอาศัยสมการของ Mosteller Formula ดังนี้

$$BSA = \sqrt{\frac{h \cdot m}{3600}} \quad (2.2)$$

เมื่อ BSA คือ พื้นที่ผิวปะทะด้านหลังมีหน่วยเป็นตารางเมตร (m^2)

h คือ ความสูงของคนขี่มีหน่วยเป็นเซนติเมตร (cm)

m คือน้ำหนักของคนขี่มีหน่วยเป็นกิโลกรัม (kg)

และ

$$FSA = \frac{2}{5} BSA \quad (2.3)$$

2.2.2 แรงเนื่องจากความเสียดทาน (Frictional Force)

$$F_{Roll} = C_R mg \quad (2.4)$$

เมื่อ C_R คือ Rolling Resistance coefficient สำหรับ Radial-ply passenger tire ซึ่งใช้คำนวณสำหรับ Segway โดยมีสมการดังนี้

$$C_R = 0.0136 + 0.04 \cdot 10^{-6} (v \cdot 3.6)^2 \quad (2.5)$$

2.2.3 แรงเนื่องจากความลาดชัน (Incline Force)

$$F_{Slope} = \sin(s)mg \quad (2.6)$$

เมื่อ s คือ ความชันของพื้นผิวเอียง มีหน่วยเป็นเรเดียน (rad)

m คือ มวลรวมทั้งหมด มีหน่วยเป็นกิโลกรัม (kg)

g เป็นค่าคงที่ของแรงโน้มถ่วงของโลกมีค่าเท่ากับ 9.81 m/s^2

ดังนั้นเมื่อทำการแทนค่าตัวแปรต่างๆลงในสมการที่กล่าวมาข้างต้นจะได้ว่า

$$F_{air} = 31.24N, F_{Friction} = 19.23N \text{ และ } F_{Slope} = 12.55N$$

และจะได้แรงรวมทั้งหมดเป็นดังนี้

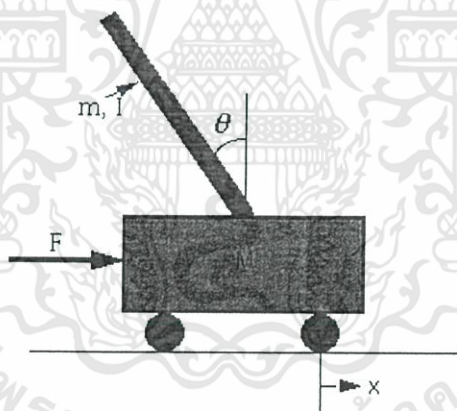
$$F_{total} = 63.02N$$

ซึ่งค่าแรงรวมนี้จะนำไปใช้ในการหาค่าขนาดของมอเตอร์นั้นคือจากการคำนวณจะได้กำลังของมอเตอร์อยู่ที่ 350.39 วัตต์แต่เลือกใช้จริงอยู่ที่ 500 วัตต์

2.3 ทฤษฎีของ Inverted Pendulum

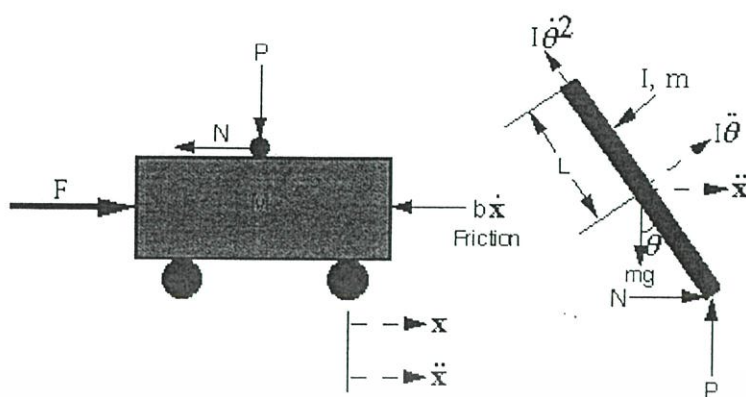
การที่จะพยายามทำให้ด้ามไม้กวาดสามารถที่จะทรงตัวอยู่ได้บนนิ้วหรือบนฝ่ามือนั้นจะต้องทำการเปลี่ยนตำแหน่งของนิ้วหรือฝ่ามืออย่างรวดเร็วเพื่อให้สามารถควบคุมการทรงตัวของด้ามไม้กวาดได้ซึ่งลักษณะเหล่านี้คล้ายกับระบบทางกลหนึ่งๆที่เรียกว่า “Inverted Pendulum” โดยที่ระบบทางกลดังกล่าวจัดได้ว่าเป็นระบบทางกลที่ไม่มีเสถียรภาพโดยธรรมชาติ

ดังนั้นการออกแบบระบบควบคุมจึงถือเป็นปัจจัยสำคัญในการที่จะนำมาใช้เพื่อควบคุมการทำงานของระบบ Inverted Pendulum ให้มีเสถียรภาพหรือสามารถที่จะทรงตัวอยู่ได้อย่างสมดุลโดยไม่มีระบบ Inverted Pendulum นั้นจะประกอบด้วย 2 ส่วนหลักๆด้วยกันคือ ส่วนที่เป็นด้ามจับหรือ Pendulum กับส่วนที่เป็นตัวรถสองล้อ (Cart) โดยทั่วไปแล้วระบบ Inverted Pendulum จัดว่าเป็นระบบทางกลที่สามารถพบเจอได้ในหนังสือหรืองานวิจัยเกี่ยวกับการควบคุมอัตโนมัติซึ่งถือว่าเป็นระบบทางกลพื้นฐานที่สุดสำหรับการออกแบบระบบควบคุมอัตโนมัติเลยก็ว่าได้ ในส่วนต่อไปจะเป็นการกล่าวถึงการพิสูจน์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ Inverted Pendulum ซึ่งสามารถนำมาใช้อธิบายเกี่ยวกับคุณลักษณะทางพลวัตของระบบได้ และจากรูปข้างล่างนี้แสดงระบบ Inverted Pendulum



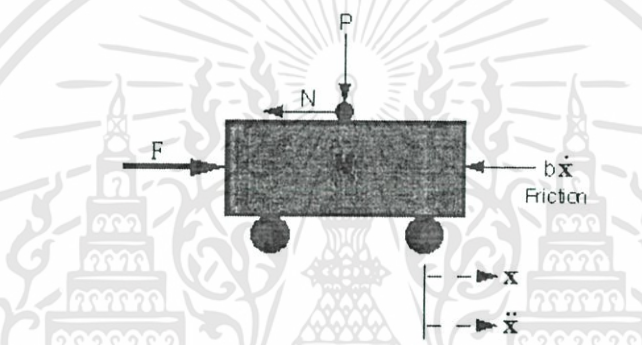
รูปที่ 2.6 ระบบ Inverted Pendulum

ในส่วนตัวต่อมาจะแสดงแผนภาพวัตถุอิสระสำหรับระบบ Inverted Pendulum ในส่วนของตัว Pendulum และในส่วนของตัวรถสองล้อ



รูปที่ 2.7 แผนภาพวัตถุอิสระ (FBD) ของระบบ Inverted Pendulum

1. ส่วนของตัวรถสองล้อ



รูปที่ 2.8 แผนภาพวัตถุอิสระของตัวรถสองล้อ

จากกฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน เมื่อพิจารณาในแนวแกน X จะได้ว่า

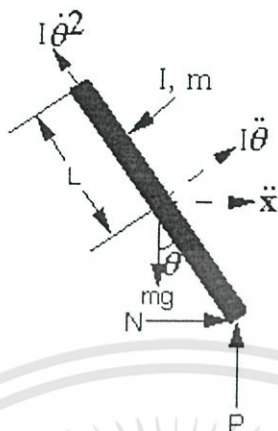
$$\sum F_x = M\ddot{x} \tag{2.7}$$

$$F - N - b\dot{x} = M\ddot{x}$$

$$M\ddot{x} + b\dot{x} + N = F \tag{2.8}$$

เนื่องจากในแนวแกน Y ไม่มีการเคลื่อนที่ดังนั้นจึงไม่พิจารณาหรืออาจจะกล่าวได้ว่าแรงในแนวนี้มีความสมดุลเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกอยู่แล้ว

2. ส่วนที่เป็นด้ามจับ Pendulum



รูปที่ 2.9 แผนภาพวัตถุอิสระของ Pendulum

เนื่องจาก Pendulum จะเกิดการหมุน ดังนั้นจึงมีแรงที่เกิดจากโมเมนต์กระทำต่อตัว Pendulum ในทิศทางที่ตั้งฉากกับ Pendulum ดังนี้

$$T = r \cdot F = I \ddot{\theta} \quad (2.9)$$

$$F = \frac{I \ddot{\theta}}{r}$$

$$F = \frac{ml^2 \ddot{\theta}}{l}$$

หรือ

$$F = ml \ddot{\theta} \quad (2.10)$$

เมื่อ โมเมนต์ความเฉื่อยของ Pendulum (I) มีค่าเท่ากับ ml^2 เพราะฉะนั้นจะได้แรงเนื่องจากโมเมนต์ในทิศทางตามแนวแกน X ดังนี้

$$F = ml \ddot{\theta} \cos \theta \quad (2.11)$$

นอกจากวัตถุที่มีการหมุนจะเกิดโมเมนต์แล้วยังเกิดแรงสู่ศูนย์กลางอีกด้วยดังนี้

$$F = \frac{mv^2}{r} \quad (2.12)$$

$$F = \frac{m(\omega r)^2}{r}$$

$$F = m\dot{\theta}^2 r$$

หรือ

$$F = m\dot{\theta}^2 l \quad (2.13)$$

เพราะฉะนั้นแรงสู่ศูนย์กลางในแนวแกน X จะได้ดังนี้

$$F = m\dot{\theta}^2 l \sin \theta \quad (2.14)$$

ดังนั้นจากกฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน เมื่อพิจารณาในแนวแกน X จะได้ว่า

$$\sum F_x = m\ddot{x}$$

$$N + ml\dot{\theta}^2 \sin \theta - ml\ddot{\theta} \cos \theta = m\ddot{x}$$

หรือ

$$N = m\ddot{x} + ml\ddot{\theta} \cos \theta - ml\dot{\theta}^2 \sin \theta \quad (2.15)$$

แทนสมการที่ (2.15) ลงในสมการที่ (2.8) จะได้ว่า

$$M\ddot{x} + b\dot{x} + m\ddot{x} + ml\ddot{\theta} \cos \theta - ml\dot{\theta}^2 \sin \theta = F$$

หรือ

$$(M + m)\ddot{x} + b\dot{x} + ml\ddot{\theta} \cos \theta - ml\dot{\theta}^2 \sin \theta = F \quad (2.16)$$

สมการที่ (2.16) นี้เป็นสมการแรกที่ได้จากการวิเคราะห์ระบบ Inverted Pendulum ซึ่งการที่จะหาฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ Inverted Pendulum นั้นจำเป็นที่จะต้องหาสมการอีกหนึ่งสมการโดยจะสามารถพิจารณาได้ในแนวแกนที่ตั้งฉากกับ Pendulum ซึ่งจะได้สมการดังนี้

$$P \sin \theta + N \cos \theta - mgl \sin \theta = ml\ddot{\theta} + m\ddot{x} \cos \theta \quad (2.17)$$

จากนั้นทำการ Take moment รอบจุดศูนย์กลางของ Pendulum จะได้สมการดังนี้

$$\sum M = I\ddot{\theta} \quad (2.18)$$

$$-Pl \sin \theta - Nl \cos \theta = I\ddot{\theta}$$

$$-l(P \sin \theta + N \cos \theta) = I \ddot{\theta}$$

หรือ

$$P \sin \theta + N \cos \theta = -\frac{I \ddot{\theta}}{l} \quad (2.19)$$

นำสมการที่ (2.19) แทนลงในสมการที่ (2.17) จะได้ว่า

$$-\frac{I \ddot{\theta}}{l} - mg \sin \theta = ml \ddot{\theta} + m \ddot{x} \cos \theta$$

$$-I \ddot{\theta} - mgl \sin \theta = ml^2 \ddot{\theta} + ml \ddot{x} \cos \theta$$

หรือ

$$(I + ml^2) \ddot{\theta} + mgl \sin \theta = -ml \ddot{x} \cos \theta \quad (2.20)$$

สมการที่ (2.20) นี้เป็นสมการที่สองที่ได้จากการวิเคราะห์ระบบ Inverted Pendulum ดังนั้นสรุปแล้วเราจะได้สมการ 2 สมการที่สามารถอธิบายลักษณะทางพลวัตของระบบ Inverted Pendulum ได้ นั่นคือ

$$(M + m) \ddot{x} + b \dot{x} + ml \ddot{\theta} \cos \theta - ml \dot{\theta}^2 \sin \theta = F \quad (2.16)$$

และ

$$(I + ml^2) \ddot{\theta} + mgl \sin \theta = -ml \ddot{x} \cos \theta \quad (2.20)$$

จากสมการที่ (2.16) และ (2.20) จะเห็นว่าเป็นสมการที่อยู่ในรูปไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Equations) ดังนั้นเพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์จึงจำเป็นต้องตั้งสมมติฐานขึ้นมาเพื่อใช้ในการสร้างสมการที่จะสามารถนำมาใช้ในการทำให้สมการที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Equations) นั้นกลายเป็นสมการที่เป็นเชิงเส้น (Linear Equations) ได้ โดยข้อตั้งสมมติฐานจะกล่าวไว้ดังนี้

1. เมื่ออยู่ในตำแหน่งซึ่งตั้งตรงในแนวตั้งจะให้มุมในแนวตั้งนี้มีค่าเท่ากับ π นั่นคือ $\theta = \pi$
2. สมมติว่ามุมที่เบี่ยงเบนไปของ Pendulum จากตำแหน่งสมมูลมีค่าไม่เกิน 20°
3. ให้ ϕ เป็นมุมที่เปลี่ยนแปลงของ Pendulum จากสภาวะสมมูลซึ่งมีค่าน้อยมากๆ จะได้ว่า $\theta = \pi + \phi$

ดังนั้นจากข้อสมมติฐานดังกล่าวจะได้สมการดังต่อไปนี้

$$\cos \theta = \cos(\pi + \phi) \approx -1 \quad (2.21)$$

$$\sin \theta = \sin(\pi + \phi) \approx -\phi \quad (2.22)$$

และ
$$\sin^2 \theta + \cos^2 \theta = 1$$

หรือ
$$\dot{\theta}^2 = \dot{\phi}^2 \approx 0$$

(2.23)

นำสมการที่ (2.21) (2.22) และ (2.23) แทนลงในสมการที่ (2.16) และ (2.20) จะได้

$$(M + m)\ddot{x} + b\dot{x} - ml\ddot{\phi} = F \quad (2.24)$$

และ
$$(I + ml^2)\ddot{\phi} - mgl\phi = ml\ddot{x} \quad (2.25)$$

จากนั้นทำการ Laplace Transformation สมการที่ (2.24) และ (2.25) โดยกำหนดให้สภาวะเริ่มต้น (Initial Condition) มีค่าเท่ากับศูนย์ จะได้

$$(M + m)X(s)s^2 + bX(s) - ml\Phi(s)s^2 = F(s) \quad (2.26)$$

$$(I + ml^2)\Phi(s)s^2 - mgl\Phi(s) = mlX(s)s^2 \quad (2.27)$$

จากสมการที่ (2.27) จัดรูปใหม่จะได้

$$X(s) = \frac{(I + ml^2)\Phi(s)s^2}{mls^2} - \frac{mgl\Phi(s)}{mls^2}$$

หรือ
$$X(s) = \left[\frac{I + ml^2}{ml} - \frac{g}{s^2} \right] \Phi(s) \quad (2.28)$$

แทนสมการที่ (2.28) ลงในสมการที่ (2.26) จะได้

$$(M + m) \left[\frac{I + ml^2}{ml} - \frac{g}{s^2} \right] \Phi(s)s^2 + b \left[\frac{I + ml^2}{ml} - \frac{g}{s^2} \right] \Phi(s) - ml\Phi(s)s^2 = F(s) \quad (2.29)$$

