

การออกแบบตัวควบคุมแบบโมเดลเรฟเฟอร์เรนซ์อะแดปทีฟสำหรับระบบอินเวอร์ทเพนดูลัม

**MODEL REFERENCE ADAPTIVE CONTROL DESIGN FOR
INVERTED PENDULUM SYSTEM**

ณัฐพงษ์ จิตมานะ

NATTAPONG CHITMANA

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

พ.ศ. 2553

การออกแบบตัวควบคุมแบบโมเดลเรฟเฟอร์เรนซ์อะแดปทีฟสำหรับระบบอินเวอร์ทเพนดูลัม



ณัฐพงษ์ จิตมานะ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

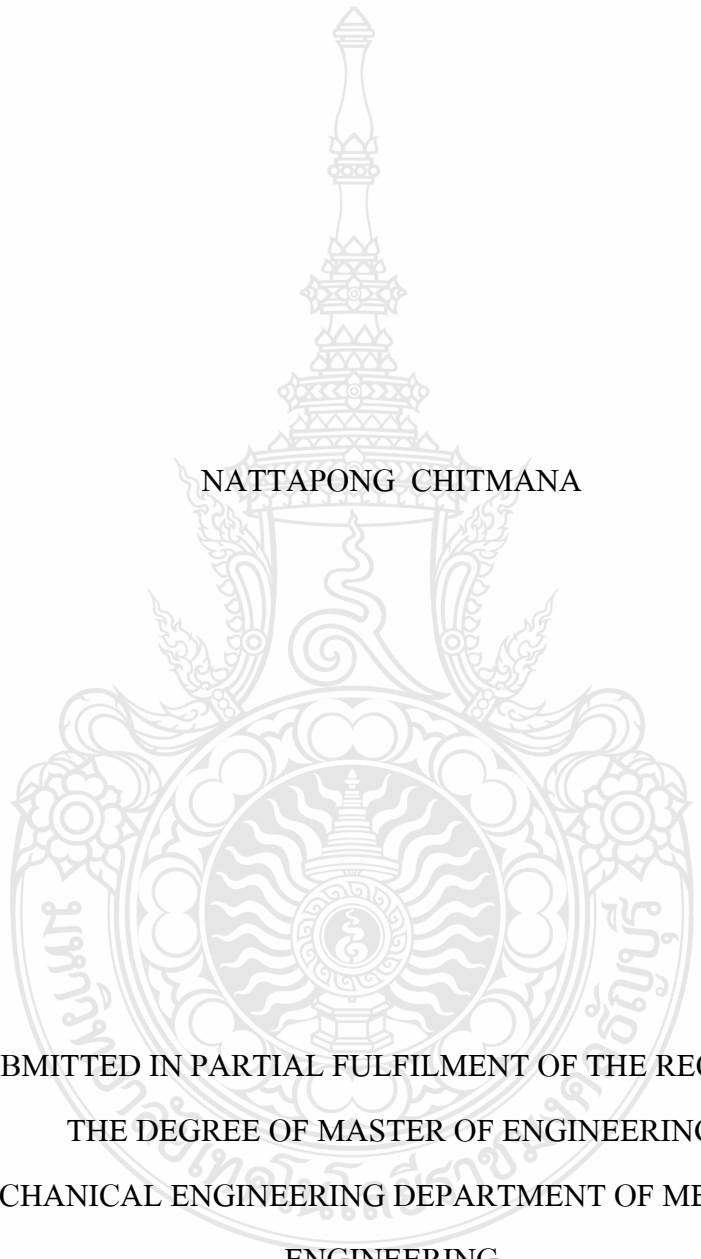
คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

พ.ศ. 2553

**MODEL REFERENCE ADAPTIVE CONTROL DESIGN FOR
INVERTED PENDULUM SYSTEM**

NATTAPONG CHITMANA



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILMENT OF THE REQUIREMENTS FOR
THE DEGREE OF MASTER OF ENGINEERING
IN MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT OF MECHANICAL
ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
RAJAMANGALA UNIVERSITY OF TECHNOLOGY THANYABURI

2010

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เป็นงานวิจัยที่เกิดจากการค้นคว้าและวิจัยขณะที่ข้าพเจ้าศึกษาอยู่ในคณะ
วิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ดังนั้นงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ถือ
เป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี และข้อความต่างๆในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
ข้าพเจ้าขอรับรองว่าไม่มีการคัดลอกหรือนำงานวิจัยของผู้อื่นมานำเสนอในชื่อของข้าพเจ้า

นายณัฐพงษ์ จิตมานะ





ใบรับรองวิทยานิพนธ์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การออกแบบตัวควบคุมแบบ โมเดลเรฟเฟอเรนซ์อะแดปทีฟ
สำหรับระบบอินเวอร์ทเพนดูลัม
MODEL REFERENCE ADAPTIVE CONTROL DESIGN FOR
INVERTED PENDULUM STSTEM

ชื่อนักศึกษา

นายณัฐพงษ์ จิตมานะ

รหัสประจำตัว

115070403005-7

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมเครื่องกล

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ดร.มนูศักดิ์ งานทอง

วัน เดือน ปี ที่สอบ

20 กันยายน 2553

สถานที่สอบ

ห้องมีฤทธิ์ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(ดร.พิพัฒน์ ปราโมทย์)

..... กรรมการ

(ดร.เกียรติศักดิ์ ศรีตระกูลชัย)

..... กรรมการ

(ดร.ปรัชญา เปรมปราณีรัชต์)

..... กรรมการ

(ดร.มนูศักดิ์ งานทอง)

.....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชัย หิรัญวโรดม)

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบตัวควบคุมแบบ โมเดลเรฟเฟอร์เรนซ์
	อะแดปทีฟสำหรับระบบอินเวอร์ทเพนดูลัม
ชื่อนักศึกษา	นายณัฐพงษ์ จิตมานะ
รหัสประจำตัว	115070403005-7
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
ปีการศึกษา	2553
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ดร.มนูศักดิ์ จานทอง

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมเสถียรภาพของระบบอินเวอร์ทเพนดูลัม ซึ่งระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมเป็นระบบไม่เป็นเชิงเส้นและไม่เสถียรภาพ ตัวควบคุมการรักษาเสถียรภาพของระบบ จะถูกออกแบบด้วยหลักการควบคุมแบบ โมเดลเรฟเฟอร์เรนซ์อะแดปทีฟ (Model Reference Adaptive Control) ซึ่งเป็นตัวควบคุมแบบปรับตัวได้จะทำให้ค่าอัตราขยายที่ได้จากระบบแบบป้อนกลับมีการปรับค่าตัวเองตามสภาพของระบบ ซึ่งต่างจากการควบคุมที่มีค่าอัตราขยายคงที่ ทำให้ระบบมีความยืดหยุ่นมากยิ่งขึ้น

