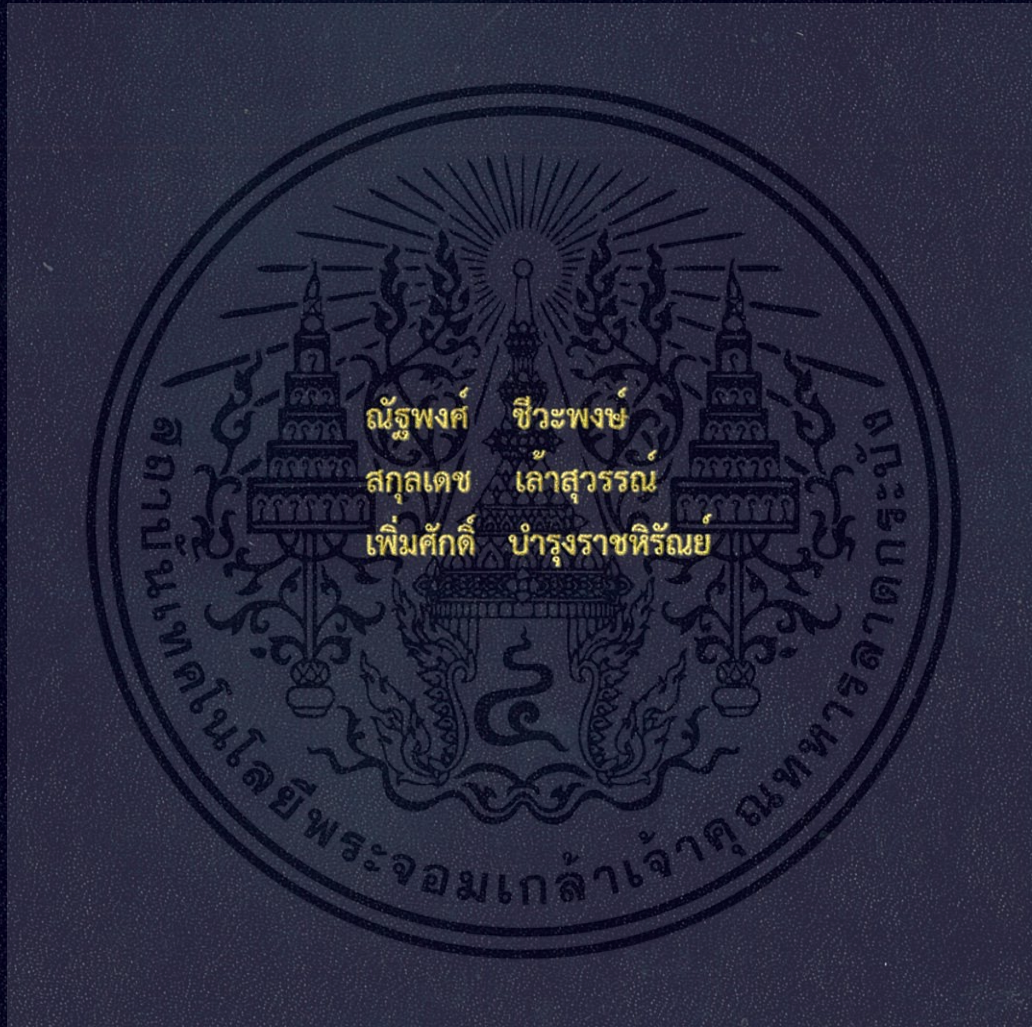


การพัฒนา Segway เพื่อการศึกษาระบบอัตโนมัติ

Segway Improvement for Studying the Control System



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2557

การพัฒนา Segway เพื่อการศึกษาระบบอัตโนมัติ

Segway Improvement for Studying the Control System



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2557

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Segway Improvement for Studying the Control System



Nattapong Cheevapong
Sakuldech Laosuwan
Permsak Bumrungrathirun

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN MECHANICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2014

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ปีการศึกษา 2557

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การพัฒนา Segway เพื่อการศึกษาระบบอัตโนมัติ

Segway Improvement for Studying the Control System

ผู้จัดทำ

- | | | |
|----------------------------------|--------------|----------|
| 1.นายณัฐพงศ์ ชีวะพงษ์ | รหัสประจำตัว | 54010414 |
| 2.นายสกุลเดช เล้าสุวรรณ | รหัสประจำตัว | 54011309 |
| 3.นายเพิ่มศักดิ์ บำรุงราชหิรัณย์ | รหัสประจำตัว | 54010960 |



ณัฐภูมิ เดไปทา
(ผศ.ดร. ณัฐภูมิ เดไปทา)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การพัฒนา Segway เพื่อการศึกษาระบบอัตโนมัติ

นายณัฐพงศ์ ชีวะพงษ์	54010414
นายสกุลเดช เล้าสุวรรณ	54011309
นายเพิ่มศักดิ์ บำรุงราชหิรัณย์	54010960
ผศ.ดร. ณัฐวุฒิ เตไปวา	อาจารย์ที่ปรึกษา ปีการศึกษา 2557

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์เรื่อง การพัฒนา Segway เพื่อการศึกษาระบบอัตโนมัติ มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการปรับปรุงและพัฒนาโครงสร้าง,ระบบควบคุมของ Segway และเพื่อให้สามารถนำไปใช้เป็นชุดทดลองสำหรับศึกษาระบบอัตโนมัติ ซึ่งปัญหาที่พบคือเรื่องการออกแบบโครงสร้าง, ระบบส่งกำลัง และระบบควบคุมที่นำมาใช้ยังมีประสิทธิภาพไม่เพียงพอต่อการควบคุมเครื่อง Segway ให้รักษาสมดุลในขณะที่มีผู้ขับขี่ ดังนั้นจึงทำการศึกษาและปรับเปลี่ยนโครงสร้าง, ระบบส่งกำลังของมอเตอร์ และระบบควบคุมการทำงาน โดยทำการลดน้ำหนักโครงสร้างของ Segway, เพิ่มอัตราทดของมอเตอร์, เปลี่ยนระบบควบคุมใหม่ให้สอดคล้องกับทฤษฎีอินเวอร์ทเพนดูลัม และทำการทดลองผลการตอบสนองอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรควบคุมแบบพีไอดี ซึ่งผลจากการปรับปรุงโครงสร้างและระบบควบคุมของ Segway พบว่าเครื่อง Segway สามารถเคลื่อนที่และสามารถรักษาสมดุลในตัวเองได้ขณะที่มีผู้ขับขี่ รวมถึงสามารถปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรควบคุมแบบพีไอดี เพื่อศึกษาผลการตอบสนองที่มีต่อระบบ

คำสำคัญ: ระบบควบคุม, อินเวอร์ทเพนดูลัม, พีไอดี

Segway Improvement for Studying the Control System

Mr.Nattapong Cheevapong	54010414
Mr.Sakuldech Laosuwan	54011309
Mr.Permsak Bumrungrathirun	54010960
Asst.Prof.Dr.Nattawoot Depaiwa	Project Advisor
Year 2014	

Abstract

The purposes of this study are to modify and improve the structural model, control system and can be used as the experimental equipment in automatic control laboratory. The problem is the inefficiency of the structural design, the transmission system and the control system which makes the Segway cannot keep balance of itself while containing the user's load. This study aims to solve the problems by lighten the structure of Segway, increase the gear ratio, design new control system according to the Invert Pendulum theory and test the system's response after adjusted the PID control values. For the results, the Segway can be driven and keep balancing while containing the user's load. Moreover, the Segway can be adjusted the PID control values for studying the system's response

Keywords: Control system, Inverted Pendulum, PID

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องด้วยได้รับความช่วยเหลือจาก ผศ.ดร.ณัฐวุฒิ เตไปวา อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์ที่ได้ให้ความรู้ที่จำเป็นต้องใช้ในการทำงานวิจัย ให้คำแนะนำ และตรวจสอบแก้ไขในการดำเนินงานปริญญาานิพนธ์ ผู้วิจัยมีความสำนึกในความกรุณาและถือเป็นที่พระคุณอย่างยิ่ง

ขอขอบพระคุณพี่เต็ม นักศึกษาระดับปริญญาเอกภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลที่ได้คอยให้ความช่วยเหลืออย่างต่อเนื่องเสมอมาในการแก้ไขปัญหา คอยให้คำแนะนำจนปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ประสบความสำเร็จ

สุดท้ายนี้ทางผู้วิจัยขอขอบพระคุณบิดา มารดาและครอบครัวที่ได้เลี้ยงดูส่งเสียให้ผู้วิจัยได้รับโอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ ตลอดจนคอยช่วยเหลือและให้กำลังใจเสมอมา ขอขอบพระคุณคณาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลทุกท่าน ที่ได้คอยประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้จนกระทั่งผู้วิจัยประสบความสำเร็จในระดับปริญญาตรี ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณอันสุดประมาณ และขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

นายณัฐพงศ์ ชีวะพงษ์

นายสกุลเดช เล้าสุวรรณ

นายเพิ่มศักดิ์ บำรุงราชหิรัณย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	i
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ii
กิตติกรรมประกาศ.....	iii
สารบัญ.....	iv
สารบัญตาราง.....	viii
สารบัญภาพ.....	ix
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.6 ขั้นตอนการศึกษา.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1.1 ทฤษฎีของ Inverted Pendulum.....	4
2.1.2 ทฤษฎีของมอเตอร์กระแสตรง.....	9
2.1.3 ทฤษฎีการควบคุมอัตโนมัติ.....	12
2.1.3.1 ความหมายและคำนิยามของระบบควบคุม.....	12
2.1.3.2 รูปแบบของการควบคุม.....	13
2.1.3.2.1 ระบบควบคุมแบบวงรอบเปิด (Open Loop Control).....	13
2.1.3.2.2 ระบบควบคุมแบบวงรอบปิด (Closed Loop Control).....	13
2.1.4 แรงต้านการเคลื่อนที่ระหว่างที่ล้อหมุนบนพื้นผิว.....	15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	17
2.2.1 งานวิจัยของ Khalil Sultan, Institute of Industrial Electronics Engineering ประเทศปาเกีสถานเรื่อง “Inverted Pendulum , Analysis, Design and Implementation”	17
2.2.2 งานปริญญาานิพนธ์ของ Rich Chi Ooi ,University of Western Australia, School of Mechanical Engineering เรื่อง “Balancing a Two-Wheeled Autonomous Robot”	18
2.2.3 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”	18
บพที่ 3 วิธีดำเนินงาน.....	20
3.1 วิเคราะห์ปัญหาและการแก้ไข.....	20
3.1.1 ปัญหาทางด้านโครงสร้าง.....	20
3.1.1.1 ปัญหาทางด้านน้ำหนัก.....	20
3.1.1.2 ปัญหาทางด้านโครงสร้างยึดส่วนล้อ.....	21
3.1.1.3 ปัญหาความไม่สมดุลของโครงสร้าง.....	22
3.1.2 ปัญหาทางด้านระบบส่งกำลัง.....	23
3.2 เปรียบเทียบวัสดุและอุปกรณ์ในการสร้าง Segway.....	24
3.3 อุปกรณ์ในการสร้าง Segway.....	25
3.3.1 โครงสร้างคาร์บอนสตีล (กลอง).....	25
3.3.2 ล้อขับเคลื่อน.....	26
3.3.3 มอเตอร์.....	26
3.3.4 แบตเตอรี่.....	27
3.3.5 เกียร์.....	27
3.3.6 แบริ่ง.....	28
3.3.7 เพลา.....	28
3.3.8 เซนเซอร์แอกเซลโรมิเตอร์.....	29
3.3.9 Snubber Capacity.....	29
3.3.10 บอร์ดควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์.....	30
3.3.11 บอร์ดควบคุมมอเตอร์.....	30
3.4 การติดตั้งอุปกรณ์.....	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.1 การติดตั้ง แบร็ริงและเพลลา.....	31
3.4.2 การติดตั้ง แบร็ริง.....	31
3.4.3 การติดตั้งบอร์ดขับมอเตอร์.....	32
3.4.4 การติดตั้งมอเตอร์.....	32
3.4.5 การติดตั้งแบตเตอรี่.....	33
3.4.6 การติดตั้งล้อขับเคลื่อน และเฟือง.....	33
3.4.7 การติดตั้งบอร์ดควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์.....	34
3.4.8 การติดตั้งเซนเซอร์แอคเซลเลอโรมิเตอร์.....	34
3.4.9 การติดตั้งแขนจับ.....	35
3.4.10 การติดตั้งสวิทช์เปิดปิดเครื่อง.....	35
3.5 หุ่นยนต์จำลองเครื่องเซกเวย์.....	36
บทที่ 4 วิธีการและผลการทดลอง.....	37
4.1 ขอบเขตการทดลอง.....	37
4.2 วิธีการทดลอง.....	37
4.3 ผลการทดลอง.....	38
บทที่ 5 สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	42
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	42
5.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....	42
5.3 ปัญหาที่สามารถแก้ไขและพัฒนาได้.....	43
5.4 ข้อเสนอแนะ.....	43
บรรณานุกรม.....	44
ภาคผนวก.....	45
ภาคผนวก ก.....	45
คำสั่งควบคุมการทำงานของมอเตอร์.....	45
Kalman.....	48
Motors.....	50
PID.....	52
Sensors.....	54
ภาคผนวก ข.....	57
การออกแบบโครงสร้าง.....	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การออกแบบโครงสร้าง เครื่อง Segway.....	57
การออกแบบขนาดเพลลา.....	57
ภาคผนวก ค.....	58
การคำนวณขนาดมอเตอร์และเฟือง.....	58