ดังนั้นเมื่อทำการจัดรูปใหม่จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบดังนี้

$$\frac{\Phi(s)}{F(s)} = \frac{\frac{ml}{q} s^2}{s^4 + \frac{b(I+ml^2)}{q} s^3 - \frac{mgl(M+m)}{q} s^2 - \frac{bmgl}{q} s}$$

เมื่อ $q = (M+m)(I+ml^2) - (ml)^2$

หรือ
$$\frac{\Phi(s)}{F(s)} = \frac{\frac{ml}{q} s}{s^3 + \frac{b(I+ml^2)}{q} s^2 - \frac{mgl(M+m)}{q} s - \frac{bmgl}{q}} \quad (2.30)$$

สมการที่ (2.28) นี้เป็นฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบที่อยู่ในรูปของมุมที่เปลี่ยนไปของ Pendulum ต่อแรงที่กระทำต่อ Cart แต่สำหรับกรณีนี้ต้องการฟังก์ชันถ่ายโอนที่อยู่ในรูปของมุมที่เปลี่ยนไปของ Pendulum ต่อทอร์ค เนื่องจากว่าเราจะใช้ทอร์คเป็นตัวเชื่อมต่อระหว่างระบบ Inverted Pendulum กับตัวขับเคลื่อนซึ่งก็คือมอเตอร์กระแสตรงซึ่งเป็นตัวทำให้เกิดทอร์คและมากระทำต่อ Cart นั่นเอง ดังนั้นสมการที่ (2.30) จึงสามารถกำหนดให้อยู่ในรูปของมุมที่เปลี่ยนไปของ Pendulum ต่อทอร์ค ได้ดังนี้

$$\frac{\Phi(s)}{T(s)} = \frac{\frac{ml}{q} s}{s^3 + \frac{b(I+ml^2)}{q} s^2 - \frac{mgl(M+m)}{q} s - \frac{bmgl}{q}} \left(\frac{1}{r}\right) \quad (2.31)$$

และเมื่อไม่พิจารณาผลเนื่องจากความเสียดทานที่เกิดขึ้นฟังก์ชันถ่ายโอนจะอยู่ในรูปต่อไปนี้

$$\frac{\Phi(s)}{T(s)} = \frac{\frac{ml}{q} s}{s^3 - \frac{mgl(M+m)}{q} s} \left(\frac{1}{r}\right)$$

หรือ
$$\frac{\Phi(s)}{T(s)} = \frac{\frac{ml}{q}}{s^2 - \frac{mgl(M+m)}{q}} \left(\frac{1}{r}\right)$$

(2.32)

เมื่อ r เป็นรัศมีของล้อยามีหน่วยเป็นเมตร (m)

จากสมการที่ (2.30) และ (2.31) เมื่อแทนค่าคงที่ต่างๆลงไปจะได้ฟังก์ชันถ่ายโอน 2 สมการดังนี้

1. มุมที่เปลี่ยนไปของ Pendulum ต่อแรงที่กระทำ

$$\frac{\Phi(s)}{F(s)} = \frac{0.0201s}{s^3 + 0.0019s^2 - 25.670s - 0.0197}$$

2. มุมที่เปลี่ยนไปต่อทอร์คที่กระทำ

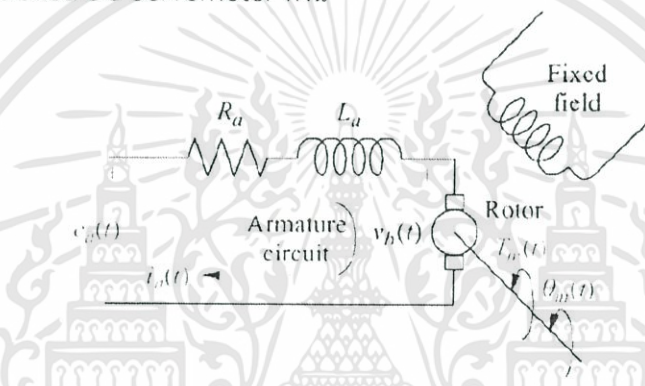
$$\frac{\Phi(s)}{T(s)} = \frac{0.0201s}{0.3175s^3 + 0.000603s^2 - 8.1502s - 0.00625}$$

โดยที่ค่าฟังก์ชันถ่ายโอนของมุมที่เปลี่ยนไปของ Pendulum ต่อแรงที่กระทำจะนำไปใช้ในการวิเคราะห์หาค่าตัวควบคุมแบบ PID ต่อไป เนื่องจากว่าสามารถพิจารณาค่าตัวแปรต่างๆได้ง่ายกว่าฟังก์ชันถ่ายโอนของมอเตอร์กระแสตรง ส่วนค่าของฟังก์ชันถ่ายโอนของมอเตอร์กระแสตรงที่หามาได้นั้นมีการสมมติค่าตัวแปรที่ให้เคียงกับความจริงซึ่งอาจจะไม่ถูกต้องถ้าหากนำมาพิจารณาในการหาตัวควบคุมแบบ PID ของระบบ

2.4 ทฤษฎีของมอเตอร์กระแสตรง

มอเตอร์จัดได้ว่าเป็นอุปกรณ์ที่ผสมผสานระหว่างตัวแปรทางเครื่องกลและไฟฟ้าซึ่งอาจเรียกว่า “ระบบเครื่องกลไฟฟ้า” โดยการประยุกต์ใช้งานมอเตอร์นี้สามารถพบได้ในงานทางด้านวิศวกรรม เช่น การควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ การควบคุมตำแหน่งของดาวเทียม ฯลฯ ซึ่งสำหรับมอเตอร์แล้ว จะให้เอาต์พุตออกมาเป็นการกระจัด (Displacement) ให้ค่าแรงดันไฟฟ้า (Voltage) เป็นอินพุต

สำหรับในกรณีของ Segway นี้จะใช้มอเตอร์ในการขับเคลื่อนเช่นกันโดยในเนื้อหาต่อไปนี้จะเป็นการกล่าวถึงการพิสูจน์ทฤษฎีของมอเตอร์เพื่อที่จะหาฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ (Transfer Function) แล้วนำไปใช้ในการออกแบบตัวควบคุมแบบ PID ต่อไป โดยที่มอเตอร์จะเป็นแบบ Armature-Controlled DC Servomotor ดังนี้



รูปที่ 2.10 แผนภาพมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

จากรูป 2.11 สนามแม่เหล็กเกิดจากแม่เหล็กถาวรหรือที่เรียกว่า “Fixed Field” ส่วนวงจรมอเตอร์กระแส $i_a(t)$ ไหลผ่านแล้วเกิดการหมุนจะเรียกว่า “อาร์เมเจอร์” (Armature) เมื่อเกิดการหมุนตัดสนามแม่เหล็กที่มุม 90° จะเกิดแรง $F = Bli_a(t)$ เมื่อ B คือ สนามแม่เหล็ก และ l คือความยาวของตัวนำ ส่งผลให้เกิดทอร์กไปหมุนโรเตอร์ (Rotor) ทำให้มอเตอร์สามารถทำงานได้อย่างสมบูรณ์

นอกจากนี้ยังมีปรากฏการณ์อื่น ๆ ที่เกิดขึ้นในมอเตอร์นั้นก็คือการเคลื่อนที่ของลวดตัวนำตัดสนามแม่เหล็กที่ 90° จะก่อให้เกิดแรงดันไฟฟ้าในลวดตัวนำคือ $e = Blv$ เมื่อ e เป็นแรงดันไฟฟ้า v เป็นความเร็วในการหมุนของลวดตัวนำที่ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก และเนื่องจากกระแสใน Armature ที่หมุนตัดสนามแม่เหล็ก ดังนั้นจะได้ว่า

$$V_b(t) = K_b \frac{d\theta_m(t)}{dt} \quad (2.33)$$

เมื่อ $V_b(t)$ คือ แรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ (Back emf)

K_b คือ ค่าคงที่ (Back emf constant)

$\frac{d\theta_m(t)}{dt}$ คือ ความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์

ทำการ Take Laplace สมการที่ (2.33) จะได้

$$V_b(s) = K_b s \theta_m(s) \quad (2.34)$$

ความสัมพันธ์ระหว่าง Armature current, $i_a(t)$ Armature voltage, $e_a(t)$ และ Back emf, $V_b(t)$ สามารถพิจารณาได้โดยอาศัยกฎของ Kirchhoff ตามรูป 2.10 ดังนี้

$$R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + v_b(t) = e_a(t)$$

(2.35)

ทำการ Take Laplace สมการที่ (2.35) จะได้

$$R_a I_a(s) + L_a s I_a(s) + V_b(s) = E_a(s) \quad (2.36)$$

ทอร์กที่เกิดจากมอเตอร์จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ Armature current ดังนี้

$$T_m(t) = K_t i_a(t) \quad (2.37)$$

ทำการ Take Laplace สมการที่ (2.37) จะได้

$$T_m(s) = K_t I_a(s) \quad (2.38)$$

เมื่อ T_m คือ ทอร์กที่เกิดจากมอเตอร์

K_t คือ ค่าคงที่ (Motor torque constant)

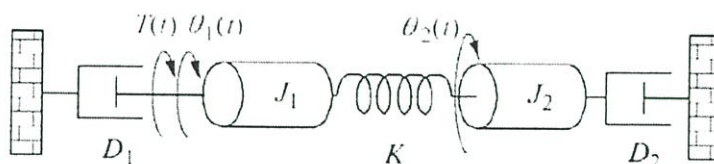
จากสมการที่ (2.38) จัดรูปใหม่ได้

$$I_a(s) = \frac{1}{K_t} T_m(s) \quad (2.39)$$

ในการที่จะหาฟังก์ชันถ่ายโอนของมอเตอร์ ขั้นแรกนำสมการที่ (2.34) และ (2.39) แทนลงในสมการที่ (2.36) จะได้

$$R_a \left[\frac{1}{K_t} T_m(s) \right] + L_a s \left[\frac{1}{K_t} T_m(s) \right] + K_b s \theta_m(s) = E_a(s)$$

$$\frac{[R_a + L_a(s)]T_m(s)}{K_t} + K_b s \theta_m(s) = E_a(s) \quad (2.40)$$



รูปที่ 2.11 แผนภาพระบบเชิงกลแบบหมุน

จากรูป แสดงถึงการสมดุลทางกลของภาระบนมอเตอร์

โดย J_m คือ โมเมนต์ความเฉื่อยสมมูลของ Armature และ Load, ($kg \cdot m^2$)

D_m คือ Equivalent viscous damping สมมูล ของ Armature และ Load

ดังนั้นจากรูปจะได้ว่า

$$T_m(t) = J_m \frac{d^2 \theta_m(t)}{dt^2} + \frac{D_m d\theta_m(t)}{dt} \quad (2.41)$$

ทำการ Take Laplace สมการที่ (2.41) จะได้

$$T_m(s) = (J_m s^2 + D_m s) \theta_m(s) \quad (2.42)$$

แทนค่าสมการที่ (2.42) ลงในสมการที่ (2.40) จะได้

$$\frac{(R_a + L_a s)(J_m s^2 + D_m s) \theta_m(s)}{K_t} + K_b s \theta_m(s) = E_a(s) \quad (2.43)$$

ถ้าสมมติว่าค่าของ Armature inductance, L_a มีค่าน้อยมากจนสามารถตัดทิ้งได้เมื่อเทียบกับค่า Armature resistance, R_a จะได้ว่า

$$\left[\frac{R_a}{K_t} (J_m s + D_m) + K_b \right] s \theta_m(s) = E_a(s) \quad (2.44)$$

ดังนั้นจะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของมอเตอร์ ดังนี้

$$\frac{\theta_m(s)}{E_a(s)} = \frac{K_t}{s [R_a (J_m s + D_m) + K_t K_b]}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{\theta_m(s)}{E_a(s)} = \frac{K_t / (R_a J_m)}{s[s + \frac{1}{J_m}(D_m + \frac{K_t K_b}{R_a})]} \quad (2.45)$$

หรืออาจจะเขียนให้อยู่ในรูปอย่างง่ายดังนี้

$$\frac{\theta_m(s)}{E_a(s)} = \frac{K}{s(s + \alpha)} \quad (2.46)$$

เมื่อ $K = \frac{K_t}{R_a J_m}$ และ $\alpha = \frac{1}{J_m}(D_m + \frac{K_t K_b}{R_a})$

หรือ อยู่ในรูปของทอร์กต่อค่าโวลต์ดังนี้

$$\frac{T_m(s)}{E_a(s)} = \frac{K_t / (R_a J_m)(J_m s^2 + D_m s)}{s[s + \frac{1}{J_m}(D_m + \frac{K_t K_b}{R_a})]} \quad (2.47)$$

เนื่องจากว่าเราพิจารณาส่วนที่เป็นระบบ Inverted Pendulum เป็นสำคัญตลอดจนค่าคงที่ต่างๆของมอเตอร์นั้นจะต้องใช้อุปกรณ์ต่างๆมากมายในการทดสอบและค่าบางค่ายังไม่ทราบปริมาณที่แน่ชัดดังนั้นในส่วนของมอเตอร์จึงไม่พิจารณาฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นสำคัญ

2.5 ทฤษฎีการควบคุมอัตโนมัติ

2.5.1 ประวัติความเป็นมาและพัฒนาการของระบบควบคุม

ระบบควบคุมได้ถูกนำมาใช้งานตั้งแต่ยุคก่อนประวัติศาสตร์ ที่พอจะมีหลักฐานปรากฏให้เห็นก็คือ ระบบชลประทานที่มีการควบคุมระดับน้ำที่แจกจ่ายไปในพื้นที่เกษตรกรรม การวิเคราะห์และออกแบบระบบควบคุมโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ถูกนำมาใช้เป็นครั้งแรกในปี ค.ศ.1760 โดย เจมส์ วัตต์ โดยเขาได้นำมาใช้ในการออกแบบและควบคุมเครื่องจักรไอน้ำและในงานอื่นๆที่เขาได้พัฒนาขึ้นในภายหลัง พัฒนาการของระบบควบคุมเริ่มเข้มข้นและจริงจังมากขึ้นในช่วงสมัย สงครามโลกครั้งที่สอง เพื่อพัฒนาอาวุธยุทธโปกรณ์ต่างๆให้ก้าวหน้ากว่าประเทศคู่แข่ง พัฒนาการของ ระบบควบคุมแบ่งได้เป็น 2 ยุคหลักๆคือ

1. ระบบควบคุมดั้งเดิม (Classical Control Systems)

เป็นระบบควบคุมที่พัฒนาขึ้นในช่วงแรกๆ ที่มีการนำเอาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ไม่ซับซ้อนมากนักมาใช้ควบคุมระบบที่เป็นเชิงเส้น (Linear Systems) และระบบที่ไม่แปรเปลี่ยนตาม เวลา (Time-invariant Systems) แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ส่วนใหญ่ก็จะอยู่ในรูปแบบของ ฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer Function) ตัวอย่างของทฤษฎีเกี่ยวกับระบบควบคุมในยุคนี้ได้แก่ ระบบ ควบคุมพีไอดี (PID Controllers) เส้นทางเดินราก (Root Locus) แผนภาพโบด (Bode Plot) และ แผนภาพไนควิสต์ (Nyquist Plot) เป็นต้น

2. ระบบควบคุมสมัยใหม่ (Modern Control Systems)

เป็นระบบควบคุมที่พัฒนาขึ้นในช่วงหลังๆอันเนื่องมาจากข้อจำกัดในการใช้งานของทฤษฎี ระบบควบคุมแบบดั้งเดิม ที่จำกัดการนำไปใช้งานกับระบบที่เป็นเชิงเส้น (Linear Systems) และ ระบบที่ไม่แปรเปลี่ยนตามเวลา (Time-invariant Systems) ซึ่งในทางปฏิบัติแล้วระบบมักจะไม่เป็น เชิงเส้น (Non-linear Systems) และแปรเปลี่ยนตามเวลา (Time-variant Systems)