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ใช้ระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมและรถรางซึ่งเคลื่อนที่อยู่บนรางเลื่อน ระบบที่ใช้ในการทดลองจะประกอบไปด้วยชุดเพนดูลัมที่ปลายมีจุดหมุนยึดติดกับตัวรถราง ตัวรางเลื่อนใช้เซอร์โวมอเตอร์ในการขับเคลื่อนและใช้เอนโค้ดเดอร์วัดตำแหน่งการเคลื่อนที่ นอกจากนี้ยังใช้กล้องความเร็วสูงในการตรวจจับตำแหน่งปลายของเพนดูลัมเพื่อวัดมุมเอียง ซึ่งแตกต่างจากการวัดมุมเอียงของเพนดูลัมโดยทั่วไปซึ่งจะใช้เอนโค้ดเดอร์ ส่วนการทดลองแบ่งเป็นสองส่วนคือ การรักษาเสถียรภาพของระบบและการติดตามตำแหน่งของรถราง โดยเปรียบเทียบระหว่างตัวควบคุม Model Reference Adaptive Control (MRAC) และตัวควบคุม Linear Quadratic Regulator (LQR) ซึ่งเป็นตัวควบคุมแบบมีค่าอัตราขยายคงที่

จากผลการทดลองพบว่าตัวควบคุม LQR และ MRAC สามารถควบคุมให้เพนดูลัมรักษาเสถียรภาพไว้ได้ ส่วนการทดลองการติดตามตำแหน่งเมื่อพิจารณาตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถราง ตัวควบคุม MRAC สามารถควบคุมให้รถรางติดตามตำแหน่งได้ใกล้เคียงและคงที่เมื่อเปรียบเทียบกับตำแหน่งอ้างอิงมากกว่าตัวควบคุม LQR ซึ่งตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถรางมีการเหลื่อมล้ำและไม่คงที่เมื่อเปรียบเทียบกับตำแหน่งอ้างอิง แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุม MRAC ที่มีค่าอัตราขยายปรับตัวได้ สามารถควบคุมตำแหน่งได้ใกล้เคียงกว่าตัวควบคุม LQR ที่มีค่าอัตราขยายคงที่

คำสำคัญ : อินเวอร์ทเพนดูลัม, ระบบไม่เป็นเชิงเส้น, โมเดลเรฟเฟอร์เรนซ์อะแดปทีฟคอนโทรล

Thesis Title : MODEL REFERENCE ADAPTIVE CONTROL
DESIGN FOR INVERTED PENDULUM STSTEM

Student Name : Mr. Nattapong Chitmana

Student ID : 115070403005-7

Degree Award : Master of Engineering

Study Program : Mechanical Engineering

Academic Year : 2010

Thesis Advisor : Dr. Manusak Janthong

ABSTRACT

This thesis presents the controller design for stabilizing the inverted pendulum system which is nonlinear and unstable system. Model Reference Adaptive Control (MRAC) technique was designed for controlled the inverted pendulum system. MRAC technique was designed for control the pendulum system. The adaptive controller will adapt the gain of state feedback system which is difference from the fixed gain controller and makes the system more flexible.

In this thesis the system used in this experiment was compounded of the inverted pendulum which connects with the linear drive transmission. The linear drive transmission was driven by servomotor and measured the position by encoder. Besides, a high speed camera was used to measure the tilt angle of the pendulum which unlike a general measure which will be used encoder. The experiments can be divided into 2 parts as stabilizing the system and tracking the position of linear drive transmission which their results were compared between MRAC controller and the LQR controller which is the fixed gain controller.

From the experiments shown that the LQR and MRAC controllers can stabilize the inverted pendulum into upright the position. As for the tracking position result, MRAC can control the position of the cart close to the reference position than the LQR controller which denotes that the adaptive gain controller is able to adjust the gain for controller the position better than the fixed gain controller.

Keywords : Inverted Pendulum, Nonlinear System, Model Reference Adaptive Control

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ ดร.มนุศักดิ์ งานทอง อาจารย์ที่ปรึกษาเป็นอย่างสูง ที่ได้ให้คำปรึกษาในการทำวิจัย แนวทางแก้ปัญหา และอุปสรรคการวิจัยต่างๆ พร้อมทั้งดูแลและสอบถามถึงความก้าวหน้าของวิทยานิพนธ์ ทำให้ผู้เขียนทำงานได้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ดร.พิพัฒน์ ปราโมทย์ ดร.ปรัชญา เปรมปราชญ์รัตน์ ดร.มนุศักดิ์ งานทอง และอาจารย์ผู้ทรงคุณวุฒิจากมหาวิทยาลัยมหิดล ดร.เกียรติศักดิ์ ศรีตระกูลชัย ที่ได้ให้คำแนะนำเพิ่มเติมพร้อมทั้งข้อเสนอแนะ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและบุคลากรที่เกี่ยวข้องทุกท่าน ที่ได้เอื้อเฟื้ออุปกรณ์และเครื่องมือในการทำวิจัย พร้อมทั้งยังอำนวยความสะดวกให้แก่ผู้เขียนได้ทำวิจัยได้อย่างราบรื่น

สุดท้ายขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และครอบครัว ที่ให้การสนับสนุนในการศึกษาและให้กำลังใจ พร้อมทั้งกระตุ้นให้การทำงานวิจัยนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี ตลอดจนคณะอาจารย์ เพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ในภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลทุกท่าน ที่คอยให้คำปรึกษาและเป็นกำลังใจให้จัดทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เสร็จสมบูรณ์

ณัฐพงษ์ จิตมานะ

20 กันยายน 2553

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย	2
1.4 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์	2
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.2 สมการลากรองจ์	8
2.3 การควบคุมแบบปรับตัวได้	9
2.4 Model Reference Adaptive Control	9
2.5 วิธีของเลียปูนอฟ	11
2.6 ตัวควบคุมสถานะป้อนกลับ	16
2.7 การแปลงสมการสถานะของระบบ	18
บทที่ 3 ขั้นตอนการทดลอง	21
3.1 ระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมที่ใช้ในการทดลอง	21
3.2 ระบบสัญญาณการควบคุมของระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมที่ใช้ในการทดลอง	25
3.3 แบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์	26
3.4 การออกแบบตัวควบคุม	33
บทที่ 4 ผลการทดลอง	39
4.1 การจำลองการควบคุมการรักษาเสถียรภาพของระบบอินเวอร์ทเพนดูลัม	39
4.2 การจำลองการควบคุมการติดตามตำแหน่งของระบบอินเวอร์ทเพนดูลัม	41
4.3 การทดลองการควบคุมการรักษาเสถียรภาพของระบบอินเวอร์ทเพนดูลัม	43
4.4 การทดลองการควบคุมการติดตามตำแหน่งของระบบอินเวอร์ทเพนดูลัม	45