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานการหมุนในรูปแบบต่างๆ.....	16
3.1 เปรียบเทียบน้ำหนักชิ้นส่วนและอุปกรณ์.....	21
3.2 แสดงการเปรียบเทียบวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ก่อนและหลัง.....	24
5.1 ค่าตัวแปรควบคุม PID ที่ใช้ในการทดลอง.....	42



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อภาว VIII เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่ที่	หน้า
2.1 แผนภาพวัตถุอิสระ (FBD) ของระบบInverted Pendulum.....	4
2.2 แผนภาพมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง.....	9
2.3 แผนภาพระบบเชิงกลแบบหมุน.....	11
2.4 ส่วนประกอบของระบบควบคุม.....	12
2.5 ระบบควบคุมแบบวงรอบเปิด.....	13
2.6 ระบบควบคุมแบบวงรอบปิด.....	13
2.7 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ.....	14
2.8 ตัวควบคุมแบบ PID.....	15
2.9 แสดงแรงต้านการเคลื่อนที่ระหว่างล้อกับพื้นผิว.....	15
2.10 งานวิจัยของ Khalil Sultan เรื่อง Inverted Pendulum.....	17
2.11 หุ่นยนต์ขับเคลื่อนสองล้อสมดุลด้วยตัวเอง.....	18
2.12 รถ Scooter สองล้อ EDGAR.....	19
3.1 แสดงถึงโครงสร้างของ Segway ก่อนที่จะทำการปรับปรุง.....	20
3.2 การยึดส่วนล้อของ Segway ก่อนทำการปรับปรุง.....	22
3.3 แสดงการจัดวางของอุปกรณ์ใหม่.....	22
3.4 การส่งกำลังโดยใช้โซ่.....	23
3.5 จำลองการส่งกำลังโดยใช้เฟือง.....	23
3.6 โครงสร้างเหล็กกล่อง ของเครื่อง Segway.....	25
3.7 ล้อขับเคลื่อน Segway.....	26
3.8 มอเตอร์ DC ขนาด 450 วัตต์.....	26
3.9 แบตเตอรี่ขนาด 12V 9Ah/20hr.....	27
3.10 (ก) เฟือง 80 ฟัน , (ข) เฟืองใหญ่ 80 ฟัน ขบกับ เฟืองเล็ก 21 ฟัน	27
3.11 แบริงยึดเพลลา.....	28
3.12 เพลลา.....	28
3.13 แอคเซลเลอโรมิเตอร์.....	29
3.14 snubber capacity ขนาด 16 μ F 400V.....	29
3.15 บอร์ดควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์.....	30
3.16 บอร์ดขับเคลื่อน.....	30
3.17 แสดงการจัดวางตำแหน่ง เพลลาและแบริงที่จุดศูนย์กลางของเครื่อง.....	31
3.18 แสดงการติดตั้งแบริง.....	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.19 แสดงการติดตั้งบอร์ดขับเคลื่อนมอเตอร์.....	32
3.20 (ก) แสดงการจัดวางมอเตอร์ด้านข้าง (ข) แสดงการจัดวาง มอเตอร์ ด้านหลัง.....	32
3.21 แสดงการจัดวาง แบตเตอรี่ ด้านหลังเครื่อง.....	33
3.22 แสดงการสวมล้อขับเคลื่อนและเฟืองเข้ากับเพลลา.....	33
3.23 แสดงการจัดวางบอร์ดควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์บนตัวเครื่อง.....	34
3.24 แสดงการจัดวางเซนเซอร์แอกเซลเลอโรมิเตอร์.....	34
3.25 แสดงการติดตั้งแขนจับ.....	35
3.26 แสดงการติดตั้งสวิทช์เปิดปิดเครื่อง.....	35
3.27 หุ่นยนต์จำลองเครื่อง Segway (ก)ด้านหน้า, (ข) ด้านบน และ (ค)ด้านข้าง.....	36
4.1 แสดง Block Diagram ของระบบ.....	37
4.2 แสดง Block Diagram ของระบบ เมื่อสมมติให้ มนุษย์คือ controller เพิ่มอีกตัว.....	38
4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมเอียงของหุ่นจำลองเครื่องSegwayกับเวลา.....	39
4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมเอียงของเครื่อง Segway และค่าของPIDที่เหมาะสม.....	39
4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมเอียงของเครื่อง Segway และค่าของPIDที่มากเกินไป.....	40
4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมเอียงของเครื่อง Segway และค่าของPIDที่น้อยเกินไป.....	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการ **X** วิชาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เศรษฐีนักประดิษฐ์นายติน คาเมน นักประดิษฐ์ชาวอเมริกัน คิดค้นนวัตกรรมเป็นยานพาหนะรูปแบบใหม่ ที่เรียกขานกันว่า เซกเวย์ ฮิวแมน ทรานส์พอร์ตเตอร์ (Segway Human Transporter) ซึ่งคาดว่าจะเข้ามาแทนที่รถยนต์ในอนาคต อันจะทำให้เกิดการปฏิวัติด้านการคมนาคมในเมืองหลวงครั้งใหญ่ นายคาเมน ซึ่งคิดค้นยานพาหนะในอนาคต ได้ประดิษฐ์นวัตกรรมด้านยานยนต์นี้ โดยมีรูปทรงคล้ายคลึงกับเครื่องตัดหญ้า ที่ติดตั้งเครื่องยนต์โรตารีผสมผสานกับสก็ูเตอร์ สามารถเคลื่อนที่เดินหน้า ถอยหลัง เลี้ยวซ้าย-ขวา หมุนตัวและหยุดโดยไม่ต้องพึ่งพาเครื่องยนต์ เกียร์ พวงมาลัย และเบรก โดยอาศัยแหล่งกำเนิดพลังงานจากกระแสไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ จึงไม่ก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศเหมือนกับควันพิษจากรถยนต์ [1]

Segway เป็นยานพาหนะสองล้อที่ได้รับการพัฒนาระบบควบคุมการทำงานโดยยึดหลักการเคลื่อนที่ของมนุษย์ เพื่อให้ผู้ใช้บังคับควบคุมได้ง่ายและเป็นธรรมชาติ โดยหลักการการทำงานใช้ระบบวัดการทรงตัว (Balance Sensor) เลียนแบบการทำงานของระบบของเหลวในหูชั้นในของมนุษย์ ระบบประมวลผลการทำงาน เลียนแบบการทำงานของสมอง ระบบขับเคลื่อน เลียนแบบการทำงานของกล้ามเนื้อ และชุดล้อเลียนแบบการทำงานของเท้า โดย Segway จะเคลื่อนที่ไปในทิศทางที่ต้องการได้อย่างนุ่มนวล และแม่นยำ ด้วยการโน้มตัวในการกำหนดทิศทางและความเร็วของ Segway [2]

จากข้างต้นจะเห็นได้ว่า ยานพาหนะสองล้อชนิดนี้นั้น มีความสามารถ ความสะดวกสบาย และมีความน่าสนใจ เป็นอย่างยิ่ง จึงทำให้คณะผู้จัดทำมีความสนใจที่จะศึกษาเครื่อง Segway ว่าการทำงาน of เครื่องมีวิธีการทำงานอย่างไร และทำการปรับปรุง พัฒนาจากโครงงานเดิม เนื่องจากโครงงานเดิมนั้นยังมีข้อผิดพลาดในเรื่องของการที่เครื่องไม่สามารถรับน้ำหนักของผู้ใช้ได้ และตอบสนองอาจจะยังไม่ดีเท่าที่ควร โดยผู้จัดทำจะทำการปรับแก้โครงสร้างเก่า , ปรับแก้อัตราทดให้เหมาะสม และแก้ไขระบบควบคุมเครื่อง Segway ให้สามารถรองรับน้ำหนักของผู้ใช้โดยไม่เกิดปัญหาหรืออันตราย และมีประสิทธิภาพการใช้งานใกล้เคียงกับ Segway มาตรฐานทั่วไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อปรับปรุงโครงสร้าง Segway ที่เคยจัดทำขึ้นให้แข็งแรง, มีน้ำหนักเบาและมีสมดุมากขึ้น
2. เพื่อปรับปรุงระบบควบคุม ให้สามารถทำงานได้และเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ประกอบกับการเรียนการสอนวิชาควบคุมอัตโนมัติ

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงในส่วนของโครงสร้างและโปรแกรมสำหรับควบคุมการทำงานของเครื่อง Segway แล้ว จะสามารถควบคุมการทำงานของเครื่อง Segway ให้สามารถทำการเคลื่อนที่ในขณะที่ผู้ขับขี่ได้ และสามารถเปลี่ยนค่าตัวควบคุม PID เพื่อนำไปใช้สำหรับการศึกษาในวิชาการควบคุมอัตโนมัติ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถเข้าใจหลักการทำงานของเครื่อง Segway
2. สามารถเข้าใจความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับระบบเมื่อมีตัวแปรควบคุม PID มาเกี่ยวข้อง

1.5 ขอบเขตการวิจัย

1. Segway ที่สามารถขับเคลื่อนและรักษาสมดุลได้ขณะที่มีผู้ขับขี่
2. Segway สามารถรองรับน้ำหนักของผู้ขับขี่ที่มีน้ำหนัก 80 กิโลกรัม
3. Segway นี้ใช้สำหรับการทดลองของนักศึกษา โดยสามารถมีการปรับค่า PID เพื่อให้ผู้ทดลองเข้าใจในเนื้อหาวิชามากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6 ขั้นตอนการศึกษา

1. ศึกษาทฤษฎี Inverted Pendulum และ ทฤษฎีไฟฟ้ากระแสตรง เพื่อวิเคราะห์ทรานเฟอร์ฟังก์ชัน
2. ทำการปรับเปลี่ยนโครงสร้างของ Segway ใหม่ให้มีน้ำหนักเบาขึ้น และตัดชิ้นส่วนบางชิ้นที่ไม่ได้ใช้ออก และเปลี่ยนระบบการส่งกำลังจากโซ่เป็นเฟืองทดแทน และเพิ่มอัตราทดให้สูงมากขึ้น
3. ศึกษาการทำงานของเซนเซอร์ และบอร์ดควบคุม เพื่อเขียนคำสั่งให้รองรับการทำงาน of เครื่อง Segway
4. ทำการเขียนคำสั่งควบคุมและทดสอบการตอบสนองของ Segway อันเนื่องมาจากคำสั่งควบคุม
5. ทดสอบผลการตอบสนองจากการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรควบคุมแบบ PID ที่ส่งผลกระทบต่อระบบ



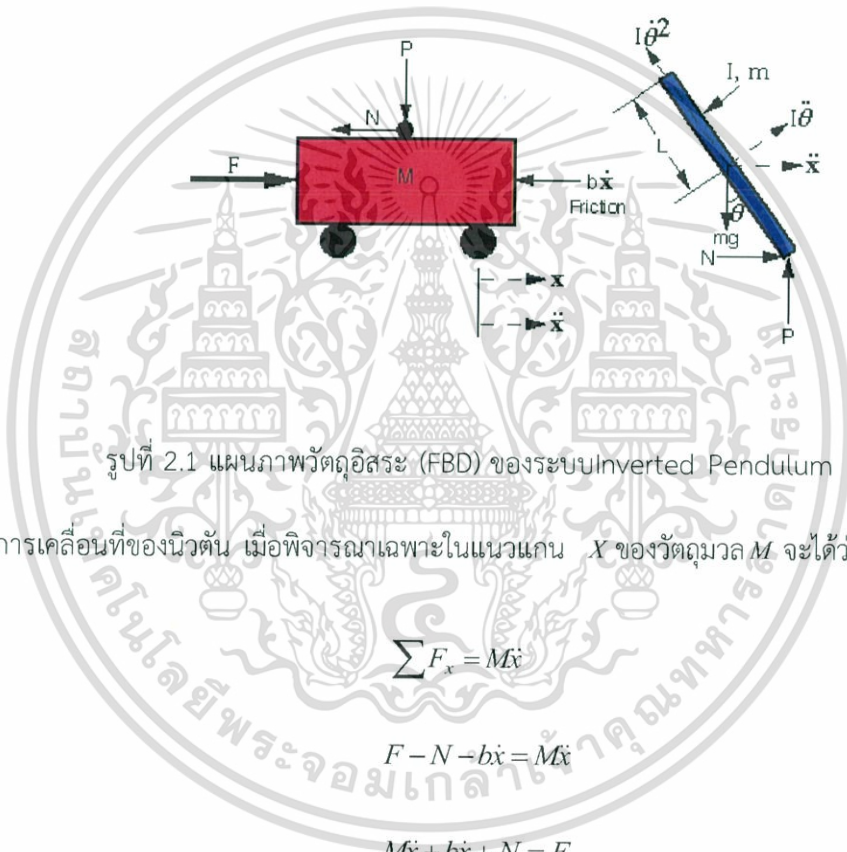
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 ทฤษฎีของ Inverted Pendulum



