พัฒนาโครงสร้างและระบบควบคุมอัตโนมัติของ Segway

Segway Structure Developing and Studying the Control System

ณัฐพงษ์ โทลา
ปัณณทัต ธีราโชติสิน
สิทธิภาส ปริปุณณโภค

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2558

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

พัฒนาโครงสร้างและระบบควบคุมอัตโนมัติของ Segway

Segway Structure Developing and Studying the Control System

ณัฐพงษ์ โทลา
ปัณณทัต ธีราโชติสิน
สิทธิภาส ปริปุณณโภค

วศ.
ณ339ส
2558
เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 143938
วัน.เดือน.ปี 04 ต.ค. 2559

b. A2800[illegible]09
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2558

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Segway Structure Developing and Studying the Control System

Nattapong Tola

Pannatat Teerachotisin

Sittipas Paripunnapok

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

2015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2558

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง. พัฒนาโครงสร้างและระบบควบคุมอัตโนมัติของ Segway

Segway Structure Developing and Studying the Control System

ผู้จัดทำ

1.นายณัฐพงษ์ โทลา รหัสประจำตัว 55010373

2.นายปัณณทัต ธีราโชติสิน รหัสประจำตัว 55010755

3.นายสิทธิภาส ปริปุณณโภค รหัสประจำตัว 55011306

ณัฐวุฒิ เดไปวา อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ.ดร. ณัฐวุฒิ เดไปวา)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พัฒนาโครงสร้างและระบบควบคุมอัตโนมัติของ Segway

นายณัฐพงษ์ โทลา 55010373
นายปัณณทัต ธีราโชติสิน 55010755
นายสิทธิภาส ปริปุณณโภค 55011306
ผศ.ดร. ณัฐวุฒิ เดไปวา อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2558

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์เรื่อง การปรับปรุง Segway เพื่อการศึกษาระบบควบคุมอัตโนมัติ มีจุดประสงค์เพื่อการพัฒนาและเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของ Segway โดยการปรับปรุงระบบควบคุม ระบบส่งกำลัง และอุปกรณ์อิเลคทรอนิกส์ ที่ยังไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอ ที่จะใช้งานจริง และใช้พลังงานในการใช้งานมากเกินกว่าที่จำเป็น ดังนั้นจึงต้องทำการศึกษาโครงสร้างและระบบของ Segway และทำการปรับเปลี่ยนระบบส่งกำลัง อุปกรณ์อิเลคทรอนิกส์และระบบควบคุม โดยการลดขนาดของมอเตอร์และแบตเตอรี่เปลี่ยนรูปแบบการส่งกำลัง และวิเคราะห์ฟังก์ชันการถ่ายโอนใหม่ เพื่อปรับปรุงระบบควบคุมโดยใช้โปรแกรม Matlab/Simulink ในการจำลองการตอบสนอง ของ Segway เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงค่าตัวควบคุมแบบ PID และนำค่าที่ได้ไปตั้งค่าการควบคุมของ Segway ให้มีการทำงานใกล้เคียงกับ Segway ที่ใช้งานได้จริงทั่วไป ซึ่งผลจากการปรับปรุงพัฒนาโครงสร้างและระบบต่างๆ ของ Segway พบว่า สามารถทำงานได้ใกล้เคียงกับ Segway มาตรฐานทั่วไป รองรับน้ำหนังของผู้ใช้ได้ รวมถึงใช้พลังงานน้อยลงตามเป้าหมาย

คำสำคัญ: Segway, PID, ฟังก์ชันการถ่ายโอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Segway Structure Developing and Studying the Control System

Mr.Nattapong	Tola	55010373
Mr.Pannatat	Teerachotisin	55010755
Mr.Sittipas	Paripunnapok	55011306
Asst.Prof.Dr.Nattawoot Depaiwa		Advisor

Year 2015

Abstract

The purposes of this study are to develop and increase efficiency of Segway by improving the control system, powertrain system and electronic apparatus that could not be used because of low ability and waste energy when the segway is working. Therefore the study must concern about the structure, control system and operation of Segway. In changing powertrain system, electronic devices and control system by lowering motor and batteries size, recreating powertrain system and analyzing transfer function will be better. The Matlab/Simulink software is used to simulate the system response for improving the control system and changing the PID controller's values in the control program of Segway. After modifying the structure and other systems of Segway, the modified Segway can be used as general Segway while supporting the user's load and saving energy according to the objectives.

Keywords: Segway, PID, Transfer function

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

รายงานจากการวิจัยฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความอนุเคราะห์จากบุคคลหลายท่าน ซึ่งผู้มีพระคุณท่านแรกที่ผู้ศึกษาใคร่ขอกราบพระคุณคือ ท่านผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐวุฒิ เดไปวา อาจารย์ที่ได้ให้ความรู้ คำแนะนำ ตรวจทาน และแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆทุกขั้นตอน เพื่อให้การเขียนรายงานการวิจัยฉบับนี้สมบูรณ์ที่สุด ท่านที่สองคือรุ่นพี่ที่กำลังศึกษาอยู่ปริญญาเอก ที่ให้คำแนะนำตรวจทาน และแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ผู้ศึกษาใคร่ขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้ นอกจากนี้ ผู้ศึกษาใคร่ขอขอบพระคุณ นายปัณณธร ธีราโชติสิน ซึ่งเป็นพี่ชายของสมาชิกในงานวิจัยนี้ ที่ค่อยให้คำปรึกษาให้คำแนะนำในการค้นคว้าข้อมูล ความรู้ในด้านต่างๆ และขอขอบคุณสมาชิกทุกท่านภายในงานวิจัยเรื่อง “การควบคุมความเร็วของกระบอกสูบไฮดรอลิก” และ “การศึกษาควบคุมระบบอัตโนมัติโดยการทดลองการควบคุมลูกตุ้มผกผัน และหุ่นยนต์รักษาสมดุล” ที่คอยให้คำปรึกษา และช่วยเหลือในการทดสอบชิ้นงาน และต้องขอขอบพระคุณบุคคลสำคัญที่สุดที่ทำให้ข้าพเจ้ามีวันนี้ ก็คือ บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพรักยิ่ง ซึ่งได้เลี้ยงดูผู้เขียนมาเป็นอย่างดี พร้อมทั้งให้โอกาสในการศึกษาอย่างเต็มที่ และยังให้กำลังใจ เอาใจใส่เสมอมา ในทุกๆ ด้านอันหาที่เปรียบมิได้ ข้าพเจ้าขอระลึกในพระคุณอันสุดประมาณ และขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

นายณัฐพงษ์ โทลา
นายปัณณทัต ธีราโชติสิน
นายสิทธิภาส ปริปุณณโภค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....II

กิตติกรรมประกาศ.....III

สารบัญ.....IV

สารบัญตาราง.....VII

สารบัญรูป.....VIII

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 ขั้นตอนการศึกษา.....3

บทที่ 2 งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....4

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....4

2.1.1 งานวิจัยของ Khalil Sultan, Institute of Industrial Electronics Engineering ประเทศปากีสถาน เรื่อง "Inverted Pendulum, Analysis, Design and Implementation".....4

2.1.2 งานปริญญานิพนธ์ของ Rich Chi Ooi ,University of Western Australia, School of Mechanical Engineering เรื่อง "Balancing a Two-Wheeled Autonomous Robot".....5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.1.3 งานปริญญานิพนธ์ของ M. A. Clark, J. B. Field, S. G. McMahon และ P. S. Philps ,University of Adelaide, Faculty of Engineering, Computer & Mathematical Sciences, School of Mechanical Engineering เรื่อง "EDGAR, A Self-Balancing Scooter" 5

2.1.4 งานปริญญานิพนธ์ของ Maia R. Bageant , MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY, Department of Mechanical Engineering, เรื่อง "Balancing a Two-Wheeled Segway Robot" 6

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 6

2.2.1 ระบบควบคุมแบบสัดส่วน - ปริพันธ์ - อนุพันธ์ 6

2.2.2 Transfer Function ของ Segway 10

2.2.3 ตัวกรองคาลแมน 14

2.2.4 Ziegler-Nichols 15

บทที่ 3 วิธีดำเนินงาน 16

3.1 วิเคราะห์ปัญหาและการแก้ไข 16

3.1.1 ปัญหาด้านโครงสร้าง 16

3.1.2 ปัญหาด้านการควบคุม 16

3.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน 17

3.2.1 ตารางการดำเนินงาน 17

3.2.2 ขั้นตอนการทำงาน 17

3.3 วงจรไฟฟ้าและการต่อสายไฟของ Segway 21

3.4 Box Diagram 22

3.5 เงื่อนไขในการทำงานของเครื่อง Segway 23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 4 วิธีการและผลการทดลอง.....24

4.1 จุดประสงค์การทดลอง.....24

4.2 วิธีการทดลอง.....24

4.3 ผลการทดลอง.....25

บทที่ 5 สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....38

5.1 สรุปผลการทดลอง.....38

5.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง.....38

5.3 ข้อเสนอแนะ.....38

บรรณานุกรม.....40

ภาคผนวก.....41

ภาคผนวก ก.....42

ภาคผนวก ข.....58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 ตารางแสดงผลของตัวแปรระบบควบคุมอัตโนมัติ....9

2.2 ตารางสมการสำหรับหาค่าตัวแปร Kp, Ki และ Kd....15

3.1 แสดงการดำเนินงานในเทอมที่ 1/2558....17

3.2 แสดงการดำเนินงานในเทอมที่ 2/2558....17

4.1 แสดงค่าความผิดพลาดเฉลี่ยของระบบ....37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

1.1 ยานพาหนะขับเคลื่อนสองล้อและ Dean Kamen....2

2.1 งานวิจัยของ Khalil Sultan เรื่อง Inverted Pendulum....4

2.2 หุ่นยนต์ขับเคลื่อนสองล้อสมดุลด้วยตัวเอง....5

2.3 รถ Scooter สองล้อ EDGAR....5

2.4 Two-Wheeled Segway Robot ของ Maia R. Bageant....6

2.5 บล็อกไดอะแกรมแสดง หลักการทำงานของระบบควบคุม PID....7

2.6 กราฟแสดงอิทธิพลของค่า Kp....8

2.7 กราฟแสดงอิทธิพลของค่า Ki....8

2.8 กราฟแสดงอิทธิพลของค่า Kd....9

2.9 ภาพ Free-body Diagram ของ Segway ตัวอย่าง....10

2.10 โปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณแรงที่สูญเสียเชิงกลของแบริ่ง....12

2.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างรอบการหมุนกับโมเมนท์แรงเสียดทานรวม....13

2.12 กระบวนการทำงานของ Kalman's Filter....15

3.1 Gyroscope Sensor รุ่น GY 521....18

3.2 ปุ่มควบคุมการเลี้ยวซ้าย-ขวา....18

3.3 Potentiometer 3 ตัว เพื่อใช้ปรับ PID....19

3.4 หน้าจอ LCD ขนาด 20x4....19

3.5 ปุ่มฉุกเฉิน เพื่อหยุดการทำงานของระบบ....19

3.6 สวิทช์คุมการจ่ายไฟ....20

3.7 Mosfet แบบเก่า(168W K58E06N1) และแบบใหม่(470W IRFP2907)....20

3.8 กล่องเก็บ Sensor และ บอร์ดควบคุม....20

3.9 วงจรไฟฟ้าและการต่อสายต่างๆเข้ากับบอร์ด Arduino ของ Segway....22

3.10 Box Diagram แสดงการทำงานของ ระบบ....22

3.11 Flowchart ของระบบเดินหน้า-ถอยหลัง....23

3.12 Flowchart ของระบบเลี้ยว....23

4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของ Segway กับ เวลา ที่ Kp=15, Kd=1....25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของ Segway กับ เวลา ที่ Kp=15, Kd=2.....25

4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของ Segway กับ เวลา ที่ Kp=15, Kd=3.....26

4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของ Segway กับ เวลา ที่ Kp=15, Kd=4.....26

4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของ Segway กับ เวลา ที่ Kp=15, Kd=5.....27

4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของ Segway กับ เวลา ที่ Kp=15, Kd=6.....27

4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของ Segway กับ เวลา ที่ Kp=16, Kd=1.....28

4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของ Segway กับ เวลา ที่ Kp=16, Kd=2.....28

4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของ Segway กับ เวลา ที่ Kp=16, Kd=3.....29

4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของ Segway กับ เวลา ที่ Kp=16, Kd=4.....29

4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของ Segway กับ เวลา ที่ Kp=16, Kd=5.....30

4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของ Segway กับ เวลา ที่ Kp=16, Kd=6.....30

4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของ Segway กับ เวลา ที่ Kp=17, Kd=1.....31

4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของ Segway กับ เวลา ที่ Kp=17, Kd=2.....31

4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของ Segway กับ เวลา ที่ Kp=17, Kd=3.....32

4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของ Segway กับ เวลา ที่ Kp=17, Kd=4.....32

4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของ Segway กับ เวลา ที่ Kp=17, Kd=5.....33

4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของ Segway กับ เวลา ที่ Kp=17, Kd=6.....33

4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของ Segway กับ เวลา ที่ Kp=18, Kd=1.....34

4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของ Segway กับ เวลา ที่ Kp=18, Kd=2.....34

4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของ Segway กับ เวลา ที่ Kp=18, Kd=3.....35

4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของ Segway กับ เวลา ที่ Kp=18, Kd=4.....35

4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของ Segway กับ เวลา ที่ Kp=18, Kd=5.....36

4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของ Segway กับ เวลา ที่ Kp=18, Kd=6.....36

5.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของ Segway กับ เวลา ที่ Kp=20, Kd=5.....38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

Segway ฮิวแมนทรานส์พอร์ตเตอร์ (Segway Human transporter) เป็นนวัตกรรมยานพาหนะรูปแบบใหม่ที่คิดค้นโดยนาย Dean Kamen นักประดิษฐ์และเป็นเศรษฐีชาวอเมริกัน ซึ่งสามารถใช้แทนรถยนต์ในสถานที่ที่รถยนต์ไม่สามารถเข้าถึงได้ เหมาะสำหรับการคมนาคมในเมืองหลวง โดย Segway นี้มีรูปร่างคล้ายเครื่องตัดหญ้าที่ได้มีการติดตั้งเครื่องยนต์แบบโรตารี่ผสมผสานกับ Scooter สามารถเคลื่อนที่ได้อิสระ โดยไม่ต้องพึ่งพาเกียร์ พวงมาลัย และเบรก และอาศัยแหล่งพลังงานจากแบตเตอรี่ จึงเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

Segway เป็นยานพาหนะที่ติดตั้งระบบควบคุมอัตโนมัติไว้โดยยึดหลักการการเอียงตัว การขยับร่างการของมนุษย์ จึงสามารถควบคุมได้ง่ายและเป็นธรรมชาติ และสามารถทรงตัวอยู่ได้โดยใช้ระบบวัดการทรงตัว (Balance Sensor) มีหลักการทำงานเหมือนระบบของเหลวภายในหูชั้นในของมนุษย์ ซึ่งวัดการเอียงของมนุษย์ และใช้ระบบประมวลผลในการออกคำสั่งให้กับ ระบบขับเคลื่อนเพื่อที่จะทรงตัวเอง และเคลื่อนที่ได้อย่างไปในทิศทางที่ต้องการได้อย่างนุ่มนวล และแม่นยำ โดยใช้การเอียงตัวของ Segway ในการกำหนดทิศทางและความเร็วในการเคลื่อนที่

เนื่องจากว่า Segway เป็นยานพาหนะขับเคลื่อนสองล้อที่สามารถนำไปใช้ในชีวิตประจำวันได้และสามารถนำไปใช้เป็นสื่อการเรียนการสอนในวิชาที่เกี่ยวกับวิชาควบคุมอัตโนมัติได้อีกด้วย ดังนั้นทางคณะผู้จัดทำจึงมีความสนใจที่จะทำการพัฒนาและปรับปรุงจากโครงงานเดิม เนื่องจากโครงงานเดิมนั้น ยังไม่สามารถที่จะให้มนุษย์นั้นไปยืนอยู่ข้างบนได้อย่างสะดวกมากนัก และไม่สามารถนำไปใช้เป็นสื่อการสอนได้ดีเท่าที่ควร โดยคณะผู้จัดทำได้ทำการเขียนโปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมใหม่ ติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการปรับค่า PID ได้โดยไม่จำเป็นต้องใช้คอมพิวเตอร์ ติดตั้งจอ LCD เพื่อที่จะรับรู้ค่า PID ณ ขณะนั้นได้ เพิ่มระบบขับเลี้ยวให้กับ Segway และ สามารถขับเคลื่อนไปข้างหน้าและหลังได้ราบรื่นมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 1.1 ยานพาหนะขับเคลื่อนสองล้อและ Dean Kamen

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

โครงการนี้มีจุดมุ่งหมายที่จะพัฒนาปรับปรุงระบบควบคุมให้สามารถเคลื่อนที่เหมือนกับ Segwayทั่วไป และสามารถนำไปเป็นอุปกรณ์ในการเรียนการสอนวิชา System Dynamic และ วิชา Automation Control เพื่อให้ผู้ที่สนใจในวิชาดังกล่าวเกิดความเข้าใจในเนื้อหาวิชามากขึ้น และได้สัมผัสกับอุปกรณ์จริง

1.3 สมมติฐานของปัญหา

เมื่อทำการเขียนโปรแกรมควบคุมการทำงานของSegwayเสร็จสมบูรณ์ ปรับปรุงและติดตั้งอุปกรณ์บางอย่างเพิ่มเติม รวมถึงหาค่า PID ที่เหมาะสมแล้ว จะทำให้Segwayตอบสนองได้ตามที่ต้องการ

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

1.4.1 ทฤษฎีของ Inverted Pendulum

1.4.2 ทฤษฎีการควบคุมอัตโนมัติ

1.4.3 การเขียนโปรแกรมควบคุมอัตโนมัติ

1.5 ขอบเขตการวิจัย

1.5.1 Segway ที่สามารถเลี้ยวซ้าย ขวาได้

1.5.2 Segway ที่สามารถรองรับผู้ใช้งานที่มีน้ำหนัก 80 กิโลกรัมได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5.3 Segway ที่สามารถรักษาสมดุลในตัวเองได้โดยอัตโนมัติ

1.5.4 Segway ที่ใช้สำหรับการทดลองของนักศึกษาโดยสามารถปรับค่า PID เพื่อให้ผู้ทดลองเข้าใจมากขึ้น

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

1.6.1 เรียนรู้ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง เช่น ทฤษฎีของ Inverted Pendulum ทฤษฎีการควบคุมอัตโนมัติ และการเขียนโปรแกรมควบคุม เป็นต้น

1.6.2 วางแผนการปรับปรุงและพัฒนา เซคเวย์

1.6.3 ศึกษาอุปกรณ์ที่มีอยู่ และอุปกรณ์ที่จะทำการติดตั้งเพิ่มเติม

1.6.4 ออกแบบโปรแกรมการทำงาน และเขียนโปรแกรมควบคุมการทำงานของ Segway

1.6.5 ทำการทดลองหาค่า PID ที่เหมาะสมในการสมดุลตัวเอง รวมถึงค่า PID ที่คนสามารถใช้เครื่อง Segway ได้

1.6.6 ออกแบบการทดลองสำหรับใช้เป็นสื่อการเรียนการสอน

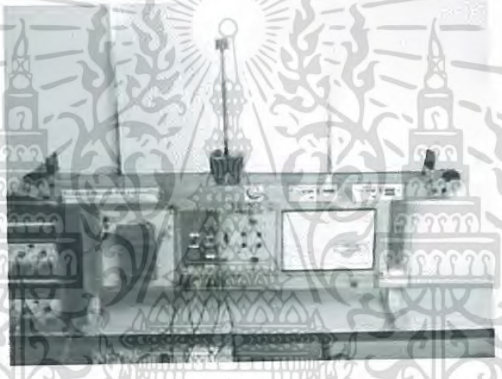
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
งานวิจัยและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่มีความเกี่ยวกับSegwayนั้นมีอยู่มากมาย ไม่ว่าจะเป็น inverted pendulum self-balancing robot รวมไปถึง 1-wheeled bike ดังนั้นจึงจะกล่าวถึง งานวิจัยและทฤษฎีต่างๆ ที่นำมาใช้ ในโครงงานนี้

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 งานวิจัยของ Khalil Sultan, Institute of Industrial Electronics Engineering ประเทศปากีสถาน เรื่อง "Inverted Pendulum, Analysis, Design and Implementation"



รูปที่ 2.1 งานวิจัยของ Khalil Sultan เรื่อง Inverted Pendulum

งานวิจัยได้กล่าวถึงพื้นฐานของระบบ Inverted Pendulum ตลอดจนการหาวิธีการที่จะควบคุมการทำงานของระบบ Inverted Pendulum นอกจากนี้ยังมีการวิเคราะห์ทางกลศาสตร์เพื่อหาสมการของระบบที่จะใช้ออกแบบตัวควบคุมแบบ PID เพื่อใช้เป็นแนวทางในการควบคุมผลตอบสนองของระบบ Inverted Pendulum รวมถึงมีการแสดงถึงวิธีการใช้โปรแกรม MATLAB ที่ช่วยในการออกแบบตัวควบคุมแบบ PID ให้ง่ายขึ้นอีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

รูปที่ 2.2 หุ่นยนต์ขับเคลื่อนสองล้อสมดุลด้วยตัวเอง

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการสร้างหุ่นยนต์ขับเคลื่อนด้วยล้อเพียงสองล้อที่สมดุลด้วยตนเอง เนื้อหาของงานวิจัยได้มีการกล่าวถึงทฤษฎีและขั้นตอนตลอดจนอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย รวมถึงมีการกล่าวถึงการออกแบบตัวควบคุมเพื่อใช้ในการสร้างเสถียรภาพให้กับหุ่นยนต์ขับเคลื่อนสองล้อสมดุลด้วยตัวเองพร้อมทั้งผลการวิเคราะห์ที่เกิดขึ้นจากการทดลองอีกด้วย [6]

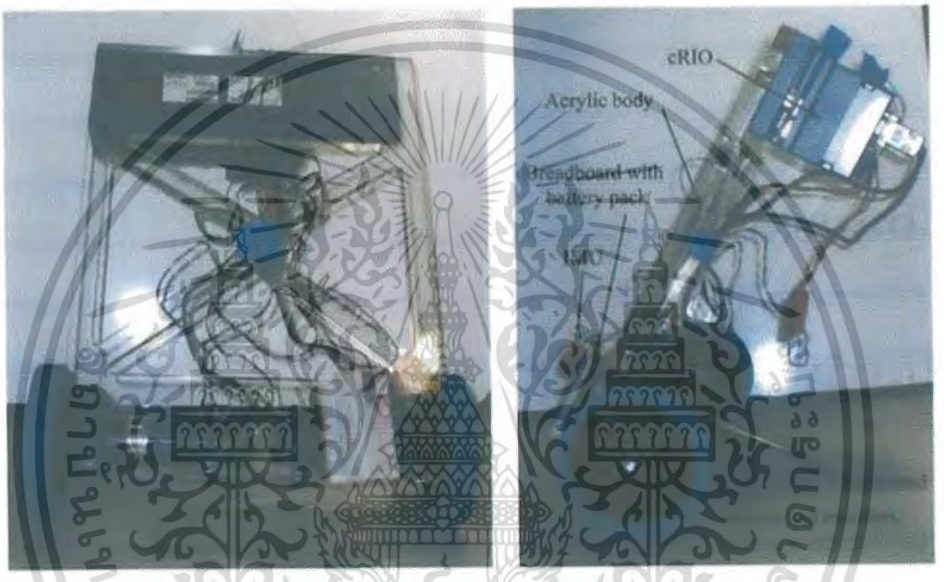
2.1.3 งานปริญญานิพนธ์ของ M. A. Clark, J. B. Field, S. G. McMahon และ P. S. Philps ,University of Adelaide, Faculty of Engineering, Computer & Mathematical Sciences, School of Mechanical Engineering เรื่อง “EDGAR, A Self-Balancing Scooter”