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	50
5.1 ผลการทดลอง	50
5.2 ปัญหาที่พบในการวิจัยและแนวทางในการแก้ปัญหา	51
5.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา	52
เอกสารอ้างอิง	53
ภาคผนวก	55
ก. รายละเอียดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	56
ข. โปรแกรมที่ใช้ในการทดลอง	61
ค. ผลงานวิจัยตีพิมพ์เผยแพร่	66
ประวัติผู้เขียน	80



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 พารามิเตอร์ของระบบอินเวอร์ทเพนดูลัม	33
3.2 สัมประสิทธิ์ของสมการคุณลักษณะที่เหมาะสม โดย ITAE	34
ก.1 ข้อมูลจำเพาะของรางเลื่อน	56
ก.2 ข้อมูลจำเพาะของมอเตอร์	56
ก.3 ข้อมูลจำเพาะของไคร์	57
ก.4 ข้อมูลก่อดึงความเร็วสูง	57



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ระบบอินเวอร์ทเพนคูล์มและรตราง	4
2.2 ชุดการทดลองระบบอินเวอร์ทเพนคูล์ม	5
2.3 ระบบอินเวอร์ทเพนคูล์มแบบสองชั้น	6
2.4 ระบบอินเวอร์ทเพนคูล์มแบบฐานหมุน	7
2.5 โครงสร้าง MRAC	11
2.6 โครงสร้างตัวควบคุมป้อนกลับ	16
2.7 โครงสร้างของตัวสังเกต	17
3.1 ระบบอินเวอร์ทเพนคูล์มที่ใช้ในการทดลอง	21
3.2 รางเลื่อนแบบเชิงเส้น	22
3.3 ชุดเพนคูล์ม	22
3.4 มอเตอร์	23
3.5 ไคร์	23
3.6 กล้องความเร็วสูง	24
3.7 ข้อมูลภาพที่ 640 พิกเซล	24
3.8 ข้อมูลภาพที่ 280 พิกเซล	24
3.9 ข้อมูลภาพที่ 1000 พิกเซล	25
3.10 โครงสร้างของระบบอินเวอร์ทเพนคูล์มในการทดลอง	26
3.11 แบบจำลองอินเวอร์ทเพนคูล์มและรตราง	27
3.12 ชุดมอเตอร์และรางเลื่อน	30
3.13 โครงสร้างการทำงานของชุดมอเตอร์และรางเลื่อนโดยใช้ซอฟต์แวร์เพื่อหาแบบจำลอง สมการทางคณิตศาสตร์	31
3.14 ผลตอบสนองสัญญาณขาออกจากการทดลองจริงและแบบจำลอง	32
3.15 โครงสร้างการออกแบบตัวควบคุม MRAC	34
3.16 โครงสร้างการออกแบบตัวควบคุมสถานะป้อนกลับ	37
4.1 ผลการจำลองการรักษาเสถียรภาพระหว่างตำแหน่งของรตรางกับเวลา	40
4.2 ผลการจำลองการรักษาเสถียรภาพระหว่างมุมของเพนคูล์มกับเวลา	40
4.3 ผลการจำลองการรักษาเสถียรภาพระหว่างสัญญาณโวลต์ขาเข้ากับเวลา	41
4.4 ผลการจำลองการควบคุมการติดตามตำแหน่งระหว่างตำแหน่งของรตรางกับเวลา	42
4.5 ผลการจำลองการควบคุมการติดตามตำแหน่งระหว่างมุมของเพนคูล์มกับเวลา	42
4.6 ผลการจำลองการควบคุมการติดตามตำแหน่งระหว่างสัญญาณโวลต์ขาเข้ากับเวลา	43

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.7 ผลการทดลองการรักษาเสถียรภาพระหว่างตำแหน่งของรศรางกับเวลา	44
4.8 ผลการทดลองการรักษาเสถียรภาพระหว่างมุมของเพนคลัมกับเวลา	44
4.9 ผลการทดลองการรักษาเสถียรภาพระหว่างสัญญาณโวลต์ขาเข้ากับเวลา	45
4.10 ผลการทดลองการควบคุมการติดตามตำแหน่งระหว่างตำแหน่งของรศรางกับเวลา ในช่วงเวลา 0-15 sec.	46
4.11 ผลการทดลองการควบคุมการติดตามตำแหน่งระหว่างตำแหน่งของรศรางกับเวลา ในช่วงเวลา 15-30 sec.	46
4.12 ผลการทดลองการควบคุมการติดตามตำแหน่งระหว่างมุมของเพนคลัมกับเวลา ในช่วงเวลา 0-15 sec.	47
4.13 ผลการทดลองการควบคุมการติดตามตำแหน่งระหว่างมุมของเพนคลัมกับเวลา ในช่วงเวลา 15-30 sec.	47
4.14 ผลการทดลองการควบคุมการติดตามตำแหน่งระหว่างสัญญาณ โวลต์ขาเข้ากับเวลา ในช่วงเวลา 0-15 sec.	48
4.15 ผลการทดลองการควบคุมการติดตามตำแหน่งระหว่างสัญญาณ โวลต์ขาเข้ากับเวลา ในช่วงเวลา 15-30 sec.	48
ก.1 เอน โค้ดเดอร์แบบหมุน	58
ก.2 การ์ด DAQ	58
ก.3 การ์ด Counter/Timer	59
ข.1 บล็อกตัวควบคุม LQR สำหรับการจำลองการควบคุมการรักษาเสถียรภาพ	61
ข.2 บล็อกตัวควบคุม MRAC สำหรับการจำลองการควบคุมการรักษาเสถียรภาพ	62
ข.3 บล็อกตัวควบคุม MRAC สำหรับการจำลองการควบคุมการติดตามตำแหน่ง	62
ข.4 บล็อกตัวควบคุม MRAC สำหรับการจำลองการควบคุมการติดตามตำแหน่ง	62
ข.5 บล็อกตัวควบคุม LQR สำหรับการทดลองการควบคุมการรักษาเสถียรภาพ	63
ข.6 บล็อกตัวควบคุม MRAC สำหรับการทดลองการควบคุมการรักษาเสถียรภาพ	63
ข.7 บล็อกตัวควบคุม MRAC สำหรับการทดลองการควบคุมการติดตามตำแหน่ง	64
ข.8 บล็อกตัวควบคุม MRAC สำหรับการทดลองการควบคุมการติดตามตำแหน่ง	64

