

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

รถยนต์สองล้อ

TWO WHEELS VEHICLE



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 72113
วัน,เดือน,ปี..... ๘ ส.ย. 2550

b. 11๖๖๓๘๑
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมการวัดคุม

ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TWO WHEELS VEHICLE



PHERAPAN PANMEE

PASAKON PRATARNCHEWIN

ARTHIT WONGTHANEE

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULLFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
BACHELOR OF ENGINEERING IN INSTRUMENTATION ENGINEERING
DEPARTMENT OF INSTRUMENTATION ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2006

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองปริญญาโท

หัวข้อปริญญาโท รถยนต์สองล้อ
TWO WHEELS VEHICLE
นักศึกษาผู้จัดทำ นายพีรพันธ์ ปานมี รหัสนักศึกษา 46010538
นายภาสกร ประทานชีวินทร์ รหัสนักศึกษา 46010581
นายอาทิตย์ วงษ์ธานี รหัสนักศึกษา 46010965
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมการวัดคุม
ปีการศึกษา 2549

อาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาโท	ลายมือชื่อ
รศ. ประภาส อุดคคิมพันธ์	
รศ. ดร. ธนิตย์ ตรีสุวรรณวัฒน์	
ผศ. พิทยา ปานนิล	

ภาควิชารับรองแล้ว

(รศ. ประภาส อุดคคิมพันธ์)

หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อปริญญานิพนธ์	รถยนต์สองล้อ		
	TWO WHEELS VEHICLE		
นักศึกษาผู้จัดทำ	นายพีรพันธ์	ปานมี	รหัสนักศึกษา 46010538
	นายภาสกร	ประทานชีวินทร์	รหัสนักศึกษา 46010581
	นายอาทิตย์	วงษ์ธานี	รหัสนักศึกษา 46010965
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ. ประภาส	อุคคกิมพานธุ์	
	รศ. ดร. ธนิตย์	ตรีสุวรรณวัฒน์	
	ผศ. พิทยา	ปานนิล	
ปีการศึกษา	2549		

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันนี้ระบบควบคุมมีบทบาทในชีวิตประจำวันมากขึ้น จึงได้มีการคิดค้นและพัฒนา ระบบควบคุมให้ดีขึ้นตลอดเวลา เพื่อที่จะนำมาประยุกต์ใช้กับระบบอัตโนมัติต่างๆ เพื่อให้มี ประสิทธิภาพยิ่งขึ้น ระบบรักษาสมดุลแบบอินเวอร์ทเพนดูลัม ถือเป็นระบบหนึ่งที่ได้พัฒนาและ สามารถนำมาใช้กับยานพาหนะที่เรียกกันว่า " Seaway " ขณะในหลายมหาวิทยาลัยและบริษัทต่างๆ ได้ให้ความสนใจเกี่ยวกับโครงการนี้มากมาย บางแห่งได้เริ่มทำการวิจัยแล้ว โดยที่ผู้วิจัยสามารถ เลือกหลักการและทฤษฎีที่มีมากมาย ทั้ง Optimal Control, Fuzzy Logic ฯลฯ ขึ้นอยู่ผู้วิจัยจะเลือก ทฤษฎีไหนมาควบคุมเพื่อให้ได้ผลตอบสนองตามที่ต้องการ ในโครงการนี้ผู้วิจัยได้ใช้ระบบควบคุม แบบ Optimal Control เพื่อรักษาสมดุลของรถสองล้อแม้จะถูกรบกวนจากแรงภายนอกและยัง สามารถควบคุมให้เคลื่อนที่ไปยังทิศที่ต้องการได้อีกด้วย

Thesis Title	Two Wheels Vehicle	
Authors	Mr. Pherapan	Panmee
	Mr. Pasakon	Pratarnchewin
	Mr. Arthit	Wongthane
Thesis Advisor	Assoc.Prof. Prapart	Ukakimapurn
	Assoc.Prof. Dr.Tanit	Trisuwanwat
	Asst.Prof. Pittaya	Pannin
Year	2006	

ABSTRACT

Technology of balancing rigid body is developed every time. It is used for many things such as many kinds of Buildings, Robots and Vehicles etc. Inverted Pendulum system is one of theories of balancing robot which is applied and used for many things. And last this system is used for vehicle that is called "SEGWAY". The principle of Inverted Pendulum is about balancing of the rigid body. By keeping the pendulum to be perpendicularly with base. All principle can be applied in the Two Wheel Balancing Robot system for keeping the car in equilibrium. The optimal control system is applied here to design the driving system which operate relatively to the balancing of pendulum and dsPIC a hi-speed microcontroller is used obtain the best performance. All the relations must be designed properly in order to keep the car in equilibrium even though the car is disturbed by unexpected force and for control the car moves correctly to the exact destination.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีเพราะได้รับความเมตตาจาก รองศาสตราจารย์ ประภาส อุคคกิตติมาพันธุ์ รองศาสตราจารย์ ดร.ธนิตย์ ศรีสุวรรณวัฒน์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ พิทยา ปานนิล ที่ได้ให้คำแนะนำแก่ผู้วิจัยตลอดมา อีกทั้งยังเอื้อเฟื้ออุปกรณ์และเครื่องมือต่าง ๆ ในการทำปริญญานิพนธ์นี้ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งและขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณอาจารย์ไสว พงศ์สวัสดิ์ ที่เอื้อเฟื้ออุปกรณ์ คุณกฤษณ์ เสมอพิทักษ์ และ อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุมทุกท่าน ที่ได้ให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์และให้ความช่วยเหลือตลอดมา

ขอกราบขอบพระคุณคุณพ่อ คุณแม่ อันเป็นที่รักยิ่ง ที่สนับสนุนและเป็นแรงบันดาลใจ ในการทำปริญญานิพนธ์ฉบับนี้

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอบแต่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

คณะผู้จัดทำ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญภาพ.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและเหตุจูงใจของการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญาานิพนธ์.....	1
1.3 ขอบเขตของปริญญาานิพนธ์.....	1
1.4 ขั้นตอนการศึกษา.....	1
บทที่ 2 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับหลักการควบคุมการทรงตัวของยนต์สองล้อ.....	2
2.1 กล่าวนำ	
2.1.1 หลักการทำงานและทฤษฎีต่างๆ.....	2
2.1.2 หลักการออกแบบ.....	2
2.2 หลักการทำงานของดีซีมอเตอร์.....	3
2.3 หลักการของระบบควบคุมที่เหมาะสมที่สุด(Optimal Control System).....	4
2.3.1 หลักการออกแบบระบบควบคุม.....	4
2.3.2 ตัวประมาณค่าสเตต (States Estimator).....	9
2.3.3 ระบบคู่ (Dual System).....	16
2.4 หลักการการทำงานของไจโรสโคป.....	21
2.4.1 การควง.....	21
2.4.2 ทฤษฎีและหลักการทำงาน.....	22
2.4.3 ประโยชน์ของไจโรสโคป.....	23
2.5 หลักการทำงานของตัวหึ่งความเร่ง.....	24
2.5.1 ทฤษฎีและหลักการทำงาน.....	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.5.2. การประยุกต์ใช้งาน.....	27
บทที่ 3 การออกแบบระบบควบคุม ไมโครคอนโทรลเลอร์ วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และ การออกแบบตัวรถยนต์สองล้อ.....	31
3.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของรถยนต์สองล้อ.....	31
3.1.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของดีซีมอเตอร์.....	31
3.1.2 พฤติกรรมของ Two Wheels Vehicle.....	32
3.1.3 หลักการของ Inverted Pendulum.....	34
3.2 การออกแบบระบบควบคุม.....	36
3.3 การออกแบบโปรแกรมบนไมโครคอนโทรลเลอร์.....	39
3.3.1 ข้อมูลเบื้องต้นของไมโครคอนโทรลเลอร์แบบ dsPIC6011.....	40
3.3.2 การออกแบบโปรแกรมในไมโครคอนโทรลเลอร์.....	40
3.4 พัลส์วิดท์โมดูเลชันแอมพลิไฟเออร์ (PWMA).....	43
3.4.1 การทำงานของพัลส์วิดท์โมดูเลชันแอมพลิไฟเออร์.....	43
3.4.2 ระบบคอนโทรลความเร็วที่ใช้พัลส์วิดท์โมดูเลชันแอมพลิไฟเออร์.....	45
3.5 วงจรควบคุมการทำงานของมอเตอร์.....	47
3.6 การออกแบบตัวรถยนต์สองล้อ.....	49
3.6.1 ลักษณะทั่วไป.....	49
3.6.2 ลักษณะการติดตั้งตัวเซนเซอร์.....	50
3.6.3 ลักษณะการติดตั้งชิ้นส่วนอื่น ๆ.....	51
3.6.4 ลักษณะของตัวเซนเซอร์ที่ใช้ในรถยนต์สองล้อ.....	51
บทที่ 4 การทดลอง.....	54
4.1 การทดลองใส่แรงผลัก.....	54
4.2 การทดลองตัวตรวจจับ (Sensor).....	55
4.3 การทดลองหาผลตอบสนองของรถยนต์สองล้อ.....	56
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บรรณานุกรม.....	58
ภาคผนวก.....	60
ภาคผนวก ก.....	61
ภาคผนวก ข.....	84
ภาคผนวก ค.....	90



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 แสดงระบบการทำงานของรถยนต์สองล้อ.....	2
2.2 แสดงการออกแบบตัวควบคุมในแนวตั้งเดิม.....	4
2.3 แสดงถึงสิ่งรบกวนที่เกิดขึ้นในวงควบคุม.....	4
2.4 แสดงการออกแบบตัวควบคุมในแนวใหม่.....	4
2.5 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรและสัญญาณ.....	5
2.6 แสดงถึงลักษณะของ Generalized Plant.....	5
2.7 แสดงถึงลักษณะของ Plant.....	5
2.8 แสดงถึงลักษณะของ Weighting Functions.....	6
2.9 แสดงถึงลักษณะของระบบ LQR.....	7
2.10 แสดงถึงลักษณะของ Generalized Plant.....	8
2.11 แสดงถึงลักษณะของ Plant.....	8
2.12 แสดงถึงลักษณะของ Weighting Functions.....	8
2.13 แสดงถึงลักษณะของระบบ LQR ร่วมกับ LQE.....	9
2.14 แสดงถึงลักษณะของระบบ LQE.....	12
2.15 แสดงถึงลักษณะของระบบ LQR.....	16
2.16 แสดงถึงลักษณะของ Pressure Regulator.....	20
2.17 ภาพแสดงการหมุนและทิศทางของแรงที่กระทำกับลูกข้าง.....	21
2.18 แสดงทิศทางการหมุนและแรง.....	22
2.19 แสดงถึงดาวเทียมขึ้นไปในทิศทางเดียวกัน.....	23
2.20 แสดงพฤติกรรมความเร็ว ความเร่ง ของลูกสูบขณะเคลื่อนที่ขึ้นลง.....	24
2.21 แสดงฟังก์ชันบล็อกไดอะแกรมของตัวหั้งความเร่ง ADXL202/ADXL210.....	26
2.22 แสดงชนิดของสัญญาณเอาต์พุตของรอบการทำงาน.....	27
3.1 แบบจำลอง โครงสร้างของมอเตอร์.....	31
3.2 Free body diagram ของล้อ.....	32
3.3 Free body diagram ของโครงรถส่วนที่เป็นก้าน Pendulum.....	34
3.4 Open Loop Poles ของระบบที่ไม่อยู่ในเสถียรภาพ.....	36
3.5 Close Loop Pole ของระบบที่อยู่ในเสถียรภาพ.....	37
3.6 ผลตอบสนองของระบบ Close Loop.....	37

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 แสดงการทำงานของแอมพลิไฟแบบพัลส์วิดท์โมดูเลชัน.....	46



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญภาพ(ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.7 ผลตอบสนองเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าน้ำหนัก $q_{11}=100$ กับ $q_{33}=100$ และ $R=1$	38
3.8 ผลตอบสนองของระบบที่ $R=0.25$ $q_{11}=100$ $q_{33}=100$	38
3.9 ผลตอบสนองของระบบที่ $R=0.25$ $q_{11}=1000$ $q_{33}=100$	39
3.10 ผลตอบสนองของระบบที่ $R=0.25$ $q_{11}=100$ $q_{33}=1000$	39
3.11 dsPIC30F6010 80-Lead Plastic Thin Quad Flatpack (TQFP).....	40
3.12 แผนภาพโดยรวมของการเขียนโปรแกรม.....	41
3.13 พัลส์วิดท์โมดูลเซ็นเซอร์แอมพลิไฟเออร์สำหรับดีซีมอเตอร์.....	43
3.14 บล็อกไดอะแกรมของระบบคอนโทรลความเร็วแบบ PWM.....	45
3.15 วงจรสมมูลย์ของดีซีมอเตอร์ในระบบคอนโทรลแบบ PWM.....	47
3.16 วงจรขับกระแสตรงของมอเตอร์.....	48
3.17 ลักษณะทั่วไปของรถยนต์สองล้อ.....	49
3.18 ลักษณะการติดตั้งตัวเซนเซอร์เมื่อก้านเพนดูลัมอยู่ที่จุดสมดุล.....	50
3.19 เมื่อก้านเพนดูลัมเกิดมีสิ่งรบกวน.....	50
3.20 ลักษณะการติดตั้งอื่นๆ.....	51
3.21 ตัววัดความเร่งสองทิศทาง (Dual axis accelerometers).....	52
3.22 Gyroscope sensor.....	52
3.23 ตัววัดแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับ (tachogen).....	53
4.1 แสดงทิศทางของระบบเมื่อถูกรบกวน และพยายามปรับแก้.....	54
4.2 เส้นสีม่วงแทนการวัดจากไจโรสโคปเส้นสีเขียวแทนการวัดร่วมกันของไจโรสโคปและตัววัด ความเร่งสองทิศทาง.....	55
4.3 ผลตอบสนองของรถยนต์สองล้อ.....	56

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและเหตุจูงใจของการวิจัย

เทคโนโลยีที่เกี่ยวกับการทรงตัวของวัตุนั้น ได้มีการคิดค้นและพัฒนาให้ดีขึ้นอยู่ตลอดเวลา ซึ่งหลักการและทฤษฎีต่าง ๆ นั้น ได้ถูกนำมาใช้ประโยชน์มากมาย ไม่ว่าจะเป็น สิ่งปลูกสร้างอาคาร บ้านเรือน, หุ่นยนต์ในอุตสาหกรรม หรือ อาจเป็นยานพาหนะต่างๆ เป็นต้น

ระบบแบบอินเวอร์ทเพนดูลัม ถือว่าเป็นระบบหนึ่งที่เกี่ยวข้องกับการทรงตัวของวัตถุซึ่งได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในรูปแบบต่างๆ มากมาย ล่าสุดได้มีการนำเอาระบบนี้มาใช้กับ SEGWAY

SEGWAY เป็นยานพาหนะชนิดหนึ่งที่สามารถรักษาการทรงตัวของมันได้ แม้ว่าจะมีเพียงสองล้อก็ตาม ซึ่งทำให้ผู้วิจัยมีความสนใจเกี่ยวกับการทำงานยานพาหนะนี้ จึงได้ทำการวิจัยและสร้างรถยนต์ 2 ล้อขึ้นมาโดยใช้หลักการอินเวอร์ทเพนดูลัม

1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญาโท

ปริญญาโทนี้เป็นการศึกษา และออกแบบตัวควบคุมหุ่นยนต์ขับเคลื่อนแบบสองล้อ โดยใช้หลักการของ อินเวอร์ทเพนดูลัม เพื่อให้หุ่นยนต์นี้สามารถทรงตัวอยู่ได้โดยไม่ล้ม และเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่เราต้องการได้ โดยใช้รีโมทคอนโทรล

1.3 ขอบเขตของปริญญาโท

ปริญญาโทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบตัวควบคุมแบบออปติมอลคอนโทรล โดยอาศัยหลักการของ อินเวอร์ทเพนดูลัม และ ทฤษฎีของมอเตอร์ เพื่อใช้ในการออกแบบชุดไมโครคอนโทรลเลอร์ DsPIC (Digital Signal Processing PIC) ใช้ใจโรตโลป ซึ่งอาศัยหลักการของเพียร์โซอิเล็กตริกทำงานร่วมกับตัววัดความเร่งสองทิศทาง ประยุกต์ใช้เป็นตัวเซนเซอร์บอกความเอียง

1.4 ขั้นตอนการศึกษา

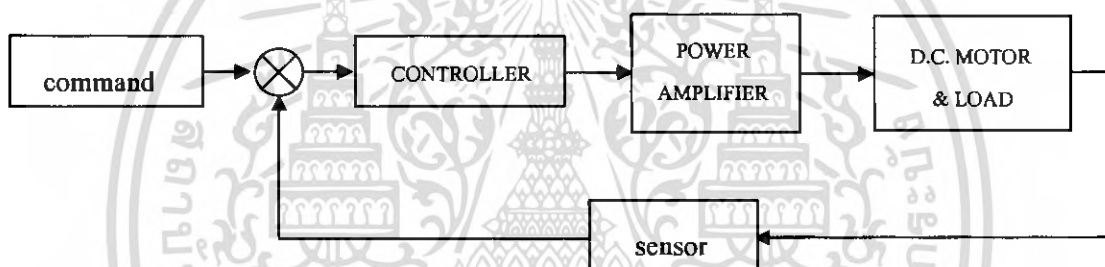
เริ่มต้นจากการศึกษาการทำงานของมอเตอร์หลักการของอินเวอร์ทเพนดูลัม และ ออกแบบระบบควบคุมแบบออปติมอลคอนโทรล โปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบเช่น โปรแกรม Solid Work Mat lab และใช้ภาษาซี เพื่อออกแบบไมโครคอนโทรลเลอร์แบบ dsPIC 30F เป็นต้น

บทที่ 2

ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับหลักการควบคุมการทรงตัวของรถยนต์ สองล้อ

2.1 กล่าวนำ

การควบคุมการทรงตัวและการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ขับเคลื่อนแบบสองล้อนั้น เป็นการรวมองค์ประกอบหลาย ๆ องค์ประกอบเข้าด้วยกัน อันได้แก่ หลักการของอินเวอร์ทเพนดูลัม หลักการของดีซีมอเตอร์ หลักการของการควบคุมแบบออปติมอล หลักการทำงานของเซนเซอร์ที่ใช้ หลักการของเพาเวอร์แอมพลิไฟเออร์ หลักการออกแบบโครงสร้างของรถ เป็นต้น ซึ่งขั้นตอนการทำงานจะแสดงผังแผนภาพต่อไปนี้



ภาพที่ 2.1 แสดงระบบการทำงานของหุ่นยนต์ขับเคลื่อนแบบสองล้อ

จากภาพที่ 2.1 แสดงให้เห็นว่าหุ่นยนต์จะทำงานได้ จำเป็นต้องรู้ถึงหลายองค์ประกอบด้วยกัน ซึ่งจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ดังนี้

2.1.1 หลักการทำงานและทฤษฎีต่างๆ ดังนี้

2.1.1.1 หลักการทำงานของดีซีมอเตอร์

- พฤติกรรมของมอเตอร์ และ โมเดลทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์

2.1.1.2 หลักการของคอนโทรลเลอร์

- หลักการของออปติมอลคอนโทรล

2.1.1.3 หลักการของเซนเซอร์แบบไจโรสโคปและการทำงาน

2.1.1.4 หลักการของวงจรถีซีไคร์มอเตอร์

2.1.1.5 หลักการของตัวหั้งความเร่ง (Accelerometer)

2.1.2 หลักการออกแบบ ดังนี้

2.1.2.1 การออกแบบโครงสร้างของรถ

- คำนึงถึงปัจจัยต่างๆ เช่น น้ำหนัก ความสูง เป็นต้น

2.1.2.2 การออกแบบคอนโทรลเลอร์

- การออกแบบ ในโปรแกรม MATLAB
- การออกแบบการเขียนโปรแกรมในไมโครคอนโทรลเลอร์

2.1.2.3 การออกแบบวงจรขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง

2.2 หลักการทำงานของดี.ซี.มอเตอร์

ดี.ซี.มอเตอร์เป็นทรานสดิวเซอร์แรงบิดซึ่งมีการออกแบบให้มีคุณลักษณะพิเศษคือ แรงบิดของเพลลาของดี.ซี.มอเตอร์จะเป็นสัดส่วน โดยตรงกับกระแสอาร์เมเจอร์แรงบิดของเพลลาของดี.ซี.มอเตอร์จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสอาร์เมเจอร์แรงบิดของเพลลาของดี.ซี.มอเตอร์จะได้จากผลระหว่างสนามแม่เหล็กและขดลวดตัวนำ หลักการแสดงในรูปที่ 2.4 ในที่นี้กระแสที่ไหลในขดลวดตัวนำจะสร้างฟลักซ์ที่ประกอบด้วยเส้นแรงแม่เหล็ก ϕ และขดลวดตัวนำเหล่านั้นอยู่ห่างจากศูนย์กลางการหมุนเท่ากับ r ความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดของเพลลาและกระแสเท่ากับ

$$T = K\phi I$$

เมื่อ	T	คือ แรงบิดของเพลลา มีหน่วยเป็นนิวตัน – เมตร
	ϕ	คือ เส้นแรงแม่เหล็ก มีหน่วยเป็นเวเบอร์
	I	คือ กระแสเป็นแอมแปร์
	K	คือ ตัวคงที่

ดังนั้นแรงบิดของเพลลาจะเป็นสัดส่วน โดยตรงกับผลคูณของเส้นแรงแม่เหล็กและกระแส เมื่อขดลวดตัวนำเคลื่อนที่ในสนามแม่เหล็กก็จะทำให้เกิดโวลต์เตจตกคร่อมตัวมันเองโวลต์เตจนี้จะ เป็นสัดส่วนกับความเร็วของเพลลาของมอเตอร์และด้านการไหลของกระแสความสัมพันธ์ระหว่างโวลต์เตจย้อนกลับนี้และความเร็วของเพลลามอเตอร์คือ

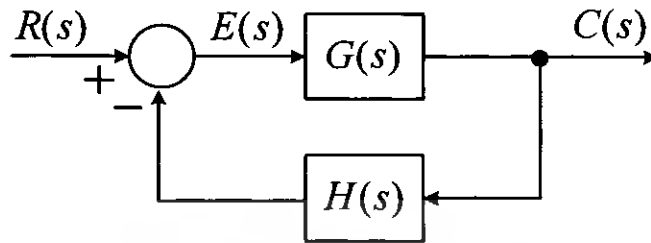
$$E = K\phi\omega$$

เมื่อ	E	คือ โวลต์เตจย้อนกลับ emf มีหน่วยเป็นโวลต์
	ϕ	คือ เส้นแรงแม่เหล็ก มีหน่วยเป็นเวเบอร์
	ω	คือ ความเร็วของมอเตอร์ มีหน่วยเป็นเรเดียน / วินาที

2.3 หลักการของระบบควบคุมที่เหมาะสมที่สุด(Optimal Control System)

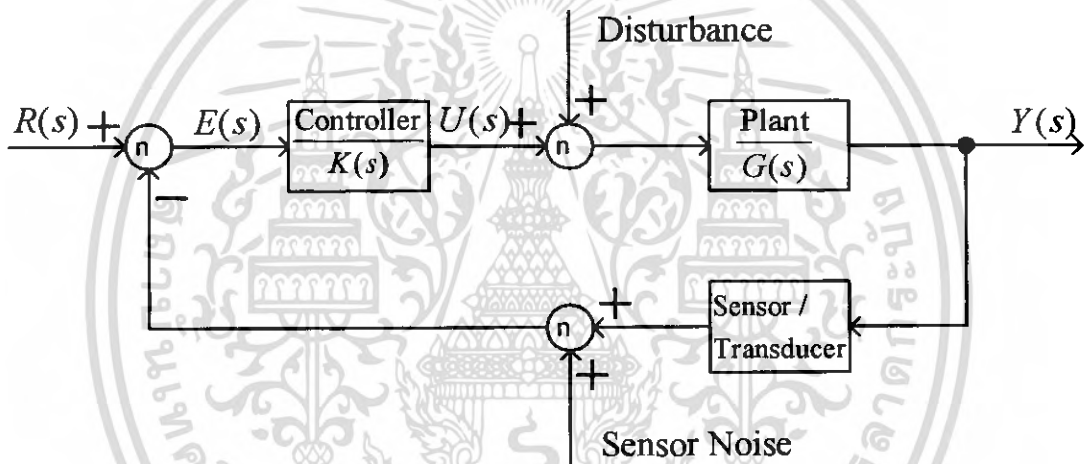
2.3.1 หลักการออกแบบระบบควบคุม

การออกแบบตัวควบคุมในแนวตั้งเดิม นั้น ถ้าเราเขียนแผนภาพกรอบง่าย ๆ จะได้



ภาพที่ 2.2 แสดงการออกแบบตัวควบคุมในแนวตั้งเดิม

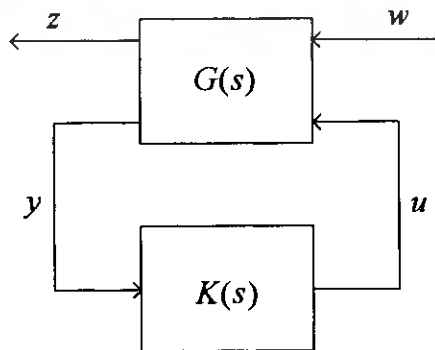
ถ้าพิจารณาว่ามี สิ่งรบกวน ในวงควบคุม เราก็อาจเขียนแผนภาพกรอบใหม่ ได้เป็น



ภาพที่ 2.3 แสดงถึงสิ่งรบกวนที่เกิดขึ้นในวงควบคุม

การออกแบบตัวควบคุมในแนวใหม่ แสดงด้วยแผนภาพกรอบง่าย ๆ ที่ประกอบด้วย

- 1) Generalized Plant $G(s)$ และ
- 2) ตัวควบคุม $K(s)$ ที่ต้องการออกแบบ



ภาพที่ 2.4 แสดงการออกแบบตัวควบคุมในแนวใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

z error signal.	w { disturbances, sensor noise, commands.
y measured variables.	u control input.

ภาพที่ 2.5 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรและสัญญาณ

$$\text{Generalized Plant; } G(s) \Leftrightarrow \begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ z(t) \\ y(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B_1 & B_2 \\ C_1 & 0 & D_{12} \\ C_2 & D_{21} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ w(t) \\ u(t) \end{bmatrix}$$

ภาพที่ 2.6 แสดงถึงลักษณะของ Generalized Plant

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}x(t) &= Ax(t) + B_1w(t) + B_2u(t) \\ z(t) &= C_1x(t) + D_{12}u(t) \\ y(t) &= C_2x(t) + D_{21}w(t) \end{aligned}$$

$w(t) \rightarrow$	$\frac{d}{dt}x(t) = Ax(t) + B_1w(t) + B_2u(t)$	$\rightarrow z(t)$
	$z(t) = C_1x(t) + D_{12}u(t)$	
$u(t) \rightarrow$	$y(t) = C_2x(t) + D_{21}w(t)$	$\rightarrow y(t)$

Generalized Plant $G(s)$ ประกอบไปด้วย

Plant

$\frac{d}{dt}x(t) = \boxed{A}x(t) +$		$+ \boxed{B_2}u(t)$
$y(t) = \boxed{C_2}x(t) +$		

ภาพที่ 2.7 แสดงถึงลักษณะของ Plant

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Weighting Functions

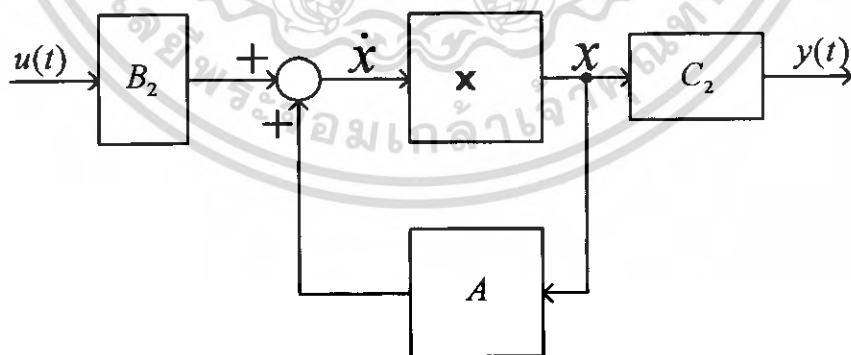
$$z(t) = \begin{array}{|c|} \hline \boxed{B_1} w(t) \\ \hline \boxed{C_1} x(t) \\ \hline \boxed{D_{21}} w(t) \\ \hline \end{array} + \boxed{D_{12}} u(t)$$

ภาพที่ 2.8 แสดงถึงลักษณะของ Weighting Functions

$$u(t) \rightarrow \begin{array}{|c|} \hline \frac{d}{dt} x(t) = Ax(t) + \quad + B_2 u(t) \\ \hline y(t) = C_2 x(t) + \quad \rightarrow y(t) \\ \hline \end{array}$$

Plant Dynamics

$$u(t) \rightarrow \begin{array}{|c|} \hline \frac{d}{dt} x(t) = Ax(t) + B_2 u(t) \\ \hline y(t) = C_2 x(t) \\ \hline \end{array} \rightarrow y(t)$$



ระบบที่ได้รับการปรับ ดัชนีสมรรถนะ (Performance Indexes) ให้มีค่าต่ำที่สุด เรามักเรียก
กันว่า ระบบควบคุมที่เหมาะสมหรือดีที่สุด

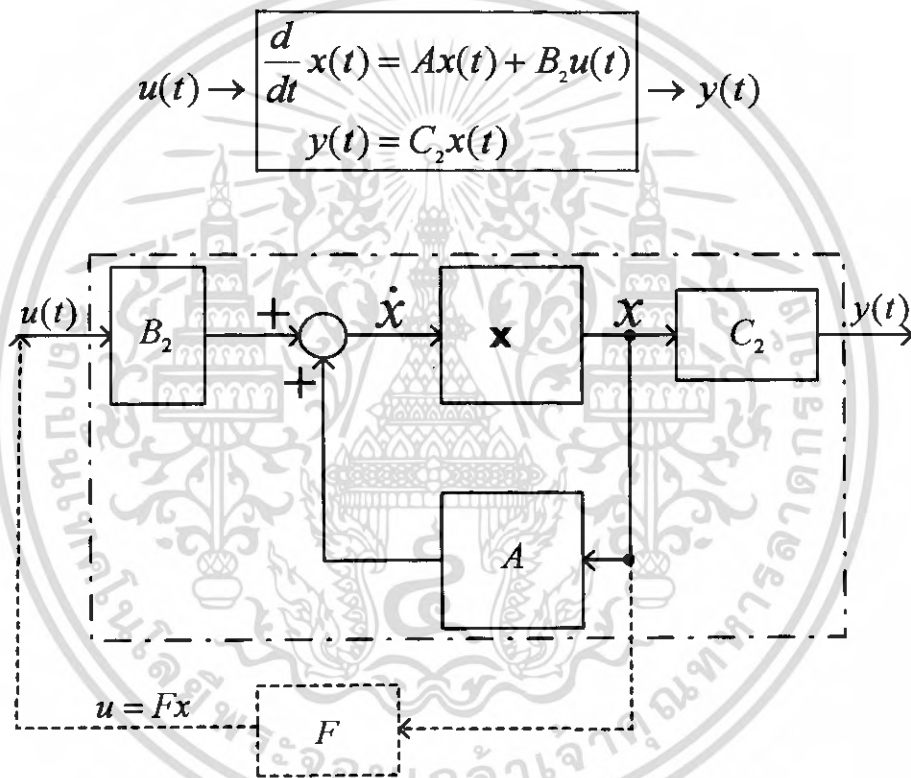
โดยทั่วไป ดัชนีสมรรถนะ ของระบบเขียนได้เป็น $J = \int_0^T g(x, u, t) dt$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{array}{l}
 u_1 \rightarrow \\
 u_2 \rightarrow \\
 \vdots \\
 u_m \rightarrow
 \end{array}
 \begin{array}{|c}
 \hline
 \text{Control} \\
 \text{system} \\
 \hline
 \end{array}
 \begin{array}{l}
 \rightarrow x_1 \\
 \rightarrow x_2 \\
 \vdots \\
 \rightarrow x_n
 \end{array}
 \left| \begin{array}{l}
 \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & \cdots & f_{1n} \\ f_{21} & & & f_{2n} \\ \vdots & & & \vdots \\ f_{m1} & & \cdots & f_{mn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix}
 \end{array}
 \right.$$

$$\boxed{u = Fx}$$

การหา $u = Fx$ ที่เป็นฟังก์ชันของ x เพื่อให้ได้ J ต่ำที่สุด



ภาพที่ 2.9 แสดงถึงลักษณะของระบบ LQR

เราจะไปหา P จากสมการริกคาตี (Riccati Equation)

$$\boxed{A^T P + PA - PB_2 R^{-1} B_2^T P + Q = 0} \quad \text{คำตอบ (Solutions) ของ } P \text{ ที่ได้จากการกำหนด}$$

Weighting functions Q, R จะเป็นกฎการควบคุมที่เหมาะสมที่สุด

$$\boxed{u = Fx = \underbrace{-R^{-1} B_2^T P}_{F} x}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณา

$$z(t) = C_1 x(t) + D_{12} u(t) = \begin{bmatrix} C_1 & D_{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ u(t) \end{bmatrix}$$

$$z^T(t) = [C_1 x(t) + D_{12} u(t)]^T = \begin{bmatrix} x(t) \\ u(t) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} C_1 & D_{12} \end{bmatrix}^T$$

$$z^T z = [C_1 x + D_{12} u]^T [C_1 x + D_{12} u] = (C_1^T x^T + D_{12}^T u^T)(C_1 x + D_{12} u)$$

$$= x^T C_1^T C_1 x + u^T D_{12}^T D_{12} u + x^T C_1^T D_{12} u + u^T D_{12}^T C_1 x$$

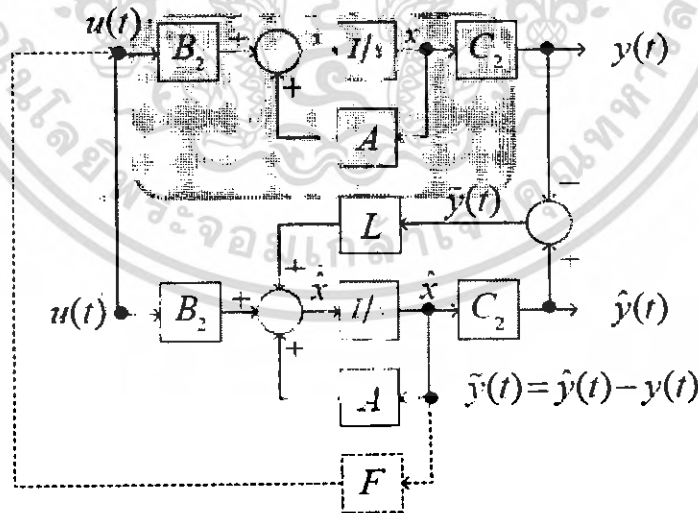
$$= x^T C_1^T C_1 x + u^T D_{12}^T D_{12} u + \overbrace{(x^T \underbrace{C_1^T D_{12}}_{=0} u + u^T \underbrace{D_{12}^T C_1}_{=0} x)}^{\text{cross-term}}$$

$$z^T z = x^T \underbrace{C_1^T C_1}_{\equiv Q} x + u^T \underbrace{D_{12}^T D_{12}}_{\equiv R} u \equiv x^T Q x + u^T R u$$

$$\int_0^{\infty} (z^T z) dt = \|z(t)\|_2^2$$

$$\|z(t)\|_2^2 \equiv \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u) dt = J$$