รูปที่ 2.3 รถ Scooter สองล้อ EDGAR

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานวิจัยนี้เป็นการสร้างรถสกู๊ตเตอร์ไฟฟ้าสองล้อที่มีลักษณะเหมือนกับ Segway มีการกล่าวถึงขั้นตอนและกระบวนการในการทำตั้งแต่การออกแบบโครงสร้างจนถึงการออกแบบระบบควบคุมและการใช้คำสั่งโปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของ Scooter สองล้อด้วย

2.1.4 งานปริญญานิพนธ์ของ Maia R. Bageant ,MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY, Department of Mechanical Engineering, เรื่อง "Balancing a Two-Wheeled Segway Robot"



รูปที่ 2.4 Two-Wheeled Segway Robot ของ Maia R. Bageant

งานวิจัยนี้จะเป็นการสร้าง Two-Wheeled Segway Robot ที่มีลักษณะเดียวกับ Segway แต่ไม่มีคนใช้งานและมีการกล่าวถึงขั้นตอนและกระบวนการออกแบบระบบควบคุมตั้งแต่การหา Transfer Function จนถึงการออกแบบคำสั่งโปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมการทำงานของ Two-Wheeled Segway Robot

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 ระบบควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์-อนุพันธ์ เป็นระบบควบคุมที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย ซึ่งค่าสัญญาณขาเข้า(Input) นั้นหามากจากการที่นำจุดอ้างอิง (Setpoint) หักลบด้วยสัญญาณขาออก (Output) หรือเรียกว่า ค่าความผิดพลาด (Error) ตัวควบคุมจะพยายามลดค่าผิดพลาดให้เหลือน้อย

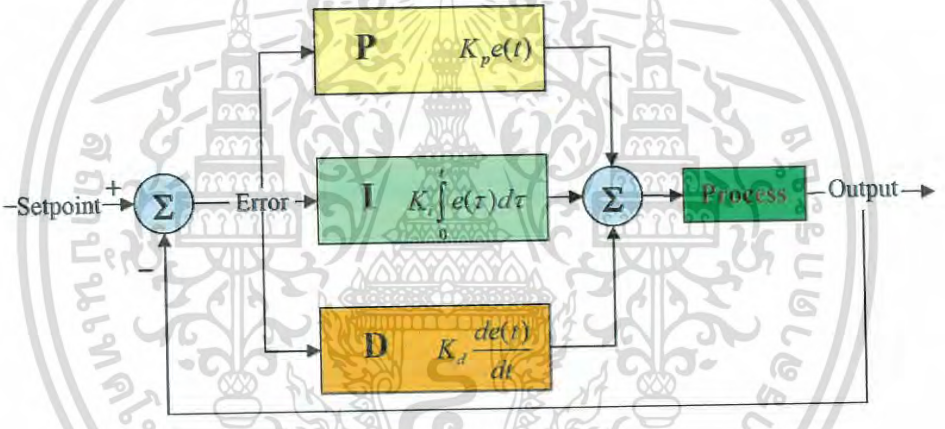
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่สุดด้วยการปรับค่าสัญญาณขาเข้าของระบบ ค่าตัวแปรของ PID ที่ใช้จะปรับเปลี่ยนตามธรรมชาติของระบบประกอบด้วย 3 ตัวแปร ดังนี้

1) Proportional เป็นส่วนปฏิกิริยาต่อ Error ณ ขณะนั้น (Current error)

2) Integral เป็นส่วนปฏิกิริยาที่เกิดจากผลรวมของ ค่า Error ที่ผ่านมาล่าสุด (Sum of recent errors)

3) Derivative เป็นส่วนปฏิกิริยาที่เกิดจากอัตราการเปลี่ยนแปลงของค่า Error (Rate at which the error has been changing) ผลรวมตามน้ำหนัก(Weighted sum) ของทั้งสาม ซึ่งปรับแต่งโดยค่าคงที่ Kp, Ki และ Kd (ค่าสัมประสิทธิ์ของค่า Error ปัจจุบัน, อดีต, และการคาดการอนาคต ตามลำดับ)เพื่อให้ได้การตอบสนองที่ต้องการจะถูกนำไปใช้ในการควบคุมกระบวนการต่างๆ โดยทั่วไปค่า K บางค่าอาจเป็นศูนย์ก็ได้ซึ่งคอนโทรลเลอร์ PID นั้นจะกลายมาเป็น controller แบบ PI, PD, P หรือ I ขึ้นอยู่กับว่าเทอมไหนหายไป



รูปที่ 2.5 บล็อกไดอะแกรมแสดงหลักการทำงานของระบบควบคุม PID

การควบคุมแบบ PID นั้นประกอบด้วย เทอมสำหรับการปรับแต่ง3 เทอมรวมกันเป็น MV

$$MV(t) = P_{out} + I_{out} + D_{out} \tag{2.1}$$

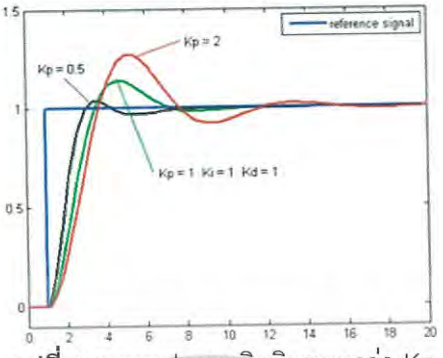
โดยที่ Pout Iout และ Dout เป็น Output จาก P, I, และ D ตามลำดับ

เทอม Pout เปลี่ยนแปลงตามอัตราส่วนของค่า Error ปัจจุบัน ซึ่งค่า Pout สามารถคำนวณได้โดยการนำค่า Error มาคูณกับค่าคงที่ Kp

$$P_{out} = K_p e(t) \tag{2.2}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า Kp ที่ สูงจะเป็นผลให้ค่า Output มากขึ้นตาม หากค่า Kp มากเกินไป ระบบอาจจะไม่เสถียรได้ ในทางตรงข้าม หากค่า Kp น้อยเกินไป อาจทำให้ระบบตอบสนองช้าเกินไป

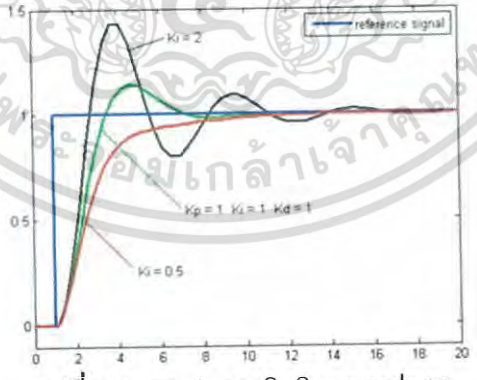


รูปที่ 2.6 กราฟแสดงอิทธิพลของค่า Kp

เทอม Iout เป็นอัตราส่วนของค่า Error สะสมในหนึ่งช่วงเวลา (อดีตจนถึงปัจจุบัน) ค่า Iout เกิดจากผลคูณของค่าคงที่ Ki กับผลรวมของ e(t) ซึ่งเป็นค่าสะสมของ Error ที่ควรจะต้อง ถูกแก้ไขมาก่อนหน้านี้

$$I_{out} = K_i \int_0^t e(t) \tag{2.3}$$

ซึ่งช่วยเร่งให้ระบบวิ่งเข้าหา Setpoint เร็วขึ้น และช่วยลด Error ที่เกิดจากการใช้เทอม Proportional อย่างเดียวแต่อาจจะทำให้เกิด Overshoot เกิน Setpoint ในค่าปัจจุบันด้วย



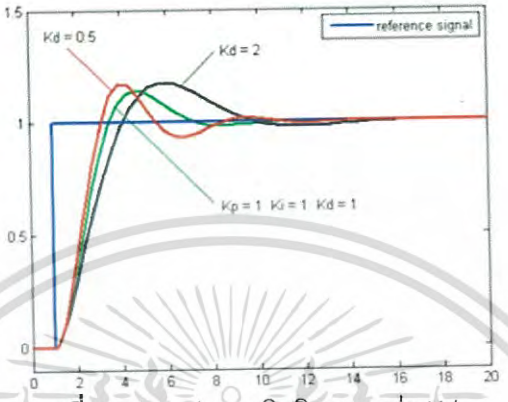
รูปที่ 2.7 กราฟแสดงอิทธิพลของค่า Ki

เทอม Dout อัตราการเปลี่ยนแปลงของค่า Error ใน โปรเซสนั้นคำนวณได้โดยสโลป (Slope) ของกราฟ Error vs time ซึ่งก็คืออนุพันธ์แรกเทียบกับเวลา และคูณค่าสโลปนี้กับค่าคงที่ Kd ก็จะได้เทอม Derivative

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$D_{out} = K_d \frac{d}{dt} e(t) \tag{2.4}$$

ซึ่งช่วยลด Overshoot ซึ่งเกิดจากเทอม Integral แต่ค้อนข้างไวต่อ Noise ซึ่งอาจทำให้ระบบไม่เสถียรได้หาก Noise และค่า Kp สูงเกินไป



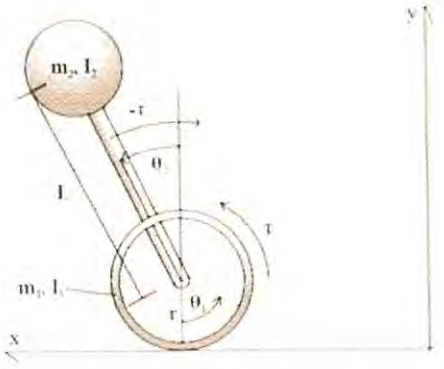
รูปที่ 2.8 กราฟแสดงอิทธิพลของค่า Kd

ผลของการเพิ่มค่าพารามิเตอร์ของคอนโทรลเลอร์ PID				
พารามิเตอร์	Rise time	Overshoot	Settling time	Error at equilibrium
K_p	ลดลง	เพิ่มขึ้น	เปลี่ยนเล็กน้อย	ลดลง
K_i	ลดลง	เพิ่มขึ้น	เพิ่มขึ้น	ถูกกำจัด
K_d	นานมาก (ลดลงหรือเพิ่มขึ้นน้อยมาก)	ลดลง	ลดลง	ไม่มี

ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงผลของตัวแปรระบบวบคุมอัตโนมัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 Transfer Function ของ Segway



รูปที่ 2.9 ภาพ Free-body Diagram ของ Segway ตัวอย่าง

$$\tau = [(m_1 + m_2)r^2 + I_1]\theta_1^{"} + [m_2L^2 + I_2]\theta_2^{"} + m_2rL\sin(\theta_2)(\theta_2^{"})^2 \quad (2.5)$$

เมื่อ θ มีค่าน้อยมากๆ $(\theta_2^{"})^2$ จะมีค่าเข้าใกล้ 0 จึงสามารถตัดออกได้ ดังนั้น

$$\tau = [(m_1 + m_2)r^2 + I_1]\theta_1^{"} + [m_2L^2 + I_2]\theta_2^{"} \quad (2.6)$$

$$\tau = [m_2L^2 + I_1]\theta_1^{"} + m_2rL\cos(\theta_2)(\theta_2^{"})^2 - m_2gL\sin(\theta_2) \quad (2.7)$$

เมื่อ θ มีค่าน้อยมากๆ $\sin(\theta_2) = \theta_2$ ดังนั้น

$$\tau = [m_2L^2 + I_1]\theta_1^{"} + m_2rL\cos(\theta_2)(\theta_2^{"})^2 - m_2gL\theta_2 \quad (2.8)$$

τ คือแรงบิดกระทำที่เกิดจากตัว Segway

$-\tau$ คือแรงบิดที่จำเป็นต้องใส่เข้าไปเพื่อให้สมการสมดุล

I_1 คือ rotational moments of inertia ของล้อ

I_2 คือ rotational moments of inertia ของ Segway

r คือ รัศมีของล้อ

L คือ ระยะห่างจากล้อถึงจุดศูนย์กลางมวลของ Segway

m_1 คือ มวลของล้อ

m_2 คือ มวลของSegwayและคนที่ใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กำหนดให้ $(m_1 + m_2)r^2 + I_1 = A$, $m_2 rL\cos(\theta_2) = B$ and $m_2 L^2 + I_2 = C$

ทำสมการที่ (2.6) ให้อยู่ในรูป ของ $\theta_1^{"}$

$$\theta_1^{"} = (\tau - C\theta_2^{"})/A \tag{2.9}$$

แทนสมการที่ (2.9) ในสมการที่ (2.8) จะได้

$$-\tau = C(\tau - C\theta_2^{"})/A + B\theta_2^{"} - m_2 gL\theta_2 \tag{2.10}$$

$$-\tau = C(\tau - C\theta_2^{"})/A + B\theta_2^{"} - m_2 gL\theta_2 \tag{2.11}$$

ใช้ laplace transform เพื่อหา Transfer Function

$$-(\frac{A+C}{A})\tau = (B - C^2)s^2\theta_2 - m_2 gL \tag{2.12}$$

$$\frac{\theta}{\tau} = -(\frac{A+C}{A})/(B - C^2)s^2 - m_2 gL \tag{2.13}$$

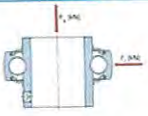
$$G(s) = \frac{\theta}{\tau} = -(A+C)/[(B - C^2)s^2 - m_2 gL]A \tag{2.14}$$

Modified Model ทำการหา Mechanical losses ของแบริ่ง โดยใช้โปรแกรมคำนวณของ SKF Group

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

YAR 204-2F

Frictional moment - power loss



Note: The drawing displayed is only for general representation and may not be identical to the selected bearing variant.

Enter Application Data

F_r [kN]
Radial load

F_a [kN]
Axial load

n_i [r/min]
Rotational speed of the inner ring

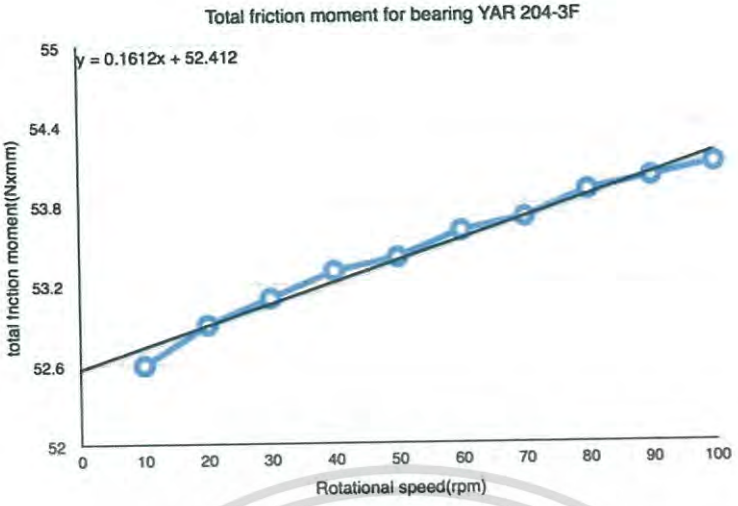
Operating temperature [°C]
Bearing outer ring

Grease used in the bearing VT307

รูปที่ 2.10 โปรแกรมที่ใช้ในการคำนวณแรงที่สูญเสียเชิงกลของแบริ่ง

เพื่อที่จะหาค่า Total friction moment ของแบริ่งและนำมาหาค่า coefficient of mechanical loss หรือ coefficient of damping ทำการคำนวณ Total friction moment โดยใช้ความเร็วในการหมุนระหว่าง 0-100 rpm และมีการรับโหลด 75N แล้วทำงานที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส และนำมาพล็อตกราฟ และหาความชันของกราฟ โดยที่ความชันของกราฟคือ coefficient of damping

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างรอบการหมุนกับโมเมนท์แรงเสียดทานรวม

ความชันของกราฟคือ 0.1612 Nmm/rpm = 1.54×10^{-3} Nm/rad/s

Then coefficient of damping (b) = 1.54×10^{-3} Nm/rad/s

For simplicity, b was estimated at 1.5×10^{-3} Nm/rad/s

แบริ่งสามารถเปรียบได้ว่าเป็น viscous damping ระหว่าง ตัวโครงสร้าง และล้อ ดังนั้นสามารถใช้สมการ ของ frictional damping ได้

$$\tau_{loss} = b(\theta_2^{'} - \theta_1^{'}) \tag{2.15}$$

$$\tau_{revised} = \tau + \tau_{loss} = \tau + b(\theta_2^{'} - \theta_1^{'}) \tag{2.16}$$

ดังนั้นสมการการเคลื่อนที่ใหม่คือ

$$\tau + b(\theta_2' - \theta_1') = C\theta_1'' + C\theta_2'' \tag{2.17}$$

$$-\tau + b(\theta_2' - \theta_1') = C\theta_1'' + C\theta_2'' \tag{2.18}$$

ทำการรวมสมการและทำการ Laplace transform เหมือนกับที่ได้ทำไปก่อนหน้านี้ จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$G(s) = \frac{\theta 2}{\tau} = \frac{(A+C)s}{(A \times B - C^2)s^3 + b(A+B+2C)s^2 - m_2 gLAs - m_2 gLb} \quad (2.19)$$

เมื่อทำการแทนค่าโดยใช้ค่าต่างๆดังนี้

L = 1.24 m

m_1 = 12 kg

m_2 = 135 kg

r = 0.15 m

I_1 = 0.946 kg.m^2

I_2 = 18.693 kg.m^2

b = 1.5x10^-3 Nm/rad/s

จะได้

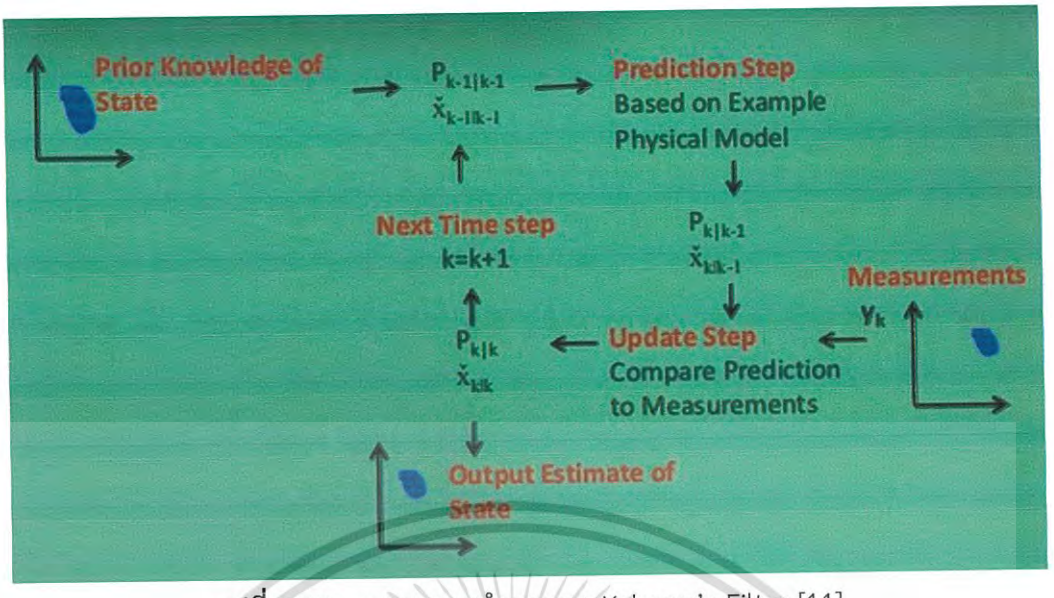
$$G(s) = \frac{\theta 2}{\tau} = \frac{230.5s}{-51110s^3 + 0.7178s^2 - 6984s - 2.463} \quad (2.20)$$

2.2.3 ตัวกรองคาลแมน (Kalman filter)

ตัวกรองคาลแมนเป็นตัวประมาณค่าที่พัฒนาขึ้นโดยอาศัยทฤษฎีการประมาณค่า ทำงานในลักษณะที่เรียกว่า "recursive" โดยใช้แบบจำลองระบบและแบบจำลองขบวนการรบกวนในการประมาณค่าล่วงหน้า จากนั้นจะนำค่าประมาณที่ได้ไปใช้ในแบบจำลองการวัด เพื่อทำการประมาณค่าข้อมูลการวัดขึ้น และนำไปเปรียบเทียบค่าข้อมูลการวัดที่วัดได้จริง จากนั้นสามารถปรับแต่งการประมาณค่าได้เสมือนกับการกรองสัญญาณ โดยผ่านพารามิเตอร์ 2 ตัว (Q และ R) ที่ปรากฏอยู่ในแบบจำลองการรบกวนระบบ เพื่อปรับแต่งแบบจำลองพลวัตของระบบ เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ตามที่ต้องการ[9]

สามารถลด Noise จากการการวัดจากเซนเซอร์ได้ โดยการนำค่าก่อนหน้าทำนายค่าล่วงหน้าแล้วนำไปเปรียบเทียบค่าที่วัดได้และปรับปรุงข้อมูลและส่งค่าที่ปรับปรุงแล้วออกเป็น output

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 กระบวนการทำงานของ Kalman's Filter [11]

2.2.4 Ziegler-Nichols

Ziegler-Nichols ได้พัฒนาวิธีการปรับค่าเกนของตัวควบคุมแบบ PID ขึ้นโดยอาศัยการทดลองและวิเคราะห์ผลโดยเปรียบเทียบกับกระบวนการต่าง ๆ ในอุตสาหกรรม และ ใช้เกณฑ์ IAE กับผลการตอบสนองของระบบโดยมีสัญญาณเข้าเป็นฟังก์ชันขั้นบันไดหนึ่งหน่วย (Unit-step Input) วิธีการวัฏจักรท้ายสุด (Ultimate Cycle Method) เริ่มจากทำให้ระบบและตัวควบคุมเป็นระบบควบคุมแบบป้อนกลับชนิดสัดส่วน(Proportional Control) เพียงอย่างเดียว หรือ ทำค่าเกนตัวควบคุมแบบอินติกรัล (Integral Control) และตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ (Derivative Control) ลงให้เหลือน้อยที่สุด จากนั้นค่อย ๆ เพิ่มค่าเกนตัวควบคุมแบบสัดส่วน (Proportional Control) ให้มีค่ามากขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งระบบเริ่มมีการแกว่ง ด้วยแอมพลิจูด (Amplitude) คงที่ สมมุติให้ค่า Kpc เป็นค่า Ku ในขณะเดียวกันก็ทำการวัดคาบเวลาการแกว่ง(Tu) และทำการใช้ตารางในการหาค่า เกนของระบบควบคุม[10]

Control Type	K_p	K_i	K_d
P	$0.5K_u$	-	-
PI	$0.45K_u$	$1.2K_p/T_u$	-
PD	$0.8K_u$	-	$K_pT_u/8$
PID	$0.6K_u$	$2K_p/T_u$	$K_pT_u/8$

ตารางที่ 2.2 ตารางสมการ สำหรับหาค่าตัวแปร Kp, Ki และ Kd

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3
วิธีดำเนินงาน

3.1 วิเคราะห์ปัญหาและการแก้ไข

จากการศึกษาโปรเจคเรื่องการพัฒนา Segway เพื่อการศึกษาระบบอัตโนมัติพบว่า มีข้อบกพร่องบางประการจึงทำให้Segway ไม่สามารถทำงานตามจุดมุ่งหมายที่ตั้งไว้ได้ โดยแบ่งปัญหาที่มีได้ดังนี้

3.1.1 ปัญหาด้านโครงสร้าง

1. การต่อสายไฟไม่เหมาะสม
2. ลักษณะของตัวเครื่อง Segway มีขนาดสูงกว่ารูปแบบทั่วไป ยากต่อการขึ้น-ลงตัวเครื่อง
3. บอร์ดที่ใช้ขับมอเตอร์มี Mosfet คุณภาพต่ำเกินไป ไม่สามารถทนทานกำลังไฟฟ้าได้ ทำให้เกิดความร้อนจน Mosfet เสียหาย จึงได้ทำการเปลี่ยนตัว Mosfet ให้สามารถรองรับกำลังไฟฟ้าของระบบได้

3.1.2 ปัญหาด้านการควบคุม

1. สามารถรักษาสมดุลด้วยตัวเองได้แต่การตอบสนองไม่ราบรื่นเท่าที่ควร และระบบควบคุมยังมีประสิทธิภาพไม่เพียงพอที่จะทำงานได้ราบรื่นเหมือน Segway ทั่วไป
2. การตอบสนองของ Segway ค่อนข้างช้า และมี Amplitude ค่อนข้างสูง ทำให้บางครั้งไม่สามารถใช้การได้ดีเท่าที่ควร
3. ค่า PID ของระบบ มีการเปลี่ยนแปลงขณะใช้งาน ค่า PID ของระบบที่สามารถปรับได้ด้วย Potentiometer มีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย เนื่องจากการขยับของตัวเครื่อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

3.2 ขั้นตอนการดำเนินงาน

3.2.1 ตารางการดำเนินงาน

	2015									
	August		September		October		November		December	
Study the principles and theories										
Analyze problems and plan the solutions										
Check and buy the equipment.										
Writing command code for controlling motor.										
Test Segway and analyze the problems.										
1st conclusion and analysis										
Edit and test codes.										

