

แบบจำลองระบบขับเคลื่อนสองล้อสำหรับพาหนะส่วนบุคคล
Two-Wheel Drive Model for Personal Vehicles

รหัสโครงการ **CE-04/2556**

กฤตชัย	ภู่อิม	53113018-5
ตะวัน	ดีสองเมือง	53113065-6

TNI

ปฏิญานี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีไทย – ญี่ปุ่น
ปีการศึกษา 2556

หัวข้อปริญญานิพนธ์

แบบจำลองระบบขับเคลื่อนสองล้อสำหรับพาหนะส่วนบุคคล

Two-Wheel Drive Model for Personal Vehicles

รหัสโครงการ CE-04/2556

โดย

นายกฤษณ์ ภู่อิ่ม 53113018-5

นางสาวตะวัน ดีสองเมือง 53113065-6

สาขาวิชา

วิศวกรรมคอมพิวเตอร์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

อาจารย์ ประเวศน์ เอื้อตรงจิตต์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น อนุมัติให้นับปริญญานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เลอเกียรติ วงศ์สารพิบูล)

วัน.....เดือน.....พ.ศ.....

คณะกรรมการสอบปริญญานิพนธ์

..... ประธานกรรมการสอบ
(อาจารย์ ดร. กรกฎ เหมสถาปัตย์)

..... กรรมการ
(อาจารย์ วรุฒิ จิตขจรวานิช)

..... กรรมการ
(อาจารย์ อัดนา เช็งโต๊ะ)

อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญานิพนธ์

.....
(อาจารย์ ประเวศน์ เอื้อตรงจิตต์)

พาหนะส่วนบุคคลชนิดนั่งขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าสองล้อ

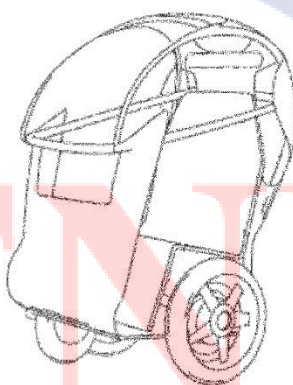
กฤตไนย์ ภู่อิ่ม 53113018-5

ตะวัน ดีสองเมือง 53113065-6

อาจารย์ที่ปรึกษา : อาจารย์ ประเวศน์ เอื้อตรงจิตต์

ปัจจุบันพาหนะส่วนบุคคลขับเคลื่อนด้วยพลังงานไฟฟ้าเข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันของคนเรามากขึ้น อาจเป็นทั้งเพราะทรัพยากรธรรมชาติประเภทพลังงานเช่น น้ำมันเชื้อเพลิง กำลังจะหมดลงรวมถึงค่าใช้จ่ายอื่น ๆ ที่ช่วยในการขับเคลื่อน และค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาที่สูงขึ้นตามลำดับ ดังนั้นทางเลือกหนึ่งที่จะช่วยลดปัญหาทรัพยากรธรรมชาติประเภทพลังงานและช่วยเพิ่มความคล่องตัวในการเดินทางคือ พาหนะส่วนบุคคลชนิดขับเคลื่อนสองล้อหรือ Segway ได้มีการนำมาใช้งานกันอย่างแพร่หลาย แต่ยังมีราคาค่อนข้างสูงและการควบคุมการขับเคลื่อนต้องอาศัยทักษะที่ต้องยืนและโน้มตัว ทางผู้จัดทำจึงคิดว่าคงจะดีกว่าหากการขับเคลื่อนนั้น

โครงการนี้ต้องการพัฒนาพาหนะส่วนบุคคลชนิดขับเคลื่อนสองล้อให้มีราคาถูกลง และสามารถใช้งานได้ง่ายใกล้เคียงกับการขับรถยนต์ทั่วไปคือ การขับเคลื่อนด้วยการนั่งและควบคุมด้วยพวงมาลัย โดยศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของพาหนะส่วนบุคคลสองล้อ เพื่อทำการออกแบบสร้างแบบจำลองและทดสอบ เพื่อยืนยันทฤษฎีและเก็บรวบรวมข้อมูลพื้นฐานสำหรับการพัฒนา Seat Segway ขนาดเท่าจริงในอนาคต



ภาพที่ 1 Seat Segway

Two-Wheel Drive Model for Personal Vehicles

Kritanai Puaim 53113018-5

Tawan Teesongmuang 53113065-6

Academic Advisor : Prawet Euatrongchit

Nowadays, personal vehicles powered by electricity have played an important role in peoples' daily lives due to the lack of natural resources such as a fuel that is possibly soon depleted as well as the rise of needs for costs and other expenses. Therefore, an alternative approach to reduce natural resource problems and help comfort people in traveling is a personal two-wheel drive vehicle or a Segway, which has been deployed extensively. However, such a Segway is relatively expensive, and the driver has to have stand-and-stoop skills.

The project therefore aims to develop a personal two-wheel drive vehicle with low costs for actual implementations. In addition, the operations of a personal vehicle two-wheel drive are expected to be relatively comparable to those of commercially available cars driven by seat and steering wheel controls. This project also studies theories related to the operations of personal two-wheel vehicles, involving kalman filter and PID control techniques. The results include the design model with experiments in order to validate the theories. Some particular information regarding Segway operations and performances are also included for further developments of the real application of a personal two-wheel drive vehicles in the future.

TNI

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณท่านอาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ประเวศน์ เขื่อนตรงจิตต์ ที่คอยให้คำปรึกษา และชี้แนะในการจัดทำโครงการนี้ จนสามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีตรงตามวัตถุประสงค์ และผ่านการทดสอบตามที่ได้ตั้งเป้าหมายไว้

โครงการนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยการสนับสนุนกำลังใจจากครอบครัว และ คณาจารย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยี ไทย-ญี่ปุ่น ที่ให้โอกาสและช่วยให้คำแนะนำมาโดยตลอด จึงขอกราบขอบพระคุณทุกท่านเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้

กฤตณัย ภู่อี่ยม
ตะวัน ตีสองเมือง

TNI

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพประกอบ	ฌ

บทที่ 1 บทนำ

1.1	ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2	วัตถุประสงค์ของการศึกษา	1
1.3	ขอบเขตของการศึกษา	1
1.4	แผนการดำเนินงาน	2
1.5	ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.6	แผนงานและระยะเวลาการดำเนินงาน.....	3

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในการปฏิบัติงาน

2.1	ทฤษฎีทางพื้นฐาน	4
2.2	ทฤษฎีขั้นตอนวิธี	5
2.3	ทฤษฎีที่ใช้ในการปฏิบัติ	16

บทที่ 3 แผนงานการปฏิบัติงานและขั้นตอนการดำเนินงาน

3.1	วิธีการปฏิบัติงาน	28
3.2	ขั้นตอนการปฏิบัติงาน	28
3.3	การเลือกใช้อุปกรณ์ในการปฏิบัติงานและปฏิบัติงาน	29

บทที่ 4 ผลการดำเนินการวิเคราะห์และสรุปผลต่าง ๆ

4.1	ผลการดำเนินงาน	47
4.2	ผลการวิเคราะห์	52

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 บทสรุปและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการดำเนินงาน	53
5.2 ปัญหาและแนวทางการแก้ไขปัญหา	53
5.3 ข้อเสนอแนะ	53
บรรณานุกรม	
บรรณานุกรม	55
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. โปรแกรมคอมพิวเตอร์	59
ภาคผนวก ข. คำสั่งโปรแกรม MATLAB	63

TNI

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1.1	แผนงานและระยะเวลาการดำเนินงาน	3
3.1	แสดงการทำงานตามลำดับของ Kalman Filter	34
3.2	ผลของการเพิ่มค่าตัวแปรอย่างอิสระ	38
ก1	โปรแกรมคอมพิวเตอร์	55
ข1	คำสั่งโปรแกรมแมทแลบ	58

THAI

สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น

TNI

NICHI INSTITUTE OF TECHNOLOGY

สารบัญภาพประกอบ

ภาพที่	หน้า
1 Seat Segway	ค
2.1 ตัวอย่างการสุมตัวแปร W_k	7
2.2 แสดง Block Diagram PID	10
2.3 แสดงเทอมของสัดส่วนหรือ P	10
2.4 แสดงเทอมของปริพันธ์ หรือ I	11
2.5 แสดงเทอมของอนุพันธ์ หรือ D	12
2.6 Moment diagram of balancing	13
2.7 FBD ของล้อพาหนะสองล้อ	14
2.8 แสดงภาพ DC Motor	17
2.9 ภาพวงจร H-Bridge Switching	18
2.10 ภาพการทำงานวงจร H-Bridge Switching	18
2.11 ภาพการทำงานวงจร H-Bridge Switching ในอีกทิศทางหนึ่ง	19
2.12 วงจรควบคุมมอเตอร์อย่างง่ายโดยใช้ทรานซิสเตอร์	20
2.13 H-Bridge switching จาก Transistor	20
2.14 H-Bridge switching จาก Transistor โดย Q1 และ Q3 ทำงาน	21
2.15 H-Bridge switching จาก Transistor โดย Q2 และ Q4 ทำงาน	21
2.16 Mosfet H-bridge Circuit	22
2.17 ภาพแสดงสถานะไร้แรงโน้มถ่วงของโลก	23
2.18 ภาพแสดงสถานะไร้แรงโน้มถ่วงของโลกเคลื่อนที่ไปทางด้าน X^+	23
2.19 เมื่อลูกบอลอยู่ในสถานะมีแรงโน้มถ่วงของโลกเคลื่อนไปที่แกน $(-Z)$	24
2.20 เมื่อลูกบอลถูกเอียงลงไปในกล่อง 45 องศา	24
2.21 อุปกรณ์วัด Accelerometer	25
3.1 Namiki Motor Encode และ Motor 12 V 150 Rpm Current 2A	27
3.2 Arduino DUE AT91SAM3X8E	27
3.3 Turnigy 2200 mah 2S 20C Lipo Pack Minimum Capacity	28
3.4 หุ่นยนต์ต้นแบบ	28
3.5 ADXL2535 Accelerometer 3g/s	29
3.6 Accelerometer Block Diagram	29
3.7 ผลการทดลองหาค่าจากเซ็นเซอร์ Accelerometer	29

สารบัญภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.8 IDG-500 Gyroscope 110 deg/s	30
3.9 Gyroscope Block Diagram	30
3.10 สมการหาค่า Gyroscope เซ็นเซอร์ที่ใช้ให้ค่าออกมาเป็น Analog	31
3.11 ผลลัพธ์การเปลี่ยนมุมและค่าความเร็วเชิงมุม	31
3.12 รูปแบบการทำงานของ Kalman Filter	33
3.13 Block Diagram เมื่อรับค่าเซ็นเซอร์	36
3.14 Flow chart of the control system of the Balancing Electric Scooter	37
3.15 แผนภาพการออกแบบ	38
3.16 แผนการดำเนินงานของการสร้างหุ่นยนต์ (ภาคการศึกษาที่ 1)	39
3.17 แผนการดำเนินงานของการสร้างหุ่นยนต์ (ภาคการศึกษาที่ 2)	40
3.18 แผนการดำเนินงานของการสร้างหุ่นยนต์	41
4.1 กราฟผลการทดลองที่กำหนดค่าความแปรปรวน Noise ของเซ็นเซอร์ที่ $R = 1$	43
4.2 กราฟผลการทดลองที่กำหนดค่าความแปรปรวน Noise ของเซ็นเซอร์ที่ $R = 100$	43
4.3 กราฟผลการทดลองที่กำหนดค่าความแปรปรวน Noise ของเซ็นเซอร์ที่ $R = 250$	44
4.4 กราฟผลการทดลองที่กำหนดค่าความแปรปรวน Noise ของเซ็นเซอร์ที่ $R = 125$	44
4.5 แสดงผลภาพรวมกราฟค่าเซ็นเซอร์หลังจากใช้ Kalman Filter ประมวลผล	45
4.6 ส่วนขยายกราฟค่าเซ็นเซอร์หลังจากใช้ Kalman Filter ประมวลผล	45
4.7 ส่วนขยายกราฟค่าเซ็นเซอร์หลังจากใช้ Kalman Filter ประมวลผล	46
4.8 แผนภาพแทนหุ่นยนต์เมื่ออยู่ในภาวะสมดุล	47
4.9 แผนภาพแทนหุ่นยนต์เมื่อเอียงตัวและพยายามที่จะรักษาสถิตไว้	47
4.10 แสดงแบบจำลอง Seat Segway	48
4.11 Prototype Seat Segway	48
4.12 ผลลัพธ์การปฏิบัติงานของนักศึกษา	48



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันทรัพยากรธรรมชาติประเภทพลังงานอย่างน้ำมันค่อย ๆ ลดลงไปเรื่อย ๆ จนกลายเป็นปัญหาหนึ่งที่ทั่วโลกกำลังหาวิธีแก้ไข ซึ่งหนึ่งในนั้นก็คือ วิธีการหาพลังงานทดแทนเช่น ไฟฟ้า ซึ่งเป็นพลังงานทดแทนหนึ่งที่ถูกนำขึ้นมาใช้กับยานพาหนะ ดังจะเห็นได้จากรถยนต์ขับเคลื่อนด้วยพลังงานไฟฟ้าที่มีมากขึ้นในปัจจุบัน เช่น Segway ซึ่งเป็นยานพาหนะสองล้อที่ใช้พลังงานไฟฟ้าในการขับเคลื่อน แต่มีราคาสูง ซึ่งค่อนข้างจำกัดวงผู้ใช้ และต้องใช้ความชำนาญมากพอสมควรในการขับเคลื่อน ดังนั้นทางผู้จัดทำจึงต้องการที่จะพัฒนา Segway ให้มีราคาถูกลง และสามารถที่จะขับเคลื่อนใกล้เคียงรถยนต์ให้มากขึ้นด้วยการนั่งและควบคุมด้วยพวงมาลัย เพื่อให้สะดวกต่อการใช้ แม้ผู้ใช้จะไม่เคยทดลองขับมาก่อน

โครงการนี้ได้กล่าวถึงทฤษฎีที่รองรับการทำงานของพาหนะส่วนบุคคลสองล้อ และทำการออกแบบและทดสอบกับหุ่นต้นแบบเพื่อยืนยันทฤษฎี และเก็บรวบรวมข้อมูลเพื่อเป็นประโยชน์แก่การพัฒนา Seat Segway ขนาดเท่าจริงในภายภาคหน้า

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 1.2.1 อธิบายหลักการทำงานและควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าได้
- 1.2.2 อธิบายหลักการทำงานของเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุมและความลาดเอียงได้
- 1.2.3 อธิบายทฤษฎีและขั้นตอนการประมาณค่าของสมการกำลังสองเชิงเส้น (Kalman Filter) และระบบควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์-อนุพันธ์ (PID Controller) ได้
- 1.2.4 พัฒนาหุ่นยนต์ต้นแบบสำหรับกรณีศึกษาการทรงตัวของวัตถุ
- 1.2.5 นำข้อมูลและปัญหาที่เกิดขึ้นจากการทำโครงการนำมาเป็นแนวทางสำหรับการออกแบบพาหนะส่วนบุคคลชนิดนั่งขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าสองล้อได้

1.3 ขอบเขตการศึกษา

- 1.3.1 ศึกษาทฤษฎีทางฟิสิกส์ในเรื่องของโมเมนตัม การดล การเคลื่อนที่ในแนวราบและแนวตั้ง
- 1.3.2 ศึกษาทฤษฎีและวิธีของการประมาณค่าของสมการกำลังสองเชิงเส้น (Kalman Filter) และระบบควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์-อนุพันธ์ (PID Controller)
- 1.3.3 ศึกษาวงจรควบคุมทิศทาง ความเร็วของมอเตอร์ และพัฒนาโปรแกรมควบคุม
- 1.3.4 ศึกษาการทำงานวิเคราะห์ของมอเตอร์ไฟฟ้าและแหล่งจ่ายพลังงาน

1.4 แผนการดำเนินงาน

แบ่งการดำเนินงานเป็น 3 ส่วน โดยผู้รับผิดชอบดังนี้

1.4.1 นาย กฤตชัย ภู่อิ่ม

- ศึกษาทฤษฎีต่าง ๆ และหลักการทรงตัวตามหลักฟิสิกส์
- ศึกษาทฤษฎีต่าง ๆ และหลักการของมอเตอร์ และบอร์ดควบคุม
- ศึกษาทฤษฎีของระบบ ควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์-อนุพันธ์ (PID Controller)
- พัฒนาหุ่นยนต์ต้นแบบโดยยังไม่มีขั้นตอนวิธีในการควบคุม

1.4.2 นางสาว ตะวัน ดีสองเมือง

- ศึกษาทฤษฎีต่าง ๆ และหลักการทรงตัวตามหลักฟิสิกส์
- ศึกษาทฤษฎีต่าง ๆ และหลักการของเซนเซอร์
- ศึกษาทฤษฎีของขั้นตอนวิธีที่ใช้ควบคุมการแปรปรวน
- นำค่าที่ได้จากเซนเซอร์มาเข้าสู่สมการกำลังสองเชิงเส้น (Kalman Filter)

1.4.3 ทำงานร่วมกัน

- นำค่าที่ได้จากขั้นตอนวิธีควบคุมการแปรปรวนมาควบคุมการทรงตัวของหุ่นยนต์ต้นแบบ
- ตรวจสอบแก้ไข เพื่อให้ได้ความเสถียร
- สร้างพาหนะส่วนบุคคลเคลื่อนที่ด้วยสองล้อตัวจริง
- ตรวจสอบแก้ไข และทดสอบการขับเคลื่อน

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้หุ่นยนต์ต้นแบบที่เคลื่อนที่ด้วยระบบควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์-อนุพันธ์ (PID Controller) และการทรงตัวด้วยเซนเซอร์วัดความเร็วเชิงมุม และวัดค่ามุมเอียงที่ผ่านวิธีการประมาณค่าของสมการกำลังสองเชิงเส้น (Kalman Filter)

1.5.2 ได้พาหนะเคลื่อนสองล้อ ชนิดนั่ง เพื่อความสะดวกสบายคล่องตัวในการเคลื่อนที่

1.6 แผนงานและระยะเวลาการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 แผนงานและระยะเวลาการดำเนินงาน

ขั้นตอนการดำเนินงาน	พ.ศ. 2556						พ.ศ. 2557		
	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.
ศึกษาทฤษฎีต่าง ๆ และหลักการทรงตัวตามฟิสิกส์									
ศึกษาทฤษฎีต่าง ๆ และหลักการของมอเตอร์ และบอร์ดควบคุม									
ศึกษาทฤษฎีต่าง ๆ และหลักการของเซนเซอร์									
ศึกษาทฤษฎีของระบบ PID และการนำมาใช้งาน									
ศึกษาทฤษฎีของอัลกอริทึมที่ใช้ควบคุมการแปรปรวน									
พัฒนาหุ่นยนต์ต้นแบบโดยยังไม่มีอัลกอริทึมในการควบคุม									
นำค่าที่ได้จากเซนเซอร์มาเข้าสู่อัลกอริทึมควบคุมการแปรปรวน									
นำค่าที่ได้จากอัลกอริทึมมาทำการควบคุมการทรงตัว									
ตรวจสอบแก้ไข เพื่อให้ความเสถียร									
จัดทำรูปเล่ม									

	นาย กฤตชัย ภู่อิม
	นางสาว ตะวัน ตีสองเมือง
	ทำร่วมกัน

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในการปฏิบัติงาน

2.1 ทฤษฎีพื้นฐาน

2.1.1 กฎการเคลื่อนที่ของนิวตัน

แรง คือปริมาณที่กระทำต่อวัตถุในรูปของการพยายามดึงหรือดันและพยายามทำให้วัตถุเปลี่ยนสภาพการเคลื่อนที่ ซึ่งแรงเป็นปริมาณเวกเตอร์มีหน่วยเป็นนิวตัน โดยแรงพื้นฐานในธรรมชาติได้แก่ แรงโน้มถ่วง แรงแม่เหล็กไฟฟ้า แรงนิวเคลียร์อย่างอ่อนและแรงนิวเคลียร์อย่างแรง สำหรับแรงที่เกิดขึ้นจากมนุษย์ ยกตัวอย่างเช่น แรงสัมผัส สนามของแรง เป็นต้น

กฎข้อที่ 1 ของนิวตัน จากสมการคณิตศาสตร์ $\sum F = 0$ ถ้ามีแรงลัพธ์ภายนอกเป็นศูนย์กระทำต่อวัตถุ วัตถุจะไม่เปลี่ยนสภาพการเคลื่อนที่

กฎข้อที่ 2 ของนิวตัน ถ้ามีแรงลัพธ์ที่ไม่เป็นศูนย์กระทำต่อวัตถุ วัตถุจะมีการเปลี่ยนสภาพการเคลื่อนที่ จากสูตร $\sum F = MA$ โดย $\sum F$ คือแรงสุทธิหรือแรงลัพธ์ที่กระทำบนวัตถุ ซึ่งเป็นการรวมแรงทั้งหมดแบบเวกเตอร์ที่กระทำบนวัตถุดังกล่าว เนื่องจากมวลเป็นปริมาณสเกลาร์ ดังนั้นทิศทางของความเร่งและแรงสุทธิเป็นทิศเดียวกัน

กฎข้อที่ 3 ของนิวตัน กรณีที่วัตถุชิ้นหนึ่งออกแรงกระทำบนวัตถุอีกชิ้นหนึ่ง วัตถุชิ้นแรกจะรู้สึกถึงแรงซึ่งกระทำกลับโดยวัตถุชิ้นที่สองต่อตัวเอง โดยแรงนี้จะมีขนาดเท่ากับแรงที่วัตถุชิ้นแรกกระทำบนวัตถุชิ้นที่สอง แต่มีทิศตรงกันข้าม โดยนิยามว่า Action = Reaction

โมเมนตัม หมายถึง ความสามารถในการเคลื่อนที่ของวัตถุ ซึ่งมีค่าเท่ากับผลคูณระหว่างมวลและความเร็วของวัตถุ มวลเป็นปริมาณสเกลาร์ แต่ความเร็วเป็นปริมาณเวกเตอร์ เมื่อนำปริมาณทั้งสองเข้าคูณด้วยกัน ถือว่าปริมาณใหม่เป็นปริมาณเวกเตอร์เสมอ ดังนั้นโมเมนตัมจึงเป็นปริมาณเวกเตอร์ คือมีทั้งขนาดและทิศทาง ถ้าวัตถุเคลื่อนที่อยู่ในกรอบอ้างอิงใด ๆ ก็ตาม วัตถุนั้นจะมีโมเมนตัมอยู่ในกรอบอ้างอิงนั้น ๆ ค่าของโมเมนตัมของวัตถุจะขึ้นอยู่กับสองตัวแปรคือมวลกับความเร็วดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งสองเขียนได้เป็น