2.3.2 ตัวประมาณค่าสแตต (States Estimator)



ภาพที่ 2.13 แสดงถึงลักษณะของระบบ LQR ร่วมกับ LQE

เราต้องการสร้างระบบทางพลศาสตร์ หรือที่ทราบกันว่า คือ ตัวสังเกต ที่สามารถประมาณค่าสแตตภายใน (Internal State) $x(t)$ จากข้อมูลความรู้ที่ให้มา อันได้แก่ ปริมาณเข้า $u(t)$ และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาณออก $y(t)$ โดยงานนี้สามารถที่จะสำเร็จลุล่วงได้ โดยอาศัยแบบแผนดังที่แสดงในรูปข้างบน

ซึ่งรูปข้างบนแสดงถึงการแยกออกเป็น 2 ส่วน อันได้แก่ ส่วนที่เป็นรูปแบบทางพลศาสตร์ของพลานท์จริงๆ (A, B_2, C_2) และส่วนที่ทำการแก้ไขความคลาดเคลื่อน $L\tilde{y} = L(\hat{y} - y)$ สำหรับเมตริกซ์ L นั้น เราเรียกว่า อัตราขยายของตัวสังเกต เราจะสังเกตได้ว่า ตัวสังเกตจะมี n สเตตภายใน \hat{x} และ สอง ปริมาณเข้า ได้แก่ $u(t)$ และ $y(t)$ เรากำลังจะแสดงให้เห็นว่า \hat{x} นั้น จะให้ค่าประมาณของทุกสเตต $x(t)$ ถ้า L ถูกเลือกอย่างถูกต้อง ดังนั้น \hat{x} ก็คือ สเตตที่ประมาณ และปริมาณออกของตัวสังเกตนั่นเอง

สมการสเตตของตัวสังเกตคือ

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + B_2u + L\tilde{y} = A\hat{x} + B_2u + L(\hat{y} - y)$$

หรือ

$$\dot{\hat{x}} = (A + LC_2)\hat{x} + B_2u - Ly$$

นี่คือระบบทางพลศาสตร์อันดับที่ n ที่มีสเตตเริ่มต้น (Initial State) $\hat{x}(0)$ เท่ากับค่าประมาณเริ่มต้นของสเตต ส่วนเมตริกซ์ L ที่เป็นอัตราขยายของตัวสังเกตนั้น เราจะต้องเลือกค่าของมัน เพื่อที่ว่า ถึงแม้ค่าประมาณเริ่มต้น $\hat{x}(0)$ จะไม่เท่ากับสเตตเริ่มต้นจริง $x(0)$ ครั้นเวลาผ่านไป สเตตที่ประมาณ $\hat{x}(t)$ จะลู่เข้าหาสเตตจริง $x(t)$

ปริมาณ $\tilde{y}(t) = \hat{y}(t) - y(t)$ นั้นเราจะเรียกว่า ความคลาดเคลื่อนของการประมาณค่าปริมาณออก (output estimation error) ในการเลือก L เราจะนิยามให้ ความคลาดเคลื่อนของการประมาณค่าสเตต (state estimation error) $\tilde{x}(t) = \hat{x}(t) - x(t) = e(t)$ และเขียนพลศาสตร์ของมันได้ดังนี้

$$\begin{aligned}\dot{\tilde{x}} &= \dot{\hat{x}} - \dot{x} = \dot{e} \\ &= [A\hat{x} + B_2u + L(\hat{y} - y)] - [Ax + B_2u] \\ &= A(\hat{x} - x) + L(\hat{y} - y) \\ &= A(\hat{x} - x) + LC_2\hat{x} - Ly \\ &= A(\hat{x} - x) + LC_2\hat{x} - LC_2x \\ &= A(\hat{x} - x) + LC_2(\hat{x} - x) \\ &= (A + LC_2)(\hat{x} - x)\end{aligned}$$

หรือ

$$\dot{\tilde{x}} = (A + LC_2)\tilde{x} \equiv A_o\tilde{x}$$

เราจะสังเกตได้ว่าปริมาณควบคุมทางเข้า (Control Input) u ไม่ปรากฏให้เราเห็นเลยจากการหักล้างกันเอง ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากว่าปริมาณเข้า u ได้ถูกป้อนเข้าตรงๆ เข้าไปใน ตัวสังเกต โดยผ่านเมตริกซ์ B_2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการนี้เป็นที่ทราบกันก็คือ ความคลาดเคลื่อนพลศาสตร์ (error dynamics) ซึ่งหลายๆ ที่มาในทฤษฎีระบบควบคุมป้อนกลับ แขนงอยู่บนจุดสำคัญในเรื่องของการวิเคราะห์ความคลาดเคลื่อนพลศาสตร์ เช่นวิชาที่เกี่ยวกับการวัดทางวิศวกรรม (Engineering Measurements) เป็นต้น จากสมการนี้ ($\dot{\tilde{x}} = (A + LC_2)\tilde{x} \equiv A_o\tilde{x}$) เราจะเห็นได้อย่างง่ายดายโดยเลขที่ทราบเท่าที่เราเลือกค่าอัตราขยายของตัวสังเกต L เพื่อที่ว่าเมตริกซ์วงปิดของตัวสังเกต (closed-loop observer matrix) จะได้มีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับ (asymptotically stable) กล่าวคือความคลาดเคลื่อนของการประมาณ (estimation error) $\tilde{x}(t)$ จะเข้าหาศูนย์อย่างเส้นกำกับ (zero asymptotically) เมื่อไรก็ตามที่ความคลาดเคลื่อนเริ่มต้นของการประมาณ (initial estimation error) $\tilde{x}(0) = \hat{x}(0) - x(0)$ ได้เกิดขึ้น

จะว่าไปแล้ว มันก็ไม่ได้เป็นการยากเลย ในการเลือกค่าของ L เพื่อให้ $(A + LC_2)$ มีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับ (A.S.) ถ้าเราเปรียบเทียบปัญหานี้ กับ ปัญหาของการเลือกค่าอัตราขยายของตัวแปรสแตตป้อนกลับ (state variable feedback; SVFB) F เพื่อว่า

$$A_c = (A + B_2F)$$

จะได้มีเสถียรภาพแบบเชิงเส้นกำกับ ปัญหาในการออกแบบตัวสังเกตนั้น การออกแบบเพื่อหาค่าของเมตริกซ์ L จะอยู่ทางด้านซ้ายมือ (ของ C_2 ใน $(A + LC_2)$) ในขณะที่ ปัญหาของการออกแบบค่าอัตราขยายของตัวแปร สแตตป้อนกลับ F นั้น อยู่ทางด้านขวามือ (ของ B_2 ใน $(A + B_2F)$) ฉะนั้นในตอนี้ เราก็สามารถที่จะมองปัญหาของการหา L ได้ในลักษณะเดียว เช่นกันกับที่ผ่านมา โดยการสลับตำแหน่ง (transposition) ของเมตริกซ์

$$A_o^T = (A + LC_2)^T = A^T + C_2^T L$$

ขณะนี้ สมการข้างบน เมื่อเราดูแล้ว จะเห็นได้ว่ามันก็เหมือนกับปัญหาของการเลือกค่าอัตราขยายของตัวแปรสแตตป้อนกลับ F เพราะปัญหาของการออกแบบหาค่าเมตริกซ์อัตราขยาย L^T ในตอนนี้ มันก็อยู่ทางด้านขวามือของ C_2^T ใน $(A^T + C_2^T L)$ เหมือน F ที่อยู่ทางด้านขวามือของ B_2 ใน $(A + B_2F)$ จะอย่างไรก็ตาม เราเห็นได้แล้วว่า ปัญหาของการออกแบบเพื่อเลือกค่าอัตราขยายของตัวแปรสแตตป้อนกลับ F นั้น ใช้ (A, B_2) ในขณะที่ การออกแบบตัวสังเกต ใช้ (A, C_2) จริงๆ แล้ว ทั้งสองปัญหานี้ มีลักษณะเหมือนกัน กล่าวคือ ถ้าเราเปรียบเทียบ การออกแบบอัตราขยายของตัวแปรสแตตป้อนกลับที่เกี่ยวข้องกับ (A, B_2, F) ด้วย (A^T, C_2^T, L) ในการออกแบบตัวสังเกต

ดังนั้น การออกแบบตัวสังเกต เพื่อให้ระบบมีเสถียรภาพด้วย วิธีการหนึ่ง จึงอาจทำได้โดย

- เปลี่ยนชื่อจาก (A^T, C_2^T) ไปเป็น (A, B_2) - ใช้เทคนิคในการออกแบบเพื่อหาค่าอัตราขยายของตัวแปรสแตตป้อนกลับเพื่อให้ระบบมีเสถียรภาพ F โดยวิธีการใดวิธีการหนึ่ง เช่น

เทคนิคในการวางตำแหน่งโพล (Poles Assignment or Poles Placement) หรือไม่ก็อาจจะใช้เทคนิคในการหาอัตราขยาย F ที่เหมาะสมที่สุด จากการที่เราได้วางเงื่อนไขไว้แล้ว

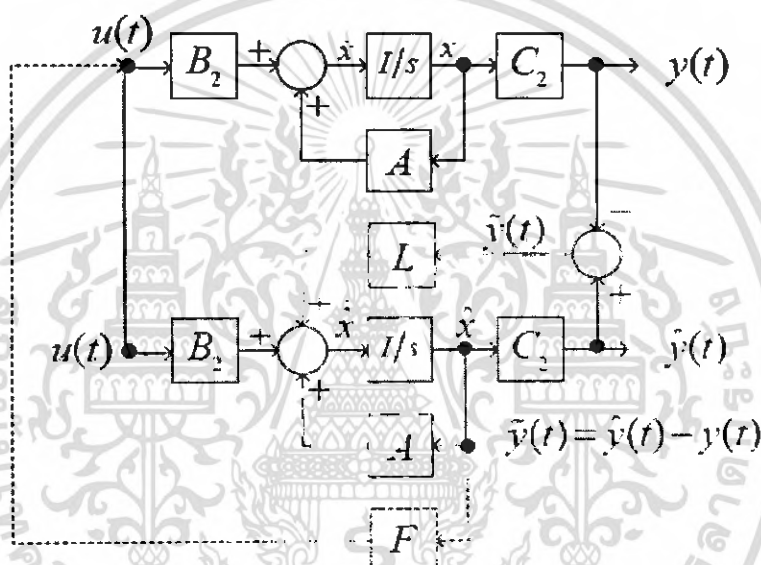
- เปลี่ยนชื่อจาก F^T ไปเป็น L

จากที่ผ่านมา เรามีสมการสแตตของตัวสังเกตเป็น

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + B_2u + L\tilde{y} = A\hat{x} + B_2u + L(\hat{y} - y)$$

หรือ

$$\dot{\hat{x}} = (A + LC_2)\hat{x} + B_2u - Ly$$



ภาพที่ 2.14 แสดงถึงลักษณะของระบบ LQE

ในการออกแบบตัวควบคุมที่เหมาะสมที่สุด โดยการป้อนกลับด้วยอัตราขยายเตต F ไปเป็นปริมาณเข้า $u = Fx$ ให้แก่พลานท์ เพื่อให้ได้ดัชนีสมรรถนะ J มีค่าต่ำสุด เรียกว่า “LQR”

เดิมทีนั้น ยังไม่มีตัวสังเกตหรือตัวประมาณค่าสแตต เราจึงป้อนกลับจากการวัดสแตต x ตรงๆ มาบัดนี้ เรามีตัวประมาณค่าสแตต \hat{x} นั้นแล้ว ซึ่งค่าประมาณของ x ก็คือ \hat{x} ถ้าหากว่าเราใช้วิธีการหาอัตราขยาย L เช่นเดียวกับที่หา F ใน “LQR” แล้ว เราจะเรียกมันว่า Linear Quadratic Estimator (LQE) และถ้าเราใช้การป้อนกลับด้วยอัตราขยายสแตต F กับ \hat{x} เพื่อไปเป็นปริมาณเข้า $u = F\hat{x}$ ให้แก่พลานท์ เราจะเรียกตัวควบคุมที่มีทั้ง LQE และ LQR รวมกันนี้ว่า Linear Quadratic Gaussian (LQG) Controller ดังนั้น เมื่อเราแทนค่า $u = F\hat{x}$ (โดยที่มันคือปริมาณออกของ ตัวควบคุม LQG) ในสมการสมการสแตตของตัวสังเกต จะได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}} &= (A + LC_2)\hat{x} + B_2u - Ly \\ \dot{\hat{x}} &= (A + B_2F + LC_2)\hat{x} - Ly\end{aligned}$$

สรุป สมการสแตตและสมการปริมาณออก ของตัวควบคุม LQG คือ

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}} &= (A + B_2F + LC_2)\hat{x} - Ly \\ u &= F\hat{x}\end{aligned}$$

สามารถเขียนในรูปชวเลข (Shorthand) ได้เป็น

$$y(t) \rightarrow \left[\begin{array}{c|c} A + B_2F + LC_2 & -L \\ \hline F & 0 \end{array} \right] \rightarrow u(t)$$

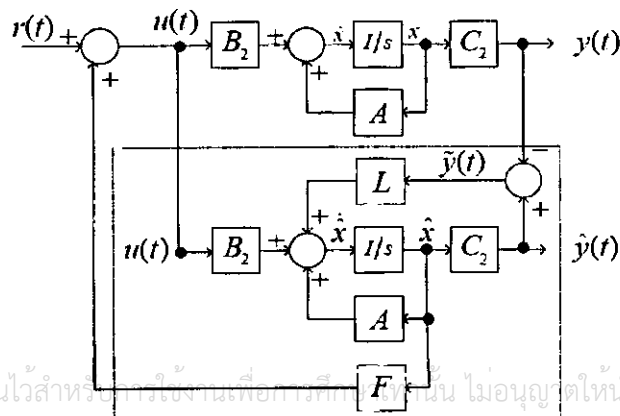
ซึ่งตัวควบคุม LQG นี้ จะออกแบบเพื่อนำไปควบคุมพลานท์

$$\begin{aligned}u(t) \rightarrow \left[\begin{array}{l} \frac{d}{dt} x(t) = Ax(t) + B_2u(t) \\ y(t) = C_2x(t) \end{array} \right] \rightarrow y(t)\end{aligned}$$

ต่อไป ดังนี้

$$y(t) \rightarrow \left[\begin{array}{c|c} A + B_2F + LC_2 & -L \\ \hline F & 0 \end{array} \right] \rightarrow u(t) \rightarrow \left[\begin{array}{c|c} A & B_2 \\ \hline C_2 & 0 \end{array} \right] \rightarrow y(t)$$

ระบบที่มีปริมาณเข้า $r(t)$



ความคลาดเคลื่อนของการประมาณค่าปริมาณออก (Output estimation error)

$$\tilde{y} = \hat{y} - y$$

ความคลาดเคลื่อนของการประมาณค่าสแตต (state estimation error)

$$\tilde{x} = \hat{x} - x = e$$

ดังนั้น อนุพันธ์ ของความคลาดเคลื่อน หรือความคลาดเคลื่อนทางพลศาสตร์

$$\dot{\tilde{x}} = \dot{\hat{x}} - \dot{x} = \dot{e}$$

แต่จากที่สมการสแตตของตัวประมาณ

$$\dot{\hat{x}} = (A + LC_2)\hat{x} + B_2u - Ly$$

และสมการสแตตของระบบทางพลศาสตร์

$$\dot{x} = Ax + B_2u$$

เราจึงมาถึงตรงที่ว่า

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{x}} &= \dot{\hat{x}} - \dot{x} = \dot{e} \\ &= [(A + LC_2)\hat{x} + B_2u - Ly] - [Ax + B_2u] \\ \dot{\tilde{x}} &= A\hat{x} + LC_2\hat{x} - Ly - Ax \\ &= A(\hat{x} - x) + LC_2\hat{x} - Ly \\ &= A(\hat{x} - x) + LC_2\hat{x} - LC_2x \\ &= A(\hat{x} - x) + LC_2(\hat{x} - x) \\ &= (A + LC_2)(\hat{x} - x) \\ &= (A + LC_2)\tilde{x} \end{aligned}$$

เมื่อ $u = r(t) + F\hat{x}$ จะได้

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + B_2u, \quad u = r(t) + F\hat{x} \\ &= Ax + B_2r(t) + B_2F\hat{x}, \quad \hat{x} = \tilde{x} + x \\ &= Ax + B_2r(t) + B_2F(\tilde{x} + x) \\ \dot{x} &= (A + B_2F)x + B_2F\tilde{x} + B_2r(t) \end{aligned}$$

ระบบวงปิด ที่ประกอบด้วย พลานท์ และ ตัวควบคุม จะมีสมการสแตต เป็น

$$\begin{aligned}\dot{x} &= (A + B_2 F) x + B_2 F \tilde{x} + B_2 r(t) \\ \dot{\tilde{x}} &= (A + LC_2) \tilde{x}\end{aligned}$$

และถ้าพิจารณาว่าปริมาณออกของพลานท์ เป็นปริมาณออก แล้ว จะได้

$$\begin{aligned}\dot{x} &= (A + B_2 F) x + B_2 F \tilde{x} + B_2 r(t) \\ \dot{\tilde{x}} &= (A + LC_2) \tilde{x}\end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{\tilde{x}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (A + B_2 F) & (B_2 F) \\ 0 & (A + LC_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \tilde{x} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_2 \\ 0 \end{bmatrix} r(t)$$

$$y = [C_2 \quad 0] \begin{bmatrix} x \\ \tilde{x} \end{bmatrix} = C_2 x$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนของพลานท์

$$u(t) \rightarrow \begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + B_2 u(t) \\ y(t) = C_2 x(t) \end{cases} \rightarrow y(t)$$

$$U(s) \rightarrow C_2 (sI - A)^{-1} B_2 \rightarrow Y(s)$$

ฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด

$$\begin{aligned}H(s) &= [C_2 \quad 0] \begin{bmatrix} sI - (A + B_2 F) & -(B_2 F) \\ 0 & sI - (A + LC_2) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} B_2 \\ 0 \end{bmatrix} \\ &= C_2 [sI - (A + B_2 F)]^{-1} B_2\end{aligned}$$

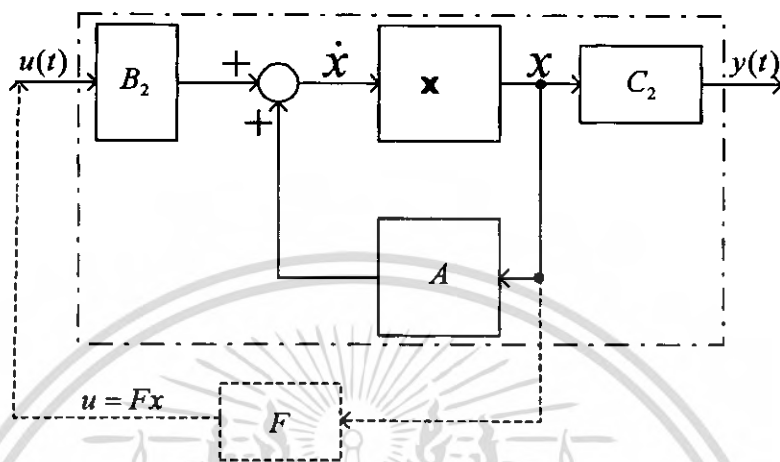
ความเป็นทวิ และความสามารถสังเกต (Duality and Observables)

ถ้าให้ พลานท์ (A, B_2, C_2) มา จะเป็นที่ยูกันเลยว่า พลานท์ (A^T, C_2^T, B_2^T) ก็คือระบบคู่ สำหรับ (A, B_2, C_2) ในระบบคู่ที่ว่ามี ผลที่เกิดขึ้นเนื่องมาจาก ปริมาณเข้า และปริมาณออก สามารถแลกเปลี่ยนระหว่างกันและกัน ได้เป็นอย่างดี

ระบบ (A, B_2, C_2) จะเรียกได้ว่า เข้าถึงได้ (reachable) ถ้าหากว่าปริมาณควบคุมทางเข้า (control input) u สามารถที่จะเลือกขับ (drive) สเตรตเริ่มต้น (initial state) $x(0)$ ใดๆ ไปยัง สเตรตสุดท้าย (final state) $x(T)$ ที่เราต้องการ ที่เวลาสุดท้าย (final time) T ได้ เรารู้ว่า ถ้าระบบสามารถเข้าถึงได้แล้ว เราก็สามารถที่จะกำหนดตำแหน่งหรือวาง โพล (poles) ณ ที่ใดๆ ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามอำเภอใจของเรา นอกจากนี้เรายังรู้อีกว่า ถ้าระบบสามารถเข้าถึงได้แล้ว เราสามารถออกแบบเพื่อเลือกค่าอัตราขยายของตัวแปรสแตตบ้อนกลับ F ของปัญหา LQR (Linear Quadratic Regulator) โดยสรุปได้ดังนี้



ภาพที่ 2.15 แสดงถึงลักษณะของระบบ LQR

LQR เป็นปัญหาของการหา F สำหรับระบบ (A, B_2) ซึ่ง $u = Fx$ เพื่อให้ $J = \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u) dt = \int_0^{\infty} (x^T C_1^T C_1 x + u^T D_{12}^T D_{12} u) dt$ มีค่าต่ำที่สุด โดย $F = -R^{-1} B_2^T P$ หาได้จาก P ซึ่งเป็นคำตอบของสมการรีกาคติ

$$A^T P + P A - P B_2 R^{-1} B_2^T P + Q = 0$$

เมื่อ A, B_2 ทราบค่าได้จากสมการสแตตของระบบ ($\dot{x} = Ax + B_2 u$) และเมตริกซ์ Q, R เป็นน้ำหนักที่เราให้ความสำคัญแก่การเบี่ยงเบนของสแตตจากจุดกำเนิด ($x^T Q x$) และค่าใช้จ่ายในการควบคุม ($u^T R u$) ตามลำดับ

2.3.3 ระบบคู่ (Dual System)

$$(A, B_2, C_2) \Leftrightarrow (A^T, C_2^T, B_2^T)$$

จากที่ว่าในระบบคู่ นั้น ผลที่เกิดขึ้นเนื่องมาจาก ปริมาณเข้า และปริมาณออก สามารถแลกเปลี่ยนระหว่างกันและกันได้เป็นอย่างดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$G(s) \begin{cases} \frac{d}{dt} x(t) = Ax(t) + B_1 w(t) + B_2 u(t) \\ z(t) = C_1 x(t) + D_{12} u(t) \\ y(t) = C_2 x(t) + D_{21} w(t) \end{cases}$$

Generalized Plant $G(s)$ คือ
$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ z(t) \\ y(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boxed{A} & B_1 & \boxed{B_2} \\ \hline C_1 & 0 & D_{12} \\ C_2 & D_{21} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ w(t) \\ u(t) \end{bmatrix}$$

LQR เป็นปัญหาของการหา F สำหรับระบบ (A, B_2) เพื่อที่ว่า

$$J_c = \int_0^{\infty} (x^T C_1^T C_1 x + u^T D_{12}^T D_{12} u) dt \text{ มีค่าต่ำที่สุด}$$

ระบบคู่ของ $G(s)$ คือ $G^T(s)$ หรือ
$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ z(t) \\ y(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boxed{A^T} & C_1^T & \boxed{C_2^T} \\ \hline B_1^T & 0 & D_{21}^T \\ B_2^T & D_{12}^T & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ w(t) \\ u(t) \end{bmatrix}$$

LQE เป็นปัญหาของการหา L สำหรับระบบ (A^T, C_2^T) เพื่อที่ว่า

$$J_E = \int_0^{\infty} (x^T B_1 B_1^T x + u^T D_{21}^T D_{21} u) dt \text{ มีค่าต่ำที่สุด}$$

$$G(s) \begin{cases} \frac{d}{dt} x(t) = Ax(t) + B_1 w(t) + B_2 u(t) \\ z(t) = C_1 x(t) + D_{12} u(t) \\ y(t) = C_2 x(t) + D_{21} w(t) \end{cases}$$

LQG เป็นปัญหาของ LQR และ LQE รวมกัน เพื่อที่ว่า ทั้ง

$$\left. \begin{aligned} J_c &= \int_0^{\infty} (x^T C_1^T C_1 x + u^T D_{12}^T D_{12} u) dt \\ J_E &= \int_0^{\infty} (x^T B_1 B_1^T x + u^T D_{21}^T D_{21} u) dt \end{aligned} \right\} \text{มีค่าต่ำที่สุด}$$

$$G(s) \begin{cases} \frac{d}{dt}x(t) = Ax(t) + B_1w(t) + B_2u(t) \\ z(t) = C_1x(t) + D_{12}u(t) \\ y(t) = C_2x(t) + D_{21}w(t) \end{cases}$$

สมการสเตตและสมการปริมาณออก ของตัวควบคุม LQG คือ

$$\begin{aligned} \dot{\hat{x}} &= (A + B_2F + LC_2)\hat{x} - Ly \\ u &= F\hat{x} \end{aligned}$$

$$y(t) \rightarrow \left[\begin{array}{c|c} A + B_2F + LC_2 & -L \\ \hline F & 0 \end{array} \right] \rightarrow u(t)$$

สรุป LQR ทา F ; LQE ทา L ; LQG ทาทั้ง F และ L

จากที่เราเคยพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีสมรรถนะ J และความคลาดเคลื่อน

$z(t)$

$$z(t) = C_1x(t) + D_{12}u(t) = \begin{bmatrix} C_1 & D_{12} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ u(t) \end{bmatrix}$$

$$z^T(t) = [C_1x(t) + D_{12}u(t)]^T = \begin{bmatrix} x(t) \\ u(t) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} C_1 & D_{12} \end{bmatrix}$$

$$z^T z = [C_1x + D_{12}u]^T [C_1x + D_{12}u] = (C_1^T x^T + D_{12}^T u^T)(C_1x + D_{12}u)$$

$$= x^T C_1^T C_1 x + u^T D_{12}^T D_{12} u + x^T C_1^T D_{12} u + u^T D_{12}^T C_1 x$$

$$= x^T C_1^T C_1 x + u^T D_{12}^T D_{12} u + \underbrace{(x^T \underbrace{C_1^T D_{12}}_{=0} u + u^T \underbrace{D_{12}^T C_1}_{=0} x)}_{\text{cross-term}}$$

$$z^T z = x^T \underbrace{C_1^T C_1}_{\equiv Q} x + u^T \underbrace{D_{12}^T D_{12}}_{\equiv R} u \equiv x^T Q x + u^T R u$$

$$\int_0^{\infty} (z^T z) dt = \|z(t)\|_2^2$$

$$\|z(t)\|_2^2 \equiv \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u) dt = J$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราจะเห็นได้ว่า ตัวควบคุม LQR ซึ่งเป็นส่วนที่ออกแบบเพื่อหาค่า F ของตัวควบคุม LQG นั้น เป็นกรณีพิเศษของ \mathcal{H}_2 Optimal Control เพราะตัด cross-term ของ $z^T z$ ทิ้งไป เราจึงเรียก ตัวควบคุม LQG ว่าเป็น \mathcal{H}_2 Basic Problem วงควบคุมที่ประกอบไปด้วยตัวควบคุม LQG และ ฟลანท์ นั้น จะมีฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดเป็น

$$\begin{aligned} H(s) &= [C_2 \quad 0] \begin{bmatrix} sI - (A + B_2 F) & -(B_2 F) \\ 0 & sI - (A + LC_2) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} B_2 \\ 0 \end{bmatrix} \\ &= C_2 [sI - (A + B_2 F)]^{-1} B_2 \end{aligned}$$

เมื่อระบบวงปิดเป็น

$$\begin{aligned} \dot{x} &= (A + B_2 F)x + B_2 F\tilde{x} + B_2 r(t) \\ \dot{\tilde{x}} &= (A + LC_2)\tilde{x} \\ \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{\tilde{x}} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} (A + B_2 F) & (B_2 F) \\ 0 & (A + LC_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \tilde{x} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_2 \\ 0 \end{bmatrix} r(t) \\ y &= [C_2 \quad 0] \begin{bmatrix} x \\ \tilde{x} \end{bmatrix} = C_2 x \end{aligned}$$

จะเห็นได้ว่าเมตริกซ์ระบบ (System Matrix) วงปิด คือ

$$A_{LQG} = \begin{bmatrix} (A + B_2 F) & (B_2 F) \\ 0 & (A + LC_2) \end{bmatrix}$$

ดังนั้น เราสามารถหาโพลวงปิด (closed-loop poles) ได้จาก

$$\Delta(s) = |sI_{2n} - A_{LQG}| = \begin{vmatrix} sI_n - (A + B_2 F) & -(B_2 F) \\ 0 & sI_n - (A + LC_2) \end{vmatrix}$$

เมื่อ I_n เป็นเมตริกซ์เอกลักษณ์ (Identity Matrix) ขนาด $n \times n$ แต่เนื่องจากว่า A_{LQG} เป็นเมตริกซ์สามเหลี่ยมบน (Upper Triangular Matrix) ดังนั้น ผลคูณของตัวกำหนด ตามเมตริกซ์เฉียง (Diagonal Matrix) คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\Delta(s) = |sI_n - (A + B_2F)| |sI_n - (A + LC_2)|$$

เราจะเห็นได้ว่า โพลวงปิด จะมีจำนวน $2n$ ตัว ถ้าเราออกแบบตัวควบคุมที่มีตัวสังเกตหรือตัวประมาณค่าสเตรตรวมอยู่ด้วย เพราะโพลในวงปิดจะมีทั้งโพลของตัวสังเกตรวมกันอยู่กับโพลของพลาเนซึ่งเรียกกันว่า “หลักการแยกกัน (Separation Principle)” และถ้าจะว่าไปแล้ว มันเป็นหัวใจของทฤษฎีควบคุมสมัยใหม่ (Modern Control Theory) เลยกี่ว่าได้ความหมายของ *Separation Principle* ก็คือว่า มันจะมีอยู่ 2 ขั้นตอนการปฏิบัติเพื่อออกแบบ ตัวควบคุม ได้แก่

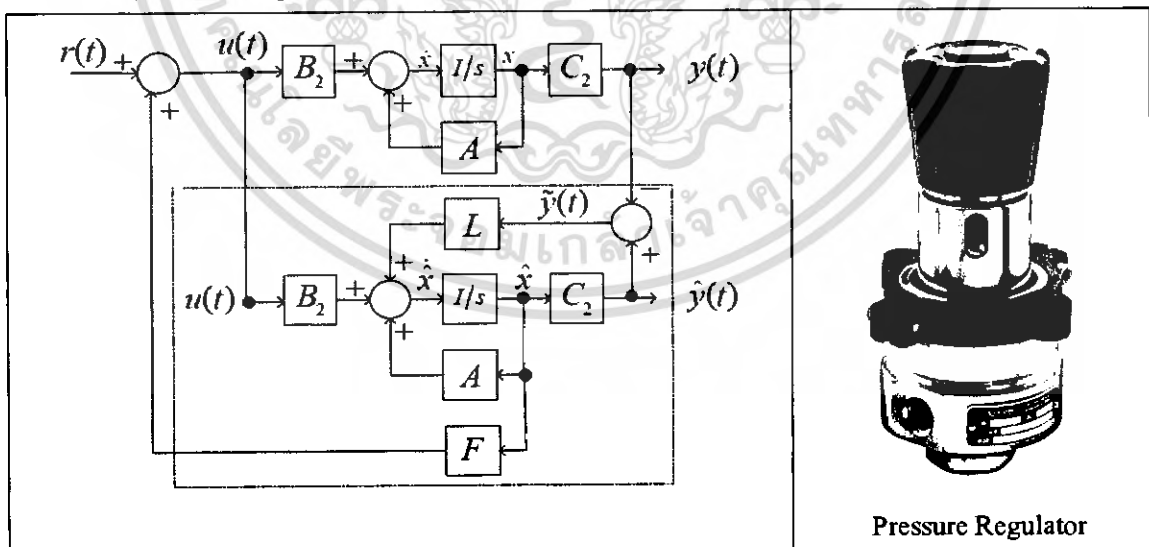
- ใช้เทคนิคอินโทรนก็ได้ เพื่อเลือกเมตริกซ์ป้อนกลับ (Feedback Matrix) F โดยสมมติว่า มันสามารถใช้การป้อนกลับด้วย full state ได้

- ออกแบบตัวสังเกต L

โดยที่พลาเนที่มีสมการสเตรตเป็น $\dot{x} = Ax + B_2u$ ตัวสังเกตมีสมการสเตรตเป็น

$$\dot{\hat{x}} = (A + LC_2)\hat{x} + B_2u - Ly$$

ถ้าหากว่า $r(t)$ ซึ่งเราเคยชินกันว่ามันคือ ปริมาณอ้างอิงทางเข้าหรือคำสั่ง (reference input or command) นั้น มีค่าเท่ากับศูนย์ เราจะได้ $u = r(t) + F\hat{x} = F\hat{x}$ และเรียกปัญหาแบบนี้ว่า “ปัญหาของการรักษาค่า (Regulator Problem)” เช่น เราจะเรียกแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 5 โวลต์ ที่เราใช้ทดลองวงจรทางดิจิทัล ซึ่งใช้ไอซีประเภทที่ที่แอลว่า ตัวรักษาระดับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง 5 โวลต์ (+5 V.(D.C.) Regulator) ก็หมายถึงว่า ปริมาณออกของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจะถูกรักษาให้มีค่าคงที่ที่ 5 โวลต์ อีกตัวอย่างหนึ่งที่เราจะเห็น ได้แก่ ตัวรักษาระดับความดัน (Pressure Regulator) เป็นต้น



ภาพที่ 2.16 แสดงถึงลักษณะของ Presser Regulator

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าจะว่าไปแล้ว “ระบบรักษาค่าอัตโนมัติ (Automatic Regulating System)” ก็คือ ระบบควบคุมป้อนกลับ ที่มี ปริมาณอ้างอิงทางเข้า หรือ ปริมาณออกที่ต้องการ เป็นค่าคงที่ หรือไม่ก็เปลี่ยนแปลงไปอย่างช้าๆ กับเวลา โดยที่งานหลักก็เพื่อที่จะคงไว้ซึ่งปริมาณออกจริงๆ ให้อยู่ที่ ค่าที่ต้องการได้ ถึงแม้จะมีสิ่งรบกวน ระบบรักษาค่าอัตโนมัติ ที่มีปริมาณออก หรือตัวแปรที่ถูกควบคุม เช่นปริมาณทางกายภาพที่เกี่ยวข้อง อุณหภูมิ ความดัน การไหล ระดับของของเหลว และ ความเป็นกรดต่าง (pH) เป็นต้น เราจะเรียกว่า “การควบคุมกระบวนการ (Process Control)”