ตารางที่ 3.1 แสดงการดำเนินงานในเทอมที่ 1/2558

	2016									
	January		February		March		April		May	
Install LCD screen, variable resistor and write new codes.										
Test the installed equipment and analyze problems.										
Code a turning system.										
Test segway and solve problem.										
2nd conclusion and analysis.										
Create a thesis and prepare for the presentation.										

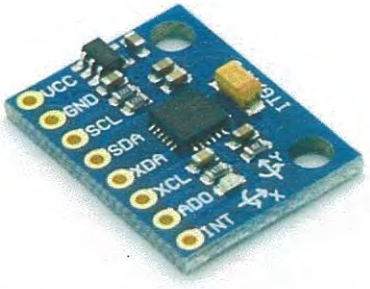
ตารางที่ 3.2 แสดงการดำเนินงานในเทอมที่ 2/2558

3.2.2 ขั้นตอนการทำงาน

1. ศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับ Segway, Arduino และระบบควบคุมอัตโนมัติ
2. วิเคราะห์ปัญหาที่เกิดขึ้น
3. ตรวจสอบอุปกรณ์และชิ้นส่วนต่างๆพร้อมจัดซื้ออุปกรณ์ที่ไม่สามารถใช้การได้

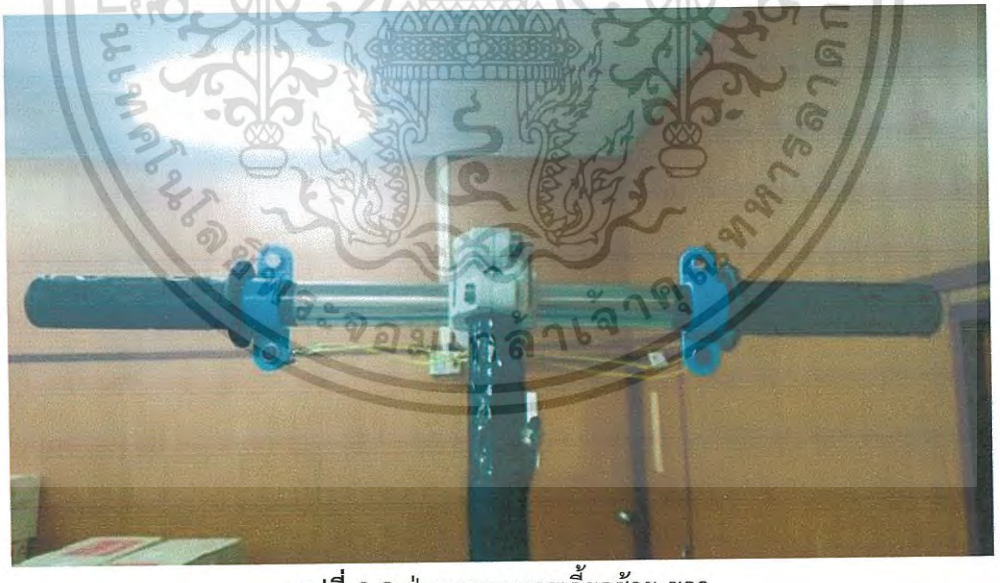
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
143938

4. เปลี่ยนเซ็นเซอร์จาก Gy-60 เป็น GY-521



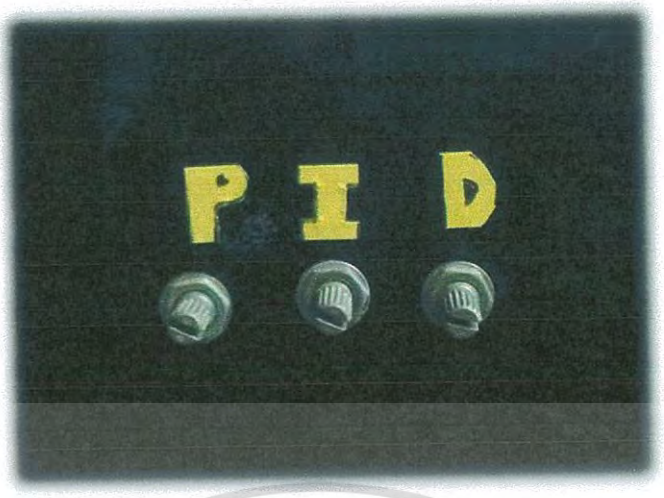
รูปที่ 3.1 Gyroscope Sensor รุ่น GY 521

5. ปรับปรุงการต่อวงจรไฟฟ้า
6. เขียนโปรแกรมควบคุมอัตโนมัติ
7. ปรับเทียบการทำงานของมอเตอร์ให้เท่ากัน
8. ทำการทดลองการทรงตัวของตัวเครื่อง
9. เพิ่ม “ตัวกรองคาลแมน” ลงในโปรแกรม พร้อมทดสอบการตอบสนองของเซนเซอร์
10. ติดตั้งระบบขับเลี้ยว, Potentiometer, จอLCD, ปุ่มฉุกเฉิน และสวิทช์คุมการจ่ายไฟ



รูปที่ 3.2 ปุ่มควบคุมการเลี้ยวซ้าย-ขวา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

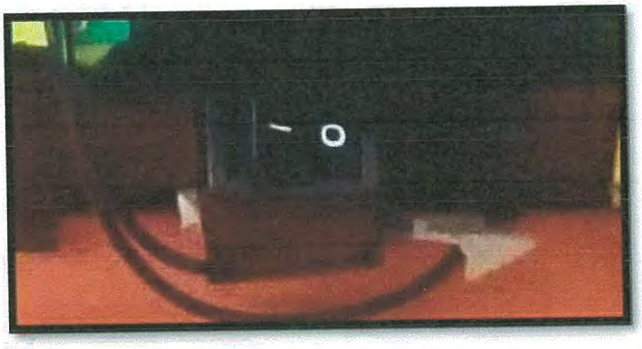


รูปที่ 3.3 Potentiometer 3 ตัว เพื่อใช้ปรับ PID

รูปที่ 3.4 หน้าจอ LCD ขนาด 20x4

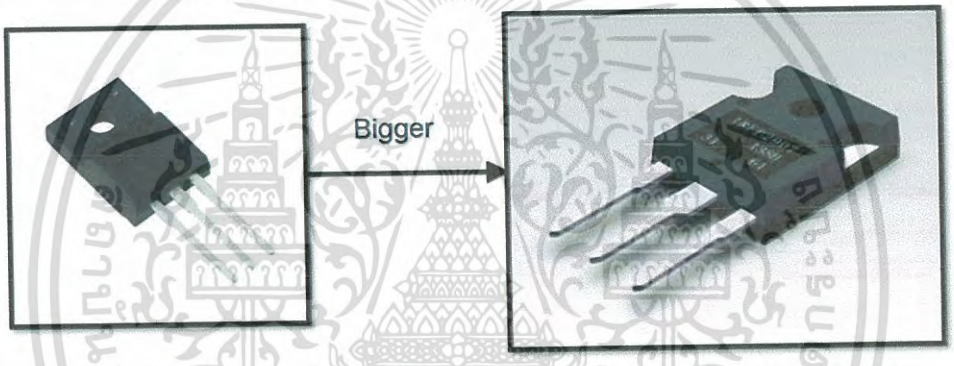
รูปที่ 3.5 ปุ่มฉุกเฉิน เพื่อหยุดการทำงานของระบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



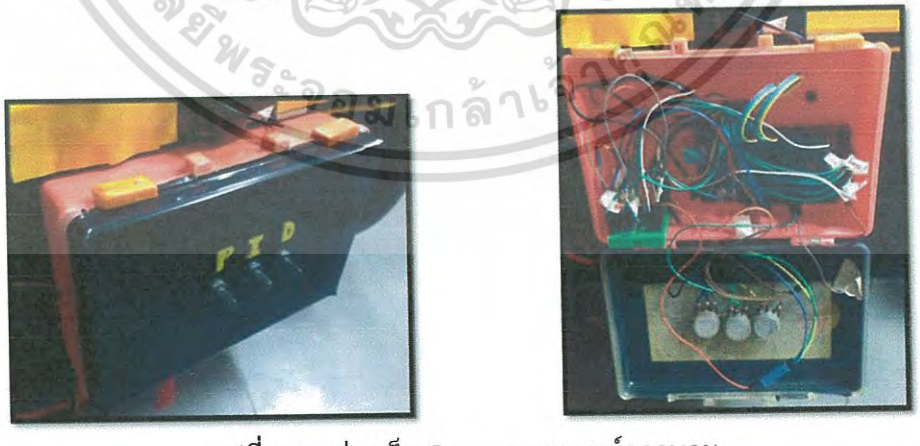
รูปที่ 3.6 สวิทช์คุมการจ่ายไฟ

11. เปลี่ยน Mosfet ใน Motor Driver Board เนื่องจากตัวเก่าเกิดความเสียหายจากที่ไม่สามรถรองรับกำลังไฟฟ้าในการทำงานได้



รูปที่ 3.7 Mosfet แบบเก่า(168W K58E06N1) และแบบใหม่(470W IRFP2907)

12. ตกแต่ง Segway และติดตั้งกล่องเก็บอุปกรณ์



รูปที่ 3.8 กล่องเก็บ Sensor และ บอร์ดควบคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

13. ทดลองเพื่อหาค่า PID ที่เหมาะสมโดยใช้วิธี Ziegler-Nichols
14. ออกแบบการทดลอง พร้อมทั้งจัดทำการทดลองตัวอย่าง

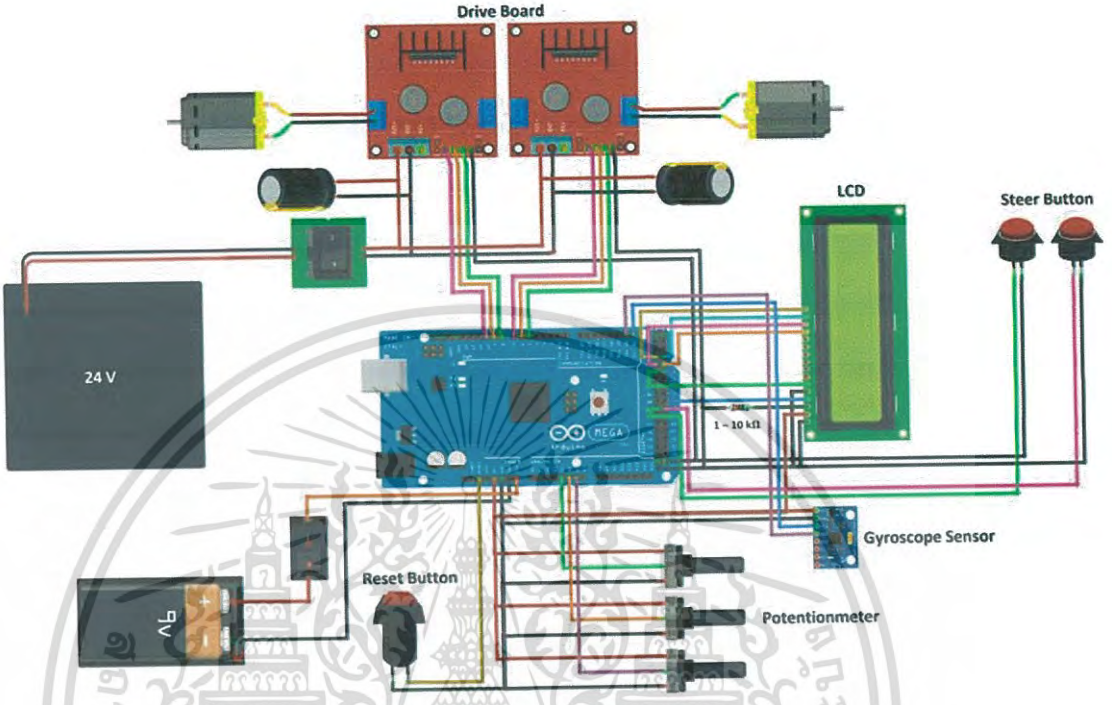
3.3 วงจรไฟฟ้า และ การต่อสายไฟของ Segway

แผนผังแสดงวงจรไฟฟ้าของ Segway รวมถึงวิธีการต่อสายไฟไปยังบอร์ด Arduino ทำงานโดยใช้แบตเตอรี่ขนาด 24V ควบคุมด้วยสวิตช์ เพื่อควบคุมการจ่ายไฟฟ้าเข้าไปยัง บอร์ดขับเคลื่อน และมีคาปาซิเตอร์ เพื่อป้องกันแรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสส่วนเกิน ที่เกิดจากการเปิดปิดและการเปลี่ยนทิศทางของ แรงเคลื่อนไฟฟ้าและกระแสไม่ให้เกิดความเสียหายต่อบอร์ดควบคุมมอเตอร์ Arduino ใช้ไฟเลี้ยงขนาด 9 V และ มีการต่อสายไฟดังนี้

1. Emergency button (Reset button) : ต่อสายหนึ่งสายกับช่อง Reset เพื่อสั่งให้โปรแกรมเริ่มต้นการทำงานใหม่ ต่ออีกสายหนึ่งกับช่อง GND
2. Potentiometer : สายตรงกลาง เพื่อปรับ Kp ต่อกับช่อง A4 เพื่อปรับ Ki ต่อกับช่อง A5 เพื่อปรับ Kd ต่อกับช่อง A6
   - เมื่อมองจากทางด้านหน้า และให้ขั้วสายชี้ลง สายทางด้านขวา ต่อกับ ช่อง 5V สายทางด้านขวา ต่อกับช่อง GND
3. Sensor : เป็น Gyroscope Sensor รุ่น GY 521 โดย VCC ต่อกับช่อง 5V ,GND ต่อกับช่อง GND ,SCL ต่อกับช่อง SCL (21) , SDA ต่อกับช่อง SDA (20)
4. Steer button : นำสายหนึ่งสายต่อกับช่อง GND ทั้ง 2 ปุ่ม ส่วนอีกสายหนึ่ง ถ้าเป็นปุ่มเลี้ยวขวา ต่อกับช่อง Digital (41) ถ้าเป็นปุ่มเลี้ยวซ้าย ต่อกับช่อง Digital (40)
5. LCD :
   - GND ต่อกับช่อง GND และ 5V ต่อกับช่อง 5V
   - Vo ต่อกับช่อง GND โดยสามารถติดตั้งตัวต้านทานเพื่อปรับความสว่างของหน้าจอได้
   - RS ต่อกับช่อง Digital (31) , R/W ต่อกับช่อง GND ,Enable ต่อกับช่อง Digital (30)
   - D4 ต่อกับช่อง Digital (29) ,D5 ต่อกับช่อง Digital (28) ,D6 ต่อกับช่อง Digital (27) ,D7ต่อกับช่อง Digital (26)
6. Drive Board (Left) : IN1 ต่อกับช่อง PWM (10),IN2 ต่อกับช่อง PWM (9) ,IN3 ต่อกับช่อง PWM (8) ,IN4 ต่อกับช่อง GND

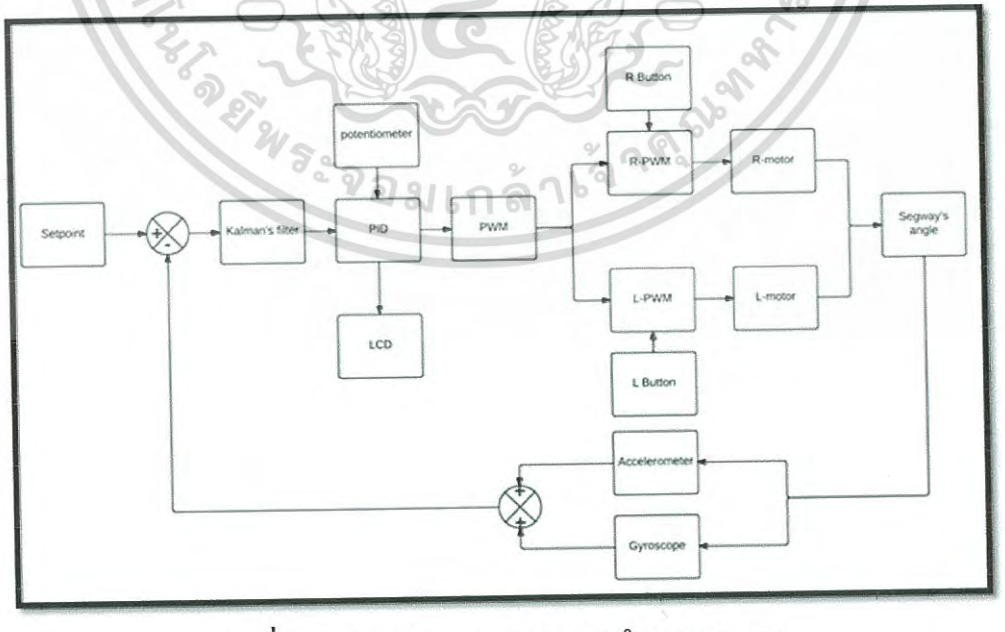
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7. Drive Board (Right) : IN1 ต่อกับช่อง PWM (7),IN2 ต่อกับช่อง PWM (6) ,IN3 ต่อกับช่อง PWM (5) ,IN4 ต่อกับช่อง GND



รูปที่ 3.9 วงจรไฟฟ้าและการต่อสายต่างๆเข้ากับบอร์ด Arduino ของ Segway

3.4 Box Diagram

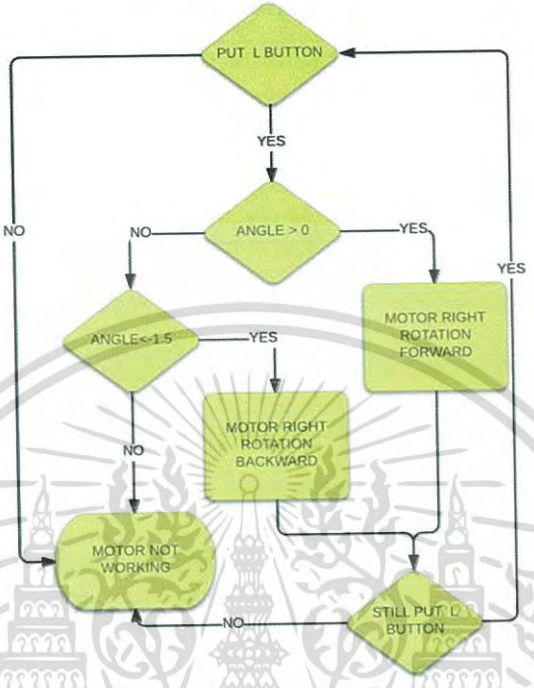


รูปที่ 3.10 Box Diagram แสดงการทำงานของระบบ

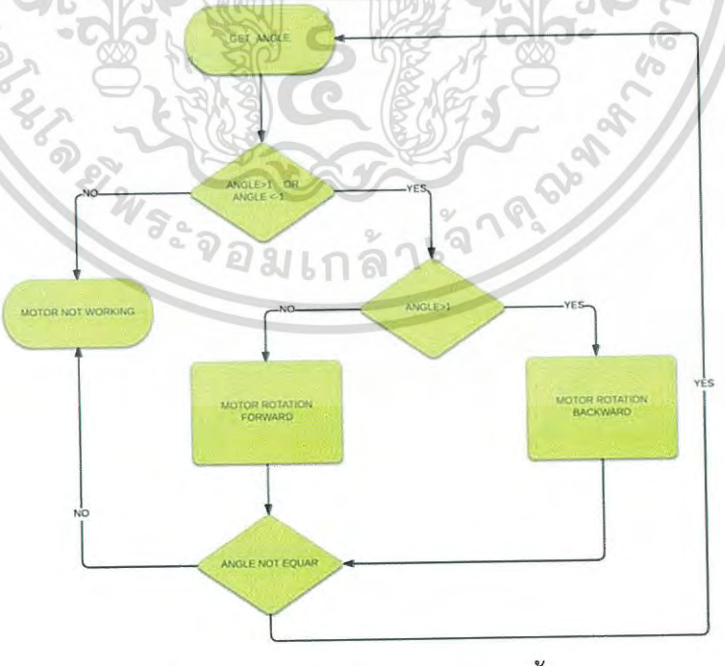
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 เงื่อนไขในการทำงานของเครื่อง Segway

เพื่อการต่อการเข้าใจ จึงได้แบ่งเงื่อนไขการงานออกเป็น 2 กรณี โดยที่จะแบ่งเป็น เงื่อนไขในการเคลื่อนที่เดินหน้าถอยหลัง และเงื่อนไขในการเลี้ยวซ้ายเลี้ยวขวา



รูปที่ 3.11 Flowchart ของระบบเดินหน้า-ถอยหลัง



รูปที่ 3.12 Flowchart ของระบบเลี้ยว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4
วิธีการและผลการทดลอง