โดยที่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในระบบควบคุมแบบดั้งเดิมมักมีข้อจำกัดในการใช้งาน กับระบบประเภทนี้ จึงได้มีการคิดแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และวิธีการควบคุมรูปแบบใหม่ๆขึ้นมา ตัวอย่างของทฤษฎีเกี่ยวกับระบบควบคุมในยุคนี้ได้แก่ระบบที่อาศัยรูปแบบของสมการสเตท (State Variable) ในการคำนวณ ระบบควบคุมความเหมาะสม (Optimal Control) ระบบควบคุมแบบ ปรับตัวได้ (Adaptive Control) ระบบควบคุมลูกผสม (Hybrid Control) โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network) และตรรกศาสตร์คลุมเครือ (Fuzzy Logic) เป็นต้น

2.5.2 ความหมายและคำนิยามของระบบควบคุม

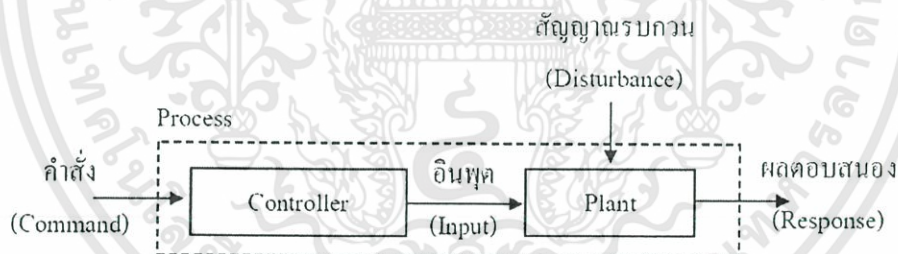


รูปที่ 2.12 ส่วนประกอบของระบบควบคุม

ระบบ (System) หมายถึง ส่วนหรือหน่วยที่ได้รับรวมสิ่งต่างๆเข้าด้วยกัน
 ควบคุม (Control) หมายถึง การบังคับหรือสั่งการ
 ระบบควบคุม (Control Systems) หมายถึง ส่วนหรือหน่วยที่ได้รับรวมสิ่งต่างๆเข้าด้วยกัน เพื่อใช้
 บังคับหรือสั่งการ

2.5.3 รูปแบบของการควบคุม

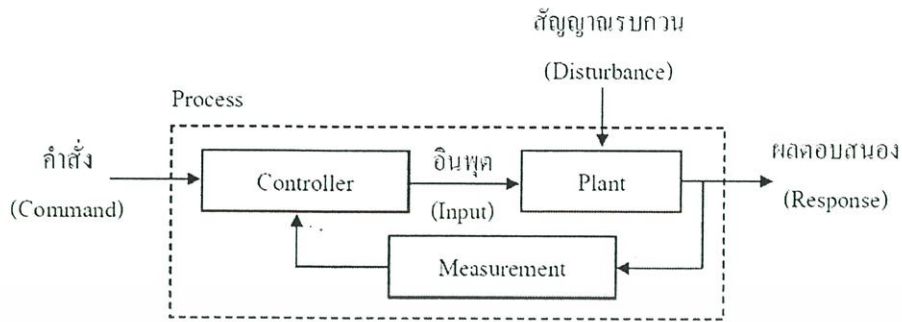
2.5.3.1 ระบบควบคุมแบบวงรอบเปิด (Open Loop Control)



รูปที่ 2.13 ระบบควบคุมแบบวงรอบเปิด

ลักษณะทั่วไปของระบบควบคุมแบบวงรอบเปิดจะเป็นไปตามรูปที่ 2.13 ในการควบคุมแบบ
 วงรอบเปิด ตัวควบคุม (Controller) จะส่งสัญญาณป้อน (Input) ให้กับสิ่งที่ต้องการควบคุม (Plant)
 ตามคำสั่งหรือสัญญาณอ้างอิง (Command or referent) ที่รับมา โดยที่ตัวควบคุมจะอนุมานว่าเมื่อ
 สิ่งที่ต้องการควบคุมได้รับสัญญาณป้อนแล้วนั้น ก็จะผลิตเอาต์พุตหรือผลตอบสนอง (Response) ให้
 ได้ตามที่คาดหวังไว้โดยไม่ต้องทำการตรวจสอบสัญญาณเอาต์พุตจริง ว่าเป็นไปตามคำสั่งหรือไม่

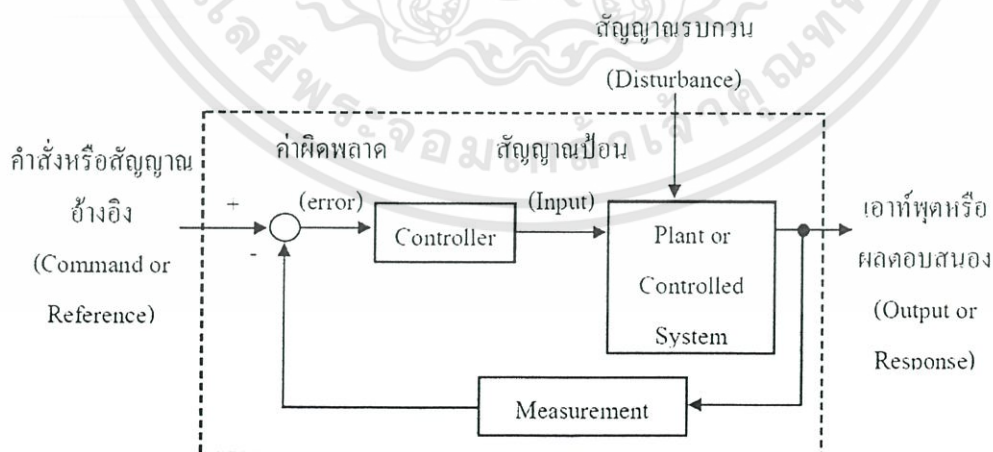
2.5.3.2 ระบบควบคุมแบบวงรอบปิด (Closed Loop Control)



รูปที่ 2.14 ระบบควบคุมแบบวงรอบปิด

ลักษณะทั่วไปของระบบควบคุมแบบวงรอบปิดจะเป็นไปตามรูปที่ 2.14 ในการควบคุมแบบวงรอบปิด ตัวควบคุม (Controller) จะทำการเปรียบเทียบสัญญาณอ้างอิงหรือคำสั่ง (Referent or Command) กับสัญญาณเข้าที่พุดหรือผลตอบสนอง (Output or Response) ที่ป้อนกลับมาโดยตัวตรวจจับ (Measurement or Sensor) แล้วนำไปสร้างสัญญาณป้อนหรืออินพุต (Input) ให้กับสิ่งที่ต้องการควบคุม (System under controlled or Plant) เพื่อที่จะให้ผลิตเอาต์พุตหรือผลตอบสนองให้เป็นไปตามสัญญาณอ้างอิงที่ต้องการ (Command or Reference)

ระบบควบคุมแบบวงรอบปิดอาจจะเรียกได้อีกอย่างหนึ่งว่า ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback Control System) ตามรูปที่ 2.15 ระบบนี้เป็นระบบควบคุมที่พยายามรักษาเอาต์พุตให้ได้ตามต้องการ โดยการนำเอาสัญญาณเอาต์พุตมาเปรียบเทียบกับสัญญาณอ้างอิงที่ต้องการ แล้วนำค่าความแตกต่างไปใช้ในการควบคุมสัญญาณป้อนให้กับสิ่งที่ต้องการควบคุม



รูปที่ 2.15 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ถูกนำมาใช้ในระบบควบคุมมีอยู่หลายรูปแบบด้วยกันเช่นฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer Function) สมการสแตต (State variables) เป็นต้น ในการเรียนในชั้นนี้จะกล่าวถึงเฉพาะการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในลักษณะของฟังก์ชันถ่ายโอนเท่านั้น

2.5.4.1 การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Modeling)

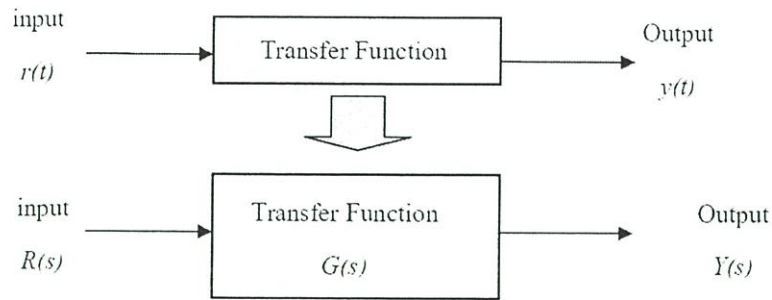
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Modeling) ที่ใช้ในระบบควบคุมพื้นฐานของระบบใดๆสามารถหาได้จาก

1. สมการความสัมพันธ์ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ของตัวแปรใดๆ แล้วแปลงให้อยู่ในรูปฟังก์ชันเอส (s-domain) ด้วยวิธีการแปลงลาปลาซ (Laplace's Transform) ซึ่งในเบื้องต้นอาจจะสร้างขึ้นมาจากสมการความสัมพันธ์ที่มีหลายตัวแปร แล้วทำให้เหลือเพียงแค่สมการความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอินพุตกับเอาต์พุตของระบบเท่านั้น สุดท้ายจึงจัดให้อยู่ในรูปแบบของฟังก์ชันถ่ายโอน
2. ทดสอบผลตอบสนองของระบบด้วยอินพุตอย่างใดอย่างหนึ่ง บันทึกผลตอบสนองที่ได้ แล้วนำไปหาสมการความสัมพันธ์ด้วยวิธีการของการแสดงตัวระบบ (System Identification) ที่พบเจอบ่อยๆก็คือการทดสอบระบบด้วยผลตอบสนองเชิงความถี่ แล้วนำข้อมูลที่ได้ไปสร้างฟังก์ชันถ่ายโอนโดยตรง

2.5.4.2 ฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function)

ฟังก์ชันถ่ายโอนก็สร้างขึ้นมาจาก สมการความสัมพันธ์ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์แปลงสมการเหล่านั้นให้อยู่ในรูปฟังก์ชันเอสด้วยการแปลงลาปลาซ (Laplace's Transform) ด้วยค่าเริ่มต้นเป็นศูนย์ จัดสมการความสัมพันธ์ให้เหลือเพียงแค่ตัวแปรสองตัวคือตัวแปรอินพุตกับเอาต์พุตของระบบ

ดังนั้นฟังก์ชันถ่ายโอนจึงหมายถึง แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอินพุตกับเอาต์พุต โดยจะจำกัดการพิจารณาเฉพาะกับระบบที่เป็นเชิงเส้นและไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลาเท่านั้น ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 ฟังก์ชันถ่ายโอน

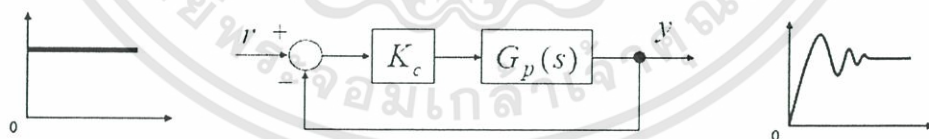
ลักษณะฟังก์ชันถ่ายโอนเป็นดังสมการความสัมพันธ์ $G(s) = \frac{\Gamma[y(t)]}{\Gamma[r(t)]} = \frac{Y(s)}{R(s)}$

2.5.5 ข้อกำหนดลักษณะของผลตอบสนองตามเวลา

2.5.5.1 กลุ่มของข้อกำหนดคุณลักษณะ

ผลตอบสนองที่ได้จากการแปลงลาปลาซผกกลับ จะแบ่งเทอมออกเป็นกลุ่มๆ โดยแบ่งได้เป็นสองกลุ่มหลักๆคือ

1. กลุ่มของเทอมที่เป็นฟังก์ชันที่เมื่อเวลาผ่านไปจะให้ค่าของผลตอบสนองอยู่ตลอดไป เรียกกลุ่มของเทอมของผลตอบสนองเหล่านี้ว่า ผลตอบสนองในสภาวะคงตัว (steady-state response)
2. กลุ่มของเทอมที่เป็นฟังก์ชันที่คูณอยู่กับฟังก์ชันเอ็กซ์โพเนนเชียลยกกำลังลบด้วยตัวแปรเวลา ลักษณะของเทอมเหล่านี้เมื่อเวลาผ่านไปจะมีค่าเข้าสู่ศูนย์ เรียกกลุ่มของเทอมของผลตอบสนองเหล่านี้ว่า ผลตอบสนองในสภาวะชั่วคราว (transient-state response) ดังรูปที่ 2.18



$$\text{Response} = \text{Transient} + \text{Steady State}$$

รูปที่ 2.17 ผลตอบสนองของระบบควบคุม

ดังนั้นในการออกแบบระบบควบคุม จึงต้องมีข้อกำหนดคุณลักษณะของผลตอบสนอง (Performance Specifications) ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มเช่นเดียวกัน คือ

1. ข้อกำหนดคุณลักษณะของการตอบสนองในสภาวะชั่วคราว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.ข้อกำหนดคุณลักษณะของผลตอบสนองในสภาวะคงตัว

ทั้งนี้เพื่อให้การออกแบบได้ผลตอบสนองของระบบเป็นไปตามที่ผู้ใช้และผู้ออกแบบเข้าใจตรงกัน

2.5.5.2 ข้อกำหนดคุณลักษณะของผลตอบสนองในสภาวะชั่วคราว

ข้อกำหนดคุณลักษณะของผลตอบสนองที่สำคัญในกลุ่มนี้ได้แก่

1. ช่วงเวลาไต่ขึ้น (Rise time, t_r) สำหรับผลตอบสนองที่เป็นแบบหน่วงต่ำกว่าจุดวิกฤตช่วงเวลานี้คือเวลาตั้งแต่เริ่มให้สัญญาณอินพุตกับระบบ จนกระทั่งผลตอบสนองมีค่าเท่ากับ ค่า ของผลตอบสนองในสภาวะคงตัวครั้งแรก หรือ ช่วงเวลาตั้งแต่ผลตอบสนองมีค่า 10% ของค่าของผลตอบสนองในสภาวะคงตัว จนกระทั่งผลตอบสนองมีค่า 90% ของค่าของผลตอบสนองในสภาวะคงตัวสำหรับผลตอบสนองที่เป็นแบบหน่วงสูงกว่าจุดวิกฤต

2. ช่วงเวลาจุดยอด (Peak time, t_p) คือช่วงเวลาตั้งแต่เริ่มให้สัญญาณอินพุตกับระบบ จนกระทั่งผลตอบสนองมีค่าสูงสุด ข้อกำหนดนี้มีอยู่เฉพาะในผลตอบสนองที่เป็นแบบหน่วงต่ำกว่าจุดวิกฤตเท่านั้น

3. ค่าพุ่งเกินสูงสุด (Peak overshoot or maximum overshoot, M_p) คือสัดส่วนของปริมาณค่าผลตอบสนองที่พุ่งเกินกว่าค่าของผลตอบสนองในสภาวะคงตัวสูงสุด ต่อค่าของผลตอบสนองในสภาวะคงตัว ข้อกำหนดนี้มีอยู่เฉพาะในผลตอบสนองที่เป็นแบบหน่วงต่ำกว่าจุดวิกฤตเท่านั้น

4) ช่วงเวลาเซตตัวของผลตอบสนอง (Settling time, t_s) คือช่วงเวลาตั้งแต่เริ่มให้สัญญาณอินพุตกับระบบ จนกระทั่งผลตอบสนองเริ่มเข้าใกล้ค่าของผลตอบสนองในสภาวะคงตัวหรือ มีค่าความผิดพลาดจากค่าของผลตอบสนองในสภาวะคงตัวไม่เกิน $\pm 5\%$ หรือ $\pm 2\%$