รูปที่ 2.1 แผนภาพวัตถุอิสระ (FBD) ของระบบ Inverted Pendulum

จากกฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน เมื่อพิจารณาเฉพาะในแนวแกน X ของวัตถุมวล M จะได้ว่า

$$\sum F_x = M\ddot{x} \tag{2.1}$$

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

$$M\ddot{x} + b\dot{x} + N = F \tag{2.2}$$

พิจารณาสมการโมเมนต์ในส่วนของ Pendulum จะได้ว่า

$$T = r \cdot F = I\ddot{\theta} \tag{2.3}$$

$$F = \frac{I\ddot{\theta}}{r} = \frac{ml^2\ddot{\theta}}{l} = ml\ddot{\theta} \tag{2.4}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

$$F = ml\ddot{\theta} \cos\theta \quad (2.5)$$

นอกจากนั้นวัตถุยังเกิดแรงสู่ศูนย์กลางด้วยดังนี้

$$F = \frac{mv^2}{r} \quad (2.6)$$

$$F = \frac{m(\omega r)^2}{r} = m\dot{\theta}^2 r = m\dot{\theta}^2 l \quad (2.7)$$

เพราะฉะนั้นแรงสู่ศูนย์กลางในแนวแกน X จะได้ดังนี้

$$F = m\dot{\theta}^2 l \sin\theta \quad (2.8)$$

จากกฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน ผลรวมแรงเมื่อพิจารณาในแนวแกน X จะได้ว่า

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

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

$$N = m\ddot{x} + ml\ddot{\theta} \cos\theta - ml\dot{\theta}^2 \sin\theta \quad (2.9)$$

แทนสมการที่ (2.9) ลงในสมการที่ (2.2)

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

$$(M + m)\ddot{x} + b\dot{x} + ml\ddot{\theta} \cos\theta - ml\dot{\theta}^2 \sin\theta = F \quad (2.10)$$

สมการที่ (2.9) เป็นสมการแรกที่ได้จากการวิเคราะห์ระบบ Inverted Pendulum
 พิจารณาแรงในแนวตั้งฉากกับ Pendulum ได้สมการดังนี้

$$P \sin\theta + N \cos\theta - mg \sin\theta = ml\ddot{\theta} + m\ddot{x} \cos\theta \quad (2.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นทำการ Take moment รอบจุดศูนย์กลางของ Pendulum จะได้สมการดังนี้

$$\sum M = I\ddot{\theta} \quad (2.12)$$

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

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

$$P \sin \theta + N \cos \theta = -\frac{I\ddot{\theta}}{l} \quad (2.13)$$

นำสมการที่ (2.13) แทนลงในสมการที่ (2.11) จะได้ว่า

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

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

$$(I + ml^2)\ddot{\theta} + mgl \sin \theta = -m\dot{x} \cos \theta \quad (2.14)$$

สมการที่ (2.14) เป็นสมการที่สองที่ได้จากการวิเคราะห์ระบบ Inverted Pendulum ดังนั้นสรุปแล้ว เราจะได้สมการสองสมการที่สามารถอธิบายลักษณะทางพลวัตของระบบ Inverted Pendulum ได้นั้นคือ

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

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

จากสมการที่ (2.10) และ (2.14) จะเห็นว่าเป็นสมการที่อยู่ในรูปไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear Equations) เพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์จึงต้องทำให้สมการเป็นสมการเชิงเส้น (Linear Equations) โดยการตั้งสมมติฐานดังต่อไปนี้

1. เมื่ออยู่ในตำแหน่งตั้งตรงในแนวตั้งกำหนดให้มุมในแนวตั้งมีค่า π นั่นคือ $\theta = \pi$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. กำหนดให้มุมที่เบี่ยงเบนของ Pendulum จากตำแหน่งสมดุลมีค่าไม่เกิน 20°

3. กำหนดให้ ϕ เป็นมุมที่เปลี่ยนแปลงของ Pendulum จากสภาวะสมดุลซึ่งมีค่าน้อยมากๆ จะได้ว่า

$$\theta = \pi + \phi$$

ดังนั้นจากสมมติฐานดังกล่าวจะได้สมการดังนี้

$$\cos \theta = \cos(\pi + \phi) \approx -1 \quad (2.15)$$

$$\sin \theta = \sin(\pi + \phi) \approx -\phi \quad (2.16)$$

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

$$\phi^2 = \phi^2 \approx 0 \quad (2.17)$$

นำสมการที่ (2.15) (2.16) และ (2.17) แทนลงในสมการที่ (2.10) และ (2.14) จะได้ว่า

$$(M + m)\ddot{x} + b\dot{x} - ml\ddot{\phi} = F \quad (2.18)$$

$$(I + ml^2)\ddot{\phi} - mgl\phi = ml\dot{x} \quad (2.19)$$

จากนั้นทำการ Laplace Transformation สมการที่ (2.18) และ (2.19) โดยกำหนดให้สภาวะเริ่มต้น (Initial Condition) มีค่าเท่ากับศูนย์ จะได้ว่า

$$(M + m)X(s)s^2 + bX(s) - ml\Phi(s)s^2 = F(s) \quad (2.20)$$

$$(I + ml^2)\Phi(s)s^2 - mgl\Phi(s) = mlX(s)s^2 \quad (2.21)$$

จากสมการที่ (2.21) จัดรูปสมการใหม่จะได้

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$X(s) = \left[\frac{I + ml^2}{ml} - \frac{g}{s^2} \right] \Phi(s) \quad (2.22)$$

แทนสมการที่ (2.22) ลงในสมการที่ (2.20) จะได้ว่า

$$(M + m) \left[\frac{I + ml^2}{ml} - \frac{g}{s^2} \right] \Phi(s) s^2 + b \left[\frac{I + ml^2}{ml} - \frac{g}{s^2} \right] \Phi(s) - ml \Phi(s) s^2 = F(s) \quad (2.23)$$

ทำการจัดรูปสมการใหม่จะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนดังนี้

$$\frac{\Phi(s)}{F(s)} = \frac{\frac{ml}{q} s}{s^3 + \frac{b(I + ml^2)}{q} s^2 - \frac{mgl(M + m)}{q} s - \frac{bmgl}{q}} \quad (2.24)$$

เมื่อ

$$q = (M + m)(I + ml^2) - (ml)^2$$

ทำการเปลี่ยนแปลงฟังก์ชันการถ่ายโอนของระบบที่อยู่ในรูปของแรงให้กลายเป็นทอร์คเนื่องจากทอร์คเป็นตัวเชื่อมระหว่างระบบ Inverted Pendulum กับตัวขับเคลื่อนซึ่งเป็นมอเตอร์กระแสตรงได้เป็นสมการดังนี้

$$\frac{\Phi(s)}{T(s)} = \frac{\frac{ml}{q} s}{s^3 + \frac{b(I + ml^2)}{q} s^2 - \frac{mgl(M + m)}{q} s - \frac{bmgl}{q}} \left(\frac{1}{r} \right) \quad (2.25)$$

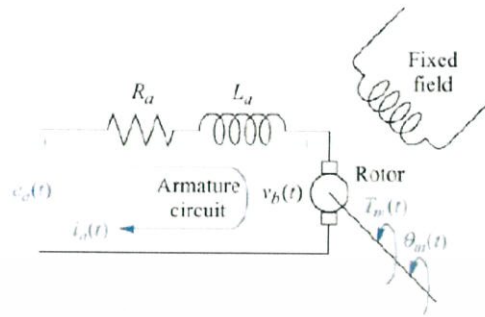
โดยที่ r คือรัศมีของล้อมีหน่วยเป็นเมตร (m)

เมื่อไม่พิจารณาผลของแรงเสียดทาน ฟังก์ชันถ่ายโอนจะอยู่ในรูปดังนี้

$$\frac{\Phi(s)}{T(s)} = \frac{\frac{ml}{q}}{s^2 - \frac{mgl(M + m)}{q}} \left(\frac{1}{r} \right) \quad (2.26)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 ทฤษฎีของมอเตอร์กระแสตรง



รูปที่ 2.2 แผนภาพมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

จากสมการแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับ

$$V_b = K_b \frac{d\theta_m(t)}{dt} \quad (2.27)$$

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

K_b คือ ค่าคงที่ (back emf constant)

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

ทำการ Laplace Transformation สมการที่ (2.27) จะได้ว่า

$$V_b(s) = K_b s \theta_m(s) \quad (2.28)$$

ความสัมพันธ์ระหว่าง Armature current ($i_a(t)$), Armature voltage ($e_a(t)$) และ Back emf ($V_b(t)$) สามารถพิจารณาได้โดยอาศัยกฎของ Kirchhoff ตามรูปที่ 2.2 ดังนี้

$$R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + v_b(t) = e_a(t) \quad (2.29)$$

ทำการ Laplace Transformation สมการที่ (2.29) จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_a I_a(s) = L_a s I_a(s) + V_b(s) = E_a(s) \quad (2.30)$$

ทอร์กที่เกิดจากมอเตอร์จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ Armature current ดังนี้

$$T_m(t) = K_t i_a(t) \quad (2.31)$$

เมื่อ T_m คือ ทอร์กที่เกิดจากมอเตอร์

K_t คือ ค่าคงที่ (Motor torque constant)

ทำการ Laplace Transformation สมการที่ (2.31) จะได้ว่า

$$T_m(s) = K_t I_a(s) \quad (2.32)$$

จัดรูปสมการที่ (2.32) ใหม่จะได้

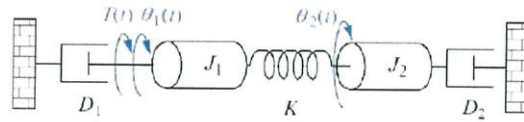
$$I_a(s) = \frac{1}{K_t} T_m(s) \quad (2.33)$$

แทนสมการที่ (2.28) และ (2.33) ลงในสมการที่ (2.30) จะได้ว่า

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

$$\frac{(R_a + L_a s) T_m(s)}{K_t} + K_b s \theta_m(s) = E_a(s) \quad (2.34)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 แผนภาพระบบเชิงกลแบบหมุน

จากรูปที่ 2.3 สามารถสร้างความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$T_m(t) = J_m \frac{d^2 \theta_m(t)}{dt^2} + D_m \frac{d\theta_m(t)}{dt} \quad (2.35)$$

เมื่อ J_m คือโมเมนต์ความเฉื่อยสมมูลของ Armature และ Load, ($kg \cdot m^2$)

D_m คือ Equivalent viscous damping สมมูลของ Armature และ Load

ทำการ Laplace Transformation สมการที่ (2.35) จะได้ว่า

$$T_m(s) = (J_m s^2 + D_m s) \theta_m(s) \quad (2.36)$$

แทนค่าสมการที่ (2.36) ลงในสมการที่ (2.34) จะได้

$$\frac{(R_a + L_a s)(J_m s^2 + D_m s) \theta_m(s)}{K_t} + K_b s \theta_m(s) = E_a(s) \quad (2.37)$$

สมมติให้ค่า Armature Inductance, L_a มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับค่า Armature Resistance, R_a จะได้ว่า

$$\left[\frac{R_a}{K_t} (J_m s + D_m) + K_b \right] \theta_m(s) = E_a(s) \quad (2.38)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นฟังก์ชันการถ่ายโอนของมอเตอร์เป็นดังนี้

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

$$\frac{\theta_m(s)}{E_a(s)} = \frac{K_t / (R_a J_m)}{s[s + \frac{1}{J_m}(D_m + \frac{K_t K_b}{R_a})]} \quad (2.39)$$

หรืออาจจะเขียนให้อยู่ในรูปร่างง่ายดังนี้

$$\frac{\theta_m(s)}{E_a(s)} = \frac{K}{s(s + \alpha)} \quad (2.40)$$

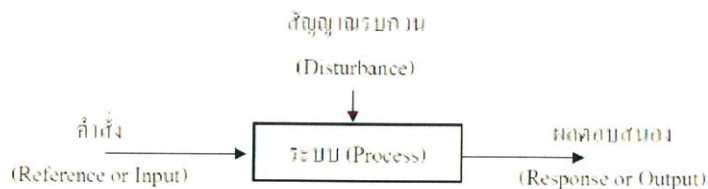
$$\text{เมื่อ } K = \frac{K_t}{R_a J_m} \text{ และ } \alpha = \frac{1}{J_m} \left(D_m + \frac{K_t K_b}{R_a} \right)$$

หรือ อยู่ในรูปของทอร์คต่อแรงดันไฟฟ้าดังนี้

$$\frac{T_m(s)}{E_a(s)} = \frac{K_t / (R_a J_m) (J_m s^2 + D_m s)}{s[s + \frac{1}{J_m} (D_m + \frac{K_t K_b}{R_a})]} \quad (2.41)$$

2.1.3 ทฤษฎีการควบคุมอัตโนมัติ

2.1.3.1 ความหมายและคำนิยามของระบบควบคุม



รูปที่ 2.4 ส่วนประกอบของระบบควบคุม

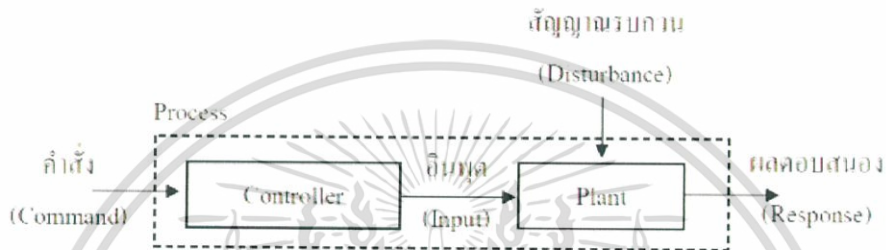
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบ (System) หมายถึง ส่วนหรือหน่วยที่ได้รวบรวมสิ่งต่างๆเข้าด้วยกัน