4.1 จุดประสงค์การทดลอง

หลังจากที่ได้ทำการปรับปรุงและติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆของ Segway และปรับปรุงโปรแกรมในการควบคุมการทำงานของ Segway แล้ว จำเป็นต้องหาค่าตัวควบคุม PID เพื่อใช้ในการตอบสนองของระบบให้ Segway สามารถที่จะรักษาสมดุลในขณะมีและไม่มีผู้ขับขี่ และทำการเปรียบเทียบการตอบสนองของระบบเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าของตัวควบคุมแบบ PID

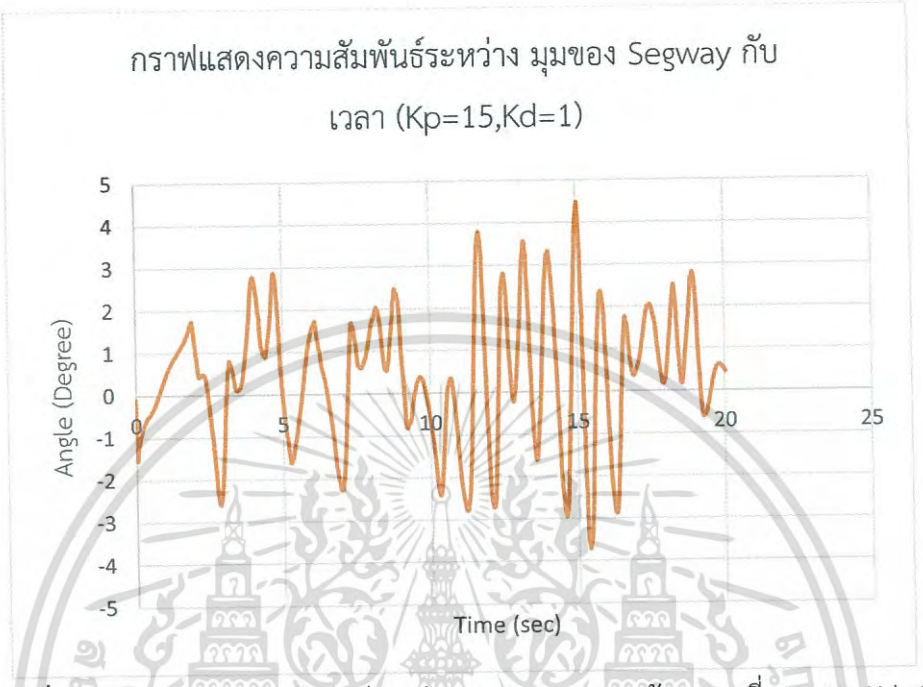
แต่ในกรณีของ Segway สามารถใช้ตัวควบคุมแบบ PD ก็เพียงพอต่อการใช้งานแล้ว ดังนั้นในการทดลองจึงจะไม่มีค่า Ki ในระบบควบคุม และทำการหาค่า Kp และ Kd ที่มีดีที่สุด แต่การที่จะเปรียบเทียบด้วยค่าต่างๆ เช่น overshoot นั้นเปรียบเทียบได้ยากเนื่องจากมีความใกล้เคียงกัน และในการเคลื่อนที่กลับไปมา แต่ละครั้งอาจจะจะมี overshoot ไม่เท่ากันก็ได้ ดังนั้นจึงจะพิจารณาจากค่าเฉลี่ยของค่าความผิดพลาด และนำมาเปรียบเทียบกันรวมถึงการทดลองนี้ยังสามารถศึกษาแนวโน้มของผลกระทบจากตัวควบคุม PD ที่ส่งผลต่อ Segway ได้อีกด้วย

4.2 วิธีการทดลอง

1. ทำการทดลองโดยการเพิ่มค่า Kd โดยให้ Kp คงที่ จากนั้นทำการทดลองเป็นจำนวน 6 ครั้ง โดยเพิ่มค่า Kd ทีละ 1 ทำการทดลองและบันทึกผลการทดลอง
2. ทำการเพิ่มค่า Kp ขึ้น 1 และใช้ค่า Kd เดียวกับการทดลองครั้งก่อนหน้าทำการทดลอง 4 ครั้ง (การทดลองทั้งหมด 24 ครั้ง) ทำการทดลองและบันทึกผลการทดลอง
3. ทำการหาค่าความผิดพลาดเฉลี่ยของทุกๆการทดลอง
4. ทำการทดลองโดยมีผู้ขับขี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

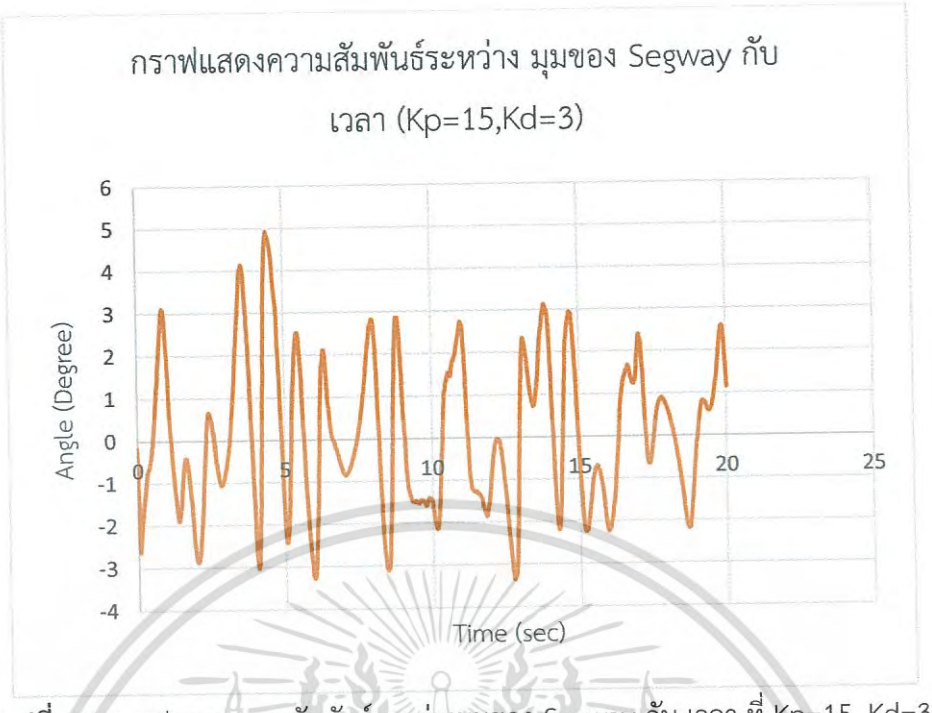
4.3 ผลการทดลอง



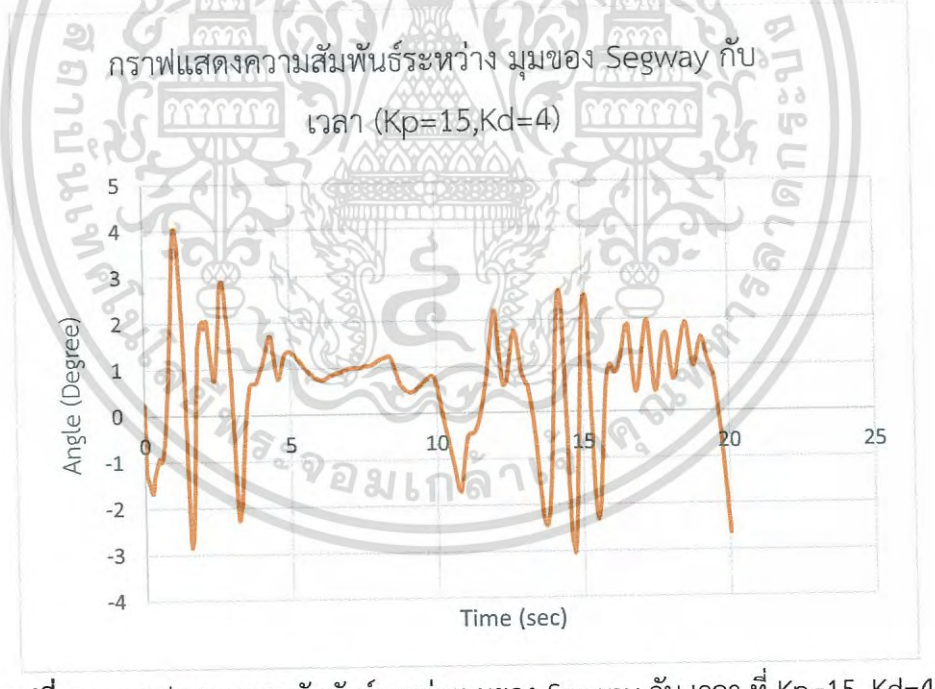
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของ Segway กับ เวลา ที่ Kp=15, Kd=1

รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของ Segway กับ เวลา ที่ Kp=15, Kd=2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



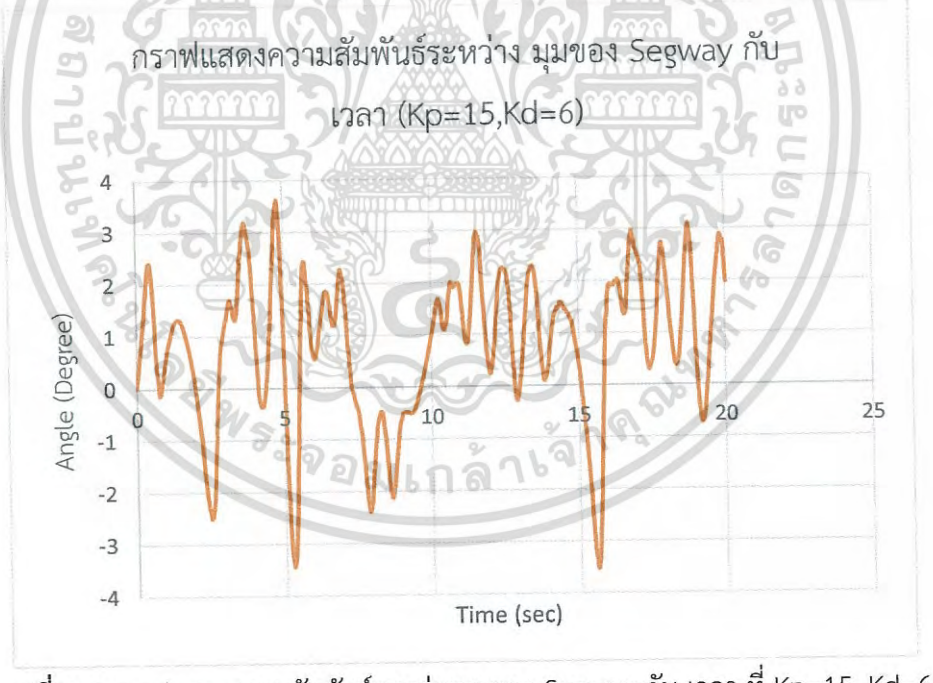
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของ Segway กับ เวลา ที่ Kp=15, Kd=3



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของ Segway กับ เวลา ที่ Kp=15, Kd=4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

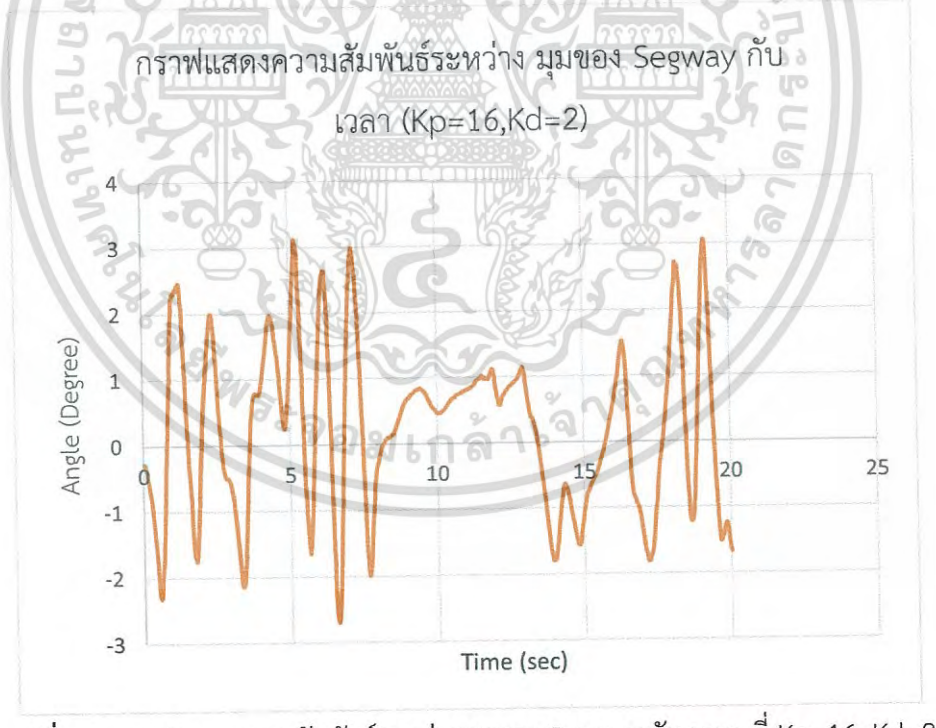
รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของ Segway กับ เวลา ที่ Kp=15, Kd=5



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของ Segway กับ เวลา ที่ Kp=15, Kd=6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

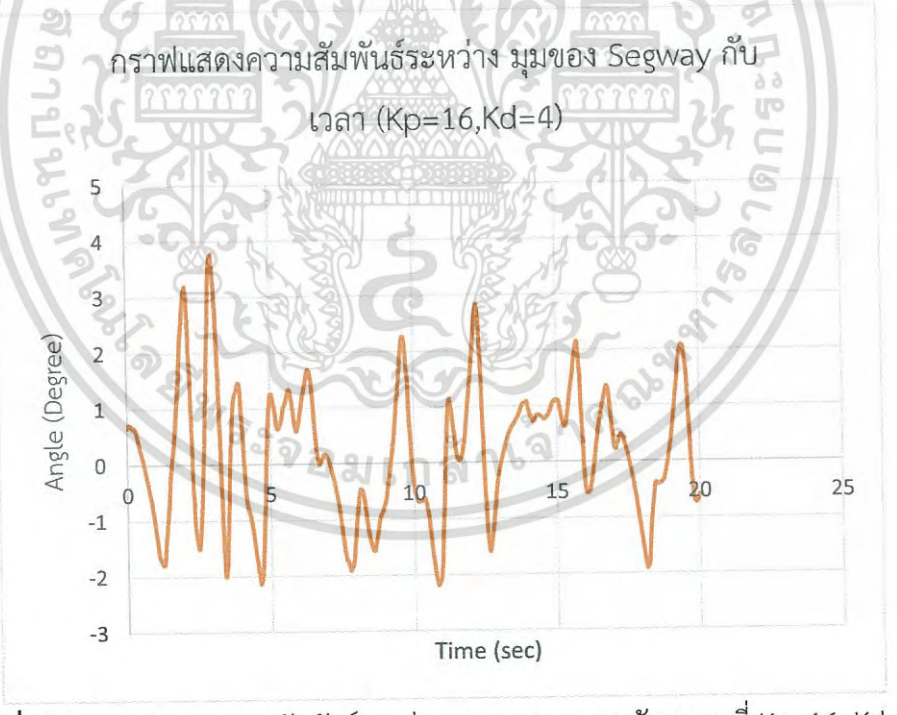
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของ Segway กับ เวลา ที่ Kp=16, Kd=1



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของ Segway กับ เวลา ที่ Kp=16, Kd=2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

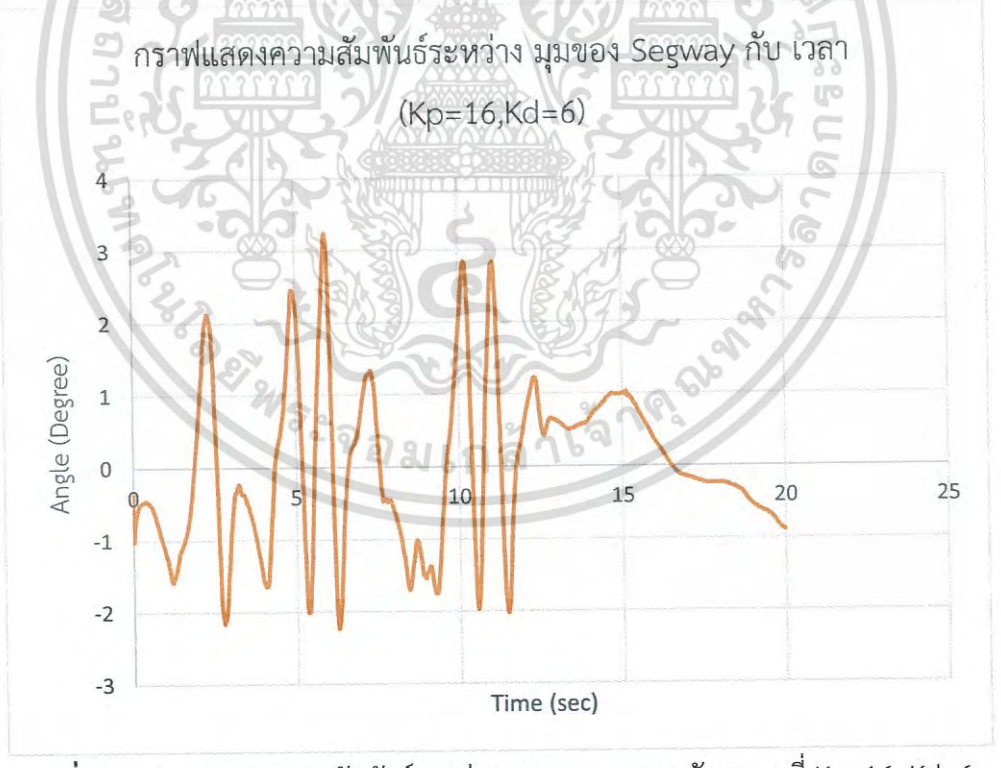
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของ Segway กับ เวลา ที่ Kp=16, Kd=3



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของ Segway กับ เวลา ที่ Kp=16, Kd=4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

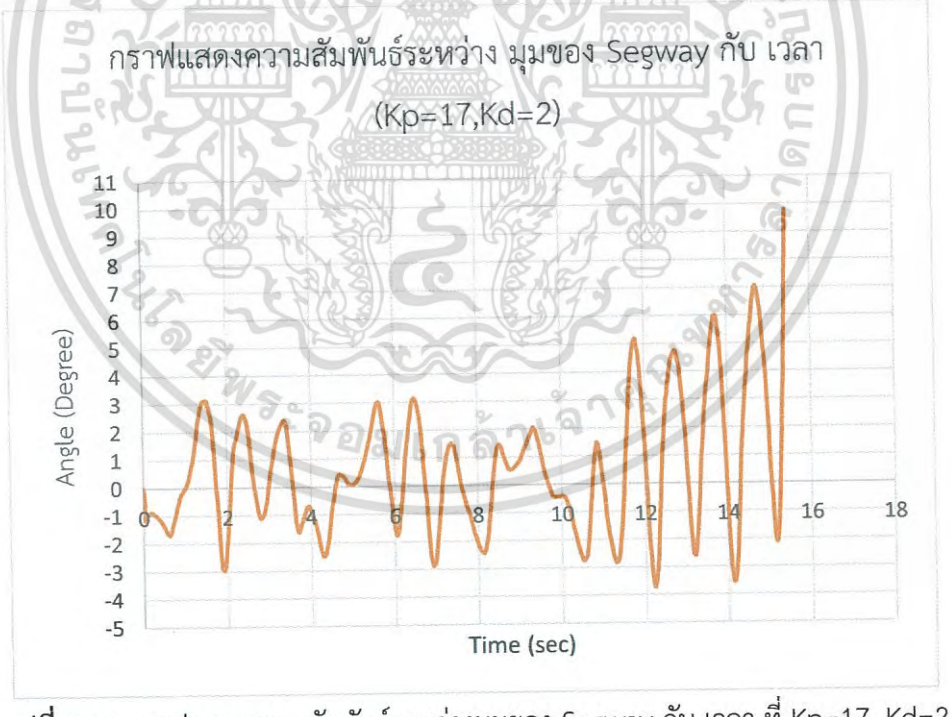
รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของ Segway กับ เวลา ที่ Kp=16, Kd=5



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของ Segway กับ เวลา ที่ Kp=16, Kd=6

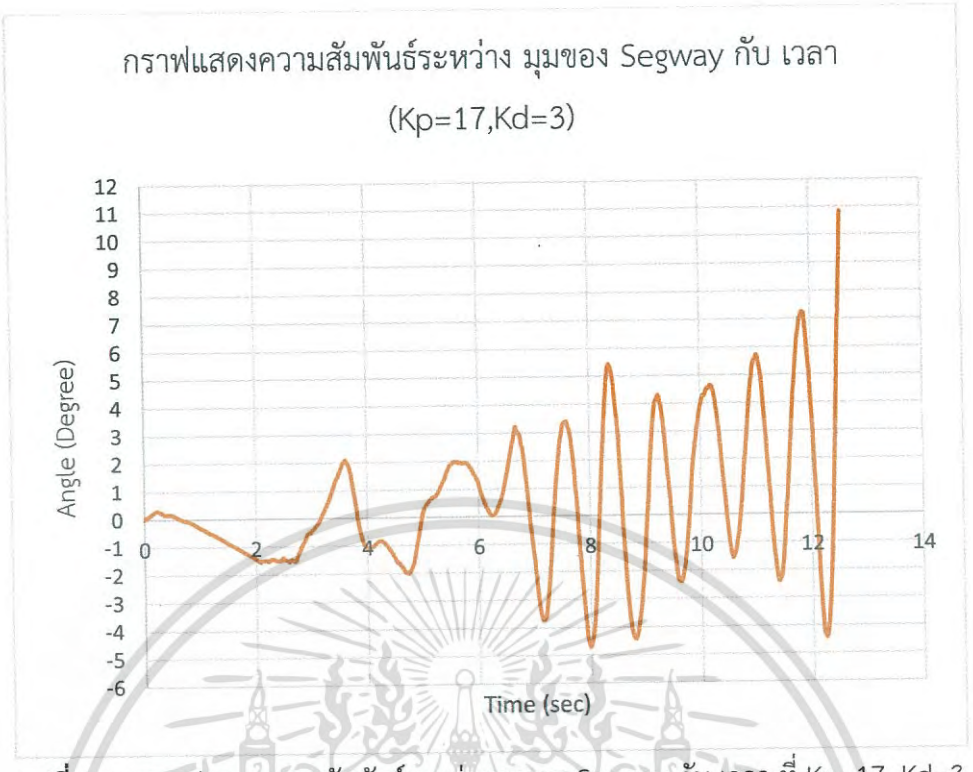
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของ Segway กับ เวลา ที่ Kp=17, Kd=1