2.4 หลักการการทำงานของไจโรสโคป

ไจโรสโคปเป็นอุปกรณ์ที่น่าพิศวงเป็นอย่างยิ่ง เพราะการหมุนของมันค่อนข้างแปลกและคล้ายกับว่ามันทำท่ายกกับแรงโน้มถ่วงได้ คุณสมบัติอันพิเศษนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ตั้งแต่รถจักรยานจนถึงยานขนส่งอวกาศ เครื่องบินโดยสารทุกประเภทมีไจโรสโคปไว้สำหรับทำเป็นเข็มทิศ และระบบนำร่องอัตโนมัติ สถานีอวกาศ Mir ของรัสเซียใช้ไจโรสโคปจำนวน 11 อัน เพื่อบังคับให้แผงโซลาร์เซลล์หันไปนทิศทางเดียวกับดวงอาทิตย์ตลอดเวลา

การเคลื่อนที่แบบไจโรจะเกิดกับมวลทุกชนิดในโลกที่มีการหมุน ซึ่งมีการนำมาประยุกต์ใช้ในลักษณะต่างๆมากมายนับไม่ถ้วน ซึ่งพื้นฐานของตัวมันมีดังนี้

2.4.1 การควง

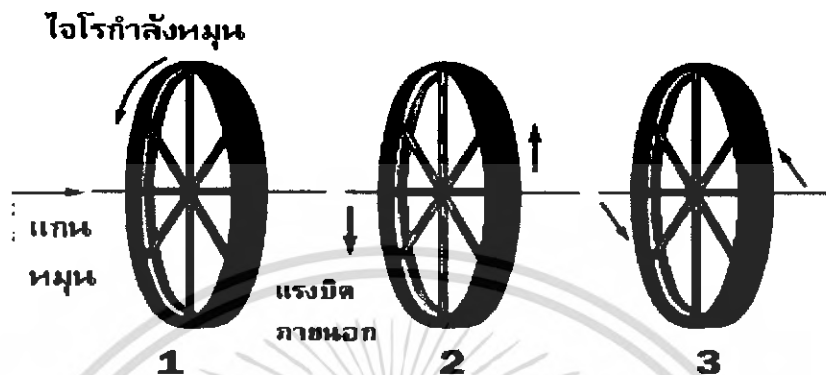


ภาพที่ 2.17 ภาพแสดงการหมุนและทิศทางของแรงที่กระทำกับลูกข่าง

การหมุนของลูกข่างจะมีการหมุน 2 แบบด้วยกัน อย่างแรกคือการหมุนรอบตัวเองของลูกข่าง อย่างที่สองก็คือลูกข่างทั้งลูกจะหมุนรอบแกนกลางอีกแกนหนึ่ง การหมุนแบบนี้เรียกว่า การควง (Precession) โดยลูกข่างไม่ล้ม แต่ถ้าไม่หมุนจะล้ม ซึ่งดูเหมือนกับทำท่ายกกับแรงโน้มถ่วงของโลก

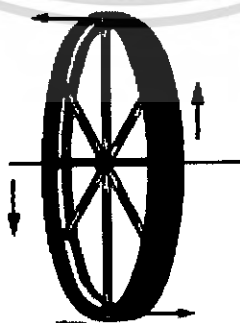
2.4.2 ทฤษฎีและหลักการ

แขวนล้อจักรยานดั่งรูป และหมุนล้อ ดั่งล้อขึ้นให้เอียงดั่งรูป การตั้งล้อในลักษณะนี้ทำให้น้ำหนักของล้อตกลงห่างจากจุดหมุน เกิดการบิดในแนวตั้งฉากกับน้ำหนักของล้อกระทำกับแกนหมุน ดูภาพ



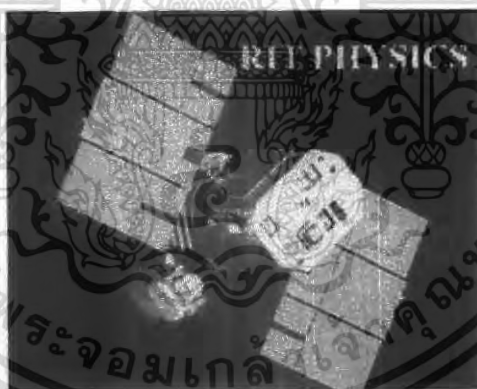
ภาพที่ 2.18 แสดงทิศทางการหมุนและแรง

1. ใจโรสโคปหมุนรอบแกนหมุน
 2. แรงจากภายนอกทำให้เกิดแรงบิดขึ้นที่แกนหมุน
 3. ใจโรจะหมุนไปในทิศตั้งฉากกับแรงจากภายนอก เรียกว่า การควง
- สังเกตจุดเล็ก 2 จุด คือจุดบน และจุดล่างของใจโรขณะหมุน ดั่งรูป



แรงบิดกระทำที่แกนหมุน (ลูกศรขึ้นและลง) เราจะใช้แรงกระทำจากภายนอกก็ได้ แต่ส่วนใหญ่จะเป็นน้ำหนักของตัวใจโรเองให้สังเกตที่จุด 2 จุด ถูกแรงกระทำ(ลูกศรซ้ายและขวา) พยายามเคลื่อนที่ไปในทิศทางดังภาพ เมื่อล้อจักรยานยังไม่มีการหมุนและมีแรงบิด (ลูกศรซ้ายและขวา) กระทำกับแกนหมุนดังภาพ จุดบนของใจโรจะเคลื่อนที่ไปทางซ้ายและจุดล่างของใจโร จะเคลื่อนที่ไปขวาตามทิศทางของแรง ดังนั้นถ้าใจโรยังไม่มีการหมุน ล้อจะพลิกและอยู่ในลักษณะ แต่ถ้าเราหมุนหมุนล้อจักรยานหรือใจโร ลองมาดูว่ามีอะไรเกิดขึ้นกับจุดสองจุดบนใจโรบ้าง จากกฎข้อที่หนึ่งของนิวตันที่กล่าวถึงสมดุลของมวลไว้ว่า มวลจะเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงด้วยความเร็วคงที่ ถ้าไม่มีแรงภายนอกมากระทำดังนั้นจุดบนของใจโรจะถูกแรงบิดจากภายนอก ทำให้เคลื่อนที่ไปทางซ้าย ส่วนจุดล่างจะถูกแรงบิดให้เคลื่อนที่ไปทางขวา ล้อจะเกิดการหมุนแบบควง เมื่อตัวใจโรสโคปหมุนไป 90 องศา จุดบนจะหมุนเปลี่ยนตำแหน่งไป 90 องศา และยังคงเคลื่อนที่ไปทางซ้าย เช่นเดียวกับจุดล่างเมื่อหมุน ขึ้นมา 90 องศา มันยังคงเคลื่อนที่ไปทางขวา ทำให้ล้อเกิดการหมุนควง ขณะที่จุดบนและจุดล่างเปลี่ยนตำแหน่งไป 90 องศา การเคลื่อนที่ในครั้งแรก จะถูกยกเลิกไปไม่เกิดการพลิกของล้อ ดังนั้นแกนหมุนของใจโรจะเหมือนกับล้ออยู่กับอากาศ ดูเสมือนว่าทำทาบกับแรงโน้มถ่วง ทั้งๆที่เป็นไปตามกฎของฟิสิกส์ทั้งสิ้น

2.4.3 ประโยชน์ของใจโรสโคป

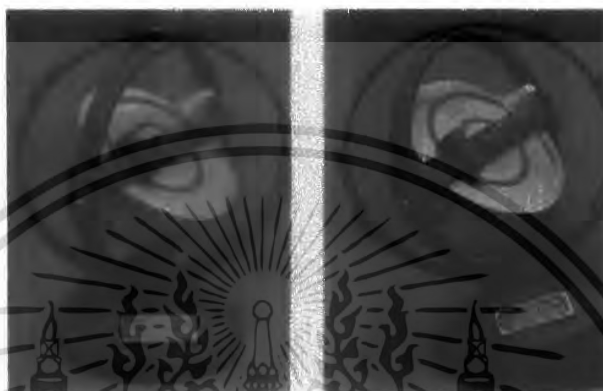


ภาพที่ 2.19 แสดงถึงดาวเทียมซึ่งไปในทิศทางเดียวกัน

ดาวเทียมบางดวงใช้หลักของใจโร เพื่อปรับตำแหน่งของดาวเทียมในอวกาศ ดังภาพที่ 2.19 ภายในดาวเทียมจะประกอบด้วยล้อ 3 อัน ตั้งฉากซึ่งกันและกัน แต่ละอันมีมอเตอร์และเบรกไว้สำหรับควบคุมการหมุน เมื่อล้อเริ่มหมุน ดาวเทียมจะเริ่มหมุนเช่นกันแต่ไปในทิศตรงกันข้ามกับล้อ หลังจากที่อยู่ในตำแหน่งที่ต้องการ ก็บังคับให้ล้อหยุดหมุน ดาวเทียมก็จะหยุดหมุนตามไปด้วย เมื่อใช้วิธีนี้เราสามารถที่จะบังคับทิศทางของดาวเทียมได้โดยไม่ต้องใช้เชื้อเพลิงหรือพลังงานมากมายนัก รูปบน ขณะที่ดาวเทียมโคจรรอบโลก ตำแหน่งของแผงโซลาร์ อาจจะไม่ตรงกับแสงอาทิตย์ ดังนั้นจึงต้องมีการปรับแต่งตำแหน่งของดาวเทียมเสมอ เพื่อให้พลังงานแสงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

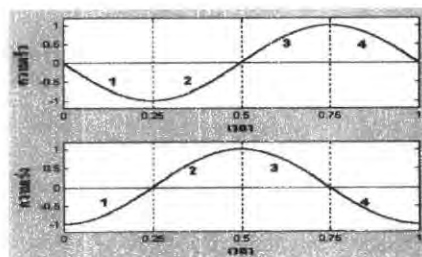
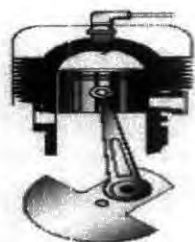
ตกลงบนแผงโซลาร์มากที่สุดเมื่อไม่มีแรงบิดหรือทอร์กกระทำจากภายนอก โมเมนตัมเชิงมุมทั้งขนาดและทิศทางจะคงที่ ดังเช่น เข็มทิศใจโรสโคปที่หมุนอยู่ในเรือ ถ้าไม่มีทอร์กภายนอกไปกระทำมันจะไม่เปลี่ยนทิศทาง แม้ว่าเรือดำนั้นจะเคลื่อนที่รอบโลกไปที่ใดก็ตามดังภาพ ดังนั้น เข็มทิศใจโรสโคปจึงนำไปใช้ในระบบนำร่อง ปัจจุบันมีระบบคอมพิวเตอร์ในการคำนวณ ดังนั้นเมื่อเรือเปลี่ยนตำแหน่งไป คอมพิวเตอร์จะคำนวณเทียบกับตำแหน่งของเข็มทิศใจโร คำนวณพร้อมไปกับข้อมูลจากตัววัดความเร็ว คอมพิวเตอร์จะคำนวณหาระยะทางจากจุดเริ่มต้นได้ แม่นยำไม่มีผิดพลาด



สังเกตที่หัวลูกซึ่งเป็นแกนหมุนของงานใจโรสโคป จะไม่เปลี่ยนทิศทางแม้ว่าโครงของใจโรสโคปจะถูกจับให้หมุน เหตุผลเพราะไม่มีแรงบิดไปกระทำกับแกนหมุน

2.5 หลักการทำงานของตัวหยั่งความเร็ว (Accelerometer)

เราอาจคุ้นเคยกับรถยนต์ว่าเวลาเขาโยนหมา ความเร็ว (ม้า) ของรถยนต์ที่ส่งผลต่อทอร์กบิดเพลาคับ เช่น ความเร็ว (Velocity) รวดจาก 0 ถึง 100 กม.ต่อชม. ภายในเวลา 10 วินาทีหรือเรียกเป็นความเร็วขนาด $(100 - 0 \text{ กม.ต่อชม.}) / (10 \text{ วินาที}) = (10 \text{ กม.ต่อชม.})$ ใน 1 วินาที ซึ่งจะเห็นแล้วว่าอัตราเร่งของรถยนต์จะมากหรือน้อยจะสัมพันธ์โดยตรงกับทอร์กบิดหรือแรงกระทำนั่นเอง หมายถึงว่าการทราบอัตราเร่งจะทราบแรงกระทำกับผลิตภัณฑ์ (รถยนต์ หรือการบิดที่เพลาคับรถยนต์) แต่ความเร็วลักษณะนี้เป็นความเร็วแบบคงที่ กรณีความเร็วแบบมีการเปลี่ยนทิศทางไปมา หรือที่ทราบว่าเป็นการสั่นสะเทือนหรือถ้านึกไม่ออกลองดูการเคลื่อนที่เร่งขึ้นลงของลูกสูบในกระบอกสูบเครื่องยนต์



ภาพที่ 2.20 แสดงพฤติกรรมความเร็ว ความเร็ว ของลูกสูบขณะเคลื่อนที่ขึ้นลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งถ้าดูในแง่ของความเร็วลูกสูบแล้ว ลูกสูบจะเคลื่อนที่ขึ้นและหยุดชั่วคราว ณ จุดสูงสุด หรือ ศูนย์ตายบนของลูกสูบ (ความเร็วเป็นศูนย์) และเกิดการจุดระเบิดขึ้น ลูกสูบจะเคลื่อนตัวมีความเร็วเพิ่มขึ้น (มีการเร่งความเร็วในทิศทางลง, 1) และเมื่อลูกสูบเคลื่อนตัวเข้าใกล้จุดศูนย์ตายล่างของลูกสูบ จะลดความเร็วลงจนเป็นศูนย์ (ความเร่งเปลี่ยนทิศทาง, 2) หลังจากนั้นงานเหวี่ยงจะทำหน้าที่นำส่งลูกสูบจากศูนย์ตายล่างขึ้นศูนย์ตายบน โดยความเร็วเป็นศูนย์ที่ศูนย์ตายล่างมีความเร็วเพิ่มขึ้น (ความเร่งมีทิศทางขึ้น, 3) และลดความเร็วลงเป็นศูนย์เมื่อเข้าถึงศูนย์ตายบน (ความเร่งเปลี่ยนทิศทางลง, 4) ซึ่งกระบวนการทั้งหมดนี้เองที่ทำให้เกิดเป็นการสั่นสะเทือนจากเครื่องยนต์ และส่งผ่านไปยังชิ้นส่วน ต่างๆ ในรถยนต์ได้ ยิ่งเราเพิ่มการเหยียบคันเร่งหมายถึงต้องการเพิ่มแรง ($F = ma$ กฎการเคลื่อนที่ข้อที่สองของนิวตัน) จากการส่งส่วนผสมน้ำมัน - อากาศ เข้าไปจุดระเบิดเพิ่มขึ้นและทำให้ลูกสูบเกิดการเร่งขึ้นลงมากขึ้นอุปกรณ์ห้อยสัญญาณความเร่ง สามารถใช้เพื่อการต่อไปนี้ได้และจะได้กล่าวในรายละเอียดต่อไป เพื่อการเลือกใช้ตัวห้อยความเร่งได้ถูกต้อง

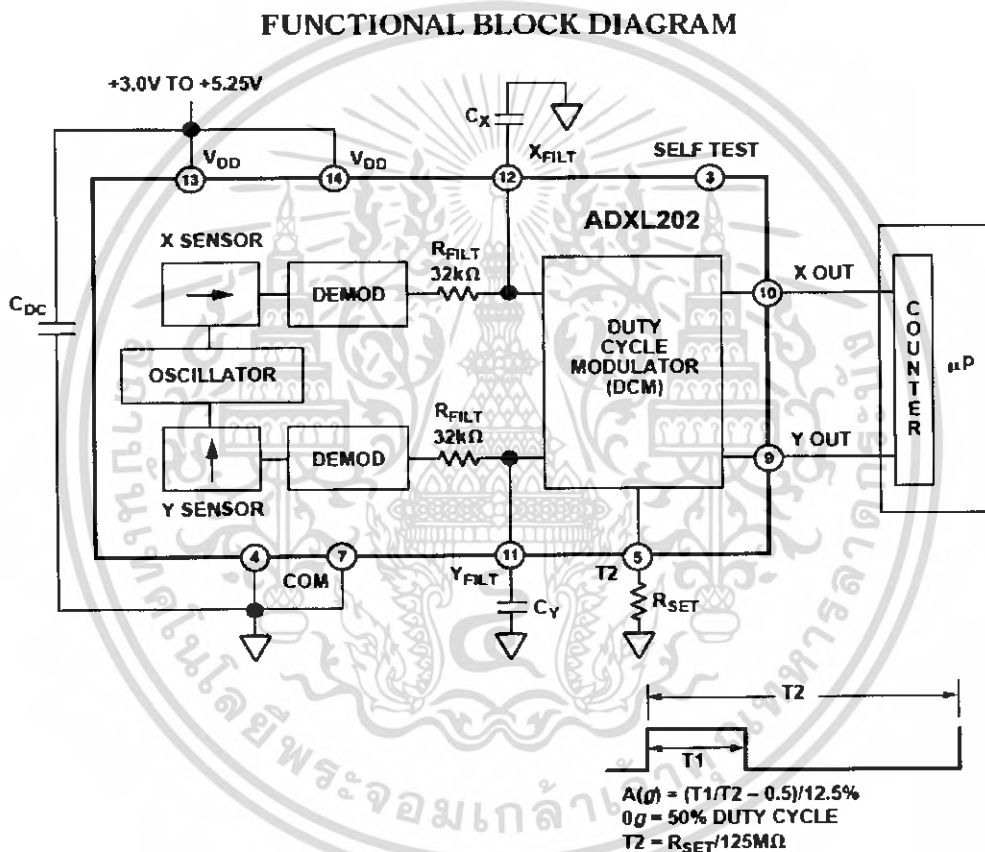
- การวัดการเคลื่อนที่
- การวัดการสั่นความถี่สูง
- การวัดการสั่นความถี่ต่ำ
- การวัดการกระแทก
- การวัดการสั่นระดับค่าความเร่งน้อย (ไมโคร G)
- การวัดการสั่นบนวัตถุที่มีขนาดเล็ก
- การวัดภายใต้อุณหภูมิแวดล้อมสูงมาก
- การวัดภายใต้อุณหภูมิแวดล้อมต่ำมาก
- การวัดภายใต้สภาวะที่แวดล้อมด้วยการแผ่รังสี
- การวัดในงานตรวจติดตามสภาพเครื่องจักร
- การวัดแบบหลายช่องสัญญาณ

ตัวห้อยความเร่งได้ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะงานเชิงกลและงานเชิงอิเล็กทรอนิกส์ ตัวอย่างเช่น

- Self balancing robots
- Tilt-mode game controllers
- Car alarm systems
- Crash detection/airbag deployment
- Human motion monitoring
- Leveling tool

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างตัวห้อยความเร่ง ADXL202/ADXL210 รุ่นนี้มีราคาและมีกำลังทางไฟฟ้าต่ำ สามารถวัดความเร่งได้สองแกน ย่านการวัดอยู่ที่ $\pm 2g$. สามารถวัดความเร่งได้ทั้งความเร่งที่มีไดนามิกและความเร่งแบบสแตติก สัญญาณเอาต์พุตเป็นแบบดิจิตอลและแสดงค่าตัวชี้ไซเคิลเป็นสัดส่วนของแต่ละแกน ความเร่งที่วัดได้นั้นจะถูกประมวลผลจากคุณสมบัติของตัวเองซึ่งภายในจะมีวงจรที่แปลงสัญญาณจากอนาล็อกเป็นสัญญาณดิจิตอล คาบสัญญาณจะทำการปรับค่าได้ภายในเวลา 0.5 ms – 10 ms สำหรับค่าย่านความถี่สูงและความถี่ต่ำจะมีแบนด์วิธ อยู่ในช่วง 0.01 Hz – 5 kHz ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงตามค่าของตัวเก็บประจุ C_x และ C_y ชนิดของเสียงที่ตกบนพื้นในอัตรา $500 \mu g/Hz$



ภาพที่ 2.21 แสดงฟังก์ชันบล็อกไดอะแกรม

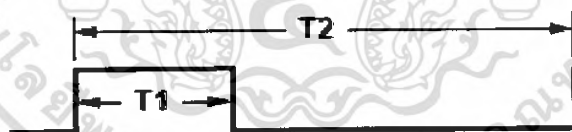
2.5.1 ทฤษฎีและหลักการทำงาน

ADXL202/ADXL210 เป็นอุปกรณ์วัดความเร่งแบบสองแกนที่สมบูรณ์แบบซึ่งอยู่ภายในไอซีเพียงตัวเดียว เพราะมีทั้งวงจรที่เป็นไมโครเมทซินและวงจรที่ทำหน้าที่เป็นตัวตรวจวัด สัญญาณทางด้านเอาต์พุตจะออกมาเป็นค่าตัวชี้ไซเคิลหรือสัดส่วนแสดงเป็นรอบการทำงานของสัญญาณความถี่และมีตัวประมวลผลแบบดิจิตอลสำหรับย่านการวัดได้คือ มีทั้งความเร่งที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นด้านบวกและด้านลบ สำหรับการวัดความเร่งทางสถิติแรงที่กระทำกับพื้นของวัตถุที่ตกลงมาเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลกจะถูกตรวจจับได้จากการตรวจจับความเอียง ซึ่งโครงสร้างของตัวตรวจจับนี้จะยึดติดอยู่กับพื้นผิวด้านบนซึ่งทำจากซิลิกอนจะมีโครงสร้างที่อยู่เหนือผิวของซิลิกอนทำหน้าที่ในการต้านทานแรงที่เกิดจากความเร่ง การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของตัวตรวจจับนั้นจะทำให้หน้าเกิดค่าความเข้มข้นของตัวเก็บประจุระหว่างตัวที่ถูกยึดอยู่กับที่ และตัวที่อยู่ตรงกลาง ซึ่งถ้าเกิดการเสียดสมมูลขึ้น จะทำให้สัญญาณเอาต์พุตแสดงผลออกมาเป็นสัดส่วนในแต่ละแกน ซึ่งแสดงเป็นแอมพลิจูดของความเร่งและแอมพลิจูดทางด้านเอาต์พุตนี้จะแสดงให้เห็นเป็นสัญญาณคลื่นสี่เหลี่ยมซึ่งใช้เทคนิคในการถอดสัญญาณกระแสไฟฟ้าสลับเปลี่ยนมาเป็นสัญญาณที่บอกค่าความเร่งสัญญาณเอาต์พุตของตัวจับรอบการทำงานสัญญาณความถี่นั้น จะมีค่าความต้านทานไปฟ้า 32 k Ω ที่จุดรับสัญญาณในแต่ละจุดนั้นจะใช้ในการปรับตั้งค่าสัญญาณแบนด์วิดท์ในแต่ละครั้งที่มีการเปลี่ยนอุปกรณ์เข้ามา โดยการกรองสัญญาณเพื่อปรับค่าความละเอียดในการวัด

หลังจากทำการกรองสัญญาณที่ความถี่ต่ำแล้วสัญญาณอนาล็อกจะถูกแปลงเป็นรอบสัญญาณความถี่หรือเปอร์เซ็นต์ความถี่ และคาบเวลาในการเปลี่ยนแปลงจะใช้เวลาระหว่าง 0.5 ms และ 10 ms. เสร็จสิ้นที่คาบเวลา T1 ที่แสดงในรูป 20.22 ความเร่งที่ 0 g จะให้ค่ารอบการทำงานที่ 50 % สัญญาณความเร่งสามารถวัดได้จากคาบเวลา T1 และ T2 ว่ามีสัญญาณพัลส์กี่ลูก สัญญาณเอาต์พุตที่เป็นสัญญาณอนาล็อกของแรงดันไฟฟ้านั้นได้รับจากการอ่านสัญญาณ หรือการกรองสัญญาณตามแนวแกน X และแกน Y หรือการส่งสัญญาณรอบการทำงานเข้าวงจร RC ฟิลเตอร์ ในการจับสัญญาณ แรงดันไฟฟ้าดีซี



$$A(g) = (T1/T2 - 0.5)/12.5\%$$

$$0g = 50\% \text{ DUTY CYCLE}$$

$$T2(s) = R_{SET}(\Omega)/125M\Omega$$

ภาพที่ 2.22 แสดงชนิดของสัญญาณเอาต์พุตของรอบการทำงาน

2.5.2 การประยุกต์ใช้งาน

การออกแบบพฤติกรรมการทำงานของ ADXL202/ADXL210

การออกแบบการทำงาน ADXL202/ADXL210 โดยรอบการทำงานทางเอาต์พุตจะรวมถึงการเลือกคาบของรอบการทำงานและการกรองสัญญาณของตัวเก็บประจุด้วย การออกแบบนี้จะหมายถึงการเอกสารเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกแบบและกำหนดแบนวิดท์ การกำหนดความละเอียดของสัญญาณเอาต์พุต และผลตอบสนองของเวลา ซึ่งสามารถศึกษาแนวทางปฏิบัติได้ดังนี้

V_{DD} แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า ใช้สองช่องคือ ช่องที่ 13 และ 14 ควรที่จะต่อไฟสองช่องนี้โดยตรง

COM มีช่องคอมมอนสองช่องคือช่องที่ 4 และ 7 ทั้งสองช่องควรที่จะต่อโดยตรงและช่องที่ 7 เป็นช่องกราวด์

V_{TP} ควรที่ปล่อยไว้และไม่ควรที่จะเชื่อมต่ออุปกรณ์ใดๆในช่องนี้

Decoupling Capacitor C_{DC} ตัวเก็บประจุขนาด 0.1 μF ก็คือการทำให้แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้ตรงตามช่อง ตามลักษณะการต่อสายเข้า V_{DD} และ COM

ST ST เป็นช่องที่ใช้ควบคุมการทดสอบลักษณะของตัวเอง เมื่อช่องนี้ถูกป้อนค่าด้วย V_{DD} แรงจากไฟฟ้าสถิตจะส่งไปยังตัวหยังความเร่งส่งผลให้วงจรทำการทดสอบตัวเอง การเปลี่ยนแปลงสัญญาณเอาต์พุตใช้ 10% ของอัตรารอบการทำงาน (หรือมีค่าเท่ากับ 0.8 g)

ตัวถอดสัญญาณรอบการทำงาน ADXL202/ADXL210 โดยมีสัญญาณดิจิทัลเอาต์พุต คือการใช้ตัวโมดูลค่าจากรอบการทำงาน ความเร่งที่วัดได้จะแสดงในรูปของสัดส่วน T_2/T_1 โดยปกติแล้วสัญญาณเอาต์พุตของ ADXL202 คือ

0 g = 50% ของรอบการทำงาน

สเกลแฟคเตอร์เอาต์พุต 12.5 % ของการเปลี่ยนแปลงค่ารอบการทำงานต่อ 1 g

ตามปกติสัญญาณเอาต์พุตของ ADXL210 คือ

0 g = 50% ของรอบการทำงาน

สเกลแฟคเตอร์เอาต์พุต 12.5 % ของการเปลี่ยนแปลงค่ารอบการทำงานต่อ 1 g

ค่าต่างๆเหล่านี้จะมีผลโดยตรงต่ออุปกรณ์ ทำให้เกิดค่าความผิดพลาดที่ค่าเริ่มต้นและค่าผิดพลาดเกี่ยวกับความไวของการวัด การวัดคาบเวลา T_2 จะต้องทำการวัดเพียงครั้งเดียวหรือจะทำการวัดคาบเวลาดังกล่าวไม่ได้ในหลายๆรอบ เพราะตัวมันต้องการวัดคาบเวลาเพียงครั้งในการกำหนดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ

การตั้งค่าแบนวิดท์โดยใช้ C_x และ C_y

ADXL202/ADXL210 รุ่นนี้จะมีการเรียงการกำหนดขอบเขตของแบนด์วิธหรือทำการกรองสัญญาณได้ที่ช่อง X_{FLT} และ Y_{FLT} และการกรองสัญญาณแต่ละครั้งจะต้องมีการเพิ่มตัวกรองสัญญาณความถี่ต่ำเข้าไปด้วยเพื่อลดสัญญาณลบกวนลง สมการที่ใช้ในการกรองสัญญาณที่มีค่า 3 เดซิเบล

พิจารณา

$$F_{-3dB} = \frac{1}{(2\pi(32\text{ k}\Omega) \times C(x, y))}$$

หรือจัดให้อยู่รูปร่างง่ายคือ

$$F_{-3dB} = \frac{5\text{ }\mu\text{F}}{C(x, y)}$$

ย่านของตัวต้านทานไฟฟ้าภายในที่ใช้ในวงจร $\pm 25\%$ ของค่าปกติ 32 k Ω

จากสมการเรานำมาทำเป็นตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า ตัวเก็บประจุและค่าแบนด์วิธได้ดังนี้

Bandwidth	Capacitor Value
10 Hz	0.47 μF
50 Hz	0.10 μF
100 Hz	0.05 μF
200 Hz	0.027 μF
500 Hz	0.01 μF
5 kHz	0.001 μF

การตั้งค่ารอบการทำงานของ DCM

ได้สมการแสดงความสัมพันธ์ดังนี้

$$T2 = \frac{R_{SET} (\Omega)}{125\text{ M}\Omega}$$

นำความสัมพันธ์ที่ได้มาเขียนแสดงในรูปแบบตารางจะได้ว่า

T2	R _{SET}
1 ms	125 k Ω
2 ms	250 k Ω
5 ms	625 k Ω
10 ms	1.25 M Ω

การเลือกใช้ตัวหยังความเร่ง

จากที่เราทราบว่าขณะนี้เรามีอุปกรณ์หยังความเร่งอยู่สองรุ่นแบ่งตามลักษณะการใช้งานได้ดังนี้ ADXL202 ถ้าเปรียบเทียบกับรุ่น ADXL210 แล้วรุ่นนี้จะมีความไวต่อการวัดความเร่งมากกว่า ประมาณ 12 % / g และมีความละเอียดในการตรวจจับมากกว่า สำหรับรุ่น ADXL210 ควรที่จะประยุกต์ใช้งานกับการวัดค่าความเร่งที่มีค่ามากกว่า $\pm 2\text{ g}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไมโครคอมพิวเตอร์อินเทอร์เน็ต

ADXL202/ADXL210 ถูกออกแบบมาเพื่อใช้กับตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ที่มีราคา ถูก นั่นก็หมายความว่าคุณสมบัติของไมโครคอนโทรลเลอร์จะขึ้นอยู่กับการออกแบบของตัวหยัง ความเร่งและการเลือกใช้งานนั้นขึ้นอยู่กับความต้องการการใช้งานว่าจะใช้งานเกี่ยวกับอะไร ซึ่งก่อนการเลือกใช้ควรพิจารณาในเรื่องต่อไปนี้

- ความละเอียดของสัญญาณที่ต้องการใช้งาน
- แบนวิคท์ หรือความถี่สูงสุดที่ต้องการตรวจวัด
- คาบเวลาที่ใช้ในหนึ่งรอบการทำงานของแต่ละแกน

ความต้องการทั้งหมดนี้จะขึ้นอยู่กับแบนวิคท์ที่ต้องการใช้งาน เมื่อทำการเลือกไมโครคอนโทรลเลอร์แล้ว อย่าลืมว่าอุปกรณ์ทุกตัวจะต้องมีระยะเวลาในการทำงานและจะต้องมีการสอบเทียบอุปกรณ์ด้วยนั่นก็คือการเตรียมพร้อมเรื่องของซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการสอบเทียบตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ด้วย



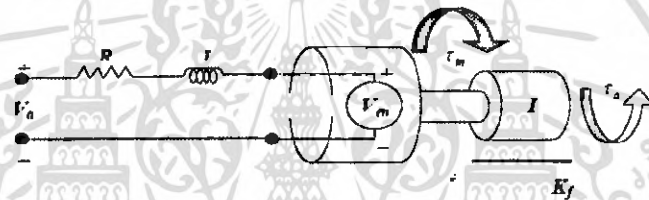
บทที่ 3

การออกแบบระบบควบคุม ไมโครคอนโทรลเลอร์ วงจรมอเตอร์ แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และการออกแบบ ตัวหุ่นยนต์

3.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของรถยนต์สองล้อ

3.1.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของดีซีมอเตอร์

ในเรื่องนี้จะกล่าวถึงพฤติกรรมของ DC Motor โดยจะนำมาเขียนในลักษณะของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Math Model) ดังนี้



ภาพที่ 3.1 แบบจำลองโครงสร้างของมอเตอร์

เมื่อใส่ Voltage จากภายนอกเข้ามาจะเกิดกระแสขึ้นในขดลวดอาร์เมเจอร์ โดยที่มอเตอร์จะสร้าง torque (T) ขึ้นมาโดยจะเป็นสัดส่วนกับกระแสที่ไหลผ่านความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$T_m = k_m I \quad (3-1)$$

ความต้านทาน R และขดลวดตัวนำ L ต่ออนุกรมอยู่กับ V_{emf} (Back electromotive force voltage) เกิดขึ้นเนื่องจากขดลวดของมอเตอร์เคลื่อนที่ผ่านสนามแม่เหล็ก โดยสามารถประมาณค่าให้มีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นกับอัตราเร็วเชิงมุม (ω) ได้ดังนี้

$$V_e = k_e \omega \quad (3-2)$$

ใช้ Kirchoff's Voltage Law (ผลรวมของแรงเคลื่อน ไฟฟ้าภายในเท่ากับศูนย์) ดังนี้

$$V_a - Ri - L \frac{di}{dt} = 0 \quad (3-3)$$

พิจารณาสมการการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ โดยประมาณค่าแรงเสียดทานของมอเตอร์ให้เป็นเชิงเส้นกับอัตราเร็วเชิงมุม โดยที่ $I R$ คือ Inertial load of Armature จากกฎของนิวตัน

$$\sum M = \tau_m - k_f \omega - \tau_a = I_r \omega \quad (3-4)$$

แทนสมการ (1.1) และ(1.2) ลงใน (1.3)และ(1.4) และจัดใหม่ให้อยู่ในรูปของ Time derivatives

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{k_m}{I_a} i - \frac{r_a}{I_a} \omega \quad (3-5)$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{R}{L} i + \frac{k_e}{L} \omega + \frac{V_s}{L} \quad (3-6)$$

เนื่องจากเป็น DC Motor และเราไม่คิด friction ที่เกิดขึ้นจากสมการที่ (1.5) และ (1.6) จะได้ว่า

$$i = -\frac{k_e}{R} \omega + \frac{1}{R} V_s \quad (3-7)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{k_m}{I_a} i - \frac{r_a}{I_a} \omega \quad (3-8)$$

แทนค่าสมการ (3.7) ลงในสมการ (3.8)

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{k_m k_e}{I_a R} \omega + \frac{1}{I_a R} V_s - \frac{r_a}{I_a} \omega \quad (3-9)$$