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันระบบการควบคุมต่างๆมีบทบาทและความสำคัญมากขึ้น ดังจะเห็นได้จากการนำระบบการควบคุมไปใช้ในงานอุตสาหกรรมต่างๆ ต่อมาระบบมีความซับซ้อนมากขึ้นซึ่งส่วนใหญ่เป็นระบบที่ไม่มีเสถียรภาพ เช่น การควบคุมแขนหุ่นยนต์ การควบคุมมอเตอร์ หรืองานควบคุมเครื่องจักรกลในด้านอุตสาหกรรม เป็นต้น ซึ่งระบบและเครื่องจักรดังกล่าวเป็นระบบที่มีความซับซ้อนและไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นในปัจจุบันจึงเกิดทฤษฎีการควบคุมขึ้นมากมายเพื่อให้สามารถควบคุมอุปกรณ์ดังกล่าวได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ในการศึกษาระบบที่ไม่มีเสถียรภาพ ระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมเป็นเครื่องมือที่ได้รับความนิยมในนำมาศึกษาระบบควบคุมในงานทางด้านวิศวกรรม เนื่องจากระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมเป็นระบบที่มีข้อศึกษาอยู่หลายประการ เช่น ระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น ไม่มีเสถียรภาพ เป็นต้น จึงเหมาะแก่การนำมาศึกษาเพื่อออกแบบตัวควบคุม ซึ่งหัวข้อหลักในการทำการทดลองกับระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมจะมีอยู่สองข้อคือ การเหวี่ยงให้เพนดูลัมขึ้นสู่จุดสูงสุด และการเลี้ยงให้เพนดูลัมตั้งตรงอยู่ได้ ณ จุดสมดุล

ในการวิจัยระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมผู้วิจัยได้นำระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมและรถราง มาใช้ในการทดลองเนื่องจากได้รับความนิยมและเป็นการศึกษาระบบที่ไม่ซับซ้อนมากนัก เพื่อให้เข้าใจต่อระบบการทำงานของระบบที่ไม่มีเสถียรภาพได้โดยง่าย นอกจากนี้ยังได้นำกล้องความเร็วสูงซึ่งใช้ในอุตสาหกรรมมาใช้ในการวัดมุมเอียงของเพนดูลัม เพื่อเป็นการประยุกต์การนำข้อมูลภาพมาใช้ในการควบคุม โดยใช้การจับตำแหน่งปลายของเพนดูลัมเพื่อวัดมุมเอียงของเพนดูลัมขณะเคลื่อนที่

ตัวควบคุมที่มักนำมาใช้ในการควบคุมระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมในปัจจุบันมีอยู่มากมาย เช่น ตัวควบคุมพีไอดี (PID control) ตัวควบคุมแบบสถานะป้อนกลับ (Feedback control) ตัวควบคุมแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear control) ตัวควบคุมแบบฟัซซีลอจิก (Fuzzy logic control) ตัวควบคุมแบบโรบัส (Robust control) เป็นต้น

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมสำหรับระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมและรถราง ซึ่งเป็นระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นและไม่มีเสถียรภาพ ระบบมีการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์แปรไปตามสภาพแวดล้อม ดังนั้นผู้ทำวิจัยได้นำตัวควบคุมชนิด Model Reference Adaptive Control (MRAC) ซึ่งเป็นตัวควบคุมแบบมีค่าอัตราขยายปรับตัวแปรผันตามสภาพของตัวแปรในระบบ ซึ่งแตกต่างจากตัวควบคุมแบบที่มีค่าอัตราขยายคงที่ที่จะมีค่าอัตราขยายเพียงค่าเดียว เพื่อที่จะใช้ในการควบคุมระบบดังกล่าว ดังนั้นเพื่อทดสอบประสิทธิภาพตัวควบคุมที่มีค่าอัตราขยายปรับตัวแปรได้และ

ตัวควบคุมที่มีอัตราขยายคงที่ จึงได้นำตัวควบคุมสถานะป้อนกลับซึ่งออกแบบโดยใช้ทฤษฎี Linear quadratic regulator (LQR) เพื่อนำมาเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพในการควบคุมระบบอินเวอร์ทเพนดูลัม และเนื่องจากระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมมีตัวแปรสถานะบางตัวที่ไม่ทราบค่าจึงได้ใช้ตัวสังเกต (Observer) มาช่วยในการประมาณค่า (Estimate) ตัวแปรสถานะให้ครบทุกตัวเพื่อนำไปใช้ในการควบคุม

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 1.2.1 เพื่อศึกษาการออกแบบตัวควบคุมระบบอินเวอร์ทเพนดูลัม โดยใช้หลักการควบคุม MRAC และ LQR
- 1.2.2 เพื่อศึกษาการหาแบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์ ของระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมและจำลองการควบคุมโดยใช้โปรแกรม MATLAB
- 1.2.3 เพื่อศึกษาการประยุกต์ใช้กล้องในงานควบคุมอัตโนมัติ

1.3 ขอบเขตการวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาโครงสร้างและหาแบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์ ของระบบอินเวอร์ทเพนดูลัม โดยใช้สมการลากรองจ์ (Lagrange's equation) ในการหาแบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์
- 1.3.2 ออกแบบตัวควบคุม LQR และ MRAC สำหรับระบบอินเวอร์ทเพนดูลัม และเปรียบเทียบผลการทดลองระหว่างตัวควบคุมทั้งสอง
- 1.3.3 ใช้ระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมและรูดรางบนรางเลื่อน และตัวรางเลื่อนมีความยาว 0.55 m
- 1.3.4 ใช้กล้องดิจิทัลความถี่สูงในการวัดมุมเอียงของเพนดูลัม ภายใต้สภาวะแสงที่มีการควบคุมภายในห้องปฏิบัติการ
- 1.3.5 จำลองการควบคุมระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมโดยใช้โปรแกรม MATLAB และนำไปใช้กับชุดการทดลองจริง

1.4 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้แบ่งออกเป็น 5 บท โดยมีรายละเอียดดังนี้
บทที่ 1 กล่าวถึงรายละเอียดความเป็นมาและความสำคัญของการทำวิจัย ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย ขอบเขตการวิจัย และรายละเอียดการทำวิจัยในแต่ละบท
บทที่ 2 กล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และทฤษฎีที่เกี่ยวข้องต่างๆ

บทที่ 3 กล่าวถึงขั้นตอนการทดลอง รายละเอียดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง ระบบ
สัญญาณการควบคุมของระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมที่ใช้ในการทดลอง การหาแบบจำลองสมการทาง
คณิตศาสตร์ของระบบอินเวอร์ทเพนดูลัม รายละเอียดการออกแบบตัวควบคุม MRAC และ
LQR

บทที่ 4 กล่าวถึงผลการทดลอง ผลการจำลองโดยนำเอาตัวควบคุมที่ได้ออกแบบไว้ มาจำลอง
การควบคุมโดยใช้โปรแกรม MATLAB และผลการทดลองตัวควบคุมกับชุดการทดลองจริง

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ พร้อมทั้งเสนอแนวทางในการพัฒนาระบบ
อินเวอร์ทเพนดูลัม