ควบคุม (Control) หมายถึง การบังคับหรือสั่งการ ระบบควบคุม (Control Systems) หมายถึง ส่วนหรือหน่วยที่ได้รวบรวมสิ่งต่างๆเข้าด้วยกัน เพื่อใช้บังคับหรือสั่งการ

2.1.3.2 รูปแบบของการควบคุม

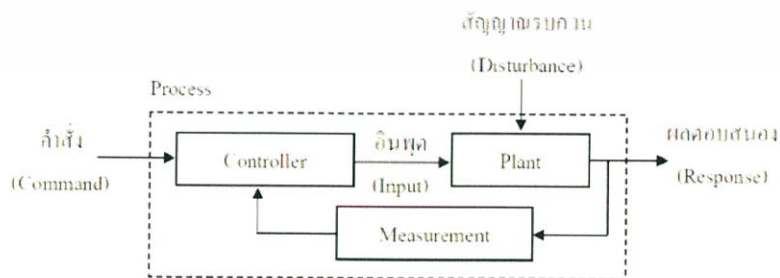
2.1.3.2.1 ระบบควบคุมแบบวงรอบเปิด (Open Loop Control)



รูปที่ 2.5 ระบบควบคุมแบบวงรอบเปิด

ลักษณะทั่วไปของระบบควบคุมแบบวงรอบเปิดจะเป็นไปตามรูปที่ 2.5 ในการควบคุมแบบวงรอบเปิด ตัวควบคุม (Controller) จะส่งสัญญาณป้อน (Input) ให้กับสิ่งที่ต้องการควบคุม (Plant) ตามคำสั่งหรือสัญญาณอ้างอิง (Command or referent) ที่รับมา โดยที่ตัวควบคุมจะอนุมานว่าเมื่อสิ่งที่ต้องการควบคุมได้รับสัญญาณป้อนแล้วนั้น ก็จะผลิตเอาต์พุตหรือผลตอบสนอง (Response) ให้ได้ตามที่คาดหวังไว้โดยไม่ต้องทำการตรวจสอบสัญญาณเอาต์พุตจริง ว่าเป็นไปตามคำสั่งหรือไม่

2.1.3.2.2 ระบบควบคุมแบบวงรอบปิด (Closed Loop Control)

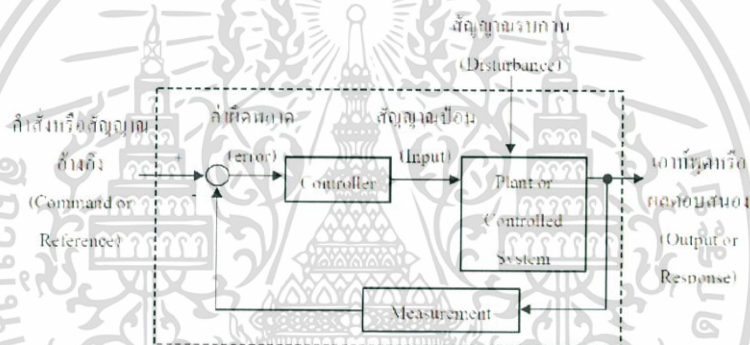


รูปที่ 2.6 ระบบควบคุมแบบวงรอบปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะทั่วไปของระบบควบคุมแบบวงรอบปิดจะเป็นไปตามรูปที่ 2.6 ในการควบคุมแบบวงรอบปิด ตัวควบคุม (Controller) จะทำการเปรียบเทียบสัญญาณอ้างอิงหรือคำสั่ง (Referent or Command) กับสัญญาณเอ้าท์พุทหรือผลตอบสนอง (Output or Response) ที่ป้อนกลับมาโดยตัวตรวจจับ (Measurement or Sensor) แล้วนำไปสร้างสัญญาณป้อนหรืออินพุต (Input) ให้กับสิ่งที่ต้องการควบคุม (System under controlled or Plant) เพื่อที่จะให้ผลิตเอาต์พุทหรือผลตอบสนองให้เป็นไปตามสัญญาณอ้างอิงที่ต้องการ (Command or Reference)

ระบบควบคุมแบบวงรอบปิดอาจจะเรียกได้อีกอย่างหนึ่งว่า ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback Control System) ตามรูปที่ 2.6 ระบบนี้เป็นระบบควบคุมที่พยายามรักษาเอาต์พุทให้ได้ตามต้องการ โดยการนำเอาสัญญาณเอาต์พุตมาเปรียบเทียบกับสัญญาณอ้างอิงที่ต้องการ แล้วนำค่าความแตกต่างไปใช้ในการควบคุมสัญญาณป้อนให้กับสิ่งที่ต้องการควบคุม



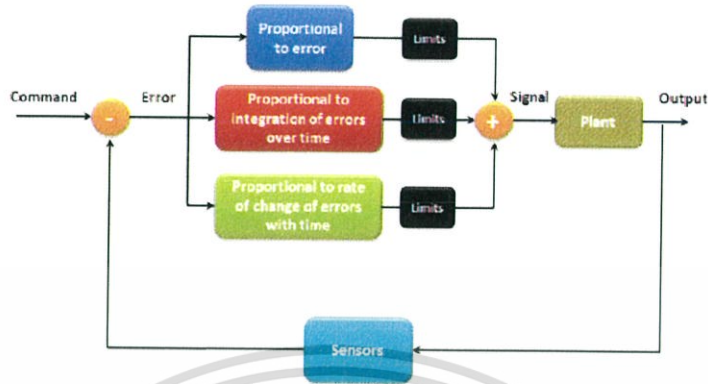
รูปที่ 2.7 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ

ตัวควบคุมแบบพีไอดี เป็นตัวควบคุมที่พบบ่อยมากที่สุดในงานอุตสาหกรรมทั่วไปเพราะเป็นตัวควบคุมที่ใช้งานง่าย การปรับค่าเกณฑ์หลักการที่ไม่ได้ซับซ้อนมากนักก็ให้ผลตอบสนองเป็นที่ยอมรับได้ สามารถปรับแต่งการควบคุมได้ง่ายเมื่อต้องการ ระบบควบคุมแบบพีไอดีมีตัวควบคุมย่อย 3 ตัว คือ

- 1) ตัวควบคุมแบบสัดส่วนหรือตัวควบคุมพี
- 2) ตัวควบคุมแบบปริพันธ์หรือตัวควบคุมไอ
- 3) ตัวควบคุมแบบปริพันธ์หรือตัวควบคุมดี ในการควบคุมระบบทั่วไปมักใช้งานตัวควบคุมร่วมกัน เช่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

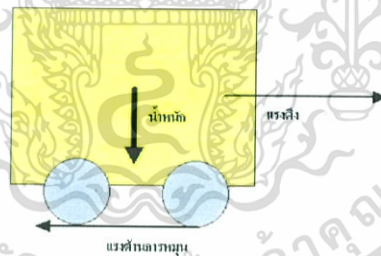
การควบคุมแบบพีไอ การควบคุมแบบพีดี และการควบคุมแบบพีไอดีรายละเอียดการทำงานของตัวควบคุม [7]



รูปที่ 2.8 ตัวควบคุมแบบ PID

2.1.4 แรงต้านการเคลื่อนที่ระหว่างที่ล้อหมุนบนพื้นผิว

แรงที่ต้านการเคลื่อนที่ระหว่างที่ล้อหมุนบนพื้นผิว เรียกว่า rolling resistance หรือ rolling friction



รูปที่ 2.9 แสดงแรงต้านการเคลื่อนที่ระหว่างล้อกับพื้นผิว

แรงต้านการหมุน สามารถแสดงด้วยสมการ

$$F_r = cW \tag{2.42}$$

F_r = แรงต้านการหมุน (N, lb_f)

c = สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของการหมุน (coefficient of rolling friction - CRF)

W = $m g$ (N, lb_f)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

m = มวลของวัตถุ (kg, lb)

g = ความเร่งโน้มถ่วง (9.81 m/s², 32.174 ft/s²)

ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานการหมุน

ตารางที่ 2.1 แสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานการหมุนในรูปแบบต่างๆ

Rolling Resistance Coefficient (c)	Condition
0.001 - 0.002	railroad steel wheels on steel rails
0.001	bicycle tire on wooden track
0.002 - 0.005	low resistance tubeless tires
0.002	bicycle tire on concrete
0.004	bicycle tire on asphalt road
0.005	dirty tram rails
0.006 - 0.01	truck tire on asphalt
0.008	bicycle tire on rough paved road
0.01 - 0.015	ordinary car tires on

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Rolling Resistance Coefficient (c)	Condition
	concrete
0.03	car tires on tar or asphalt
0.04 - 0.08	car tire on solid sand
0.2 - 0.4	car tire on loose sand

การคำนวณเลือกใช้มอเตอร์ของ ของ Segway เครื่องนี้ เลือกใช้ $c = 0.002$ นั่นคือค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน ในรูปแบบ การเคลื่อนที่ของ ล้อจักรยานบนพื้นคอนกรีต [3]

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 งานวิจัยของ Khalil Sultan, Institute of Industrial Electronics Engineering

ประเทศปากีสถานเรื่อง “Inverted Pendulum, Analysis, Design and Implementation”

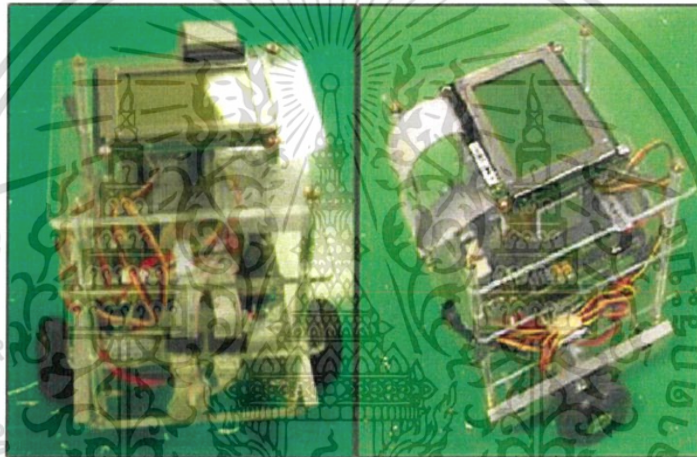


รูปที่ 2.10 งานวิจัยของ Khalil Sultan เรื่อง Inverted Pendulum

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในงานวิจัยนี้จะมีการกล่าวถึงตั้งแต่พื้นฐานของระบบ Inverted Pendulum จนพัฒนาလာมาเป็น การหาวิธีการที่จะควบคุมการทำงานของระบบ Inverted Pendulum จากนั้นจะเป็นการวิเคราะห์ ทางกลศาสตร์เพื่อหาสมการของระบบอันจะเป็นประโยชน์ต่อการออกแบบตัวควบคุมแบบ PID เพื่อ ใช้เป็นแนวทางในการที่จะควบคุมผลตอบสนองของระบบ Inverted Pendulum ต่อไป นอกจากนี้ยัง มีการแสดงถึงวิธีการใช้โปรแกรม MATLAB ที่ช่วยในการออกแบบตัวควบคุมแบบ PID ให้ง่ายขึ้นอีก ด้วย [4]

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

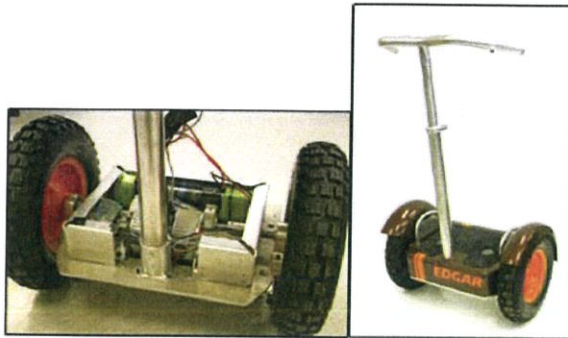


รูปที่ 2.11 หุ่นยนต์ขับเคลื่อนสองล้อสมดุลด้วยตัวเอง

เป็นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสร้างหุ่นยนต์ขับเคลื่อนสองล้อที่สมดุลด้วยตนเอง ซึ่งได้กล่าวถึง ทฤษฎีและขั้นตอนตลอดจนอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยรวมถึงมีการกล่าวถึงการออกแบบตัวควบคุมเพื่อ ใช้ในการสร้างเสถียรภาพให้กับหุ่นยนต์ขับเคลื่อนสองล้อสมดุลด้วยตัวเองพร้อมทั้งผลการวิเคราะห์ที่ เกิดขึ้นจากการทดลองอีกด้วย [5]

2.2.3 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 ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 รถ Scooter สองล้อ EDGAR

โดยในงานวิจัยนี้จะเป็นการสร้างรถสกู๊ตเตอร์ (Scooter) สองล้อที่มีลักษณะคล้ายคลึงกับ เซกเวย์มาก และมีการกล่าวถึงขั้นตอนและกระบวนการในการทำตั้งแต่การออกแบบโครงสร้างจนถึงการออกแบบระบบควบคุมและการคำสั่งโปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของสกู๊ตเตอร์สองล้อด้วย [6]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