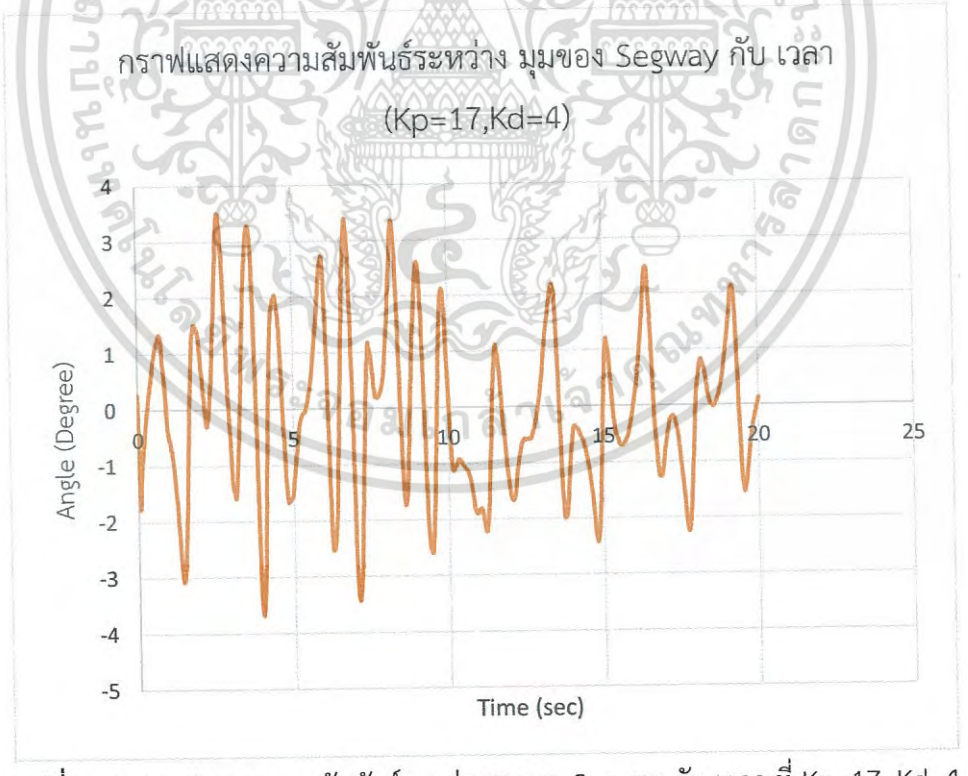


รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของ Segway กับ เวลา ที่ Kp=17, Kd=2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



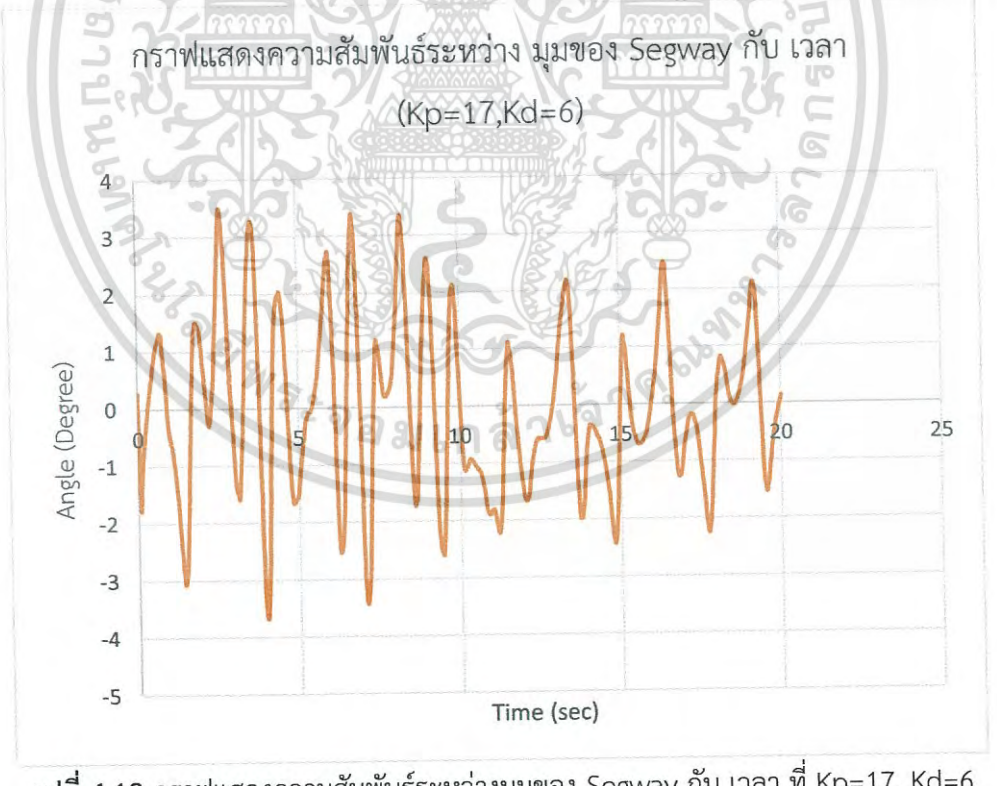
รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของ Segway กับ เวลา ที่ Kp=17, Kd=3



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของ Segway กับ เวลา ที่ Kp=17, Kd=4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

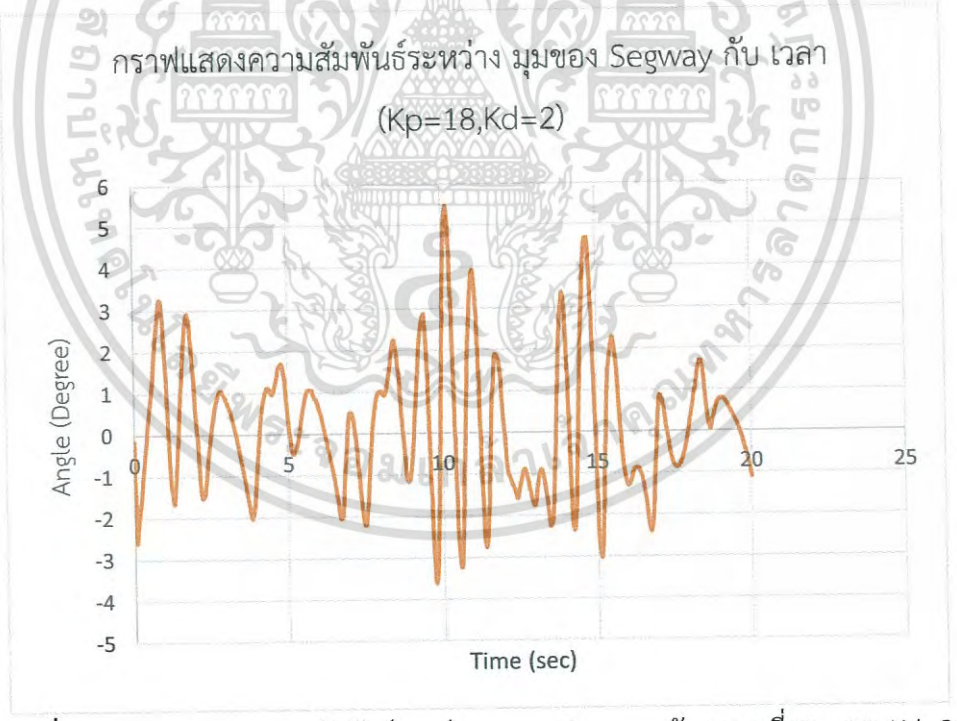
รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของ Segway กับ เวลา ที่ Kp=17, Kd=5



รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของ Segway กับ เวลา ที่ Kp=17, Kd=6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

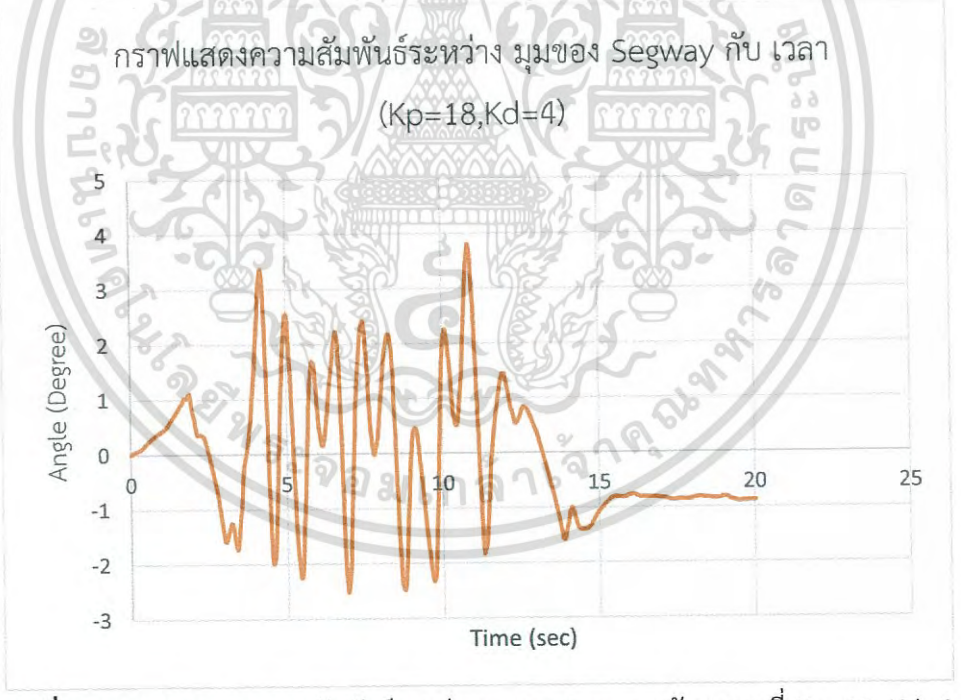
รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของ Segway กับ เวลา ที่ Kp=18, Kd=1



รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของ Segway กับ เวลา ที่ Kp=18, Kd=2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

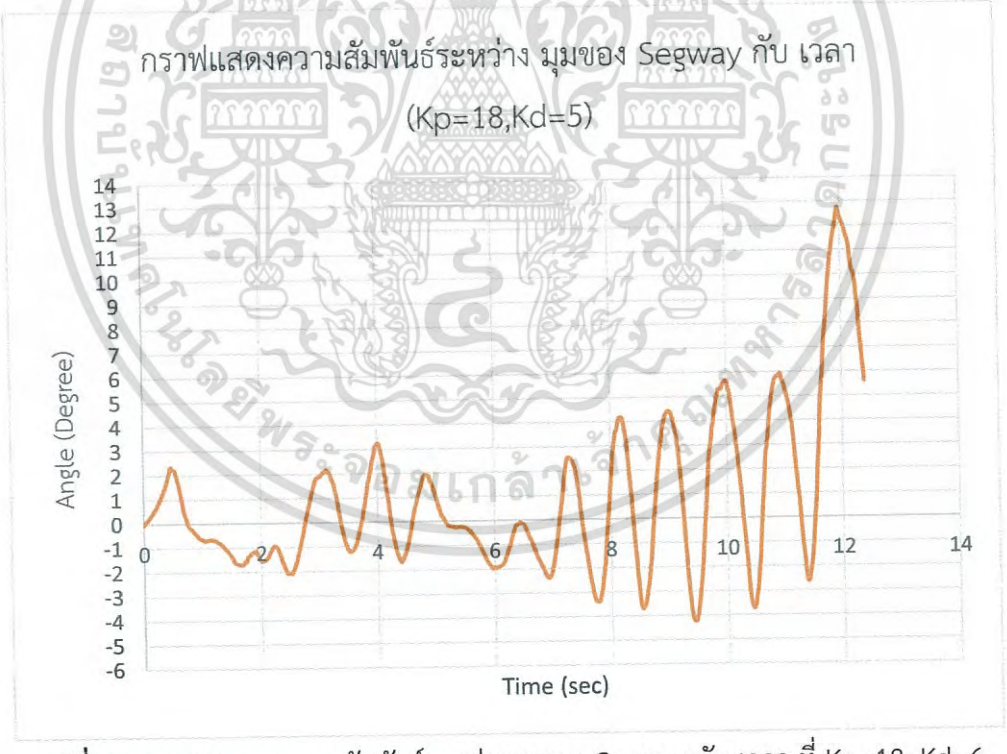
รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของ Segway กับ เวลา ที่ Kp=18, Kd=3



รูปที่ 4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของ Segway กับ เวลา ที่ Kp=18, Kd=4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของ Segway กับ เวลา ที่ Kp=18, Kd=5



รูปที่ 4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของ Segway กับ เวลา ที่ Kp=18, Kd=6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

		Kp			
		15	16	17	18
Kd	1	1.281	1.148	1.481	1.19
	2	1.647	1.066	1.812	1.289
	3	1.471	0.731	1.877	1.621
	4	1.19	0.994	1.191	1.036
	5	1.223	0.993	2.341	1.447
	6	1.383	0.888	1.891	2.283

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความผิดพลาดเฉลี่ยของระบบ

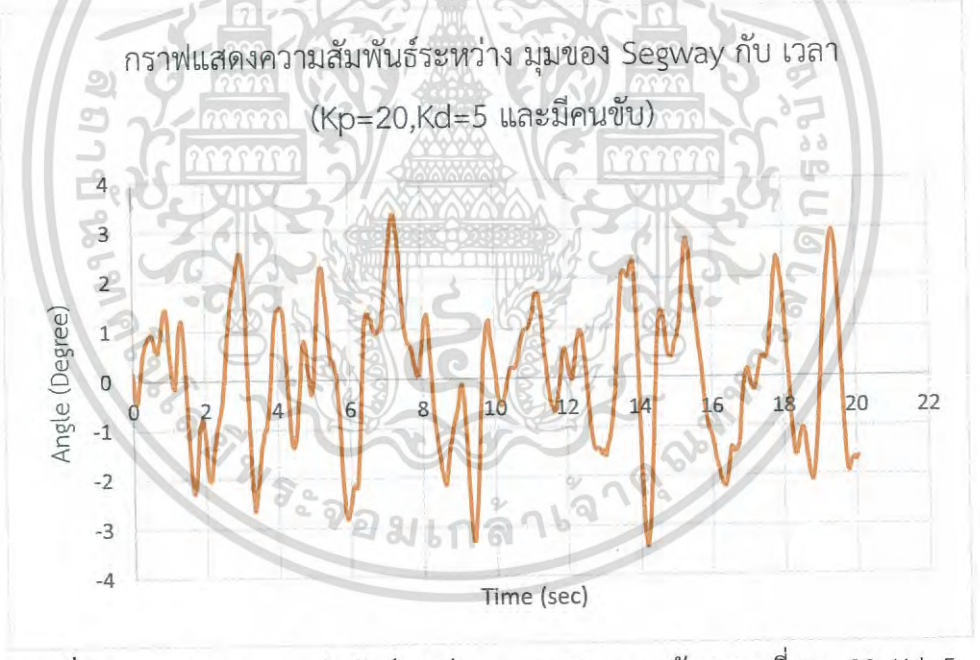
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลอง พบว่าเมื่อ ค่า Kd เพิ่มขึ้นจะสามารถลด ค่าความผิดพลาดได้แต่ ถ้ามากเกินไปก็จะทำให้ระบบมี ค่าความผิดพลาดเพิ่มขึ้นเช่นกัน

ค่า Kp และ Kd ที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานในขณะที่ไม่มีผู้ใช้งานคือ Kp = 16 และ Kd = 3 เนื่องจากว่ามีค่าความผิดพลาดน้อยที่สุด และถ้ามีมวลมากขึ้น ค่า Kp และ Kd จะต้องมาขึ้น แต่เนื่องจากการทดลองโดยมีผู้ขับขี่นั้น การทำงานของระบบมีอิทธิพลจากการกระทำของผู้ขับขี่ จึงยากต่อการเปรียบเทียบ ว่าค่า Kp และ Kd เท่ากับเท่าไรจึงจะเหมาะสม ดังนั้นจึงได้ทำการเลือกค่าที่ผู้ขับขี่(ผู้ทดลอง)คิดว่าสามารถควบคุมได้ง่าย ซึ่งมีกราฟแสดงผลการทดลองดังนี้



รูปที่ 5.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของ Segway กับ เวลา ที่ Kp=20, Kd=5

5.2 วิเคราะห์ผลการทดลอง

การปรับตัวควบคุม PD จะต้องมีการเปลี่ยนแปลง เมื่อระบบมีคุณสมบัติเปลี่ยนไปเช่น มีการเปลี่ยนแปลงมวลของระบบ กำลังไฟฟ้าของระบบ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.3 ข้อเสนอแนะ

1. หากการทดลองใช้เวลานานเกินไป จะต้องมีการชาร์ตแบตเตอรี่เพื่อความถูกต้องแม่นยำในการเก็บข้อมูล
2. ตัวยึดล้อเข้ากับเพลา มีอาการหลวมทำให้ล้อสามารถหมุนได้เล็กน้อยโดยที่เพลาไม่หมุน ทำให้การควบคุมเครื่อง Segway ยากขึ้น แก้ปัญหานี้ได้โดยทำการยึดล้อกับเพลาให้แน่น
3. เสาของเครื่อง Segway สามารถขยับได้ ส่งผลต่อการควบคุม โดยเฉพาะขณะที่มีผู้ขับขี่ หากทำการยึดติดเสากับตัวเครื่องโดยที่ไม่สามารถขยับได้จะควบคุมเครื่อง Segway ได้ง่ายขึ้น
4. Handbar ของ Segway อยู่ใกล้กับผู้ขับขี่มากการไปทำให้ ทำให้ผู้ขับขี่ทรงตัวลำบาก
5. ฐานที่ยืนบน Segway ควรจะอยู่ต่ำกว่าแกนหมุนของล้อ เพื่อให้ศูนย์ถ่วงต่ำ และส่งผลให้การควบคุม Segway นั้นง่ายขึ้น

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

[1] Segway ฟิสิกส์ราชมงคล ,
URL:http://www.rmutphysics.com/charud/howstuffwork/howstuff2/segway/index.htm
[2] Rolling Resistance Coefficiencys,
URL:http://www.engineeringtoolbox.com/rollingfriction-resistance-d_1303.html
[3] NEMA Design B Electrical Motors,
URL:http://www.engineeringtoolbox.com/electrical-motor-efficiency-d_655.html
[4] น.ต.กัปตัน เตียวตระกูล,วารสารกรมอิเล็กทรอนิกส์ทหารเรือ ปีที่15 ฉบับที่16,
URL:http://www.navy.mi.th/elecwww/magaz/magazine/no16/18.pdf
[5] Khalil Sultan (2003) , Inverted Pendulum Analysis, Design and Implementation, Instrumentation and Control Lab at the Institute of Industrial Electronics Engineering, Karachi, Pakistan.
[6] Rich Chi Ooi (2003) , Balancing a Two-Wheeled Autonomous Robot , The University of Western Australia School of Mechanical Engineering,Final Year Thesis
[7] M. A. Clark,J. B. Field,S. G. McMahon,and P.S. Philps (2005), EDGAR, A Self-Balancing Scooter, University of Adelaide, Faculty of Engineering, Computer & Mathematical Sciences, School of Mechanical Engineering
[8] Maia R. Bageant, Balancing a Two-Wheeled Segway Robot, Massachusetts Institute of
Technology, Department of Mechanical Engineering, Final Year Thesis.
[9] สมภพ ภูริวิกรัยพงศ์, ตัวกรองคาลแมน,
URL:http://www.space.mict.go.th/knowledge.php?id=kalman
[10] วิธีการปรับค่าเกนตัวควบคุมแบบ PID กรณีไม่ทราบแบบจาลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการ (ตอนที่ 1), URL :
http://www.thailandindustry.com/guru/view.php?id=10522&section=9&rcount=Y
[11] kalman's filter,
URL:http://www.slideshare.net/SaravananNatarajan2/kalman-filters-47937307