2.5.6 ตัวควบคุมแบบ PID

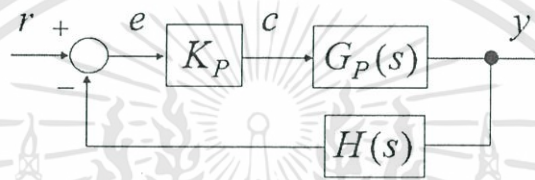
ตัวควบคุมแบบ PID เป็นตัวควบคุมที่พบบ่อยมากที่สุดในงานอุตสาหกรรมทั่วไปเพราะเป็นตัวควบคุมที่ใช้งานง่าย การปรับค่าเกนอาศัยหลักการที่ไม่ได้ซับซ้อนมากนักก็ให้ผลตอบสนองเป็นที่ยอมรับได้ สามารถปรับแต่งการควบคุมได้ง่ายเมื่อต้องการ ระบบควบคุมแบบ PID มีตัวควบคุมย่อย 3 ตัว คือ

1. ตัวควบคุมแบบสัดส่วนหรือตัวควบคุม P
2. ตัวควบคุมแบบปริพันธ์หรือตัวควบคุม I
3. ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์หรือตัวควบคุม D

ในการควบคุมระบบทั่วไปมักใช้งานตัวควบคุมร่วมกัน เช่น การควบคุมแบบ PI การควบคุมแบบ PD และการควบคุมแบบ PID รายละเอียดการทำงานของตัวควบคุมแต่ละแบบมีดังนี้

2.5.6.1 ตัวควบคุมแบบสัดส่วน

หรือตัวควบคุมแบบ P ตัวควบคุมแบบนี้จะนำเอาสัญญาณค่าความผิดพลาดระหว่างสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณเอาต์พุตมาเป็นอินพุตของตัวควบคุม แล้วตัวควบคุมจะทำการสร้างสัญญาณเอาต์พุตด้วยการขยายสัญญาณความผิดพลาดดังกล่าวด้วยค่าเกนของตัวควบคุม บล็อกไดอะแกรมและลักษณะของการประมวลผลสัญญาณเป็นดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 ตัวควบคุมแบบ P

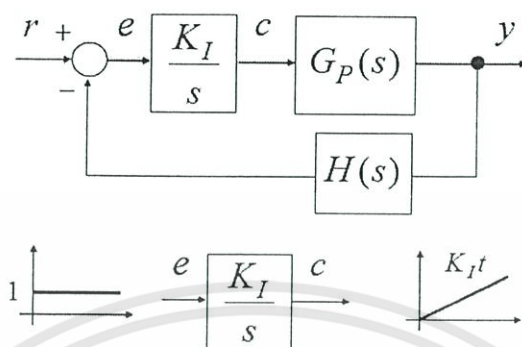
จุดเด่นของตัวควบคุมแบบนี้เมื่อนำไปใช้งานก็คือ การปรับค่าเกนให้สูงขึ้นจะมีผลทำให้ระบบมีผลตอบสนองที่เร็วขึ้น ปัญหาที่อาจเกิดขึ้นในการนำไปใช้งานก็คือ ถ้านำไปใช้กับระบบชนิด 0 (System type 0) ตัวควบคุมแบบนี้จะไม่สามารถขจัดค่าความผิดพลาดในสภาวะคงตัวได้ แต่ก็สามารถทำให้ค่าความผิดพลาดดังกล่าวมีค่าน้อยลงได้ด้วยการปรับค่าเกนให้สูง

ซึ่งในทางปฏิบัติแล้วการปรับค่าเกนให้สูงมากขนาดไหนเอาต์พุตที่ออกจริงๆ จากตัวควบคุมมักมีค่าจำกัด และการปรับเกนให้มีค่าสูงสำหรับระบบที่มีอันดับสูง อาจจะทำให้ได้ผลตอบสนองที่ไม่เป็นที่พึงประสงค์ เช่นการปรับเกนให้สูงขึ้นสำหรับระบบอันดับสอง ผลที่ตามมาก็คือค่าพุงเกินก็จะสูงขึ้นตามด้วย ซึ่งอาจจะเป็นอันตรายต่อระบบได้

2.5.6.2 ตัวควบคุมแบบปริพันธ์

หรือตัวควบคุมแบบ I ตัวควบคุมแบบนี้จะนำเอาสัญญาณความผิดพลาดระหว่างสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณเอาต์พุตมาเป็นอินพุตของตัวควบคุม แล้วตัวควบคุมจะทำการสร้าง

สัญญาณเอาต์พุตด้วยการอินทิเกรตสัญญาณความผิดพลาดดังกล่าวแล้วคูณด้วยค่าเกนของตัวควบคุม บล็อกไดอะแกรมและลักษณะของการประมวลผลสัญญาณเป็นดังรูปที่ 2.19

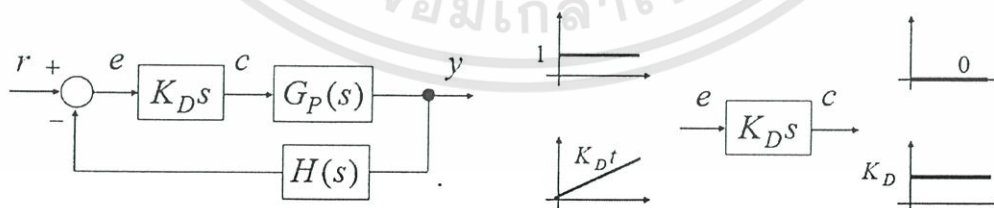


รูปที่ 2.19 ตัวควบคุมแบบ I

จุดเด่นของตัวควบคุมแบบนี้เมื่อนำไปใช้งานก็คือ ถ้านำไปใช้กับระบบชนิด 0 (System type 0) ตัวควบคุมแบบนี้จะสามารถจัดค่าความผิดพลาดในสภาวะคงตัวได้ ข้อด้อยที่อาจจะเกิดขึ้นในการนำไปใช้งานก็คือ ตัวควบคุมแบบนี้ไม่สามารถลดผลของการพุ่งเกินของผลตอบสนองได้ และการปรับเกนให้มีค่าสูง อาจจะทำให้ได้ผลตอบสนองที่ไม่เป็นที่พึงประสงค์ เช่นการปรับเกนให้สูงขึ้น อาจจะมีผลทำให้ผลตอบสนองของระบบเกิดการแกว่งตัวได้

2.5.6.3 ตัวควบคุมแบบอนุพันธ์

หรือตัวควบคุมแบบ D ตัวควบคุมแบบนี้จะนำเอาสัญญาณความผิดพลาดระหว่างสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณเอาต์พุตมาเป็นอินพุตของตัวควบคุม แล้วตัวควบคุมจะทำการสร้างสัญญาณเอาต์พุตด้วยการอนุพันธ์สัญญาณความผิดพลาดดังกล่าว แล้วคูณด้วยค่าเกนของตัวควบคุม บล็อกไดอะแกรมและลักษณะของการประมวลผลสัญญาณเป็นดังรูปที่ 2.20



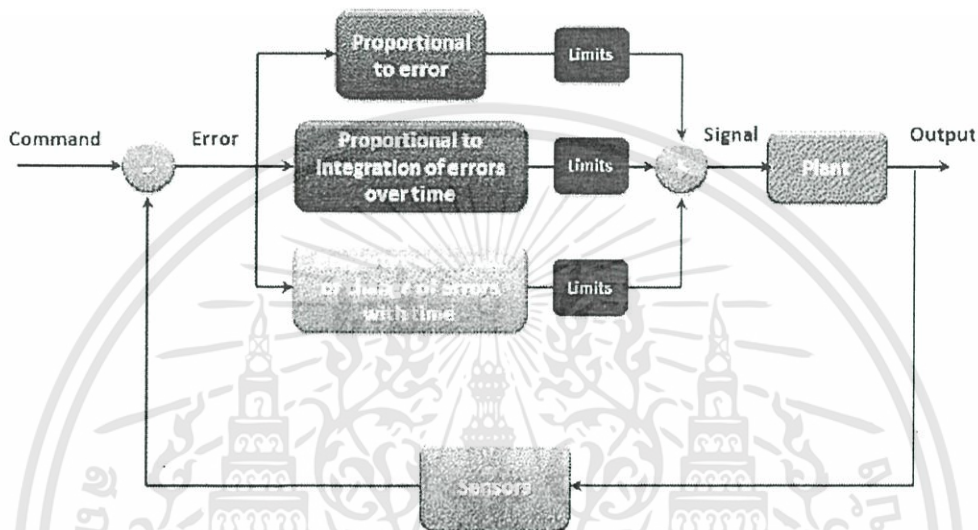
รูปที่ 2.20 ตัวควบคุมแบบ D

จุดเด่นของตัวควบคุมแบบนี้เมื่อนำไปใช้งานก็คือ ตัวควบคุมแบบนี้ใช้สำหรับลดผลของการพุ่งเกินของผลตอบสนองได้ ลดผลตอบสนองที่มีการเปลี่ยนแปลงไปมาได้ แต่ต้องปรับค่าเกนให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหมาะสมด้วย ไม่เช่นนั้น อาจจะทำให้ได้ผลตอบสนองที่ไม่เป็นที่พึงประสงค์ ปัญหาที่อาจเกิดขึ้นในการนำเอาตัวควบคุมนี้ไปใช้งานก็คือ

ตัวควบคุมแบบนี้จะไม่สามารถจัดค่าความผิดพลาดในสภาวะคงตัวได้ และการใช้ตัวควบคุมนี้อาจจะทำให้ได้ผลตอบสนองที่ช้าลงได้ตัวอย่างผลตอบสนองต่ออินพุตแบบขั้นบันไดของระบบต่างๆ ด้ยการใช้งานระบบควบคุมพีไอดีในลักษณะต่างๆกัน เป็นดังรูปที่ 2.21

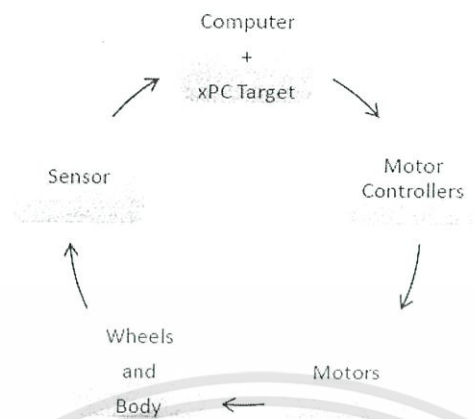


รูปที่ 2.21 ผลตอบสนองจากการนำเอาตัวควบคุม PID แบบต่างๆ ไปใช้กับระบบหลายๆแบบ

จากรูปที่ 2.21 จะเห็นว่าถ้าหากนำตัวควบคุมแบบ P ไปใช้ใช้กับระบบที่เป็นอันดับหนึ่ง ผลตอบสนองที่ได้จะมีค่าความผิดพลาดในสภาวะคงตัว ซึ่งสามารถลดผลกระทบได้ด้วยการเพิ่มค่าเกนของตัวควบคุมให้สูงขึ้น สำหรับการนำไปใช้กับระบบที่มีอันดับสูงกว่านั้นและเป็นระบบชนิด 0 ค่าความผิดพลาดในสภาวะคงตัวก็ยังคงมีค่าอยู่ และการลดผลกระทบด้วยการปรับค่าเกนของตัวควบคุม P ให้สูงขึ้น อาจจะมีผลให้การพุ่งเกินมีค่าสูงขึ้นได้ ถ้าหากใช้ตัวควบคุมร่วมกันระหว่าง P กับ I หรือตัวควบคุมแบบ P I กับระบบนี้แล้ว

ตัวควบคุมแบบ I ก็จะช่วยจัดค่าความผิดพลาดในสภาวะคงตัว แต่ผลตอบสนองที่ได้จะยังมีค่าพุ่งเกินเหมือนเดิม ถ้าหากใช้ตัวควบคุมร่วมกันระหว่าง P กับ D หรือตัวควบคุมแบบ PD กับระบบนี้แล้ว การพุ่งเกินของผลตอบสนองก็จะลดลง แต่ค่าความผิดพลาดในสภาวะคงตัวก็ยังคงอยู่ ดังนั้นถ้าหากใช้ตัวควบคุมร่วมกันระหว่าง P, I และ D ด้วยการปรับค่าเกนให้เหมาะสมกับระบบนั้นๆ ก็จะได้ผลตอบสนองแบบหน่วงต่ำกว่าวิกฤตที่มีค่าพุ่งเกินเหมาะสมกับระบบนั้นๆ

2.6 โครงสร้างการทำงานของ Segway

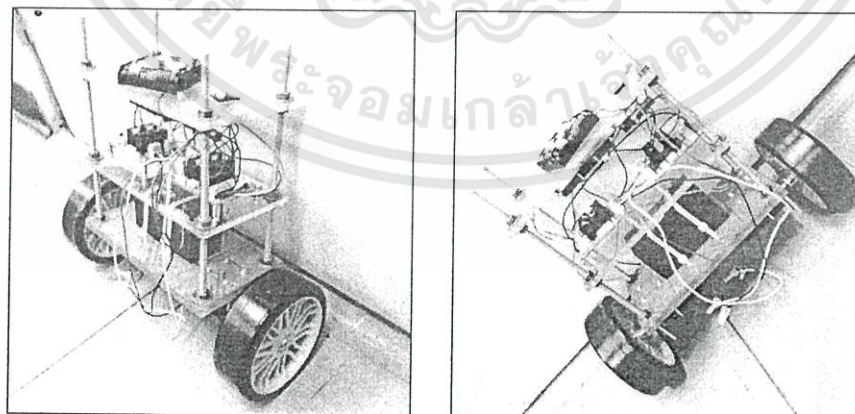


รูปที่ 2.22 แสดงรูปแบบการทำงานของ Segway

รูปแบบการทำงานจะมีลักษณะเป็นระบบแบบวงปิดคือมีเซนเซอร์เป็นตัวป้อนกลับข้อมูลเพื่อนำไปเทียบกับค่าอ้างอิงที่ได้ทำการกำหนดไว้แล้วส่งค่าที่ได้ผ่านการคำนวณแล้วไปใช้ประมวลผลเพื่อนำไปใช้ควบคุมการทำงานของมอเตอร์เพื่อให้ Segway สามารถที่จะเคลื่อนที่ไปข้างหน้าได้

2.7 ต้นแบบของการสร้าง Segway

ก่อนที่จะมีการสร้าง Segway นั้นได้มีการสร้างหุ่นยนต์ต้นแบบขึ้นมาก่อนตัวหนึ่งเพื่อศึกษาทฤษฎีตลอดจนพฤติกรรมการทำงานซึ่งถือว่ามีประโยชน์มากเนื่องจากว่าหุ่นยนต์ที่ได้จัดทำขึ้นก่อนนั้นมีความคล้ายคลึงกับ Segway มากดังนั้นปัญหาที่เกิดขึ้นกับหุ่นยนต์นั้นก็จะเป็นประโยชน์นำไปพัฒนาและปรับแก้เพื่อให้การสร้าง Segway นั้นมีประสิทธิภาพมากที่สุด



รูปที่ 2.23 หุ่นยนต์ขับเคลื่อนสองล้อสมมูลด้วยตัวเอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

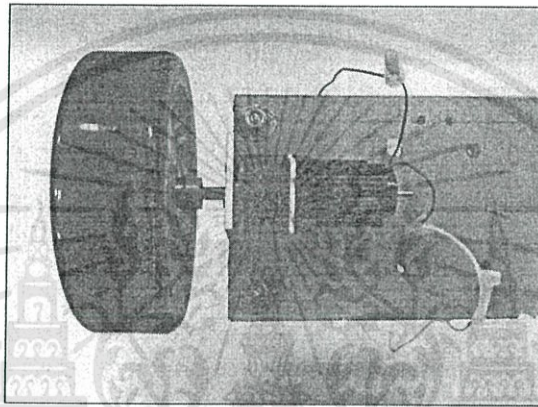
2.7.1 ปัญหาที่เกิดขึ้นกับหุ่นยนต์ขับเคลื่อนสองล้อสมดุด้วยตัวเอง

โดยในส่วนนี้จะกล่าวถึงปัญหาบางประการที่พบเจอในการสร้างหุ่นยนต์ขับเคลื่อนสองล้อสมดุด้วยตัวเองโดยจะแบ่งออกเป็นสองส่วนใหญ่ด้วยกันคือ