โมเมนตัม = มวล $\times$ ความเร็ว

$$P = MV$$

กฎการอนุรักษ์โมเมนตัมและการชน โมเมนตัมมีคุณสมบัติพิเศษคือ จะถูกอนุรักษ์อยู่เสมอ ซึ่งไม่เพิ่มขึ้นและในขณะเดียวกันก็ไม่ลดหายไป แม้แต่ในการชน พลังงานจลน์นั้นจะไม่ถูกอนุรักษ์ในการชน ถ้าการชนนั้นเป็นการชนแบบไม่ยืดหยุ่น เนื่องจากการคงตัวของโมเมนตัม ซึ่งทำให้สามารถนำไปคำนวณความเร็วที่ไม่ทราบค่าภายหลังการชนได้ โดยผลรวมของโมเมนตัมก่อนการชนจะต้องเท่ากับผลรวมของโมเมนตัมหลังการชนเสมออ้างอิงจากสมการดังนี้

$$m_1 \mathbf{v}_{1,i} + m_2 \mathbf{v}_{2,i} = m_1 \mathbf{v}_{1,f} + m_2 \mathbf{v}_{2,f}$$

สำหรับการชนของโมเมนตัมนั้นมีด้วยกันทั้งหมด 3 รูปแบบดังนี้

1. การชนแบบยืดหยุ่น โมเมนตัมรวมกันก่อนชนต้องเท่ากับโมเมนตัมรวมกันหลังชนแล้ว ผลรวมของพลังงานจลน์ก่อนการชนจะต้องเท่ากับผลรวมของพลังงานจลน์หลังการชนด้วยอ้างอิงจากสมการดังนี้

$$\frac{1}{2}m_1 v_{1,i}^2 + \frac{1}{2}m_2 v_{2,i}^2 = \frac{1}{2}m_1 v_{1,f}^2 + \frac{1}{2}m_2 v_{2,f}^2$$

2. การชนแบบพุ่งตรง (การชนในหนึ่งมิติ) ในกรณีที่วัตถุพุ่งเข้าชนกันเป็นทางตรงสามารถหาความเร็วปลายได้ดังนี้

$$v_{1,f} = \left(\frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} \right) v_{1,i} + \left(\frac{2m_2}{m_1 + m_2} \right) v_{2,i}$$

$$v_{2,f} = \left(\frac{2m_1}{m_1 + m_2} \right) v_{1,i} + \left(\frac{m_2 - m_1}{m_1 + m_2} \right) v_{2,i}$$

3. การชนแบบไม่ยืดหยุ่น ตัวอย่างที่พบเห็นได้ของการชนแบบไม่ยืดหยุ่น คือการที่วัตถุชนแล้วติดกัน (ไถลไปด้วยกัน) สมการต่อไปนี้จะแสดงการอนุรักษ์โมเมนตัม

$$m_1 \mathbf{v}_{1,i} + m_2 \mathbf{v}_{2,i} = (m_1 + m_2) \mathbf{v}_f$$

2.2 ทฤษฎีขั้นตอนวิธี (Algorithm Theory)

2.2.1 คาลมานฟิลเตอร์ (Kalman Filter)

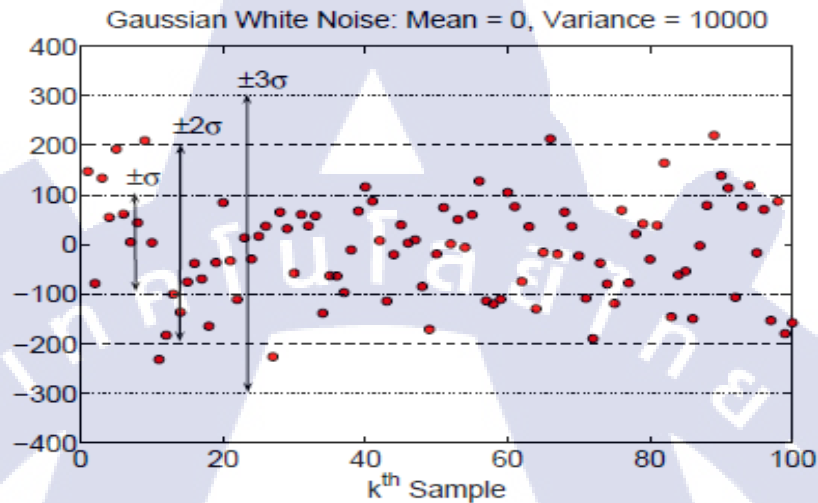
การวิเคราะห์ระบบสิ่งที่เราต้องรู้คือสถานะ (States) ณ เวลาหนึ่ง ๆ ของระบบว่าเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาอย่างไรแต่ในทางปฏิบัติการหาสถานะมีอุปสรรคหลายอย่างเช่น ความไม่สมบูรณ์ของเซ็นเซอร์ที่ใช้วัดสถานะของระบบ และความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการวัด ดังนั้นวิธีที่ช่วยในการประมวลผลสถานะจากปัญหาดังกล่าวคือ การใช้การประมาณค่าและวิธีหนึ่งที่ช่วยในการประมาณค่าในที่นี้คือ Kalman filter ซึ่งเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ถูกใช้กันอย่างแพร่หลายเช่น ระบบสื่อสารโทรคมนาคม ระบบควบคุมและระบบการประมวลผลสัญญาณ เป็นต้น โดยการใช้การประมาณค่าของสมการกำลังสองเชิงเส้น (Linear Quadratic Estimation หรือ LQE) เป็นขั้นตอนวิธีแบบเวียนบังเกิดในการประมาณตัวแปรสถานะของระบบพลวัต โดยการประมาณตัวแปรสถานะของระบบพลวัตนี้ อาจประยุกต์ใช้ในกรณีที่ต้องการประมาณตัวแปรสถานะที่ถูกสัญญาณรบกวนหรือเกิดจากข้อจำกัดในการตรวจวัดตัวแปรสถานะนั้น ๆ หรือในบางกรณีก็ใช้ร่วมกับข้อมูลของตัวแปรสถานะที่ได้รับมาจากเซ็นเซอร์ ซึ่งทำให้ข้อมูลของตัวแปรสถานะมีความแม่นยำมากขึ้นกว่าการเลือกใช้ข้อมูลจากเซ็นเซอร์เพียงอย่างเดียว

รูปแบบมาตรฐานของ ตัวกรองคาลมาน จะอยู่ในรูปของเมตริกซ์ เพื่อให้ใช้งานได้กับระบบที่มีสัญญาณเข้า-ออกหลายสัญญาณ (Multiple Input Multiple Output System) และเพื่อใช้ประมาณสถานะของระบบหลาย ๆ สถานะ ในบทความนี้จะนำเสนอ ตัวกรองคาลมาน ในรูปของ Scalar เพื่อให้ง่ายต่อการทำความเข้าใจแนวคิดพื้นฐานและหลักการทำงานของตัวกรองคาลมาน คือสูตรทางคณิตศาสตร์ใช้สำหรับหาค่าประมาณที่ดีที่สุดของสถานะระบบ โดยนำข้อมูลเกี่ยวกับความไม่แน่นอน เช่น ความไม่แน่นอนของกลศาสตร์ของระบบ (System Dynamics) และความคลาดเคลื่อนของเซ็นเซอร์ (Measurement Noise) มาประกอบการพิจารณาบนพื้นฐานของความน่าจะเป็นในลักษณะที่เกื้อกูลกันได้ดีที่สุด (Optimal) การใช้ตัวกรองคาลมานเริ่มต้นด้วยสมมุติฐานว่าสามารถเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบในรูป Discrete-Time System Model ด้วยสมการ

$$x_k = \Phi x_{k-1} + w_k \quad (1)$$

ให้ x_k เป็นตัวแปรใด ๆ ณ เวลา t_k ที่ไม่รู้ค่าแต่ต้องการประมาณค่า ณ เวลา $t_0, t_1, \dots, t_k$ ไปเรื่อย ๆ สมมุติว่า x_k เปลี่ยนแปลงตามเวลาตามสมการที่ (1) คือแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเรียกว่า Plant หรือ Process Model เพราะแสดงความสัมพันธ์ว่า x เปลี่ยนแปลงตามเวลาอย่างไร ให้ w_k เป็น Gaussian White Noise มีค่าเฉลี่ย (Mean) เท่ากับ μ และ Variance เท่ากับ Q (ดังนั้น Standard Deviation ของ w_k คือ $\sigma = \sqrt{Q}$) โดยปกติจะไม่สามารถมั่นใจ 100% ได้ว่าตัวแปรสุ่มจะมีค่าเป็นเท่าไร แต่เนื่องจาก w_k เป็นตัวแปรสุ่มแบบ

Gaussian จึงสามารถใช้ค่า Mean และ Variance อธิบายเกี่ยวกับ w_k ในเชิงความน่าจะเป็นได้ อย่างสมบูรณ์ว่าถ้าสุ่มหลาย ๆ ครั้ง โดยเฉลี่ย w_k จะมีค่าเท่ากับ μ นอกจากนี้ประมาณ 68%, 95% และ 99% ของค่าของ w_k จากการสุ่มทั้งหมดจะอยู่ในช่วง $\mu \pm \sigma$, $\mu \pm 2\sigma$ และ $\mu \pm 3\sigma$ ตามลำดับ สมมติให้ $\mu = 0$ และ $Q = 10000$ ภาพที่ 2.1 แสดงผลของการสุ่มตัวอย่าง w_k 100 ครั้ง



ภาพที่ 2.1 ตัวอย่างการสุ่มตัวแปร w_k

จากภาพที่ 2.1 ตัวอย่างการสุ่มตัวแปร w_k จะสังเกตได้ว่าประมาณ 68%, 95% และ 99% ของ w_k จะอยู่ในช่วง $\mu \pm \sigma$, $\mu \pm 2\sigma$ และ $\mu \pm 3\sigma$ ตามลำดับ $\mu = 0$ White Noise หมายความว่า w_k ไม่เกี่ยวข้องกับตัวแปรอื่นใดหรือตัวมันเองโดยสิ้นเชิง (Uncorrelated)

ดังนั้นแม้ว่าจะรู้ค่าของ w ในอดีตหรือค่าของตัวแปรอื่นใด ก็ไม่สามารถใช้ข้อมูลนั้น ทำนายค่าของ w_k ในอนาคต (2) ถึง (4) สรุปคุณสมบัติของ w_k ด้วยสูตรทางคณิตศาสตร์

$$z_k = H_k x_k + w_k \quad (2)$$

สมการที่ (2) คือแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบเรียกว่า Measurement Model เพราะอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่เซ็นเซอร์วัดได้ z_k กับสถานะของระบบ x_k รวมกันเรียกว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบ (System Model) ที่สมมติให้ w_k เป็น Gaussian White Noise มีค่า Mean เท่ากับศูนย์และ Variance เท่ากับ R

$$P_k^- = E[(e_k^-)^2] = \Phi_{k-1}^2 P_{k-1} + Q_k \quad (3)$$

เราสามารถใส่สมการที่ (3) เพื่อคาดการณ์ค่าของ $x(t)$ ความน่าเชื่อถือของการคาดการณ์ (P_k) ไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งเซนเซอร์สามารถวัดค่าได้ เมื่อเซนเซอร์วัดค่าได้ตัวกรองคาลมาน จะนำค่าที่วัดได้มาประกอบการพิจารณาเพื่อหาค่าประมาณสถานะของระบบ ตามสมการ

$$\hat{x}_k^+ = \hat{x}_k^- + K_k(z_k - H_k\hat{x}_k^-) \quad (4)$$

$$K_k = P_k^- H_k (P_k^- H_k^2 + R_k)^{-1} \quad (5)$$

$$P_k = (I - K_k H) P_k^- \quad (6)$$

เครื่องหมายบวกเป็นการระบุว่า $\hat{x}_k^+$ เป็นค่าประมาณโดยได้หน้า ค่าที่เซนเซอร์วัดได้มาประกอบการพิจารณา สมการที่ (4) คือสมการที่ใช้ Update ค่า $\hat{x}_k^-$ ที่เราคาดการณ์ไว้ล่วงหน้า (ก่อนที่เซนเซอร์จะวัดค่าได้) เมื่อพิจารณาจากสมการที่ (4) และ (2) แล้วจะเห็นว่า $H_k\hat{x}_k^-$ คือสมการที่ใช้ประมาณค่าที่เซนเซอร์ควรวัดได้ คำนวณโดยใช้ค่าประมาณ $\hat{x}_k^-$ ตัวกรองคาลมานจะทำงานโดยหา Residual ($z_k - H_k\hat{x}_k^-$) ซึ่งเป็นผลต่างระหว่างค่าที่เซน

เซอร์ควรวัดได้กับค่าที่วัดได้จริง นำมาให้น้ำหนักโดยการคูณด้วย Kalman Gain แล้วนำผลที่ได้มาใช้แก้ไขค่า $\hat{x}_k^-$ ที่ได้คาดการณ์ไว้ล่วงหน้าจะสังเกตได้ว่าค่าที่นำมาใช้แก้ไข $\hat{x}_k^-$ ขึ้นอยู่กับขนาดของ Residual และ K_k โดยทั่วไป ถ้าผลต่างระหว่างค่าที่คาดการณ์กับค่าที่วัดได้จริงมีมากและข้อมูลมีความน่าเชื่อถือน้อยค่า K_k ที่คำนวณได้จะมีค่าสูง ทำให้ต้องแก้ไข $\hat{x}_k^-$ มาก $K_k(z_k - H_k\hat{x}_k^-)$ มีค่ามาก ในทางกลับกันถ้าผลต่างระหว่างค่าที่คาดการณ์ไว้กับค่าที่วัดได้จริงมีน้อย และข้อมูลมีความน่าเชื่อถือค่า K_k ที่คำนวณได้จะมีค่าต่ำ ทำให้แก้ไข $\hat{x}_k^-$ เพียงเล็กน้อย $K_k(z_k - H_k\hat{x}_k^-)$ มีค่าน้อยโดยอัตโนมัติ การคำนวณค่า K_k ตามสมการที่ (5) เป็นการคำนวณที่ได้นำข้อมูลทางสถิติของระบบมาพิจารณาแล้วและเป็นค่า Gain ที่จะทำให้ P_k มีค่าต่ำสุด ซึ่งคาลมานฟิลเตอร์ต้องใช้วิธีการคำนวณต่าง ๆ เพื่อความเข้าใจในทฤษฎีคาลมานฟิลเตอร์ เช่น Expected Value, Discrete Random Variable, Identity Matrix, Jacobian Conjecture

ค่าคาดหวัง (Expected Value) สำหรับทฤษฎีความน่าจะเป็นค่าคาดหวังของตัวแปรสุ่มคือค่าเฉลี่ยถ่วงน้ำหนัก (weighted average) ของทุก ๆ ค่าที่เป็นไปได้ของตัวแปรสุ่ม โดยในการคำนวณการถ่วงน้ำหนักจะใช้ค่าฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (Probability Density Function) สำหรับตัวแปรสุ่มต่อเนื่องหรือใช้ค่าฟังก์ชันมวลของความน่าจะเป็น (Probability Mass Function) สำหรับตัวแปรวิฤต ค่าความคาดหวังนี้เมื่อพิจารณาจาก Law of Large Numbers ก็คือค่าลิมิตแบบ Almost Surely ของค่าเฉลี่ยที่ได้จากการสุ่มตัวอย่าง โดยที่จำนวนการสุ่มโตเข้าสู่ค่าอนันต์

ตัวแปรสุ่มวิฤต (Discrete Random Variable) ตัวแปรสุ่มวิฤต หมายถึงตัวแปรสุ่มที่ประกอบด้วยค่าทั้งหมด หรือตัวเลขทั้งหมดที่เป็นไปได้จำนวนจำกัด ซึ่งโดยทั่วไปจะเป็นจำนวนนับสมมติ ตัวแปรสุ่ม X มีโอกาสมีค่าเป็น x_1 ด้วยความน่าจะเป็น p_1 มีโอกาสมีค่าเป็น x_2 ด้วยความน่าจะเป็น p_2 p_n มีโอกาสมีค่าเป็น x_k ด้วยความน่าจะเป็น p_k แล้วค่าคาดหวังของตัวแปรสุ่ม X จะถูกนิยาม

เมตริกเอกลักษณ์ (Identity Matrix) เมตริกซ์เอกลักษณ์ (Identity Matrix) เป็น Scalar Matrix ที่มีสมาชิกในแนวเส้นทแยงมุมหลักมีค่าเป็น 1 เท่ากันหมด สัญลักษณ์ ใช้ I แทน Identity Matrix เมตริกซ์เอกลักษณ์เป็นเมตริกซ์ที่มีคุณสมบัติสำคัญในการคูณ การหาส่วนกลับของเมตริกซ์ A

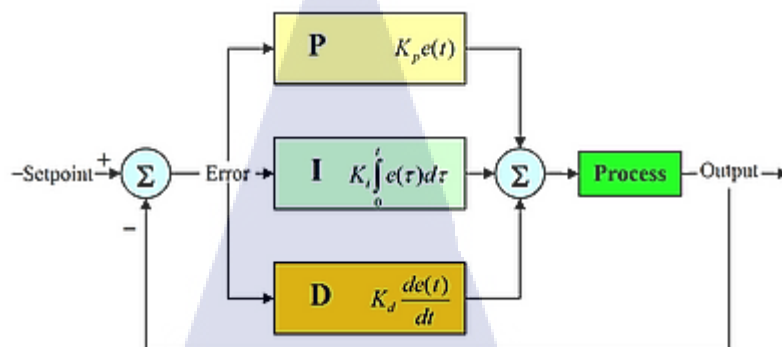
$$I_1 = [1], I_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, I_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \dots, I_n$$

2.2.2 PID Controller (Proportional Integral Derivative Controller)

สิ่งที่ต้องรู้ในการวิเคราะห์ระบบ คือสถานะ (States) ณ เวลาหนึ่ง ๆ ของระบบว่าระบบควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์-อนุพันธ์ (PID Controller) เป็นระบบควบคุมแบบป้อนกลับที่ใช้กันอย่างกว้างขวาง ซึ่งค่าที่นำไปใช้ในการคำนวณเป็นค่าความผิดพลาดที่หามาจากความแตกต่างของตัวแปรในกระบวนการและค่าที่ต้องการ ตัวควบคุมจะพยายามลดค่าผิดพลาดให้เหลือน้อยที่สุดด้วยการปรับค่าสัญญาณขาเข้าของกระบวนการ ค่าตัวแปรของ PID ที่ใช้จะปรับเปลี่ยนตามธรรมชาติของระบบการควบคุมแบบ PID ได้ชื่อตามการรวมกันของเทอมของตัวแปรทั้งสามตามสมการ

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

$P_{out}, I_{out}, D_{out}$ หมายถึง ผลของสัญญาณขาออกของระบบ ดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.2 แสดง Block Diagram PID

เทอมของสัดส่วนหรือ P เป็นอัตราขยาย ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงเป็นสัดส่วนของค่าความผิดพลาดตอบสนองของสัดส่วนสามารถทำได้โดยการคูณค่าความผิดพลาดด้วยค่าคงที่ K_p หรือที่เรียกว่าอัตราขยายสัดส่วน

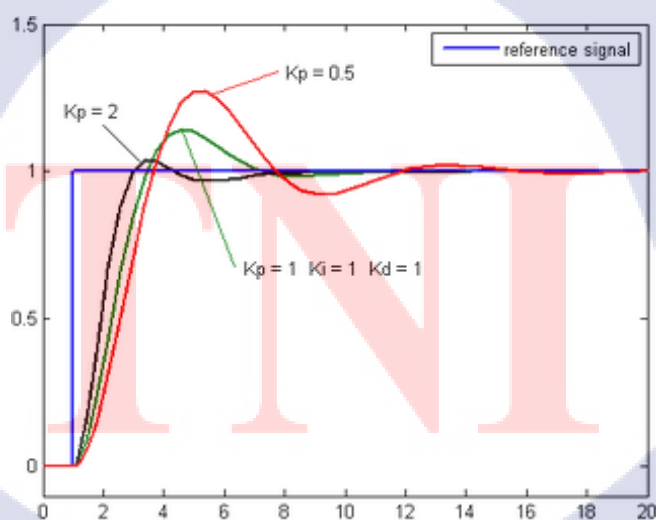
$$P_{out} = K_p e(t)$$

กำหนดให้ P_{out} เป็นค่าสัญญาณขาออกของเทอมสัดส่วน

กำหนดให้ K_p เป็นอัตราขยายสัดส่วน ตัวแปรปรับค่าได้

กำหนดให้ e เป็นค่าความผิดพลาด = SP - PV

กำหนดให้ t เป็นค่าของหน่วยเวลา



ภาพที่ 2.3 แสดงเทอมของสัดส่วนหรือ P

เทอมของปริพันธ์ หรือ I เป็นสัดส่วนของขนาดความผิดพลาดและระยะเวลาของความผิดพลาด ผลรวมของความผิดพลาดในทุกช่วงเวลา (ปริพันธ์ของความผิดพลาด) จะให้ออฟเซตสะสมที่ควรจะเป็นในก่อนหน้า ความผิดพลาดสะสมจะถูกคูณโดยอัตราขยายปริพันธ์ ขนาดของผลของเทอมปริพันธ์จะกำหนดโดยอัตราขยายปริพันธ์ K_i

$$I_{out} = K_i \int_0^t e(\tau) d\tau$$

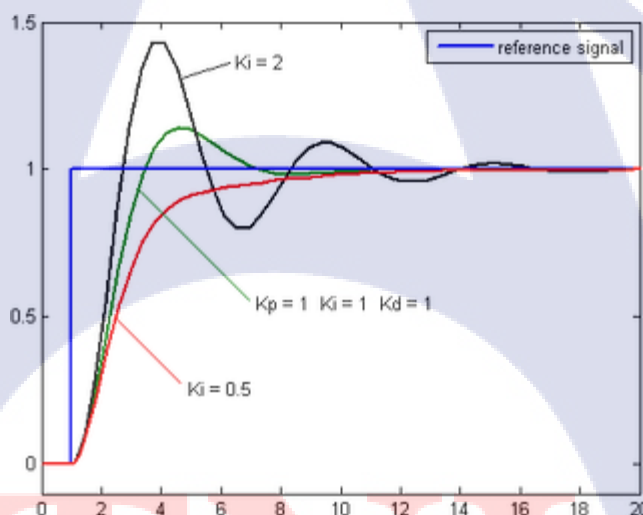
กำหนดให้ I_{out} เป็นค่าสัญญาณขาออกของเทอมปริพันธ์