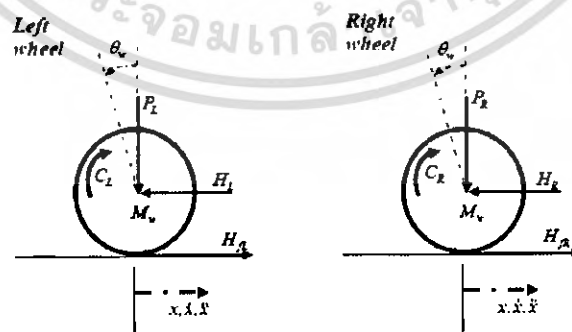
สามารถแสดงเป็น State space model โดยมีตัวแปรที่เราสนใจคือ θ และ ω อินพุตของมอเตอร์คือ Voltage และ Torque

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{k_m k_e}{I_a R} & \frac{1}{I_a R} - \frac{r_a}{I_a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{k_m}{I_a R} & -\frac{1}{I_a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_s \\ r_a \end{bmatrix} \quad (3-10)$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_s \\ r_a \end{bmatrix} \quad (3-11)$$

3.1.2 พฤติกรรมของ Two Wheels Vehicle

ในการอธิบายพฤติกรรมของ Two Wheels Vehicle เราจะทำการแยกพิจารณาออกเป็น 2 ส่วน คือ 1. ส่วนของล้อ 2. ส่วนของ Pendulum โดยทั้งสองส่วนนี้สามารถอธิบายพฤติกรรมของ Two Wheels Vehicle ได้พิจารณา Body diagram ของล้อ



ภาพที่ 3.2 Free body diagram ของล้อ

ใช้กฎของ Newton โดยพิจารณาผลรวมของแรงแนวแกนอนในทิศทาง x

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}\sum F_x &= Ma \\ M_w \ddot{x} &= H_R - H_L\end{aligned}\quad (3-12)$$

โมเมนต์รอบจุดศูนย์กลางของล้อ

$$\begin{aligned}\sum M_o &= I\alpha \\ I_w \ddot{\theta}_w &= C_R - H_R r\end{aligned}\quad (3-13)$$

จาก DC Motor และ Torque สามารถแทนด้วย

$$\tau_m = I_r \frac{d\omega}{dt} + \tau_o \quad (3-14)$$

เปลี่ยนรูปสมการโดยการแทนค่าตัวแปรของ DC Motor โดย torque ที่ Motor ให้ออกคือ

$$C = I_r \frac{d\omega}{dt} = \frac{-k_m k_e}{R} \dot{\theta}_w + \frac{k_m}{R} V_a \quad (3-15)$$

แทนค่า (3.15) ใน (3.13)

$$I_w \ddot{\theta}_w = \frac{-k_m k_e}{R} \dot{\theta}_w + \frac{k_m}{R} V_a - H_R r \quad (3-16)$$

$$H_R = \frac{-k_m k_e}{Rr} \dot{\theta}_w + \frac{k_m}{Rr} V_a - \frac{I_w}{r} \ddot{\theta}_w \quad (3-17)$$

นำ (3.17) แทนค่าใน (3.12)

Left wheel

$$M_w \ddot{x} = \frac{-k_m k_e}{Rr} \dot{\theta}_w + \frac{k_m}{Rr} V_a - \frac{I_w}{r} \ddot{\theta}_w - H_L \quad (3-18)$$

Right wheel

$$M_w \ddot{x} = \frac{-k_m k_e}{Rr} \dot{\theta}_w + \frac{k_m}{Rr} V_a - \frac{I_w}{r} \ddot{\theta}_w - H_R \quad (3-19)$$

เปลี่ยนการเคลื่อนที่เชิงมุมเป็นการเคลื่อนที่เชิงเส้น

Left wheel

$$M_w \ddot{x} = \frac{-k_m k_e}{Rr^2} \dot{x} + \frac{k_m}{Rr} V_a - \frac{I_w}{r^2} \ddot{x} - H_L \quad (3-20)$$

Right wheel

$$M_w \ddot{x} = \frac{-k_m k_e}{Rr^2} \dot{x} + \frac{k_m}{Rr} V_a - \frac{I_w}{r^2} \ddot{x} - H_R \quad (3-21)$$

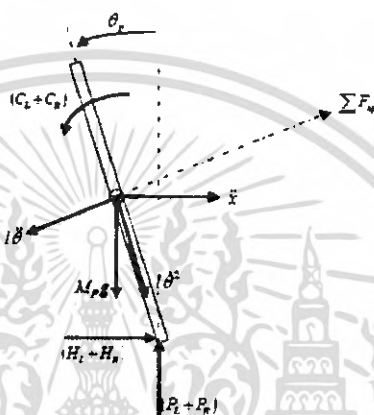
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บวกสมการ (3.20) เข้ากับ (3.21)

$$2\left(M_w + \frac{I_w}{r^2}\right)\ddot{x} = \frac{-2k_s k_e}{Rr^2}\dot{x} + \frac{2k_s}{Rr}V_e - (H_L + H_R) \quad (3-22)$$

3.1.3 หลักการของ Inverted Pendulum

พิจารณาส่ว โคจรของรถที่เป็น Inverted Pendulum พิจารณาจาก body diagram



ภาพที่ 3.3 Free body diagram ของ โครงรถส่วนที่เป็นก้าน Pendulum

จาก Newton's law of Motion ผลบวกของแรงตามแนวแกนนอน

$$\begin{aligned} \sum F_x &= M_p \ddot{x} \\ (H_L + H_R) - M_p l \ddot{\theta}_p \cos \theta_p + M_p l \dot{\theta}_p^2 \sin \theta_p &= M_p \ddot{x} \end{aligned} \quad (3-23)$$

ดังนั้น

$$(H_L + H_R) = M_p \ddot{x} + M_p l \ddot{\theta}_p \cos \theta_p - M_p l \dot{\theta}_p^2 \sin \theta_p \quad (3-24)$$

พิจารณาผลบวกของแรงตามแนวแกนตั้งฉากกับ Pendulum

$$\begin{aligned} \sum F_y &= M_p \ddot{x} \cos \theta_p \\ (H_L + H_R) \cos \theta_p + (P_L + P_R) \sin \theta_p - M_p g \sin \theta_p - M_p l \ddot{\theta}_p &= M_p \ddot{x} \cos \theta_p \end{aligned} \quad (3-25)$$

พิจารณาผลบวกของ Moment รอบจุด C.M ของ Pendulum

$$\begin{aligned} \sum M_o &= I \alpha \\ -(H_L + H_R) \cos \theta_p - (P_L + P_R) \sin \theta_p - (C_L + C_R) &= I_p \ddot{\theta}_p \end{aligned} \quad (3-26)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Torque ที่ให้แก่ pendulum ที่ได้จาก Motor จากสมการ (3-15)

$$C_L + C_R = \frac{-2k_m k_e \dot{x}}{R} + \frac{2k_m V_o}{R}$$

แทนค่า $C_L + C_R$ ในสมการ (3.26)

$$-(H_L + H_R) \cos \theta_p - (P_L + P_R) \sin \theta_p - \left(\frac{-2k_m k_e \dot{x}}{Rr} + \frac{2k_m V_o}{R} \right) = I_p \ddot{\theta}_p$$

$$-(H_L + H_R) \cos \theta_p - (P_L + P_R) \sin \theta_p = I_p \ddot{\theta}_p - \frac{2k_m k_e}{Rr} \dot{x} + \frac{2k_m V_o}{R} \quad (3-27)$$

คูณ -1 ในสมการ (3.25)

$$\left[-(H_L + H_R) \cos \theta_p - (P_L + P_R) \sin \theta_p \right] + M_p g l \sin \theta_p + M_p l^2 \ddot{\theta}_p = -M_p \ddot{x} \cos \theta_p \quad (3-28)$$

แทนค่า (3.27) ลงใน (3.28) จะได้

$$I_p \ddot{\theta}_p - \frac{2k_m k_e}{Rr} \dot{x} + \frac{2k_m V_o}{R} + M_p g l \sin \theta_p + M_p l^2 \ddot{\theta}_p = -M_p \ddot{x} \cos \theta_p \quad (3-29)$$

จากสมการที่ (3.24) แทนค่าลงใน (3.22)

$$2 \left(M_v + \frac{I_v}{r^2} \right) \ddot{x} = \frac{-2k_m k_e}{Rr^2} \dot{x} + \frac{2k_m V_o}{Rr} - M_p \ddot{x} - M_p l \ddot{\theta}_p \cos \theta_p + M_p l \ddot{\theta}_p^2 \sin \theta_p \quad (3-30)$$

จัดสมการ (3.29) และ (3.30) ทั้ง 2 สมการเป็น Non-linear equations

$$\left(I_p + M_p l^2 \right) \ddot{\theta}_p - \frac{2k_m k_e}{Rr} \dot{x} + \frac{2k_m V_o}{R} + M_p g l \sin \theta_p = -M_p \ddot{x} \cos \theta_p \quad (3-31)$$

$$\frac{2k_m V_o}{Rr} = \left(2M_v + \frac{2I_v}{r^2} + M_p \right) \ddot{x} + \frac{2k_m k_e}{Rr^2} \dot{x} + M_p l \ddot{\theta}_p \cos \theta_p - M_p l \ddot{\theta}_p^2 \sin \theta_p \quad (3-32)$$

เมื่อให้ $\theta_p = \pi + \phi$ เมื่อ ϕ คือมุมที่มีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก และมีทิศทางไปด้านหน้า เพราะฉะนั้น

$$\cos \theta_p = -1, \sin \theta_p = -\phi \quad \text{and} \quad \left(\frac{d\theta_p}{dt} \right)^2 = 0$$

ทำสมการให้เป็น สมการเชิงเส้น

$$\left(I_p + M_p l^2 \right) \ddot{\phi} - \frac{2k_m k_e}{Rr} \dot{x} - \frac{2k_m V_o}{R} - M_p g l \phi = M_p \ddot{x} \quad (3-33)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{2k_m}{Rr} V_a = \left(2M_w + \frac{2I_w}{r^2} + M_p \right) \ddot{x} + \frac{2k_m k_s}{Rr^2} \dot{x} - M_p l \ddot{\phi} \quad (3-34)$$

จัดสมการ (3.33) และ (3.34) ใหม่

$$\ddot{\phi} = \frac{M_p l}{(I_p + M_p l^2)} \ddot{x} + \frac{2k_m k_s}{Rr(I_p + M_p l^2)} \dot{x} - \frac{2k_m}{R(I_p + M_p l^2)} V_a + \frac{M_p g l}{(I_p + M_p l^2)} \phi \quad (3-35)$$

$$\ddot{x} = \frac{2k_m}{Rr \left(2M_w + \frac{2I_w}{r^2} + M_p \right)} V_a - \frac{2k_m k_s}{Rr^2 \left(2M_w + \frac{2I_w}{r^2} + M_p \right)} \dot{x} + \frac{M_p l}{\left(2M_w + \frac{2I_w}{r^2} + M_p \right)} \ddot{\phi} \quad (3-36)$$

นำสมการ (3.35) แทนใน (3.34) และแทนค่า (3.36) ใน (3.33) จะได้นั้นเขียนเป็น State space equation จะได้

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \ddot{x} \\ \dot{\phi} \\ \ddot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{2k_m k_s (M_p l r - I_p - M_p l^2)}{Rr^2 \alpha} & \frac{M_p^2 g l^2}{\alpha} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{2k_m k_s (r \beta - M_p l)}{Rr^2 \alpha} & \frac{M_p g l \beta}{\alpha} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ \phi \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{2k_m (I_p + M_p l^2 - M_p l r)}{Rr \alpha} \\ 0 \\ \frac{2k_m (M_p l - r \beta)}{Rr \alpha} \end{bmatrix} V_a \quad (3-37)$$

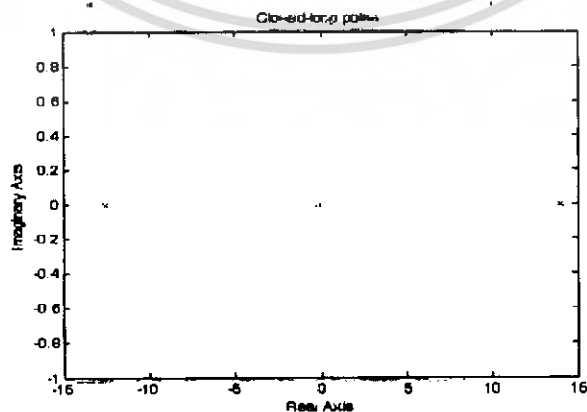
เมื่อกำหนดให้

$$\beta = \left(2M_w + \frac{2I_w}{r^2} + M_p \right) \quad \alpha = \left[I_p \beta + 2M_p l^2 \left(M_w + \frac{I_w}{r^2} \right) \right]$$

3.2 การออกแบบระบบควบคุม

จากทฤษฎีของออปติมอลคอนโทรลและโมเดลทางคณิตศาสตร์สามารถหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆได้ดังต่อไปนี้

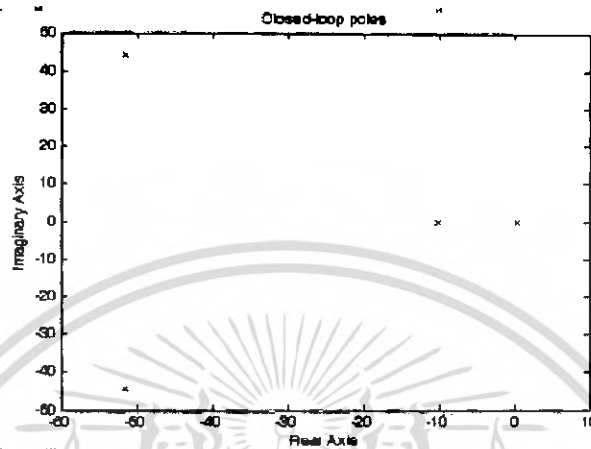
$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1.0103 & 8.7872 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 28.3293 & 175.9778 & 0 \end{pmatrix} \quad B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ -0.8616 \\ 0 \\ -24.1579 \end{bmatrix} \quad C_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$



ภาพที่ 3.4 Open Loop Poles ของระบบที่ไม่อยู่ในเสถียรภาพ

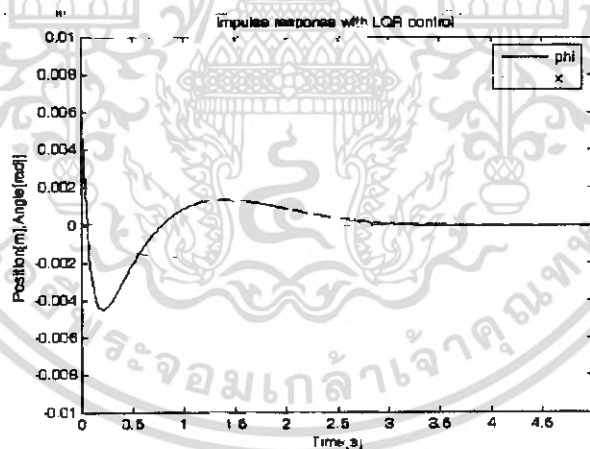
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพ 3.4 จะสังเกตได้ว่าระบบไม่อยู่ในเสถียรภาพ เนื่องจากมีโพลของระบบอยู่ทางซีกขวาของแกนจริง เมื่อทำการออกแบบ LQR และ LQE เพื่อหาค่า Gain F (LQR) และ Gain L (LQE) จะได้ผลของ Close Loop Poles ดังภาพที่ 3.5



ภาพที่ 3.5 Close Loop Pole ของระบบที่อยู่ในเสถียรภาพ

สังเกตตำแหน่งของ Close Loop Poles จะเห็นว่าระบบอยู่ในเสถียรภาพซึ่งผลตอบสนองต่อ Impulse เป็นไปดังภาพที่ 3.6



ภาพที่ 3.6 ผลตอบสนองของระบบ Close Loop

ผลตอบสนองของระบบจะขึ้นอยู่กับค่าปรับค่าน้ำหนักของเมตริก Q และเมตริก R โดย

$$Q = \begin{bmatrix} q_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & q_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

โดยที่ q_{11} จะเป็นตัวน้ำหนักของ X (position)

q_{33} จะเป็นตัวน้ำหนักของ θ (Angular)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเราทำการเปลี่ยนแปลงค่า Q และ R เป็นค่าต่างจะพบว่าผลตอบสนองของระบบจะเปลี่ยนไป ค่าถ่วงน้ำหนักของเมตริก Q เป็นตัวบ่งชี้ถึงความสำคัญของตัวแปร State เมื่อค่าในเมตริก Q ของตัวแปร State ใดมีค่าสูงแสดงว่าเราให้ความสำคัญต่อผลตอบสนองของตัวแปร State นั้นสูง ส่วนค่าในเมตริก Q ของตัวแปร State ที่มีค่าต่ำบ่งบอกถึงว่าเราให้ความสนใจต่อผลตอบสนองแก่ตัวแปร State นั้นน้อย

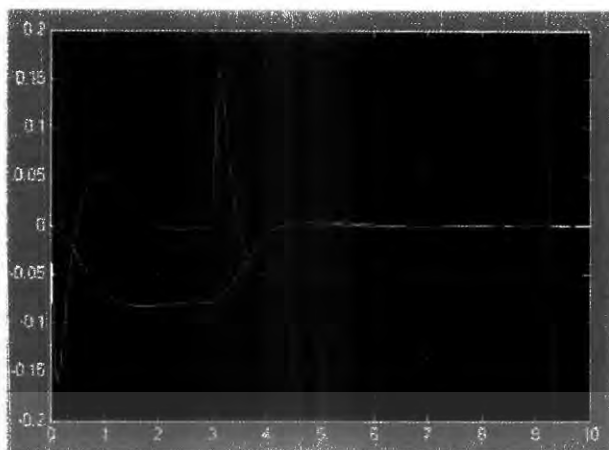


ภาพที่ 3.7 ผลตอบสนองเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าน้ำหนัก $q_{11}=100$ กับ $q_{33}=100$ และ $R=1$ มีการรบกวนระบบ ตั้งแต่วินาทีที่ 0-3 หลังจากนั้นปล่อยให้ระบบทำงาน สัญญาณสี่วงแทนค่า "Pendulum" สัญญาณสี่เหลี่ยมแทน "ตำแหน่งของรถ"



ภาพที่ 3.8 ผลตอบสนองของระบบที่ $R=0.25$ $q_{11}=100$ $q_{33}=100$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.9 ผลตอบสนองของระบบที่ $R=0.25$ $q_{11}=1000$ $q_{33}=100$



ภาพที่ 3.10 ผลตอบสนองของระบบที่ $R=0.25$ $q_{11}=100$ $q_{33}=1000$

- สรุปได้ว่า
1. ลด R จะทำให้ผลตอบสนองดีขึ้นมอมที่เปลี่ยนไปลดน้อยลง จะเข้าสู่สมคูลเร็วขึ้น
 2. เพิ่ม X จะทำให้ตำแหน่งพยายเมที่จะเข้าสู่สมคูลเร็วขึ้นแต่เมื่อกลับมาที่ 0 แล้วมวมของ Pendulum ยังไม่เข้าสู่ตำแหน่งจึงทำให้ตำแหน่งของรถยังแกว่งอยู่
 3. เพิ่ม Θ จะทำให้ตำแหน่งของก้าน Pendulum เข้าสู่สเตรด 0 เร็วกว่าตำแหน่งของรถ แต่การเลือก Weighting Function ยังต้องคว่า มันใช้ไฟเกินกว่าที่ Battery ให้ได้รึเปล่า

3.3 การออกแบบโปรแกรมบนไมโครคอนโทรลเลอร์

เนื่องจากการทำงานของหุ่นยนต์สองล้อนี้ จำเป็นต้องอาศัยการประมวลผลของการคำนวณที่มีความไวค่อนข้างมาก และมีหน่วยความจำที่ใช้มากพอสมควร เหล่านี้ทำให้ต้องเลือกใช้เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์แบบดิจิทัล หรือ Digital Signal Processing (dsPIC) ก่อนอื่นจะขอกล่าวข้อมูลเบื้องต้นของไมโครคอนโทรลเลอร์แบบนี้ก่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.1 ข้อมูลเบื้องต้นของไมโครคอนโทรลเลอร์แบบ dsPIC

DsPIC คือชื่อของไมโครคอนโทรลเลอร์แบบ 16 บิต มีชื่ออย่างเป็นทางการสำหรับไมโครคอนโทรลเลอร์อนุกรมใหม่นี้ว่า Digital Signal Controller หรือ DSP นั้นหมายความว่า dsPIC เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ได้รับการออกแบบมาเป็นพิเศษเพื่องานประมวลผลสัญญาณดิจิทัลสำหรับสร้างระบบควบคุมอัตโนมัติที่มีความสามารถสูง

ในการใช้งานนั้นจะเลือกรุ่น DsPIC30F6010 เป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ขนาด 80 ขา แบบ Thin Quad Flatpack (TQFP) สาเหตุที่ช้รุ่นนี้เนื่องจากมีโมดูลของ pulse width modulation ถึง 4 คู่ ซึ่งเท่ากับความต้องการ อีกทั้งหน่วยความจำและ จำนวนพอร์ทก็มีให้ใช้มากเพียงพอกับความ ต้องการอีกด้วย ซึ่งคุณสมบัติต่าง ๆ จะกล่าวอยู่ในภาคผนวก ค.

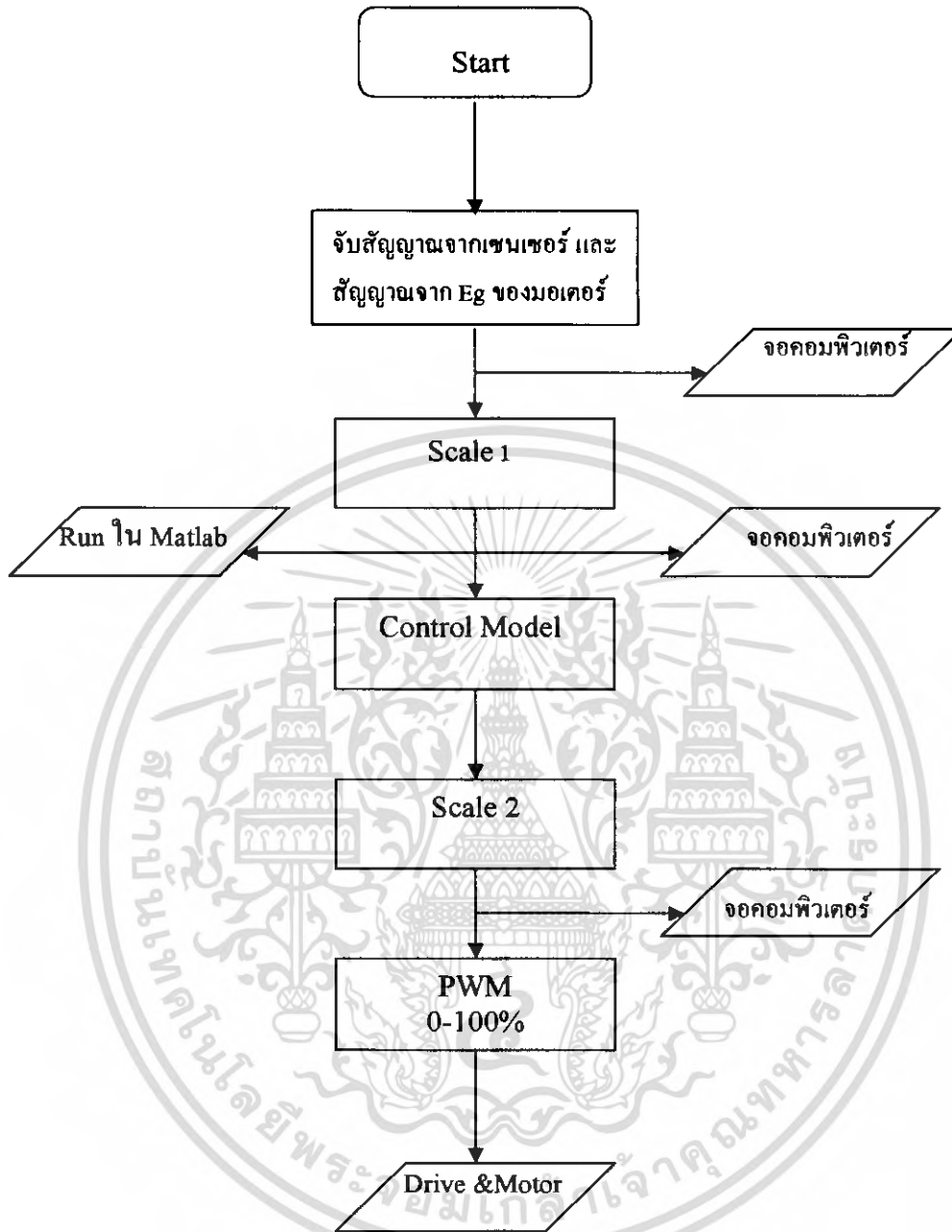


ภาพที่ 3.11 dsPIC30F6010 80-Lead Plastic Thin Quad Flatpack (TQFP)

3.3.2 การออกแบบโปรแกรมในไมโครคอนโทรลเลอร์

ในส่วนของ การเขียนโปรแกรม นั้นจะให้ภาษาซีในการเขียน และใช้โปรแกรม MPLAB IDE เป็นตัวคอมไพล์ การเขียนโปรแกรมทั้งหมดนี้จะอยู่ภายใต้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ได้ศึกษามาแล้วทั้งหมด เพื่อให้การควบคุมมีประสิทธิภาพที่สุด ซึ่งการออกแบบโปรแกรมนั้นจะเริ่มตั้งแต่มีสัญญาณเข้า คำนวณในโมเดลทางคณิตศาสตร์ จนกระทั่งได้สัญญาณเอาต์พุตออกมา ซึ่งจะเป็นไปตามแผนภาพโดยรวมดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.12 แผนภาพโคจรรวมของการเขียนโปรแกรม

จากแผนภาพการทำงานของไมโครคอนโทรลเลอร์ จะเริ่มด้วยการจับสัญญาณจากเซนเซอร์ 2 แห่ง และสัญญาณจากรีโมทคอนโทรลเลอร์ทั้งหมด 4 ช่องสัญญาณ สัญญาณแรกที่ถูกจับคือสัญญาณที่มาจากรีโมทคอนโทรลเลอร์จากช่องสัญญาณ THRO ซึ่งเป็นสัญญาณพัลส์วืดมอดดูเลชันตัวแรกที่ สัญญาณตัวนี้ไว้ใช้สำหรับการบังคับทิศทางเดินทางเดินหน้า ถอยหลัง ให้กับตัวหุ่นยนต์

สัญญาณที่สอง คือ สัญญาณ AILE ซึ่งเป็นสัญญาณพัลส์วิดตัวที่สองจากรีโมทคอนโทรล สัญญาณนี้เอาไว้ใช้สำหรับบังคับทิศทางเลี้ยวซ้าย ขวาของตัวรถยนต์สองล้อ สัญญาณตัวที่สาม คือ สัญญาณพัลส์วีจจากเซนเซอร์วัดอัตราเร็วเชิงมุม หรือ ไจโรสโคป ซึ่งจะถูกระงับการทำงาน หรือ จะทำงานได้เมื่อได้รับสัญญาณ ELEV ซึ่งเป็นสัญญาณพัลส์วีจตัวที่สามจากรีโมทคอนโทรล

สัญญาณที่สี่ คือ สัญญาณ RUDD ซึ่งเป็นสัญญาณพัลส์วิดตัวที่สี่จากรีโมทคอนโทรล สัญญาณนี้เอาไว้ใช้สำหรับการชดเชยสัญญาณ (compensate) ที่เกิดจากความผิดเพี้ยนของเซนเซอร์วัดมุม หรือ สัญญาณ Error จากไจโรสโคป

สัญญาณทั้งสี่นี้จะถูกลำดับการจับสัญญาณไว้แล้ว ด้วยโปรแกรมที่เขียนบนไมโครคอนโทรลเลอร์ สัญญาณทั้งสี่นี้จะมีค่าประมาณ 50Hz หรือ 0.020 ms เพื่อให้มีความละเอียดและความไวต่อการจับระดับสัญญาณถึง Timer Capture 32bit ซึ่งเป็นความเร็วที่สูงที่สุดของการจับสัญญาณ

สัญญาณที่ห้า และ หก คือ แรงดันย้อนกลับของมอเตอร์(Eg) ของมอเตอร์ทั้งสองตัว นำมาหาค่าความเร็วเชิงมุมจากโมเดลทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ ค่าความเร็วนี้จะถูกนำมาคำนวณหาระยะทางที่รถเคลื่อนที่ ตอนนี้จะแสดงผลบนหน้าจอคอมพิวเตอร์เพื่อง่ายต่อการสังเกตผล จากนั้นนำตัวเลขของการจับสัญญาณที่ได้ มาทำสเกลให้อยู่ในรูปของความเร็วเชิงมุม (rad/s) และระยะทาง (m)

การนำสัญญาณทั้งหมดนี้มาใช้ จะเริ่มจากการหาค่าอ้างอิงของสัญญาณทั้งหมดสัญญาณ โดยจับสัญญาณตอนที่ระบบสมดุล ไม่มีการขยับเขยื้อนตัวรถยนต์ สัญญาณอ้างอิงนี้จะต้องคงที่ตลอดการจับค่าประมาณ 100 ครั้ง จึงจะเสร็จสิ้นการสอบเทียบสัญญาณ (Calibrate) ส่วนการนำค่าตัวเลขจากสัญญาณทั้งหมดมาใช้นั้นกระทำโดย เมื่อป้อนอินพุตให้กับรถยนต์ โดยการบังคับที่รีโมทคอนโทรล หรือ ทำให้ตัวรถยนต์เอียงจากจุดที่เราอ้างอิง สัญญาณที่เข้าไปใหม่จะถูกเปรียบเทียบกับสัญญาณอ้างอิงที่ได้จากขั้นตอนสอบเทียบสัญญาณ สัญญาณที่แตกต่างนี้เองจะถูกนำมาเปลี่ยนค่าเป็นตัวเลขเพื่อเข้าสู่กระบวนการคำนวณต่อไป

สัญญาณตัวที่เจ็ดซึ่งเป็นตัวสุดท้าย คือ สัญญาณที่ใช้วัดโวลต์เตจจากแบตเตอรี่ซึ่งมีค่าประมาณ 0-12 โวลต์ สัญญาณนี้จะต้องถูกแบ่งสัญญาณเป็น 0-5 โวลต์ เพื่อส่งไปให้ช่องรับสัญญาณอะนาล็อกในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์

ตัวเลขทั้งหมดที่ได้จากขั้นตอนแรกจะถูกนำมาใช้ในการคำนวณ ในโมเดลทางคณิตศาสตร์ของตัวมอเตอร์ และ ส่วนของออปติมอลคอนโทรลที่ได้จากการออกแบบ โดยอินพุตของคอนโทรลโมเดลจะเป็นค่าตัวเลขขององศาที่เอียงจากจุดอ้างอิง ซึ่งได้มาจากการสัญญาณเซนเซอร์ไจโรสโคป และตัวเลขที่เป็นระยะทางซึ่งได้จากการวัด Eg ของมอเตอร์ คำนวณออกมาเป็นค่าของระยะทาง หลังจากการคำนวณเสร็จสิ้นจะได้ค่า MV (Manipulate Value)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าตัวเลขของค่า MV ที่ได้จะถูกสเกลอีกครั้งให้เป็น 0-100 % เพื่อจะส่งไปให้ส่วนของโปรแกรมที่เขียนเพื่อสร้าง PWM เพื่อให้ได้ duty cycle 0-100% และความถี่ประมาณ 2.5 KHz

ขั้นตอนสุดท้ายของโปรแกรมคือการส่งสัญญาณ PWM 4 คู่ ซึ่งแต่ละคู่จะทำงานเป็นแบบโหมคคอมพลิเมนต์ารี (Complementary mode) คือ มีด้าน high และ ด้าน low ซึ่งจะมีค่าเวลาตายของคู่ PWM (Dead time) มากกว่า 200 นาโนวินาทีขึ้นไป มอเตอร์ 1 ตัวจะใช้ PWM 2 คู่ เพื่อที่จะควบคุมได้ทั้งความเร็วและทิศทางของมอเตอร์ ซึ่งรายละเอียดของวงจรตีชีโครมอเตอร์จะกล่าวในหัวข้อต่อไป สำหรับโปรแกรมที่เขียนผู้ที่สนใจสามารถดูเพิ่มเติมถึงหลักการเขียนโปรแกรม และภาษาที่ใช้เขียนได้สามารถดูเพิ่มเติมได้ที่ภาคผนวก ก

3.4 พัลส์วิดท์โมดูเลชันแอมพลิไฟเออร์ (PWMA)

ในระบบ “ตีชีเซอร์โว” แอมพลิไฟจะมีหน้าที่ควบคุมกระแสและ โวลต์เตจที่ใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ เพื่อให้ได้ค่าความเร็วตามที่ต้องการแอมพลิไฟแบบ PWM สามารถทำงานได้ 3 แบบคือ ไบโพลาร์ ยูนิโพลาร์และลิมิตยูนิโพลาร์ซึ่งเราได้อธิบายรายละเอียดในแต่ละแบบ เราจะได้ศึกษาปัญหาการสูญเสียในแอมพลิไฟตลอดจนปัญหาการรักษาความถี่ในการสวิทซ์ให้ถูกต้อง

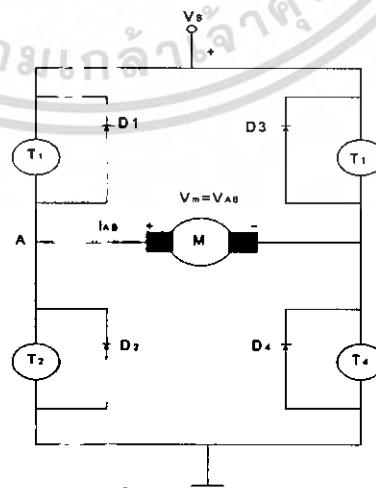
จากการศึกษาปัญหาการใช้งานกับตีชีมอเตอร์นี้เราสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับสเตรปมอเตอร์ และใช้เป็นแอมพลิไฟของลิเนียร์มอเตอร์ได้อีกด้วย

3.4.1 การทำงานของพัลส์วิดท์โมดูเลชันแอมพลิไฟเออร์

แอมพลิไฟแบบ PWM สามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิด ตามลักษณะของการทำงานคือไบโพลาร์ ยูนิโพลาร์และลิมิตยูนิโพลาร์ สำหรับแบบไบโพลาร์ซึ่งง่ายที่สุดจะดูการทำงานได้ตามรูปที่ 3.13 โดยที่เราจะกำหนดให้มีความถี่การสวิทซ์เป็น f_s , t_{on} ที่เกิดขึ้นในส่วนแรกและ t_{off} เกิดในส่วนหลัง โดย

$$t_{on} \text{ เมื่อ } 0 \leq t \leq t_1$$

$$t_{off} \text{ เมื่อ } t_1 \leq t \leq t_f$$



ภาพที่ 3.13 พัลส์วิดท์โมดูเลชันแอมพลิไฟเออร์สำหรับตีชีมอเตอร์

ไบโพลาร์ จะมี และ T_4 นำกระแสระหว่างเฟส on ส่วน T_2 และ T_3 จะนำกระแสขณะเฟส off จะได้ ฟังก์ชันตกคร่อมมอเตอร์เป็น

$$\frac{\omega(s)}{V_{in}(s)} = \frac{1}{\alpha(s)} \cdot \frac{K_T}{sJ} V_m = V_{AB} \begin{cases} V_s 0 < t < t_1 \\ -V_s t_1 < t < t_f \end{cases} \quad (3-38)$$