เอกสารอ้างอิง หนังสือ งานวิจัยที่เกี่ยวข้องและใช้ในการอ้างอิง

ภาคผนวก ในส่วนนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง โปรแกรมที่ใช้ในการ
ทดลอง ผลงานวิจัยตีพิมพ์เผยแพร่ และประวัติผู้เขียน



บทที่ 2

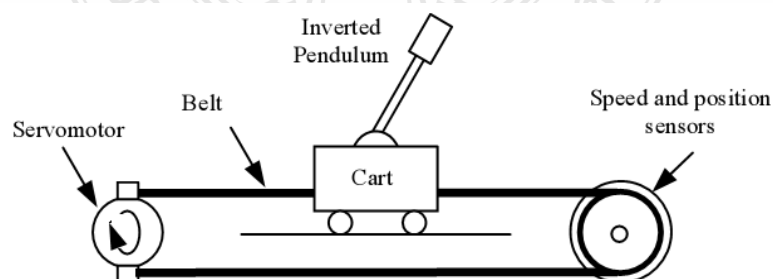
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงงานวิจัยต่างๆที่เกี่ยวข้องกับระบบอินเวอร์ทเพนดูลัม และทฤษฎีที่ใช้ในการควบคุมชนิดต่างๆ รวมถึงงานวิจัยที่มีความเกี่ยวข้องกับการออกแบบตัวควบคุม MRAC และการนำข้อมูลภาพมาใช้ในการวิจัย ส่วนทฤษฎีที่เกี่ยวข้องจะประกอบไปด้วยสมการลากรองจ์ ซึ่งจะนำไปใช้ในการหาสมการทางคณิตศาสตร์ของระบบอินเวอร์ทเพนดูลัม การควบคุมแบบปรับตัวเองได้ การนำวิธีเสถียรภาพของเลียปูนอฟมาใช้ในการออกแบบตัวควบคุม MRAC และการออกแบบตัวควบคุมสถานะป้อนกลับซึ่งออกแบบโดย LQR จะใช้เป็นตัวควบคุมในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับตัวควบคุม MRAC การประมาณค่าตัวแปรสถานะจะใช้ตัวสังเกตในประมาณค่าตัวแปรที่ไม่ทราบค่าในระบบ

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงงานวิจัยเกี่ยวกับทฤษฎีการควบคุม ที่ใช้ในการควบคุมอุปกรณ์ต่างๆ เช่น อินเวอร์ทเพนดูลัม มอเตอร์ เป็นต้น ซึ่งเป็นการนำทฤษฎีการควบคุมมาประยุกต์ใช้กับการทดลองจริง เพื่อศึกษาระบบควบคุมการรักษาเสถียรภาพ การควบคุมตำแหน่ง เป็นต้น โดยมีผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

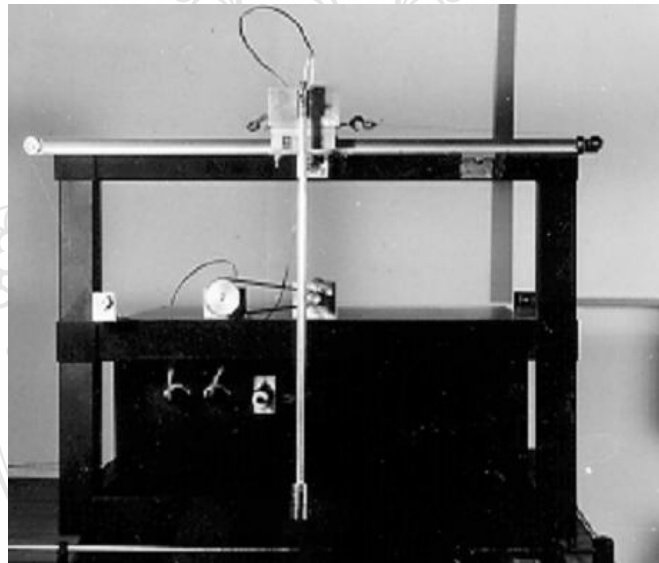
Han Y., Tzoneva R. และ Behardien S. [1] เสนอระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมและรถรางโดยมีสายพานเป็นส่งกำลังให้กับรถรางและใช้เซอร์โวมอเตอร์ในการขับเคลื่อน มีตัวเอนโค้ดเดอร์เป็นตัววัดตำแหน่งของรถราง ใช้ตัวควบคุมสถานะป้อนกลับที่ออกแบบโดย LQR ในการออกแบบตัวควบคุมการรักษาเสถียรภาพของระบบ



รูปที่ 2.1 ระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมและรถราง [1]

สมรรถชัย ปัญญา [2] เสนอการออกแบบตัวควบคุมแบบผสมระหว่างตัวควบคุมพีดีและตัวควบคุมแบบสไลด์ดิ้งโหมดสำหรับระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมบนรถ ซึ่งประกอบด้วยตัวควบคุมพีดีใช้สำหรับควบคุมตำแหน่งรถรางในการเหวี่ยงขึ้นของเพนดูลัม จากสมมูลล่างขึ้นไปยังจุดสมดุลบนและตัวควบคุมแบบสไลด์ดิ้งโหมดใช้สำหรับรักษาเสถียรภาพของอินเวอร์ทเพนดูลัม ณ ตำแหน่งจุดสมดุล ตัวควบคุมพีดีที่ถูกออกแบบโดยเส้นทางราก (Root locus) จะควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่ของรถรางให้ไปและกลับจนกระทั่งเหวี่ยงเพนดูลัมขึ้นไป ณ บริเวณจุดสมดุลบน หลังจากนั้นตัวควบคุมสไลด์ดิ้งโหมดที่ถูกออกแบบโดยการวางโพล (Pole placement) จะถูกเปลี่ยนมาให้ควบคุมเสถียรภาพของอินเวอร์ทเพนดูลัม ณ ตำแหน่งจุดสมดุลบนโดยใช้เงื่อนไขการสวิตช์ (Switch)

Nenad Muskinja และ Boris Tovornik [3] เสนอระบบการเหวี่ยงขึ้นของเพนดูลัม จากตำแหน่งสมมูลล่างสู่ตำแหน่งสมดุลบน และควบคุมสมดุลให้เพนดูลัมตั้งตรงอยู่ตำแหน่งกลางของราง โดยใช้ตัวควบคุมพีซีลอจิก ควบคุมทั้งขณะเหวี่ยงขึ้นและรักษาสมดุล ณ ตำแหน่งสูงสุด การควบคุมแบบพีซีใช้หลักการทางตรรกะ เช่นเดียวกับหลักการคิดของมนุษย์ซึ่งใช้หลักการของความน่าจะเป็นและการประมาณการณ ซึ่งจะมีสมาชิกของฟังก์ชัน (Membership functions) เป็นตัวกำหนดรูปแบบการควบคุม (Algorithm)