กำหนดให้ K_i เป็นอัตราขยายปริพันธ์ ตัวแปรปรับค่าได้

กำหนดให้ e เป็นค่าความผิดพลาด = SP – PV

กำหนดให้ t เป็นค่าของหน่วยเวลา

กำหนดให้ τ เป็นตัวแปรปริพันธ์



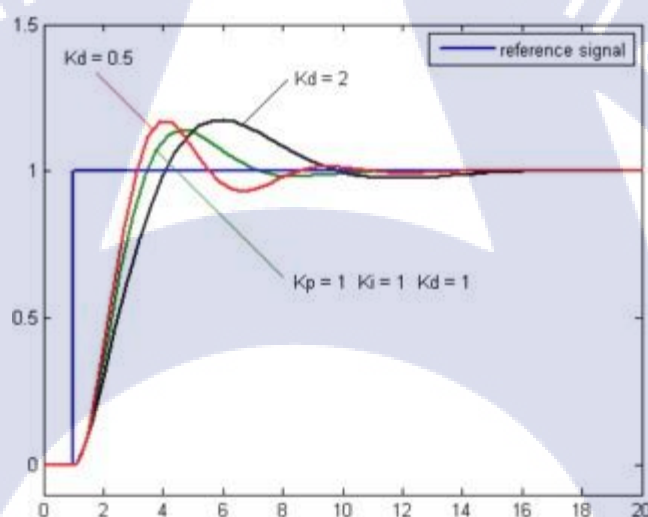
ภาพที่ 2.4 แสดงเทอมของปริพันธ์ หรือ I

เทอมปริพันธ์ (เมื่อรวมกับเทอมสัดส่วน) จะเร่งกระบวนการให้เข้าสู่จุดที่ต้องการและขจัดความผิดพลาดที่เหลืออยู่ที่เกิดจากการใช้เพียงเทอมสัดส่วน แต่อย่างไรก็ตาม เทอมปริพันธ์เป็นการตอบสนองต่อความผิดพลาดสะสมในอดีต จึงสามารถทำให้เกิดโอเวอร์ชูตได้ (หมายถึงข้ามจุดที่ต้องการ)

เทอมของอนุพันธ์ หรือ D เป็นอัตราการเปลี่ยนแปลงของความผิดพลาดจากกระบวนการนั้นคำนวณหาจากความชันของความผิดพลาดทุก ๆ เวลา (นั่นคือ เป็นอนุพันธ์อันดับหนึ่งสัมพันธ์กับเวลา) และคูณด้วยอัตราขยายอนุพันธ์ K_d ขนาดของผลของเทอมอนุพันธ์ (บางครั้งเรียก อัตรา) ขึ้นกับ อัตราขยายอนุพันธ์ K_d

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

กำหนดให้ D_{out} เป็น สัญญาณขาออกของเทอมอนุพันธ์
กำหนดให้ K_d เป็น อัตราขยายอนุพันธ์, ตัวแปรปรับค่าได้
กำหนดให้ e เป็น ความผิดพลาด = SP - PV
กำหนดให้ t เป็นค่าของหน่วยเวลา

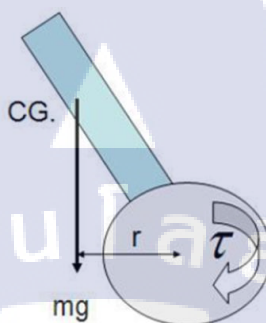


ภาพที่ 2.5 แสดงเทอมของอนุพันธ์ หรือ D

เทอมอนุพันธ์จะชะลออัตราการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณขาออกของระบบควบคุม และด้วยผลนี้จะช่วยให้ระบบควบคุมเข้าสู่จุดที่ต้องการ ดังนั้นเทอมอนุพันธ์จะใช้ในการลดขนาดของโอเวอร์ชูตที่เกิดจาเทอมปริพันธ์ และทำให้เสถียรภาพของการรวมกันของระบบควบคุมดีขึ้น แต่อย่างไรก็ตามอนุพันธ์ของสัญญาณรบกวนที่ถูกขยายในระบบควบคุม จะไวมากต่อการรบกวนในเทอมของความผิดพลาด และสามารถทำให้กระบวนการไม่เสถียรได้ ถ้าสัญญาณรบกวน และอัตราขยายอนุพันธ์มีขนาดใหญ่เพียงพอ

2.2.3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การหาเอกลักษณ์ของระบบจากข้อมูล input และ output คือการสร้างแบบจำลองจากสมการทางกายภาพซึ่งสามารถหาได้จากหลายวิธี เช่น วิธีของ นิวตัน และวิธีของเคน บทความนี้อาศัยวิธีของนิวตัน มาหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยพิจารณาจาก ภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 Moment diagram of balancing

จากภาพที่ 2.6 จะเห็นได้ว่า การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของพาหนะสองล้อ จะเป็นแบบลูกตุ้มนาฬิกากลับหัว การหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จึงใช้รูปแบบลูกตุ้มนาฬิกากลับหัว โดยค่าทอร์กของมอเตอร์ที่สร้างขึ้นคือ

$$v = IR_m + k_b k_2 \dot{\theta}_w \quad (7)$$

$$T = k_g k_m I \quad (8)$$

v คือค่าแรงดันที่ใช้ขับมอเตอร์

I คือค่ากระแสในขดลวด

R_m คือค่าความต้านทานของขดลวดใน มอเตอร์ (Motor armature resistance)

T คือค่าแรงบิดของมอเตอร์

k_b คือค่า Motor back emf constant

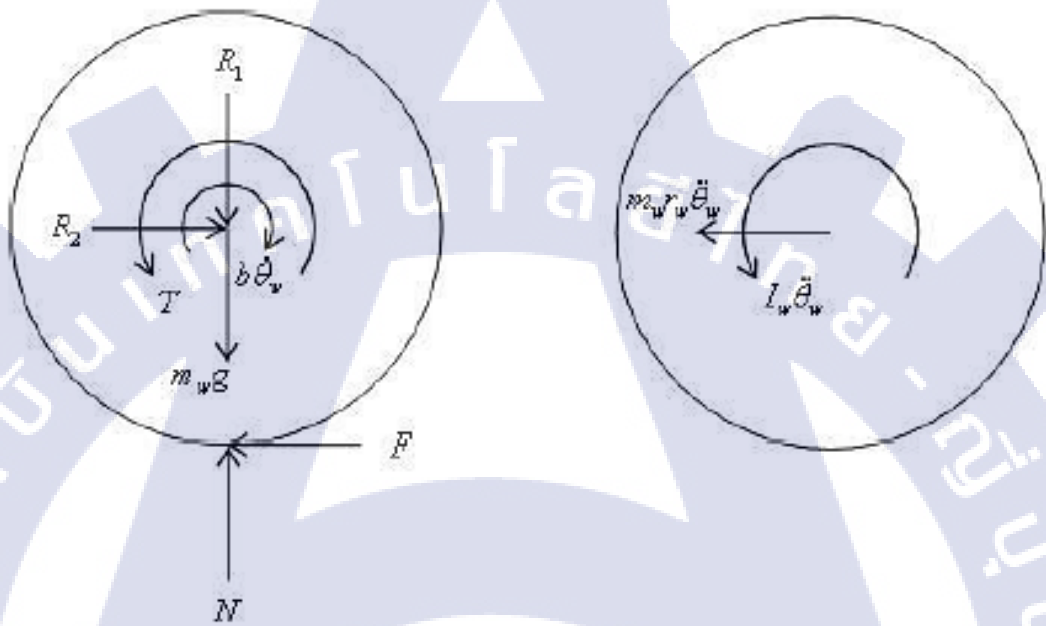
k_m คือค่า Motor torque constant

k_g คือค่า Gear ratio

$\dot{\theta}_w$ คือค่าความเร็วล้อของพาหนะสองล้อ

จากสมการที่ (7) และ (8) จะได้

$$T = \frac{k_g k_m V}{R_m} - \frac{k_b k_m k_g^2 \theta_w}{R_m} \quad (9)$$



ภาพที่ 2.7 FBD ของล้อพาหะสองล้อ

จากกฎของนิวตันจะได้

$$T - b\ddot{\theta}_w - Fr_w = I_w\ddot{\theta}_w \quad (10)$$

$$F = m_b r_b \ddot{\theta}_b + 2m_w r_w \ddot{\theta}_w \quad (11)$$

$$\begin{aligned} m_b g(r_b \sin \theta_b) &= I_b \ddot{\theta}_b + I_w \ddot{\theta}_w \\ &+ (m_b r_b \ddot{\theta}_b + m_b r_w \ddot{\theta}_w)(r_b \cos \theta_b + r_w) \\ &+ (m_w r_w \ddot{\theta}_w)(r_w) \end{aligned} \quad (12)$$

เมื่อรวมสมการจากมอเตอร์กระแสตรงล้อของพาหนะสองล้อและพาหนะสองล้อกับผู้ขับขี่จะได้

$$m_b g(r_b \sin \theta_b) = [I_w + (r_b \cos \theta_b + r_w)m_b r_w + m_w r_w r_w] \ddot{\theta}_w + [I_b + (r_b \cos \theta_b + r_w)m_b r_b] \ddot{\theta}_b \quad (13)$$

m_b คือค่าน้ำหนักของพาหนะสองล้อ

m_w คือค่าน้ำหนักของผู้ขับขี่พาหนะสองล้อ

r_b คือค่ารัศมีของล้อพาหนะสองล้อ

r_w คือค่าจุดศูนย์กลางของผู้ขับขี่พาหนะสองล้อถึงรัศมีล้อ

b คือค่าแรงปฏิกิริยาระหว่างลูกปืนล้อของพาหนะสองล้อ

I_b คือค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของผู้ขับขี่พาหนะสองล้อ

I_w คือค่า โมเมนต์ความเฉื่อยของ พาหนะสองล้อ

2.3 ทฤษฎีที่ใช้ในการปฏิบัติ

2.3.1 วัสดุที่ใช้ทำโครงสร้างหุ่นยนต์ (Material of Parts)

วัสดุในอุดมคติที่ใช้ในการทำ โครงสร้างของหุ่นยนต์นั้นจะต้องมีน้ำหนักเบา แต่จะต้องแข็งแรง ซึ่งวัสดุที่ใช้งานในทางวิศวกรรมนั้นมีให้เลือกมากมาย แต่การที่จะเลือกวัสดุที่เหมาะสมที่สุดในการทำโครงการหุ่นยนต์นั้นต้องคำนึงในเรื่องของวัสดุจะต้องมีความคงทนแข็งแรง วัสดุต้องมีน้ำหนักเบาและราคาที่เหมาะสม วัสดุที่มีความเป็นไปได้ในการนำมาทำโครงสร้างหุ่นยนต์ คือ อะลูมิเนียมและพลาสติกซึ่งได้แก่ เทอร์โมพลาสติก เทอร์โมเซตพลาสติกและ อะคริลิก โดยคุณสมบัติของวัสดุแต่ละชนิดสามารถอธิบายคร่าว ๆ ได้ดังนี้

2.3.1.1 อะลูมิเนียม (Aluminum) เป็นโลหะที่อ่อนดัดง่ายในธรรมชาติอะลูมิเนียมพบในรูปแร่บอกไซต์เป็นหลัก และมีคุณสมบัติเด่นคือ ท่อต้านการออกซิเดชันได้ดีแข็งแรง และน้ำหนักเบามีการใช้อะลูมิเนียมในอุตสาหกรรมหลายประเภท อะลูมิเนียมเป็นโลหะที่อ่อนและเบา ที่มีลักษณะไม่เป็นเงา เนื่องจากเกิดการออกซิเดชันขึ้นบาง ๆ อย่างรวดเร็วเมื่อสัมผัสอากาศ โลหะอะลูมิเนียมไม่เป็นสารพิษ ไม่เป็นแม่เหล็ก และไม่เกิดประกายไฟถ้าทำเป็นโลหะผสมอะลูมิเนียมมีความหนาแน่นเป็น 1/3 ของเหล็กกล้าและทองแดงอ่อน สามารถดัดได้ง่าย สามารถกลึง และหล่อแบบได้ง่าย มีความสามารถต่อต้านการกร่อนและความทน เนื่องจากชั้นนอกมีออกไซด์ป้องกัน

2.3.1.2 พลาสติก (Plastic) พลาสติกเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่สังเคราะห์ขึ้นใช้แทนวัสดุธรรมชาติบางชนิดเมื่อเย็นก็แข็งตัว เมื่อถูกความร้อนก็อ่อนตัวบางชนิดแข็งตัวถาวรมีหลายชนิด เช่น ไนลอนยางเทียมใช้ทำสิ่งต่าง ๆ เช่น เสื้อผ้า ฟิล์มภาชนะส่วนประกอบ เรือ หรือ รถยนต์ พลาสติกแบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือเทอร์โมพลาสติกและเทอร์โมเซตติงพลาสติก

เทอร์โมพลาสติก (ThermoPlastic) หรือ เรซินเป็นพลาสติกที่ใช้กันแพร่หลายที่สุด ได้รับความร้อนจะอ่อนตัว และเมื่อเย็นลงจะแข็งตัวสามารถเปลี่ยนรูปได้ พลาสติกประเภทนี้โครงสร้างโมเลกุลเป็นโซ่ตรงยาว มีการเชื่อมต่อระหว่างโซ่พอลิเมอร์น้อยมากจึงสามารถหลอมเหลว เมื่อผ่านการอัดแรงมาก ๆ จะไม่ทำลายโครงสร้างเดิมตัวอย่างเช่น พอลิเอทิลีน พอลิโพรพิลีน พอลิสไตรีน มีสมบัติพิเศษคือ เมื่อหลอมแล้วสามารถนำมาขึ้นรูปกลับมาใช้ใหม่ได้

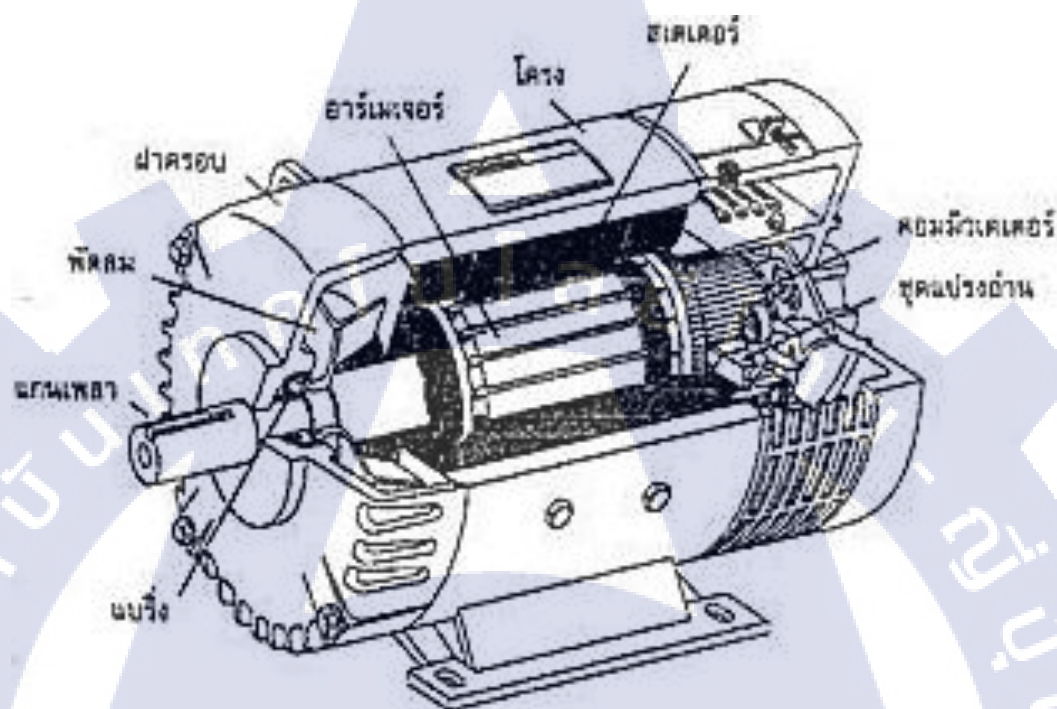
เทอร์โมเซตติงพลาสติก (Thermosetting Plastic) เป็นพลาสติกที่มีสมบัติพิเศษคือทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ และทนปฏิกิริยาเคมีได้ดีเกิดคราบและรอยเปื้อนได้ยาก คงรูปหลังการผ่านความร้อน หรือแรงดันเพียงครั้งเดียวเมื่อเย็นลงจะแข็งมากทนความร้อน และความดันไม่อ่อนตัว และเปลี่ยนรูปร่างไม่ได้ แต่ถ้าอุณหภูมิสูงก็จะแตก และไหม้เป็นขี้เถ้าสีดำ พลาสติกประเภทนี้ โมเลกุลจะเชื่อมโยงกันเป็นร่างแหจับกันแน่นแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลแข็งแรงมาก จึงไม่สามารถนำมาหลอมเหลวได้กล่าวคือ เกิดการเชื่อมต่อข้ามไปมาระหว่างสายโซ่ของโมเลกุลของโพลิเมอร์ (cross linking among polymer chains) ด้วยเหตุนี้หลังจากพลาสติกเย็นจนแข็งตัวแล้วจะไม่สามารถทำให้อ่อนได้อีกโดยใช้ความร้อนหากแต่จะสลายตัวทันทีที่ อุณหภูมิสูงถึงระดับการทำพลาสติกชนิดนี้ให้เป็นรูปลักษณะต่าง ๆ ต้องใช้ความร้อน

2.3.1.3 อะคริลิกพลาสติก หรือ โพลีเมทิลเมทาไครเลต เป็นเทอร์โมพลาสติกชนิดหนึ่งที่มีชื่อทางการค้าหลายชื่อ เช่น Plexiglas, Lucite, Perspex เป็นต้น พลาสติกชนิดนี้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในงานหลายอย่างเช่น กระบอกสูบเครื่องบิน บ้ายโฆษณา กระบอกตู้ปลา และวัสดุทางการแพทย์ เป็นต้น เนื่องจากวัสดุมีคุณสมบัติที่โดดเด่นในเรื่องความเหนียว (toughness) และความโปร่งใส (transparent) ซึ่งสามารถขึ้นรูปได้ง่าย และเมื่อผนวกกับการมีความหนาแน่นต่ำ ซึ่งเป็นคุณสมบัติประจำตัวของวัสดุประเภทพลาสติกแล้ว จึงทำให้อะคริลิกพลาสติกเป็นวัสดุที่นิยมนำมาใช้แทนแก้วในงานหลายอย่าง

2.3.2 หลักการของมอเตอร์กระแสไฟฟ้าตรง (Motor Action)

หลักการของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (Motor Action) เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเข้าไปในมอเตอร์ผ่านแปรงถ่าน เข้าสู่คอมมิวเตเตอร์ และเข้าไปในขดลวดอาร์มาเจอร์ ทำให้เกิดสนามแม่เหล็กขึ้น และกระแสไฟฟ้าอีกส่วนหนึ่งจะไหลเข้าไปในขดลวดสนามแม่เหล็ก (Field coil) สร้างขั้วแม่เหล็กเหนือ-ใต้ขึ้น และเกิดสนามแม่เหล็ก 2 สนาม ในขณะเดียวกันตามคุณสมบัติของเส้นแรงแม่เหล็ก ทิศทางตรงข้ามจะหักล้างกันและทิศทางเดียวกันจะเสริมแรงกัน ทำให้เกิดแรงบิดใน

ตัวอาร์มาเจอร์ ซึ่งวางแกนเพลลา และสวมอยู่กับตลับลูกปืนของมอเตอร์ ทำให้อาร์มาเจอร์นี้หมุนได้ ขณะที่ตัวอาร์มาเจอร์ทำหน้าที่หมุนได้นี้เรียกว่า โรเตอร์ (Rotor) ซึ่งหมายความว่าตัวหมุน การที่อำนาจเส้นแรง แม่เหล็กทั้งสองมีปฏิกิริยาต่อกัน ทำให้ขดลวดอาร์มาเจอร์ หรือโรเตอร์หมุนไปนั้น เป็นไปตามกฎมือซ้าย ของเฟลมมิง (Fleming's left hand rule)



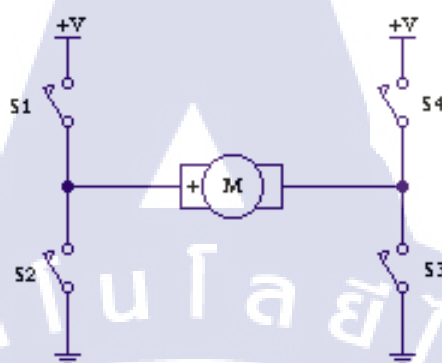
ภาพที่ 2.8 แสดงภาพ DC Motor

2.3.3 มอเตอร์แบบอนุกรม (Series Motor)

มอเตอร์แบบอนุกรมคือ มอเตอร์ที่ต่อขดลวดสนามแม่เหล็กอนุกรมกับอาร์มาเจอร์ของมอเตอร์ชนิดนี้ว่า ซีรีย์ฟิลด์ (Series Field) มีคุณลักษณะที่ดีคือให้แรงบิดสูงนิยมใช้เป็นต้นกำลังของรถไฟฟ้า รถยกของ เกรนไฟฟ้า ความเร็วรอบของมอเตอร์อนุกรมเมื่อไม่มีโหลดความเร็วจะสูงมากแต่ถ้ามีโหลดมาต่อ ความเร็ว ก็จะลดลงตามโหลด โหลดมากหรือทำงานหนักความเร็วลดลง แต่ขดลวด ของมอเตอร์ ไม่ เป็นอันตราย จากคุณสมบัตินี้จึงนิยมนำมาใช้กับเครื่องใช้ไฟฟ้า ในบ้านหลายอย่างเช่น เครื่องดูดฝุ่น เครื่องผสมอาหาร สว่านไฟฟ้า จักรเย็บผ้า เครื่องเป่าผม มอเตอร์กระแสตรง แบบอนุกรม ใช้งานหนักได้ดีเมื่อใช้งานหนักกระแสจะมากความเร็วรอบ จะลดลง เมื่อไม่มีโหลดมาต่อความเร็วจะสูงมากอาจเกิดอันตรายได้ดังนั้นเมื่อเริ่มสตาร์ทมอเตอร์แบบอนุกรมจึงต้องมีโหลดมาต่ออยู่เสมอ