แบบยูนิโพลาร์ จะลดจำนวนทรานซิสเตอร์ในการสวิตชิ่งลงการสวิตชิ่งขึ้นอยู่ V_m เป็นบวก หรือลบเมื่อ V_m เป็นบวก T_4 จะนำกระแสตลอดคาบ ในขณะที่ T_1 นำกระแสในช่วงเฟส on และ T_2 จะนำกระแสในช่วงเฟส off เมื่อ V_m เป็นลบ T_2 จะนำกระแสตลอด โดยมี T_3 และ T_4 สลับกันทำงาน เมื่อ V_m เป็นบวกได้

$$V_{in} \begin{cases} V_s 0 < t < t_1 \\ 0 t_1 < t < t_f \end{cases} \quad (3-39)$$

การแสดงค่า V_m ในทางลบจะเหมือนกันเพียงแต่ V_m เป็นลบเท่านั้น

จากลักษณะของ 2 แบบดังที่กล่าวมานั้นมีประโยชน์เหมือนกัน ซึ่งในแต่ละกรณีจะมี ทรานซิสเตอร์คู่หนึ่ง (T_1, T_2) หรือ (T_3, T_4) จะหยุดนำกระแสขณะที่อีกคู่ นำกระแสซึ่งมีเวลาเก็บ ประสมและเวลาที่ปล่อยออกของทรานซิสเตอร์เกิดขึ้นและมันอาจเป็นไปได้ที่ทรานซิสเตอร์ทั้งหมด นำกระแสในเวลาเดียวกัน ซึ่งจะทำให้เกิดการลัดวงจรของซัพพลาย เราจำเป็นต้องหลีกเลี่ยงภาวะ ดังกล่าว ซึ่งสามารถทำได้โดยการสร้างช่วง delay time ระหว่างการหยุดและการนำกระแสของ ทรานซิสเตอร์และด้วยเหตุผลดังกล่าว ความถี่ของการสวิตชิ่งจะถูกจำกัดในวงที่แคบลง

แบบที่ 3 ของการทำงานคือแบบ ลิมิตยูนิโพลาร์จะแสดงให้เห็นคือมีความจำเป็น ต้องมี ช่วง delay ซึ่งการสวิตชิ่งขึ้นกับค่า V_m เมื่อ V_m เป็นบวก T_4 จะนำกระแสตลอด T_1 จะสวิตช์เป็น on ในช่วงเฟส on ดังนั้นในช่วงเฟส on ทั้ง T_1 และ T_4 จะ on ยังผลแก่โวลต์เดจของมอเตอร์ V_m คือ

$$V_m = V_s 0 \leq t \leq t_1 \quad (3-40)$$

ระหว่างเฟส Off จะมี T_4 นำกระแสเพียงตัวเดียวเป็นผลให้ V_m ขึ้นกับ I_{AB} คราบใดที่ $I_{AB} > 0$ ซึ่งเป็นสภาวะปกติ เมื่อ $V_{AB} > 0$ กระแส I_{AB} จะไหลผ่าน D_2 และ T_4 เป็นผลให้ $V_A = 0$ และ

$$\text{เมื่อ } V_m = V_{AB} = 0 \quad (3-41)$$

ในกรณีที่ I_{AB} เป็นลบ กระแสจะไหลผ่าน D_1 และ D_4 เป็นผลให้ $\begin{cases} t_1 \leq t \leq t_f \\ I_{AB} < 0 \end{cases} V_A = V_s$ และ

$$V_m = V_{AB} = V_s \text{ เมื่อ } \begin{cases} t_1 \leq t \leq t_f \\ I_{AB} < 0 \end{cases} \quad (3-42)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งจะเกิดขึ้นภายหลังเปลี่ยนขั้ว V_m

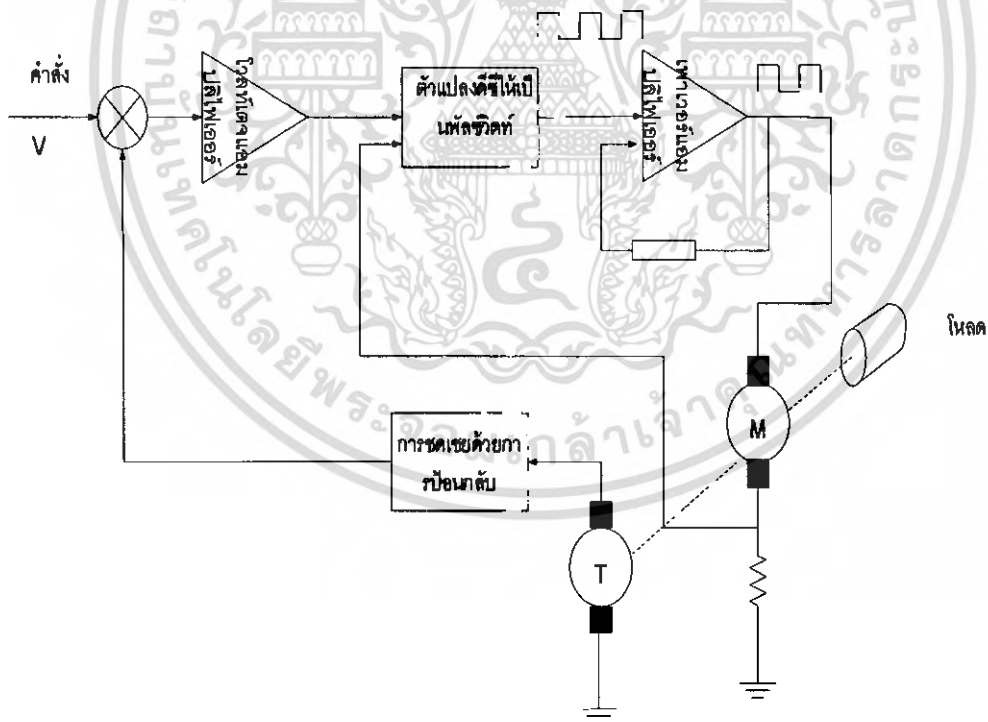
ในที่สุดถ้าเราสามารถทำให้ $I_{AB}=0$ (เข้าใกล้ศูนย์จนถือว่าเป็นศูนย์) จะทำให้ ทั้ง D_1 และ D_4 ไม่นำกระแสและโวลต์แดง V_m จะอยู่ระหว่างค่าศูนย์และ V_s ดังต่อไปนี้

$$0 < V_m < V_s \quad \text{เมื่อ} \quad \begin{cases} t_1 \leq t \leq t_f \\ I_{AB} > 0 \end{cases} \quad (3-43)$$

อย่างไรก็ตามถ้า $I_{AB} > 0$ เป็นสภาวะปกติเมื่อ $V_m > 0$ แบบยูนีโพลาร์และแบบลิมิตยูนีโพลาร์ จะแสดงคุณสมบัติคล้ายกันมาก ซึ่งเราสามารถสรุป Mode การทำงานและผลของโวลต์แดง ดังตารางที่ 3.1

3.4.2 ระบบคอนโทรลความเร็วที่ใช้พัลส์วIDTH โมดูเลชันแอมพลิไฟเออร์

PWM สวิตซ์ซิ่งแอมพลิไฟเออร์ที่ทำงานด้วยทรานซิสเตอร์จะใช้ในระบบคอนโทรลที่มีประสิทธิภาพสูง ระบบคอนโทรลความเร็วที่มีเพาเวอร์สูง ๆ และในระบบเซอร์โวลต์ลอคโคดอะแกรมของระบบคอนโทรลความเร็วแบบ PWM แสดงได้ในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 บล็อกโคดอะแกรมของระบบคอนโทรลความเร็วแบบ PWM

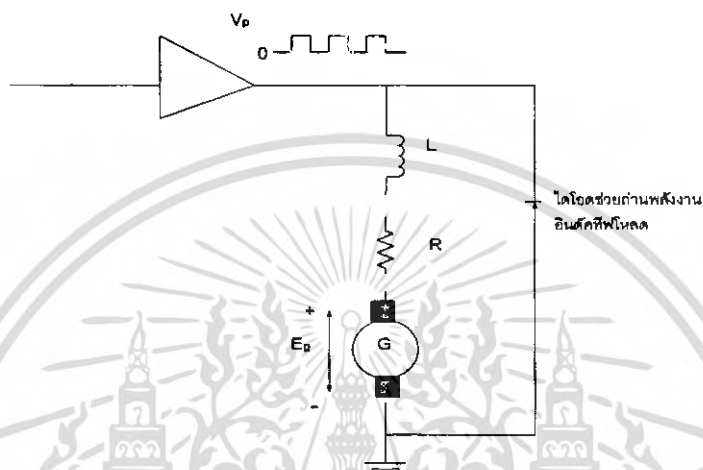
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 แสดงการทำงานของแอมพลิไฟแบบพัลส์วิดท์โมดูเลชัน

ลักษณะการทำงานและ อินพุทโวลต์เตจ	ภาวทรานซิสเตอร์และโวลต์เตจของมอเตอร์	
	เฟส on	เฟส off
ไบโพลาร์โหมค	T_1, T_4 on T_2, T_3 off $V_m = V_s$	T_2, T_3 on T_1, T_4 off $V_m = -V_s$
ยูนิโพลาร์	T_1, T_4 on T_2, T_3 off $V_m = V_s$	T_2, T_4 on T_1, T_3 off $V_m = 0$
ยูนิโพลาร์	T_2, T_3 on T_1, T_4 off $V_m = -V_s$	T_2, T_4 on T_1, T_3 off $V_m = 0$
ลิมิตยูนิโพลาร์	T_1, T_4 on T_2, T_3 off $V_m = V_s$	T_4 on T_1, T_2, T_3 off $V_m = 0$, if $I_{AB} > 0$ $V_m = V_s$, if $I_{AB} < 0$ $0 < V_m < V_s$, if $I_{AB} = 0$
ลิมิตยูนิโพลาร์	T_2, T_3 on T_1, T_4 off $V_m = -V_s$	T_2 on T_1, T_3, T_4 off $V_m = 0$, if $I_{AB} > 0$ $V_m = -V_s$ if $I_{AB} < 0$ $-V_s < V_m < 0$ if $I_{AB} = 0$

เรามักจะใช้ความถี่ของพัลส์ในระบบ PWM ที่มีค่าสูงกว่า 1 kHz (มักจะมีค่าถึง 10 KHz) และความถี่นี้จะขึ้นอยู่กับความต้องการของผลตอบสนองของระบบต่อแบนด์วิดท์อินพุตคั่นชันของมอเตอร์และคุณสมบัติการสูญเสียเพาเวอร์ในตัวมอเตอร์ที่ความสูง ในเวลาเดียวกันเราจะต้องคำนึง audio noise ที่เกิดจาก ขดลวด, ฮีทซิงค์ และส่วนของโครงประกอบของตัวมอเตอร์มันจะดังออกมาเป็นเสียงรบกวนและในการประยุกต์ใช้งานของระบบ PWM นี้เราสามารถเพิ่มความถี่ของพัลส์ให้สูงขึ้นถึงจุดที่เสียงของน็อยส์ (noise) นั้น หูคน ไม่ได้ยินเสียงนั้น

ในการพิจารณาคุณสมบัติของโวลต์เดจและกระแสของระบบ PWM ขึ้นแรกเราพิจารณาถึงมอเตอร์ในอุดมคติและคุณลักษณะของมอเตอร์ในระบบ PWM วงจรสมมูลของมอเตอร์แสดงได้ในรูปที่ 1.23 ถูกคลื่นของกระแสที่ไหลในมอเตอร์ในระหว่างสวิตช์ซึ่งโหมด (switching mode) ไม่ได้ขึ้นอยู่กับเพียงสวิตช์ซึ่งเรท (Switching rate) เท่านั้น แต่ยังขึ้นอยู่กับความเร็วของมอเตอร์ (w) ผลรวมของอินดักแต้นซ์ (L) ความต้านทานของมอเตอร์ (R_m) และระดับของกระแสในไซเคิลสุดท้าย



ภาพที่ 3.15 วงจรสมมูลของดีซีมอเตอร์ในระบบคอนโทรลแบบ PWM

3.5 วงจรควบคุมการทำงานของมอเตอร์

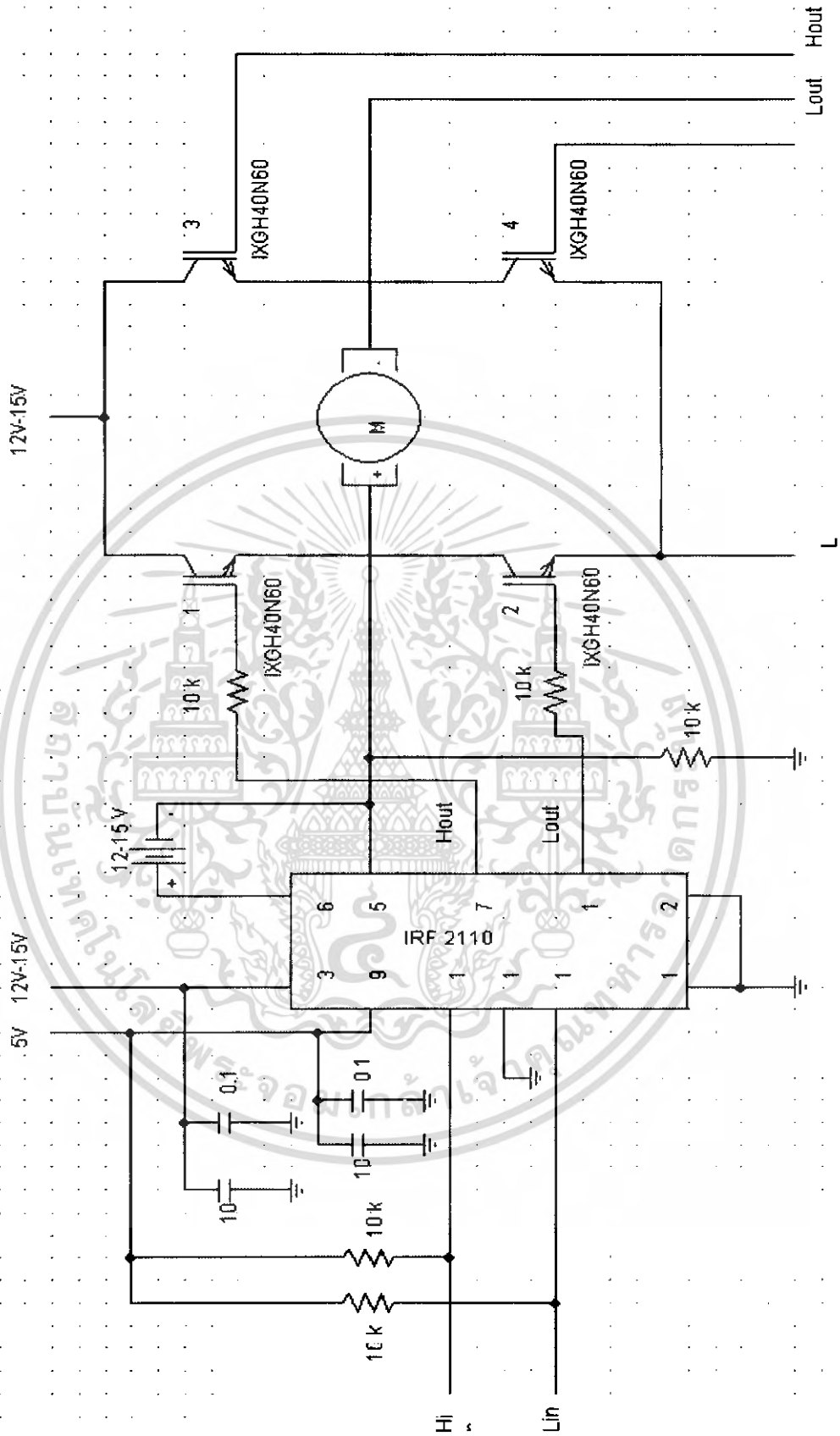
จากภาพ 3.11 ในการออกแบบวงจรขับมอเตอร์อาศัยหลักการขับมอเตอร์แบบ 4 ควอดแรน และคำนึงถึงกระแสกับแรงดันทางด้านเอาต์พุตซึ่งในที่นี้เราจำกัดกระแสไว้ไม่เกิน 15 แอมแปร์ และแรงดันอยู่ที่ -12 ถึง 12 โวลต์ สำหรับการทำงานของวงจรมอเตอร์จะรับสัญญาณอินพุต แบบพัลส์วิธ มอดูเลชันความถี่ประมาณ 2.5KHz ซึ่งเป็นสัญญาณที่ได้จากไมโครคอนโทรลเลอร์โดยค่าความถี่ไซเคิลจะขึ้นอยู่กับผลของการคำนวณทางคณิตศาสตร์ในตัวไมโครคอนโทรลเลอร์สัญญาณพัลส์วิธ ที่ออกมา 1 คู่ จะประกอบไปด้วยสัญญาณแบบ High และ Low ซึ่งสัญญาณทั้งสองนั้นจะเป็นแบบ คอมพลิเม้นตารีมี deatime ประมาณ 200ns

สัญญาณทั้งสองจะถูกส่งเข้าไปที่ตัว Gatedrive เพื่อขยายสัญญาณทางด้านเอาต์พุต จะได้ Hout และ Lout เพื่อไปตั้งการทำงานของตัวสวิตช์ซึ่ง ซึ่งในโปรเจกต์นี้ใช้มอสเฟต เนื่องจากความสามารถในการทนต่อกระแส แรงดัน และสามารถสวิตช์ที่ความถี่สูงๆได้

มอเตอร์ 1 ตัวใช้สัญญาณพัลส์วิธ 2 คู่ เพื่อให้สามารถเลือกทิศทางการไหลของกระแสได้ แรงดันที่ป้อนให้มอเตอร์นั้นจะอยู่ที่ -12 ถึง 12 โวลต์ ซึ่งตัวที่จะกำหนดขนาดของแรงดันที่จะป้อนให้มอเตอร์ก็คือ สัญญาณพัลส์วิธที่ปรับค่าความถี่ไซเคิลได้ตั้งแต่ 0-100% โดยที่

$$V_a = \text{Ton} / (\text{Toff} + \text{Ton}) * V_{\text{battery}} = \text{duty cycle} * V_{\text{battery}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

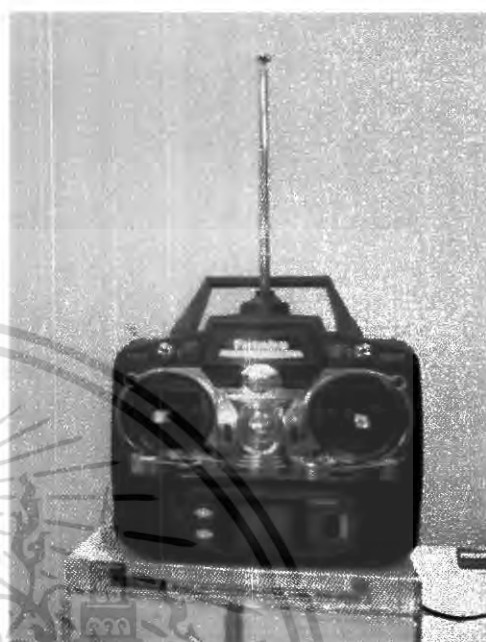
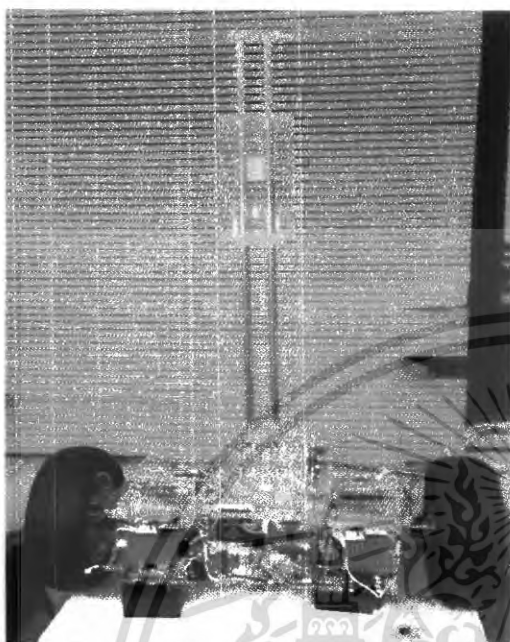


ภาพที่ 3.16 วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6 การออกแบบตัวรถยนต์สองล้อ

3.6.1 ลักษณะทั่วไป



ภาพที่ 3.17 ลักษณะทั่วไปของรถยนต์สองล้อ

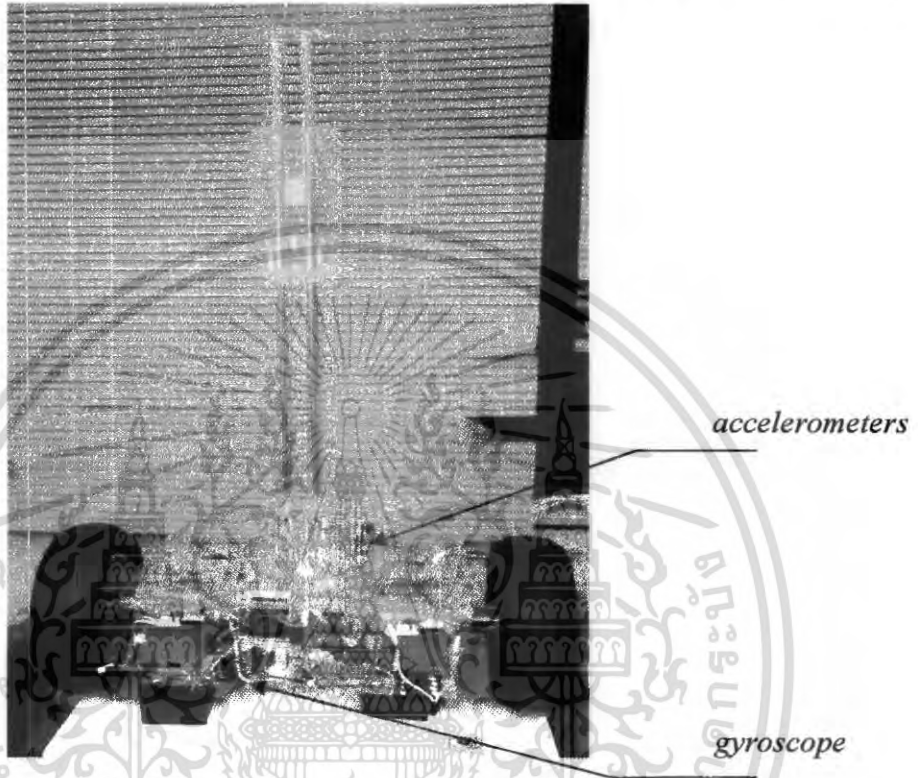
เนื่องจากหุ่นยนต์ตัวก่อนยังพบปัญหาทางด้านตัวเซนเซอร์ ซึ่งทำให้รถยนต์สองล้อยังไม่มีความเสถียรมากนัก จึงได้มีการพัฒนาต่อไปจากเดิมโดยการเพิ่มตัวเซนเซอร์อีกตัวหนึ่งซึ่งมาช่วยขจัดปัญหาของไจโรสโคปที่เกิดการเลื่อนของสัญญาณ เมื่อไจโรสโคปเกิดการเลื่อนจะมีการคอมเพนเสต (Compensate) สัญญาณกลับสู่จุดเดิม มีผลทำให้หุ่นยนต์ควบคุมได้ดีขึ้นเมื่อเวลาผ่านไปนานๆ และเปลี่ยนตัวเซนเซอร์จากตัววัดกระแส (Current Sensor) มาเป็นเทคโคเจนท์ (Tachogen) เพราะตัววัดกระแสที่วัดจากมอเตอร์จะมีกระแสค้ำอยู่แม้รถยนต์จะอยู่ในเสถียรภาพแต่ตัววัดกระแสสามารถวัดกระแสออกมาได้ซึ่งนำไปคำนวณต่อให้ออกมาเป็นค่าแรงดันย้อนกลับ (Voltage feedback, E_b) ทำให้ระบบคิดวารถยนต์ไม่เสถียรจึงเกิดการเคลื่อนที่ของล้อกลับไปกลับมาไม่อยู่นิ่ง แต่เมื่อเราเปลี่ยนเป็นเทคโคเจนท์ (Tachogen) มาวัดแรงดันย้อนกลับ (Voltage feedback, E_b) โดยวัดแรงดันที่ออกมาจากมอเตอร์เลยเมื่อรถยนต์อยู่นิ่งแรงดันย้อนกลับที่ออกมาก็จะเป็นศูนย์รถยนต์จึงดูแล้วนิ่งมากกว่ารถยนต์ตัวเดิมที่เคลื่อนที่ไปมาไม่อยู่นิ่ง

การควบคุมทิศทางจะควบคุมผ่านรีโมทคอนโทรลเลอร์จากรูป สัญญาณจากรีโมทจะถูกรับด้วยการ์ดรับสัญญาณแบบ PCM ซึ่งจะให้สัญญาณพัลส์วิดท์ที่ได้กล่าวมาแล้วในส่วนของโปรแกรม การควบคุมทิศทางของตัวรถยนต์นี้เหมือนกับการควบคุมทิศทางของรถบังคับทั่วไป คือเดินหน้า ถอยหลัง เลี้ยวซ้าย เลี้ยวขวา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6.2 ลักษณะการติดตั้งตัวเซนเซอร์

เนื่องจากการรักษาสมดุลของรถยนต์สองล้อ จะต้องใช้เซนเซอร์วัดมุมที่เอียงไปจากตำแหน่งสมดุลของก้านพวงล้อ การติดตั้งจึงติดตั้งไว้บนตัวของรถยนต์ เมื่อก้านพวงล้อเกิดมีสิ่งรบกวน ทำให้ก้านพวงล้อเปลี่ยนตำแหน่งไปจากจุดสมดุลเซนเซอร์จะวัดมุมที่ก้านพวงล้อเปลี่ยนแปลงไป



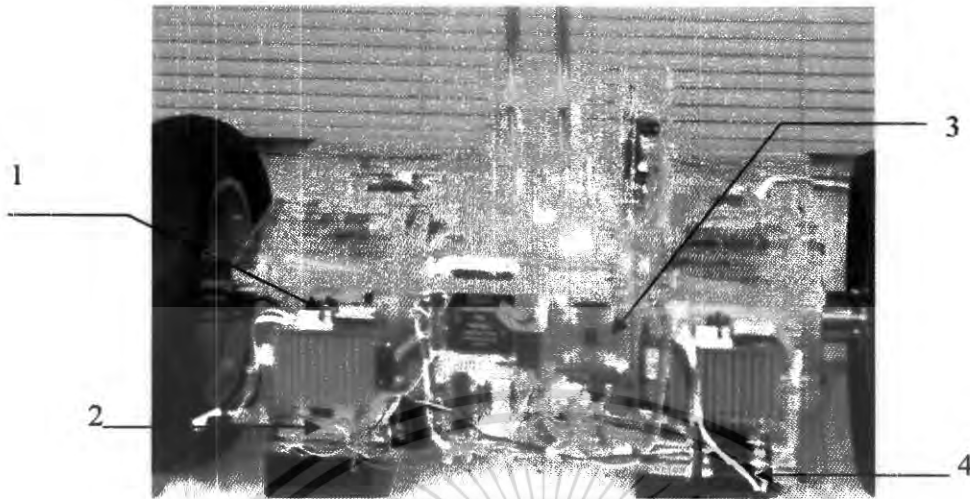
ภาพที่ 3.18 ลักษณะการติดตั้งตัวเซนเซอร์เมื่อก้านพวงล้ออยู่ที่จุดสมดุล



ภาพที่ 3.19 เมื่อก้านพวงล้อเกิดมีสิ่งรบกวน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.6.3 ลักษณะการติดตั้งชิ้นส่วนอื่นๆ



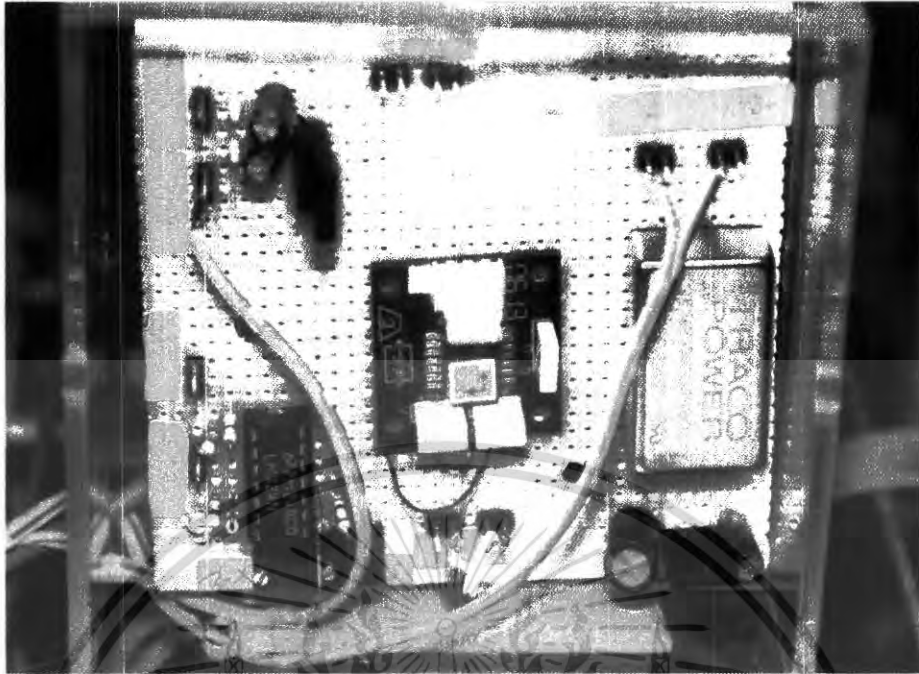
ภาพที่ 3.20 ลักษณะการติดตั้งอื่นๆ

ส่วนประกอบอื่นๆ จากที่กล่าวข้างต้นประกอบด้วย

1. ส่วนของวงจรขับกระแส หรือ วงจรซีซีไดร์ฟมอเตอร์ ซึ่งจะมีทั้งหมด 4 ชุด แต่ละชุดจะมีตัวระบายความร้อน(Heat zinc) เพื่อระบายความร้อนที่เกิดจากการที่ตัวสวิตซ์แบบมอสเฟตซึ่งทำงานที่ความถี่สูงๆ เพื่อเพิ่มอายุการใช้งานให้กับตัวมอสเฟต ซึ่งส่วนนี้ทั้งหมดเป็นส่วนที่มีน้ำหนักพอสมควร การติดตั้งจะต้องคำนึงถึงสมดุลตัวตัวหุ่นยนต์ด้วย ดังนั้นจึงทำการติดตั้งดังรูปโดยเน้นถึงความสมดุลเป็นหลัก
2. ส่วนของตัวรับสัญญาณรีโมทคอนโทรล ใช้รับสัญญาณจากรีโมทเพื่อเดินหน้า ถอยหลัง เลี้ยวซ้ายและขวา และยังรับสัญญาณจากใจโรสโคปอีกด้วย
3. ส่วนของชุดไมโครคอนโทรลเลอร์ ชุดรับสัญญาณจากรีโมทคอนโทรลพร้อมแบตเตอรี่ขนาด 4 ก้อนของถ่าน AA และตัวเซนเซอร์แบบใจโรสโคป ซึ่งจะถูกติดตั้งใกล้กันบริเวณทางขวาของรถยนต์ ดังภาพ การติดตั้งแบบนี้จะลดปัญหาหาของการลอคของสัญญาณขึ้นเนื่องมาจากระยะทางของสายไฟ
4. รางถ่าน เราใช้ถ่านไฟฉายในการให้พลังงานกับใจโรสโคป

3.6.4 ลักษณะของตัวเซนเซอร์ที่ใช้ในรถยนต์สองล้อ

เราใช้ Gyroscope เป็นตัววัดมุมที่เปลี่ยนไปเป็นหลักโดยที่ตัววัดความเร่งสองทิศทาง (Dual axis accelerometers) เป็นตัว Compensate มุมที่ 0 องศา เวลาที่ Gyroscope เกิดการเลื่อนของสัญญาณเมื่อใช้เวลานานๆเนื่องจากความร้อน ทำให้ระบบไม่รู้จุดอ้างอิงที่ 0 องศาจะทำให้รถยนต์สองล้อไม่สามารถรักษาสมดุลได้

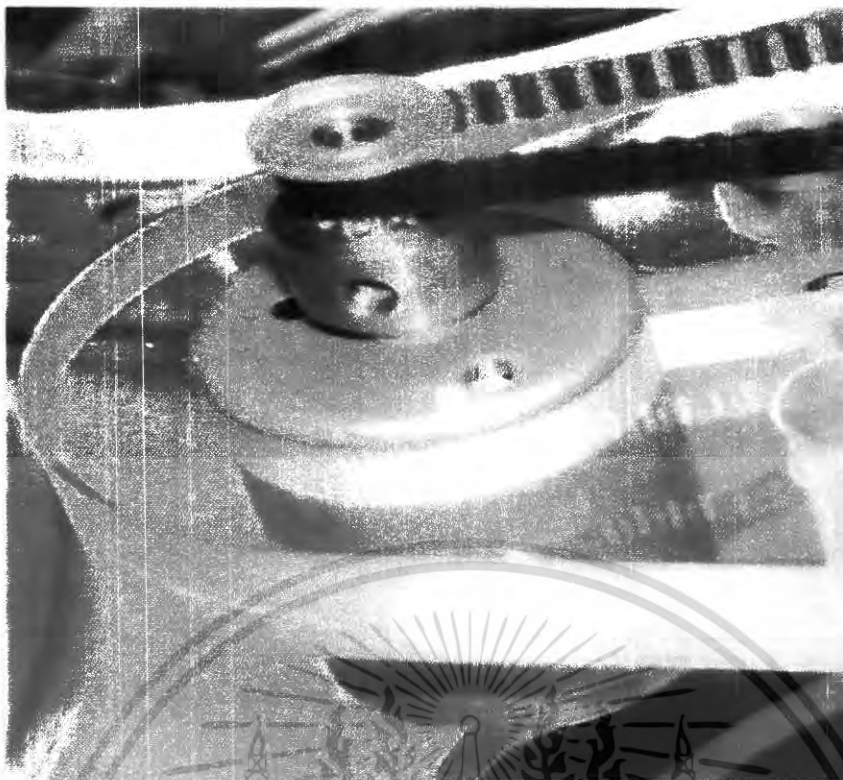


ภาพที่ 3.21 ตัววัดความเร่งสองทิศทาง (Dual axis accelerometers)