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

คำสั่งควบคุมการทำงานของ Segway

```
/* สั่งให้ใช้งานฟังก์ชั่นในไฟล์ Wire.h ,Kalman.h และ LiquidCrystal.h */
#include <Wire.h>
#include <Kalman.h>
#include <LiquidCrystal.h>

LiquidCrystal lcd(31, 30, 29, 28, 27, 26);    //กำหนดพอร์ตการรับส่งระหว่างหน้าจอ LCD และ
Arduino

/* กำหนดตัวแปรสำหรับระบบเลี้ยว */
#define Button_L_In 40
#define Button_R_In 41
int Button_State_L = 1;
int Button_State_R = 1;
int add_Left = 0, add_Right = 0;

/* กำหนดตัวแปรสำหรับ Gyro Sensor และ Kalman Filter */
#define RESTRICT_PITCH
Kalman kalmanX; // Create the Kalman instances
Kalman kalmanY;
double accX, accY, accZ;
double gyroX, gyroY, gyroZ;
int16_t tempRaw;
double gyroXangle, gyroYangle;
double compAngleX, compAngleY;
double kalAngleX, kalAngleY;
double act_angle
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
double Kalman_angle[10] = {0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0};
double Kalman_angle_avg = 0.00, Kalman_med1, Kalman_med2;
uint32_t timer;
uint8_t i2cData[14]; // Buffer for I2C data

/* กำหนดพอร์ตการรับส่งระหว่าง Motor Driver Boards และ Arduino */
#define pin5 5
#define pin6 6
#define pin7 7
#define pin8 8
#define pin9 9
#define pin10 10

/* กำหนดตัวแปรสำหรับควบคุมมอเตอร์ */
float drive;
int PWM_motor_L, PWM_motor_R;
float sm_drive[10] = {0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0};
float sm_drive_avg;
int Stop_Button;
int PWM_Driving = 100;
/* กำหนดตัวแปรสำหรับควบคุมการหน่วงเวลาในการทำงาน เพื่อให้ระบบเสถียรขึ้น */
long last_cycle = 0;
long cycle_time;

/* กำหนดตัวแปรสำหรับ PID */
#define GUARD_GAIN 10.0
float K = 1;
float Kp = 1.00;
float Ki = 0.00;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
float Kd = 0.00;
float last_error = 0;
float integrated_error = 0;
float pTerm = 0, iTerm = 0, dTerm = 0;
float Setpoint = 0;
float Kp_[10] = {0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0};
float Ki_[10] = {0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0};
float Kd_[10] = {0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0};
float Kp_avg = 0.00;
float Ki_avg = 0.00;
float Kd_avg = 0.00;

void setup() {
  Serial.begin(115200);    //กำหนดความเร็วในการรับส่งข้อมูล ที่ 115200 bits/sec
  Wire.begin();
#if ARDUINO >= 157
  Wire.setClock(400000UL); //กำหนดความถี่ที่ 400kHz
#else
  TWBR = ((F_CPU / 400000UL) - 16) / 2;
#endif

  i2cData[0] = 7;
  i2cData[1] = 0x00;
  i2cData[2] = 0x00;
  i2cData[3] = 0x00;
  while (i2cWrite(0x19, i2cData, 4, false));
  while (i2cWrite(0x6B, 0x01, true));

  while (i2cRead(0x75, i2cData, 1));
  if (i2cData[0] != 0x68) {
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
  Serial.print(F("Error reading sensor"));    //ถ้าไม่มีการรับข้อมูลจาก Gyro Sensor ให้แสดง
ข้อความว่า "Error reading sensor"
  while (1);
 }
 delay(100);

 /* Set kalman and gyro starting angle */
 while (i2cRead(0x3B, i2cData, 6));
 accX = (i2cData[0] << 8) | i2cData[1];
 accY = (i2cData[2] << 8) | i2cData[3];
 accZ = (i2cData[4] << 8) | i2cData[5];

#ifdef RESTRICT_PITCH
 double roll  = atan2(accY, accZ) * RAD_TO_DEG;
 double pitch = atan(-accX / sqrt(accY * accY + accZ * accZ)) * RAD_TO_DEG;
#else
 double roll  = atan(accY / sqrt(accX * accX + accZ * accZ)) * RAD_TO_DEG;
 double pitch = atan2(-accX, accZ) * RAD_TO_DEG;
#endif

 kalmanX.setAngle(roll); // Set starting angle
 kalmanY.setAngle(pitch);
 gyroXangle = roll;
 gyroYangle = pitch;
 compAngleX = roll;
 compAngleY = pitch;

 /* กำหนดพอร์ต Digital ที่ 5,6,7,8,9 และ 10 ให้เป็นพอร์ตส่งสัญญาณ */
 pinMode(pin5, OUTPUT);
 pinMode(pin6, OUTPUT);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
pinMode(pin7, OUTPUT);
pinMode(pin8, OUTPUT);
pinMode(pin9, OUTPUT);
pinMode(pin10, OUTPUT);

/* เปิดการทำงานพอร์ตระบบเลี้ยว และตั้งให้เป็นพอร์ตรับสัญญาณ */
pinMode(Button_L_In, INPUT);
digitalWrite(Button_L_In, HIGH);
pinMode(Button_R_In, INPUT);
digitalWrite(Button_R_In, HIGH);

pinMode(24, INPUT);
digitalWrite(24, HIGH);

timer = micros();
delay(5000);

lcd.begin(20, 4);   //เปิดการทำงานหน้าจอ LCD ด้วยจำนวน 20x4 ตัวอักษร
lcd.clear();
}

void loop() {
  /* Update all the values */
  while (i2cRead(0x3B, i2cData, 14));
  accX = ((i2cData[0] << 8) | i2cData[1]);
  accY = ((i2cData[2] << 8) | i2cData[3]);
  accZ = ((i2cData[4] << 8) | i2cData[5]);
  tempRaw = (i2cData[6] << 8) | i2cData[7];
  gyroX = (i2cData[8] << 8) | i2cData[9];
  gyroY = (i2cData[10] << 8) | i2cData[11];
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
gyroZ = (i2cData[12] << 8) | i2cData[13];

double dt = (double)(micros() - timer) / 1000000; // Calculate delta time
timer = micros();

#ifdef RESTRICT_PITCH
double roll  = atan2(accY, accZ) * RAD_TO_DEG;
double pitch = atan(-accX / sqrt(accY * accY + accZ * accZ)) * RAD_TO_DEG;
#else
double roll  = atan(accY / sqrt(accX * accX + accZ * accZ)) * RAD_TO_DEG;
double pitch = atan2(-accX, accZ) * RAD_TO_DEG;
#endif

double gyroXrate = gyroX / 131.0;
double gyroYrate = gyroY / 131.0;

#ifdef RESTRICT_PITCH
if ((roll < -90 && kalAngleX > 90) || (roll > 90 && kalAngleX < -90)) {
  kalmanX.setAngle(roll);
  compAngleX = roll;
  kalAngleX = roll;
  gyroXangle = roll;
} else
  kalAngleX = kalmanX.getAngle(roll, gyroXrate, dt);
if (abs(kalAngleX) > 90)
  gyroYrate = -gyroYrate;
kalAngleY = kalmanY.getAngle(pitch, gyroYrate, dt);
#else

if ((pitch < -90 && kalAngleY > 90) || (pitch > 90 && kalAngleY < -90)) {
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
  kalmanY.setAngle(pitch);
  compAngleY = pitch;
  kalAngleY = pitch;
  gyroYangle = pitch;
 } else
  kalAngleY = kalmanY.getAngle(pitch, gyroYrate, dt); // คำนวนมุมในแนวแกน Y โดยใช้
Kalman filter

 if (abs(kalAngleY) > 90)
  gyroXrate = -gyroXrate;
 kalAngleX = kalmanX.getAngle(roll, gyroXrate, dt); // คำนวนมุมในแนวแกน X โดยใช้
Kalman filter
#endif

 gyroXangle += gyroXrate * dt; // คำนวนมุมโดยไม่ผ่าน filter
 gyroYangle += gyroYrate * dt;

 if (gyroXangle < -180 || gyroXangle > 180)
  gyroXangle = kalAngleX;
 if (gyroYangle < -180 || gyroYangle > 180)
  gyroYangle = kalAngleY;

 Kalman_angle_average();              //สั่งให้เริ่มการทำงานใน void
Kalman_angle_average()
  act_angle = Kalman_angle_avg;
  drive = updatePid(Setpoint, act_angle);  //สั่งให้เริ่มการคำนวณหาค่า PWM จากค่า PID
ที่ตั้งไว้
  smooth_drive();                  //สั่งให้เริ่มการทำงานใน void smooth_drive()
  steering_loop();                 //สั่งให้เริ่มการทำงานใน void steering_loop()
  control_motors();                //สั่งให้เริ่มการทำงานใน void control_motors()
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
time_stamp();                    //สั่งให้เริ่มการทำงานใน void time_stamp()

Serial.print(millis()-5120);Serial.print("\t");Serial.print(Kalman_angle_avg); //สั่งให้แสดงค่ามุมที่เอียงที่ผ่าน Kalman Filter แล้ว
Serial.print("\r\n");


/* กำหนดตำแหน่งข้อความที่จะแสดงในหน้าจอ LCD */
lcd.setCursor(0, 0); lcd.print("Angle  ");
lcd.setCursor(7, 0); lcd.print(Kalman_angle_avg);
lcd.setCursor(14, 0); lcd.print("Degree");
if(Kalman_angle_avg >= -10.00 && Kalman_angle_avg <= 0.00){
  lcd.setCursor(12, 0); lcd.print(" ");
}
if(Kalman_angle_avg >= 0.00 && Kalman_angle_avg < 10.00){
  lcd.setCursor(11, 0); lcd.print("  ");
}
if(Kalman_angle_avg >= 10.00){
  lcd.setCursor(12, 0); lcd.print("  ");
}
lcd.setCursor(0, 1); lcd.print("P : ");
lcd.setCursor(4, 1); lcd.print(Kp);
if(Kp <= 10.00){
  lcd.setCursor(8, 1); lcd.print(" ");
}
lcd.setCursor(0, 2); lcd.print("I : ");
lcd.setCursor(4, 2); lcd.print(Ki);
if(Ki >= 10.00){
  lcd.setCursor(8, 2); lcd.print(" ");
}
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
  lcd.setCursor(0, 3); lcd.print("D : ");
  lcd.setCursor(4, 3); lcd.print(Kd);
  if(Kd <= 10.00){
    lcd.setCursor(8, 3); lcd.print(" ");
  }
}

/* loop การคำนวณหาค่ามุมเฉลี่ย เพื่อลดสัญญาณรบกวน*/
void Kalman_angle_average() {
  Kalman_angle[9] = kalAngleX;
  for (int i = 0; i < 9; i++) {
    Kalman_angle[i] = Kalman_angle[i + 1];
  }
  Kalman_angle_avg = 0;
  for (int i = 0; i < 10; i++) {
    Kalman_angle_avg = Kalman_angle_avg + Kalman_angle[i];
  }
  Kalman_angle_avg = Kalman_angle_avg / 10.00;
  Kalman_angle_avg = Kalman_angle_avg + 6;
}

/* PID cnotroler */
int updatePid(int angle_setpoint, int act_Value)  {
  int error = angle_setpoint - act_Value;
  Kp = (1022 - analogRead(4)) / 20;          //รับค่า Kp จาก Potentiometer โดยผ่าน
ช่องสัญญาณ analog ที่ 4
  Ki = (1022 - analogRead(5)) / 205.00;     //รับค่า Ki จาก Potentiometer โดยผ่าน
ช่องสัญญาณ analog ที่ 5
  Kd = (1022 - analogRead(6)) / 20;          //รับค่า Kd จาก Potentiometer โดยผ่าน
ช่องสัญญาณ analog ที่ 6
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
Kp = 16;
Ki = 0;
Kd = 2;

Kp_[9] = Kp;
Ki_[9] = Ki;
Kd_[9] = Kd;
for (int i = 0; i < 9; i++) {
  Kp_[i] = Kp_[i + 1];
  Ki_[i] = Ki_[i + 1];
  Kd_[i] = Kd_[i + 1];
}
Kp_avg = 0.00;
Ki_avg = 0.00;
Kd_avg = 0.00;
for (int i = 0; i < 10; i++) {
  Kp_avg = Kp_avg + Kp_[i];
  Ki_avg = Ki_avg + Ki_[i];
  Kd_avg = Kd_avg + Kd_[i];
}
Kp = Kp_avg / 10.00;
Ki = Ki_avg / 10.00;
Kd = Kd_avg / 10.00;

if (Kp < 0) {
  Kp = 0.00;
}
if (Ki < 0) {