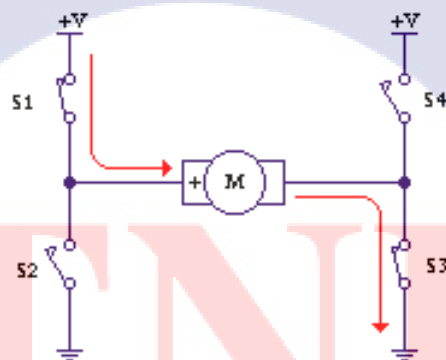
2.3.4 การควบคุมมอเตอร์

การควบคุมทิศทางการหมุนของ DC Motor โดยใช้หลักการทำงานของวงจร H-Bridge Switching



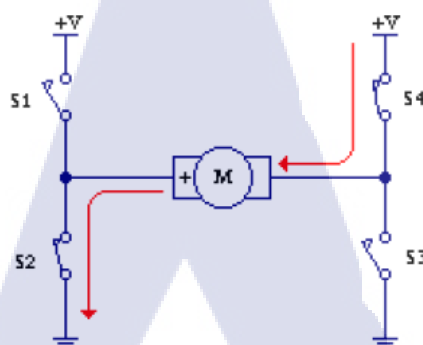
ภาพที่ 2.9 ภาพวงจร H-Bridge Switching

หลักการของวงจรนั้น จะประกอบไปด้วย สวิตช์ 4 ตัว นั่นก็คือ S1 S2 S3 และ S4 ซึ่งในภาพตัวอย่าง จะใช้ DC-Motor เป็น Load ของวงจร



ภาพที่ 2.10 ภาพการทำงานของวงจร H-Bridge Switching

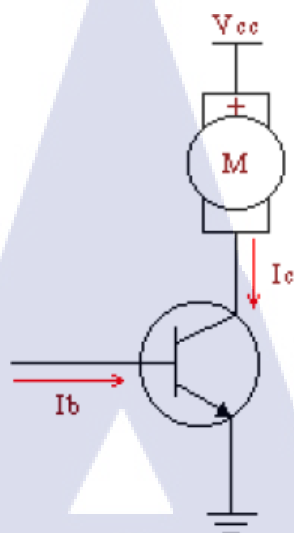
ในสภาวะเริ่มต้น สวิตช์ ทุกตัว Off อยู่ ก็จะไม่ทำอะไรเกิดขึ้นทั้งสิ้น เพราะไม่มีกระแสไฟฟ้าไหล เข้าสู่ มอเตอร์ (ภาพบน) ทำการ On สวิตช์ S1 และ S3 พร้อมกัน (ภาพกลาง) จะเป็นการเชื่อมวงจร ทำให้มี กระแสไฟฟ้า ไหลผ่านมอเตอร์ จากขั้วบวกของมอเตอร์ ไปยังขั้วลบของมอเตอร์ จึงทำให้มอเตอร์สามารถหมุนได้ ในทิศทาง Forward (จะหมุนแบบตามเข็มนาฬิกา หรือทวนเข็มนาฬิกานั้น ขึ้นอยู่กับ ลักษณะของ การพันขดลวดภายในมอเตอร์)



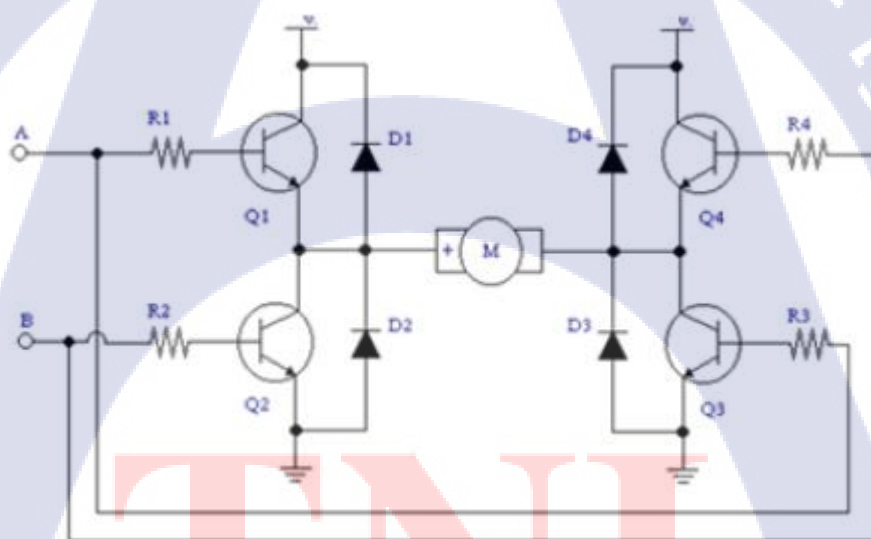
ภาพที่ 2.11 ภาพการทำงานของวงจร H-Bridge Switching ในอีกทิศทางหนึ่ง

ภาพที่ 2.11 จะแสดงการทำงานของวงจร H-Bridge Switching ในอีกทิศทางหนึ่ง และในทางกลับกัน ถ้าหากทำการเปิดสวิตช์ S2 และ S4 พร้อมกัน ก็จะเป็นการเชื่อมวงจร และ ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า ไหลผ่านมอเตอร์ จากขั้วลบของมอเตอร์ ไปยังขั้วบวกของมอเตอร์ จึงทำให้มอเตอร์สามารถหมุนได้ และเป็นการหมุนในทิศทางตรงกันข้าม (กลับทิศทางกับกรณีแรก) ซึ่งวงจรนี้อาศัยสวิตช์ 4 ตัว เพื่อบังคับทิศทางการไหล ของกระแสไฟฟ้า ที่ไหลผ่านมอเตอร์ เพื่อควบคุมให้มอเตอร์หมุนตามทิศทางที่ต้องการ โดยการผลัดกันเปิดและเปิดสวิตช์พร้อมกัน 2 ตัว การควบคุมทิศทางการหมุนของ DC Motor แบบ H-Bridge Switching

2.3.4.1 H-Bridge switching โดยใช้ ทรานซิสเตอร์ (Transistor) เป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor device) ที่เราสามารถนำ คุณสมบัติของการ Cut off และการ Saturation (สภาวะอิ่มตัว) มาประยุกต์ใช้งานเป็นสวิตช์ได้ และที่สำคัญมันเป็นสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ที่เราสามารถควบคุมการปิดและเปิดได้ จากภาพเป็นวงจรสาธิตอย่างง่าย โดยการนำทรานซิสเตอร์มาเป็นสวิตช์ควบคุมมอเตอร์ หลักการคิดก็คือ เมื่อเราป้อนกระแส I_b ด้วยปริมาณที่มากพอก็จะทำให้ทรานซิสเตอร์ทำงาน (On) จะทำให้กระแส I_c ไหลแปลว่ามีกระแสไหลผ่านมอเตอร์ได้ (กระแส I_b จะต้องมากเพียงพอที่จะทำให้ทรานซิสเตอร์อยู่ในสภาวะอิ่มตัว) ทรานซิสเตอร์จะทำงานเหมือนกับสวิตช์ปิดวงจรค่าความต้านทานระหว่างขา C และขา E จะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์กระแส I_c ที่ไหลจะมีค่าเข้าใกล้ $I_c (\text{max})$ ในสภาวะคัตออฟ (Cutoff mode) นี้จะเกิดขึ้นเมื่อเราหยุดจ่ายกระแส I_b ($I_b = 0$) ทรานซิสเตอร์จะทำงานเหมือนกับสวิตช์เปิดวงจรค่าความต้านทานระหว่างขา C และขา E จะมีค่าเป็นอนันต์กระแส I_c จะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์

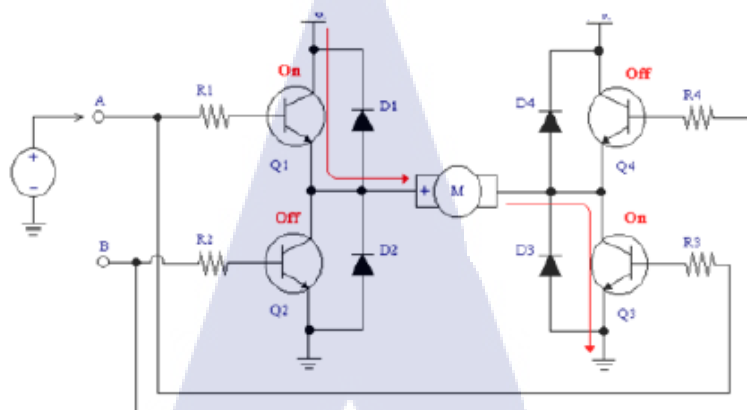


ภาพที่ 2.12 วงจรควบคุมมอเตอร์อย่างง่ายโดยใช้ทรานซิสเตอร์



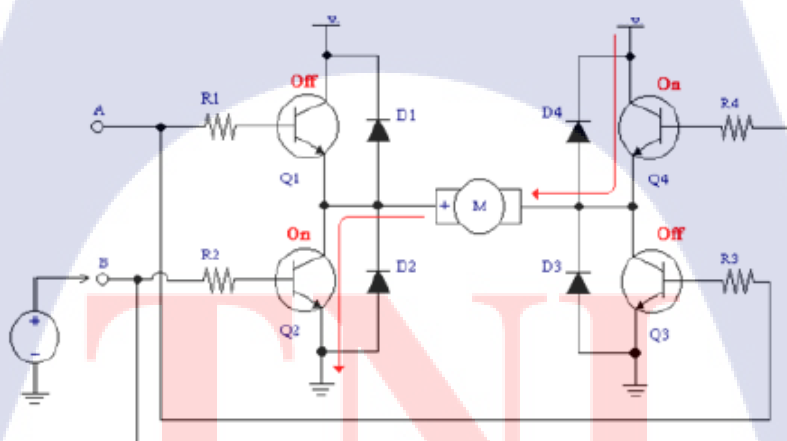
ภาพที่ 2.13 H-Bridge switching จาก Transistor

วงจรภาพที่ 2.12 ประกอบไปด้วยทรานซิสเตอร์ Q1, Q2, Q3 และ Q4 ความต้านทาน R1, R2, R3 และ R4 ทำหน้าที่จำกัดกระแส I_b ส่วนไดโอด D1, D2, D3 และ D4 ทำหน้าที่ป้องกันกระแสไหลย้อนกลับจากมอเตอร์ในขณะที่ทรานซิสเตอร์หยุดทำงาน



ภาพที่ 2.14 H-Bridge switching จาก Transistor โดย Q1 และ Q3 ทำงาน

วงจรภาพที่ 2.14 เมื่อมีการจ่ายแรงดันเข้าที่จุด A ทำให้มีกระแสไหลผ่าน R1 เข้าสู่ base ของ Q1 และมีกระแสไหลผ่าน R3 เข้าสู่ base ของ Q3 ทำให้ Q1 และ Q3 ทำงาน (On) เปรียบเสมือนสวิตช์ปิดวงจรส่งผลให้มีกระแสไหลจากแหล่งจ่ายผ่านขา Collector และ Emitter ของ Q1 ผ่านเข้าสู่ขั้วบวก (+) ของมอเตอร์ผ่านไปยังขา Collector และ Emitter ของ Q3 ทำให้มีกระแสไหลผ่านมอเตอร์ในทิศทางบวกและครบวงจร จึงทำให้มอเตอร์หมุนในทิศทาง Forward ได้



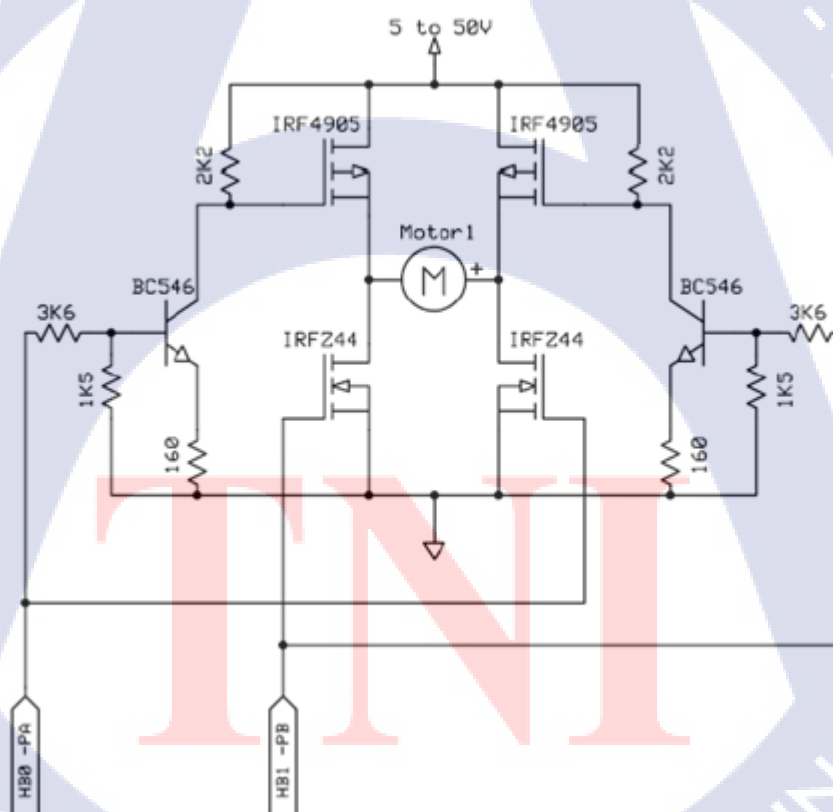
ภาพที่ 2.15 H-Bridge switching จาก Transistor โดย Q2 และ Q4 ทำงาน

วงจรภาพที่ 2.15 เมื่อมีการจ่ายแรงดันเข้าที่จุด B ทำให้มีกระแสไหลผ่าน R2 เข้าสู่ base ของ Q2 และมีกระแสไหลผ่าน R4 เข้าสู่ base ของ Q4 ทำให้ Q2 และ Q4 ทำงาน (On) เปรียบเสมือนสวิตช์ปิดวงจรส่งผลให้มีกระแสไหลจากแหล่งจ่ายผ่านขา Collector และ Emitter ของ Q4 ผ่านเข้าสู่ขั้วลบ (-) ของมอเตอร์ผ่านไปยังขา Collector และ Emitter ของ Q2 ทำให้มีกระแสไหลผ่านมอเตอร์ในทิศทางลบและครบวงจร จึงทำให้มอเตอร์หมุนในทิศทาง Reverse ได้

ข้อดีของการใช้ Transistor มาประยุกต์ในการสร้าง H-Bridge switching

- ที่สามารถตอบสนองจังหวะของการเปิด/ปิดสวิทช์ได้รวดเร็ว
- ทำให้การควบคุมกำลังงานที่จ่ายให้มอเตอร์ทำได้อย่างรวดเร็วและ ต่อเนื่อง
- ไม่ทำให้เกิดปัญหารบกวนจากสนามแม่เหล็กอย่างมีนัย

2.3.4.2 H-Bridge switching โดยใช้ Mosfet หลักการทำงานจะคล้ายกับการสร้างวงจร H-Bridge Switching จาก Transistor โดยที่ใช้ Mosfet เป็นตัว switching ซึ่งสามารถทนกระแสได้สูงกว่า Transistor ทั่วไปและมี switching time ที่ต่ำทำให้เหมาะกับการใช้ควบคุมแบบ PWM ในวงจรจะประกอบด้วย Mosfetp-channel และ n-channel โดยทำงานเป็นคู่ complement โดย Mosfet 1 และ Mosfet 4 จะทำงานพร้อมกันเมื่อมีสัญญาณเข้าที่ PA, Mosfet 2 และ Mosfet 3 จะทำงานพร้อมกัน เมื่อเราส่งสัญญาณที่ PB โดยจะทำหน้าที่เหมือน switch เปิดและปิดทำให้กระแสไหลผ่านมอเตอร์ทิศทางกลับด้าน เพื่อที่จะควบคุมมอเตอร์ให้กลับทิศทางและจะมี Freewheeling diode เพื่อป้องกันกระแสไหลย้อนกลับจากมอเตอร์ต่อคร่อม Mosfet แต่ละตัว



ภาพที่ 2.16 Mosfet H-bridge Circuit

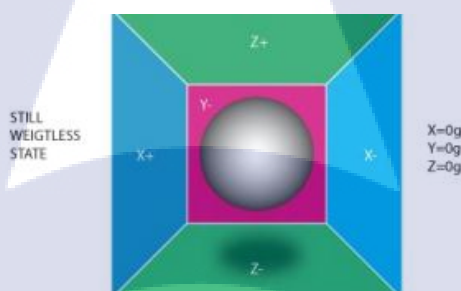
ข้อดีของการใช้ Mosfet

- การทนกระแสที่สูงกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับทรานซิสเตอร์
- แรงดันตกคร่อมน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับทรานซิสเตอร์
- ความเร็วในการสวิตช์เร็วกว่า Transistor

2.3.5 เซ็นเซอร์

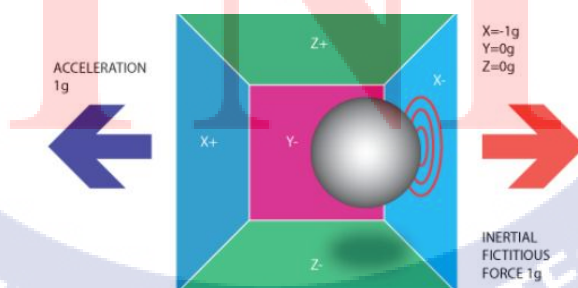
การติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับต่าง ๆ ขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งาน และความสนใจในข้อมูลทางวิทยาศาสตร์ และเนื่องจากการควบคุมการเลี้ยวตัวของหุ่นยนต์สองล้อจำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ตรวจจับ (Sensor) เพื่อตรวจวัดความเอียงของหุ่นยนต์ จึงได้ทำการศึกษาเซ็นเซอร์ดังนี้

2.3.5.1 Accelerometer คือเครื่องตรวจวัดความเร่งของการเคลื่อนที่ของวัตถุหลักการทำงานของ Accelerometer สามารถอธิบายโดยมีลูกบอลบรรจุภายในกล่องที่เคลื่อนที่



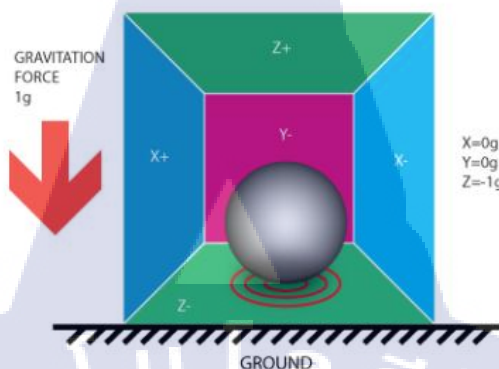
ภาพที่ 2.17 ภาพแสดงสภาวะไร้แรงโน้มถ่วงของโลก

เมื่อลูกบอลอยู่ในสภาวะไร้แรงโน้มถ่วงของโลก ในสภาวะไร้แรงโน้มถ่วงของโลก ลูกบอลที่บรรจุภายในกล่องนั้นลอยอยู่ระหว่างแกน X Y และ Z โดยไม่สัมผัสกับผิวของกล่องซึ่งเปรียบเสมือนค่าที่ส่งออกมาได้คือ X Y และ Z = 0 g (โดยที่ $g = 9.8\text{m/s}^2$)



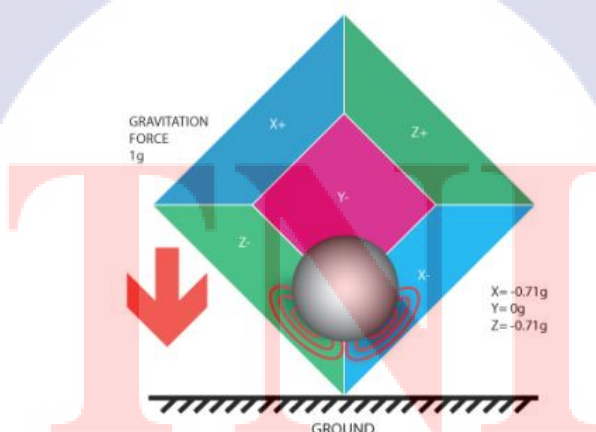
ภาพที่ 2.18 ภาพแสดงสภาวะไร้แรงโน้มถ่วงของโลกเคลื่อนที่ไปทางด้าน X+

เมื่อกำลังเคลื่อนที่ไปทางด้าน $X+$ ในกรณีที่ลูกบอลนั้นสัมผัสกับผนังทางขวาซึ่งแสดงผลเป็นค่าแกน $-X$ ของ Accelerometer ซึ่งจะได้ค่า $X = -1 \text{ g}$ ค่า $Y = 0 \text{ g}$ และค่า $Z = 0 \text{ g}$



ภาพที่ 2.19 เมื่อลูกบอลอยู่ในสภาวะมีแรงโน้มถ่วงของโลกเคลื่อนไปที่แกน $(-Z)$

สมมุติลูกบอลที่บรรจุในกล่องนั้นอยู่ในสภาวะมีแรงโน้มถ่วง ซึ่งจะทำให้ลูกบอลมีแรงกดลงที่แกน Z ของกล่องเนื่องจากค่า g จะส่งผลทำให้ค่าของ $X = 0 \text{ g}$ $Y = 0 \text{ g}$ และ $Z = -1 \text{ g}$ ซึ่งจะเห็นได้ว่า ถ้าในสภาวะปกติของ Accelerometer จะมีผลต่อค่าแรงโน้มถ่วงของโลกตลอดเวลา โดยจากแบบจำลองข้างต้นลูกบอลได้กดลงที่แกน $(-Z)$ จะทำให้ค่าของ $Z = 1 \text{ g}$ เสมอตามแรงกดของแรงโน้มถ่วงของโลกอยู่ตลอดเวลาในสภาวะปกติ