2.7.1.1 ปัญหาทางด้านโครงสร้าง

1. โครงสร้างของตัวหุ่นยนต์อาจจะออกแบบไม่ดีมากจึงทำให้หุ่นยนต์ไม่สามารถที่จะสมดุได้ด้วยตัวเอง

2. การติดตั้งมอเตอร์ไม่ดีพอทำให้การหมุนของล้อเกิดความผิดพลาดได้

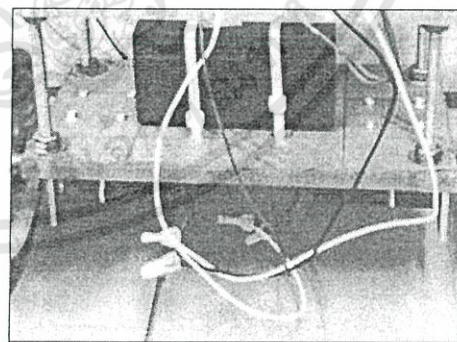
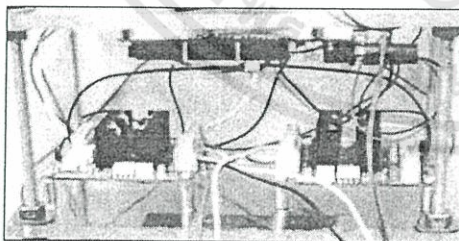


รูปที่ 2.24 ปัญหาที่เกิดขึ้นกับหุ่นยนต์ขับเคลื่อนสองล้อสมดุด้วยตัวเอง

2.7.1.2 ปัญหาทางด้านอิเล็กทรอนิกส์

1. การต่อสายไฟระหว่างอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆไม่มีความเรียบร้อยและไม่เป็น

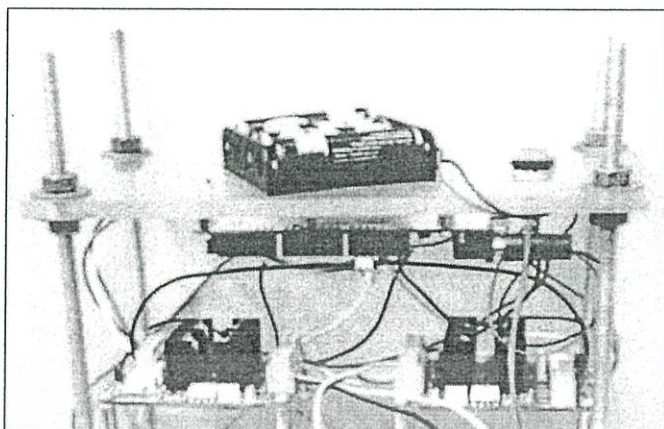
ระเบียบ



รูปที่ 2.25 ปัญหาการต่อสายไฟฟ้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

2. การติดตั้งอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ อาทิ บอร์ดควบคุมมอเตอร์ บอร์ดควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ มีการติดตั้งไม่ดีทำให้การต่อสายไฟต่างเป็นไปด้วยความลำบาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.26 ปัญหาการวางตำแหน่งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ไม่ดี

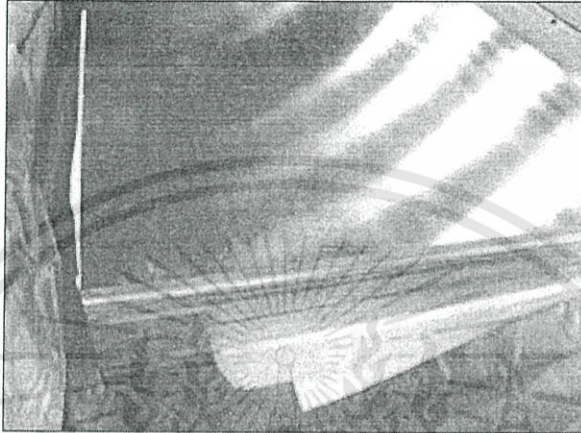


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้าง Segway

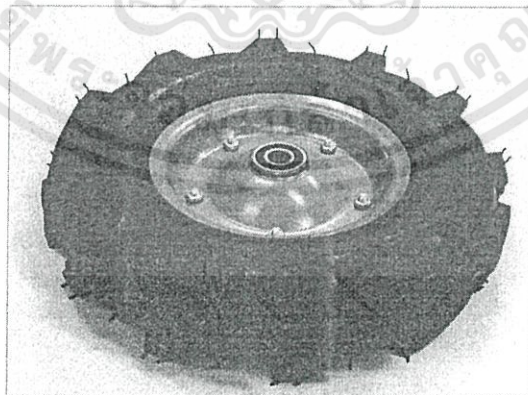
3.1 แผ่นอลูมิเนียม



รูปที่ 3.1 แผ่นอลูมิเนียมเกรดหนา

ใช้แผ่นอลูมิเนียมเกรดหนาจำนวน 2 แผ่น ซึ่งมีขนาด กว้าง 465 มิลลิเมตร ยาว 530 มิลลิเมตร โดยที่แผ่นหนึ่งจะทำหน้าที่ในการยึดติดอุปกรณ์ อาทิ มอเตอร์ แบตเตอรี่ บอร์ดควบคุม ฯลฯ ส่วนอีกแผ่นหนึ่งจะใช้สำหรับเป็นที่รองรับในขณะขับขี่ ซึ่งการที่เลือกแผ่นอลูมิเนียมเกรดหนานี้ เนื่องจากมีความสวยงามและมีความแข็งแรงเพียงพอต่อการรับน้ำหนักจำนวนมากได้

3.2 ล้อขับเคลื่อน

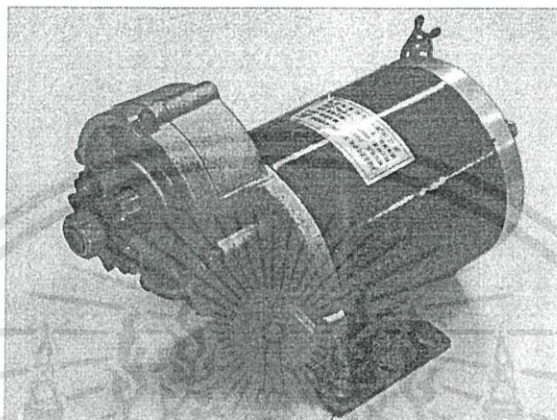


รูปที่ 3.2 ล้อ Segway

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้ล้อที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของกระทะล้อคือ 9 นิ้ว และความหนาของยางคือ 3.5 นิ้ว ซึ่งสามารถที่จะรับน้ำหนักได้สูงถึง 100 กิโลกรัมและสามารถที่จะวิ่งภายใต้ความเร็วของ Segway ที่ได้ทำการออกแบบไว้

3.3 มอเตอร์กระแสตรง



รูปที่ 3.3 มอเตอร์กระแสตรง

เลือกใช้มอเตอร์กระแสตรงมีเกียร์ทดขนาด 24 โวลต์ 500 วัตต์ โดยควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงได้ด้วยการจ่ายกระแสไฟฟ้าเป็นช่วงเวลา แต่ไม่สามารถที่จะควบคุมทิศทางการหมุนของมอเตอร์ได้ต้องใช้บอร์ดควบคุมมอเตอร์เข้ามาช่วยในการควบคุม

3.4 แบตเตอรี่

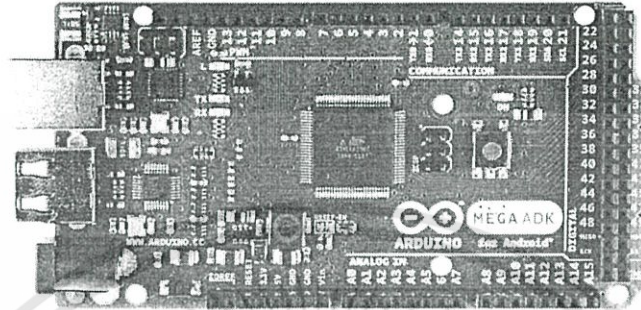


รูปที่ 3.4 แบตเตอรี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้แบตเตอรี่ขนาด 12 โวลต์ 9 แอมแปร์/ชั่วโมง 36 วัตต์ จำนวน 4 ก้อนเพื่อทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายพลังงานให้กับอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้อง

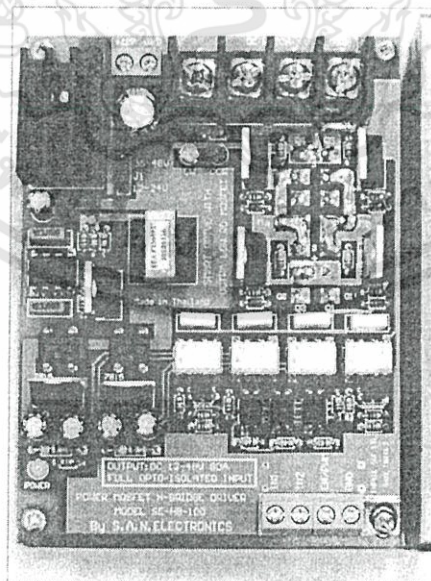
3.5 บอร์ดควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์



รูปที่ 3.5 บอร์ดควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mega ADK R3

ใช้บอร์ดควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Mega ADK R3 ซึ่งจัดว่าเป็นหน่วยประมวลผลกลาง (Central Processing Unit) ประเภทหนึ่งที่สามารถรับสัญญาณข้อมูลจากอุปกรณ์ภายนอกเพื่อนำมาคำนวณตัดสินใจ และส่งสัญญาณออกไปยังอุปกรณ์ภายนอกเพื่อสั่งให้ทำงานตามโปรแกรมที่เขียนขึ้น

3.6 บอร์ดควบคุมมอเตอร์

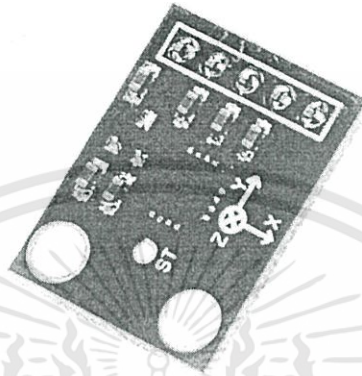


รูปที่ 3.6 บอร์ดควบคุมมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้สำหรับการควบคุมทิศทางของมอเตอร์ให้เป็นไปในทิศทางที่เราต้องการคือ ทวนเข็มและตามเข็มนาฬิกา โดยที่สามารถทนทานต่อแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านในวงจรได้ดี

3.7 เซนเซอร์แอกเซลเลอโรมิเตอร์



รูปที่ 3.7 เซนเซอร์แอกเซลเลอโรมิเตอร์

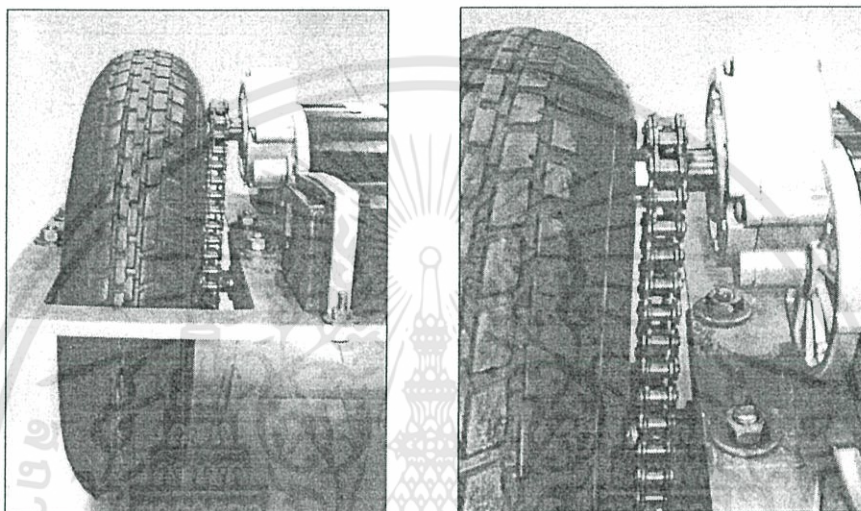
แอกเซลเลอโรมิเตอร์ เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดหนึ่งใช้ในการวัดความเร่งซึ่งสามารถประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย โดยเราใช้ แอกเซลเลอโรมิเตอร์ ในการวัดความเร่งที่เป็นแรงดึงดูดของโลกนั่นก็คือค่า g นั่นเอง ดังนั้นเราสามารถสรุปได้ว่าถ้าเรามีแอกเซลเลอโรมิเตอร์ เราก็สามารถวัดแรงโน้มถ่วงของโลกได้ ซึ่งแน่นอนมันสามารถจะวัดได้ทั้งปริมาณและทิศทางของความเร่ง

ข้อดีของแอกเซลเลอโรมิเตอร์ คือเมื่อ Segway มีการเอียงตัวค้างสถานะอยู่มันก็จะคงให้เอาต์พุตออกมาเพื่อที่จะบอกให้รู้สถานะของการเอียงของ Segway ค่าเอาต์พุตที่ได้นั้นสามารถที่จะเอามาทำการคำนวณมุมได้ ทั้งนี้แอกเซลเลอโรมิเตอร์ ไม่ใช่จะวัดความเอียงในขณะที่ Segway อยู่นิ่งๆเท่านั้นแต่แอกเซลเลอโรมิเตอร์ ยังสามารถวัดความเอียงแบบพลวัต (Dynamic) ได้ด้วย

3.8 การพัฒนาของ Segway จากหุ่นยนต์ต้นแบบ

3.8.1 ทางด้านโครงสร้างของ Segway

เนื่องจากในตอนแรกที่ทำโครงสร้าง Segway ขึ้นมานั้นมีปัญหาที่เกิดขึ้นกับโครงสร้าง Segway นั้นก็คือ การที่ล้อติดกับแผ่นลูมเนียม รวมถึงการที่ขอบยางของล้อติดกับแกนของมอเตอร์ทำให้ Segway ไม่สามารถที่จะเคลื่อนที่ได้ ดังนั้นจึงทำโครงสร้างขึ้นมาใหม่ขึ้นสองชั้นที่มีการเผื่อพื้นที่สำหรับอุปกรณ์ต่างๆให้สามารถจัดวางได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 3.8 ปัญหาที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างของ Segway

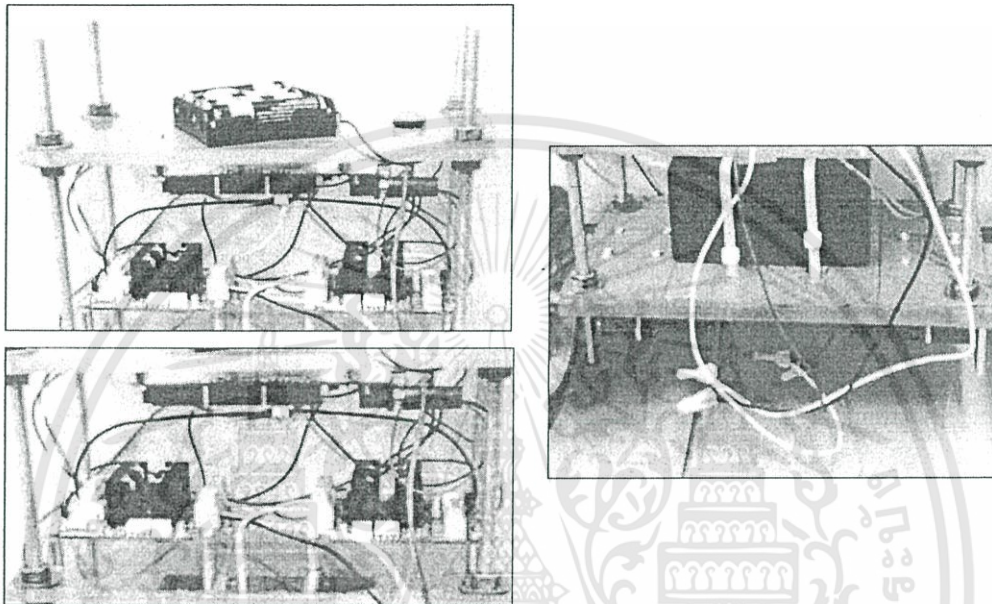


รูปที่ 3.9 การแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นกับโครงสร้างของ Segway