  Ki = 0.00;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
}
if (Kd < 0) {
  Kd = 0.00;
}

//คำนวณค่า PWM จากค่า Kp ,Ki ,Kd ที่ตั้งไว้
pTerm = Kp * error;
integrated_error += error;
iTerm = Ki * constrain(integrated_error, -GUARD_GAIN, GUARD_GAIN);
dTerm = Kd * (error - last_error);
last_error = error;
return -constrain(K * (pTerm + iTerm + dTerm), -255, 255);
}

/* ลดการกระชากของมอเตอร์ */
void smooth_drive() {
 sm_drive[9] = drive;
 for (int i = 0; i < 9; i++) {
   sm_drive[i] = sm_drive[i + 1];
 }
 sm_drive_avg = 0;
 for (int i = 0; i < 10; i++) {
   sm_drive_avg = sm_drive_avg + sm_drive[i];
 }
 sm_drive_avg = sm_drive_avg / 10;
 drive = sm_drive_avg;
}

/* คำสั่งสำหรับระบบเลี้ยว */
void steering_loop() {
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
Button_State_L = digitalRead(Button_L_In);  //รับคำสั่งเมื่อกดปุ่มเลี้ยวซ้าย
Button_State_R = digitalRead(Button_R_In);  //รับคำสั่งเมื่อกดปุ่มเลี้ยวขวา

//เมื่อกดปุ่มเลี้ยวซ้าย จะเพิ่มความเร็วมอเตอร์ขวา
if (Button_State_L == 0) {
  add_Right = add_Right + 2;
  if (add_Right >= 30) {
    add_Right = 30;
  }
}
//เมื่อปล่อยปุ่มเลี้ยวซ้าย จะลดความเร็วที่เพิ่มจนเหลือ 0
if (Button_State_L == 1) {
  add_Right = add_Right - 5;
  if (add_Right <= 0) {
    add_Right = 0;
  }
}
//เมื่อกดปุ่มเลี้ยวขวา จะเพิ่มความเร็วมอเตอร์ซ้าย
if (Button_State_R == 0) {
  add_Left = add_Left + 2;
  if (add_Left >= 30) {
    add_Left = 30;
  }
}
//เมื่อปล่อยปุ่มเลี้ยวขวา จะลดความเร็วที่เพิ่มจนเหลือ 0
if (Button_State_R == 1) {
  add_Left = add_Left - 5;
  if (add_Left <= 0) {
    add_Left = 0;
  }
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
  }
}

/* คำสั่งสำหรับควบคุมมอเตอร์ */
void control_motors() {
  drive = abs(drive);
  PWM_motor_L = drive + add_Left;
  PWM_motor_R = (drive + add_Right) * 1.27;

  //กำหนดค่า PWM สูงสุดอยู่ที่ 230
  if (PWM_motor_R > 230) {
    PWM_motor_R = 230;
  }
  if (PWM_motor_L > 230) {
    PWM_motor_L = 230;
  }

  Stop_Button = digitalRead(24);
  if(Stop_Button == 0){
    PWM_motor_L = 0;
    PWM_motor_R = 0;
  }

  //เมื่อมุมเอียงมากกว่า 0 องศา จะสั่งให้มอเตอร์หมุนไปข้างหน้า
  if (Kalman_angle_avg >= 0.00 && Kalman_angle_avg < 36.50 ) {
    if(Kalman_angle_avg <= 0.50){
      PWM_motor_R = 0;
      PWM_motor_R = add_Right;
      PWM_motor_L = 0;
      PWM_motor_L = add_Left;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
  }
  digitalWrite(pin5, HIGH);
  digitalWrite(pin6, LOW);
  analogWrite(pin7, PWM_motor_R);
  digitalWrite(pin8, HIGH);
  digitalWrite(pin9, LOW);
  analogWrite(pin10, PWM_motor_L);
}
if (Kalman_angle_avg >= 36.50) {
  digitalWrite(pin5, HIGH);
  digitalWrite(pin6, LOW);
  analogWrite(pin7, 0);
  digitalWrite(pin8, HIGH);
  digitalWrite(pin9, LOW);
  analogWrite(pin10, 0);
  delay(5000);

  if(Kalman_angle_avg > 13.00){
    digitalWrite(pin5, HIGH);
  digitalWrite(pin6, LOW);
  analogWrite(pin7, PWM_Driving);
  digitalWrite(pin8, HIGH);
  digitalWrite(pin9, LOW);
  analogWrite(pin10, PWM_Driving);
  }
 }

 //เมื่อมุมเอียงน้อยกว่า 0 องศา จะสั่งให้มอเตอร์หมุนไปข้างหลัง
 if (Kalman_angle_avg < 0.00 && Kalman_angle_avg > -34.50) {
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
if(Kalman_angle_avg < -0.50)
{
digitalWrite(pin5, LOW);
digitalWrite(pin6, HIGH);
analogWrite(pin7, PWM_motor_R);
digitalWrite(pin8, LOW);
digitalWrite(pin9, HIGH);
analogWrite(pin10, PWM_motor_L);
}
if(Kalman_angle_avg < 0.00 && Kalman_angle_avg > -1.50){
  for(PWM_motor_R ; PWM_motor_R > 0 ; PWM_motor_R = PWM_motor_R - 5){
    PWM_motor_L = PWM_motor_L - 5;
    if(PWM_motor_L < 0){
      PWM_motor_L = 0;
    }
    analogWrite(pin7, PWM_motor_R);
    analogWrite(pin10, PWM_motor_L);
  }
 }
 if(Kalman_angle_avg < -13.00){
 digitalWrite(pin5, LOW);
 digitalWrite(pin6, HIGH);
 analogWrite(pin7, PWM_Driving);
 digitalWrite(pin8, LOW);
 digitalWrite(pin9, HIGH);
 analogWrite(pin10, PWM_Driving);
 }
}
if (Kalman_angle_avg <= -34.50) {
 digitalWrite(pin5, LOW);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
    digitalWrite(pin6, HIGH);
    analogWrite(pin7, 0);
    digitalWrite(pin8, LOW);
    digitalWrite(pin9, HIGH);
    analogWrite(pin10, 0);
    delay(5000);
  }
}

/* ควบคุมความเร็วการทำงานของโปรแกรมให้อยู่ที่ 10 millisecond/process */
void time_stamp(){
  while((millis() - last_cycle) < 10){
    delay(1);
  }
  cycle_time = millis() - last_cycle;
  last_cycle = millis();
}
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

เอกสารประกอบการทดลองทางวิศวกรรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาวิธีการปรับค่าตัวควบคุมพีดีของซีเกลอร์-นิโคลส์

(Study tuning rules for PD controller by Ziegler–Nichols method)

จุดประสงค์การทดลอง

1.1 รู้จักทฤษฎีการควบคุมและระบบควบคุม PD โดยไม่ใช้ค่า I

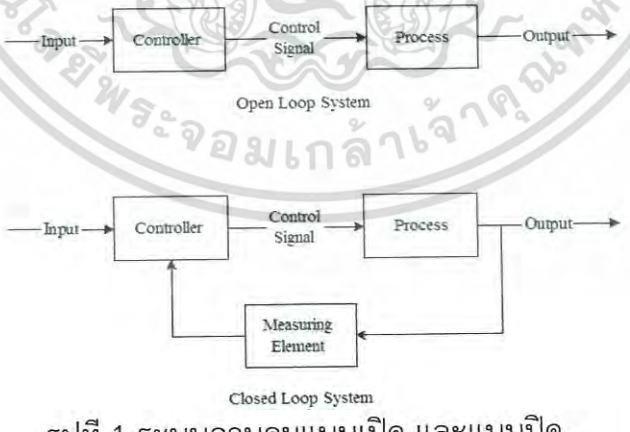
1.2 รู้วิธีการปรับค่าตัวควบคุม PD โดยวิธีของ Ziegler–Nichols

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีระบบควบคุม

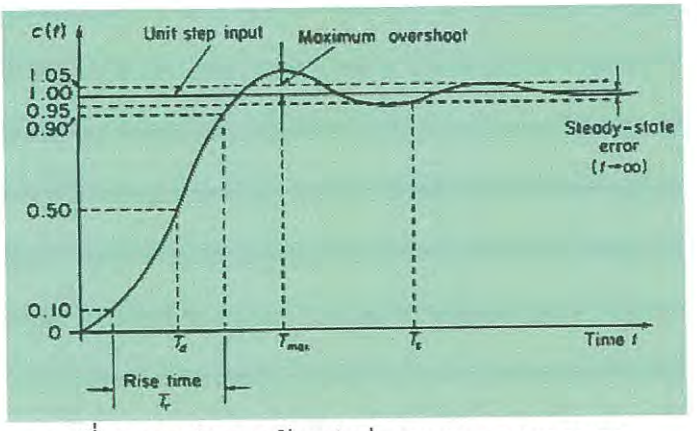
การควบคุมหมายถึง การควบคุมระบบพลศาสตร์ ให้มีค่าสัญญาณขาออกตามที่ต้องการ โดยการป้อนค่าสัญญาณขาเข้าที่เหมาะสมให้กับระบบ โดยสามารถแบ่งได้ 2 ประเภทคือ

1. ระบบควบคุมแบบเปิด (Open-loop control systems) คือระบบที่ไม่มีการนำสัญญาณขาออก มาบ่งชี้ถึงลักษณะการควบคุม หรือก็คือระบบควบคุมที่มีกระบวนการทำงานตามคำสั่งที่ได้กำหนดไว้โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลง เช่น เครื่องซักผ้า เป็นต้น โดยการควบคุมส่วนใหญ่ต้องอาศัยการคาดคะเนและการตัดสินใจของมนุษย์
2. ระบบควบคุมแบบวงจรปิด (Close-loop control systems) หรือระบบป้อนกลับ (Feedback control) คือระบบที่นำสัญญาณขาออกมาเปรียบเทียบกับสัญญาณขาเข้า เพื่อลดความผิดพลาดของสัญญาณขาออกให้น้อยลง



รูปที่ 1 ระบบควบคุมแบบเปิด และแบบปิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2 กราฟแสดงตัวแปรต่างๆทางระบบควบคุม

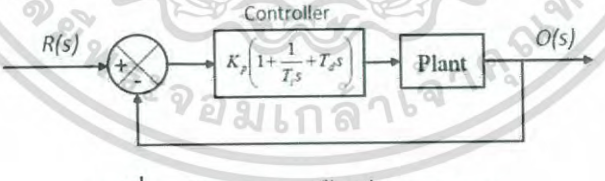
Rise time (RT) คือ เวลาที่ใช้เมื่อสัญญาณขาออกมีค่าตั้งแต่ 10% ถึง 90% ของค่า Set point

Maximum overshoot (MO) คือ ค่าความผิดพลาดสูงสุดที่เกิดขึ้น

Setting time (ST) คือเวลาที่ใช้ ตั้งแต่เริ่มต้นจนสัญญาณขาออก มีค่าความผิดพลาด (Steady-state error) น้อยกว่าที่กำหนดไว้

ระบบควบคุมPID

ตัวควบคุมPID เป็นตัวแปรสำคัญในระบบควบคุมแบบปิด ซึ่งค่าที่นำไปใช้ในการคำนวณเป็นค่าความผิดพลาดที่หามาจากความแตกต่างของตัวแปรในกระบวนการและค่าที่ต้องการ ตัวควบคุมจะพยายามลดค่าผิดพลาดให้เหลือน้อยที่สุดด้วยการปรับค่าสัญญาณขาเข้าของกระบวนการ และค่าตัวแปรของ PID ที่ใช้จะปรับเปลี่ยนตามธรรมชาติของระบบ



รูปที่ 3 ตัวควบคุมพีไอดีของระบบ

Proportional (P) มีลักษณ์เป็น Linear control ซึ่งถ้ามีค่ามากจะทำให้ระบบตอบสนองเร็วขึ้นแต่ก็จะทำให้ระบบมีค่าความผิดพลาดมากขึ้นเช่นกัน

Integral (I) จะเป็นการนำค่าความผิดพลาดมารวมกันทำให้เมื่อมีค่ามากขึ้นจะทำให้ระบบตอบสนองช้าลงแต่ก็จะช่วยลดค่าความผิดพลาดได้

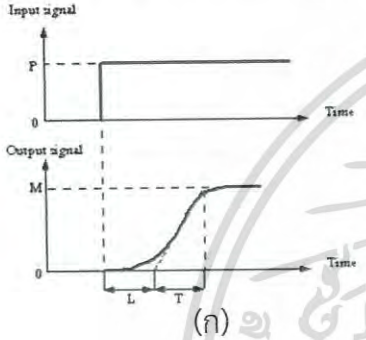
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Derivative (D) จะเป็นการคาดเดาระบบที่กำลังจะเกิดขึ้นจากค่าความผิดพลาดก่อนหน้า แล้วนำมาปรับการสั่งงานระบบจะมีการตอบสนองที่เร็วขึ้นแต่ถ้ามีมากเกินไปจะทำให้ระบบแกว่งและไม่เสถียร

Ziegler-Nichols

วิธีการของ Ziegler-Nichols นั้นมีอยู่ 2 วิธีได้แก่

1.วิธีการปฏิกิริยาของกระบวนการ (Process Reaction Method) เป็นการป้อน step input เข้าไปในระบบ และทำการหาตัวแปรตามรูปที่ 4-ก และทำการหา ค่า PID โดยใช้ภาพ 4-ข



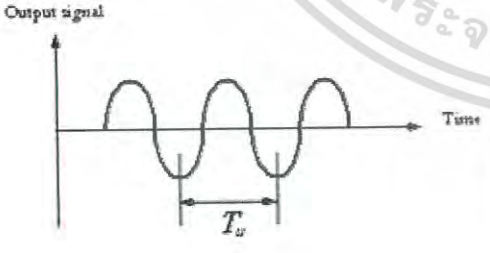
(ก)

ชนิดตัวควบคุม	K_p	$1/T$	T_d
P	P/RL	-	-
PI	$0.9P/RL$	$1/3.33L$	-
PID	$1.2P/RL$	$1/2L$	$0.5L$

(ข)

รูปที่ 4 (ก) วิธีการหาตัวแปรต่างๆ (ข) ตารางการหาค่า PID

2.วิธีการวัฏจักรท้ายสุด (Ultimate Cycle Method) เริ่มด้วยการปรับค่า I และ D ให้เป็น 0 และทำการปรับค่า P จะมีแอมพริจูทคงที่ โดยที่ค่า P ที่เราหาได้นั้นคือ Ku (Ultimate gain หรือ Critical gain) และคาบของกราฟคือ Tu (Oscillation period)



(ก)

Control Type	K_p	K_i	K_d
P	$0.5K_u$	-	-
PI	$0.45K_u$	$1.2K_p/T_u$	-
PD	$0.8K_u$	-	$K_pT_u/8$
PID	$0.6K_u$	$2K_p/T_u$	$K_pT_u/8$

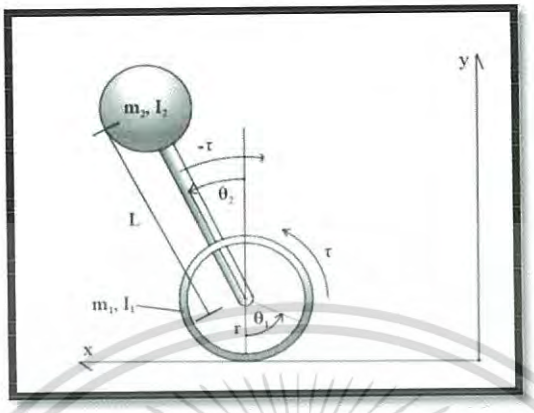
(ข)

รูปที่ 5 (ก) วิธีการหาค่า Tu (ข) ตารางการหาค่า PD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟังก์ชันถ่ายโอน

ฟังก์ชันถ่ายโอนของเครื่องเซคเวย์ สามารถได้จาก Free body diagram ทางด้านขวา โดยการทำให้เป็นสมการความสัมพันธ์ระหว่างมุมและทอร์ก



รูปที่ 6 Free body diagram ของเครื่องเซคเวย์

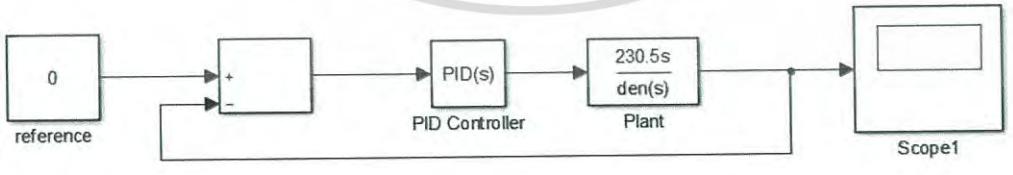
ในการทดลองนี้ได้หาฟังก์ชันถ่ายโอนเอาไว้แล้วดังนี้

$$G(s) = \frac{\theta_2}{\tau} = \frac{[((m_1+m_2)r^2+I_1)+(m_2L^2+I_2)]s}{((m_1+m_2)r^2+I_1)(m_2rl\cos(\theta_2)-(m_2L^2+I_2)^2)s^3+b[((m_1+m_2)r^2+I_1)+m_2rl\cos(\theta_2)+2(m_2L^2+I_2)]s^2-m_2gL((m_1+m_2)r^2+I_1)s-m_2gLb}$$

และเมื่อแทนค่าต่างๆเข้าไปแล้วจะได้ฟังก์ชันถ่ายโอนดังนี้

$$G(s) = \frac{\theta_2}{\tau} = 230.5s/[-51110s^3 + 0.7178s^2 - 6984s - 2.463]$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนที่กล่าวไปนั้นก็คือ Plant ของระบบ สามารถนำไปใช้ Simulation ในโปรแกรม Mat lab Simulink ได้



รูปที่ 7 Block diagram

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชุดการทดลองและวิธีการทดลอง

1. ชุดการทดลองตามรูปที่ 6 ประกอบด้วย
   1.1. สวิตซ์จ่ายไฟฟ้าแก่บอร์ด Arduino (รูปที่8)
   1.2. Potentiometers ปรับค่า PID (รูปที่ 9 ซ้าย)
   1.3. จอ LCD (รูปที่ 9 ขวา)
   1.4. ปุ่มฉุกเฉิน (รูปที่ 10 ซ้าย)
   1.5. สวิตซ์จ่ายไฟฟ้าแก่มอเตอร์และ Drive board (รูปที่ 10 ขวา)
2. ขั้นตอนการใช้งาน Segway
   2.1. เปิดสวิตซ์ที่อยู่ด้านหลัง