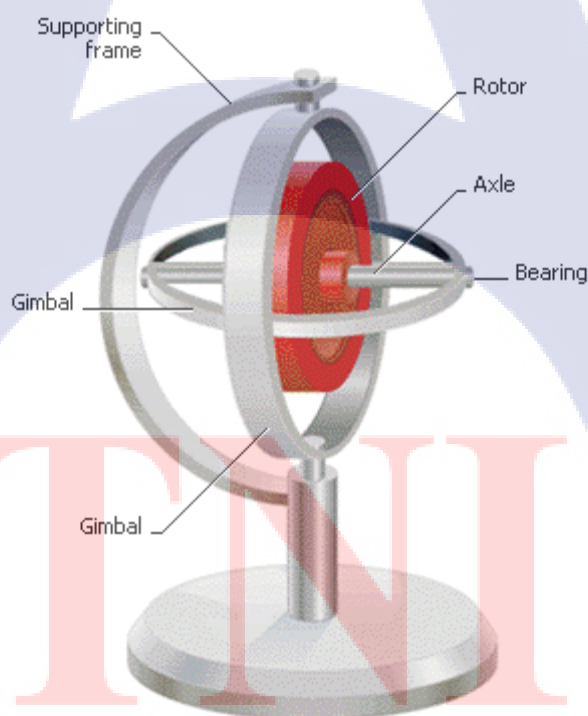
ภาพที่ 2.20 เมื่อลูกบอลถูกเอียงลงไปในกล่อง 45 องศา

เมื่อเราเอียงกล่องไป 45 องศาโดยยังคงให้อยู่ภายใต้สภาวะแรงโน้มถ่วงของโลกจะทำให้ลูกบอลกดที่ผนังของกล่องทั้งสองด้านคือกดลงที่แกน $-Z$ และ $-X$ โดยจะทำให้ค่าของ $X = -0.71$

$g_Y = 0\text{ g}$ และ $Z = -0.71\text{ g}$) ซึ่งเป็นผลจากการแตกแรงกดของค่าแรงโน้มถ่วงของโลกที่กระทำต่อ แกน $-Z$ และ $-X$ ซึ่งทำมุมเป็น 45 องศา

2.3.6 Gyroscope

Accelerometer คืออุปกรณ์ที่ใช้วัดความเร็วเชิงมุม Gyroscope ตามหลักการแล้วเป็นอุปกรณ์ที่อาศัยแรงเฉื่อยของล้อที่หมุน เพื่อช่วยในการรักษาทิศทางของแกนหมุนให้อยู่ในตำแหน่งเดิมตลอดเวลาที่มีการหมุน ดังภาพ ประกอบไปด้วยล้อหมุน (Rotor) บรรจุในกรอบ (Gimbal) อีกทีหนึ่ง ทำให้เอียงในทิศทางต่าง ๆ ได้โดยอิสระ นั่นคือ หมุนในแกน ไต ๆ ก็ได้ โหมดัมเชิงมุมของล้อดังกล่าวจะทำให้มันคงรักษาทิศทางของมันไว้แม้ว่ากรอบจะเอียงตัวไปมา น้อยแค่ไหนก็ตามจากคุณสมบัติดังกล่าว ทำให้สามารถนำหลักการนี้ไปประยุกต์ใช้เพื่อประโยชน์ต่าง ๆ เช่น เข็มทิศและใช้เป็นระบบนำร่องของเครื่องบิน เรือ อุปกรณ์ป้องกันการกลิ้งบนเรือใหญ่ รวมถึงระบบในยานอวกาศและสถานีอวกาศ เป็นต้น ในโครงการนี้ใช้ Gyroscope ทำหน้าที่ในการวัดความเร็วเชิงมุมของหุ่นยนต์เมื่อมีการเคลื่อนที่หรือมีการเปลี่ยนแปลงของมุมเอียงซึ่งเอาต์พุตของ Gyroscope จะขยับขึ้นลงตามทิศทางของการเอียงของหุ่นยนต์



ภาพที่ 2.21 อุปกรณ์วัด Accelerometer

บทที่ 3

แผนงานการปฏิบัติงานและขั้นตอนการดำเนินงาน

3.1 วิธีการวางแผนการปฏิบัติงาน

1. พิจารณาระบบขับเคลื่อน โดยพิจารณาจาก
 - ขนาดของหุ่นยนต์
 - แรงดันของมอเตอร์
 - กระแสของมอเตอร์
 - บอร์ดไดรฟ์มอเตอร์
2. พิจารณาศึกษาข้อมูลของเซ็นเซอร์ โดยใช้โปรโตคอล ADC เป็นเกณฑ์
 - Gyroscope พิจารณาที่มุมมองศา deg / s
 - Accelerometer พิจารณาที่ค่า G / s
3. พิจารณาเกี่ยวกับไมโครคอนโทรลเลอร์ที่จะเลือกโดยใช้หลักเกณฑ์ดังนี้
 - ความเร็ว MIPS
 - แรงดัน Output
 - ADC Channel
 - I/O Port
 - Library Support
4. พิจารณาแบตเตอรี่ โดยใช้หลักเกณฑ์ดังนี้
 - แรงดัน
 - กระแส
5. เลือกชนิดของวัสดุที่จะใช้ทำโครงสร้าง และล้อ โดยใช้หลักเกณฑ์
 - ขนาด และน้ำหนัก
 - CG

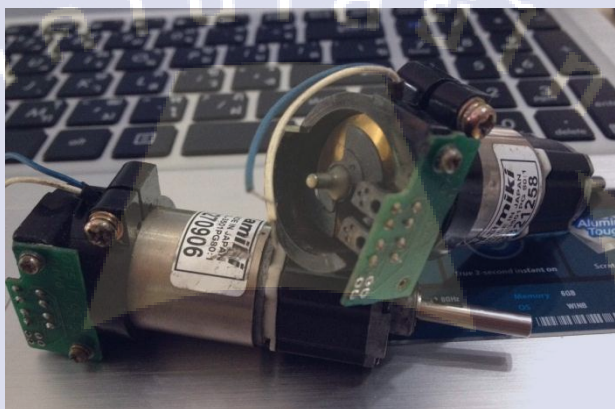
3.2 ขั้นตอนการปฏิบัติงาน

1. ทดสอบการอ่านค่าจากเซ็นเซอร์ทั้งสอง พร้อมทั้งนำค่ามาปรับจนให้ได้ค่าที่ต้องการ
2. ทดสอบการทำงานของมอเตอร์ การควบคุมทิศทาง ให้ถูกต้อง
3. สร้างการสื่อสารและการแสดงผลสำหรับแสดงผลของเซ็นเซอร์
4. ประกอบตัวหุ่นขึ้นจากแผ่น อะคริลิกพลาสติกและอลูมิเนียม เพื่อให้มีความแข็งแรง
5. ประกอบมอเตอร์ และล้อให้ได้เสถียรภาพ
6. เดินวงจรไฟฟ้า แบตเตอรี่ และสายสัญญาณต่าง ๆ และตรวจสอบความเรียบร้อย

7. ทดสอบความถูกต้องของเซ็นเซอร์ ค่าที่ได้จากเซ็นเซอร์ต้องใกล้เคียงจากการประมาณด้วยสายตา
8. นำค่าที่ได้จากเซ็นเซอร์เข้าสู่ขั้นตอนวิธีสมการเชิงเส้นกำลังสอง (Kalman Filter)
9. ปรับจูนด้วยขั้นตอนวิธีระบบควบคุมแบบสัดส่วน-ปริพันธ์-อนุพันธ์ (PID Controller)
10. สรุปผลและหาแนวทางแก้ไข

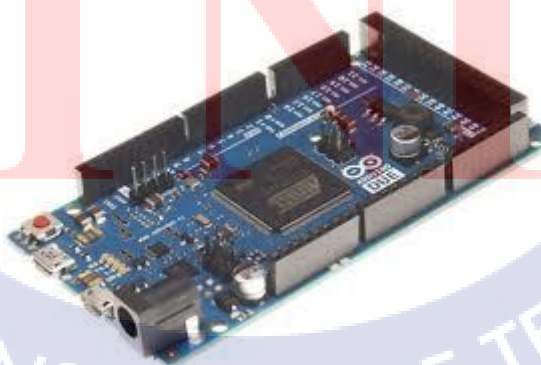
3.3 ขั้นตอนการเลือกใช้อุปกรณ์ในการปฏิบัติงานและปฏิบัติงาน

3.3.1 มอเตอร์



ภาพที่ 3.1 DC Motor 12V และ Namiki Motor Encode

3.3.2 ไมโครคอนโทรลเลอร์



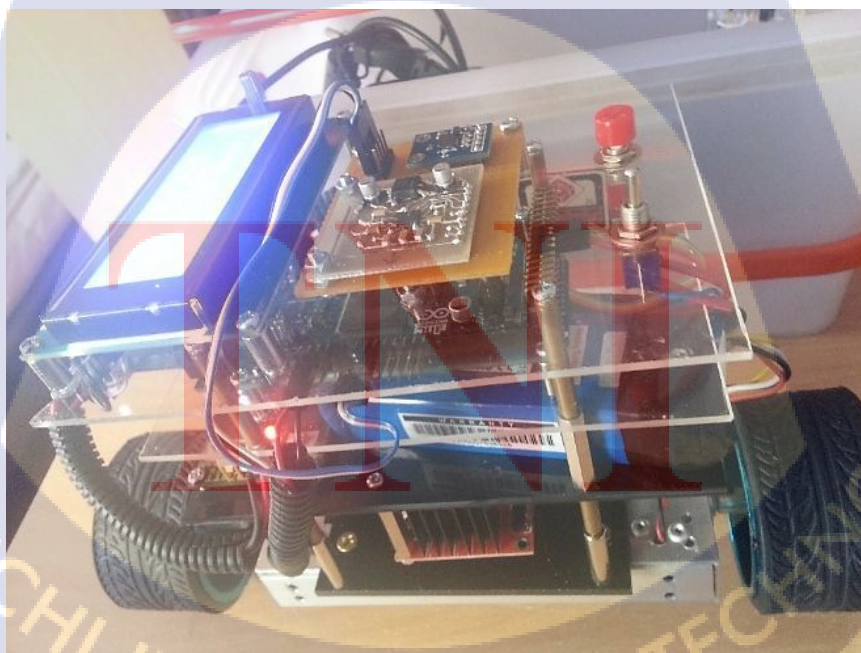
ภาพที่ 3.2 Arduino DUE AT91SAM3X8E

3.3.3 แหล่งจ่ายพลังงาน



ภาพที่ 3.3 Turnigy 7.4v 2200mAh 2Cell Lipo Pack

3.3.4 ประกอบหุ่นยนต์ต้นแบบ

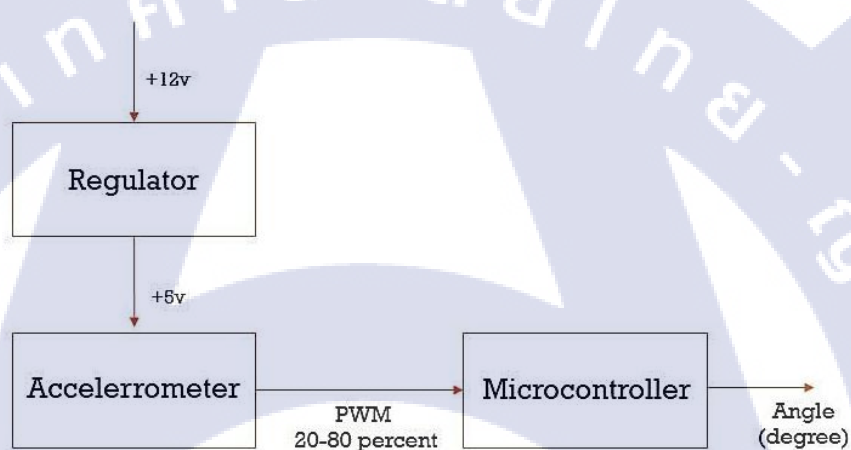


ภาพที่ 3.4 หุ่นยนต์ต้นแบบ

3.3.5 Accelerometer



ภาพที่ 3.5 ADXL2535 Accelerometer 3g/s



ภาพที่ 3.6 Accelerometer Block Diagram

จากการปฏิบัติงานได้ทำการทดลองหาค่าจากเซ็นเซอร์ Accelerometer ได้ให้ผลลัพธ์ออกมาเป็นค่า Analog ดังภาพที่ 3.7

```

// Accelerometer ( (digital * Vref) /ADC bit) - Gzero) /sensitive
// Gzero = 1.65, sensitive = 0.3
Ax = ( ( (Adx*3.3) /1023) -1.65) /0.3;
Az = ( ( (Adz*3.3) /1023) -1.65) /0.3;
Adeg = (atan2 (-Ax,Az) *180) /M_PI;
  
```

ภาพที่ 3.7 ผลการทดลองหาค่าจากเซ็นเซอร์ Accelerometer

ค่าที่ได้จากการอ่าน ADC เข้ามานั้น ต้องผ่านการแปลงค่าจากสมการ

$$\text{ค่าจริง} = ((\text{digital} * V_{\text{ref}}) / \text{ADC bit}) - G_{\text{zero}} / \text{sensitive}$$

$$\text{โดยที่ } V_{\text{ref}} = 3.3\text{V} \quad \text{ADCbit10bit} = 1023 (2^{10})$$

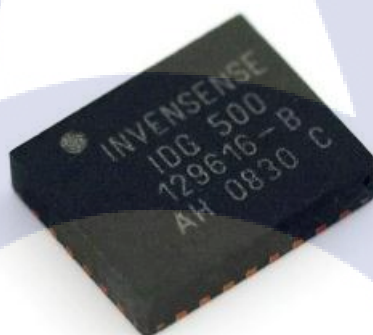
$$G_{\text{zero}} = 1.65 \quad \text{Sens} = 0.3 \text{ g/V}$$

ค่า G_{zero} คือค่าอ้างอิง ค่า Sens คือค่าที่เซ็นเซอร์ตอบสนอง

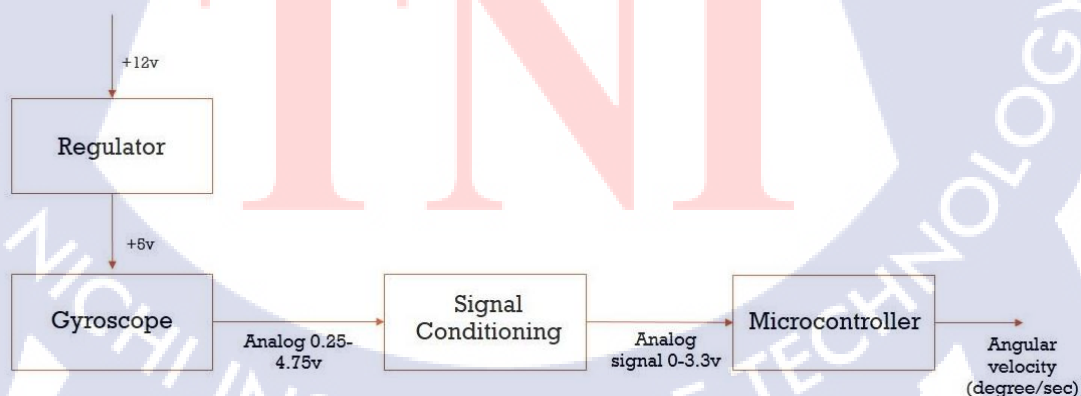
โดยการหามุมนั้นต้องใช้ฟังก์ชันสองแกน ในที่นี้เราใช้แกน X กับแกน Z แล้วนำมาพิจารณาร่วมกับสมการจะได้ค่ามุมที่เอียงออกมา

$$A_{\text{deg}} = (\text{atan2} (-A_x, A_z) * 180) / M_{\text{PI}}; \quad (14)$$

3.3.6 Gyroscope



ภาพที่ 3.8 IDG-500 Gyroscope 110 deg/s



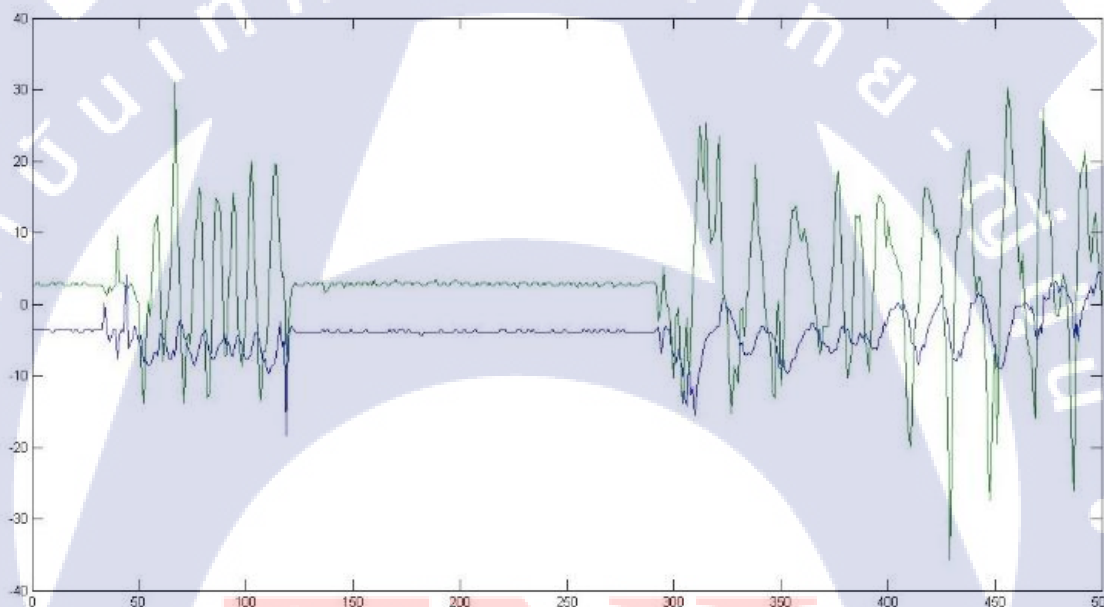
ภาพที่ 3.9 Gyroscope Block Diagram

ทำการทดลองหาค่าจากเซ็นเซอร์ Gyroscope เซ็นเซอร์ที่ใช้ให้ค่าออกมาเป็นค่า Analog

$$\begin{aligned} \text{Grx} &= ((\text{Gx} * 3.3) / 1023) - 1.35) / 0.009; \\ \text{Zero} &= 1.35 \text{ sensitive} = 0.009 \end{aligned}$$

ภาพที่ 3.10 สมการหาค่า Gyroscope เซ็นเซอร์ที่ใช้ให้ค่าออกมาเป็น Analog

ลักษณะการคำนวณจะเหมือนกัน ต่างกันที่ค่า Zero กับเซ็นเซอร์การคำนวณจะได้ ค่าความเร็วเชิงมุมเป็นหน่วย deg/s หลังจากนั้นทำการเปรียบเทียบค่าของเซ็นเซอร์ โดยส่งค่าผ่านทาง Uart เข้ามาเก็บเป็นไฟล์ แล้วใช้โปรแกรม Matlab แสดงผลกราฟออกมา



ภาพที่ 3.11 ผลลัพธ์การเปลี่ยนมุมและค่าความเร็วเชิงมุม

โดยการเก็บตัวอย่างมา 500 ค่า โดยในเส้นสีน้ำเงินคือค่าจาก Accelerometer ส่วนสีเขียวจาก Gyroscope จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนมุมค่าความเร็วเชิงมุมจะเปลี่ยนตาม ในลักษณะที่กลัศยงกันในช่วง แต่ค่าของ Gyroscope มีการแกว่งมากเนื่องจากเซ็นเซอร์ค่อนข้างไวและไม่เสถียร จึงต้องนำไปผ่านสมการลดการแปรปรวน เพื่อแก้ไขปัญหาข้างต้น

3.3.7 Kalman Filter

ในส่วนของทฤษฎีควบคุม ได้ใช้ Kalman filter เพื่อที่จะประมาณสถานะ x ในเวลาใดเวลาหนึ่งแบบ discrete time สามารถเขียนเป็นสมการ สถานะที่คาดหมาย (State Prediction) ดังนี้

$$x_k = Ax_{k-1} + Bu_{k-1} + w_{k-1} \quad (15)$$

และจะได้สมการจากการวัดค่าเซ็นเซอร์ z ที่เวลาหนึ่ง ๆ (Measurement Prediction)

$$z_k = Hx_k + v_k \quad (16)$$

ตัวแปรสุ่ม (Random variable) w_k และ v_k คือ สัญญาณรบกวนที่ได้จากการวัด (Noise Measurement) ซึ่งเป็นอิสระต่อกัน ในที่นี้จะสมมติให้เป็นเกาส์เซียน (Gaussian Noise or White Noise) ซึ่งสัญญาณจะมีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ และมีเพาเวอร์สเปกตรัม (Power Spectrum) คงที่ทุกย่านความถี่ สามารถเขียนการแจกแจงแบบปกติ (Normal probability) ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} p(w) &\sim N(0, Q) \\ p(v) &\sim N(0, R) \end{aligned}$$

กำหนด ความผิดพลาดจากการคาดเดาล่วงหน้า ดังนี้

$$P_k = E[e_k^- e_k^{-T}] \quad (17)$$

กำหนดความผิดพลาดจากการเดาภายหลัง ดังนี้

$$P_k = E[e_x e_x^T] \quad (18)$$

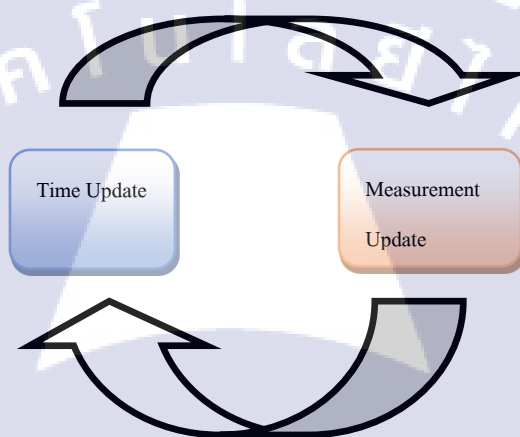
จากสมการข้างต้นจะเป็นสมการเชิงเส้น สามารถเขียนสมการ The Probabilistic Origins of the Filter ได้ดังนี้

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k + K_k(z_k - H\hat{x}_k) \quad (19)$$