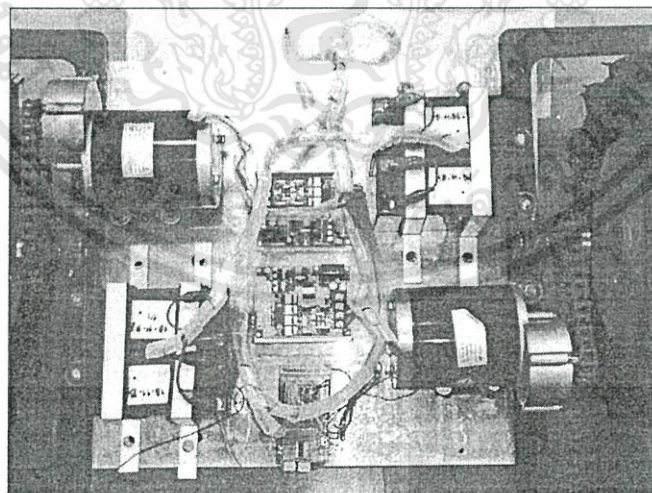
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.8.2 ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์

ในส่วนนี้จะเป็นการแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นกับหุ่นยนต์ขับเคลื่อนสองล้อสมดุด้วยตัวเองแล้วนำมาพัฒนากับการสร้าง Segway ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นปัญหาทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กล่าวคือการต่อสายไฟต่างๆจะต้องให้ดี แน่นหนา ตลอดจนอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆต้องวางไว้ในตำแหน่งที่เหมาะสมและเป็นระเบียบง่ายต่อการต่อสายไฟ ดังนี้

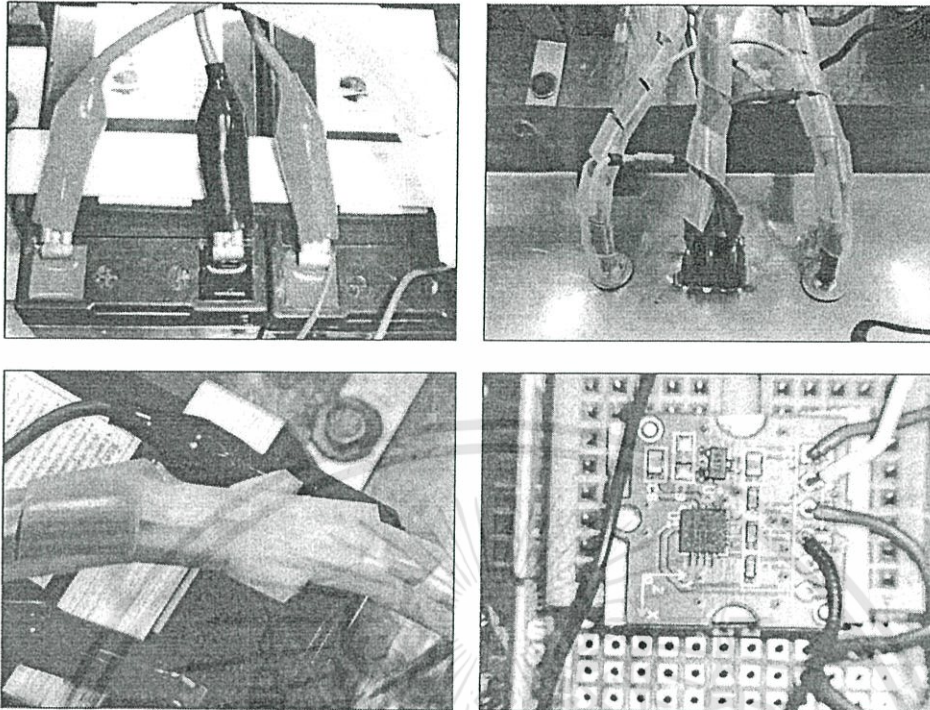


รูปที่ 3.10 ปัญหาทางอิเล็กทรอนิกส์ของหุ่นยนต์



รูปที่ 3.11 การวางอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อย่างเหมาะสม

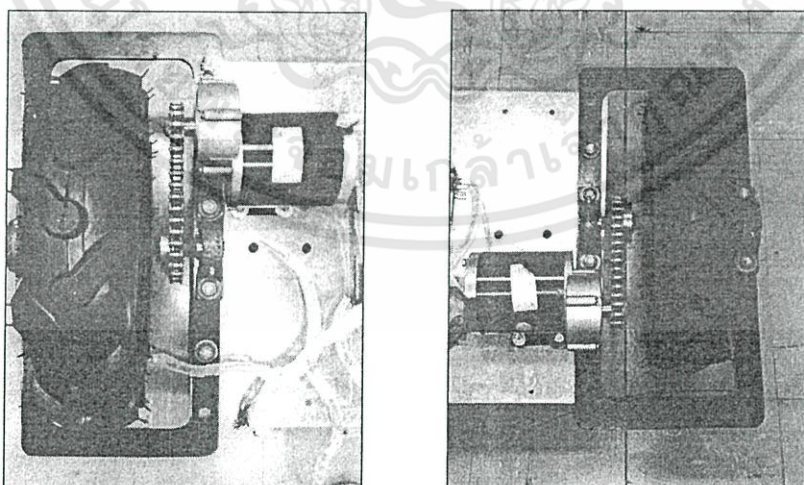
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 การต่อสายไฟที่เป็นระเบียบเรียบร้อย

หลังจากที่ทำการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นกับ Segway ไม่ว่าจะ เป็นปัญหาทางด้านโครงสร้างและ ปัญหาทางด้านอิเล็กทรอนิกส์เป็นที่เรียบร้อยแล้วต่อไปก็จะเป็นการประกอบโครงสร้างต่างๆเข้าด้วยกันดังต่อไปนี้

3.9 การติดตั้งล้อและมอเตอร์ของ Segway

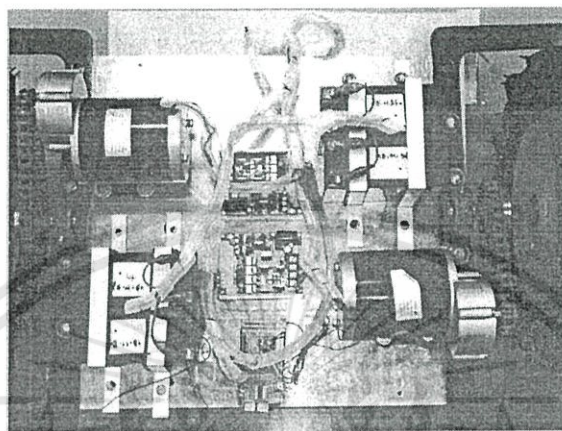


รูปที่ 3.13 การติดตั้งมอเตอร์และล้อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ล้อของ Segway นั้นจะมีการสวมเพลลาที่ได้เชื่อมเฟืองเอาไว้ ดังนั้นเมื่อทำการประกอบล้อ และติดตั้งมอเตอร์จะใช้เฟืองเป็นตัวเชื่อมระหว่างล้อกับมอเตอร์ทำให้ Segway สามารถเคลื่อนที่ได้

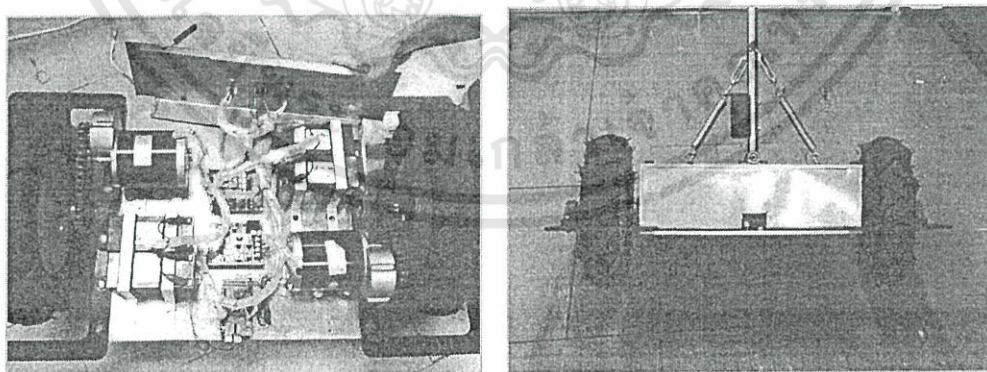
3.10 การติดตั้งอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์



รูปที่ 3.14 การติดตั้งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

อุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่ได้ทำการติดตั้งนั้นก็จะมีในส่วนของ บอร์ดควบคุม ไมโครคอนโทรลเลอร์ บอร์ดควบคุมมอเตอร์ เซนเซอร์ แบตเตอรี่ ซึ่งอุปกรณ์ต่างๆเหล่านี้จะเชื่อมต่อกันเป็นวงจร

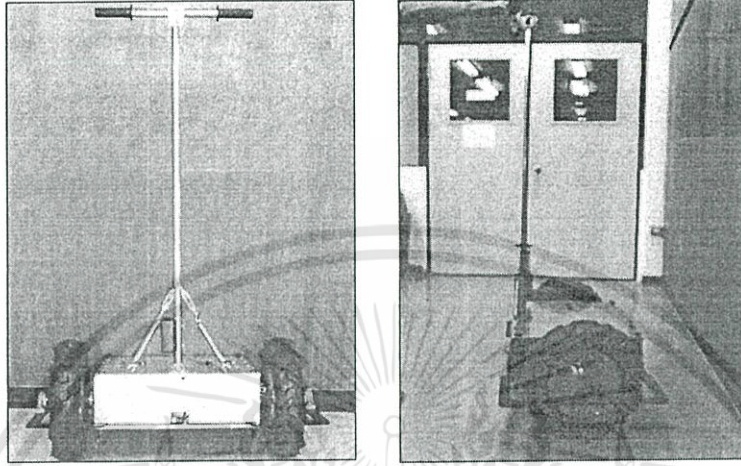
3.11 การติดตั้งโครงสร้างของ Segway



รูปที่ 3.15 การติดตั้งโครงสร้างของอุปกรณ์ทั้งหมด

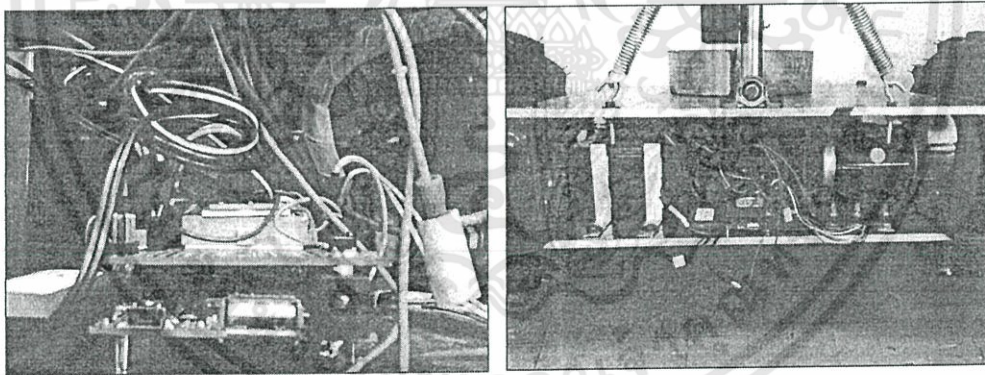
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลังจากที่ทำการติดตั้งส่วนต่างๆไม่ว่าจะเป็นล้อ มอเตอร์รวมถึงอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์เรียบร้อยแล้วขั้นตอนสุดท้ายก็คือการประกอบโครงสร้างของ Segway ทั้งหมดเข้าด้วยกันเพื่อให้สามารถนำไปใช้ในการทดสอบและใช้งานจริงในอนาคตต่อไปได้



รูปที่ 3.16 Segway ที่ได้ทำการประกอบเรียบร้อยแล้ว

3.12 การใช้งาน Segway

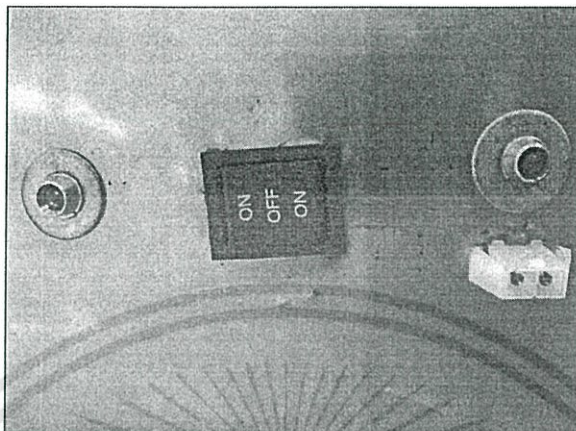


รูปที่ 3.17 จุดเชื่อมต่อเพื่อ upload โปรแกรมการทำงานให้กับ Segway

อย่างแรกคือต้องทำการ Upload โปรแกรมที่ได้ทำการเขียนไว้ผ่านหน่วยประมวลผลนั้นก็คือบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์นั่นเอง

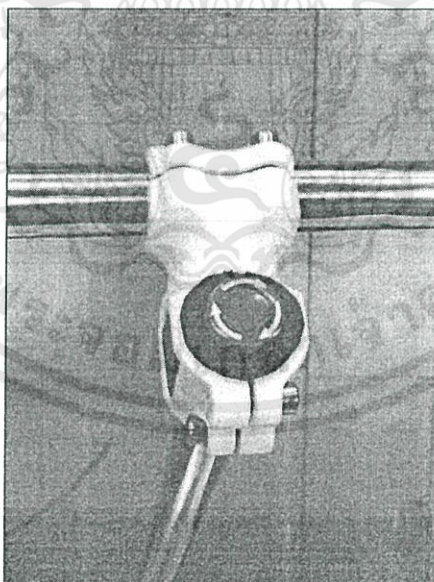
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนต่อไปคือการเปิดสวิตช์ โดยถ้าเปิดไปทางไฟสีเขียวจะเป็นการเปิดเครื่องแต่ถ้าเปิดไปทางซ้ายจะเป็นการชาร์จแบตเตอรี่ซึ่งไฟจะติดเมื่อทำการต่อสายชาร์จเข้ากับเครื่องชาร์จแล้ว



รูปที่ 3.18 สวิตช์ที่ใช้ในการเปิดเครื่องและชาร์จไฟของ Segway

ในขณะที่ใช้งาน Segway นั้นอาจจะเกิดเหตุขัดข้องบางอย่างซึ่งอาจจะก่อให้เกิดอันตรายต่อผู้ใช้งานได้ ดังนั้นจึงได้มีการทำสวิตช์ฉุกเฉินขึ้นมาบริเวณด้ามจับเพื่อใช้สำหรับปิดเครื่องในกรณีฉุกเฉินได้



รูปที่ 3.19 สวิตช์ฉุกเฉิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

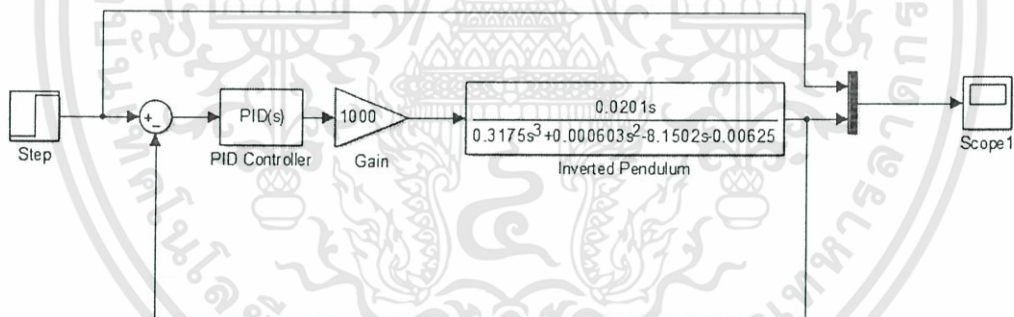
รูปแบบและผลการทดลอง

4.1 รูปแบบการทดลอง

รูปแบบของการทดลองคือการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของตัวควบคุมแบบ PID เพื่อให้ Segway สามารถทำงานได้ตามการตอบสนองที่ต้องการ โดยในการทดลองนี้จะเป็นการตรวจสอบว่าค่าตัวควบคุมแบบ PID ที่หามาจากฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ Inverted Pendulum กับที่ได้จากการทดลองนั้นมีค่าที่ตรงกันหรือมีความใกล้เคียงกันมากน้อยเพียงใด