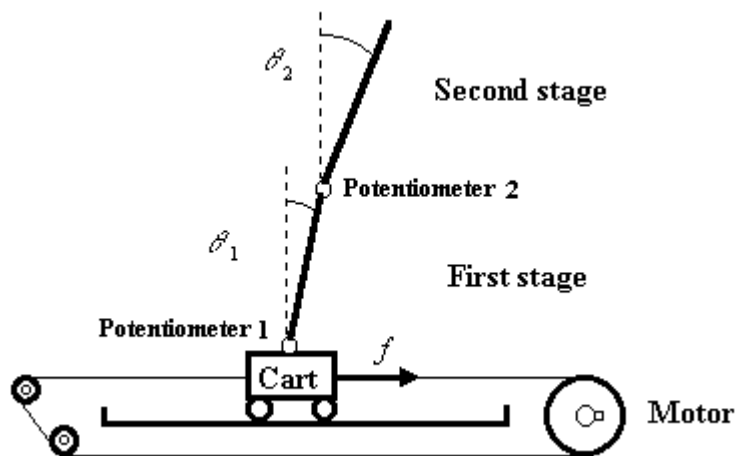


รูปที่ 2.2 ชุดการทดลองอินเวอร์ทเพนดูลัม [3]

สองเมือง นันทขว้าง [4] เสนอการควบคุมการเหวี่ยงขึ้นและการรักษาเสถียรภาพของอินเวอร์ทเพนดูลัม โดยใช้ตัวควบคุมแบบพีดีที่ถูกออกแบบด้วยเส้นทางราก ควบคุมตำแหน่งรถในการเหวี่ยงขึ้นของเพนดูลัมร่วมกับตัวควบคุมเซอร์โวป้อนกลับสถานะ ที่ถูกออกแบบด้วยวิธีการวางโพลในการรักษาเสถียรภาพของอินเวอร์ทเพนดูลัม

Lychek Keo [5] เสนอการสร้างและออกแบบตัวควบคุมอินเวอร์ทเพนคูล์มเคลื่อนที่ โดยการออกแบบตัวควบคุมสองชนิด ได้แก่ตัวควบคุมไม่เชิงเส้นและตัวควบคุมป้อนกลับสถานะ ซึ่งตัวควบคุมทั้งสองนี้สามารถรักษาสมมูลของอินเวอร์ทเพนคูล์มเคลื่อนที่ โดยการประกันเสถียรภาพสมรรถนะ และความคงทนของระบบไม่เชิงเส้นที่ต้องการควบคุมได้ตามต้องการ ตัวควบคุมชนิดแรกคือตัวควบคุมกำหนดอัตราขยาย ซึ่งอยู่บนพื้นฐานของเทคนิคการสังเคราะห์เชิงเส้นที่เปลี่ยนตามพารามิเตอร์ ส่วนตัวควบคุมชนิดที่สองคือตัวควบคุมป้อนกลับสถานะ ซึ่งออกแบบโดยวิธีคุมค่าเชิงเส้นกำลังสองและวิธีวางตำแหน่งโพล

Weijing Zhang [6] เสนอระบบอินเวอร์ทเพนคูล์มแบบสองชั้น ใช้การควบคุมสถานะป้อนกลับ ซึ่งจะแบ่งการควบคุมออกเป็นวงรอบการทำงานของตัวควบคุมสองวงปิดเพื่อควบคุมการทำงานในแต่ละสถานะ วงในจะควบคุมสถานะแรกและวงนอกจะควบคุมสถานะสอง ออกแบบตัวควบคุมโดยการกำหนดให้การควบคุมในสถานะแรกคือ $\theta_1 = \theta$ เมื่อถึงจุดสมมูลแล้วกำหนดให้สถานะแรกเป็น $\theta_1 = 0$ เพื่อให้สถานะสองสอดคล้องกับสถานะแรกกำหนดให้ $\theta_2 = \theta$ ด้วยและเป้าหมายสุดท้ายต้องการให้ $\theta_2 = 0$ ในวงนอกดังนั้น $\theta_1 = \theta_2 = 0$



รูปที่ 2.3 ระบบอินเวอร์ทเพนคูล์มแบบสองชั้น [6]

วราวุธ พรินทรากุล [7] เสนอตัวควบคุมการเหวี่ยงขึ้นและรักษาเสถียรภาพสำหรับระบบอินเวอร์ทเพนคูล์มแบบฐานหมุน ตัวควบคุมการเหวี่ยงขึ้นจะถูกออกแบบด้วยหลักการควบคุมพลังงานและตัวควบคุมการรักษาเสถียรภาพของอินเวอร์ทเพนคูล์มให้มีเสถียรภาพ ณ บริเวณจุดสมมูลบน จะใช้ตัวควบคุมเซอร์โวป้อนกลับสถานะ ร่วมกับตัวสังเกตแบบอันดับต่ำสุดที่ถูกออกแบบด้วยวิธีการกำหนดอัตราส่วนคุณลักษณะ ซึ่งการเพิ่มอินทิเกรเตอร์เข้าไปในระบบควบคุมนั้นเพื่อให้กำจัดค่าผิดพลาดในสภาวะคงตัว และเนื่องจากระบบอินเวอร์ทเพนคูล์มแบบฐานหมุนมีตัวแปรที่ไม่สามารถวัดค่าได้บางตัวโดยตรง จึงใช้ตัวสังเกตแบบอันดับต่ำสุดเข้ามาช่วยประมาณค่าตัวแปรสถานะ



รูปที่ 2.4 ระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมแบบฐานหมุน [7]

วรศักดิ์ วัชรวิญญู [8] เสนอการควบคุมอินเวอร์ทเพนดูลัมโดยการลดอัตราหาค่าและพีชชีตอลจิก ใช้หลักการควบคุมพีชชีตอลจิกและได้นำกล่องพีชชีตอมาใช้ในการประมวลผลภาพ เพื่อที่จะใช้หามุมของก้านเพนดูลัมที่กระทำกับแนวตั้ง (Vertical line) และตำแหน่งตัวถ่วงที่อยู่ห่างจากของรางเป็นระยะทางเท่าใด และนำข้อมูลที่ได้ไปประมวลผล แต่เนื่องจากกล่องมีการชักตัวที่ช้าจึงทำให้ส่งข้อมูลได้ช้าและไม่ต่อเนื่อง