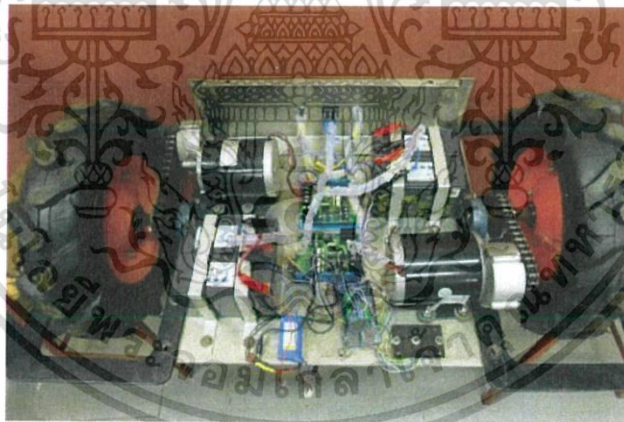
วิธีดำเนินงาน

3.1 วิเคราะห์ปัญหาและการแก้ไข

จากการศึกษาโปรเจกต์เรื่องการสร้าง Segway เพื่อใช้ศึกษาในวิชาการควบคุมอัตโนมัติพบว่า โปรเจกต์ที่ผ่านมามีข้อบกพร่องหลายประการจึงทำให้ Segway ไม่สามารถดำเนินการได้ตาม วัตถุประสงค์และขอบเขตที่ตั้งไว้ โดยหลังจากที่ได้ทำการศึกษาสามารถพบว่าสามารถแบ่งสาเหตุของ ปัญหาได้ดังนี้

3.1.1 ปัญหาทางด้านโครงสร้าง

3.1.1.1 ปัญหาทางด้านน้ำหนัก



รูปที่ 3.1 แสดงถึงโครงสร้างของ Segway ก่อนที่จะทำการปรับปรุง

รูปที่ 3.1 แสดงถึงโครงสร้างของ Segway ก่อนที่จะทำการปรับปรุง โดยเมื่อทำการ วิเคราะห์ถึงปัญหาพบว่า น้ำหนักของโครงสร้างของ Segway นั้นมากเกินไปซึ่งแสดง รายละเอียดน้ำหนักของชิ้นส่วนและอุปกรณ์ได้ดังตารางที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 เปรียบเทียบน้ำหนักชิ้นส่วนและอุปกรณ์

ลำดับ	ชิ้นส่วนอุปกรณ์เดิม	น้ำหนัก (kg)	ชิ้นส่วนอุปกรณ์ใหม่	น้ำหนัก (kg)
1	ฐานอะลูมิเนียม	11.6	โครงเหล็กกล่อง	8.1
2	มอเตอร์ 450 W	10.6	มอเตอร์ 450 W	10.6
3	แผ่นเหล็กประคองล้อ	6.2	-	-
4	คันทันบังคับ	1.5	คันทันบังคับ	1.5
5	แบตเตอรี่	10.8	แบตเตอรี่	10.8
6	เหล็กถ่วง	17	-	-
7	แผ่นครอบด้านหลัง	0.7	-	-
	รวม	58.4		31

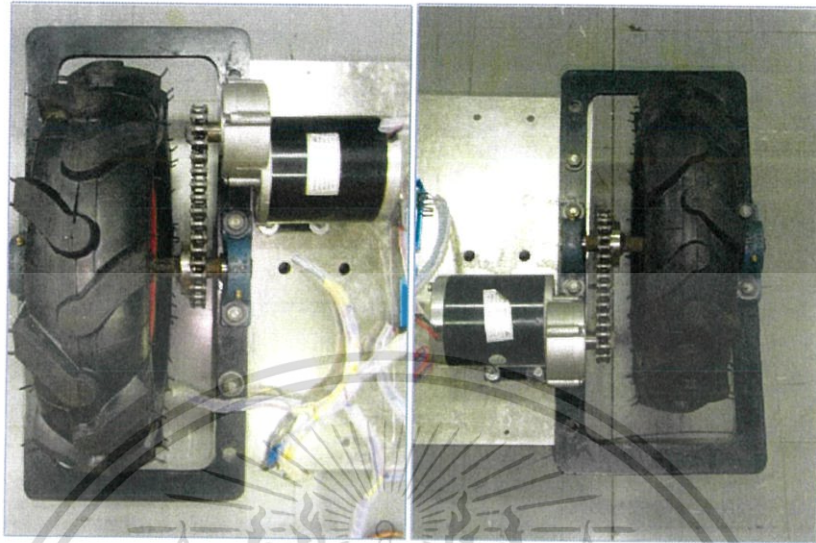
เมื่อรวมน้ำหนักของทุกอุปกรณ์พบว่าน้ำหนักมากถึง 58.4 กิโลกรัม จึงเป็นสาเหตุให้เกิดการออกแบบใหม่เพื่อลดน้ำหนักของโครงสร้างซึ่งส่วนหลักที่ทำการปรับเปลี่ยนคือฐานอะลูมิเนียมและแผ่นเหล็กประคองล้อ โดยเปลี่ยนไปใช้เหล็กกล่องที่มีความแข็งแรงแต่น้ำหนักเบาแทนฐานอะลูมิเนียมและนำส่วนของแผ่นเหล็กประคองล้อออก รวมถึงการออกแบบขนาดโดยรวมของส่วนโครงสร้างให้มีขนาดเล็กลง ดังนั้นน้ำหนักโดยรวมของโครงสร้างใหม่ ลดลง 27 kg ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 46.23 ของน้ำหนักเดิม

3.1.1.2 ปัญหาทางด้านโครงสร้างยึดส่วนล้อ

ปัญหาที่พบอีกสิ่งหนึ่งในส่วนของโครงสร้างคือการยึดส่วนล้อที่ไม่เหมาะสมซึ่งปัญหานี้ทำให้โครงสร้างไม่แข็งแรง สาเหตุเนื่องมาจากการใช้แผ่นเหล็กยึดส่วนล้อที่ทำการยึดเพียงส่วนปลายของแผ่นเหล็กตามรูปที่ 3.2 และอีกสาเหตุหนึ่งคือระยะของส่วนล้อกับส่วนโครงสร้างฐานมีระยะห่างมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีผลต่อการโค้งงอของส่วนล้อ จึงเป็นจำเป็นต้องมีการออกแบบใหม่โดยเปลี่ยนรูปแบบการยึดส่วนล้อ และลดระยะห่างระหว่างล้อกับส่วนโครงสร้างฐาน



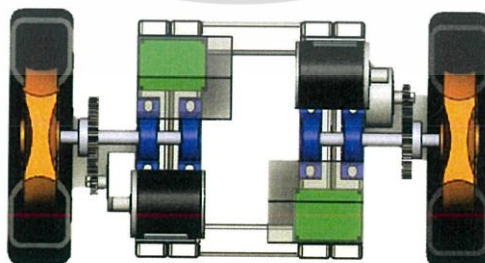
(ก)

(ข)

รูปที่ 3.2 การยึดส่วนล้อของ Segway ก่อนทำการปรับปรุง (ก) ขว (ข) ซ้าย

3.1.1.3 ปัญหาความไม่สมดุลของโครงสร้าง

เนื่องมาจากการจัดวางอุปกรณ์และโครงสร้างของเครื่อง Segway เดิม ไม่สมดุลรอบจุดแกนเพลลา ทำให้เครื่อง Segway ไม่สามารถรักษาสมดุลด้วยตัวเองขณะที่เครื่องไม่ทำงาน โดยการแก้ปัญหาที่ผ่านมาใช้การถ่วงน้ำหนักด้วยเหล็กตันหนักถึง 17 กิโลกรัม เพื่อแก้ปัญหานี้จึงทำการจัดวางอุปกรณ์ต่างๆ ให้เกิดความสมดุลรอบแกนเพลลาตามรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 แสดงการจัดวางของอุปกรณ์ใหม่

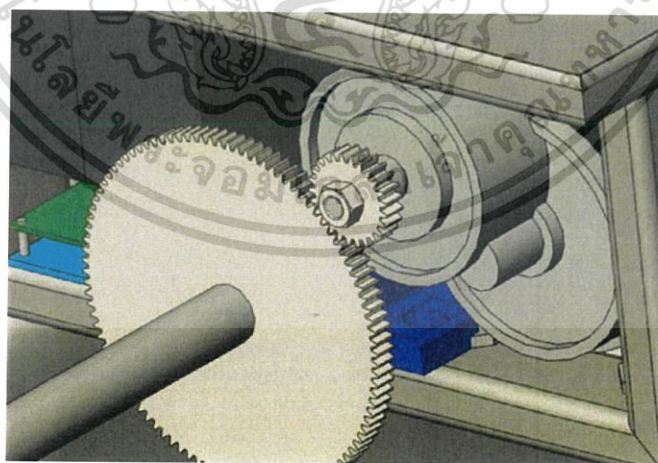
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2 ปัญหาทางด้านระบบส่งกำลัง

การที่ Segway เกิดปัญหาทำให้ผู้ใช้ไม่สามารถขึ้นไปใช้งานได้มีสาเหตุส่วนหนึ่งมาจากระบบส่งกำลังที่ไม่มีประสิทธิภาพ เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 3.4 พบว่าระบบส่งกำลังที่ใช้ใน Segway เป็นการใช้ระบบโซ่ส่งกำลังที่มีการจัดวางในทิศทางที่ตรงกันข้ามซึ่งผิดลักษณะการติดตั้งของระบบโซ่ส่งกำลัง ดังนั้นจึงเกิดแนวคิดในการเปลี่ยนระบบส่งกำลังมาเป็นการใช้ระบบเฟืองทดที่มีประสิทธิภาพสูงกว่า เมื่อมีการส่งกำลังในสองทิศทาง ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.4 การส่งกำลังโดยโซ่

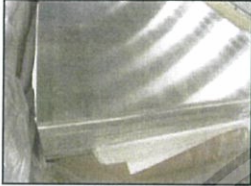
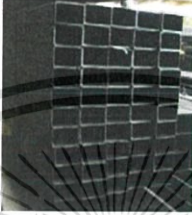


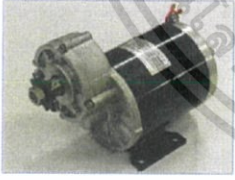
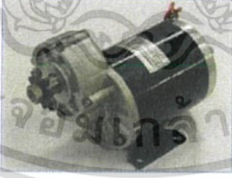




รูปที่ 3.5 จำลองการส่งกำลังโดยใช้เฟือง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 เปรียบเทียบวัสดุและอุปกรณ์ในการสร้าง Segway

ตารางที่ 3.2 แสดงการเปรียบเทียบวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ก่อนและหลัง

เดิม	ใหม่	สาเหตุการเปลี่ยน
: แผ่นอลูมิเนียม 	: คาร์บอนสตีล (กล่อง) 	เพื่อลดน้ำหนักและเพิ่มความ แข็งแรง
 : ล้อขับเคลื่อน	: ล้อขับเคลื่อน (จักรยาน) 	เนื่องจากของเดิมใช้การไม่ได้และ มีขนาดใหญ่
 : มอเตอร์กระแสตรง		ประหยัดงบประมาณ
 : แบตเตอรี่	 : แบตเตอรี่	ของเดิมใช้การไม่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

:โซ่ส่งกำลัง 	:เกียร์ส่งกำลัง 	โซ่เหมาะแก่การส่งกำลังใน ทิศทางเดียว
: แบริ่ง 	: แบริ่ง (เดิม) 	ประหยัดงบประมาณ
: เหล็ก 	: เหล็ก 	ของเดิมใช้การไม่ได้และให้ เหมาะสมกับการติดตั้ง

3.3 อุปกรณ์ในการสร้าง Segway

3.3.1 โครงสร้างคาร์บอนสตีล (กล่อง)



รูปที่ 3.6 โครงสร้างเหล็กกล่อง ของเครื่อง Segway

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากเดิมใช้แผ่นอะลูมิเนียม ยึดด้วยสลักเกลียว 4 ตัว ที่มีน้ำหนักมากและไม่มีความแข็งแรง จึงเปลี่ยนโครงสร้างใหม่ โดยใช้ คาร์บอนสตีล(เหล็กกล่อง)มีความหนา 1.4 mm โครงสร้าง กว้าง 400 mm ยาว 450 mm สูง 200 mm และยึดด้วยการเชื่อม ซึ่งมีความแข็งแรงมากกว่าและน้ำหนักเบา กว่า

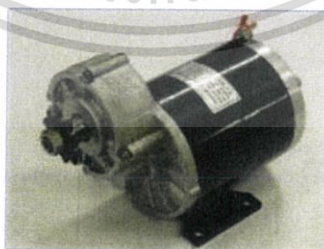
3.3.2 ล้อขับเคลื่อน



รูปที่ 3.7 ล้อขับเคลื่อน Segway

ล้อเดิมมีขนาดที่ใหญ่มากและมีการเชื่อมยึดติดกับเพลาลงจึงทำให้ไม่สามารถปรับแก้ไขได้ จึงเปลี่ยนใช้ล้อจักรยานจากความเหมาะสมของขนาดโครงสร้างโดยมีขนาด เส้นผ่าศูนย์กลาง 12 นิ้ว หนา 2 นิ้ว ทำให้ได้ล้อที่กะทัดรัดและสามารถปรับเปลี่ยนถอดประกอบแก้ไขได้

3.3.3 มอเตอร์



รูปที่ 3.8 มอเตอร์ DC ขนาด 450 วัตต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการคำนวณ พบว่า มอเตอร์ที่เหมาะสมคือ มอเตอร์กระแสตรงมีเกียร์ทด ขนาด 250 วัตต์ โดยของเดิม มีขนาด 450 วัตต์ จึงเพียงพอต่อการควบคุมความเร็ว แต่อาจส่งผลในเรื่องของความเร็วในการตอบสนอง ซึ่งเพื่อเป็นการประหยัดงบประมาณเนื่องจาก ราคามอเตอร์ตัวใหม่ค่อนข้างสูงจึงเลือกใช้ของเดิม