4.2 วิธีการทดลอง

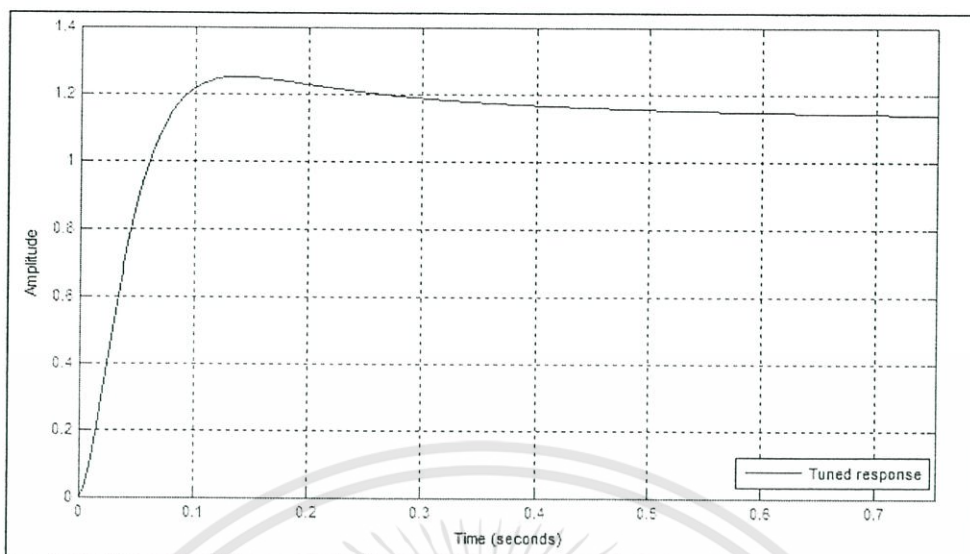
ทำการทดลองจากตัวเครื่องของเสกเวย์โดยตรงคือขั้นแรกพยายามจูนค่าเริ่มต้นให้ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากระบบของ Inverted Pendulum ที่ได้จากการ Simulation และดูการตอบสนองว่าเป็นไปตามที่ต้องการหรือไม่ จากนั้นจึงค่อยๆทำการปรับจูนค่าต่างๆของตัวควบคุมแบบ PID จากตัวเครื่อง Segway จนกระทั่งได้ค่าที่ต้องการกล่าวคือ ค่าที่สามารถทำให้ Segway ทำงานได้และมีการตอบสนองเป็นที่น่าพอใจ



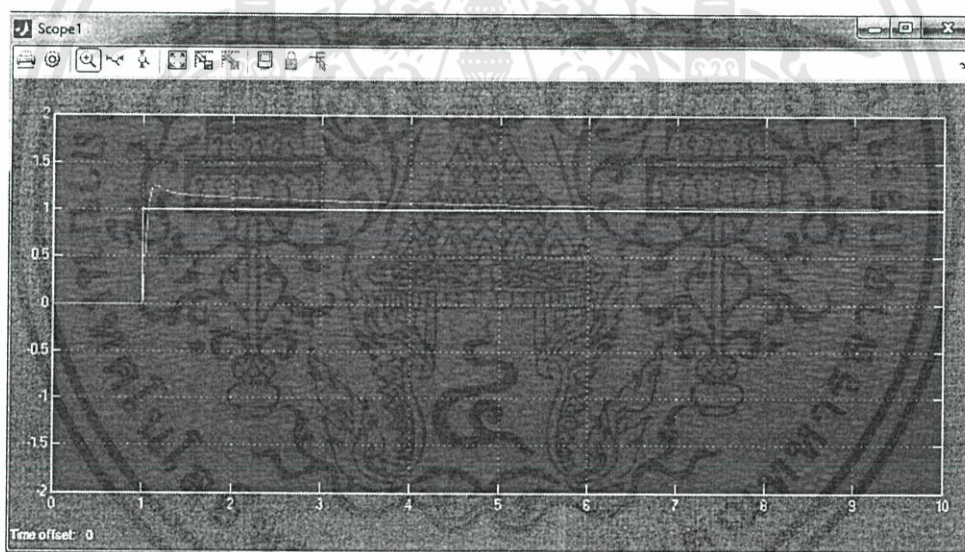
รูปที่ 4.1 แผนภาพ Block Diagram ของระบบ Inverted Pendulum

4.3 ผลการทดลอง

ทำการหาค่าของตัวควบคุมแบบ PID โดยการจูนค่าใน Simulink ในโปรแกรม MATLAB ในช่วงของการตอบสนองที่ต้องการจะได้กราฟของการตอบสนองและค่าของตัวควบคุมแบบ PID ดังนี้



รูปที่ 4.2 แสดงผลการตอบสนองของระบบ Inverted Pendulum



รูปที่ 4.3 แสดงกราฟการตอบสนองเมื่อเทียบกับ Step input ของระบบ Inverted Pendulum

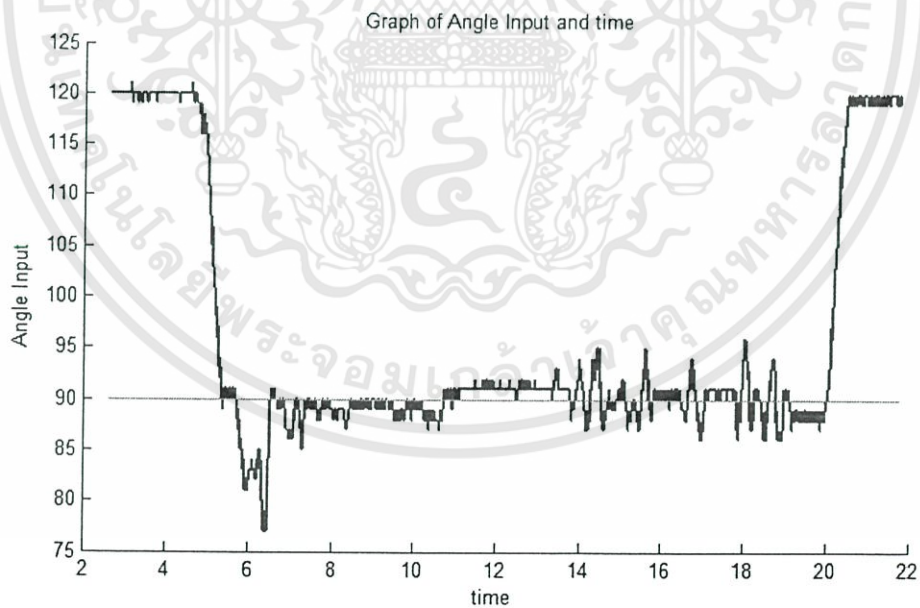
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองโดยใช้ Segway ในการจูนค่าต่าง ๆ นั้นจะได้ผลการทดลองดังนี้

Controller parameters		
	Tuned	Block
P	3.0178	3.0178
I	0.67857	0.67857
D	0.40542	0.40542
N	96.7362	96.7362

Performance and robustness		
	Tuned	Block
Rise time (seconds)	0.0426	0.0426
Settling time (seconds)	7.71	7.71
Overshoot (%)	24.9	24.9
Peak	1.25	1.25
Gain margin (rad/s)	-16.9 @ 1.29	-16.9 @ 1.29
Phase margin (rad/s)	60 @ 26.5	60 @ 26.5
Closed-loop stability	Stable	Stable

รูปที่ 4.4 แสดงค่าการตอบสนองของระบบ Inverted Pendulum



รูปที่ 4.5 แสดงกราฟค่ามุม Input กับ เวลาที่ได้จากการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

5.1 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

จากรูปที่ 4.1 จะพบว่าระบบ Inverted Pendulum จะเกิด ค่า Overshoot ค่อนข้างที่จะสูง นั่นคือมีค่าอยู่ที่ 24.9 % ซึ่งถ้ามองในเชิงของระบบ Segway แล้วก็อาจจะกล่าวได้ว่าการทำงานในช่วงแรกจะเกิดการพุ่งอย่างแรกจากสภาวะสมดุลซึ่งโดยส่วนใหญ่แล้วค่านี้มักจะไม่เกินที่ 10% หลังจากนั้นระบบก็จะเริ่มเข้าสู่สภาวะสมดุลจนกระทั่งสามารถทำงานได้

จากรูปที่ 4.5 จะพบว่าค่ามุมอ้างอิงของ Segway จะอยู่ที่ 90 องศา เมื่อทำการทดสอบโดยการทำให้ Segway มีการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าและถอยหลังก็จะพบว่าในช่วงแรกระบบยังไม่เข้าสู่สมดุลแต่เมื่อเวลาผ่านไปช่วงหนึ่งระบบก็จะเริ่มเข้าใกล้มุมอ้างอิงมากขึ้นและสามารถที่จะรักษาระดับของความสมดุลนี้ไว้ได้

จากการปรับจูนค่าตัวควบคุมแบบ PID จากการ Simulation และจากการทดลองปรับจากตัวเครื่องของ Segway นั้น จะพยายามปรับให้มีค่าใกล้เคียงกับค่าทางทฤษฎีก่อนเป็นหลักเพื่อเป็นตัวอ้างอิงว่าค่าที่ได้จากระบบ Inverted Pendulum นั้นจะสามารถทำให้ระบบของ Segway ซึ่งเป็นระบบจริงนั้นสามารถที่จะทำงานตามการตอบสนองได้หรือไม่ เมื่อทำการปรับจูนค่าแรกเป็นที่เรียบร้อยแล้วก็ลองดูการตอบสนองของระบบ ถ้าดูแล้วว่ายังไม่เพียงพอต่อความต้องการก็ทำการปรับจูนค่าจากตัวเครื่องไปเรื่อยๆจนได้ค่าที่น่าพอใจ ซึ่งจากการปรับจูนจากตัวเครื่องของ Segway จะได้ค่าตัวควบคุม PID ดังนี้

ค่า P controller มีค่าเท่ากับ 3

ค่า I controller มีค่าเท่ากับ 0.5

ค่า D controller มีค่าเท่ากับ 0.3

โดยค่าที่ทำการปรับจูนนั้นจะมีค่าที่ใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการ Simulation ของระบบ Inverted Pendulum และค่าตัวควบคุมแบบ PID ที่ได้จากการจูนนี้ก็สมารถที่จะทำให้ Segway นั้นทำงานได้ในระดับที่น่าพอใจ

5.2 ปัญหาที่เกิดขึ้นในขณะทำการทดลอง

เนื่องจาก Segway ที่ได้ทำการทดสอบนั้นอาจจะยังมีข้อผิดพลาดอยู่หลายประการ ไม่ว่าจะเป็นในส่วนของตัวโครงสร้าง และอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ที่นำมาใช้นั้นอาจจะยังไม่ดีพอหรือขาด

ความเที่ยงตรงและแม่นยำในการวัดค่าต่างๆ ดังนั้นจึงอาจทำให้ Segway ทำงานได้ไม่ดีนัก และค่าที่ได้จากการทดลองนั้นอาจจะเกิดความผิดพลาดได้

นอกจากนั้นในระหว่างการทดลองอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์บางอย่าง เช่น บอร์ดควบคุมมอเตอร์ มักจะเกิดความเสียหายซึ่งสาเหตุอาจจะเกิดขึ้นจากเรื่องของกระแสไฟฟ้าในวงจรที่ไม่คงที่ รวมถึงเซนเซอร์ที่บางครั้งก็ทำการตรวจจับค่าได้ไม่ดีนัก

5.3 ข้อเสนอแนะ

ก่อนที่จะสร้าง Segway มาจนถึง ณ จุดนี้มีปัญหาต่างๆเกิดขึ้นมากมายซึ่งการแก้ไขก็ได้ทำมาอย่างต่อเนื่องเพื่อให้ได้ Segway ที่มีโครงสร้างรวมถึงอุปกรณ์ต่างๆมีประสิทธิภาพสูงสุดเท่าที่จะทำได้ ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงจะกล่าวถึงปัญหาโดยรวมที่เกิดขึ้นเพื่อที่จะพัฒนาต่อยอดในเรื่องของการสร้าง Segway ให้มีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้นต่อไป

จนถึง ณ จุดนี้ Segway ที่ทำการสร้างขึ้นมานั้นสามารถที่จะทำงานตามการตอบสนองได้ในระดับหนึ่งแต่ปัญหาที่สำคัญที่สุดคือยังไม่สามารถที่จะให้คนขึ้นไปขี่ใช้ได้ดังนั้นสิ่งนี้ถือเป็นจุดสำคัญที่จะพัฒนาต่อไป โดยที่แนวทางของการศึกษานั้นก็ได้อธิบายไว้แล้วในบางส่วน นอกเหนือจากนี้อาจจะเป็นในส่วนของตัวอุปกรณ์หรือโครงสร้างของ Segway ที่จะต้องทำการปรับปรุงแก้ไขต่อไป

บรรณานุกรม

- [1] Ayça GÖÇMEN,2011,DESIGN OF TWO WHEELED ELECTRIC VEHICLE,A THESIS SUBMITTED TO THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF ATILIM UNIVERSITY
- [2] Christian Sundin, Filip Thorstensson (2012),Department of Signals and Systems, CHALMERS University of Technology, Autonomous balancing robot, Design and construction of balancing robot,2012
- [3] Control Tutorials for MATLAB & SIMULINKURL
URL:<http://ctms.engin.umich.edu/CTMS/index.php?example=InvertedPendulum§ion=Control>
- [4] ELEMENTS OF CONTROL SYSTEMS,Ganti Prasada Rao, International Centre for Water and Energy Systems, PO Box 2623, Abu Dhabi. UAE.
URL:<http://www.eolss.com/eolss/images/6.43.1.0Figure15.JPG>
- [5] Hamid Reza Memardashi (2010), Massey University, Design and Parametric Control of Co-axes driven two-wheeled balancing robot, 2010
- [6] John-David Warren,Josh Adams,and Harald Molle, 2009, Arduino Robotics,Technology in action
- [7] Khalil Sultan,2003,Inverted Pendulum Analysis, Design and Implementation, Instrumentation and Control Lab at the Institute of Industrial Electronics Engineering, Karachi, Pakistan.
- [8] M. A. Clark,J. B. Field,S. G. McMahon,andP. S. Philips,2005, EDGAR, A Self-Balancing Scooter,University of Adelaide, Faculty of Engineering, Computer & Mathematical Sciences, School of Mechanical Engineering
- [9] Mr Peter Miller (2008), University of Southern Queensland Faculty of Engineering and Surveying, Building a Two Wheeled Balancing Robot, 2008

[10] Rich Chi Ooi,2003,Balancing a Two-Wheeled Autonomous Robot,The University of Western Australia School of Mechanical Engineering,Final Year Thesis

[11] Segway ฟิสิกส์ราชมงคล

URL:[http:// www.rmutphysics.com/charud/howstuffwork/.../segway/index.htm](http://www.rmutphysics.com/charud/howstuffwork/.../segway/index.htm)