ภาพที่ 3.22 Gyroscope sensor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาพที่ 3.23 ตัววัดแรงดันไฟฟ้าย้อนกลับ (tachogen)

แรงดันไฟฟ้าย้อนกลับที่ได้จากมอเตอร์จะถูกนำไปคำนวณต่อเป็นหน่วย Rad/s จากสมการ

$$Eb = K_e \omega$$

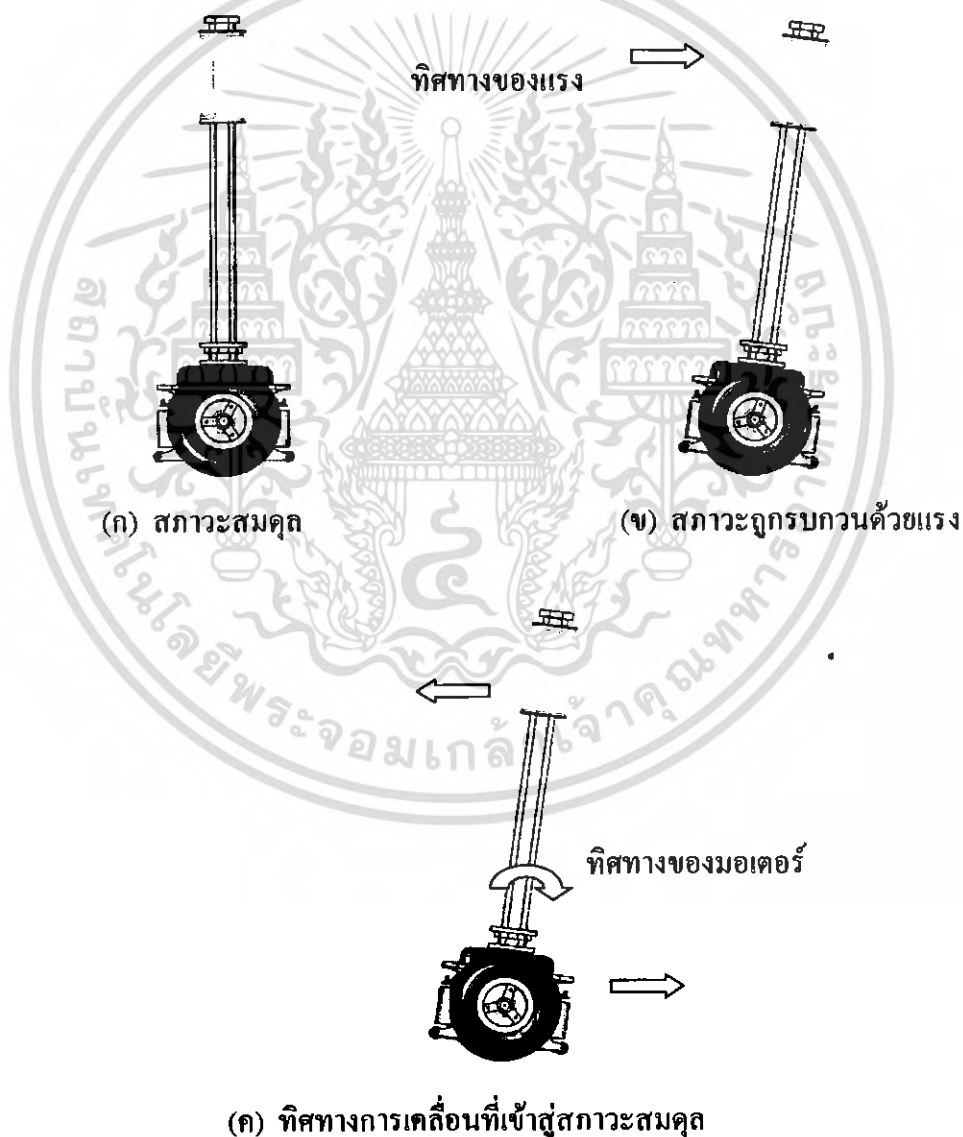
แล้วนำไปคำนวณต่อได้ระยะทางที่รถเคลื่อนที่ไป ซึ่งนำไปใช้ควบคุมความเร็วของมอเตอร์ทั้งสอง อีกด้วย ทำให้เวลาเคลื่อนที่สามารถเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงได้ เนื่องจากความเร็วของล้อทั้งสองเท่ากัน หรือใกล้เคียงกัน

บทที่ 4

การทดลอง

4.1 การทดลองใส่แรงผลัก

จากภาพที่ 4.1 (ก) เมื่อระบบอยู่ในสภาวะสมดุล ก้านเพนดูลัมจะตั้งตรงดิ่งภาพ แต่เมื่อใส่แรงผลักดิ่งภาพ (ข) จะเปรียบเสมือนระบบถูกรบกวนด้วย disturbance สัญญาณจากใจโรสโคปซึ่งเป็นตัววัดความเอียง จะถูกส่งไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ ผ่านกระบวนการควบคุม และส่งสัญญาณออกมาให้มอเตอร์เคลื่อนที่เพื่อรักษาสมดุลให้กับระบบซึ่งมีทิศทางดิ่งภาพ (ค)



ภาพที่ 4.1 แสดงทิศทางของระบบเมื่อถูกรบกวน และพยายามปรับแก้

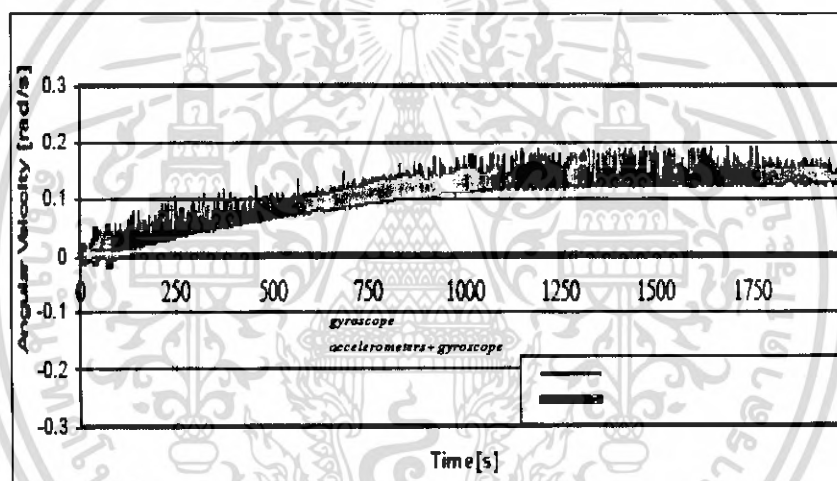
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนใหญ่รถไม่สามารถเคลื่อนกลับที่เดิมได้ เนื่องจากพื้นอาจมีความฝืดหรือลาดเอียงไม่เท่ากัน ทำให้เวลาวิ่งกลับไม่ตรงที่จุดเดิมและอาจเกิดจากมอเตอร์ทั้งสองวิ่งด้วยความเร็วที่ไม่เท่ากันทั้งที่เป็นมอเตอร์ชนิดเดียวกันและขนาดเท่ากัน

4.2 การทดลองตัวตรวจวัด (Sensor)

เนื่องจากรถยนต์สองล้อตัวก่อนยังพบปัญหาทางด้านตัวเซนเซอร์ ซึ่งทำให้รถยนต์สองล้อยังไม่เสถียรภาพมากนัก จึงได้มีการพัฒนาต่อไปจากเดิมโดยการเพิ่มตัวเซนเซอร์อีกตัวหนึ่งคือตัววัดความเร่งสองทิศทาง (Dual axis Accelerometers) ซึ่งมาช่วยขจัดปัญหาของไจโรสโคปที่เกิดการเลื่อนของสัญญาณเมื่อเวลาผ่านไปนานๆ เมื่อไจโรสโคปเกิดการเลื่อนจะมีการคอมเพนเสด (Compensate) สัญญาณกลับสู่จุดเดิม มีผลทำให้หุ่นยนต์ควบคุมได้ดีขึ้นเมื่อเวลาผ่านไปนานๆ

ดังรูป



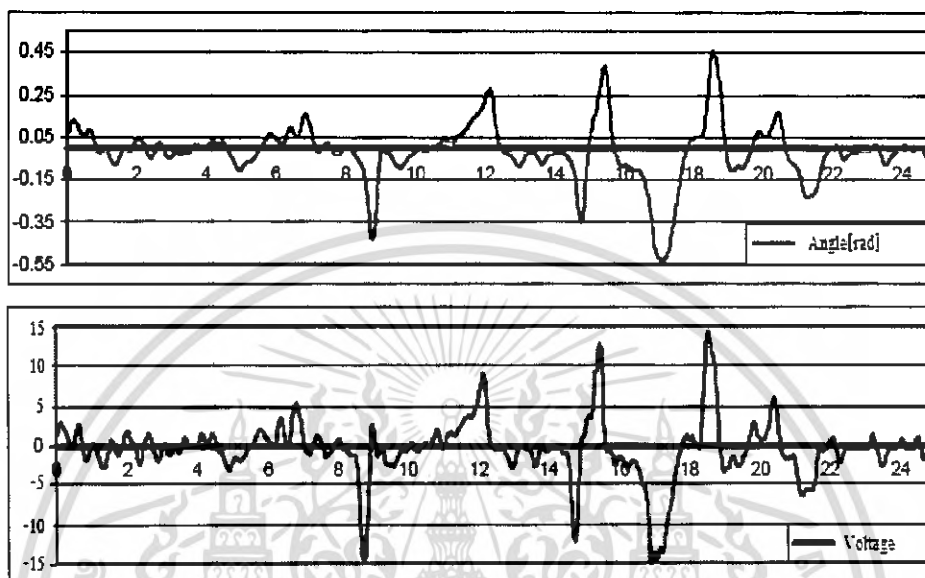
ภาพที่ 4.2 เส้นสีม่วงแทนการวัดจากไจโรสโคป เส้นสีเขียวแทนการวัดร่วมกันของไจโรสโคป และตัววัดความเร่งสองทิศทาง

เปลี่ยนตัวเซนเซอร์จากตัววัดกระแส (Current Sensor) มาเป็นเทคโคเจนท์ (Tachogen) เพราะตัววัดกระแสที่วัดจากมอเตอร์จะมีกระแสค้ำอยู่แม้รถยนต์สองล้อจะเสถียรภาพแต่ตัววัดกระแสสามารถวัดกระแสออกมาได้ซึ่งนำไปคำนวณต่อให้ออกมาเป็นค่าแรงดันย้อนกลับ (Voltage feedback, E_b) ทำให้ระบบคิดวาล์วยังไม่เสถียรจึงเกิดการเคลื่อนที่ของล้อกลับไปกลับมาไม่อยู่นิ่ง แต่เมื่อเราเปลี่ยนเป็นเทคโคเจนท์ (Tachogen) มาวัดแรงดันย้อนกลับ (Voltage feedback, E_b) โดยวัดแรงดันที่ออกมาจากมอเตอร์เลยเมื่อรถยนต์สองล้ออยู่นิ่งแรงดันย้อนกลับที่ออกมาก็จะเป็นศูนย์และสามารถควบคุมความเร็วได้ดีกว่าและเร็วกว่าเพราะไม่ต้องนำไปคำนวณอีกหุ่นยนต์จึงดูแล้วนิ่งมากกว่าหุ่นยนต์ตัวเดิมที่เคลื่อนที่ไปมาไม่อยู่นิ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การทดลองหาผลตอบสนองของรดยนต์สองล่อ

การทดลองนี้ได้ทำการรบกวนระบบโดยการผลักที่ก้านเพนดูลัมในเวลาไม่นานแล้วปล่อยให้ระบบทำการรักษาสมดุล ได้ผลตอบสนองของรดยนต์สองล่อ ดังภาพ



ภาพที่ 4.3 ผลตอบสนองของรดยนต์สองล่อ

จากภาพที่ 4.3 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างมุมที่เปลี่ยนไปจากระบบที่สมดุล กับค่าของแรงดันไฟฟ้า ที่ส่งให้กับมอเตอร์เพื่อควบคุมให้ระบบกลับสู่สมดุลอีกครั้ง ณ เวลาเดียวกัน เมื่อระบบถูกรบกวน หรือ ถูกทำให้เอียงไปจากสภาวะสมดุลมากขึ้นจะทำให้แรงดันที่ต้องป้อนให้กับมอเตอร์มากขึ้นด้วยและจากภาพที่ 4.3 แสดงให้เห็นถึงการรักษาสมดุลของรดยนต์สองล่อเมื่อถูกรบกวนไปให้เสียมดุล มุมของก้านเพนดูลัมยังคงกลับไป 0 เสมอ

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง ปัญหาและข้อเสนอแนะ

1. สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองเมื่อทำการผลึกตัวรดคือระบบถูกรบกวนทำให้ก้านเพนดูลัมเกิดการโน้มเอียง เปลี่ยนแปลงตำแหน่งไปจากจุดสมดุล ตัวเซนเซอร์ใจ โรสโคปจะทำงานร่วมกับเซนเซอร์วัดความเร่ง สองทิศทางเพื่อวัดมุมการเอียง ไปของก้านเพนดูลัมและวัดระยะทางที่ล้อเคลื่อนที่ไปจากจุดเริ่มต้น จากนั้นสัญญาณการเอียงของมุมของก้านเพนดูลัมและระยะทางที่ตัวรยนต์ที่เคลื่อนที่ไปจากจุดสมดุล นำมาคำนวณเพื่อหาค่าของสัญญาณควบคุมไปทำการควบคุมระบบผ่านทางมอเตอร์ เพื่อให้ระบบกลับเข้าสู่จุดสมดุลเดิม ซึ่งจากการทดสอบพบว่า

1. การทดลองส่วนใหญ่แล้วรถไม่สามารถเคลื่อนที่กลับที่เดิมได้ แต่จุดประสงค์หลักก็คือให้รถสามารถต้านแรงที่มากกระทำได้ ไม่ใช่ให้วิ่งกลับที่จุดเดิม
2. มุมและแรงดันไฟฟ้ามีความสัมพันธ์กัน แรงดันไฟฟ้าที่ส่งให้กับมอเตอร์เพื่อควบคุมให้ระบบกลับสู่สมดุลอีกครั้ง เมื่อระบบถูกรบกวนหรือถูกทำให้เอียงไปจากสภาวะสมดุลมากขึ้นจะทำให้แรงดันที่ต้องป้อนให้กับมอเตอร์มากขึ้นด้วย

2. ปัญหา

1. เกิดการรบกวนกันเนื่องจากการวางสายไฟจำนวนมาก ทำให้อาจเกิดสัญญาณรบกวนกัน
2. ชุดเกียร์เกิดมีระยะคลอนทำให้ระบบการควบคุมไม่ดีเท่าที่ควร
3. โครงสร้างยังเป็นอะคริลิกอยู่ยังไม่สามารถรับโหลดหนัก ๆ ได้

3. ข้อเสนอแนะ

1. ปรับปรุงตำแหน่งการวางของสายไฟ ให้เกิดการรบกวนกันน้อยที่สุด
2. เปลี่ยนชุดเกียร์ให้มีระยะคลอนน้อยที่สุด
3. เปลี่ยนโครงสร้างให้แข็งแรงยิ่งขึ้นหากต้องการรับโหลดหนัก ๆ

บรรณานุกรม

- [1] ผ.ศ.ดร. ธนิตย์ ศรีสุวรรณวัฒน์ “Optimal Control System” เอกสารประกอบการเรียนการสอน
- [2] Rich Chi Ooi “Balancing a Two-Wheeled Autonomous Robot” The University of Western Australia, thesis 2003
- [3] Felix Grasser, Aldo D’Arrigo, Silvio Colomba, Alfred Rufer “A Mobile, InvertePedulum” Swiss Federal Institute of Technology Lausanne.
- [4] นคร กักดีชาติ, ชัยวัฒน์ ลิ้มพรจิตรวิไล “dsPIC microcontroller: Basic experiment in C Programming with MPLAB C30” Innovative Experiment Co.,Ltd.



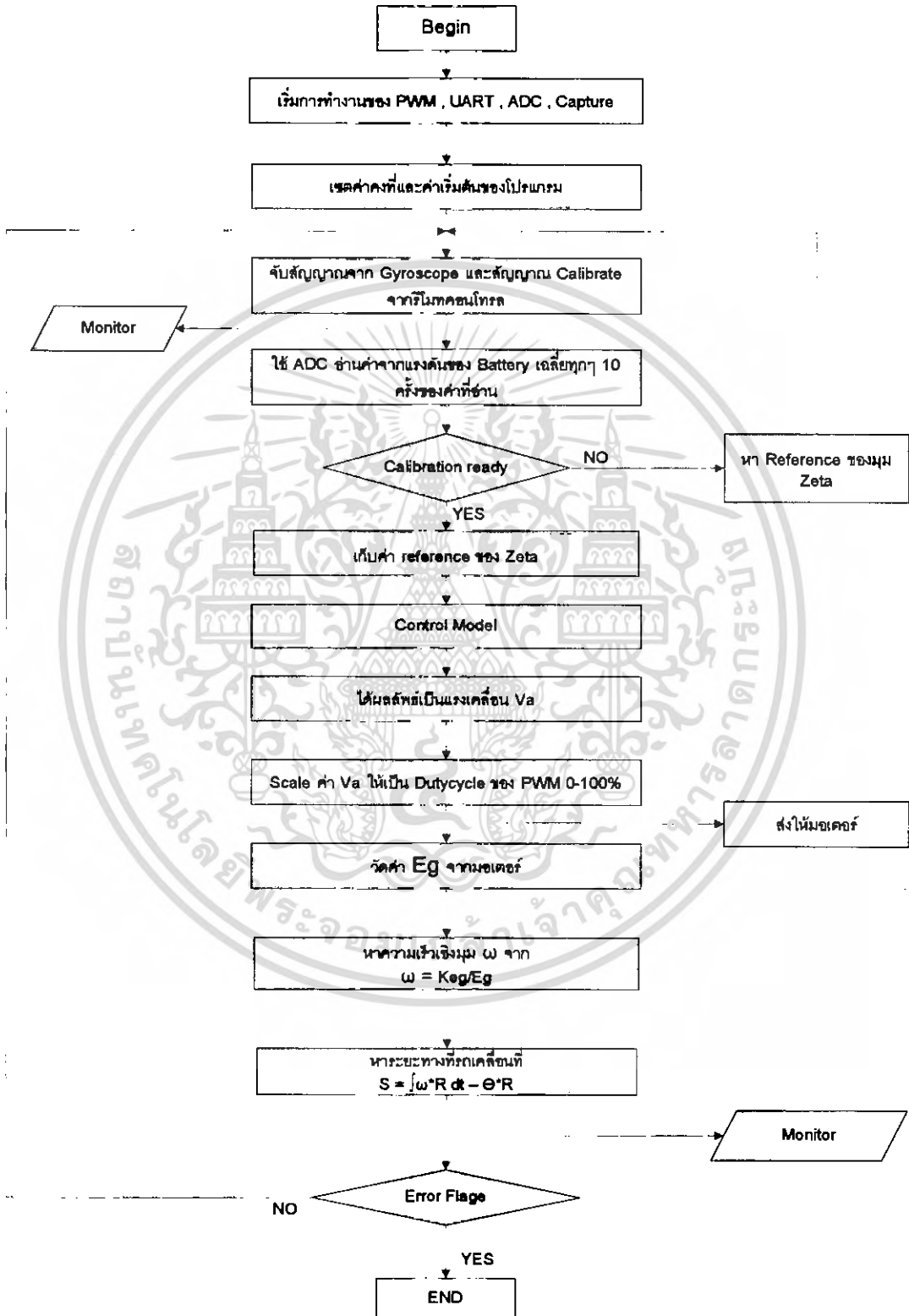
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

โปรแกรมที่เขียนบนไมโครคอนโทรลเลอร์ dsPIC



แผนภาพขั้นตอนการทำงานของ โปรแกรม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

/*

Xtal 30 MHz , Oscillator Mode Xt w/PLL 16x

Watchdog Timer Disable

Board Rate Uart1 38400

Capture use Timer23 32bit

: Pin input RD0 or IC1

: input capture 50 HZ 20 ms

: if input pwm = min Timer32bit read

: if input pwm = max

*/

#include<p30f6010.h>

#include<uart.h>

#include<pwm.h>

#include<timer.h>

#include<incap.h>

#include<stdio.h>

#include<print.c>

#include<PWM.c>

#include<Capture.c>

#include<ACD.c>

//#include<ports.h>

#define CNTLQ 0x11

#define CNTLS 0x13

#define DEL 0x7F

#define BACKSPACE 0x08

#define CR 0x0D

#define LF 0x0A

int Flag_Capture ; // "0" is no flag , "1" is yes flag

unsigned long Capture_period,zecom,LeRi,Gyro_com ;

unsigned long reference,reference_com,reference_lr,reference_fb,reference_Ia1,reference_Ia2;

unsigned long max_zeta ,min_zeta,max_com,min_com,max_fb,min_fb;

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

unsigned long max_lr,min_lr,max_Ia1,min_Ia1,max_la2,min_la2;
unsigned int count,count1,count2,count3,count4,count5,count6,count7,count8 ;
int Error_cap,compensate,Fw_Bw,Left_Right;
float sum;
unsigned long zeta_old,zeta_new;
char calibrate,mm,nn,oo,pp,qq,rr;
char str[12];
float zeta_com;
float total_zeta,zeta_rad;
float adc0,adc1,adc2,adc3;
float xd = 0; // มันคือ x dot
float zd = 0; // sum_zeta dot
float xdd;
float zdd;
float Vbatt;
int i1,i2,i3,i4;
float Ia1,Ia2;
float Ia1_2,Ia1_3,Ia2_2,Ia2_3;
unsigned long sumv;
unsigned long sum_Ia1,sum_Ia2;
float Va1;
float Va2;
float Error1,Error2,Error_Eg,ln1,ln2,ln_Error;
float New_Error_cap,Old_Error_cap;
float New_Error_Eg,Old_Error_Eg,New_Error1,Old_Error1,New_Error2,Old_Error2;
float Eg1,Eg2;
float Biass,Ra1,Ra2,Rate;
float W1,W2;
float velo1,velo2,zeta_dot,old_zeta;
float distance1,distance1_old,distance2,distance2_old,distance_total;
float Va,K1,K2,K3,K4;
float GainE,GainP,GainI,GainI_Eg;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

float GainE1,GainP1,GainI1;
float GainE2,GainP2,GainI2;
float Set_Point;
float Ra1_1,Ra1_2;
float Dir;
float F11,F12,F13,F14;
float A22,A42,A23,A43;
float B21,B41;
float L11,L21,L31,L41;
float L12,L22,L32,L42;
float X_,X_d,X_dd,X,Zeta,Zeta_,Zeta_d,Zeta_dd;
float U,velo;
unsigned int y; //ใช้เป็นตัวตรวจสอบระบบ

//////////////////// Capture 1 //////////////////////
void __attribute__((__interrupt__)) _IC1Interrupt(void) // แคปเจอร์ที่ขา RD0
{
    if(PORTDbits.RD8 == 1)
    {
        WriteTimer23(0);
    }
    if(PORTDbits.RD8 == 0)
    {
        //////////////////////Begining////////////////////////////////////
        //1.1...function compensate Zeta Or Forward,Bacdward (THRO).....//
        zecom = ReadTimer23();

        //1.2.....Function direct Left or Right (AILE).....//
        while(PORTDbits.RD9 == 0)
            WriteTimer23(0);
        while(PORTDbits.RD9 == 1)
            LeRi = ReadTimer23();
    }
}

```

```

//1.3.....Gyroscope Signal (ELEV).....//
    while(PORTDbits.RD10 == 0)
        WriteTimer23(0);
    while(PORTDbits.RD10 == 1)
        Capture_period = ReadTimer23(); //อ่านค่า
        Error_cap = reference - Capture_period;

//1.4.....Compensate Gyroscope (Rudder) .....//
    while(PORTDbits.RD11 == 0)
        WriteTimer23(0);
    while(PORTDbits.RD11 == 1)
        Gyro_com = ReadTimer23(); //อ่านค่า

//1.5.....Value of Ia1 & Ia2.....//
    adc1 = analog(2); // ท1 Ia1
    adc2 = analog(3); // ท1 Ia2

//1.5.....ฟังก์ชันหาแบนด์แคป.....//
    max_zeta = reference+25;
    min_zeta = reference-25;

    max_fb = reference_fb + 100;
    min_fb = reference_fb - 100;

    max_lr = reference_lr + 100;
    min_lr = reference_lr - 100;

    max_com = reference_com + 100;
    min_com = reference_com - 100;

    max_Ia1 = reference_Ia1 + 5;
    min_Ia1 = reference_Ia1 - 5;
    max_Ia2 = reference_Ia2 + 5;
    min_Ia2 = reference_Ia2 - 5;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

//1.6.....เรื่องของการบังคับ.....//
//1.6.1.....หาค่า Forward_Backward.....//
    if((zecom > max_fb)||(zecom < min_fb))
    {
        Fw_Bw = reference_fb - zecom;
    }
    if((zecom < max_fb)&(zecom > min_fb))
    {
        Fw_Bw = 0;
    }
//1.6.2.....หาค่า compensate of Gyroscope.....//
    if((Gyro_com > max_com)||(Gyro_com < min_com))
    {
        compensate = reference_com - Gyro_com;
    }
    if((Gyro_com < max_com)&(Gyro_com > min_com))
    {
        compensate = 0;
    }
//1.6.3.....ฟังก์ชันอินทิเกรตหา Zeta.....//
    if((Capture_period>max_zeta)||(Capture_period<min_zeta)) //กรณีที่
capture_period มีค่ามากกว่า rangeที่กำหนด
    {
        sum = Error_cap + (compensate/50) + sum;
    }
    if((Capture_period<max_zeta)&(Capture_period>min_zeta))//กรณีที่
น้อยกว่า max แต่มากกว่า min
    {
        Error_cap = 0;
        sum = Error_cap + (compensate/75) + sum;
    }

```

```

//1.6.4.....หาค่า Left_Right.....//
    if((LeRi>max_lr)||(LeRi<min_lr))
    {
        Left_Right = reference_lr - LeRi;
    }
    if((LeRi<max_lr)&(LeRi>min_lr))
    {
        Left_Right = 0;
    }

//1.6.5.....การหาค่าของกระแส Ia1 & Ia2.....//
    if((adc1>max_Ia1)||(adc1<min_Ia1))
    {
        Ia1 = adc1 - reference_Ia1;
    }
    if((adc1<max_Ia1)&(adc1>min_Ia1))
    {
        Ia1 = 0;
    }
    if((adc2>max_Ia2)||(adc2<min_Ia2))
    {
        Ia2 = reference_Ia2 - adc2;
    }
    if((adc2<max_Ia2)&(adc2>min_Ia2))
    {
        Ia2 = 0;
    }

//1.7.....หาค่าเฉลี่ยของ Vbatt.....//
    if(count6 != 10) //เริ่มจาก 0-9 ทั้งหมด 10 ครั้ง
    {
        adc3 = analog(1); // ทา Vbatt
        count6++;
        sumv = adc3 + sumv;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

}
if(count6 == 10)
{
    Vbatt = (sumv / 2046.0)*2.44; // 0-12 Volts
    sumv = 0;
    count6 = 0;
}
//2.0////////////////////////////////////ฟังก์ชันการเบรต Calibrate = 1////////////////////////////////////
if(calibrate == 1)
{
    //2.1.1.....หาค่า reference Zeta.....//
    if(mm == 1)
    {
        if(sum != 0.0)
        {
            sum = 0.0;
            reference = reference - Error_cap;
            count = 0;
        }
        if(sum == 0.0)
        {
            count++;
            if(count == 100)
            {
                mm = 0;
            }
        }
    }
}
//2.1.2.....หาค่า reference Gyro_compensate.....//
if(nn == 1)
{
    if(compensate != 0)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

{
    reference_com = Gyro_com;
    count1 = 0;
}
if(compensate == 0)
{
    count1++;
    if(count1==100)
    {
        nn = 0;
    }
}
//2.1.3.....หาค่า reference fb.....//
if(oo==1)
{
    if(Fw_Bw != 0)
    {
        reference_fb = zecom;
        count2 = 0;
    }
    if(Fw_Bw == 0)
    {
        count2++;
        if(count2==100)
        {
            oo = 0;
        }
    }
}
}
//2.1.4.....หาค่า reference lr.....//
if(pp==1)

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

{
    if(Left_Right!=0)
    {
        reference_lr = LeRi;
        count3 = 0;
    }

    if(Left_Right==0)
    {
        count3++;
        if(count3==100)
        {
            pp = 0;
        }
    }
    //2.1.5.....พาคำ reference Ia1.....//
    if(qq==1)
    {
        if(Ia1 != 0)
        {
            reference_Ia1 = adc1;
            count4 = 0;
        }
        if(Ia1==0)
        {
            count4++;
            if(count4==100)
            {
                qq = 0;
            }
        }
    }
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

//2.1.6.....หาค่า reference Ia2.....//
    if(rr==1)
    {
        if(Ia2 != 0)
        {
            reference_Ia2 = adc2;
            count5 = 0;
        }
        if(Ia2==0)
        {
            count5++;
            if(count5==100)
            {
                rr = 0;
            }
        }
    }
    if((mm==0)&(nn == 0)&(oo == 0)&(pp == 0)&(qq == 0)&(rr == 0))
    {
        calibrate = 0; // End of calibrate function
        PORTDbits.RD3 = 1; //แสดงสถานะเมื่อคาร์เบรตเสร็จ
    }

PDC1 = 600.0; // (5KHz=0 - 514)(1KHz=0-2570)
PDC2 = 3149.0;
PDC3 = 3149.0;
PDC4 = 600.0;
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

////////////////////////////////////Calibrate = 0 เริ่มดำเนินการหลัก////////////////////////////////////
if(calibrate==0)
{
//3.4.2.....หาค่า Eg.....

GainP =analog(8)/256.00;
GainI =analog(9)/10.24;*/
count8++;
Ra1=96.680;// analog(7)/5.12; //Ra1=96.680
Ra2=92.578;// analog(8)/5.12;//Ra2=92.578
Biass= 600.0;
GainI_Eg=20.00;//analog(9)/5.12;
Rate =0.3;// analog(7)/170.66666667;
Ia1_2=(Ia1)*(Ia1);
Ia1_3=Ia1_2*(Ia1);
K1= -(Ia1_3*0.00000424037087)+(Ia1_2*0.00194762087103)-
(Ia1*0.06698584017707);
K2=
(Ia1_3*0.00000424037087)+(Ia1_2*0.00194762087103)+(Ia1*0.06698584017707);

if( Ia1 > 250 )
{
K1 = 0.0;
}

if( Ia1 < -250)
{
K2 = 0.0;
}

Ia2_2=(Ia2)*(Ia2);
Ia2_3=Ia2_2*(Ia2);

K3= -(Ia2_3*0.00000424037087)+(Ia2_2*0.00194762087103)-
(Ia2*0.06698584017707);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

K4=
(Ia2_3*0.00000424037087)+(Ia2_2*0.00194762087103)+(Ia2*0.06698584017707);

if( Ia2 > 250 )
{
    K3 = 0.0;
}

if( Ia2 < -250)
{
    K4 = 0.0;
}

if(U > 0)
{
    Va1 = (((i1-Biass)/(3749.0-Biass))*Vbatt); //Va1 = Vbatt*Dutycycle1
    Eg1 = (((((i1-Biass)*Vbatt*(Ra1+K1))-((Ia1)*(3749.0-Biass)))/((3749.0-
Biass)*(Ra1+K1))))*0.6457542431;
}

if(U <= 0)
{
    Va1 = (((i2+Biass-3749.0)/(3749.0-Biass))*Vbatt);
    Eg1 = (((((i2+Biass-3749.0)*Vbatt*(Ra1+K2)) - (Ia1)*(3749.0-
Biass))/((3749.0-Biass)*(Ra1+K2))))*1.173752934;
}

if(U > 0)
{
    Va2 = (((i3-Biass)/(3749.0-Biass))*Vbatt); //Va1 = Vbatt*Dutycycle1
    Eg2 = (((((i3-Biass)*Vbatt*(Ra2+K3))-((Ia2)*(3749.0-Biass)))/((3749.0-
Biass)*(Ra2+K3))));
}

if(U <= 0)
{

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Va2 = (((i4+Biass-3749.0)/(3749.0-Biass))*Vbatt);
Eg2 = (((i4+Biass-3749.0)*Vbatt*(Ra2+K4)) - (Ia2)*(3749.0-
Biass))/((3749.0-Biass)*(Ra2+K4));
}

```

```
//3.4.3.....ทวิระยะทาง.....
```

```

W1 = Eg1 / (0.095768*3.0); // Keg1 = 0.0016284 Volt.s/rad
W2 = Eg2 / (0.095768*3.0); // Keg2 = 0.0016284
velo1 = W1*0.245*0.02180; //W1*รัศมีล้อ*เวลาใน 1 scantime
velo2 = W2*0.245*0.02180; // รัศมีล้อเท่ากับ 0.245
velo=(velo1+velo2)/2.0;
distance1 = distance1+(velo1 + distance1_old)/2.0; //lamp hold signal;
distance1_old = velo1;
distance2=distance2+ (velo2 + distance2_old)/2.0;
distance2_old = velo2;
distance_total = (distance1+distance2)/2.0;
total_zeta = ((sum/795.0)+(Fw_Bw/2000.00)); // 0-30 degree
zeta_rad = total_zeta*0.0174533 ; // หน่วยเป็น rad 0-0.5236 rad
Zeta=(zeta_rad*(-1.00));
zeta_dot = (Zeta - old_zeta)/0.0218;
old_zeta = Zeta;
X=distance_total;

```

```
//3.2.....การคำนวณคอนโทรลโมเดล.....//
```

```

F11=0.0010;
F12=2.3925;/2.3693;
F13=148.9684;/78.4753;
F14=3.4686;/2.5066;
A22=-0.8682;
A42=-0.9467;
A23=22.5148;
A43=45.9485;
B21=0.7403;
B41=0.8073;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