3.3.4 แบตเตอรี่



รูปที่ 3.9 แบตเตอรี่ขนาด 12V 9Ah/20hr

เนื่องจากของเดิมเสื่อมสภาพ จึงใช้แบตเตอรี่ใหม่โดยใช้ขนาดเดิมคือ 12V 9Ah/20hr จำนวน 4 ก้อน

3.3.5 เกียร์



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.10 (ก) เฟือง 80 ฟัน , (ข) เฟืองใหญ่ 80 ฟัน ขบกับ เฟืองเล็ก 21 ฟัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระบบส่งกำลังที่ใช้ใน Segway เดิม เป็นการใช้ระบบโซ่ส่งกำลังที่มีการจัดวางในทิศทางที่ตรงกันข้ามซึ่งผิดลักษณะการติดตั้งของระบบโซ่ส่งกำลัง ดังนั้นจึงเกิดแนวคิดในการเปลี่ยนระบบส่งกำลังมาเป็นการใช้ระบบเฟืองทดที่มีประสิทธิภาพสูงกว่าเมื่อมีการส่งกำลังในสองทิศทาง

3.3.6 แบริ่ง



รูปที่ 3.11 แบริ่งยึดเพลลา

ติดตั้งแบริ่งเพื่อช่วยในการจับยึดเพลลา

3.3.7 เพลลา

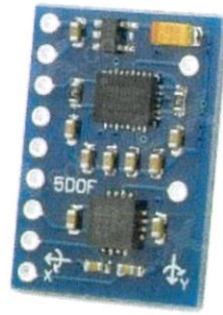


รูปที่ 3.12 เพลลา

เนื่องจากเพลลาเดิม มีการเชื่อมติดกับล้อ จึงไม่สามารถนำมาใช้งานได้ จึงกลึงเหล็กใหม่ให้ได้ขนาดเหมาะสมกับล้อขับเคลื่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.8 เซนเซอร์แอคเซลโรมิเตอร์



รูปที่ 3.13 แอคเซลโรมิเตอร์

แอคเซลโรมิเตอร์ เป็นเซนเซอร์ที่ใช้ในการวัดความเร่งที่เป็นแรงดึงดูดของโลก โดยของเดิมค่าที่ได้ออกมาเป็นค่า digital ซึ่งส่งผลให้ input ที่รับเข้ามามีการคำนวณอัตโนมัติซึ่งมีตัวแปรอื่นๆที่ไม่ได้ใช้งาน จึงทำการเปลี่ยนเป็นแบบ analog ที่สามารถปรับและคำนวณค่าในโค้ดที่กำหนดเองได้

3.3.9 Snubber Capacity



รูปที่ 3.14 snubber capacity ขนาด 16 μ F 400V

Snubber Capacity มีเพื่อป้องกันแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสส่วนเกินที่เกิดจากการเปิดปิดและเปลี่ยนทิศทางของกระแสและแรงเคลื่อนไฟฟ้า ไม่ให้เกิดการเสียหายต่อบอร์ดควบคุมมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.10 บอร์ดควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์



รูปที่ 3.15 บอร์ดควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์

บอร์ดควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ (Arduino Mega ADK R3) ซึ่งเป็นหน่วยประมวลผลกลาง ที่สามารถรับสัญญาณข้อมูลจากอุปกรณ์ภายนอก เพื่อนำมาคำนวณและส่งสัญญาณตามโปรแกรมที่เขียนขึ้นไปยังอุปกรณ์ภายนอก(มอเตอร์)

3.3.11 บอร์ดควบคุมมอเตอร์



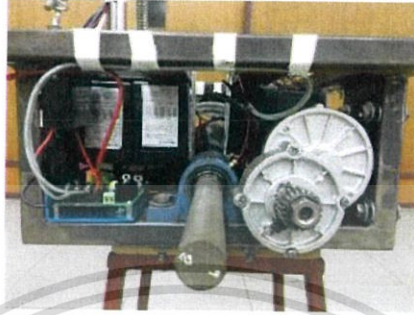
รูปที่ 3.16 บอร์ดขับมอเตอร์

ใช้สำหรับการควบคุมทิศทาง และความเร็วของมอเตอร์ ด้วย PWM โดยเชื่อมต่อกับบอร์ดควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การติดตั้งอุปกรณ์

3.4.1 การติดตั้งแบร์ริงและเพลา



รูปที่ 3.17 แสดงการจัดวางตำแหน่ง เพลาและแบร์ริงที่จุดศูนย์กลางของเครื่อง

ติดตั้งแบร์ริงและเพลา ไว้จุดศูนย์กลางของโครงสร้าง เพื่อให้สามารถรักษาสมดุลของตัวเครื่อง Segway

3.4.2 การติดตั้งแบร์ริง



รูปที่ 3.18 แสดงการติดตั้งแบร์ริง

ในแต่ละฝั่งของเครื่อง มีการติดตั้งแบร์ริง ข้างละ 2 ตัว ยึดด้วยสลักเกลียวเพื่อเพิ่มความแข็งแรงและสามารถจับยึดเพลาที่รับแรงกดจากน้ำหนักเครื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.3 การติดตั้งบอร์ดขับเคลื่อนมอเตอร์



รูปที่ 3.19 แสดงการติดตั้งบอร์ดขับเคลื่อนมอเตอร์

ติดตั้งบอร์ดขับให้ใกล้เคียงกับแบตเตอรี่และมอเตอร์ เพื่อลดระยะการจัดวางสายไฟให้เหมาะสม

3.4.4 การติดตั้งมอเตอร์



(ก)

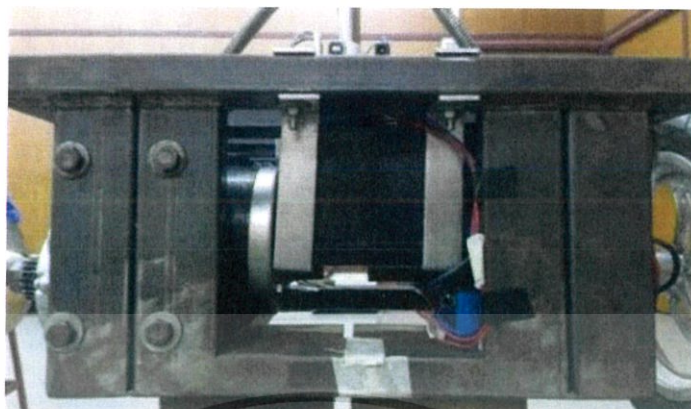
(ข)

รูปที่ 3.20 (ก) แสดงการจัดวางมอเตอร์ด้านข้าง (ข) แสดงการจัดวาง มอเตอร์ ด้านหลัง

การติดตั้งมอเตอร์ มีการจัดวางให้ชิดกับโครงเหล็กเพื่อที่สามารถเจาะโครงโดยใช้สลักเกลียวในการขันยึดมอเตอร์เข้ากับตัวฐานให้แน่นและมั่นคง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.5 การติดตั้งแบตเตอรี่



รูปที่ 3.21 แสดงการจัดวาง แบตเตอรี่ ด้านหลังเครื่อง

การติดตั้งแบตเตอรี่ มีการจัดวางเพื่อให้เกิดการสมดุลของน้ำหนัก โดยติดตั้งที่ด้านหน้าและด้านหลัง ซึ่งแต่ละฝั่ง จะวางแบตเตอรี่ฝั่งละ 2 ก้อน มีแผ่นอลูมิเนียมจับยึดกับโครงเหล็กเพื่อเป็นฐานรับน้ำหนักให้แบตเตอรี่

3.4.6 การติดตั้งล้อขับเคลื่อนและเฟือง

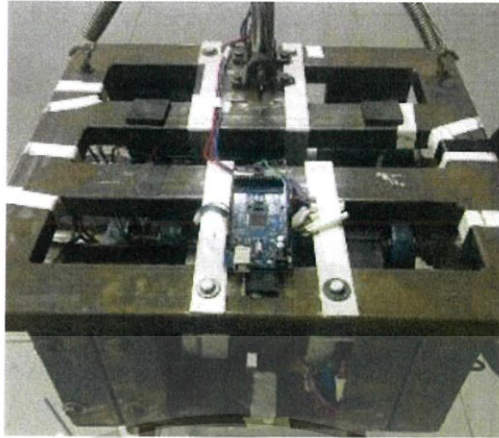


รูปที่ 3.22 แสดงการสวมล้อขับเคลื่อนและเฟืองเข้ากับเพลา

การติดตั้งล้อขับเคลื่อน ใช้การสวมล้อเข้ากับเพลา และมีการเจาะที่แกนเพลาเพื่อใช้สำหรับยึดระหว่างล้อขับเคลื่อนกับเพลาด้วยสลักเกลียว สำหรับการติดตั้งเฟือง ทำการเจาะรูเพลาแล้วยึดติดกันด้วยตัวหนอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.7 การติดตั้งบอร์ดควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์



รูปที่ 3.23 แสดงการจัดวางบอร์ดควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์บนตัวเครื่อง

การติดตั้งบอร์ดควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ ไว้บนตัวเครื่องเพื่อให้ง่ายสำหรับการต่ออุปกรณ์คอมพิวเตอร์ในการรับคำสั่ง และง่ายต่อการรีเซ็ตค่าในการปรับจูนค่า

3.4.8 การติดตั้งเซนเซอร์แอคเซลเลอโรมิเตอร์

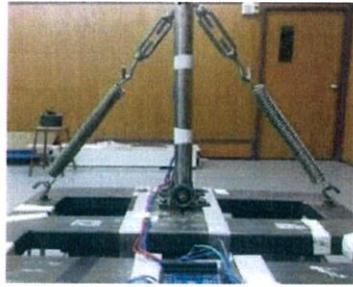


รูปที่ 3.24 แสดงการจัดวางเซนเซอร์แอคเซลเลอโรมิเตอร์

การติดตั้งเซนเซอร์แอคเซลเลอโรมิเตอร์ มีการวางไว้ใต้เพลลา ซึ่งใกล้กับตำแหน่งจุดหมุนมากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4.9 การติดตั้งแขนจับ



รูปที่ 3.25 แสดงการติดตั้งแขนจับ

การติดตั้งแขนจับ ในส่วนของการเอียงซ้ายขวา ใช้การต่อเพลาลึกกับท่ออะลูมิเนียม และใช้แบริ่งในการยึดเพลาลึก มีสปริงเพื่อเป็นแรงดึง ด้านกันระหว่างสองฝั่ง ให้แขนจับตั้งตรง

3.4.10 การติดตั้งสวิทช์เปิดปิดเครื่อง

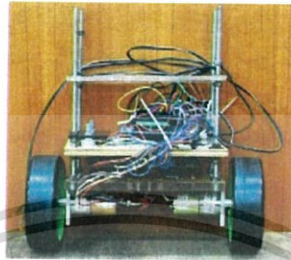


รูปที่ 3.26 แสดงการติดตั้งสวิทช์เปิดปิดเครื่อง

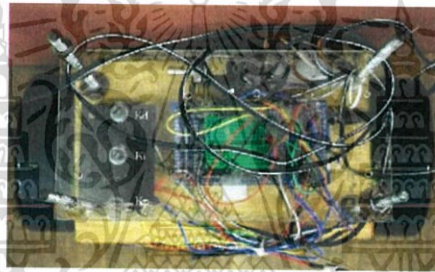
การติดตั้งสวิทช์เปิดปิดเครื่องเซกเวย์ มีการจัดวางติดกับแขนจับ เพื่อให้ผู้ใช้สามารถเปิดปิดเครื่องเซกเวย์ได้ง่ายและสะดวก

3.5 หุ่นยนต์จำลองเครื่อง Segway

เนื่องจากปัญหาในการรักษาสมดุลในตัวเองของเครื่อง Segway ยังไม่มีประสิทธิภาพมากพอ จึงสร้างชุดทดลองในระดับที่เล็กกว่าเพื่อให้ง่ายต่อการรักษาสมดุลและเปรียบเทียบผลการตอบสนองของระบบเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าตัวควบคุมแบบ PID แสดงดังรูปที่ 3.27 (ก),(ข) และ (ค)



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 3.27 หุ่นยนต์จำลองเครื่อง Segway (ก)ด้านหน้า, (ข) ด้านบน และ (ค)ด้านข้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

วิธีการและผลการทดลอง

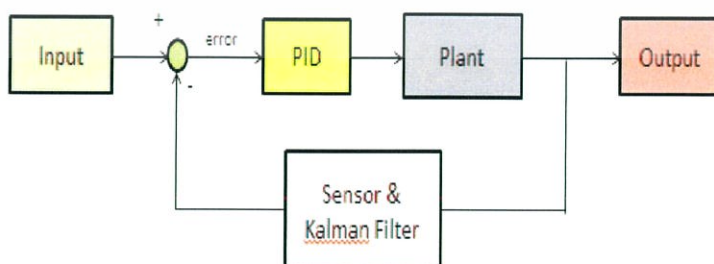
หลังจากที่ได้ทำการสร้างโครงสร้างของ Segway และทำการออกแบบโปรแกรมในการควบคุมการทำงานของ Segway แล้วจำเป็นต้องหาค่าตัวควบคุมแบบ PID เพื่อใช้ในการปรับการตอบสนองของระบบให้ Segway สามารถที่จะรักษาสมดุลในขณะมีผู้ขับขี่ และทำการเปรียบเทียบการตอบสนองของระบบของระบบเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวควบคุมแบบ PID