ซึ่งค่า K ในสมการ เรียกว่า Kalman Gain จากสมการ

$$K_k = P_k^- H^T (H P_k^- H^T + R)^{-1} \quad (20)$$

การทำงานของ Kalman filter มีรูปแบบการทำงานแบบควบคุมการป้อนกลับของสัญญาณ (Feedback control) ซึ่งก็คือการประมาณการสถานะของกระบวนการขณะใดขณะหนึ่ง หลังจากนั้นจะป้อนกลับไปในรูปแบบของการวัดสัญญาณรบกวนซึ่งสามารถแบบสมการออกเป็น 2 ส่วนคือ สมการปรับเวลา (Time update) และ สมการปรับการวัด (Measurement update) สมการปรับเวลาคือ ตัวที่ตอบสนองต่องานล่วงหน้าทีสถานะปัจจุบัน และโคเวเรียนของการประมาณที่ผิดพลาด เพื่อให้ได้มาซึ่งการประมาณล่วงหน้าของช่วงเวลาต่อไป ส่วนสมการปรับการวัดจะตอบสนองต่อการป้อนกลับคือ การ วัดครั้งใหม่จะถูกรวมเข้ากับการประมาณ เพื่อให้ได้มาซึ่งการปรับปรุงการประมาณล่วงหน้า โดยสมการปรับเวลาสามารถเรียกได้ว่าเป็น สมการตัวทำนาย (Predictor) และสมการปรับการวัดจะเรียกว่าเป็น สมการตรวจแก้ ดังภาพที่ 3.12



ภาพที่ 3.12 รูปแบบการทำงานของ Kalman Filter

สามารถแบ่งสมการตามประเภทของการทำงานได้แก่ สมการปรับเวลา และสมการปรับการวัดดังนี้

สมการปรับเวลา (Discrete Kalman Filter Time update Equations)

$$\bar{x}_k = A\hat{x}_{k-1} + Bu_{k-1} \quad (21)$$

$$\bar{P}_k = A\bar{P}_{k-1}A^T + Q \quad (22)$$

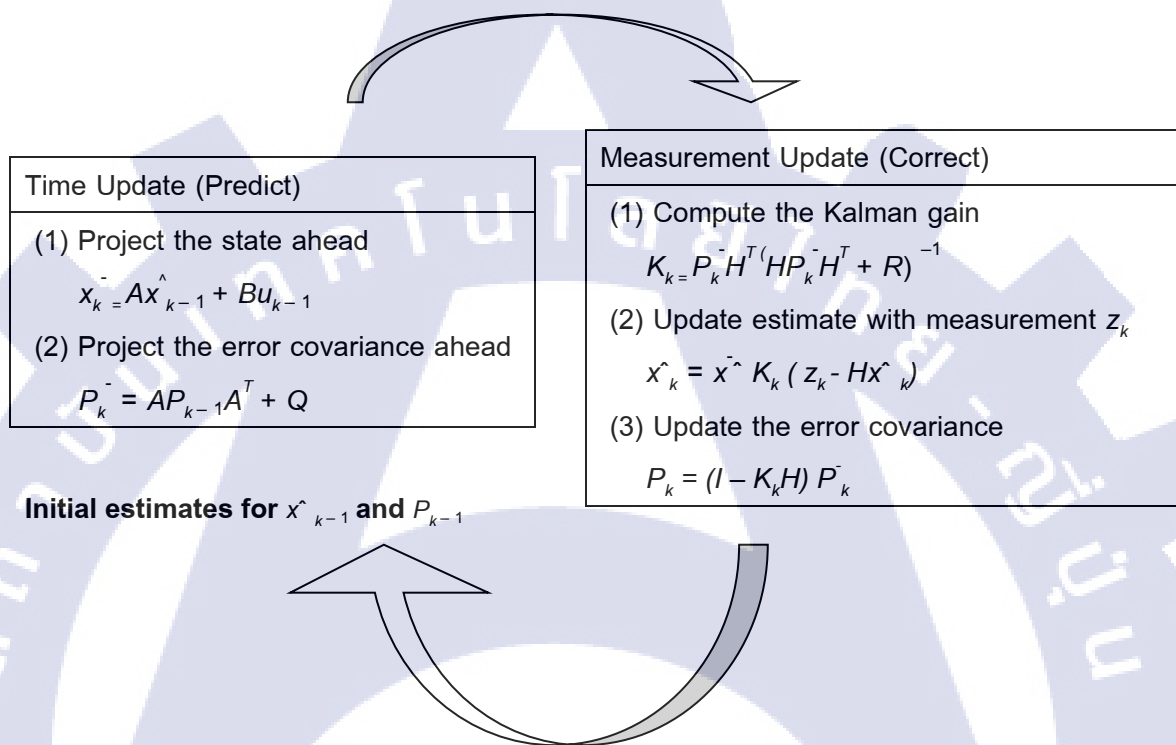
สมการปรับการวัด (Discrete Kalman Filter Measurement update Equations)

$$K_k = \bar{P}_k H^T (H\bar{P}_k H^T + R)^{-1} \quad (23)$$

$$\hat{X}_k = \hat{x}^- - K_k(z_k - H\hat{x}_k) \quad (24)$$

$$P_k = (I - K_k H)\bar{P}_k \quad (25)$$

การออกแบบระบบฟิเตอร์เพื่อใช้งาน จะมีการรบกวนของการวัด R (Measurement Error Covariance) ซึ่งเป็นโควาริเียน ที่ได้มาจากการประมวลผลของการวัดก่อนหน้านี้ สามารถหาค่าความผิดพลาดได้จริงเพราะได้มาจากระบบการวัด แต่อย่างไรก็ตามในการคำนวณหา Q (Process Noise Covariance) สามารถทำได้ยากมาก ด้วยเหตุนี้จึงต้องมีการสุ่มหรือการประมาณค่า เพื่อให้ได้ความสัมพันธ์ของแบบจำลองกระบวนการที่มีผลลัพธ์เป็นที่ยอมรับได้ ความสัมพันธ์ของระบบสามารถอธิบายได้ดังตารางที่ 3.3



ตารางที่ 3.3 แสดงการทำงานตามลำดับของ Kalman Filter

ทำการทดลองโดยการเก็บค่าจากเซ็นเซอร์แล้วนำมาผ่านการประมวลผล Kalman Filter ใน Math Lab โดยการเขียนสมการในรูปแบบ Source Code ของ Matlab ดังนี้

$$X_kPlus1 = A * X_k + B * U_k(i);$$

แปลงมาจากสมการ $\hat{x}_k^- = A\hat{x}_{k-1} + Bu_{k-1}$

X_kPlus1 = สถานะของระบบปัจจุบัน

X_k = สถานะของระบบก่อนหน้านี้

U_k = ค่าของเซ็นเซอร์ตัวที่หนึ่ง

$$P_{k+1} = A^T P_k A + Q;$$

แปลงมาจากสมการ $P_k^- = A^T P_{k-1} A + Q$

P_{k+1} = ค่าความแปรปรวนของระบบปัจจุบัน

P_k = ค่าความแปรปรวนของระบบก่อนหน้า

Q = ค่าความแปรปรวน noise ของระบบ (ในรูปแบบเมทริกเอกลักษณ์สองแถว)

$$K_k = (P_k^- H^T) (H P_k^- H^T + R)^{-1};$$

แปลงมาจากสมการ $K_k = P_k^- H^T (H P_k^- H^T + R)^{-1}$

K_k = ค่า Kalman gain

P_k^- = ค่าประมาณความแปรปรวนของระบบ

R = ค่าความแปรปรวน noise ของเซ็นเซอร์ (กำหนดเอง)

$$X_k = X_{k-1} + (K_k (Z_k - H X_{k-1}));$$

แปลงมาจากสมการ $\hat{x}_k = \hat{x}_{k-1} + K_k (z_k - H \hat{x}_{k-1})$

X_k = สถานะของระบบหลังจากนำค่าเซ็นเซอร์ตัวที่สองมาคำนวณ

X_{k-1} = ค่าประมาณสถานะของระบบ

K_k = ค่า Kalman gain

Z_k = ค่าจากเซ็นเซอร์ตัวที่สอง

$$P_k = (I - K_k H) P_{k-1};$$

แปลงมาจากสมการ $P_k = (I - K_k H) P_{k-1}$

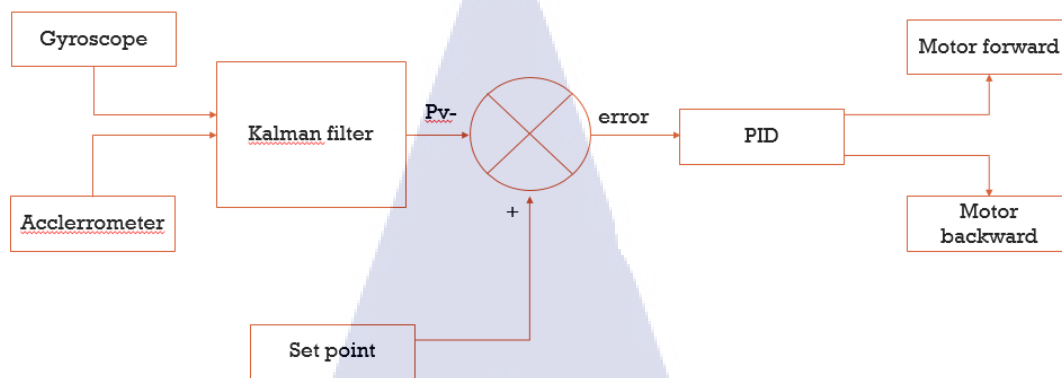
P_k = ค่าความแปรปรวนของระบบ

$I(2)$ = เมทริกเอกลักษณ์สองแถว

K_k = ค่า Kalman gain

P_{k-1} = ค่าประมาณความแปรปรวนของระบบ

หลังจากที่ทดลองเขียนโค้ดตามสมการได้พบข้อสงสัย 2 ข้อในการทำงานของระบบตามทฤษฎี Kalman Filter ค่าของ R ซึ่งเป็นค่าที่ต้องกำหนดเอง และไม่มีหลักการในการกำหนดเนื่องจากในระบบต่าง ๆ มีค่าความแปรปรวนของ Noise ของเซ็นเซอร์ไม่เหมือนกัน จึงได้ทดลองสุ่มค่า R เพื่อศึกษาพฤติกรรมของระบบที่มีผลต่อค่าความแปรปรวนนี้ และเพื่อหาค่าความแปรปรวน Noise ของเซ็นเซอร์ที่ใกล้เคียงกับระบบจริงให้มากที่สุด



ภาพที่ 3.13 Block Diagram เมื่อรับค่าเซ็นเซอร์

จาก Block Diagram เมื่อรับค่าเซ็นเซอร์ทั้งสอง ส่งผ่านเข้า Kalman Filter จากนั้นจะเป็นการ Check point โดยในที่นี้ Set point = 0 deg จากนั้นจะเข้าสู่ PID เพื่อหาความเร็วที่เหมาะสมในการจ่าย PWM & Direction ออกไปควบคุมมอเตอร์

3.3.8 การประยุกต์ใช้ตัวควบคุม PID

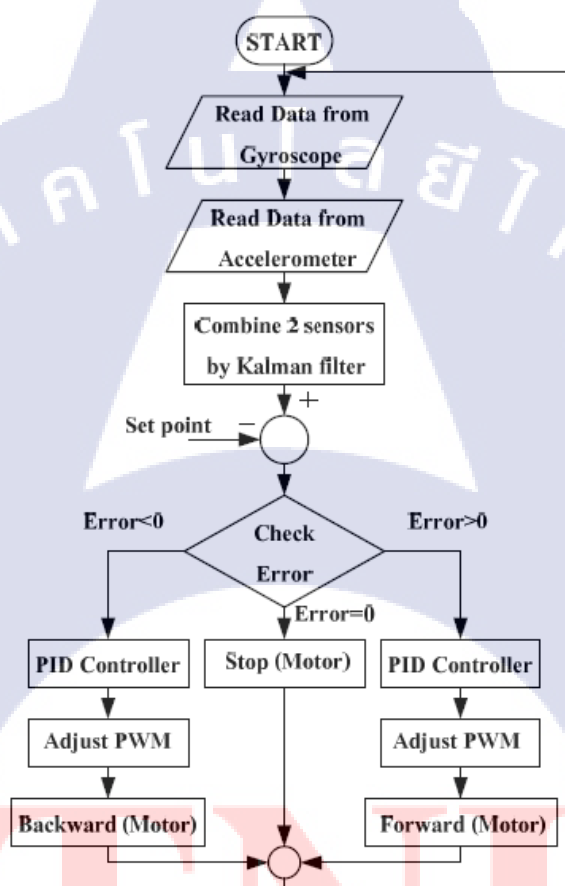
การประยุกต์ใช้ตัวควบคุม PID ในไมโครคอนโทรลเลอร์ประกอบด้วย 3 เทอมหลักด้วยกัน คือเทอม P (Proportional term) เทอม I (Integral term) และเทอม D (Derivative term) โดยค่าของ P เป็นการกำหนดการทำงานของสัญญาณทางด้านออกเป็นสัดส่วนกับค่าความคลาดเคลื่อนหรือการเปลี่ยนแปลงของค่าที่วัดได้ ในทางปฏิบัติ P จะเข้าใกล้ค่าหนึ่งซึ่งไม่ใช่ค่าที่ตั้งไว้จริง (set point) ซึ่งเรียกว่าค่า “offset” ส่วนค่าของ I จะใช้ในการแก้ปัญหา offset ระบบควบคุม I จะเข้าไปช่วยกำจัดค่า offset ที่ยังคงมีอยู่ให้ระบบเข้าสู่ set point โดยค่าสัญญาณทางด้านออกขึ้นอยู่กับ Integral Time ที่กำหนดขึ้นมาตั้งแต่ต้นหากกำหนดให้ Integral time น้อยระบบจะเข้าสู่ set point ได้อย่างรวดเร็วแต่จะเกิดการกระเพื่อมของระบบมากด้วย และหากกำหนดให้ Integral time มากใช้เวลานานกว่าระบบจะเข้าสู่ set point และค่าของ D ในกรณีที่มีการรบกวนระบบจากภายนอกเป็นผลให้กระบวนการของระบบมีการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใด การควบคุมแบบ D มีการตอบสนองที่รวดเร็วเป็นผลให้ระบบเข้าสู่ set point ได้รวดเร็วขึ้น โดยสามารถเขียนสมการระบบควบคุม PID ให้อยู่ในรูปของโปรแกรมที่เป็นแบบดิจิทัลแบบเวลาไม่ต่อเนื่องได้ดังสมการที่ (26)

$$u(t) = K_p \left(error(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t error(t) dt + T_D \cdot \frac{d error(t)}{dt} \right) \quad (26)$$

$u(t)$ คือค่าสัญญาณทางด้านออกของระบบ ณ เวลา t ใด ๆ เท่ากับผลบวกของค่าของแต่ละเทอมที่ประกอบด้วย เทอม P เทอม I และเทอม D ณ เวลา t โดยค่า $T_I = (K / K)$ และค่า $T_D =$

K_D/K_P ซึ่งเป็นค่าคงที่ของ Integral term และ Derivative term ตามลำดับ และเมื่อแทนค่า T_i และ T_D ลงในสมการ (26) ใช้สำหรับเขียนโปรแกรมลงในไมโครคอนโทรลเลอร์

ค่าที่ได้จากการวัดของเซนเซอร์ทั้งสองมีค่าเป็นแรงดันซึ่งจะมีค่าสูงต่ำเปลี่ยนแปลงไปตามมุมที่รถเอียงก ค่าที่ได้นี้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ตั้งไว้ ทำให้เกิดค่าแรงดันคลาดเคลื่อนซึ่งได้ถูกส่งไปให้ตัวควบคุม *PID* เพื่อทำการประมวลผลสำหรับควบคุมการหมุนของมอเตอร์ กระแสตรง โดยให้มีทิศทางหมุนไปข้างหน้า ถอยหลัง หรือหยุด ดังแสดงโฟลว์ชาร์ตการทำงานในภาพที่ 3.14



ภาพที่ 3.14 Flow chart of the control system of the Balancing Electric Scooter

3.3.9 การตั้งค่า PID ในรูปแบบ Manual Configuration

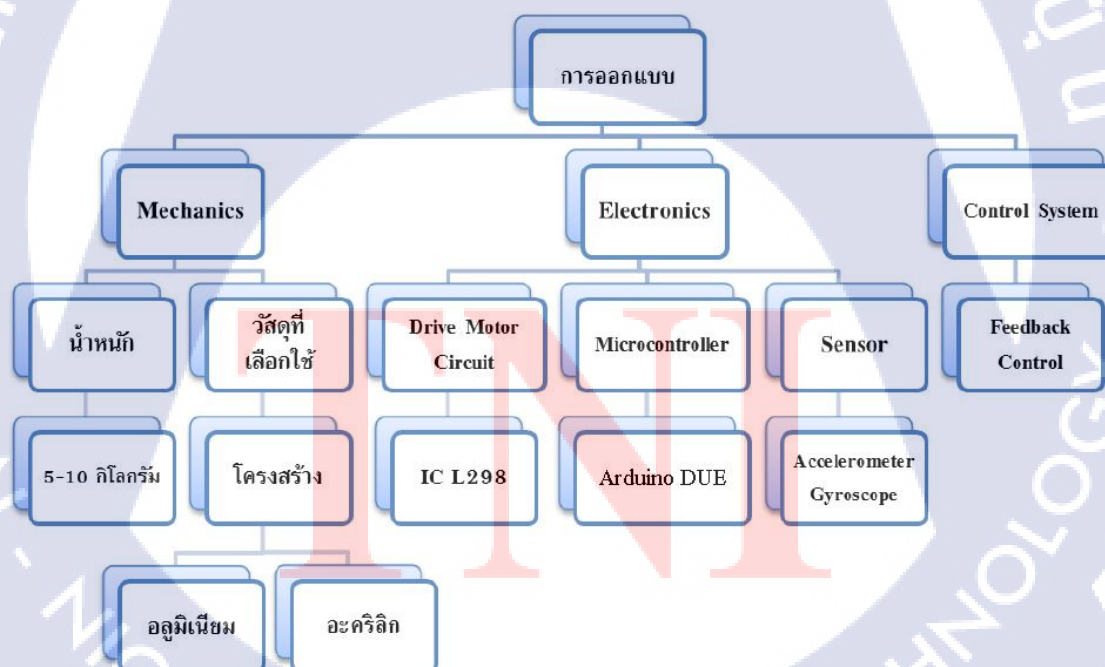
ถ้าระบบยังคงทำงาน ขั้นแรกให้ตั้งค่า K_i และ K_d เป็นศูนย์ เพิ่มค่า K_p จนกระทั่งสัญญาณขาออกเกิดการแกว่ง (oscillate) แล้วตั้งค่า K_p ให้เหลือครึ่งหนึ่งของค่าที่ทำให้เกิดการแกว่งสำหรับการตอบสนองชนิด Quarter Amplitude Decay แล้วเพิ่ม K_i จนกระทั่งออฟเซตถูกต้องในเวลาที่พักของกระบวนการ แต่ถ้า K_i มากไปจะทำให้ไม่เสถียร สุดท้ายถ้าต้องการให้เพิ่มค่า K_d จนกระทั่งอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ แต่ถ้า K_d มากเกินไปจะเป็นเหตุให้การตอบสนอง

และโอเวอร์ชูตเกินยอมรับได้ ปกติการปรับจูน PID ถ้าเกิดโอเวอร์ชูตเล็กน้อยจะช่วยให้เข้าสู่จุดที่ต้องการเร็วขึ้น แต่ในบางระบบไม่สามารถยอมให้เกิดโอเวอร์ชูตได้ และถ้าค่า K_p น้อยเกินไปก็จะทำให้เกิดการแกว่งถ้าเพิ่มค่า Parameters จะทำให้เกิดผลกระทบต่อระบบดังนี้

ตารางที่ 3.4 ผลของการเพิ่มค่าตัวแปรอย่างอิสระ

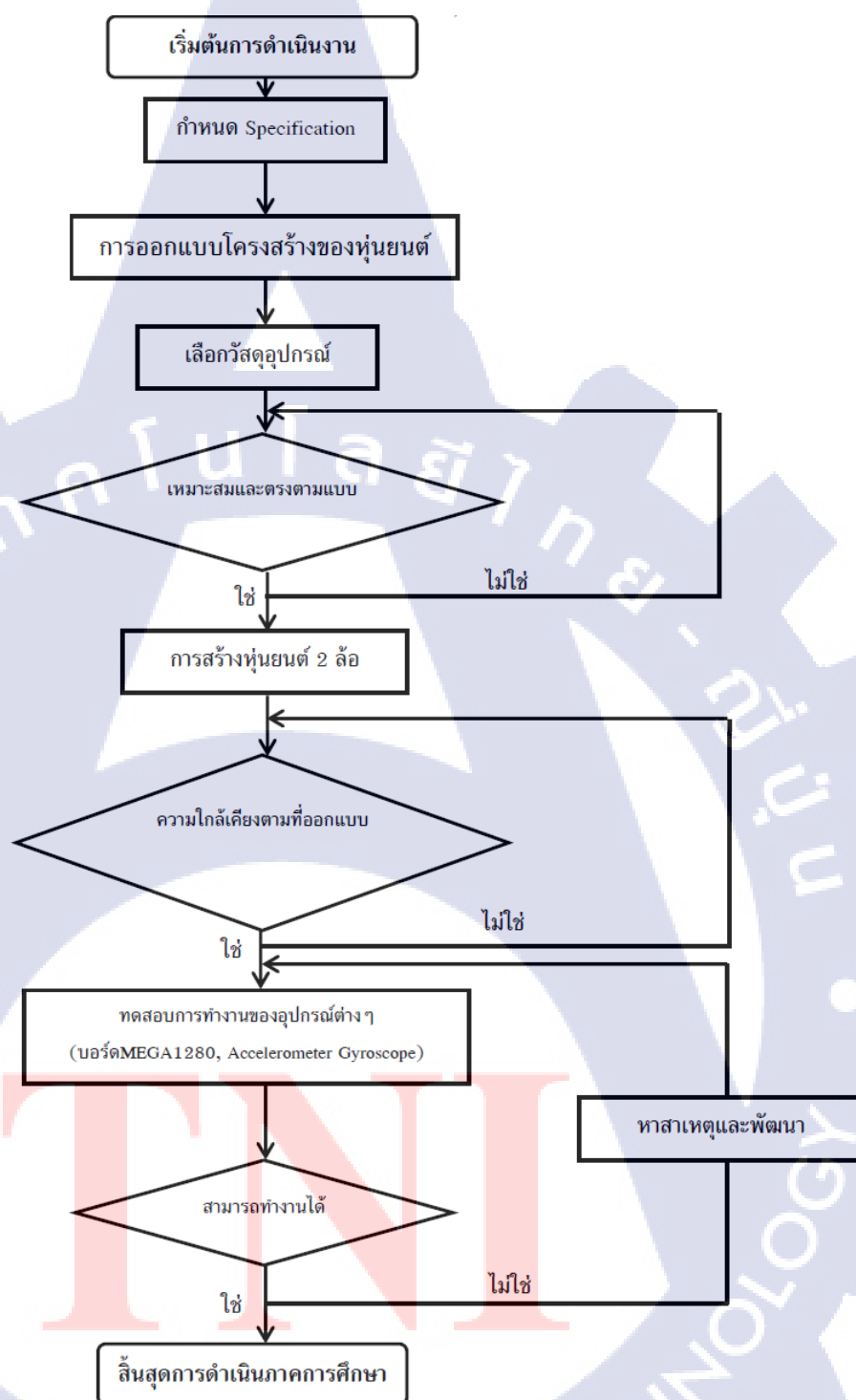
ตัวแปร	ช่วงเวลาขึ้น (Rise time)	โอเวอร์ชูต (Overshoot)	เวลาสู่สมดุล (Settling time)	ความผิดพลาดสถานะคงตัว (Steady-state error)	เสถียรภาพ
K_p	ลด	เพิ่ม	เปลี่ยนแปลงเล็กน้อย	ลด	ลด
K_i	ลด	เพิ่ม	เพิ่ม	ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ	ลด
K_d	ลดลงเล็กน้อย	ลดลงเล็กน้อย	ลดลงเล็กน้อย	ตามทฤษฎีไม่มีผล	ดีขึ้นถ้า K_d มีค่าน้อย