L11=-5.2029;
L21=-15.9954;
L31=-2.2183;
L41=-36.9359;
L12=-2.2183;
L22=-29.8709;
L32=-24.9131;
L42=-62.7920;

```

```

X_d = L11*(X_-X)+X_d+L12*(Zeta_-Zeta);
X_dd = L21*(X_-X)+A22*X_d+A23*Zeta_+L22*(Zeta_-Zeta)+B21*U;
Zeta_d = L31*(X_-X)+Zeta_d+L32*(Zeta_-Zeta);
Zeta_dd= L41*(X_-X)+A42*X_d+A43*Zeta_+L42*(Zeta_-Zeta)+B41*U;
X_=X_+(X_d*0.02180);
X_d=X_d+(X_dd*0.02180);
Zeta_=Zeta_+(Zeta_d*0.02180);
Zeta_d=Zeta_d+(Zeta_dd*0.02180);
U=F11*X+F12*velo+F13*Zeta+F14*zeta_dot;
adc0=0.0;// analog(4);
GainE1 = 1.906;// 0.938;
GainP1 = 0.668 ;//0.574;
GainI1 = 0.00;//38.086;// 93.164;
GainE2 = 1.906;// 0.700;
GainP2 = 0.668;// 1.033;
GainI2 = 0.00;//38.086;// 2.930;
Dir = Left_Right/(1166.666667*5.0);
/* Set_Point= compensate/(1166.666667*5.0);*/
Error_Eg = ((Eg1)-(Eg2)+Dir);//Error ของความเร็ว
In_Error = In_Error+(Error_Eg*0.02180*0.5);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Error1= ((Set_Point)-(Eg1*GainE1)-(In_Error*GainI_Eg));// Error2=SP2-PV2+Error_Eg
In1=In1+(Error1*0.02180*Rate);
i1 = (((Error1)*GainP1+In1*GainI1)*312.4167)+Biass ;// Close Loop PI controller
if(i1>=3740.0)
{
    i1 = 3740.0;
}
if(i1<=10)
{
    i1 = 10;
}
i2 = 3749.0 + (((Error1)*GainP1+In1*GainI1)*312.4167)-Biass ;
if(i2>=3740.0)
{
    i2 = 3740.0;
}
if(i2<=10)
{
    i2 = 10;
}
Error2= ((U)-(Eg2*GainE2)+(In_Error*GainI_Eg));// Error2=SP2-PV2+Error_Eg
In2=In2+(Error2*0.02180*Rate);
i3 = (((Error2)*GainP2+In2*GainI2)*312.4167)+Biass ;// Close Loop PI controller
if(i3>=3740.0)
{
    i3 = 3740.0;
}
if(i3<=10)
{
    i3 = 10;
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

i4 = 3749.0 + (((Error2)*GainP2+In2*GainI2)*312.4167)-Biass ;
if(i4>=3740.0)
{
    i4 = 3740.0;
}

if(i4<=10)
{
    i4 = 10;
}

PDC1 = i1; // (5KHz=0 - 514)(1KHz=0-2570)
PDC2 = i2;
PDC3 = i3;
PDC4 = i4;
//3.3.....การหาค่าPWM.....//
/*
    if(Va > Vbatt)
    {
        i1 = 2570;
        i2 = 0;
        i3 = 2570;
        i4 = 0;
    }
    if(Va < (-1.0*Vbatt))
    {
        i1 = 0;
        i2 = 2570;
        i3 = 0;
        i4 = 2570;
    }
    if((Va < Vbatt)&(Va > (-1.0*Vbatt)))
    {
        i1 = 1285.0+(Va/Vbatt*1285.0) ;
        i2 = 1285.0-(Va/Vbatt*1285.0);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        i3 = i1;
        i4 = i2;
    }

    PDC1 = i2 ; // (5KHz=0 - 514)(1KHz=0-2570)
    PDC2 = i1 ;
    PDC3 = i2 ;*/
}

}

Flag_Capture = 1;
IFS0bits.IC1IF = 0; // เคลียร์อินเตอร์พแคปเจอร์
}

////////////////////////////////// PWM ////////////////////////////////////
void __attribute__((__interrupt__)) _PWMIInterrupt(void)
{
    IFS2bits.PWMIF = 0;
}

////////////////////////////////// TX1 RX1 ////////////////////////////////////
void __attribute__((__interrupt__)) _U1TXInterrupt(void)
{
    IFS0bits.U1TXIF=0;
}

void __attribute__((__interrupt__)) _U1RXInterrupt(void)
{
    IFS0bits.U1RXIF=0;
}

////////////////////////////////// Main Program ////////////////////////////////////
int main(void)
{
    char Txdata []="r\nUART test Gyroscope sensor\r\n";
    char i;
    float a,b;
    calibrate = 1;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

reference = 30000;
reference_com = 30000;
reference_lr = 30000;
reference_fb = 30000;
mm=1;
nn=1;
oo=1;
pp=1;
qq=1;
rr=1;
count = 0;
count1 = 0;
count2 = 0;
count3 = 0;
count4 = 0;
count5 = 0;
count6 = 0;
count8 = 0;
total_zeta = 0;
distance1 = 0;
distance2 = 0;
distance_total = 0;
sumv = 0;
xd = 0;
zd = 0;
Va = 0;
zeta_old = 0;
Eg1=0;
Eg2=0;
In1 = 0;
In2 = 0;
In_Error = 0;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

Zeta=0;
old_zeta = 0;
Zeta_=0;
Zeta_d=0;
Zeta_dd=0;
X=0;
X_=0;
X_d=0;
X_dd=0;
U=0;
i = 0;
Old_Error_cap=0.0;
Flag_Capture = 0;
uart1_init();
PWM_init();
capture_init();
putsUART1((unsigned int *)Txdata );
printf("\r");
Open_capture();
TRISDbits.TRISD3 = 0;
TRISDbits.TRISD2 = 1;
TRISDbits.TRISD1 = 1;
while(1)
{
    while (Flag_Capture==0);           // รอให้มีการ เคปเจอร์ก่อน
    Flag_Capture = 0;
    i++;
    if(i == 2)
    {
        a = count8*0.0218;
        b = total_zeta*(-1.0);
        printf("\r%.4f\t%.4f\t%.3f\n",U,b,a);
    }
}

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        i = 0;
    }
}
}

```

ส่วนต่อไปนี้เป็นโปรแกรมย่อยซึ่งเป็นตัวกำหนดรีจิสเตอร์เพื่อกำหนดการทำงานของทางด้านฮาร์ดแวร์ของตัวไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งประกอบไปด้วยส่วนของ PWM, Capture , Analog to digital และ Uart

1. PWM

เป็นส่วนของการกำหนดค่าต่างๆ ของ pulsewidth modulation เช่น การกำหนดความถี่ของสัญญาณที่ออก การกำหนดโหนดของ PWM เป็นโหนดอิสระ หรือ แบบคอมพลิเมนต์ การกำหนดค่าของเวลาดาย(dead time) เป็นต้น ซึ่งมีโปรแกรมดังนี้

```

#define FCY 30000000 // 30 MIPS
#define FPWM 200000 // 10 kHz ,if 20 kHz = 40000
#define DEADTIME (unsigned int)(0.000022 * FCY) //เดิมเป็น 0.000002
//#define _DES_FREQ 60 // 60 Hz sine wave is required
#define _DELTA_PHASE (unsigned int)(_DES_FREQ * 65536 / FPWM)
char new;
void PWM_init(void)
{
    TRISE = 0x0100; // PWM pins as outputs, and FLTA as input
    PTPER = 0x0752; // XT x16 5 KHz (ก่อนคือ 6675 = 50Hz)(0100 = 5KHz)()
    OVDCON = 0x0000; // Disable all PWM outputs.
    DTCON1 = 0x3F3F; // (PLLx8,0004 = 202 ns)(PLLx8,0006 = 300ns)(PLLx8,0008 =
    400)(0404)
    DTCON2 = 0x0000;
    PWMCON1 = 0x00FF; // Enable PWM output pins and enable complementary mode 0077
    PDC1 = PTPER; /* 0 Volts on Phase A. This value corresponds to*/
    PDC2 = PTPER; // 0 Volts on Phase B.
    PDC3 = PTPER; // 0 Volts on Phase C.

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

PDC4 = PTPER; // 0 Volts on Phase D.
IFS2bits.PWMIF = 0; // Clear PWM Interrupt flag
IEC2bits.PWMIE = 1; // Enable PWM Interrupts
OVDCON = 0xFF00; // PWM outputs are controller by PWM module
PTCONbits.PTCKPS = 1; // PWM Time Base Input Clock Prescale Select bits 16
PTCONbits.PTMOD = 0; // Center aligned PWM operation
PTCONbits.PTEN = 1; // Start PWM
return;
}

```

2. ส่วนของ ADC หรือ Analog to Digital

ส่วนนี้จะมีการกำหนดที่สำคัญอยู่ คือ การเชื่อมต่อของไมโครคอนโทรลเลอร์ให้เป็นขาที่รับสัญญาณทางอนาล็อก เรื่องของการเริ่มการ conversion และการหยุด conversion ความเร็วในการ sample ของสัญญาณ ซึ่งมีโปรแกรมดังนี้

```

#include<p30f6011.h> // Header file for dsPIC30F6011
#include<lcd6011.h> // Header file for dsPIC30F6011
#include<adc10.h> // Module function for uart
#include<stdio.h>
unsigned int x,a;
unsigned int analog(unsigned char ch)
{
    unsigned int vall;
    ADPCFG &= (!(ch+1)); // all PORTB = Digital; RB0 = analog
    ADCON1 = 0x0000; // SAMP bit = 0 ends sampling ...
    ADCHS = ch; // Connect RB0/AN0 as CH0 input ..
    ADCSSL = 0;
    ADCON3 = 0x000A; // Manual Sample, Tad = internal 2 Tcy
    ADCON2 = 0;
    ADCON1bits.ADON = 1; // turn ADC ON
    ADCON1bits.SAMP = 1; // start sampling ...
    // delay_ms(1);
    // Keep for counter loop
}

```

```

for(a=0;a<102;a++); // Loop for delay 1 millisec per unit(7.3728 MHz@ PLL4x) 816
ADCON1bits.SAMP = 0; // start Converting
while (!ADCON1bits.DONE); // conversion done?
val1 = ADCBUF0; // yes then get ADC value
return(val1);
}

```

3. ส่วนของ Capture หรือ การจับสัญญาณ

เป็นส่วนที่ใช้ในการจับสัญญาณ PWM ของไอโรสโคป ซึ่งต้องกำหนดการทำงานของขาอินพุต ซึ่งในที่นี้ใช้ขา RDO และกำหนดลำดับความสำคัญของการอินเตอร์รัพ

```

void capture_init()
{
    /* Enable Timer1 Interrupt and Priority to '1' */
    ConfigIntCapture1(IC_INT_PRIOR_1 & IC_INT_ON);
    T2CON = 0x8008;
    // timer 32 bit start
    // timer mode 32 bit
}

void Open_capture()
{
    OpenCapture1(IC_IDLE_STOP & IC_TIMER3_SRC &
        IC_INT_1CAPTURE & IC EVERY_EDGE);
}

```

4. ส่วนของการแสดงผลผ่านทางช่องสัญญาณอนุกรม หรือ Uart

ในส่วนนี้เป็นการกำหนดค่าเริ่มต้นการใช้งานของ Uart ซึ่งจะเขียนโปรแกรมได้ดังนี้

```

void uart1_init()
{
    int U1ModeValue;
    int U1StatusValue;
    unsigned BaudRateValue = 65; // 38400 when PLL=16x, XTAL1=30MHz
}

```

```

UIModeValue =
    UART_EN                &
    UART_IDLE_CON          &
    UART_TX_ENABLE         & // test
    UART_EN_WAKE           &
    UART_DIS_LOOPBACK      &
    UART_DIS_ABAUD         &
    UART_ISTOPBIT          & //test
    UART_NO_PAR_8BIT;

```

```

UIStatusValue =
    UART_INT_TX_BUF_EMPTY &
    UART_TX_PIN_NORMAL    &
    UART_TX_ENABLE        &
    UART_INT_RX_CHAR      &
    UART_ADR_DETECT_DIS   &
    UART_RX_OVERRUN_CLEAR;
OpenUART1( UIModeValue, UIStatusValue, BaudRateValue );
SetPriorityIntU1RX(3);
EnableIntU1RX;
}