รูปที่ 8 สวิตซ์จ่ายไฟฟ้าแก่บอร์ด Arduino

2.2. ปรับค่า PD โดยใช้ Potentiometers และดูค่า PID จากจอ LCD

รูปที่ 9 Potentiometers ปรับค่า PID และจอ LCD

2.3. กดปุ่มฉุกเฉินค้างไว้ ก่อนที่จะเปิดสวิตซ์ด้านหน้า

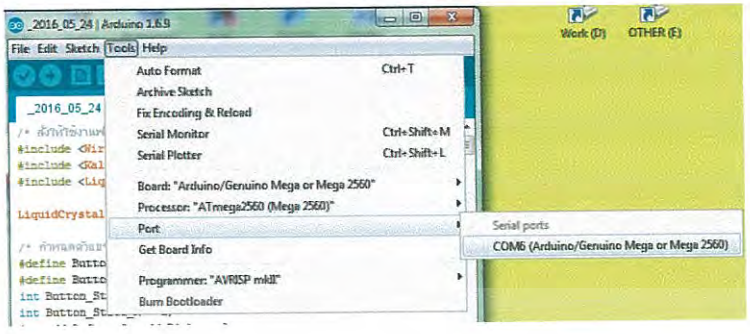
รูปที่ 10 ปุ่มฉุกเฉิน และ สวิตซ์จ่ายไฟฟ้าแก่มอเตอร์และDrive board

2.4. ปล่อยปุ่มฉุกเฉิน และเริ่มทำการทดลอง

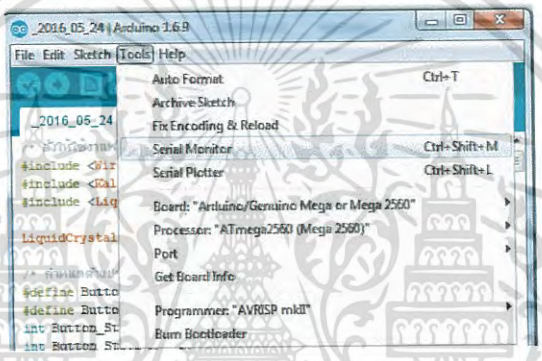
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ขั้นตอนการเก็บผลการทดลองจากโปรแกรม Arduino (ต้องต่อสาย USB ตลอดการทดลอง)

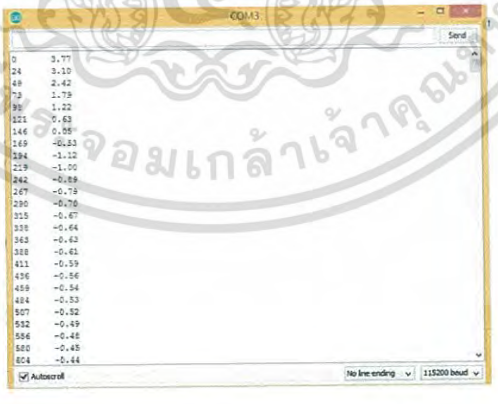
3.1. ที่หน้าต่างโปรแกรม เลือก tool>port>com(ตัวเลขจะเปลี่ยนไปตามตำแหน่งช่อง USB)



3.2. ก่อนที่จะเริ่มทำการทดลอง ให้เลือก tool>Serial Monitor



3.3. หน้าต่างที่จะแสดงผลการทดลองก็จะปรากฏขึ้นมา ที่มุมขวาล่างหากไม่ใช่เลข 115200 ให้เปลี่ยนเป็น 115200



3.4. ทำการคัดลอกค่าที่ได้ นำไปทำกราฟในโปรแกรม Excel

<u>* ค่าที่ทำการคัดลอกมาจาก Arduino มีหน่วยเป็น มิลลิวินาที และ Degree ตามลำดับ</u>

4. ปรับค่า PID ที่เครื่อง Segway โดยให้ Kp =12, Ki = 0 และ Kd = 0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ทำการเปิด Serial Monitor แล้ว กดปุ่มฉุกเฉิน และเอียงเครื่อง Segway ไปข้างหน้า 7 องศา
6. ปล่อยเครื่อง Segway และ เก็บค่าจาก Serial Monitor
7. บันทึกผลการทดลอง โดยใช้ค่าได้โปรแกรม Arduino และ Excel ลงในตารางบันทึกผล ถ้าหากว่าค่าที่เก็บมามีมุมเกิน 10องศา ให้ตัดทิ้ง
8. ทำข้อ 5 และ 6 ซ้ำ 5 ครั้ง โดยให้เพิ่มค่า P ทีละ 2
9. หาค่า PD โดยใช้วิธีการวัฏจักรท้ายสุด
10. นำค่า PD ที่หาได้ไปปรับค่าที่เครื่อง Segway และ บันทึกผลการทดลอง

กำหนดให้ Steady-state error ไม่เกิน 2.5 องศา

<u>บันทึกผลการทดลอง</u>

ตารางบันทึกผลการทดลองของ Segway กับค่า Critical gain(Ku)

Ku	RT (วินาที)	MO (องศา)	Tu
12			
14			
16			
18			
20			
22			

ตารางบันทึกผลการทดลองของ Segway กับค่า Kp,Kd ที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธี Ziegler-Nichols

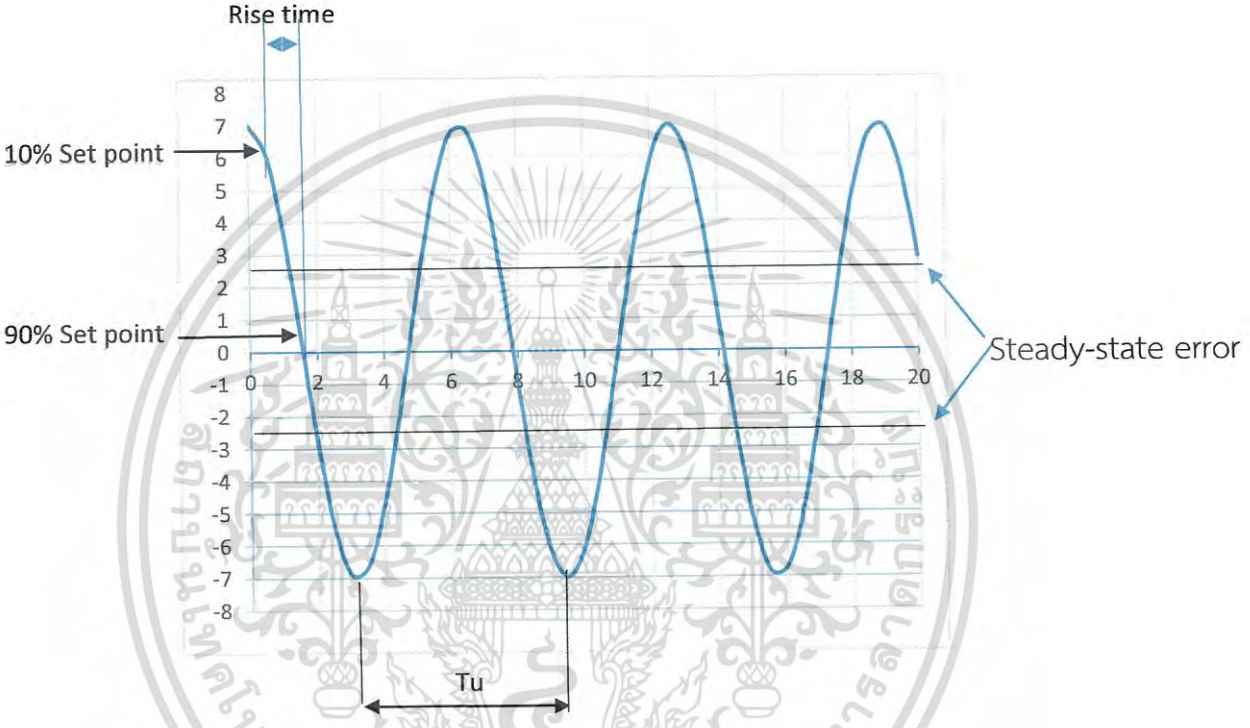
Ku	Kp	Kd	RT (วินาที)	MO (องศา)	ST (วินาที)
12					
14					
16					
18					
20					
22					

หมายเหตุ Ku = Ultimate gain หรือ Critical gain, MO = Maximum overshoot ,
RT = Rise time , ST= Setting time , Tu = Oscillation period

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิธีการคำนวณ

1. Rise time = เวลาที่ 90% set point – เวลาที่ 10% set point
2. Oscillation period = ระยะห่างของยอดคลื่นลูกที่ 1 และ 2
3. ค่า Kp = 0.8 x Critical gain
4. ค่า Kd = Critical gain x Oscillation period / 8
5. Setting time = เวลาที่ Steady-state error ไม่เกิน 2.5 องศา



<u>สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง</u>

คำถามท้ายการทดลอง

1. เมื่อปรับค่า Kp หรือ Kd เพิ่มมากขึ้นจากการทดลองจะส่งผลดีต่อระบบหรือไม่ อย่างไร
2. ผลการตอบสนองของเครื่อง Segway ที่ดีที่สุด มีค่า Kp, Kd, Rise time, Maximum overshoot, Setting time เท่ากับเท่าไร และ ลักษณะของกราฟที่ใช้ Ku นั้น ใกล้เคียงกับทฤษฎีของ Ziegler-Nichols หรือไม่
3. ถ้าเพิ่มมวลลงบน Segway ควรจะเปลี่ยนค่า Kp และ Kd อย่างไร เพราะเหตุใด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. วิธีการปรับค่าเกนตัวควบคุมแบบ PID กรณีไม่ทราบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของกระบวนการ (ตอนที่ 1), URL: http://www.thailandindustry.com/guru/view.php?id=10522&section=9&rcount=Y
2. Katsuhiko Ogata (2004), System Dynamics. 4th edition. Pearson Education,Inc.
3. ระบบควบคุมแบบ Feedback และการคำนวณ Stability , URL:https://www.cpe.ku.ac.th/~yuen/204471/control/stability/

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างการทดลอง

ตารางบันทึกผลการทดลองของ Segway กับค่า Critical gain(Ku)

Ku	RT (วินาที)	MO (องศา)	Tu
12	0.13	5.53	1.238
14	0.121	6.79	0.952
16	0.115	6.13	0.909
18	0.121	8.27	0.842
20	0.121	8.88	0.833
22	0.121	7.15	0.798

ตารางบันทึกผลการทดลองของ Segway กับค่า Kp,Kd ที่ได้จากการคำนวณด้วยวิธี Ziegler-Nichols

Ku	Kp	Kd	RT (วินาที)	MO (องศา)	ST (วินาที)
12	9.6	1.857	0.145	4.05	-
14	11.2	1.666	0.167	4.98	-
16	12.8	1.818	0.146	5.88	-
18	14.4	1.895	0.146	6.84	-
20	16	2.083	0.128	5.23	1.111
22	17.6	2.195	0.114	6.52	1.62

ตัวอย่างการคำนวณ

90% set point = 0.7 และ10% set point = 6.3

ที่ ค่า Ku = 18

(ดูจากกราฟที่ 1 และ 2 ประกอบ)

Rise time = เวลาที่ 90% set point – เวลาที่ 10% set point

= 0.193 – 0.072 = 0.121 วินาที

Maximum overshoot = องศาที่สูงที่สุด = 8.27 องศา

Period = ระยะห่างของเวลาระหว่างยอดคลื่นลูกที่ 1 และ ลูกที่ 2

= 1.263 – 0.421 = 0.842 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่า Kp = 0.8 x Critical gain

= 0.8 x 18 = 14.4

ค่า Kd = Critical gain x Oscillation period / 8

= 18 x 0.842 / 8 = 2.083

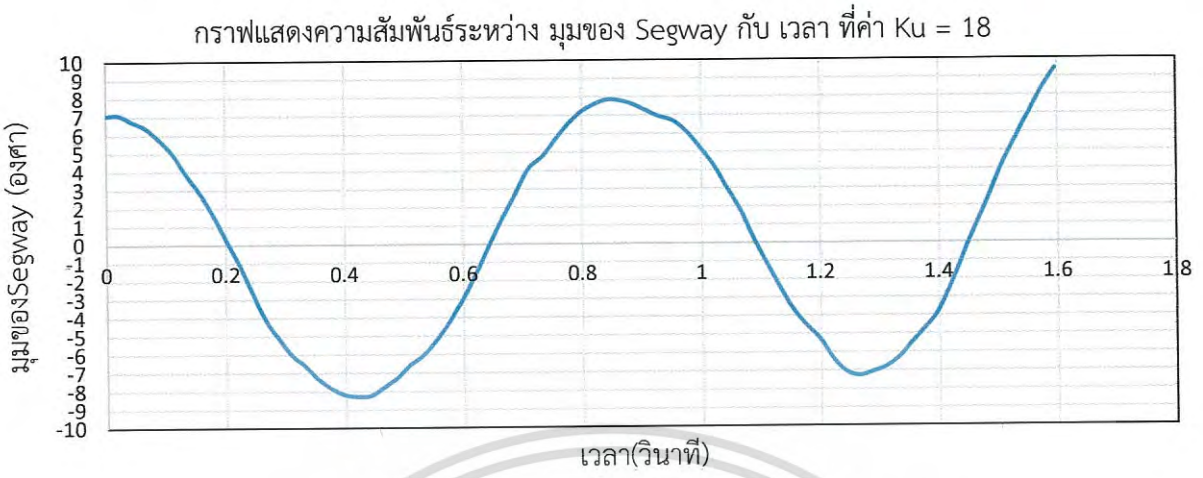
Rise time = เวลาที่ 90% ของ set point – เวลาที่ 10% ของ set point

= 0.190 – 0.044 = 0.146 วินาที

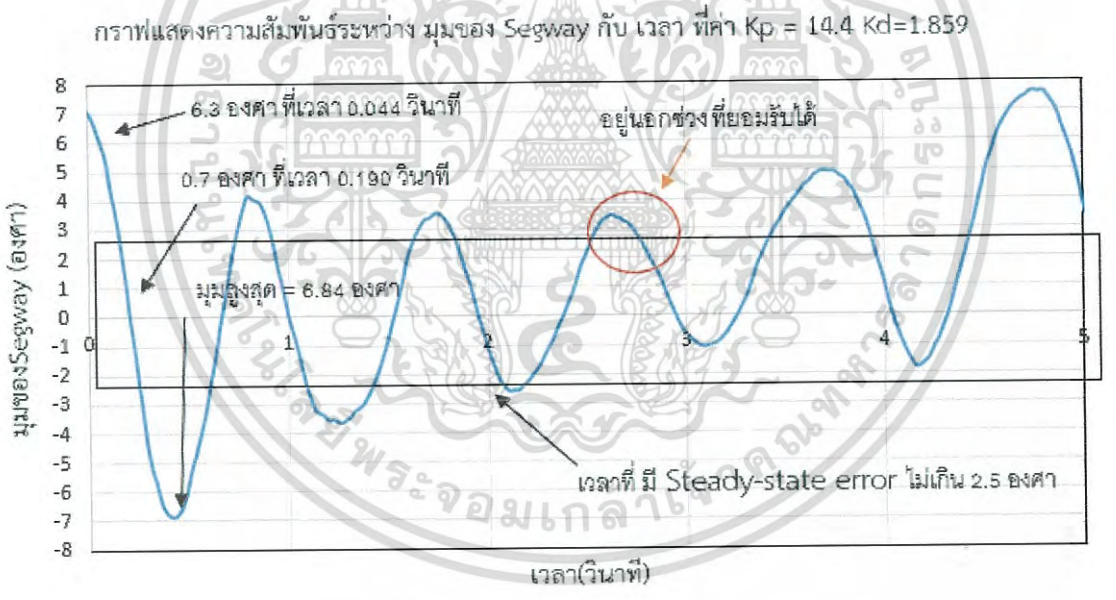
Maximum overshoot = องศาที่สูงที่สุด = 6.84 องศา

Setting time = เวลาที่ Steady-state error ไม่เกิน 2.5 องศา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



กราฟที่ 1



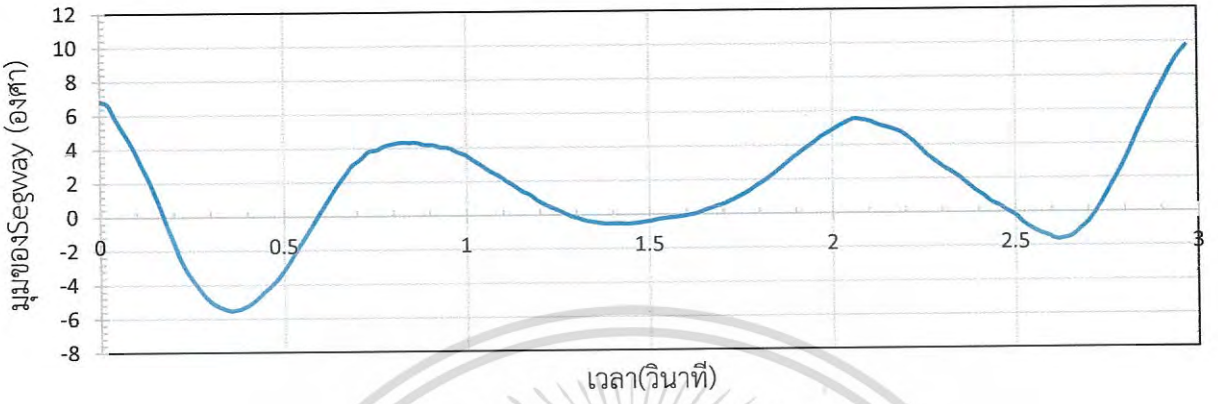
กราฟที่ 2

ไม่มี Setting time เนื่องจากมีค่าที่อยู่นอกช่วงที่ยอมรับได้ (วงกลมสีแดง ในกราฟที่ 2)

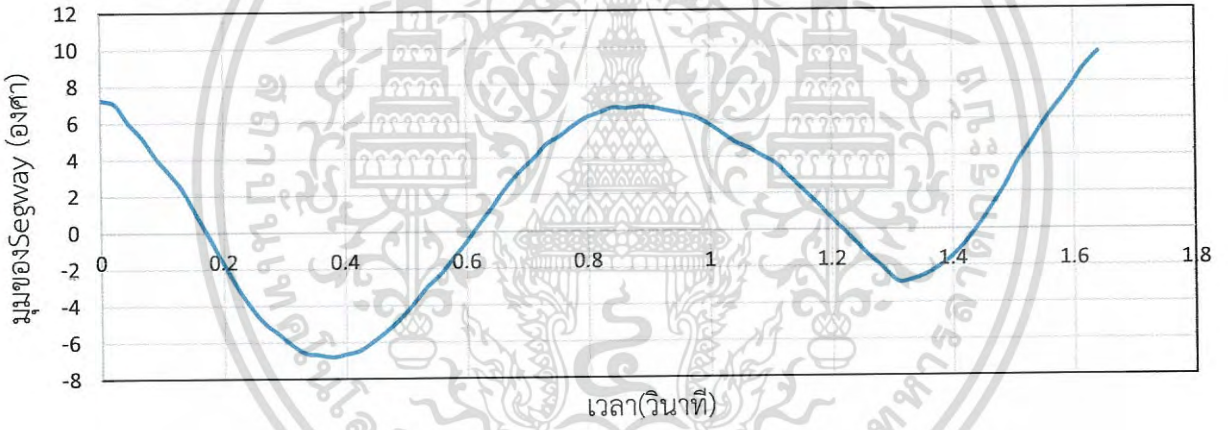
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟ

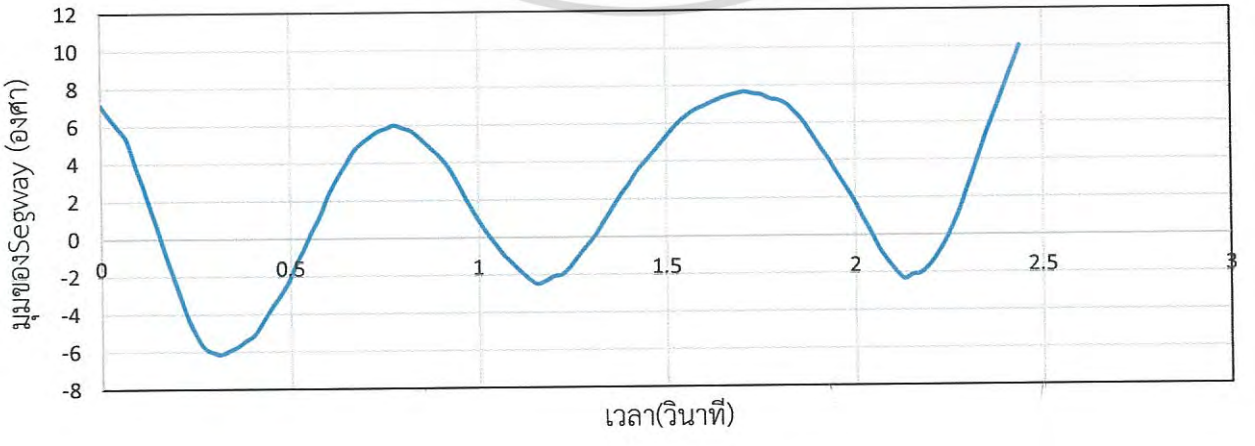
กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง มุมของ Segway กับ เวลา ที่ค่า Ku = 12



กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง มุมของ Segway กับ เวลา ที่ค่า Ku = 14

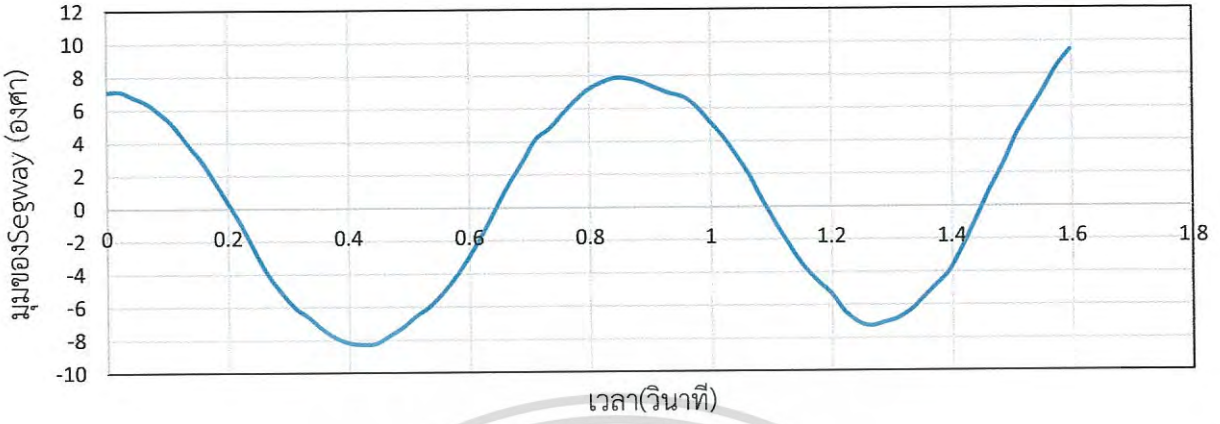


กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง มุมของ Segway กับ เวลา ที่ค่า Ku = 16

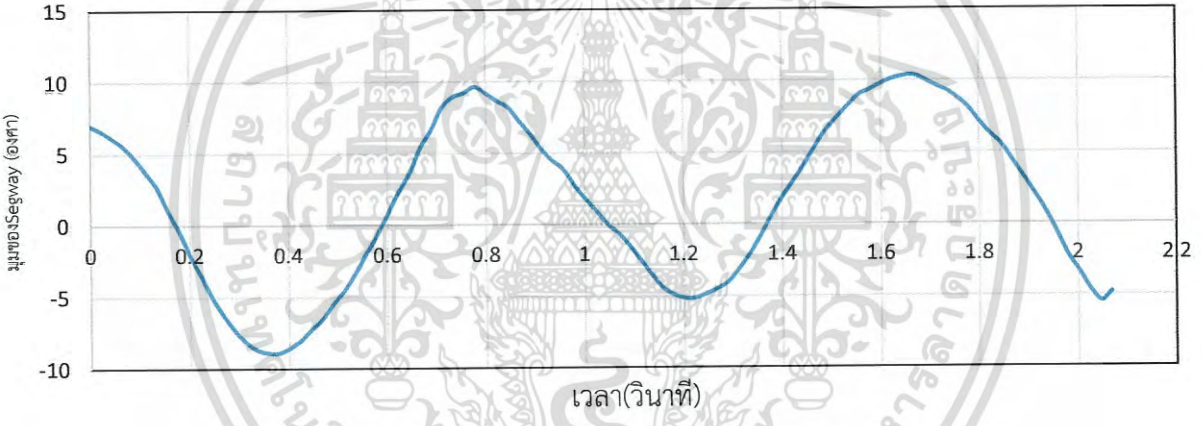


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

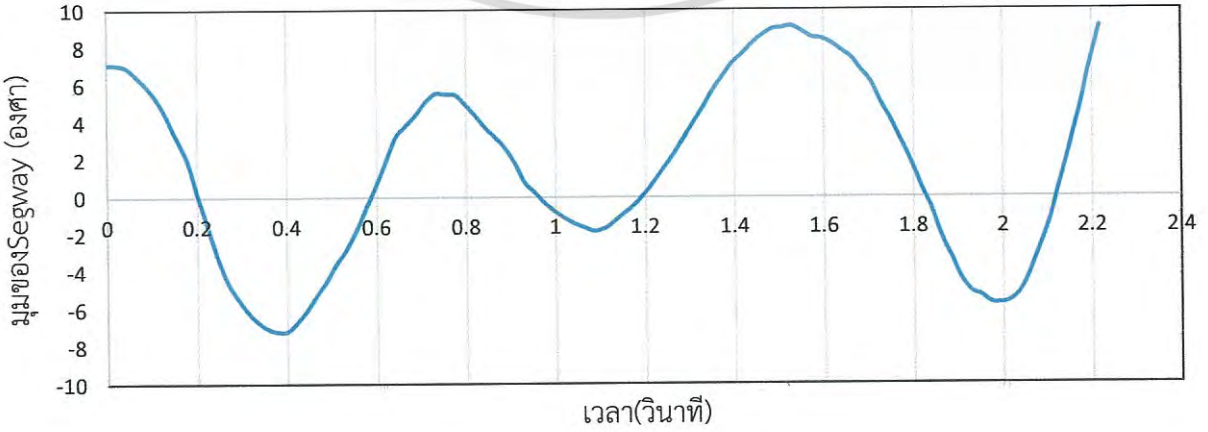
กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง มุมของ Segway กับ เวลา ที่ค่า Ku = 18



กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง มุมของ Segway กับ เวลา ที่ค่า Ku = 20

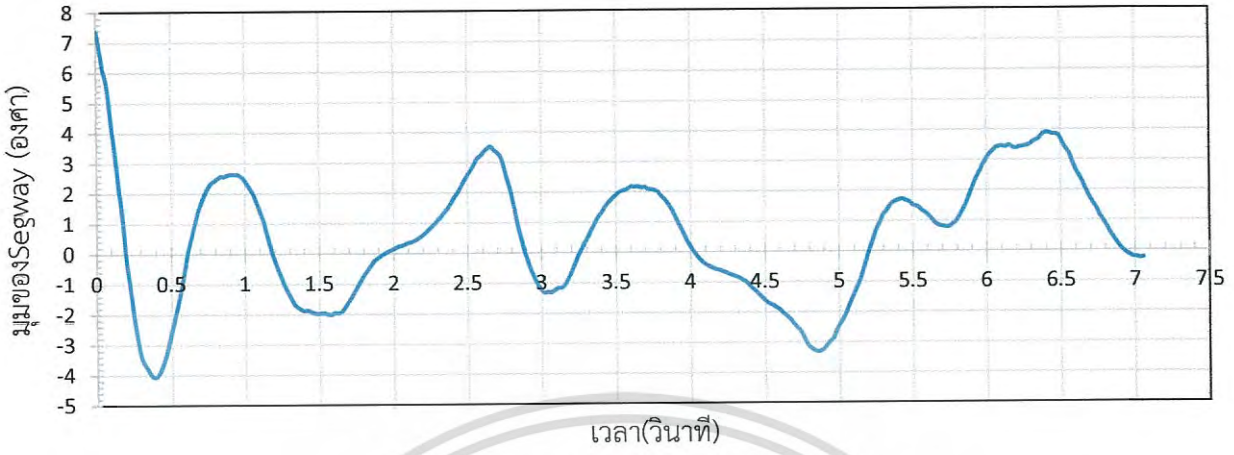


กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง มุมของ Segway กับ เวลา ที่ค่า Ku = 22

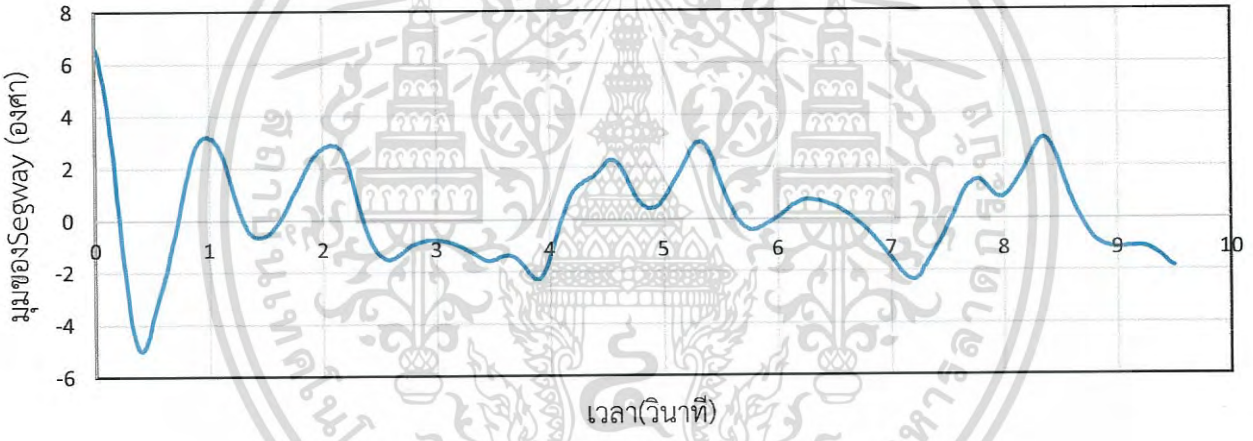


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

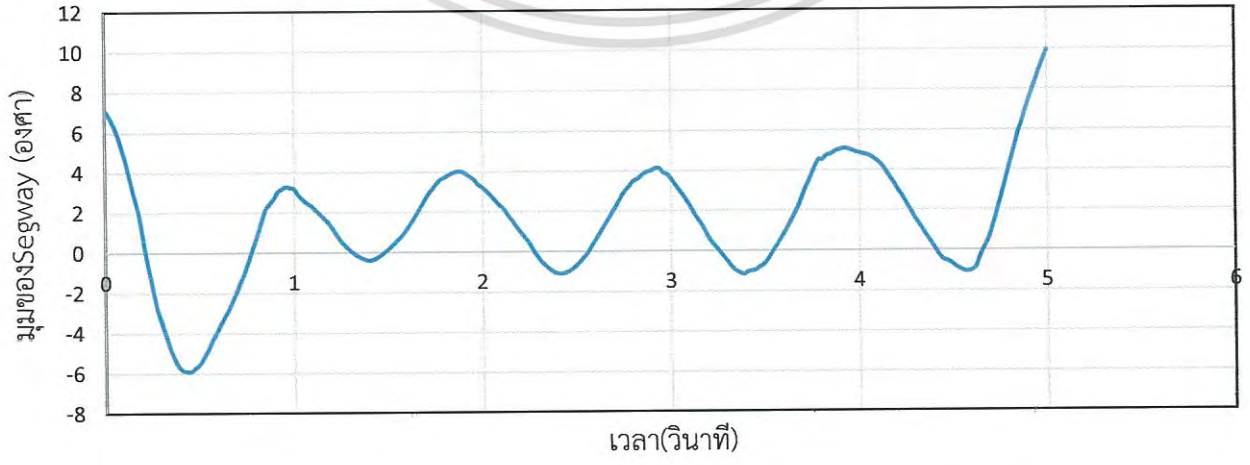
กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมของ Segway กับ เวลา ที่ค่า Kp = 9.6, Kd = 1.857



กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง มุมของ Segway กับ เวลา ที่ค่า Kp = 11.2, Kd = 1.666

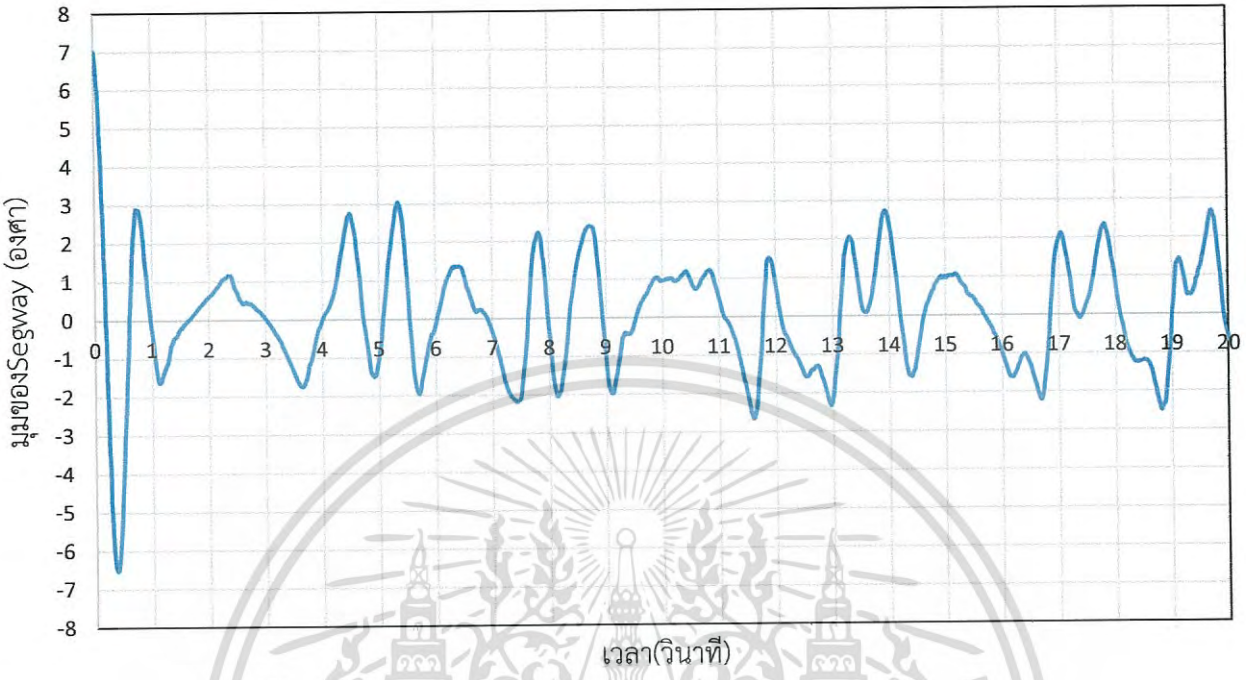


กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง มุมของ Segway กับ เวลา ที่ค่า Kp = 12.8, Kd = 1.818

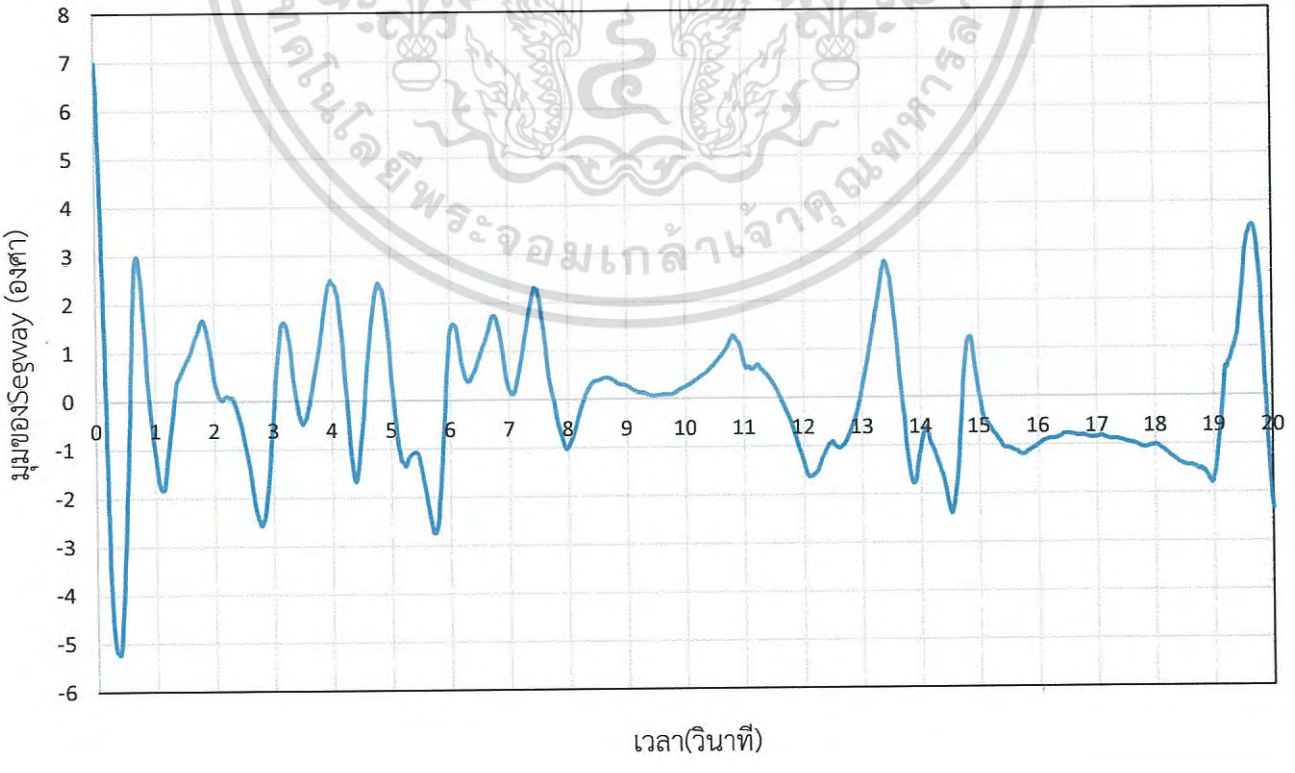


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง มุมของ Segway กับ เวลา ที่ค่า Kp = 17.6, Kd = 2.195



กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง มุมของ Segway กับ เวลา ที่ค่า Kp = 16, Kd = 2.083



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

สรุปผลการทดลอง

1. เมื่อทำการปรับค่า Kp เพิ่มขึ้นเพียงค่าเดียวโดยให้ค่าอื่นเท่ากับ 0 ระบบมีจะมี Rise time ค่อนข้างคงที่ แต่มี Maximum Overshoot และความถี่มากขึ้น สรุปได้ว่า ถ้าค่า Kp เพิ่มขึ้น Overshoot ก็จะเพิ่มขึ้นด้วย แต่คาบของคลื่นจะสั้นลงหรือมีความถี่สูงขึ้นนั้นเอง แสดงให้เห็นว่าระบบมีการตอบสนองที่เร็วขึ้น

2. เมื่อนำค่า Ku และ Tu มาคำนวณหาค่า Kp และ Kd แล้วทำการทดลอง พบว่าการทดลอง 3 ครั้งแรกนั้น ไม่สามารถทรงตัวด้วยตัวเองได้ แต่ก็สามารถทรงตัวได้นานขึ้นเมื่อเทียบกับผลการทดลองของค่า Ku

3. การทดลองครั้งที่ 4 นั้น สามารถทรงตัวเองได้แต่ค่า Steady-state error นั้น มีมากกว่าที่กำหนด ทำให้ไม่มีค่า Setting time

4. การทดลองครั้งที่ 5 และ 6 นั้น สามารถทรงตัวได้ด้วยตัวเอง โดยที่ การทดลองครั้งที่ 5 ที่มีค่า Kp เท่ากับ 16 และ Kd เท่ากับ 2.083 เป็นการทดลองที่ให้ผลลัพธ์ดีที่สุด เนื่องจากมีค่า Maximum Overshoot และ Setting time น้อยกว่าการทดลองครั้งที่ 6 และกราฟที่ได้จะการทดลองครั้งที่ 5 ที่มี Ku เท่ากับ 20 นั้น มีลักษณะใกล้เคียงกับทฤษฎีของ Ziegler-Nichols

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตอบคำถาม

1. หากเพิ่มค่า Kp แล้ว Rise time จะลดลง แต่ในทางกลับกันก็จะเกิด Overshoot มากขึ้นเช่นกัน ดังนั้นการที่จะเพิ่มค่า Kp ให้มากกว่า 17.6 นั้นอาจไม่มีประโยชน์มากนัก เนื่องจาก Rise time ของระบบนั้นเร็วมากพออยู่แล้ว จึงไม่ควรจะเพิ่ม Overshoot ให้แก่ระบบ แต่ถ้าทำการเพิ่มค่า Kd ด้วย ก็จะทำให้ลด Overshoot ลงแต่ก็จะเพิ่มค่า Rise time ด้วย ดังนั้นถ้าเพิ่มค่า Kd ไม่มากเกินไป คาดว่าจะทำให้ระบบทำงานได้ดีขึ้น (มี Amplitude ขณะทำงานลดลง)

2. จากการทดลองเครื่อง Segway การทดลองที่ 1 ถึง 4 นั้น มีสามารถหา Setting time ได้ และเมื่อเปรียบเทียบค่า Maximum overshoot และ Rise time พบว่าการทดลองครั้งที่ 5 ที่ Kp = 16, Kd = 2.083 นั้นมี Rise time สูงกว่าการทดลองครั้งที่ 6 ที่ Kp = 17.6, Kd = 2.195 อยู่ 0.01 วินาที ซึ่งเป็นเวลาที่มีค่าน้อย และมีผลกระทบต่อระบบน้อยมากเมื่อเทียบกับ Maximum overshoot ที่ มีค่าน้อยกว่า 1.29 องศา

ดังนั้นค่า Kp และ Kd ที่ดีที่สุด คือ ค่า Kp = 16, Kd = 2.083 , Rise time = 0.128 วินาที , Maximum overshoot = 5.23 องศา , Setting time = 1.111 วินาที และเมื่อดูกราฟของค่า Ku = 20 ก็มีลักษณะใกล้เคียงกับ ทฤษฎีของ Ziegler-Nichols ที่มี Amplitude ประมาณ 10 องศา

3. เมื่อเพิ่มมวลของ เครื่อง Segway ระบบต้องมีการตอบสนองที่ไว้ขึ้นเพื่อ หรือใช้แรงมากขึ้นในการรักษาสมดุล ดังนั้นจึงควรเพิ่มค่า Kp ให้แก่ระบบ แต่การเพิ่มค่า Kp อย่างเดียวนั้นอาจจะทำให้ระบบมี Overshoot ที่สูงเกินไป ดังนั้นจึงต้องเพิ่มค่า Kd ให้แก่ระบบด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้