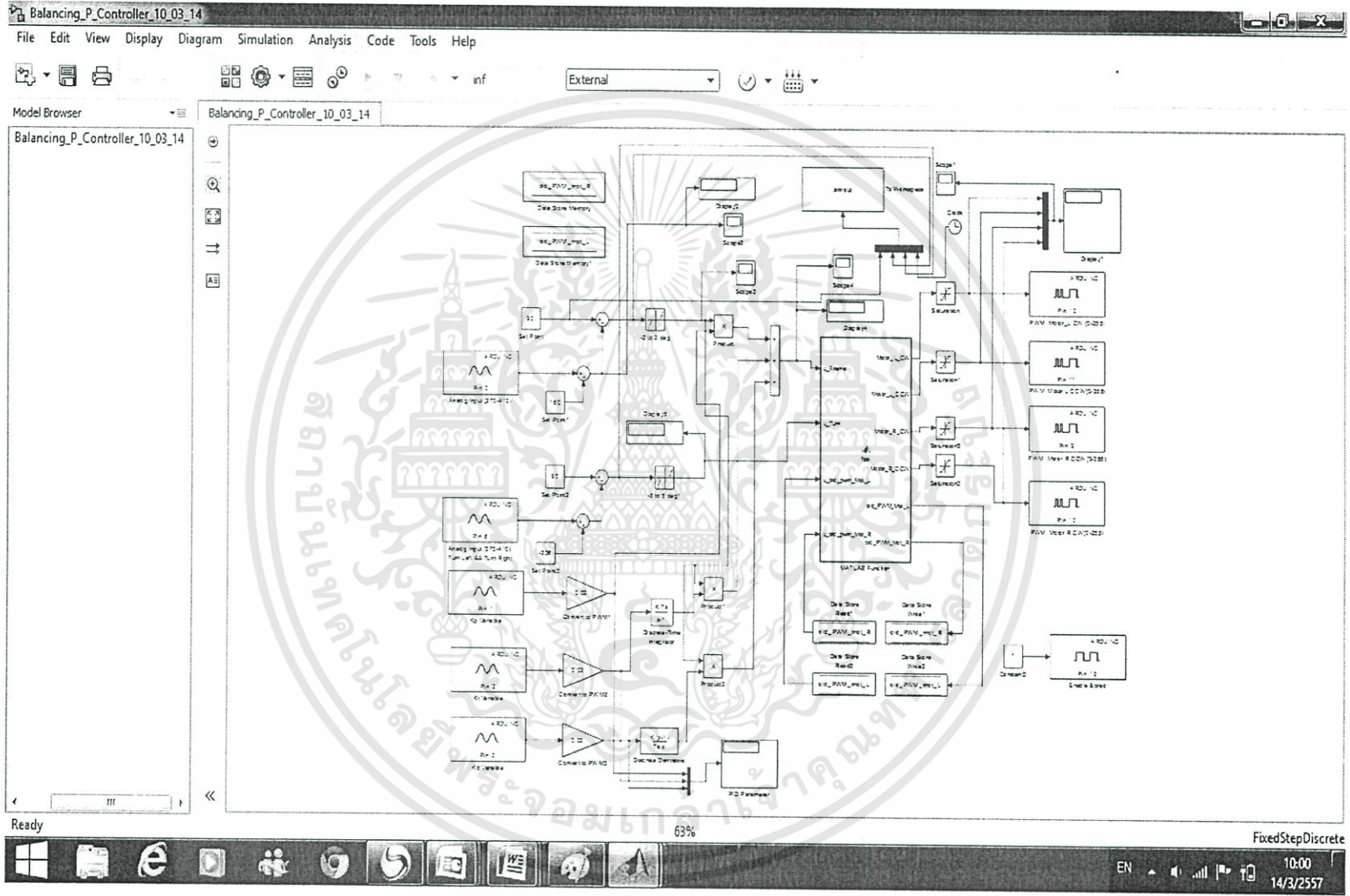
[12] System Dynamics, Mathematical Modeling of Engineering Systems, Case Study F - Dynamic Model of a Permanent Magnet DC Motor

URL:http://www.profjrwhite.com/system_dynamics/sdyn/s6/s6fmthm/s6fmthm.html



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผนภาพ Block Diagram ที่ใช้ทดสอบ Segway



ภาคผนวก ข

คำสั่งควบคุมการทำงานของมอเตอร์

```

function
[Motor_L_CW, Motor_L_CCW, Motor_R_CW, Motor_R_CCW, old_PWM_Mot_L, old_PWM_
Mot_R] ...
    = fcn(u_Frame, u_Turn, u_old_pwm_Mot_L, u_old_pwm_Mot_R)
%#codegen
Motor_L_CW=0;
Motor_L_CCW=0;
Motor_R_CW=0;
Motor_R_CCW=0;
old_PWM_Mot_L=0;
old_PWM_Mot_R=0;
if u_Frame > 0
%*****
    if u_old_pwm_Mot_L > u_Frame
        % forward
        Motor_L_CW = u_old_pwm_Mot_L - 1;
        Motor_L_CCW=0;
%*****
    end
    if u_old_pwm_Mot_R > u_Frame
        Motor_R_CW = u_old_pwm_Mot_R - 1;
        Motor_R_CCW=0;
    end
%*****
    if u_old_pwm_Mot_L < u_Frame
        Motor_L_CW = u_old_pwm_Mot_L + 1;
        Motor_L_CCW=0;
    end
%*****

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

if u_old_pwm_Mot_R < u_Frame
    Motor_R_CW = u_old_pwm_Mot_R + 1;
    Motor_R_CCW=0;
end
%*****

if u_Turn > 0
    Motor_R_CW = u_old_pwm_Mot_R - 1;
end

if u_Turn < 0
    Motor_L_CW = u_old_pwm_Mot_L -1 ;
end

if Motor_L_CW > 255
    Motor_L_CW = 255;
end
if Motor_R_CW > 255
    Motor_R_CW = 255;
end
if Motor_L_CW < 0
    Motor_L_CW=0;
end
if Motor_R_CW < 0
    Motor_R_CW = 0;
end
old_PWM_Mot_L = Motor_L_CW;
old_PWM_Mot_R = Motor_R_CW;

end
%*****

if u_Frame < 0
%*****
u_Frame = abs(u_Frame)

```

```

    if u_old_pwm_Mot_L > u_Frame
    % forward
        Motor_L_CCW = u_old_pwm_Mot_L - 1;
        Motor_L_CW=0;
    % *****

    end

    if u_old_pwm_Mot_R > u_Frame
        Motor_R_CCW = u_old_pwm_Mot_R - 1;
        Motor_R_CW=0;
    end

    % *****

    if u_old_pwm_Mot_L < u_Frame
        Motor_L_CCW = u_old_pwm_Mot_L + 1;
        Motor_L_CW=0;
    end

    % *****

    if u_old_pwm_Mot_R < u_Frame
        Motor_R_CCW = u_old_pwm_Mot_R + 1;
        Motor_R_CW=0;
    end

    % *****

    if u_Turn > 0
        Motor_R_CCW = u_old_pwm_Mot_R - 1;
    end

    if u_Turn < 0
        Motor_L_CCW = u_old_pwm_Mot_L - 1 ;
    end

    if Motor_L_CCW > 255
        Motor_L_CCW = 255;
    end

    if Motor_R_CCW > 255

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
        Motor_R_CCW = 255;
    end
    if Motor_L_CCW < 0
        Motor_L_CCW=0;
    end
    if Motor_R_CCW < 0
        Motor_R_CCW = 0;
    end
    old_PWM_Mot_L = Motor_L_CCW;
    old_PWM_Mot_R = Motor_R_CCW;

end
end
```



ภาคผนวก ค

การคำนวณหาขนาดของมอเตอร์ที่นำมาใช้งาน

สามารถย้อนกลับไปศึกษาได้ในหัวข้อที่ 2.2 เรื่องกลศาสตร์ของ Segway กล่าวคือในการที่จะคำนวณหาขนาดของมอเตอร์ที่จะนำไปใช้งานนั้นมีความจำเป็นที่จะต้องทราบถึงแรงที่ใช้ตลอดจนความเร็วของ Segway ที่ได้ทำการออกแบบเอาไว้ โดยในตอนนี้จะกล่าวโดยสรุปเท่านั้น จากหัวข้อที่ 2.2 จะทราบถึงแรงที่กระทำต่อ Segway ดังนี้

1. แรงที่กระทำเนื่องจากอากาศซึ่งมีค่า $F_{air} = 31.24N$
2. แรงเนื่องจากความเสียดทานซึ่งมีค่า $F_{friction} = 19.23N$
3. แรงเนื่องจากความลาดชันซึ่งมีค่า $F_{Slope} = 12.55N$

ดังนั้นเมื่อทำการรวมแรงเหล่านี้ก็จะได้เป็นแรงรวมที่ Segway สามารถที่จะใช้ไปเพื่อทำให้เกิดการเคลื่อนที่ได้ นั่นคือ $F_{total} = 63.02N$ จากนั้นก็จะสามารถคำนวณหาขนาดของมอเตอร์ได้โดยอาศัยสมการ $P = Fv$ เมื่อ v เป็นความเร็วสูงสุดของ Segway ที่ได้ทำการออกแบบไว้ซึ่งให้มีค่าเท่ากับ $20km/hr$ หรือ ประมาณ $5.56m/s$ และเมื่อแทนค่าต่างๆในสมการก็จะได้กำลังที่นำมาใช้งานนั้นก็คือ 350.39 วัตต์ แต่เลือกใช้จริงอยู่ที่ 500 วัตต์ซึ่งถ้ามองดูแล้วถือได้ว่ามีขนาดใหญ่เกินความจำเป็นแต่ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับกรออกแบบโครงสร้างตลอดจนค่าตัวแปรต่างๆที่มีผลต่อการคำนวณ

โดยค่าที่ทำการออกแบบไว้ดังนี้

ความเร็วสูงสุดของ Segway (v) เท่ากับ $20km/hr$

มวลของผู้ขี่ (m) เท่ากับ $80kg$

ความสูงของผู้ขี่ (h) เท่ากับ $180cm$

ความชันของระดับพื้น (s) เท่ากับ $\frac{\pi}{6} rad$

น้ำหนักของตัวรถ M_{car} เท่ากับ $30kg$

น้ำหนักแบตเตอรี่ M_{bat} เท่ากับ $10kg$

ซึ่งค่าต่างๆที่ได้ทำการกำหนดขึ้นนี้เป็นเพียงการประมาณเท่านั้นถ้าต้องการความแม่นยำควรที่จะนำไปชั่งน้ำหนักเพื่อหาค่าน้ำหนักที่แท้จริงและค่าตัวแปรต่างๆเหล่านี้สามารถที่จะเปลี่ยนแปลงได้ตามความเหมาะสมของการออกแบบ

ภาคผนวก ง

การคำนวณเกี่ยวกับฟังก์ชันถ่ายโอน

ในส่วนของฟังก์ชันถ่ายโอนจะมีอยู่สองส่วนด้วยกันคือในส่วนของระบบ Inverted Pendulum และมอเตอร์กระแสตรง แต่ที่นำมาพิจารณาจริงๆคือในส่วนของระบบ Inverted Pendulum เนื่องจากเป็นส่วนที่มองว่ามีความคล้ายคลึงกับ Segway มากกว่าส่วนมอเตอร์นั้นมองแต่เพียงว่าเป็นตัวที่ใช้ในการส่งกำลังเพื่อทำให้ Segway นั้นสามารถที่จะเคลื่อนที่ได้ซึ่งมีคำสั่งที่ใช้ในการควบคุมที่ค่อนข้างชัดเจนอยู่แล้ว อีกส่วนหนึ่งที่ไม่ได้นำมอเตอร์กระแสตรงมาพิจารณาฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบนั้นเนื่องจากมีตัวแปรที่ไม่ทราบค่าหลายตัวแปรและการคำนวณมีลักษณะที่ซับซ้อนกว่าระบบ Inverted Pendulum

ในส่วนต่อไปนี้จะกล่าวถึงการหาค่าของฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ Inverted Pendulum ในเชิงตัวเลขดังนี้

$$\frac{\Phi(s)}{F(s)} = \frac{\frac{ml}{q}s}{s^3 + \frac{b(I+ml^2)}{q}s^2 - \frac{mgl(M+m)}{q}s - \frac{bmgl}{q}}$$

โดย $q = (M+m)(I+ml^2) - (ml)^2$

เมื่อ m คือมวลของ Pendulum ซึ่งอาจจัดว่าเป็นคนที่ขึ้นไปยืนบน Segway นั้นเอง

M คือมวลของตัวเครื่อง Segway ทั้งหมด

b คือสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ตัวรถหรือล้อของ Segway ซึ่งมีค่าค่อนข้างน้อยมาก

l เป็นความยาวของเพนดูลัมซึ่งก็เทียบได้กับความสูงของคนนั่นเอง

I เป็นโมเมนต์ความเฉื่อยเชิงมวลของเพนดูลัมซึ่งก็เทียบได้กับโมเมนต์ความเฉื่อยเชิงมวลของคนนั่นเอง

g เป็นความเร่งเนื่องจากความโน้มถ่วงของโลก

โดยหลักๆแล้วค่าตัวแปรบางตัวก็จะนำมาจากค่าที่นำไปใช้คำนวณกำลังของมอเตอร์เช่นเดียวกันกล่าวคือ

$$M = M_{Car} + M_{Bat} = 40kg$$

$$m = m_{Rider} = 80kg$$

l เป็นครึ่งหนึ่งของความสูงของคนที่ออกแบบไว้ที่ค่า $0.9m$

ส่วนการคำนวณค่าของ I นั้นจะใช้สมการ $I = mL^2$ เมื่อ L คือความสูงของคนมีค่า $0.18m$

ดังนั้นจะได้ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยเชิงมวลของเพนดูลัมดังนี้

$$I = (80)(0.18)^2 = 2.592$$

ส่วนค่าของ b นั้นจะสมมติว่ามีค่า $0.1N/m/sec$ จากนั้นจึงทำการแทนค่าต่างๆลงในสมการ ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ Inverted Pendulum จะได้

$$\frac{\Phi(s)}{F(s)} = \frac{0.0201s}{s^3 + 0.0019s^2 - 25.670s - 0.0197}$$

ซึ่งค่าฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ Inverted Pendulum ที่ได้นี้จะนำไปใช้ในการหาค่าตัวควบคุมแบบ PID ต่อไป และฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบ Inverted Pendulum อีกรูปหนึ่งคือ

$$\frac{\Phi(s)}{T(s)} = \frac{\frac{ml}{q}s}{s^3 + \frac{b(I+ml^2)}{q}s^2 - \frac{mg(M+m)}{q}s - \frac{bmg}{q}} \left(\frac{1}{r}\right)$$

ในการทำงานเดียวกันเมื่อทำการแทนค่าต่างๆลงในสมการ เมื่อ r มีค่าเท่ากับ 9 นิ้ว หรือ $0.2286m$ จะได้อัตราดังนี้

$$\frac{\Phi(s)}{T(s)} = \frac{0.0201s}{0.3175s^3 + 0.000603s^2 - 8.1502s - 0.00625}$$

ในการเลือกใช้ฟังก์ชันถ่ายโอนจะเลือกรูปแบบใดมาใช้ก็ได้โดยที่ค่าที่ได้จะมีความใกล้เคียงกันขึ้นอยู่กับ การจูนค่าตามการตอบสนองที่ต้องการ

ภาคผนวก จ

การเลือกซื้ออุปกรณ์

ควรซื้ออุปกรณ์ที่ได้มาตรฐานและเป็นของแท้ เพราะถ้าซื้อของเลียนแบบมาใช้บางครั้งอาจจะพบว่าอุปกรณ์ดังกล่าวทำงานได้ไม่เต็มศักยภาพตามที่ควรจะเป็น ถ้าจะซื้อเซนเซอร์วัดมุม สามารถเข้าไปที่เว็บไซต์นี้ <http://instrument.edm.co.th/sensors/inclination.html>

แล้วดูที่ Inclination Sensors : 1 axis Voltage Output รหัสสินค้า QG30-KI-090H-AV-K ที่มีสเปกคือ Range: +90o, Output: 0.5-4.5 Vdc ในราคา 10000 บาท

ส่วนบอร์ด Arduino ให้เข้าเว็บไซต์ <http://www.thaieasyelec.com/> แล้วสั่งซื้อบอร์ดของแท้มาใช้เลย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้