4.1 ขอบเขตการทดลอง

ทำการเปลี่ยนแปลงค่าตัวควบคุมแบบ PID ภายในโปรแกรมควบคุมการทำงานของ Segway เพื่อศึกษาการตอบสนองของระบบที่เกิดขึ้นและทำการเปรียบเทียบเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมเอียงของเครื่อง Segway และเวลา

4.2 วิธีการทดลอง

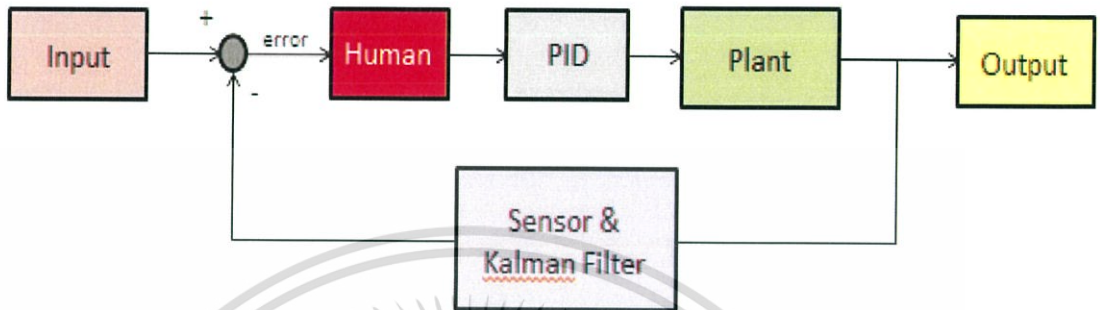
1. ทำการทดสอบความเหมาะสมและถูกต้องของโปรแกรมควบคุมโดยการนำมาควบคุมหุ่นยนต์จำลองเครื่อง Segway เพื่อให้หุ่นยนต์สามารถรักษาสมดุลในตัวเองหลังจากที่มีการระกวนสมดุลของระบบ



รูปที่ 4.1 แสดง Block Diagram ของระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. นำโปรแกรมควบคุมที่ทดสอบแล้วมาควบคุมการทำงานของเครื่อง Segway โดยการปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรควบคุมแบบ PID ที่เหมาะสมต่อการตอบสนองเมื่อมีผู้ขับขี่



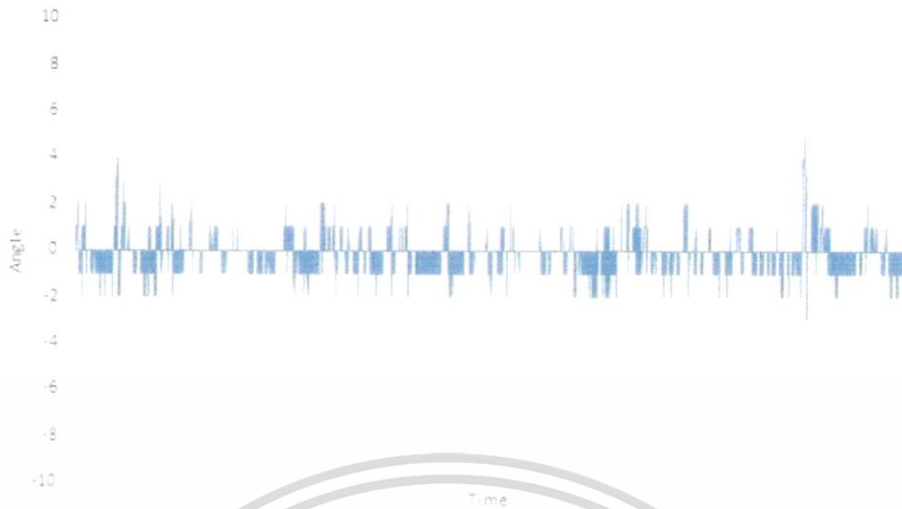
รูปที่ 4.2 แสดง Block Diagram ของระบบ เมื่อสมมติให้ มนุษย์คือ controller เพิ่มอีกตัว

3. ทำการเปลี่ยนแปลงค่าตัวควบคุมแบบ PID ภายในโปรแกรมควบคุมการทำงานของ Segway เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุดที่จะรักษาสมดุลในขณะที่มีผู้ขับขี่ รวมถึงแสดงผลในรูปแบบกราฟ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมการเอียงกับเวลา เพื่อศึกษาการตอบสนองของระบบที่เปลี่ยนไปอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนค่าตัวควบคุมแบบ PID

4.3 ผลการทดลอง

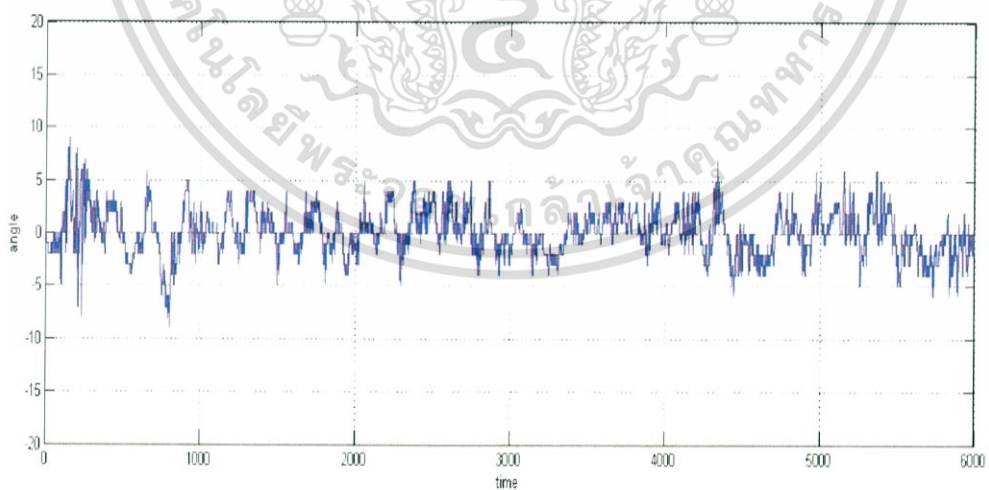
จากการนำโปรแกรมควบคุมการทำงานไปใช้ในการควบคุมหุ่นยนต์จำลองเครื่อง Segway เพื่อทดสอบความเหมาะสมของโปรแกรม พบว่าโปรแกรมสามารถสั่งการให้หุ่นยนต์จำลองรักษาสมดุลในตัวเองได้หลังจากที่มีการรบกวนสมดุลของระบบ และยังสามารถปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรควบคุมแบบ PID ได้ซึ่งสามารถแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างมุมเอียงของหุ่นยนต์กับเวลาได้ ดังรูปที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมเอียงของหุ่นจำลองเครื่อง Segway กับเวลา

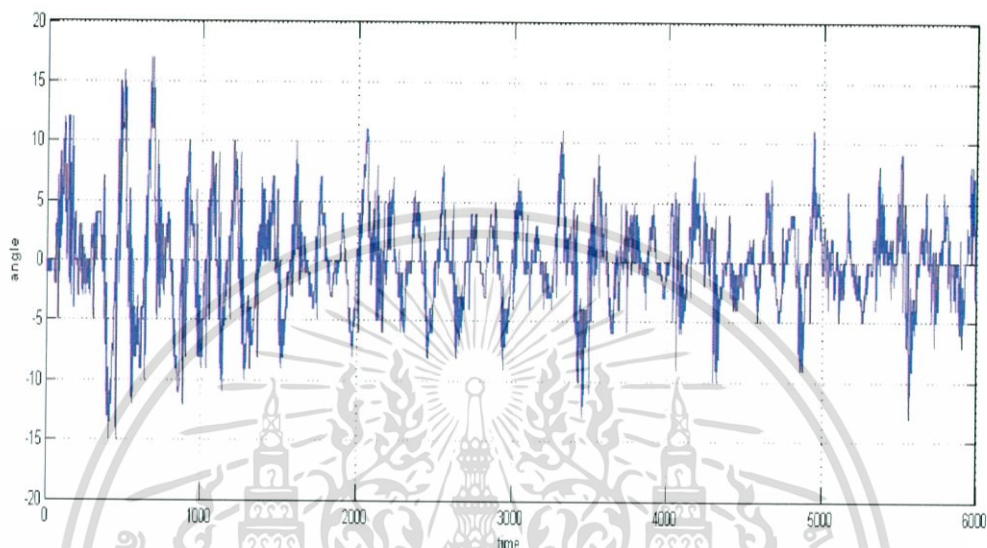
หลังจากนั้นทำการนำโปรแกรมที่ทดสอบแล้วไปใช้ควบคุมการทำงานของเครื่อง Segway ในขณะที่มีผู้ขับขี่เพื่อให้มีการตอบสนองที่เหมาะสมต่อการใช้งาน พบว่าค่าตัวแปรควบคุมแบบ PID ที่เหมาะสมต่อการควบคุมนั้นมีค่า K_p , K_i , และ K_d เท่ากับ 7, 0.2 และ 2 ตามลำดับซึ่งสามารถแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมเอียงของเครื่อง Segway และค่าของPIDที่เหมาะสม

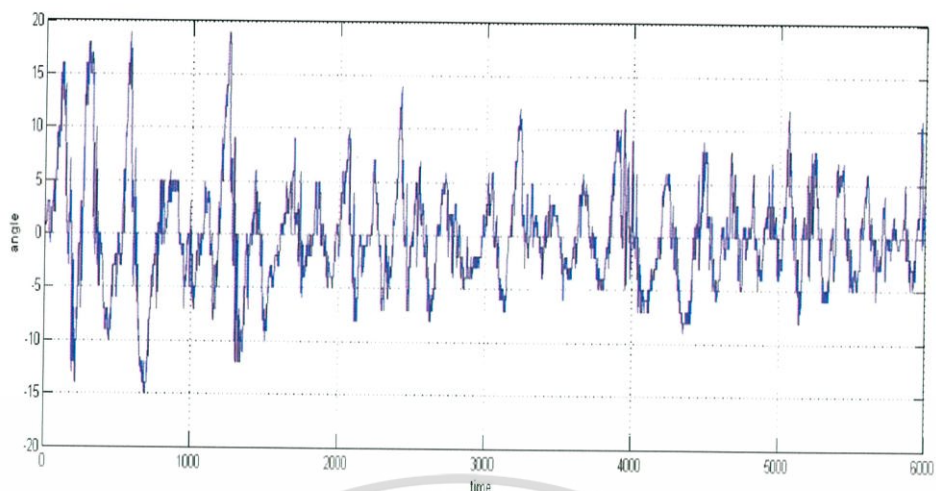
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทราบค่าตัวแปรควบคุมแบบ PID ที่เหมาะสมแล้วจึงทำการทดสอบการตอบสนองของระบบเมื่อเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรควบคุมแบบ PID โดยเริ่มจากค่าตัวแปรควบคุมที่มากเกินไปที่ค่า K_p , K_i และ K_d เท่ากับ 10, 0.2 และ 2 ตามลำดับ พบว่าการตอบสนองของระบบเร็วขึ้นอย่างมากซึ่งสามารถแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมเอียงของเครื่อง Segway และค่าของPIDที่มากเกินไป

และสุดท้ายทำการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรควบคุมแบบ PID ให้น้อยลงไปที่ค่า K_p , K_i และ K_d เท่ากับ 5, 0.2 และ 1 ตามลำดับ พบว่าการตอบสนองของระบบช้าลงซึ่งสามารถแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมเอียงของเครื่อง Segway และค่าของPIDที่น้อยเกินไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรควบคุมแบบ PID ที่ค่าต่างๆดังแสดงในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ค่าตัวแปรควบคุม PID ที่ใช้ในการทดลอง

	Kp	Ki	Kd
Appropriate	7	0.2	2
High Gain	10	0.2	2
Low Gain	5	0.2	2

สามารถสรุปได้ว่าค่าตัวแปรควบคุม PID ส่งผลต่อการตอบสนองของระบบ โดยเมื่อทำการเพิ่มค่าตัวแปร PID จะส่งผลทำให้การตอบสนองของระบบเร็วขึ้น ในทางตรงกันข้ามเมื่อทำการลดตัวแปรควบคุม PID ลง จะส่งผลทำให้การตอบสนองของระบบช้าลง

5.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง

ในการปรับค่าตัวควบคุมแบบ PID มีความจำเพาะเจาะจงสำหรับแต่ละระบบและลักษณะการตอบสนองที่ต้องการเช่นในการปรับค่าตัวแปรควบคุมเพื่อให้เครื่อง Segway สามารถรักษาสมดุลในตัวเองโดยปราศจากผู้ขับขี่ใช้ค่าตัวแปรควบคุมแบบ PID ที่ค่า $K_p=2$, $K_i=0.2$ และ $K_d=2$ ซึ่งน้อยกว่าเมื่อเทียบกับการปรับเพื่อให้สามารถรักษาสมดุลในขณะที่มีผู้ขับขี่ เนื่องจากน้ำหนักโดยรวมของระบบที่ลดลง และเมื่อเทียบกับการปรับค่าตัวแปรควบคุมสำหรับหุ่นยนต์จำลองเครื่อง Segway ให้สามารถรักษาสมดุลในตัวเองได้ก็มีค่าแตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 ปัญหาที่สามารถแก้ไขและพัฒนาได้