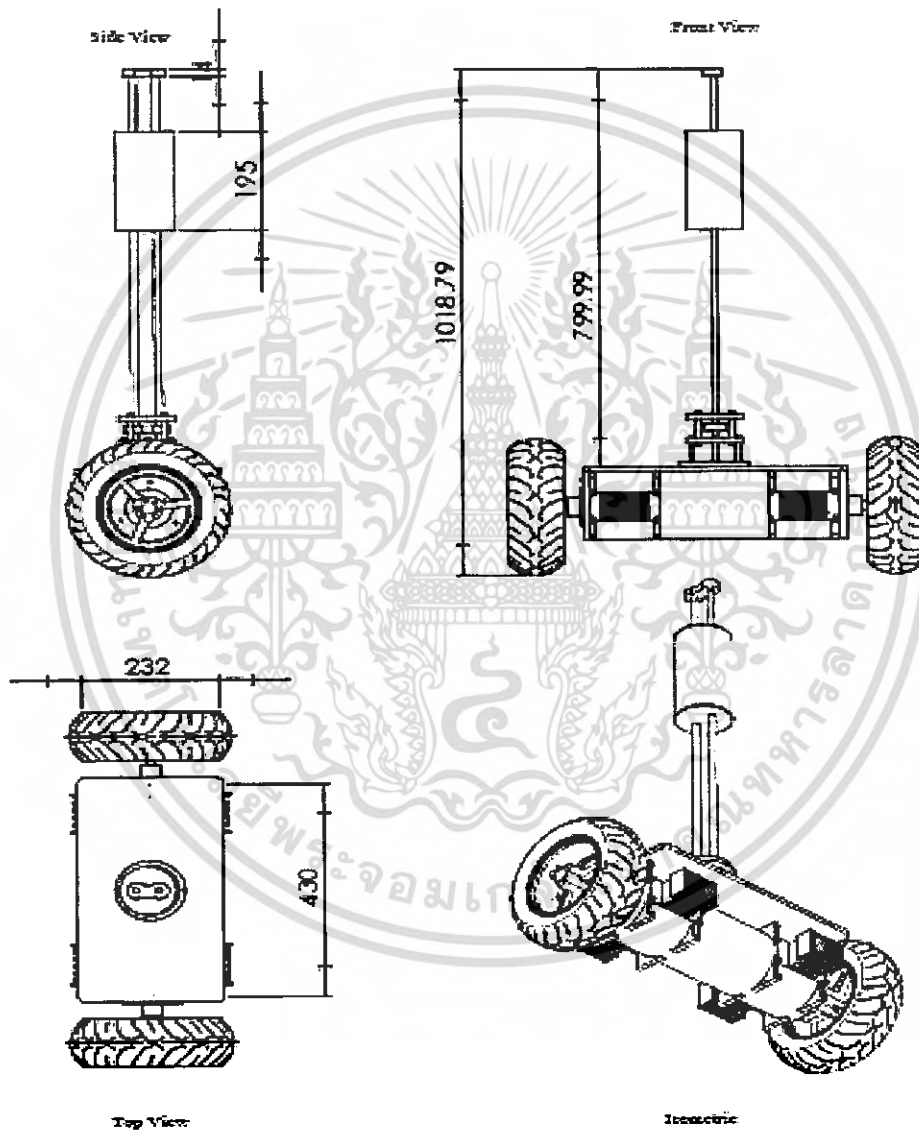
```

ผู้สนใจสามารถนำโปรแกรมนี้มาใช้ได้เลย ซึ่งโปรแกรมน้อยทั้ง 4 นั้น สามารถนำมารวมกับโปรแกรมหลักได้เลย หรือ แยกกันก็ได้ โดยถ้าแยกกันจะต้องกำหนด directory ของโปรแกรมน้อย ใน Include Path ซึ่งอยู่ในส่วนของ Build option

ภาคผนวก ข

โครงสร้างของตัวหุ่นยนต์ขับเคลื่อนแบบสองล้อ

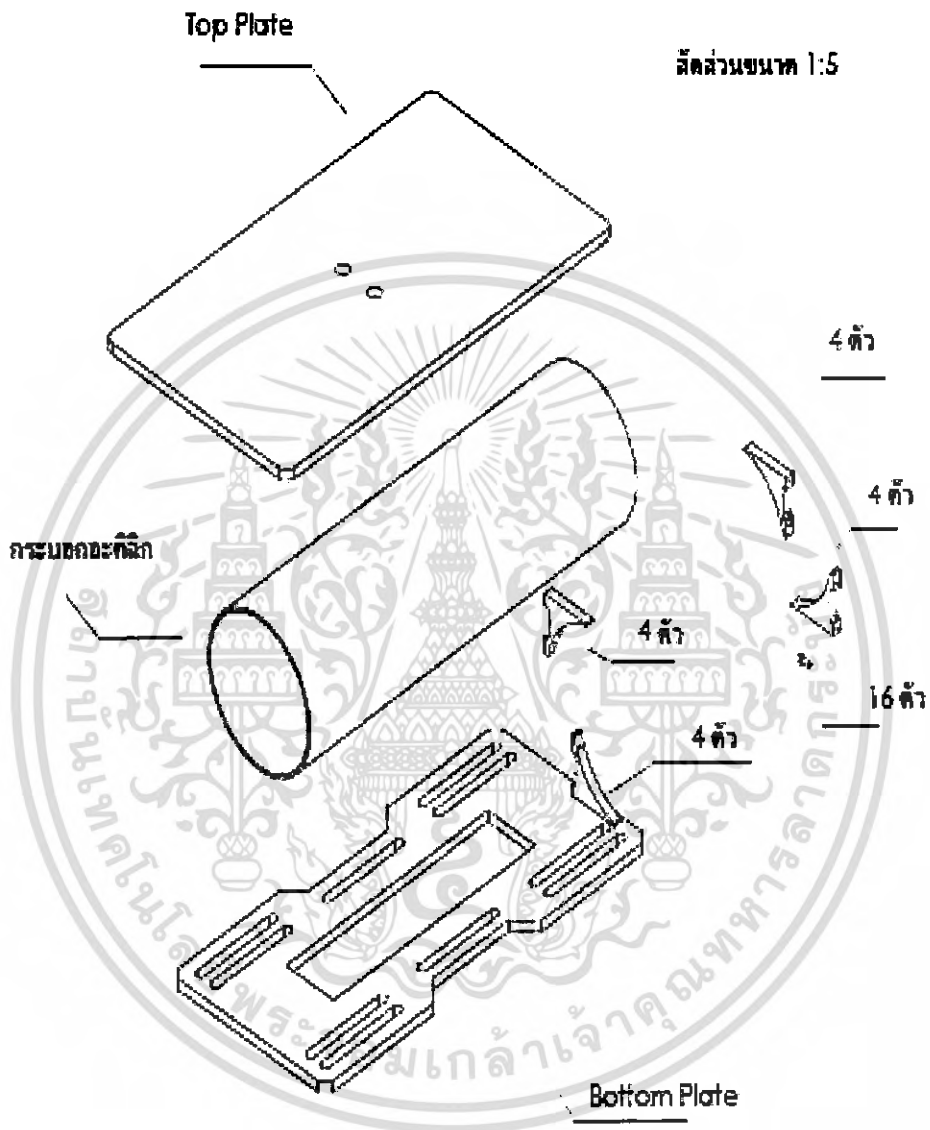
1. Dimension ของตัวรถ



Dimension ของหุ่นยนต์ สักส่วนต่อขนาดจริง 1:10

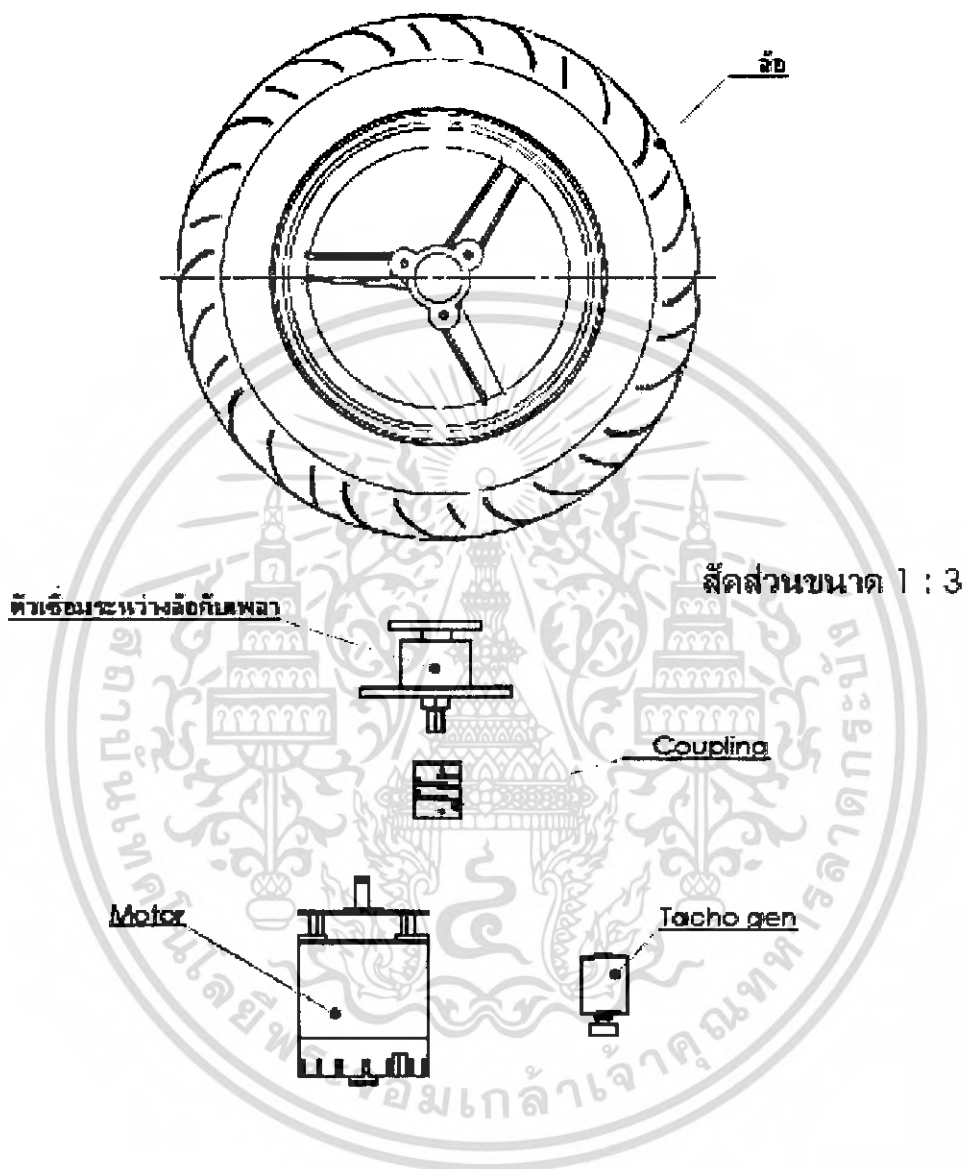
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ชุดประกอบของตัวรถ



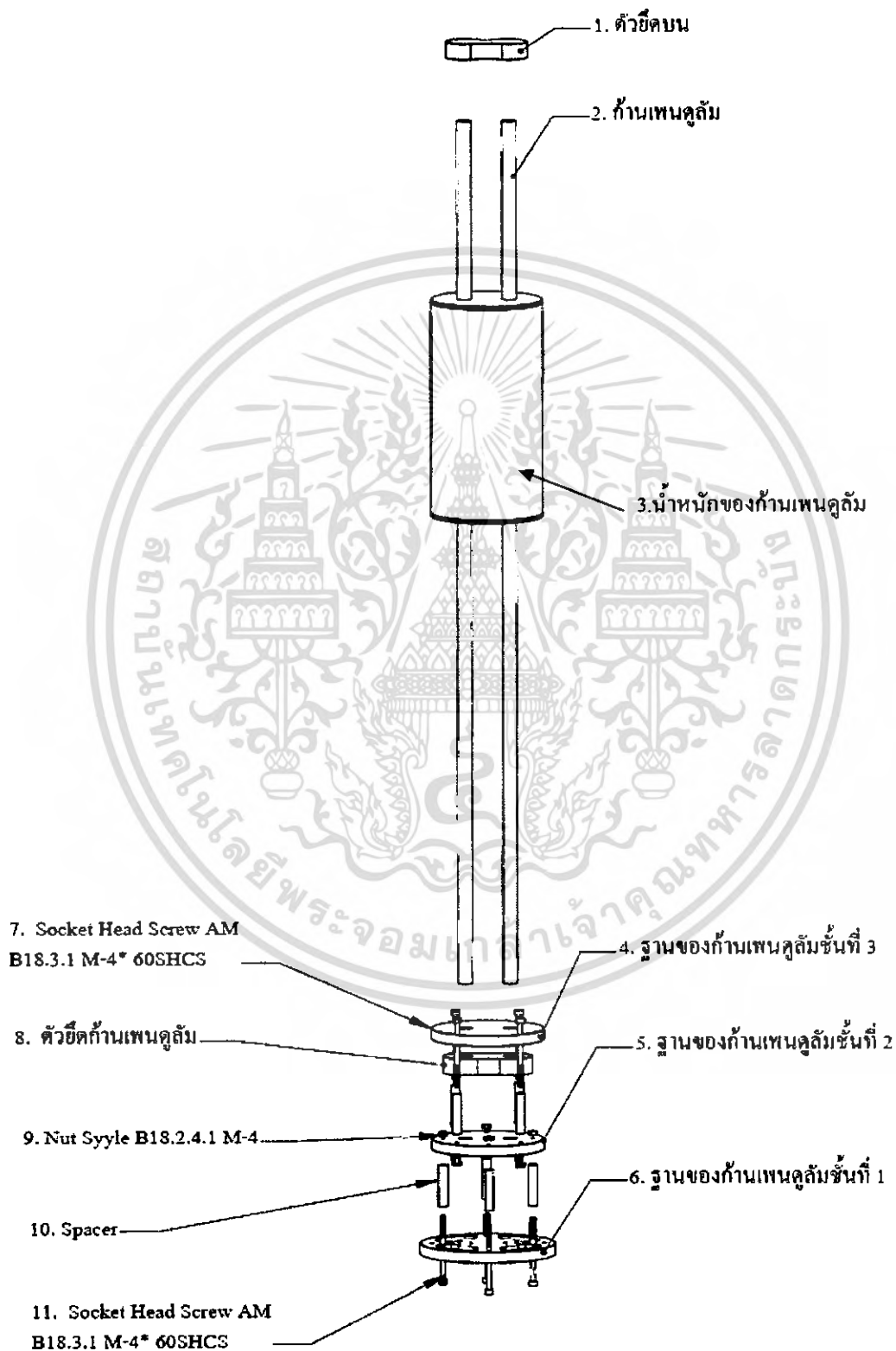
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ชุดของระบบเกียร์และล้อ



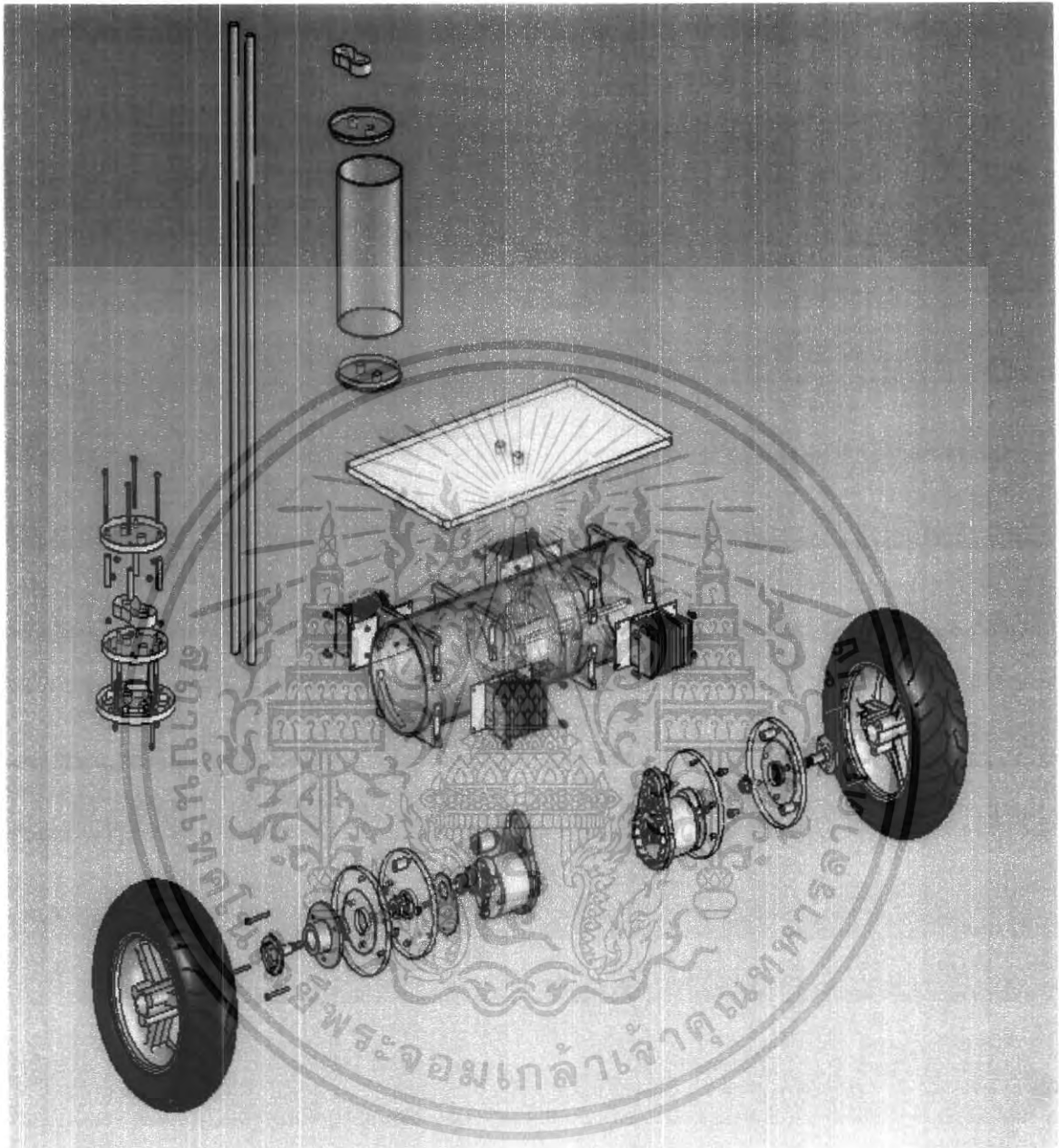
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ส่วนประกอบของก้านเพนดูลัม



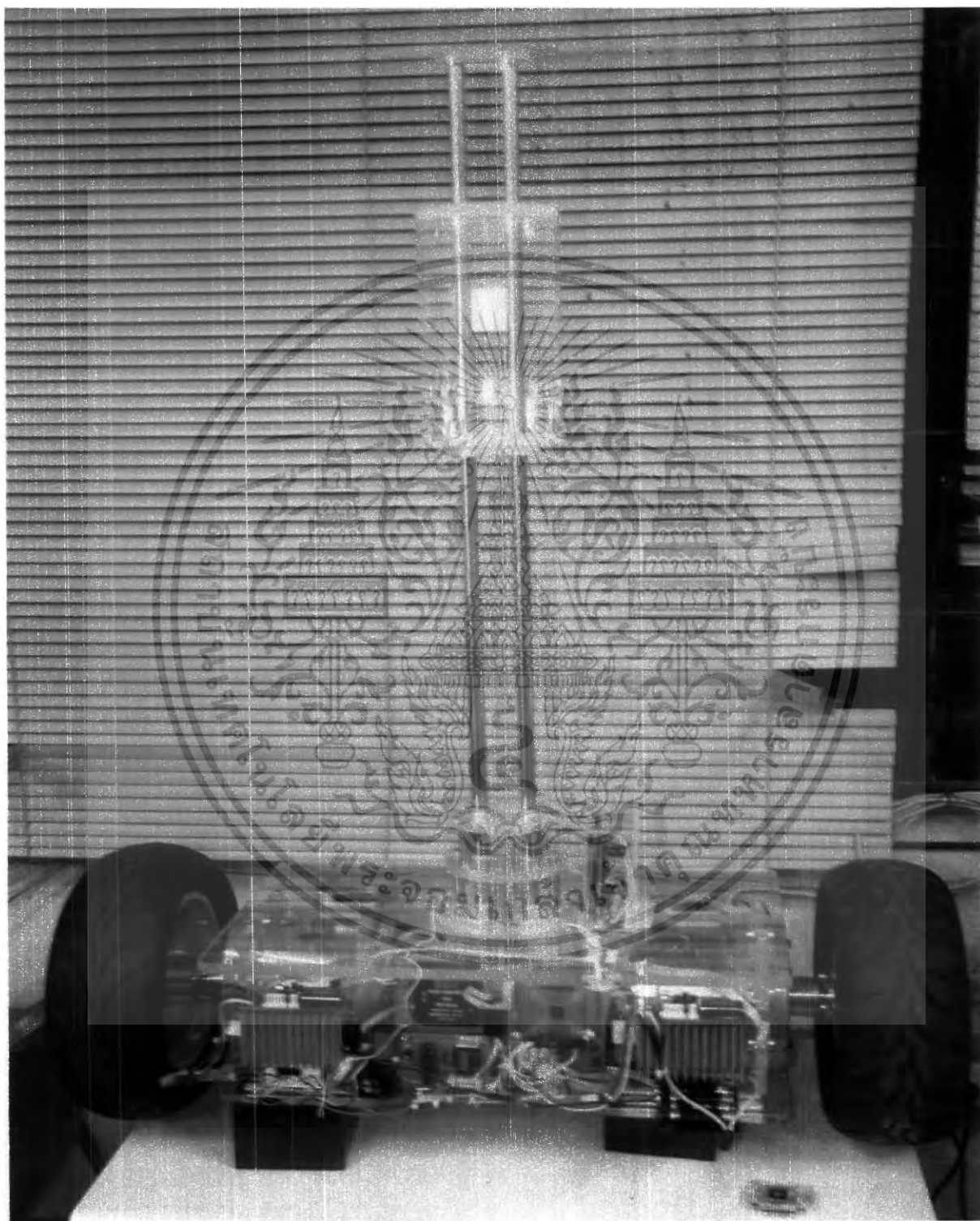
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5 ส่วนประกอบทั้งหมดของรถสองล้อ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. รูปร่างลักษณะของหุ่นยนต์ขับเคลื่อนแบบสองล้อ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ข้อมูลของไอซีที่ใช้ในปริิญาานิพนธ์

1. DsPIC30F6010 (ไมโครคอนโทรลเลอร์)
2. IR2110(gate drive)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



dsPIC30F6010

dsPIC30F6010 Enhanced Flash 16-bit Digital Signal Controller

Note: This data sheet summarizes features of this group of dsPIC30F devices and is not intended to be a complete reference source. For more information on the CPU, peripherals, register descriptions and general device functionality, refer to the *dsPIC30F Family Reference Manual* (DS70046). For more information on the device instruction set and programming, refer to the *dsPIC30F Programmer's Reference Manual* (DS70030).

High-Performance Modified RISC CPU:

- Modified Harvard architecture
- C compiler optimized instruction set architecture with flexible Addressing modes
- 84 base instructions
- 24-bit wide instructions, 16-bit wide data path
- 144 Kbytes on-chip Flash program space (Instruction words)
- 8 Kbytes of on-chip data RAM
- 4 Kbytes of non-volatile data EEPROM
- Up to 30 MIPS operation:
 - DC to 40 MHz external clock input
 - 4 MHz-10 MHz oscillator input with PLL active (4x, 8x, 16x)
- 44 interrupt sources
 - 5 external interrupt sources
 - 8 user selectable priority levels for each interrupt source
 - 4 processor trap sources
- 16 x 16-bit working register array

DSP Engine Features:

- Dual data fetch
- Accumulator write back for DSP operations
- Modulo and Bit-Reversed Addressing modes
- Two, 40-bit wide accumulators with optional saturation logic
- 17-bit x 17-bit single cycle hardware fractional/integer multiplier
- All DSP instructions single cycle
- \pm 16-bit single cycle shift

Peripheral Features:

- High current sink/source I/O pins: 25 mA/25 mA
- Timer module with programmable prescaler:
 - Five 16-bit timers/counters; optionally pair 16-bit timers into 32-bit timer modules
- 16-bit Capture input functions
- 16-bit Compare/PWM output functions
- 3-wire SPI™ modules (supports 4 Frame modes)
- I²C™ module supports Multi-Master/Slave mode and 7-bit/10-bit addressing
- 2 UART modules with FIFO Buffers
- 2 CAN modules, 2.0B compliant

Motor Control PWM Module Features:

- 6 PWM output channels
 - Complementary or Independent Output modes
 - Edge and Center Aligned modes
- 4 duty cycle generators
- Dedicated time base
- Programmable output polarity
- Dead Time control for Complementary mode
- Manual output control
- Trigger for A/D conversions

Quadrature Encoder Interface Module Features:

- Phase A, Phase B and Index Pulse input
- 16-bit up/down position counter
- Count direction status
- Position Measurement (x2 and x4) mode
- Programmable digital noise filters on inputs
- Alternate 16-bit Timer/Counter mode
- Interrupt on position counter rollover/underflow

dsPIC30F6010

Analog Features:

- 10-bit Analog-to-Digital Converter (A/D) with 4 S/H inputs:
 - 500 Ksps conversion rate
 - 16 input channels
 - Conversion available during Sleep and Idle
- Programmable Low Voltage Detection (PLVD)
- Programmable Brown-out Detection and Reset generation

Special Microcontroller Features:

- Enhanced Flash program memory:
 - 10,000 erase/write cycle (min.) for industrial temperature range, 100K (typical)
- Data EEPROM memory:
 - 100,000 erase/write cycle (min.) for industrial temperature range, 1M (typical)

- Self-reprogrammable under software control
- Power-on Reset (POR), Power-up Timer (PWRT) and Oscillator Start-up Timer (OST)
- Flexible Watchdog Timer (WDT) with on-chip low power RC oscillator for reliable operation
- Fail-Safe clock monitor operation detects clock failure and switches to on-chip low power RC oscillator
- Programmable code protection
- In-Circuit Serial Programming™ (ICSP™)
- Selectable Power Management modes
 - Sleep, Idle and Alternate Clock modes

CMOS Technology:

- Low power, high speed Flash technology
- Wide operating voltage range (2.5V to 5.5V)
- Industrial and Extended temperature ranges
- Low power consumption

dsPIC30F Motor Control and Power Conversion Family*

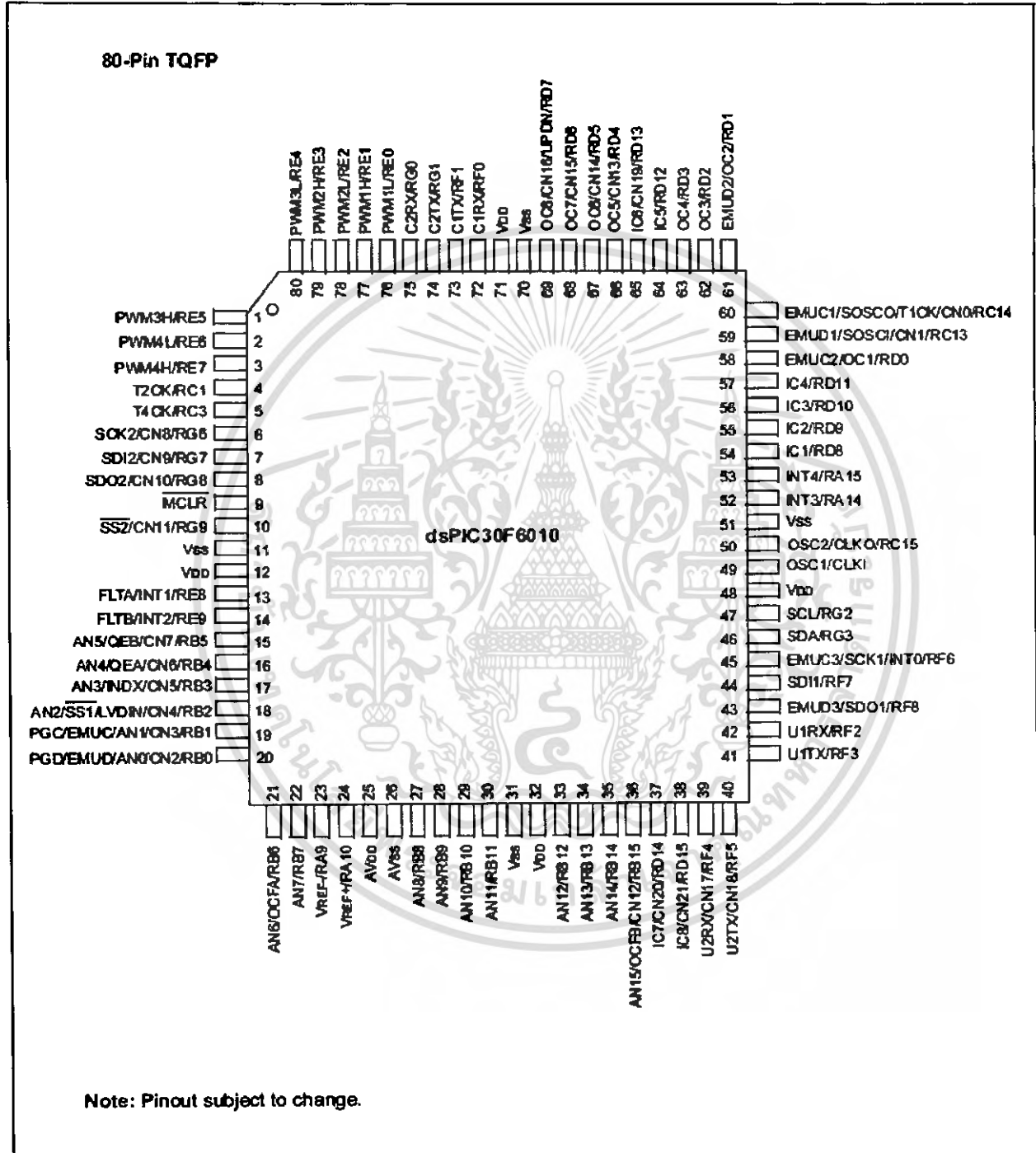
Device	Pins	Program Mem. Bytes/Instructions	SRAM Bytes	EEPROM Bytes	Timer 16-bit	Input Cap	Output Comp/Sld PWM	Moto Control PWM	A/D 10-bit 500 Ksps	Quad Enc	UART	SPI™	I ² C™	CAN
dsPIC30F2010	28	12K/4K	512	1024	3	4	2	6 ch	6 ch	Yes	1	1	1	-
dsPIC30F3010	28	24K/8K	1024	1024	5	4	2	6 ch	6 ch	Yes	1	1	1	-
dsPIC30F4012	28	48K/16K	2048	1024	5	4	2	6 ch	6 ch	Yes	1	1	1	1
dsPIC30F3011	40/44	24K/8K	1024	1024	5	4	4	6 ch	9 ch	Yes	2	1	1	-
dsPIC30F4011	40/44	48K/16K	2048	1024	5	4	4	6 ch	9 ch	Yes	2	1	1	1
dsPIC30F5015	64	66K/22K	2048	1024	5	4	4	8 ch	16 ch	Yes	1	2	1	1
dsPIC30F6010	80	144K/48K	8192	4096	5	8	8	8 ch	16 ch	Yes	2	2	1	2

* This table provides a summary of the dsPIC30F6010 peripheral features. Other available devices in the dsPIC30F Motor Control and Power Conversion Family are shown for feature comparison.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

dsPIC30F6010

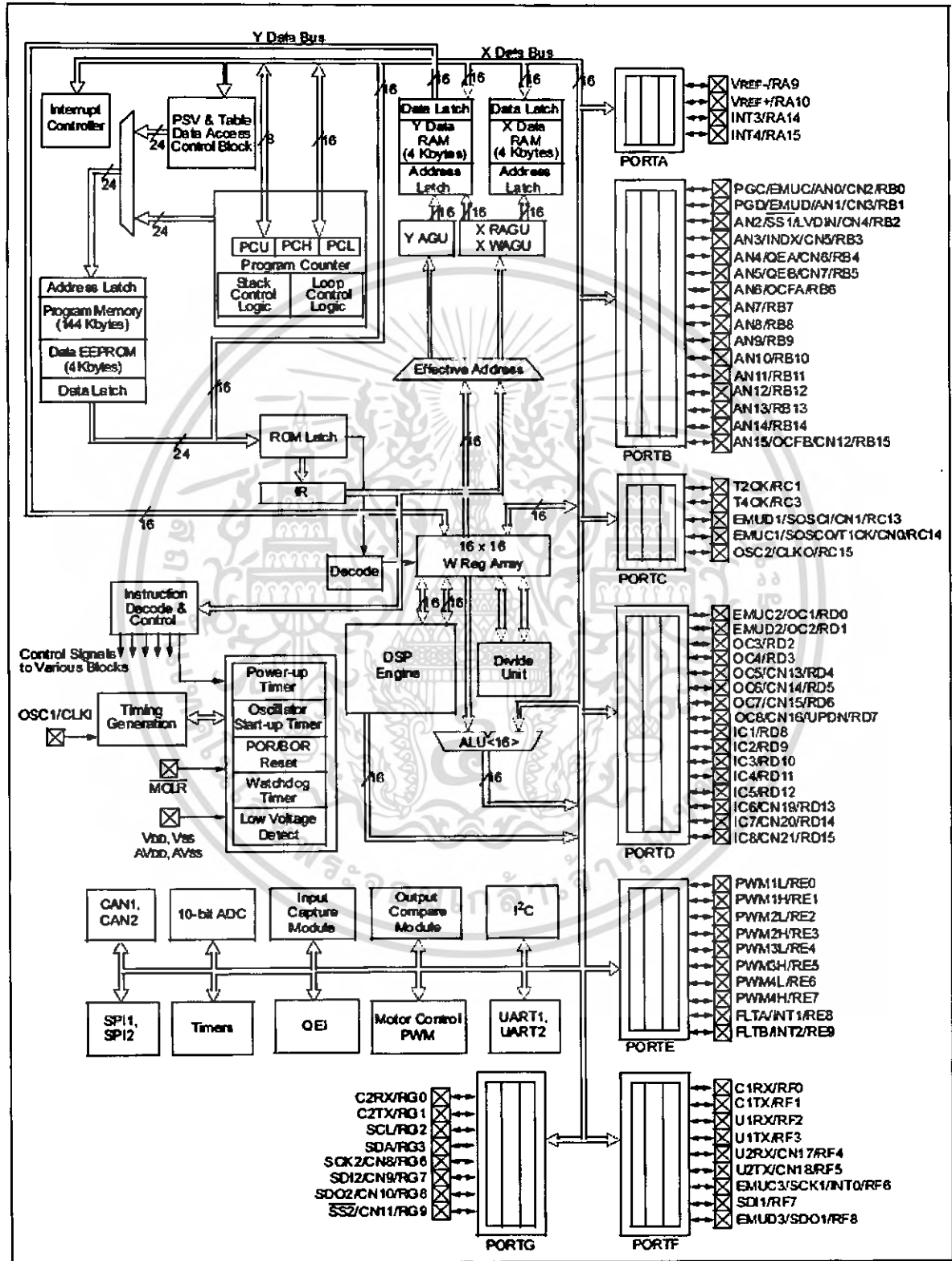
Pin Diagram



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

dsPIC30F6010

FIGURE 1-1: dsPIC30F6010 BLOCK DIAGRAM



dsPIC30F6010

Table 1-1 provides a brief description of the device I/O pinout and the functions that are multiplexed to a port pin. Multiple functions may exist on one port pin. When multiplexing occurs, the peripheral module's functional requirements may force an override of the data direction of the port pin.

TABLE 1-1: dsPIC30F6010 I/O PIN DESCRIPTIONS

Pin Name	Pin Type	Buffer Type	Description
AN0-AN15	I	Analog	Analog input channels. AN0 and AN1 are also used for device programming data and clock inputs, respectively.
AVDD	P	P	Positive supply for analog module.
AVSS	P	P	Ground reference for analog module.
CLKI	I	ST/CMOS	External clock source input. Always associated with OSC1 pin function.
CLKO	O	—	Oscillator crystal output. Connects to crystal or resonator in Crystal Oscillator mode. Optionally functions as CLKO in RC and EC modes. Always associated with OSC2 pin function.
CN0-CN23	I	ST	Input change notification inputs. Can be software programmed for internal weak pull-ups on all inputs.
COFS	I/O	ST	Data Converter Interface frame synchronization pin.
CSCK	I/O	ST	Data Converter Interface serial clock input/output pin.
CSDI	I	ST	Data Converter Interface serial data input pin.
CSDO	O	—	Data Converter Interface serial data output pin.
C1RX	I	ST	CAN1 bus receive pin.
C1TX	O	—	CAN1 bus transmit pin.
C2RX	I	ST	CAN2 bus receive pin.
C2TX	O	—	CAN2 bus transmit pin.
EMUD	I/O	ST	ICD Primary Communication Channel data input/output pin.
EMUC	I/O	ST	ICD Primary Communication Channel clock input/output pin.
EMUD1	I/O	ST	ICD Secondary Communication Channel data input/output pin.
EMUC1	I/O	ST	ICD Secondary Communication Channel clock input/output pin.
EMUD2	I/O	ST	ICD Tertiary Communication Channel data input/output pin.
EMUC2	I/O	ST	ICD Tertiary Communication Channel clock input/output pin.
EMUD3	I/O	ST	ICD Quaternary Communication Channel data input/output pin.
EMUC3	I/O	ST	ICD Quaternary Communication Channel clock input/output pin.
IC1-IC8	I	ST	Capture inputs 1 through 8.
INDX	I	ST	Quadrature Encoder Index Pulse Input.
QEA	I	ST	Quadrature Encoder Phase A input in QE1 mode. Auxiliary Timer External Clock/Gate input in Timer mode.
QEB	I	ST	Quadrature Encoder Phase B input in QE1 mode. Auxiliary Timer External Clock/Gate input in Timer mode.
UPDN	O	CMOS	Position Up/Down Counter Direction State.
INT0	I	ST	External interrupt 0.
INT1	I	ST	External interrupt 1.
INT2	I	ST	External interrupt 2.
INT3	I	ST	External interrupt 3.
INT4	I	ST	External interrupt 4.
LVDIN	I	Analog	Low Voltage Detect Reference Voltage input pin.

Legend: CMOS = CMOS compatible input or output Analog = Analog input
 ST = Schmitt Trigger input with CMOS levels O = Output
 I = Input P = Power

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

dsPIC30F6010

TABLE 1-1: dsPIC30F6010 I/O PIN DESCRIPTIONS (CONTINUED)

Pin Name	Pin Type	Buffer Type	Description
FLTA	I	ST	PWM Fault A input.
FLTB	I	ST	PWM Fault B input.
PWM1L	O	—	PWM 1 Low output.
PWM1H	O	—	PWM 1 High output.
PWM2L	O	—	PWM 2 Low output.
PWM2H	O	—	PWM 2 High output.
PWM3L	O	—	PWM 3 Low output.
PWM3H	O	—	PWM 3 High output.
PWM4L	O	—	PWM 4 Low output.
PWM4H	O	—	PWM 4 High output.
MCLR	I/P	ST	Master Clear (Reset) input or programming voltage input. This pin is an active low Reset to the device.
OCFA	I	ST	Compare Fault A input (for Compare channels 1, 2, 3 and 4).
OCFB	I	ST	Compare Fault B input (for Compare channels 5, 6, 7 and 8).
OC1-OC8	O	—	Compare outputs 1 through 8.
OSC1	I	ST/CMOS	Oscillator crystal input. ST buffer when configured in RC mode; CMOS otherwise.
OSC2	I/O	—	Oscillator crystal output. Connects to crystal or resonator in Crystal Oscillator mode. Optionally functions as CLKO in RC and EC modes.
PGD	I/O	ST	In-Circuit Serial Programming data input/output pin.
PGC	I	ST	In-Circuit Serial Programming clock input pin.
RA9-RA10	I/O	ST	PORTA is a bi-directional I/O port.
RA14-RA15	I/O	ST	
RB0-RB15	I/O	ST	PORTB is a bi-directional I/O port.
RC1	I/O	ST	PORTC is a bi-directional I/O port.
RC3	I/O	ST	
RC13-RC15	I/O	ST	
RD0-RD15	I/O	ST	PORTD is a bi-directional I/O port.
RE0-RE9	I/O	ST	PORTE is a bi-directional I/O port.
RF0-RF8	I/O	ST	PORTF is a bi-directional I/O port.
RG0-RG3	I/O	ST	PORTG is a bi-directional I/O port.
RG6-RG9	I/O	ST	
SCK1	I/O	ST	Synchronous serial clock input/output for SPI™ #1.
SDI1	I	ST	SPI #1 Data In.
SDO1	O	—	SPI #1 Data Out.
SS1	I	ST	SPI #1 Slave Synchronization.
SCK2	I/O	ST	Synchronous serial clock input/output for SPI #2.
SDI2	I	ST	SPI #2 Data In.
SDO2	O	—	SPI #2 Data Out.
SS2	I	ST	SPI #2 Slave Synchronization.
SCL	I/O	ST	Synchronous serial clock input/output for I ² C.
SDA	I/O	ST	Synchronous serial data input/output for I ² C.
SOSCO	O	—	32 kHz low power oscillator crystal output.
SOSCI	I	ST/CMOS	32 kHz low power oscillator crystal input. ST buffer when configured in RC mode; CMOS otherwise.

Legend: CMOS = CMOS compatible input or output Analog = Analog input
 ST = Schmitt Trigger input with CMOS levels O = Output
 I = Input P = Power

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

dsPIC30F6010

TABLE 1-1: dsPIC30F6010 I/O PIN DESCRIPTIONS (CONTINUED)

Pin Name	Pin Type	Buffer Type	Description
T1CK	I	ST	Timer1 external clock input.
T2CK	I	ST	Timer2 external clock input.
T3CK	I	ST	Timer3 external clock input.
T4CK	I	ST	Timer4 external clock input.
T5CK	I	ST	Timer5 external clock input.
U1RX	I	ST	UART1 Receive.
U1TX	O	—	UART1 Transmit.
U1ARX	I	ST	UART1 Alternate Receive.
U1ATX	O	—	UART1 Alternate Transmit.
U2RX	I	ST	UART2 Receive.
U2TX	O	—	UART2 Transmit.
VDD	P	—	Positive supply for logic and I/O pins.
VSS	P	—	Ground reference for logic and I/O pins.
VREF+	I	Analog	Analog Voltage Reference (High) input.
VREF-	I	Analog	Analog Voltage Reference (Low) input.

Legend: CMOS = CMOS compatible input or output Analog = Analog input
 ST = Schmitt Trigger input with CMOS levels O = Output
 I = Input P = Power

ข้อมูลของไมโครคอนโทรลเลอร์รุ่นนี้ที่ได้นำเสนอเป็นเพียงทางด้านคุณสมบัติที่สำคัญเท่านั้น จะไม่กล่าวถึงคุณลักษณะต่างๆ เช่น สถาปัตยกรรม โครงสร้างทางโปรแกรม หน่วยประมวลผลสัญญาณดิจิทัล เป็นต้น ซึ่งข้อมูลเหล่านี้ ผู้สนใจสามารถค้นคว้าหาข้อมูลได้จากเว็บไซต์ของบริษัท ไมโครชิฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

HIGH AND LOW SIDE DRIVER

Features

- Floating channel designed for bootstrap operation
Fully operational to +500V or +600V
Tolerant to negative transient voltage
dV/dt immune
- Gate drive supply range from 10 to 20V
- Undervoltage lockout for both channels
- 3.3V logic compatible
Separate logic supply range from 3.3V to 20V
Logic and power ground ±5V offset
- CMOS Schmitt-triggered inputs with pull-down
- Cycle by cycle edge-triggered shutdown logic
- Matched propagation delay for both channels
- Outputs in phase with inputs

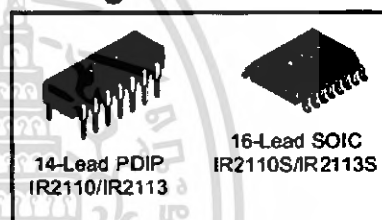
Product Summary

V _{OFFSET} (IR2110)	500V max.
(IR2113)	600V max.
I _{O+/-}	2A / 2A
V _{OUT}	10 - 20V
t _{on/off} (typ.)	120 & 94 ns
Delay Matching (IR2110)	10 ns max.
(IR2113)	20ns max.

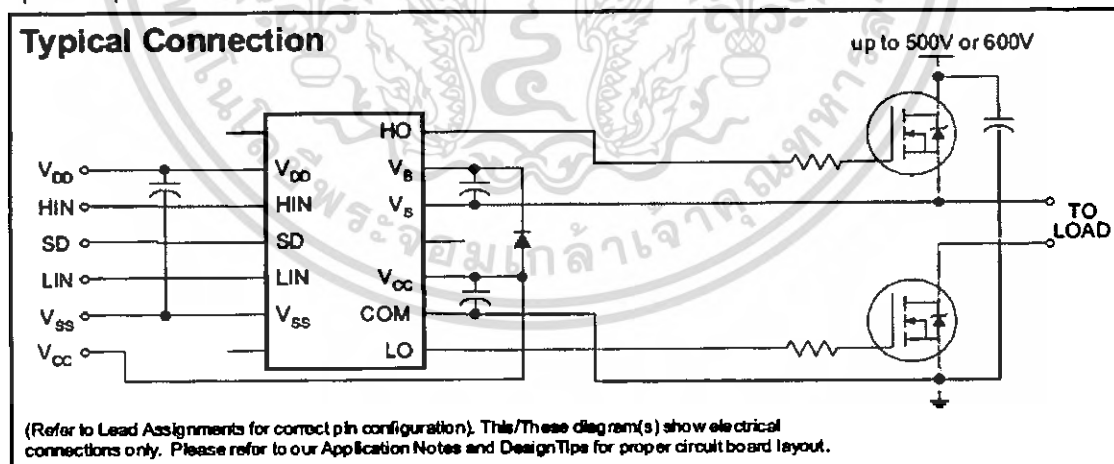
Description

The IR2110/IR2113 are high voltage, high speed power MOSFET and IGBT drivers with independent high and low side referenced output channels. Proprietary HVIC and latch immune CMOS technologies enable ruggedized monolithic construction. Logic inputs are compatible with standard CMOS or LSTTL output, down to 3.3V logic. The output drivers feature a high pulse current buffer stage designed for minimum driver cross-conduction. Propagation delays are matched to simplify use in high frequency applications. The floating channel can be used to drive an N-channel power MOSFET or IGBT in the high side configuration which operates up to 500 or 600 volts.

Packages



Typical Connection



IR2110(-1-2)(S)PbF/IR2113(-1-2)(S)PbF

International
IGR Rectifier

Absolute Maximum Ratings

Absolute maximum ratings indicate sustained limits beyond which damage to the device may occur. All voltage parameters are absolute voltages referenced to COM. The thermal resistance and power dissipation ratings are measured under board mounted and still air conditions. Additional information is shown in Figures 28 through 35.

Symbol	Definition	Min.	Max.	Units	
V _B	High side floating supply voltage (IR2110)	-0.3	525	V	
	(IR2113)	-0.3	625		
V _S	High side floating supply offset voltage	V _B - 25	V _B + 0.3		
V _{HO}	High side floating output voltage	V _S - 0.3	V _B + 0.3		
V _{CC}	Low side fixed supply voltage	-0.3	25		
V _{LO}	Low side output voltage	-0.3	V _{CC} + 0.3		
V _{DD}	Logic supply voltage	-0.3	V _{SS} + 25		
V _{SS}	Logic supply offset voltage	V _{CC} - 25	V _{CC} + 0.3		
V _{IN}	Logic input voltage (HIN, LIN & SD)	V _{SS} - 0.3	V _{DD} + 0.3		
dV _{off} /dt	Allowable offset supply voltage transient (figure 2)	—	50		V/ns
P _D	Package power dissipation @ T _A ≤ +25°C	(14 lead DIP)	—	1.6	W
		(16 lead SOIC)	—	1.25	
R _{THJA}	Thermal resistance, junction to ambient	(14 lead DIP)	—	75	°C/W
		(16 lead SOIC)	—	100	
T _J	Junction temperature	—	150	°C	
T _S	Storage temperature	-55	150		
T _L	Lead temperature (soldering, 10 seconds)	—	300		

Recommended Operating Conditions

The input/output logic timing diagram is shown in figure 1. For proper operation the device should be used within the recommended conditions. The V_S and V_{SS} offset ratings are tested with all supplies biased at 15V differential. Typical ratings at other bias conditions are shown in figures 36 and 37.

Symbol	Definition	Min.	Max.	Units
V _B	High side floating supply absolute voltage	V _S + 10	V _S + 20	V
V _S	High side floating supply offset voltage (IR2110)	Note 1	500	
	(IR2113)	Note 1	600	
V _{HO}	High side floating output voltage	V _S	V _B	
V _{CC}	Low side fixed supply voltage	10	20	
V _{LO}	Low side output voltage	0	V _{CC}	
V _{DD}	Logic supply voltage	V _{SS} + 3	V _{SS} + 20	
V _{SS}	Logic supply offset voltage	-5 (Note 2)	5	
V _{IN}	Logic input voltage (HIN, LIN & SD)	V _{SS}	V _{DD}	
T _A	Ambient temperature	-40	125	

Note 1: Logic operational for V_S of -4 to +500V. Logic state held for V_S of -4V to -V_{GS}. (Please refer to the Design Tip DT97-3 for more details).

Note 2: When V_{DD} < 5V, the minimum V_{SS} offset is limited to -V_{DD}.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Dynamic Electrical Characteristics

V_{BIAS} (V_{CC} , V_{BS} , V_{DD}) = 15V, C_L = 1000 pF, T_A = 25°C and V_{SS} = COM unless otherwise specified. The dynamic electrical characteristics are measured using the test circuit shown in Figure 3.

Symbol	Definition	Figure	Min.	Typ.	Max.	Units	Test Conditions
t_{on}	Turn-on propagation delay	7	—	120	150	ns	$V_S = 0V$
t_{off}	Turn-off propagation delay	8	—	94	125		$V_S = 500V/600V$
t_{sd}	Shutdown propagation delay	9	—	110	140		$V_S = 500V/600V$
t_r	Turn-on rise time	10	—	25	35		
t_f	Turn-off fall time	11	—	17	25		
MT	Delay matching, HS & LS turn-on/off	(IR2110) (IR2113)	— —	— —	10 20		

Static Electrical Characteristics

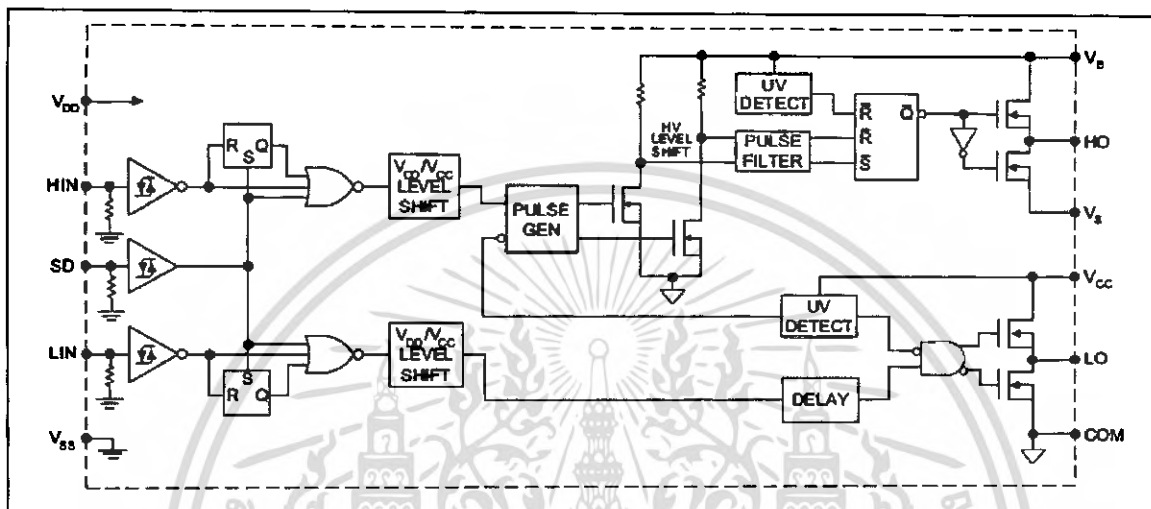
V_{BIAS} (V_{CC} , V_{BS} , V_{DD}) = 15V, T_A = 25°C and V_{SS} = COM unless otherwise specified. The V_{IN} , V_{TH} and I_{IN} parameters are referenced to V_{SS} and are applicable to all three logic input leads: HIN, LIN and SD. The V_O and I_O parameters are referenced to COM and are applicable to the respective output leads: HO or LO.

Symbol	Definition	Figure	Min.	Typ.	Max.	Units	Test Conditions
V_{IH}	Logic "1" input voltage	12	9.5	—	—	V	
V_{IL}	Logic "0" input voltage	13	—	—	6.0		
V_{OH}	High level output voltage, $V_{BIAS} - V_O$	14	—	—	1.2		$I_O = 0A$
V_{OL}	Low level output voltage, V_O	15	—	—	0.1		$I_O = 0A$
I_{LK}	Offset supply leakage current	16	—	—	50	μA	$V_B = V_S = 500V/600V$
I_{OBS}	Quiescent V_{BS} supply current	17	—	125	230		$V_{IN} = 0V$ or V_{DD}
I_{OCC}	Quiescent V_{CC} supply current	18	—	180	340		$V_{IN} = 0V$ or V_{DD}
I_{ODD}	Quiescent V_{DD} supply current	19	—	15	30		$V_{IN} = 0V$ or V_{DD}
I_{IN+}	Logic "1" input bias current	20	—	20	40		$V_{IN} = V_{DD}$
I_{IN-}	Logic "0" input bias current	21	—	—	1.0		$V_{IN} = 0V$
V_{BSUV+}	V_{BS} supply undervoltage positive going threshold	22	7.5	8.6	9.7	V	
V_{BSUV-}	V_{BS} supply undervoltage negative going threshold	23	7.0	8.2	9.4		
V_{CCUV+}	V_{CC} supply undervoltage positive going threshold	24	7.4	8.5	9.6		
V_{CCUV-}	V_{CC} supply undervoltage negative going threshold	25	7.0	8.2	9.4		
I_{O+}	Output high short circuit pulsed current	26	2.0	2.5	—	A	$V_O = 0V$, $V_{IN} = V_{DD}$ $PW \leq 10 \mu s$
I_{O-}	Output low short circuit pulsed current	27	2.0	2.5	—		$V_O = 15V$, $V_{IN} = 0V$ $PW \leq 10 \mu s$

IR2110(-1-2)(S)PbF/IR2113(-1-2)(S)PbF

International
IOR Rectifier

Functional Block Diagram



Lead Definitions

Symbol	Description
VDD	Logic supply
HIN	Logic input for high side gate driver output (HO), in phase
SD	Logic input for shutdown
LIN	Logic input for low side gate driver output (LO), in phase
VSS	Logic ground
VB	High side floating supply
HO	High side gate drive output
VS	High side floating supply return
VCC	Low side supply
LO	Low side gate drive output
COM	Low side return

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

IR2110(-1-2)(S)PbF/IR2113(-1-2)(S)PbF

International
IOR Rectifier

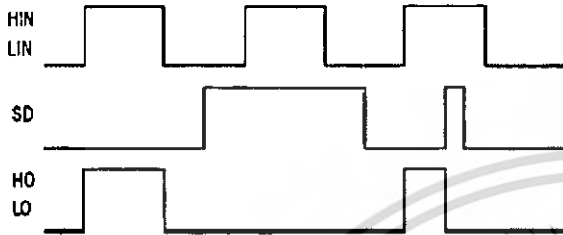


Figure 1. Input/Output Timing Diagram

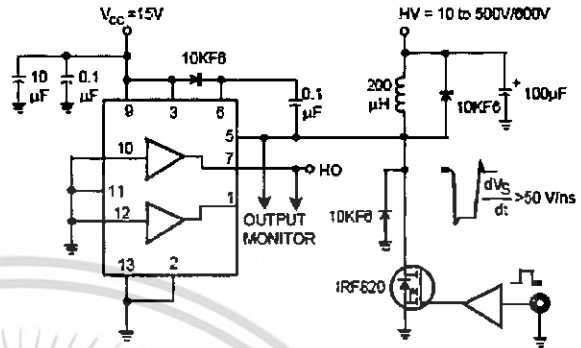


Figure 2. Floating Supply Voltage Transient Test Circuit

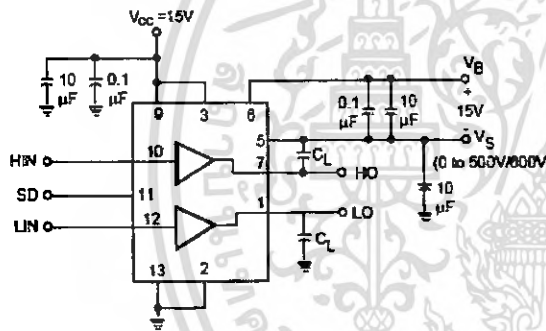


Figure 3. Switching Time Test Circuit

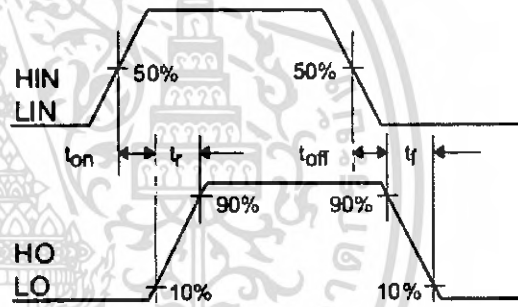


Figure 4. Switching Time Waveform Definition

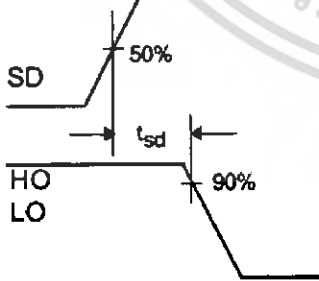


Figure 5. Shutdown Waveform Definitions

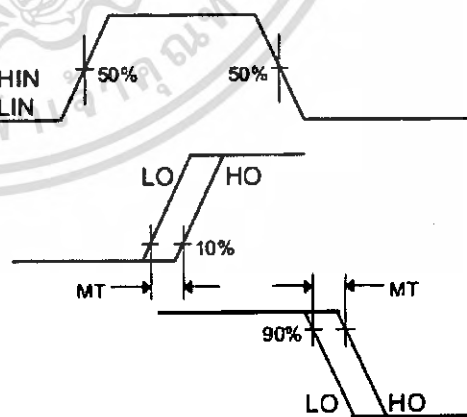


Figure 6. Delay Matching Waveform Definitions

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้