3.3.10 ขั้นตอนการออกแบบของหุ่นยนต์



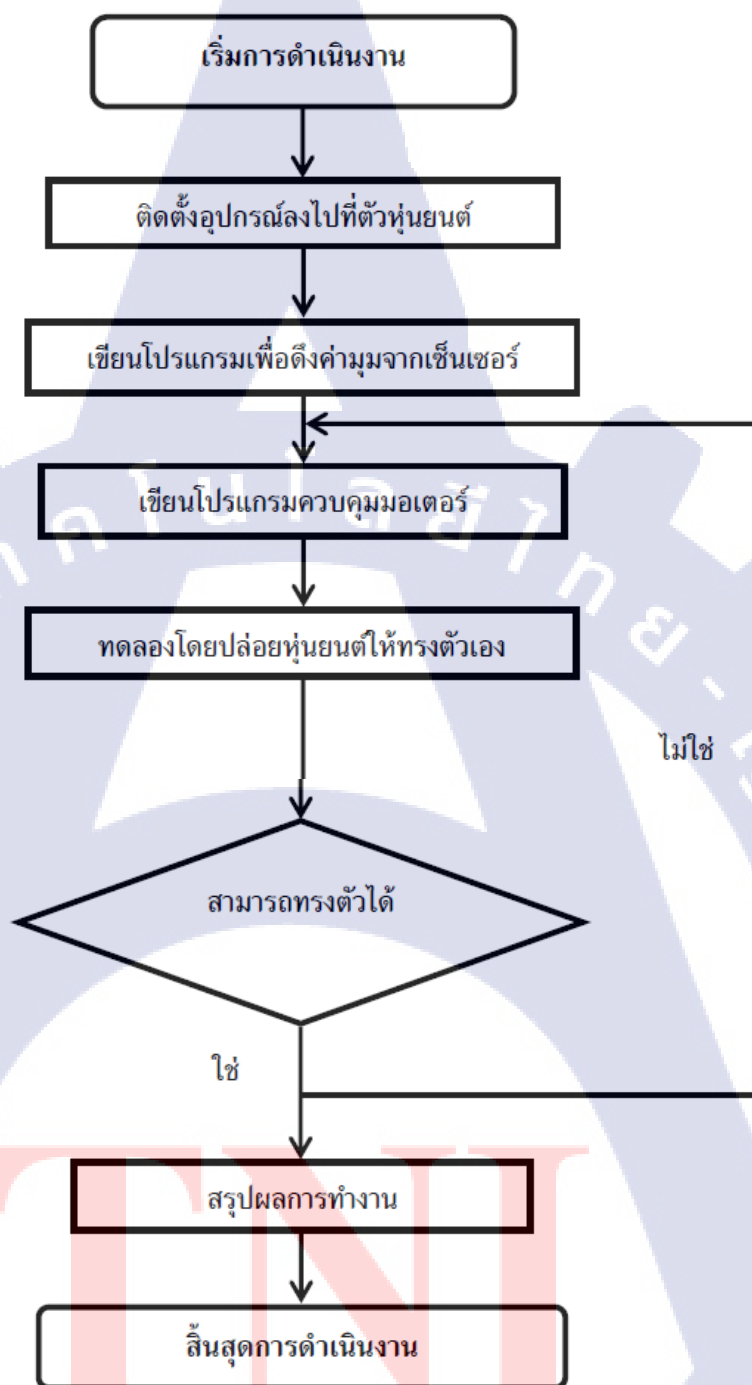
ภาพที่ 3.15 แผนภาพการออกแบบ

3.3.11 แผนการดำเนินงานของการสร้างหุ่นยนต์ (ภาคการศึกษาที่ 1)



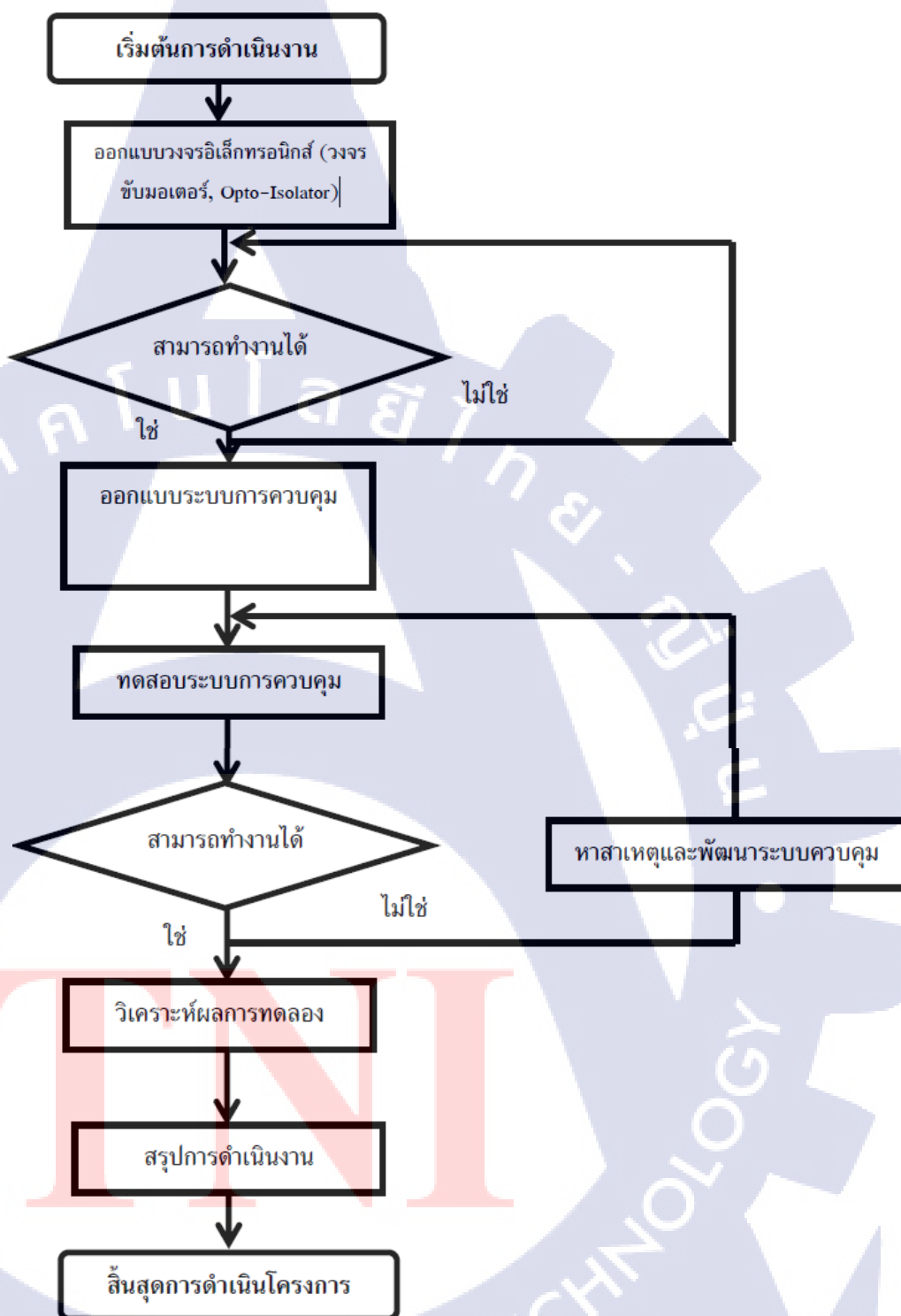
ภาพที่ 3.16 แผนการดำเนินงานของการสร้างหุ่นยนต์ (ภาคการศึกษาที่ 1)

3.3.12 แผนการดำเนินงานของการสร้างหุ่นยนต์ (ภาคการศึกษาที่ 2)



ภาพที่ 3.17 แผนการดำเนินงานของการสร้างหุ่นยนต์ (ภาคการศึกษาที่ 2)

3.3.13 แผนการดำเนินงานของการสร้างหุ่นยนต์



ภาพที่ 3.18 แผนการดำเนินงานของการสร้างหุ่นยนต์

3.3.14 ขั้นตอนการตั้งค่า Default ของหุ่นยนต์

1. ตั้งค่าของ Set Point เป็น 0 องศา จากนั้นตั้งค่าของ K_i K_d ให้เท่ากับ 0 และเพิ่มค่าของ K_p ให้มากขึ้นจนหุ่นเริ่มทรงตัวได้
2. เมื่อหุ่นทรงตัวได้ ปรับละเอียดในส่วนของ K_i เพื่อให้หุ่นทรงตัวได้มากขึ้น
3. เพิ่มค่า K_d เพื่อให้ระบบตอบสนองเร็วขึ้น แต่ต้องเพิ่มทีละน้อย เนื่องจากเทอม D ตอบสนองต่อสัญญาณรบกวนในระบบมาก จนอาจทำให้ระบบไม่ตอบสนองได้



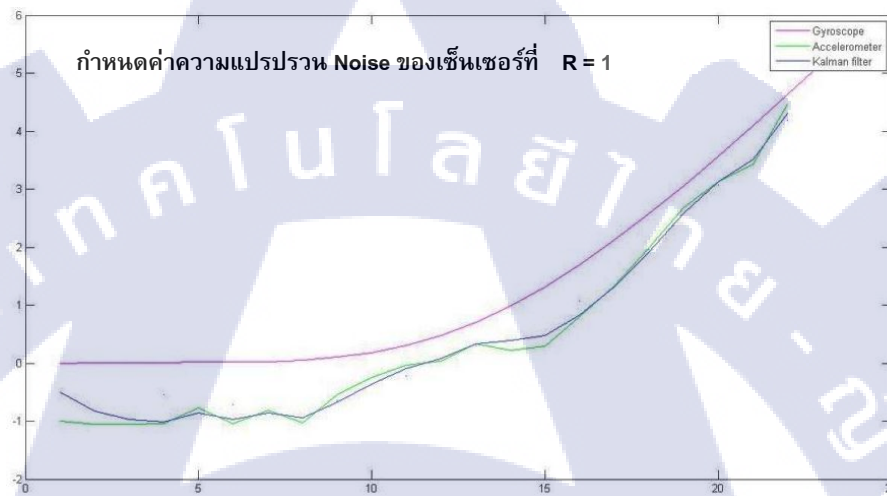
บทที่ 4

ผลการดำเนินงานและการวิเคราะห์

4.1 ผลการดำเนินงาน

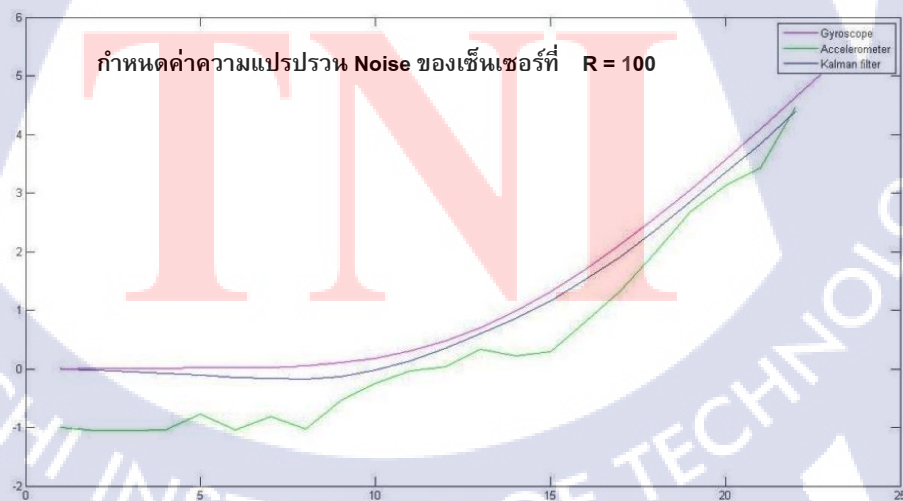
4.1.1 ผลการทดลองการประมาณค่าสมการกำลังสองเชิงเส้น (Kalman Filter)

ทดลองสุ่มค่าเพื่อหาแนวทางการกำหนดค่าความแปรปรวน Noise ของเซ็นเซอร์และเปลี่ยนตำแหน่งการใส่ค่าเซ็นเซอร์



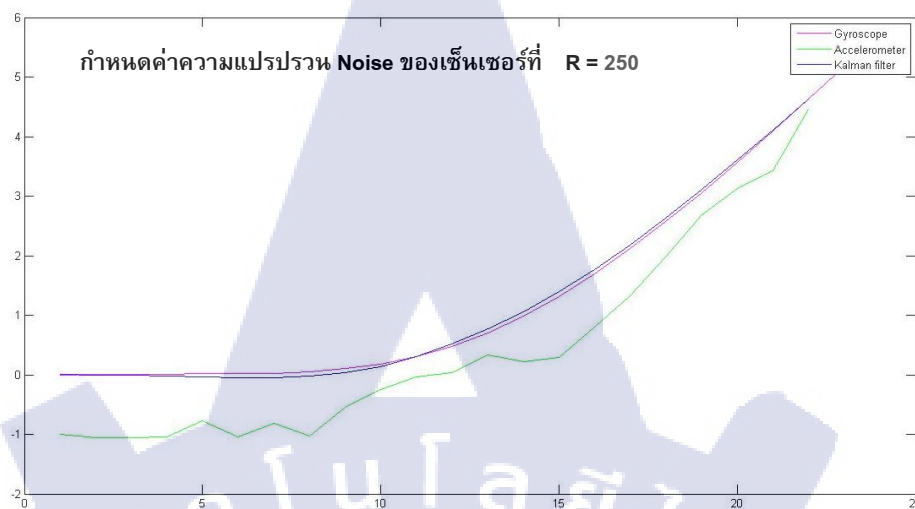
ภาพที่ 4.1 กราฟการทดลองที่กำหนดค่าความแปรปรวน Noise ของเซ็นเซอร์ที่ $R = 1$

เส้นกราฟของ Kalman filter เปรียบเข้าหาเซ็นเซอร์ Accelerometer มากกว่า Gyroscope จนมีค่าเท่ากับ Accelerometer



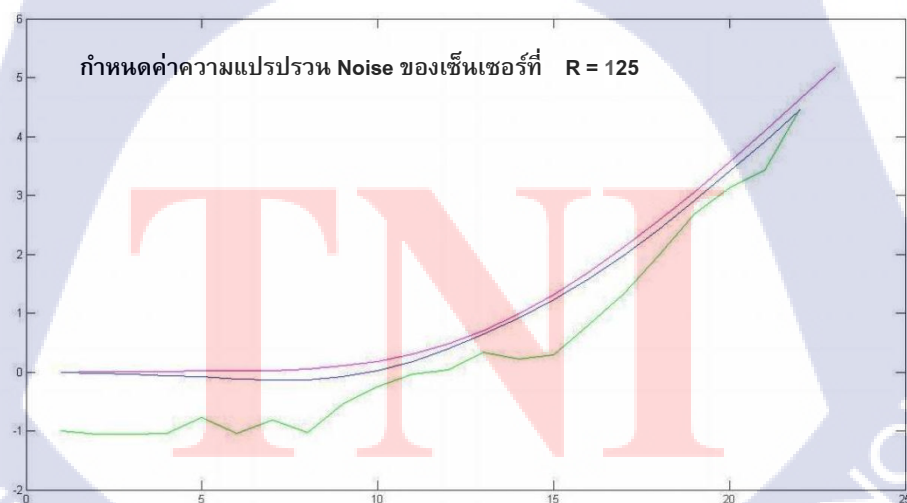
ภาพที่ 4.2 กราฟการทดลองที่กำหนดค่าความแปรปรวน Noise ของเซ็นเซอร์ที่ $R = 100$

เส้นกราฟของ Kalman Filter เบนเข้าหาเซ็นเซอร์ Gyroscope มากกว่า Accelerometer



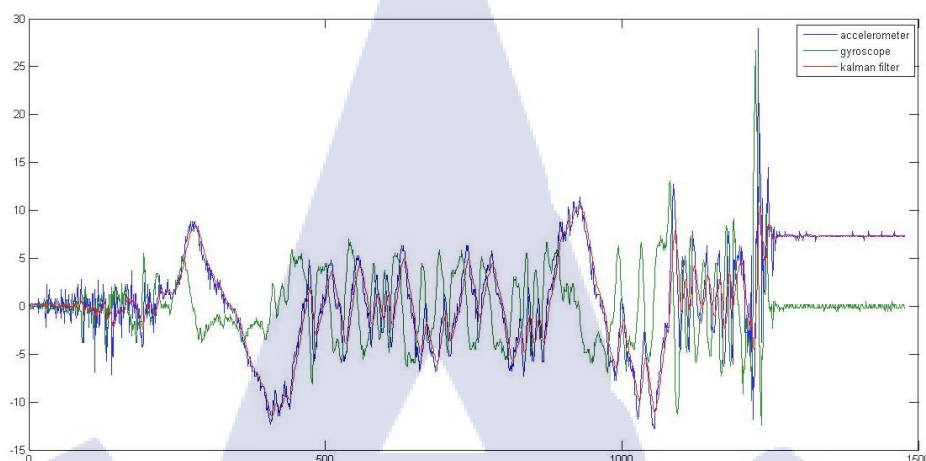
ภาพที่ 4.3 กราฟการทดลองที่กำหนดค่าความแปรปรวน Noise ของเซ็นเซอร์ที่ $R = 250$

จะสังเกตได้ว่าเส้นกราฟค่อนข้างเบนเข้าหาเซ็นเซอร์ Gyroscope มากกว่า Accelerometer จนแทบจะมีค่าเท่ากับ Gyroscope จากการสุ่มเลข ค่าความแปรปรวน Noise ของเซ็นเซอร์ ทำให้พอสรุปได้ว่าความกว้างของค่าความแปรปรวนระหว่างสองเซ็นเซอร์นั้นคือ 1-250 เราจึงได้ค่ากลางของค่าความแปรปรวนเป็น 125

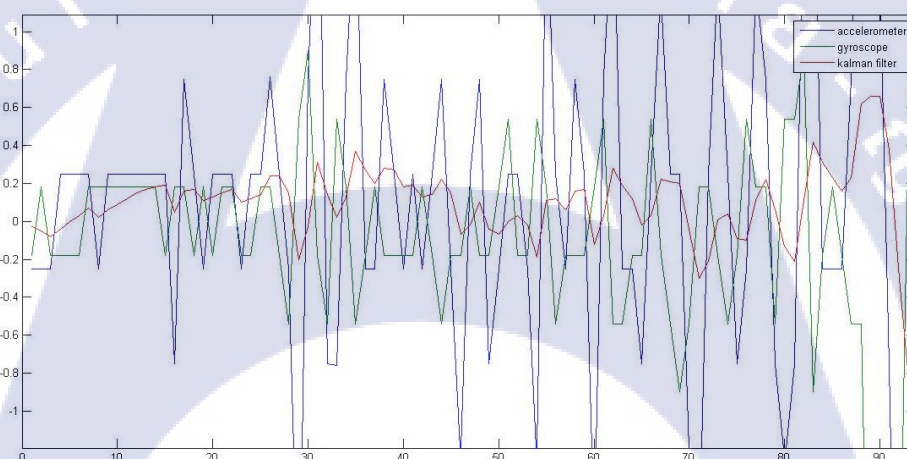


ภาพที่ 4.4 กราฟการทดลองที่กำหนดค่าความแปรปรวน Noise ของเซ็นเซอร์ที่ $R = 125$

หลังจากลองทดลองศึกษาพฤติกรรมของ Kalman filter ในโปรแกรมแมทแล็บ จึงนำมาใช้ประมวลผลกับค่าจริง ได้ผลของ Kalman filter ดังภาพที่ 4.5