1. ปัญหาทางด้านมอเตอร์ที่มีกำลังเกินขนาดที่จำเป็นและการตอบสนองของมอเตอร์สองข้างที่แตกต่างกัน
2. ปัญหาทางด้านสัญญาณรบกวนที่เกิดจากการติดตั้งระบบไฟฟ้าที่ยังไม่ดีเพียงพอ

5.4 ข้อเสนอแนะ

1. ปัญหาทางด้านมอเตอร์สามารถแก้ไขโดยการเปลี่ยนเป็นมอเตอร์ที่มีกำลังลดลงและเพื่อให้มอเตอร์ทั้งสองข้างมีการตอบสนองเท่ากัน
2. ปัญหาทางด้านสัญญาณรบกวนซึ่งสามารถแก้ไขด้วยการติดตั้งระบบไฟฟ้าให้มีประสิทธิภาพโดยการพันเกลียวสายไฟหรือใช้แกนเทอร์รอยสำหรับเชื่อมต่อสายไฟ
3. เพิ่มการติดตั้งระบบเลี้ยวของเครื่อง Segway



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

5.1 เว็บไซต์

- [1] Segway ฟิสิกส์ราชาชมงคล , URL:
<http://www.rmutphysics.com/charud/howstuffwork/howstuff2/segway/index.htm>
- [2] ฟิสิกส์รอบตัวตอน SEGWAY, URL:
<http://www.scimath.org/socialnetwork/groups/viewgroup/474-SEGWAY>
- [3] Rolling Resistance Coefficiencys, URL: http://www.engineeringtoolbox.com/rolling-friction-resistance-d_1303.html

5.2 รายงาน

- [4] Khalil Sultan (2003) , *Inverted Pendulum Analysis*, Design and Implementation, Instrumentation and Control Lab at the Institute of Industrial Electronics Engineering, Karachi, Pakistan.
- [5] Rich Chi Ooi (2003) , *Balancing a Two-Wheeled Autonomous Robot* , The University of Western Australia School of Mechanical Engineering, Final Year Thesis
- [6] M. A. Clark, J. B. Field, S. G. McMahon, and P. S. Philips (2005) , *EDGAR, A Self-Balancing Scooter*, University of Adelaide, Faculty of Engineering, Computer & Mathematical Sciences, School of Mechanical Engineering
- [7] วิศรุต บุญวิภัทรเสวี , สิริชัย ศรีกลิ่นดี และ สุทธิพงษ์ บรรพตจิต. 2556 : 9 . การสร้าง Segway เพื่อใช้ศึกษาในวิชาการควบคุมอัตโนมัติ . กรุงเทพฯ.

ภาคผนวก ก

คำสั่งควบคุมการทำงานของมอเตอร์

```

#include <math.h>

#define GYR_Y      0           // Gyro Y (IMU pin #4)

#define ACC_Z      1           // Acc Z (IMU pin #7)

#define ACC_X      2           // Acc X (IMU pin #9)

#define InA_R      11          // INA right motor pin

#define InB_R      12          // INB right motor pin

#define PWM_R      9           // PWM right motor pin

#define InA_L      8           // INA left motor pin

#define InB_L      10          // INB left motor pin

#define PWM_L      13          // PWM left motor pin

#define LINE_END   10

#define SPLIT      58

int  STD_LOOP_TIME = 9;

int  sensorValue[3] = { 0, 0, 0};

int  sensorZero[3] = { 0, 0, 0 };

int  lastLoopTime = STD_LOOP_TIME;

int  lastLoopUsefulTime = STD_LOOP_TIME;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

unsigned long loopStartTime = 0;

int actAngle; // angles in QUIDS 360° = 2PI =
1204 QUIDS

int ACC_angle;

int GYRO_rate;

int setPoint = 0;

int drive = 0;

int ttt = 0;

int error = 0;

int updateRate = 5; //Nr of loop to skip sending and receiving info from PC

float motorOffsetL = 0.9; //The offset for left motor

float motorOffsetR = 1.15; //The offset for right motor

void setup()
{

  analogReference(EXTERNAL); // Aref 3.3V

  Serial.begin(19200);

  for(int pin=InA_R; pin<=PWM_L; pin++) pinMode(pin, OUTPUT); // set output
mode

  delay(50);

  calibrateSensors();

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

}

void loop()
{
// ***** Sensor aquisition & filtering *****

  updateSensors();

  ACC_angle = getAccAngle(); // in Quids

  GYRO_rate = getGyroRate(); // in Quids/seconds

  actAngle = kalmanCalculate(ACC_angle, GYRO_rate, lastLoopTime);
  Serial.println(actAngle); // calculate Absolute Angle

// ***** PID and motor drive *****

  drive = updatePid(setPoint, actAngle); // PID algorithm

  if(actAngle>(setPoint-70) && actAngle<(setPoint+70))
    Drive_Motor(drive);
  else
    Drive_Motor(0); // stop motors if situation is hopeless

// ***** print Debug info *****

  //serialOut_raw();

  //serialOut_timing();

  //serialIn_GUI(); //Processing information from a pc

  //serialOut_GUI(); //Sending information to pc for debug

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
// ***** loop timing control *****

lastLoopUsefulTime = millis()-loopStartTime;

if(lastLoopUsefulTime<STD_LOOP_TIME)      delay(STD_LOOP_TIME-
lastLoopUsefulTime);

lastLoopTime = millis() - loopStartTime;

loopStartTime = millis();

}
```

Kalman

```
// KasBot V1 - Kalman filter module

float Q_angle = 0.002; //0.001
float Q_gyro = 0.01; //0.003 ok1= 0.02
float R_angle = 0.01; //0.03
float x_angle = 0;
float x_bias = 0;
float P_00 = 0, P_01 = 0, P_10 = 0, P_11 = 0;

float dt, y, S;

float K_0, K_1;

float kalmanCalculate(float newAngle, float newRate,int looptime) {

dt = float(looptime)/1000;          // XXXXXXXX arevoir

x_angle += dt * (newRate - x_bias);

P_00 += - dt * (P_10 + P_01) + Q_angle * dt;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

P_01 += - dt * P_11;

P_10 += - dt * P_11;

P_11 += + Q_gyro * dt;

y = newAngle - x_angle;

S = P_00 + R_angle;

K_0 = P_00 / S;

K_1 = P_10 / S;

x_angle += K_0 * y;

x_bias += K_1 * y;

P_00 -= K_0 * P_00;

P_01 -= K_0 * P_01;

P_10 -= K_1 * P_00;

P_11 -= K_1 * P_01;

return x_angle;
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Motors

```

// KasBot V1 - Motors module

int Drive_Motor(int torque) {

    if (torque >= 0) {                                // drive motors forward

        digitalWrite(InA_R, LOW);

        digitalWrite(InB_R, HIGH);

        digitalWrite(InA_L, LOW);

        digitalWrite(InB_L, HIGH);

    } else {                                          // drive motors backward

        digitalWrite(InA_R, HIGH);

        digitalWrite(InB_R, LOW);

        digitalWrite(InA_L, HIGH);

        digitalWrite(InB_L, LOW);

        torque = abs(torque);

    }

    if(torque>1)

    {

        torque = map(torque,0,255,2,150);

        //analogWrite(PWM_R,torque * motorOffsetR)

        analogWrite(PWM_R,torque* motorOffsetR);
    }
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

//Original value

//analogWrite(PWM_L,torque * .9);           // motor are not built
equal...

analogWrite(PWM_L,torque* motorOffsetL);

}

else

{

torque = 0;

analogWrite(PWM_R,torque);

//Original value

//analogWrite(PWM_L,torque * .9);           // motor are not built
equal...

analogWrite(PWM_L,torque);

}

ttt = torque;

}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PID

```

// KasBot V1 - PID module

#define  GUARD_GAIN  10.0

float K = 1;

float Ki_div=1;

float  Kp = 7;

float  Ki = 0.2;

float  Kd = 4;

int last_error = 0;

int integrated_error = 0;

int pTerm = 0, iTerm = 0, dTerm = 0;

int updatePid(int targetPosition, int currentPosition) {

    error = targetPosition - currentPosition;

    /*Kp=map(analogRead(4),0,1023,0,2);

    Ki=map(analogRead(5),0,1023,0,2);

    Kd=map(analogRead(6),0,1023,0,15);

    Serial.print("Kp = "); Serial.println(Kp);

    Serial.print("Ki = "); Serial.println(Ki);

    Serial.print("Kd = "); Serial.println(Kd);*/

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

pTerm = Kp * error;

integrated_error += error;

iTerm = Ki * constrain(integrated_error*Ki_div, -GUARD_GAIN, GUARD_GAIN);

dTerm = Kd * (error - last_error);

last_error = error;

return -constrain(K*(pTerm + iTerm + dTerm), -255, 255);
}

```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sensors

```

// KasBot V1 - Sensors Module

void calibrateSensors() {                                     // Set zero sensor values

    long v;

    for(int n=0; n<3; n++){

        v = 0;

        for(int i=0; i<50; i++)    v += readSensor(n);

        sensorZero[n] = v/50;

    }

    //Original value                                     //(618 - 413)/2 = 102.5    330/3.3 =
    x/1024

    sensorZero[ACC_Z] -= 102;                               // Sensor position: horizontal,
    upward

    //sensorZero[ACC_Z] -= 137;

}

void updateSensors() {                                     // data acquisition

    long v;

    for(int n=0; n<3; n++){

        v = 0;

        for(int i=0; i<5; i++)    v += readSensor(n);

        sensorValue[n] = v/5 - sensorZero[n];
  
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    }

}

int readSensor(int channel){

    return (analogRead(channel));

}

int getGyroRate() { // ARef= 3.3V, Gyro
    sensitivity=2mV/(deg/sec)

    //return int((sensorValue[GYR_Y] * 0.888888888889)*-1); // in
    //quid/sec:(1024/360)/1024 * 3.3/0.002)

    //Original value

    //return int(sensorValue[GYR_Y] * 4.5833333333); // in
    //quid/sec:(1024/360)/1024 * 3.3/0.002)

    return int(sensorValue[GYR_Y] * 6.5833333333);

}

int getAccAngle() {

    return arctan2(-sensorValue[ACC_Z], -sensorValue[ACC_X]) + 256; // in Quid:
    1024/(2*PI))

}

int arctan2(int y, int x)

{

    int coeff_1 = 128; // angle in Quids (1024 Quids=360°)
    int    coeff_2 = 3*coeff_1;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

float abs_y = abs(y)+1e-10; // prevent 0/0 condition

float r, angle;

if (x >= 0) {

    r = (x - abs_y) / (x + abs_y);

    angle = coeff_1 - coeff_1 * r;

} else {

    r = (x + abs_y) / (abs_y - x);

    angle = coeff_2 - coeff_1 * r;

}

if (y < 0) return int(-angle); // negate if in quad III or IV
else return int(angle);

}

```

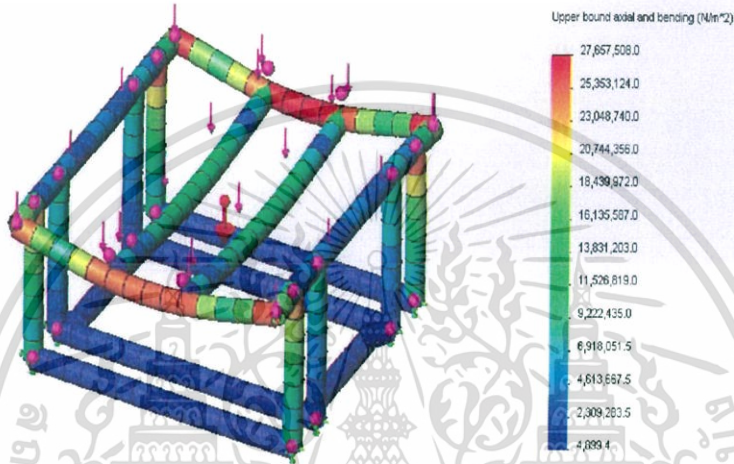
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

การออกแบบโครงสร้าง

การออกแบบโครงสร้าง เครื่อง Segway ด้วย โปรแกรม solid work

Model name: baseee
Study name: Study 1
Plot type: Upper bound axial and bending Stress1
Deformation scale: 215.903



การออกแบบขนาดเพลลา ด้วย โปรแกรม solid work

Model name: Part1
Study name: Study 2
Plot type: Static displacement Displacement1
Deformation scale: 72.1459



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

การคำนวณขนาดมอเตอร์และเฟือง

การคำนวณขนาดเฟือง

$$rpm \times gearratio$$

$$450 \times \frac{21}{80} \approx 120rpm$$

$$\omega = 2\pi \frac{rad}{rev} \times \frac{120rev}{min} = 754 \frac{rad}{min} \approx 12.6 \frac{rad}{s}$$

$$v = \omega r$$

$$v = 12.6 \frac{rad}{s} \times 6 \frac{inch}{rad} \times 0.0254 \frac{m}{inch}$$

$$v = 6.92 \frac{km}{hr}$$

การคำนวณขนาดมอเตอร์ที่เหมาะสม

$$V = 15 \text{ km/hr}$$

$$\text{Weight} = 150\text{kg}$$

$$\text{Efficiency} = 0.78$$

$$\text{safety factor} = 2$$

$$c = 0.002$$

$$P = \left[\text{weight} \times g \times C \right] \times V \times \frac{\text{safetyfactor}}{\text{motorefficiency}}$$

$$P = \left[150 \times 9.81 \times 0.002 \right] \times 15 \times \frac{5}{18} \times \frac{2}{0.78} \approx 32w$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้