ไพโรจน์ บริกัปปกุล [9] เสนอการออกแบบตัวควบคุมชนิดกระทำย้อนกลับแบบอินทิกรัลปรับตัวเองสำหรับมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวร ใช้ตัวควบคุมแบบอินทิกรัลปรับตัวเอง (Adaptive Integral Backstepping) โดยการออกแบบตั้งอยู่บนพื้นฐานของทฤษฎีของเลียปูนอฟ ทำการทดลองควบคุมความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์ซิงโครนัสแม่เหล็กถาวร จากผลการทดลองพบว่าตัวควบคุมที่ได้ออกแบบไว้ให้ประสิทธิภาพสูงในการติดตามสัญญาณอ้างอิงแม้จะมีโหลด รวมทั้งยังสามารถกำจัดภาระรบกวนได้เร็ว และไม่มีค่าคลาดเคลื่อนที่สภาวะคงตัว เนื่องจากผลของตัวอินทิกรัลและผลการปรับตัวเองเพื่อชดเชยพารามิเตอร์ที่เปลี่ยนแปลง

ชัยศรี เอี่ยมอำไพ [10] เสนอการใช้ MRAC เพื่อควบคุมตำแหน่งมอเตอร์กระแสตรงเพื่อให้ได้ผลตอบสนองดีที่สุด MRAC ถูกออกแบบด้วยวิธีเสถียรภาพของเลียปูนอฟ ทำการทดลองโดยใช้ตัวควบคุม MRAC และ PI เพื่อเปรียบเทียบผลการทดลอง จากผลการทดลองพบว่าตัวควบคุม MRAC สามารถควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์ไว้ได้อย่างถูกต้องเที่ยงตรง ถึงแม้ว่าโหลดจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหันก็ตาม ซึ่งแตกต่างจะตัวควบคุม PI ที่ยังมีผลตอบสนองเบี่ยงเบนไปจากสัญญาณขาเข้า และมีความล่าช้ากว่าตัวควบคุม MRAC มาก

จากงานวิจัยระบบอินเวอร์ทเพนดูลัม [1] ถึง [7] จะเห็นว่าตัวควบคุมส่วนใหญ่สามารถควบคุมระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมให้มีเสถียรภาพได้ แต่อย่างไรก็ตามระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมส่วนใหญ่ใช้การวัดตำแหน่งมวลจากเอนโคไดเตอร์ เพื่อให้เกิดความหลากหลายในระบบควบคุมผู้วิจัยได้นำระบบภาพโดยใช้กล้องดิจิทัลความเร็วสูงมาใช้ในการวัดตำแหน่งของมวล

จากงานวิจัย [8] การใช้กล้องซีซีดีสามารถนำมาใช้ในการจับตำแหน่ง เพื่อใช้ในการวัดตำแหน่งของระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมได้ แต่เนื่องจากกล้องซีซีดียังมีการชักตัวที่ช้าจึงทำให้การส่งข้อมูลไม่ต่อเนื่อง ดังนั้นผู้ทำการวิจัยได้เลือกใช้กล้องดิจิทัลความเร็วสูง (CMOS) ซึ่งมีประสิทธิภาพในการส่งข้อมูลที่สูง เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพที่ดีขึ้นในการใช้ข้อมูลภาพในงานระบบควบคุมมากยิ่งขึ้น

จากงานวิจัย [9] พบว่าในตัวควบคุมอินทิกรัลปรับตัวเองได้ สามารถควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์ได้ดี แม้จะมีโหลดที่มีการเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใด และงานวิจัย [10] พบว่าตัวควบคุม MRAC สามารถควบคุมตำแหน่งของมอเตอร์กระแสดตรงได้เที่ยงตรงกว่าตัวควบคุม PI แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมที่สามารถปรับตัวเองได้ สามารถควบคุมระบบได้ดีกว่าตัวควบคุมที่มีอัตราขยายคงที่ จากผลงานวิจัย [9] และ [10] จะเห็นว่าตัวควบคุมที่ปรับค่าเองได้มีทิศทางที่ดีในการนำมาควบคุมระบบถึงแม้ว่าจะมีตัวรบกวนก็ตาม ดังนั้นได้ผู้วิจัยได้นำตัวควบคุม MRAC มาใช้กับการควบคุมระบบอินเวอร์ทเพนดูลัม เพื่อเป็นการประยุกต์การนำตัวควบคุมแบบปรับตัวเองได้มาใช้กับระบบที่ไม่มีเสถียรภาพ

2.2 สมการลากรองจ์

สมการลากรองจ์เป็นสมการแบบหนึ่งที่อยู่ภายใต้ขอบเขตของกลศาสตร์ดั้งเดิม (Classical mechanics) ซึ่งเสนอโดย โจเซฟ หลุยส์ ลากรองจ์ (Joseph Louis Lagrange) โดยการคำนวณกลศาสตร์แบบลากรองจ์นี้ จะไม่ใช่แรงในการคำนวณเหมือนกับกลศาสตร์นิวตัน (Newton mechanics) แต่จะใช้พลังงานในการคำนวณแทนซึ่งประกอบไปด้วยเทอมของพลังงานสองเทอมคือ พลังงานจลน์ (Kinetic energy) และ พลังงานศักย์ (Potential energy) จึงทำให้กลศาสตร์ลากรองจ์สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการเคลื่อนที่ในแบบต่างๆที่มีความซับซ้อนได้ง่ายกว่ากลศาสตร์แบบนิวตัน โดยมีสมการดังนี้

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = Q_i \quad (2.1)$$

เมื่อ L คือ Lagrangian function

q_i คือ Generalized coordinates

Q_i คือ Generalized forces

โดยที่ Lagrangian function คือผลต่างระหว่างพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ภายในระบบ คือ

$$L(q, \dot{q}) = T(q, \dot{q}) - V(q, \dot{q}) \quad (2.2)$$

เมื่อ T คือ พลังงานจลน์ของระบบทั้งหมด

V คือ พลังงานศักย์ของระบบทั้งหมด

และ Q_i สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$Q_i = \sum_{j=1}^N \bar{F}_j \frac{\partial \bar{r}_j}{\partial q_i} \quad (2.3)$$

เมื่อ N คือ จำนวนอนุภาคหรือวัตถุในระบบ

\bar{F} คือ เวกเตอร์ของแรงที่กระทำต่ออนุภาคหรือวัตถุในระบบ

\bar{r} คือ เวกเตอร์ตำแหน่งของอนุภาคหรือวัตถุในระบบ

2.3 การควบคุมแบบปรับตัวได้ (Adaptive Control)

ในทฤษฎีการควบคุมโดยทั่วไป ระบบการควบคุมจะถูกสังเคราะห์โดยการประมาณระบบที่ต้องการควบคุมในรูปของสมการอนุพันธ์เชิงเส้นที่ไม่แปรค่าตามเวลา ซึ่งตัวควบคุมถูกกำหนดให้มีค่าคงที่ (Fixed controller) การควบคุมดังกล่าวไม่สามารถนำมาใช้ได้กับการควบคุมทุกสถานการณ์ โดยเฉพาะถ้ากระบวนการที่ต้องการควบคุมที่มีตัวแปรที่ไม่ทราบค่าหรือแปรผันไปตามเวลาได้