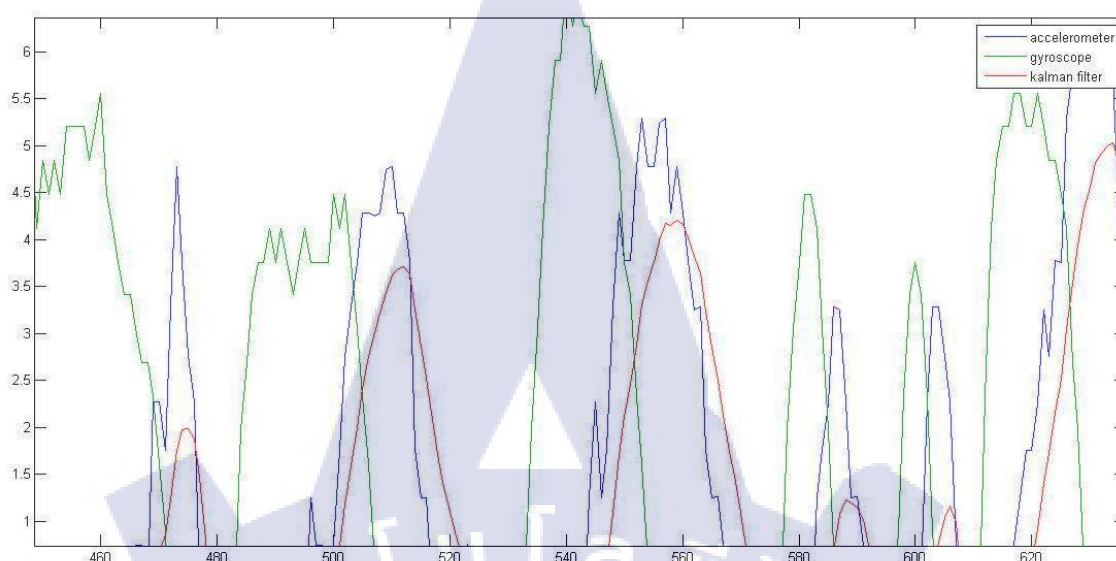


ภาพที่ 4.5 กราฟภาพรวมค่าเซ็นเซอร์หลังจากใช้ Kalman Filter ประมวลผล



ภาพที่ 4.6 ส่วนขยายกราฟค่าเซ็นเซอร์หลังจากใช้ Kalman Filter ประมวลผล

จากภาพจะสังเกตได้ว่าในส่วนของ Gyroscope สเกลความสูงของกราฟจะน้อยกว่า Accelerometer เพราะ Gyroscope สามารถวัดได้แค่ Dynamic response เพียงอย่างเดียว เมื่อเซ็นเซอร์หยุดนิ่งในชั่วขณะหนึ่ง ค่าที่วัดได้จะทำการสวิงกลับมาที่จุดอ้างอิงซึ่งในที่นี้คือค่า 0 แต่ในส่วนของ Accelerometer ที่สามารถวัดค่าได้ทั้ง Dynamic Response และ Static Response นั้นคือเมื่อเซ็นเซอร์หยุดนิ่งในชั่วขณะหนึ่งค่าก็จะไม่วกกลับมาที่ 0 แต่ค่าที่วัดได้จะยังคงอยู่ที่เดิมตามความเป็นจริงของหุ่นในตอนนั้น ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ค่าของ Accelerometer มีสเกลความสูงมากกว่า Gyroscope อย่างเห็นได้ชัด



ภาพที่ 4.7 ส่วนขยายกราฟค่าเซ็นเซอร์หลังจากใช้ Kalman Filter ประมวลผล

จากภาพ จะเห็นได้ชัดว่าเส้นกราฟสีเขียวจะวัดค่าได้เร็วกว่าสีน้ำเงิน นั่นคือ Gyroscope สามารถวัดค่าได้รวดเร็วกว่า Accelerometer และในส่วนของเส้นสีแดงของ Kalman Filter จะมีลักษณะที่เรียบไม่แกว่ง ตรงตามหลักทฤษฎีที่ว่า Kalman Filter ช่วยลดความแปรปรวนได้ และเมื่อนำค่าจากเซ็นเซอร์มาผ่านการประมวลผลจาก Kalman Filter แล้วนำค่าที่ได้ไปใช้บังคับหุ่นจึงทำให้ตัวหุ่นมีความเสถียรนิ่งมากกว่าการรับค่าจากเซ็นเซอร์โดยตรง

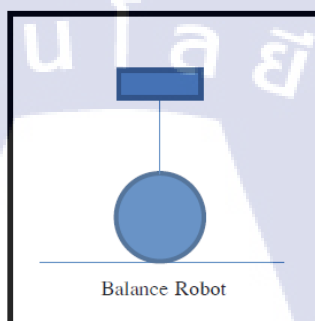
4.1.2 ผลการตั้งค่า PID ในรูปแบบ Manual Configuration

การตั้งค่า PID มีหลายประเภทด้วยกัน หลัก ๆ แล้วแบ่งตามลักษณะการตั้งค่า ในที่นี้เราจะแบ่งเป็นสองประเภทใหญ่ คือ Online Tuning และ Offline Tuning ซึ่งเราเลือกใช้แบบ Online Tuning ชนิด Trial-and-error Tuning ซึ่งจากหลักการดังกล่าวมีข้อดีคือไม่จำเป็นต้องรู้ว่า สมการหรือโมเดลของระบบเป็นอย่างไร และยังเป็น การตั้งค่าแบบง่าย ๆ ไม่ซับซ้อน ซึ่งสามารถตั้งค่าและได้รับผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นได้เลย แต่อย่างไรก็ตามการใช้หลักการดังกล่าวอาจไม่สามารถที่จะทำให้ระบบนิ่งได้เลยทีเดียวซึ่งเราสามารถที่จะตั้งค่าโดยการปรับพารามิเตอร์แต่ละตัวของ PID ที่เรียกว่า Trial-and-error นี่ซึ่งเป็นการสุ่มค่าให้ได้คำตอบของระบบที่ดีที่สุด โดยอ้างอิงกับทฤษฎีของระบบ PID ว่าในแต่ละเทอมมีพฤติกรรมหรือส่งผลต่อระบบอย่างไร

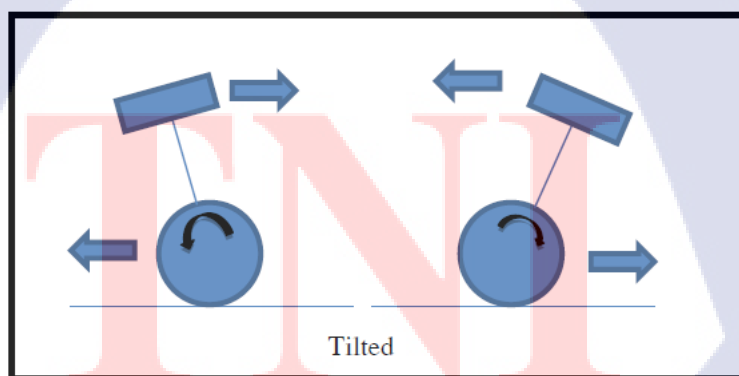
จากการตั้งค่าด้วยวิธีนี้ผลที่ได้คือหุ่นยนต์ทรงตัวได้ไม่นานนัก และเมื่อมีการตั้งค่าใหม่ผลลัพธ์ที่ได้กลับไม่เหมือนเดิมและแย่ลงกว่าเดิม เนื่องจากเป็นเพราะโครงสร้างของตัวหุ่นหรือตำแหน่งเซ็นเซอร์และบางอย่างที่เป็นปัจจัยภายนอกที่ล้วนส่งผลกระทบต่อการควบคุม

4.1.3 ผลการทดสอบหุ่นยนต์ต้นแบบ

หุ่นสามารถทรงตัวได้ในเวลาสั้น ๆ พอมีการสั่งให้เคลื่อนที่ระบบเกิดการเสียสมดุลและล้มลง จากการพยายามตั้งค่าใหม่หลาย ๆ ครั้งพบว่า ในบางครั้งแม้จะเป็นค่าเดิมแต่ผลที่ได้กลับไม่เหมือนกัน ทำให้เห็นว่าปัจจัยภายนอกทุก ๆ ด้านมีผลต่อระบบ เช่น โครงสร้าง ตำแหน่ง เซนเซอร์ กำลังไฟ สัญญาณควบคุม ในบางครั้งหุ่นสามารถเคลื่อนที่แล้วหยุดทรงตัวได้ แต่เมื่อเคลื่อนที่อีกครั้งหุ่นจึงล้มลง แสดงให้เห็นว่าผลจากการใช้การประมาณค่าของสมการกำลังสองเชิงเส้น (Kalman filter) และการควบคุมแบบPID เห็นผลเป็นที่น่ายอมรับหากแต่ต้องแก้ไขปัจจัยอื่นที่ได้มองข้ามไป



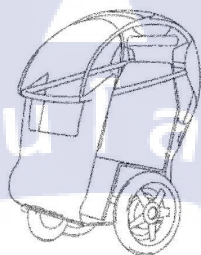
ภาพที่ 4.8 แผนภาพแทนหุ่นยนต์เมื่ออยู่ในภาวะสมดุล



ภาพที่ 4.9 แผนภาพแทนหุ่นยนต์เมื่อเอียงตัวและพยายามที่จะรักษาสมดุลไว้

4.2 ผลการวิเคราะห์

จากการทำหุ่นยนต์ทรงตัวต้นแบบ ทำให้ได้ข้อสรุปด้านทฤษฎีในการอ่านค่าจาก เซนเซอร์และควบคุมหุ่นยนต์ให้ทรงตัวอยู่ได้ และพบปัญหามากมายทั้งในด้านทฤษฎี ซอฟต์แวร์ และฮาร์ดแวร์ อีกทั้งยังปัญหาในหลาย ๆ ส่วนที่มองข้ามไป เช่น โครงสร้าง และ ตำแหน่ง เซนเซอร์ แต่ทั้งนี้ทั้งนั้น เราได้เลือกแบบ Seat Segway โดยศึกษาจาก Seat Segway ทฤษฎีและผลจากหุ่นยนต์ต้นแบบ รวมถึงปัญหาในด้านต่าง ๆ ที่ได้มองข้ามจาก หุ่นยนต์ ต้นแบบ โดยหากได้รับการสนับสนุนหรือมีทุนในการทำวิจัยต่อ ก็จะนำ ประสบการณ์และแบบ ที่ได้เลือกมาพัฒนาต่อยอดเพื่อให้เป็น Seat Segway ฝีมือคนไทย



ภาพที่ 4.10 แสดงแบบจำลอง Seat Segway



ภาพที่ 4.11 Prototype Seat Segway



ภาพที่ 4.12 ผลลัพธ์การปฏิบัติงานของนักศึกษา

บทที่ 5

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการดำเนินงาน

หลังจากทดลองหาค่าความแปรปรวน Noise ของเซ็นเซอร์ในเลขที่แตกต่างกัน ทำให้พอสรุปได้ว่าความกว้างของค่าความแปรปรวน ระหว่างสองเซ็นเซอร์นั้นคือ 1-250 โดยที่เราสามารถปรับค่าความแปรปรวน ในการสั่งให้ Kalman Filter เชื่อค่าจากเซ็นเซอร์ตัวไหนมากกว่ากัน จากผลทดลองนี้ทำให้สามารถวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของค่าความแปรปรวนกับค่าของเซ็นเซอร์ได้ว่า ค่าความแปรปรวนของเซ็นเซอร์ยิ่งมากเท่าไร Kalman Filter จะใช้ข้อมูลของเซ็นเซอร์ที่รับเข้ามาน้อยเท่านั้น ในกรณีของระบบ ได้ใช้ค่าของ Accelerometer เป็นค่าของเซ็นเซอร์ที่รับเข้ามา และใช้ค่าของ Gyroscope เป็นค่า input ตั้งต้น เพราะฉะนั้นเมื่อปรับให้ค่าความแปรปรวนมาก จึงทำให้ผลเส้นกราฟของ Kalman Filter นั้น เชื่อค่าเซ็นเซอร์ของ Gyroscope มากกว่า ค่าจาก Accelerometer และในทางตรงกันข้าม เมื่อปรับค่าให้ค่าความแปรปรวนน้อยจึงทำให้ผลเส้นกราฟของ Kalman Filter เชื่อค่าจากเซ็นเซอร์ของ Accelerometer มากกว่าค่าจาก Gyroscope ซึ่งเมื่อวิเคราะห์ได้ดังนี้ จึงทำให้เราสามารถกำหนดค่าความแปรปรวนอย่างมีหลักการได้ โดยในระบบนี้เราต้องการความเป็นกลางระหว่างทั้งสองเซ็นเซอร์ จึงได้ค่าความแปรปรวน noise ของระบบเป็นค่ากึ่งกลางระหว่าง 1-250 นั่นคือ 125

5.2 ปัญหาและแนวทางการแก้ไข้ปัญหา

หุ่นยนต์สามารถทรงตัวได้ในระยะสั้น และสามารถเคลื่อนที่ได้ แต่เมื่อหยุดการเคลื่อนที่ไม่สามารถทรงตัวต่อไปได้ เป็นเพราะเหตุปัจจัยหลายอย่างเช่น โครงสร้าง ตำแหน่งเซ็นเซอร์ แกนเพลามอเตอร์ ระบบควบคุมมอเตอร์ ฯลฯ แต่ทั้งนี้ทั้งนั้นทำให้เรามองเห็นปัญหาที่เราเห็นได้ มองข้ามไป ทำให้เกิดการเรียนรู้ และมองภาพการดำเนินแก้ไขออก อย่างไรก็ตามในส่วนระยะเวลาการทำโครงการนี้ได้ครบกำหนดเวลาแล้วเสร็จ แต่ผลงานยังไม่แล้วเสร็จตามที่วางแผนไว้ แต่ได้ทราบถึงปัญหาและแนวทางการแก้ไขแล้ว ซึ่งทางผู้จัดทำก็จะดำเนินการต่อเพื่อให้เป็นกรณีศึกษา และเป็นแหล่งข้อมูลสำหรับผู้สนใจในการพัฒนาต่อยอดออกไป

5.3 ข้อเสนอแนะจากการดำเนินงาน

ในการทำงานจริงต้องพึงระลึกเสมอว่าไม่มีแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ใดที่สมบูรณ์ 100 เปอร์เซ็นต์ในชีวิตจริงมีตัวแปรเป็นจำนวนมากที่มีผลต่อระบบซึ่งไม่สามารถนำมาเขียนเป็นสมการได้อย่างครบถ้วนสมบูรณ์และไม่มีเซ็นเซอร์ใดที่วัดค่าได้สมบูรณ์ 100 เปอร์เซ็นต์ ในทางปฏิบัติเซ็นเซอร์ทุกชนิดมีความคลาดเคลื่อน (Measurement Noise) จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ดังนั้นสำหรับการใช้ทฤษฎี Kalman filter ในแต่ละระบบ จำเป็นที่จะต้องหาค่าความ

แปรปรวน noise ของเซ็นเซอร์ใหม่ในทุกระบบ เพราะเราไม่สามารถกำหนดค่าความแปรปรวนนี้ได้อย่างตายตัว ถ้าต้องการให้ประสิทธิภาพของ Kalman filter ใช้ได้ผลสูงสุดนั้น จำเป็นที่จะต้องหาค่าความแปรปรวนของระบบเพื่อนำมาใช้คำนวณ เช่นเดียวกับตัวหุ่นยนต์แบบเช่นกัน การออกแบบในบางส่วนที่มองข้ามไปเช่นโครงสร้างความสมดุล ขนาดและน้ำหนัก แกนเพลามอเตอร์ และระบบควบคุมมอเตอร์ ทำให้ผลงานออกมาไม่สมบูรณ์เท่าที่ควร ดังนั้นในการออกแบบควรคำนึงถึงรายละเอียดให้ครบถ้วน วางแผนและหาแนวทางแก้ไข การวางแผนที่ดีจะสามารถหลีกเลี่ยงปัญหาไปได้อย่างมาก



บรรณานุกรม

TNI

บรรณานุกรม

ชาญวิทย์ หารหนองบัว และ เกรียงไกล กันไชย. (2553) . **THE BEST OF PROJECT** เซมิฯ.

กรุงเทพฯ : บริษัท ซีอีดียูเคชั่น จำกัด (มหาชน).

ไพโรจน์ ทองประศรี. (2554) . **รถไฟฟ้า2ล้อแบบสมดุล Balancing Electric Scooter.**

กรุงเทพฯ : มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา.

Tibor Digana. (2004). **KALMAN FILTERING IN MULTI-SENSOR FUSION.** Helsinki
University of Technology.

Greg Welch, Gary Bishop. (2006). **An Introduction to the Kalman Filter.** Department of
Computer Science University of North Carolina at Chapel Hill

Jose Luis Corona Miranda. (2009). **APPLICATION OF KALMAN FILTERING AND PID
CONTROL FOR DIRECT INVERTED PENDULUM CONTROL.** The Faculty of
California State University

CHIRAYUSHAH. (2000). **SENSORLESS CONTROL OF STEPPER MOTOR USING
KALMAN FILTER,** Bachelor of Engineering in Instrument & Control Engineering
Dharamsinh Desai Institute of Technology

R. E. KALMAN. (1960). **A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems**
Research Institute for Advanced Study Baltimore

TNI

ภาคผนวก

TNI

ภาคผนวก ก.
โปรแกรมคอมพิวเตอร์

TNI

ตารางที่ ก1 โปรแกรมคอมพิวเตอร์

```
#include <PID_v1.h>
#include <math.h>
unsigned long timer = 0; //timer
unsigned long delta_t = 0; //delta time or how long it
takes to execute data acquisition
float kal;
float x_angle = 0;
float x_angleC = 0;
float x_angleRG = 0;
float x_angleRA = 0;
float x_angle2C = 0;
double Setpoint ,in,ou; //PID
double kp = 3,ki = 0,kd = 0; //SET PID TUNE
PID myPID (&in, &ou,&Setpoint,kp,ki,kd,DIRECT) ;
void forward () {
    //Left
    digitalWrite (35,HIGH) ;
    analogWrite (8,ou) ; //RPWM
    digitalWrite (9,HIGH) ; //LPRM
    //right
    digitalWrite (33,HIGH) ;
    analogWrite (10,ou) ; //LPRWM
    digitalWrite (11,HIGH) ; //LPRM
}
void backward () {
    digitalWrite (35,HIGH) ;
    digitalWrite (8,HIGH) ; //RPWM
    analogWrite (9,ou) ; //LPRM
    digitalWrite (33,HIGH) ;
    digitalWrite (10,HIGH) ; //RPWM
    analogWrite (11,ou) ; //LPRM
}
void right () {
    //Left
    digitalWrite (35,HIGH) ;
    analogWrite (8,0) ; //RPWM
    digitalWrite (9,HIGH) ; //LPRM
    //right
    digitalWrite (33,HIGH) ;
    digitalWrite (10,HIGH) ; //RPWM
    analogWrite (11,0) ; //LPRM
}
void motorstop () {
    //Left
    digitalWrite (35,LOW) ;
    digitalWrite (8,HIGH) ; //RPWM
    digitalWrite (9,HIGH) ; //LPRM

    //right
    digitalWrite (33,LOW) ;
    digitalWrite (10,HIGH) ; //RPWM
    digitalWrite (11,HIGH) ; //LPRM
}
void motorbreak () {
    //Left
    digitalWrite (35,HIGH) ;
    digitalWrite (8,HIGH) ; //RPWM
```

```

digitalWrite (9,HIGH) ;           //LPRM
//right
digitalWrite (33,HIGH) ;
digitalWrite (10,HIGH) ;           //RPWM
digitalWrite (11,HIGH) ;           //LPRM
}
void setup () {
  Serial.begin (19200) ;
  Serial.flush () ;
  in = kal;
  Setpoint = 0;
  myPID.SetMode (AUTOMATIC) ;
}
float Adx,Adz,Ax,Az,Adeg;          //Decale for Accelometer
float Gx,Grx;                      //Decale for Gyroscope
int i = 0;
void loop ()
{
  delta_t = millis () - timer;      // calculate
  time through loop i.e. acq. rate
  timer = millis () ;

  Adx = analogRead (0) ;             //Read digital Accelo X
  Adz = analogRead (1) ;             //Read digital Accelo Z
  Gx = analogRead (2) ;              //Read digital Gyro   X

  // Accelometer ( (digital * Vref) /ADC bit) - Gzero) /sensitive
  Gzero = 1.65 sensitive = 0.3
  Ax = ( ( (Adx*3.3) /1023) -1.65) /0.3;
  Az = ( ( (Adz*3.3) /1023) -1.65) /0.3;
  Adeg = (atan2 (-Ax,Az) *180) /M_PI;

  // Gyroscope ( (digital * Vref) /ADC bit) - zero) /sensitive   zoro
  = 1.35 sensitive = 0.009
  Grx = ( ( (Gx*3.3) /1023) -1.35) /0.009;
  //actAngle = kalmanCalculate (ACC_angle, GYRO_rate, delta_t) ;
  kal = kalmanCalculate (Adeg,Grx,delta_t) ;

  if (kal<-6)
  {
    in = kal;
    myPID.Compute () ;
    forward () ;
  }
  if (kal>-6)
  {
    in = kal;
    myPID.Compute () ;
    backward () ;
  }
  if (kal = -6) //0
  {
    motorstop () ;
  }
}

```

ภาคผนวก ข.
คำสั่งโปรแกรม MATLAB

TNI

ตารางที่ ข1 คำสั่งโปรแกรมแมทแล็บ

```

clear all
clc

DeltaT = 10/1000; % 0.01s
Axis = xlsread ('data_gyro_accel10_n04') ;

A = [1 -DeltaT; 0 1];
B = [DeltaT; 0];
H = [1 0];
P_init = [0 0; 0 0];
Q = [1 0; 0 1];

R = 125.0;
bias_k = 0;
theta_k = 0;
P_k = P_init;
X_k = [theta_k; bias_k];

meamGyroZ = 425; %gyro 0
gyro_convert = 5.4675/12.5;
thetaOld = 0;

for i = 1:length (Axis (:,1) )
% Data Gyro ...
t (i) = i;
U_k (i) = (Axis (i,1) -meamGyroZ) *gyro_convert;
Theta (i) = thetaOld (i) +U_k (i) *DeltaT;
thetaOld (i+1) = Theta (i) ;

%Data Acc ...
Z_k (i) = Axis (i,2) ;

%Befor have Data

X_kPlus1 = A*X_k + B*U_k (i) ;
P_kPlus1 = A*P_k*A' + Q;

%Update Data
P_kMinus = P_kPlus1;
X_kMinus = X_kPlus1;
%After have Data
K_k = (P_kMinus*H') *inv ( (H*P_kMinus*H') +R) ;
X_k = X_kMinus + (K_k* (Z_k (i) - (H*X_kMinus) ) ) ;
P_k = (eye (2) - (K_k*H) ) *P_kMinus;

ThetaKeep (i) = X_k (1,1) ;
end

plot (thetaOld, 'm')
hold on
plot (Z_k, 'g')
plot (ThetaKeep, 'b')

```