ต่อมาได้มีการพัฒนาระบบที่สามารถปรับตัวเองได้ โดยเริ่มจากการปรับค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมให้เป็นไปตามสภาพแวดล้อม ซึ่งเป็นการสังเกตสภาพแวดล้อมแล้วนำไปหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมต่อพฤติกรรมของระบบ โดยมีนิยามของระบบควบคุมที่ปรับตัวได้ คือ ระบบที่มีการควบคุมซึ่งสามารถปรับปรุงตัวเองให้เหมาะสมตามการเปลี่ยนแปลงของกระบวนการแบ่งเป็น ระบบป้อนกลับปฐมภูมิ (Primary feedback) ซึ่งคอยดูแลการเปลี่ยนแปลงสัญญาณของกระบวนการ โดยการปรับค่าพารามิเตอร์อ้างอิงจากสภาพแวดล้อม และระบบป้อนกลับทุติยภูมิ (Secondary feedback) เป็นการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ของกระบวนการที่ไม่ทราบค่าหรือค่าที่มีการเปลี่ยนแปลง

2.4 Model Reference Adaptive Control

การควบคุมแบบ Model Reference Adaptive Control ถูกเสนอครั้งแรกโดย Whitacker ในปี 1958 โครงสร้างของ MRAC จะประกอบไปด้วยส่วนสำคัญดังต่อไปนี้ 1. ตัวควบคุมปฐมภูมิ (Primary

controller) 2.กระบวนการ (Process) 3.โมเดลอ้างอิง (Reference model) 4.กฎการปรับตัว (Adaptive laws) ดังรูปที่ 2.5

1. ตัวควบคุมป้อนกลับ

การออกแบบส่วนควบคุมป้อนกลับมีหลักการออกแบบอยู่สองประการคือ ประการแรกจะต้องสอดคล้องกับสถานะความเข้ากันได้ของโมเดลอย่างสมบูรณ์ (Perfect model matching) นั่นคือการตั้งค่าพารามิเตอร์ของตัวควบคุมจะต้องทำให้พฤติกรรมของระบบวงปิดเท่ากับโมเดลอ้างอิงได้ ส่วนประการที่สองสัญญาณการควบคุม u จะต้องมีคุณสมบัติเป็นเชิงเส้น ซึ่งโดยทั่วไปจะอยู่ในรูป $u = \theta^T \omega$ โดย θ คือเวกเตอร์ของพารามิเตอร์ของตัวควบคุม และ ω คือตัวแปรสถานะที่ประกอบไปด้วยตัวแปรสถานะ x_p และสัญญาณอ้างอิง x_m และถ้าไม่ทราบค่าตัวแปรสถานะจะต้องมีตัวสังเกต มาช่วยในการประมาณค่าตัวแปรสถานะ

2. โมเดลอ้างอิง

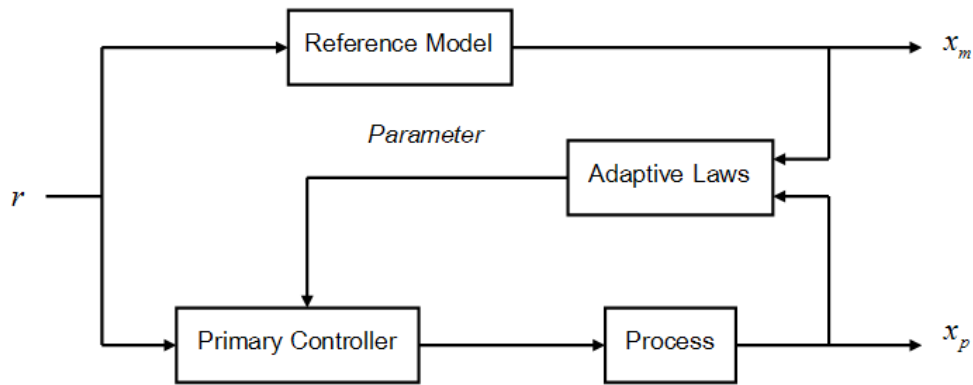
ในตัวโมเดลอ้างอิงนั้นจะเป็นตัวบ่งบอกถึงสัญญาณขาเข้า r ที่เราต้องการ ในการหาค่าโมเดลอ้างอิงเพื่อใช้ในการอ้างอิงกับระบบนั้น ได้นำ ITAE มาใช้เพื่อเป็นค่าอ้างอิงให้กับระบบดังในหัวข้อที่ 3.4.1 โดยที่โมเดลอ้างอิงจะต้องสามารถตอบสนองต่อโมเดลของระบบนั้นๆ ได้จริง และไม่ตอบสนองต่อระบบช้าหรือไวจนเกินไป หากโมเดลอ้างอิงมีความไม่เหมาะสมต่อระบบอาจทำให้เกิดภาวะอิ่มตัว (Saturation) และอาจก่อให้เกิดความไม่เสถียรขึ้นในระบบได้

3. กระบวนการ

ในการออกแบบตัวควบคุมเราสมมติกระบวนการเป็นเชิงเส้น ทราบอันดับของฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function) ทราบเครื่องหมายของค่าอัตราขยาย และไม่มีตัวรบกวนจากภายนอก (Disturbance) แต่กระบวนการในความเป็นจริงไม่อาจเป็นไปตามเงื่อนไขดังกล่าวได้ทั้งหมด ดังนั้นในการทำวิจัยนี้จึงได้มีการจำลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ก่อนซึ่งเป็นกระบวนการที่ควบคุมได้ เพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงค่าตัวควบคุมก่อนนำไปใช้กับการทดลองจริง

4. กฎการปรับตัว

ส่วนสำคัญของการออกแบบระบบ MRAC คือกฎการปรับตัว (Adaptive laws) ซึ่งการออกแบบกฎการควบคุมในงานวิจัยนี้ ได้เลือกใช้วิธีการของเลียปูนอฟ (Lyapunov's method) โดยสมมติว่ากระบวนการเป็นเชิงเส้นที่มีค่าพารามิเตอร์ไม่ทราบค่าหรือแปรค่าตามเวลา ส่วนค่าที่ใช้ในการควบคุมแบบสถานะป้อนกลับและพารามิเตอร์ของตัวควบคุมที่จะปรับค่าคืออัตราขยายป้อนกลับ (Feedback gain)



รูปที่ 2.5 โครงสร้าง MRAC

จากรูปที่ 2.5 กำหนดให้ r เป็นสัญญาณขาเข้าอ้างอิงของระบบ โดยโมเดลอ้างอิงมีสัญญาณขาออกเป็น x_m และสัญญาณขาออกจากระบบเป็นสัญญาณ x_p ส่วนกฎการปรับตัวจะรับค่าจากสัญญาณ x_m และ x_p เพื่อเปรียบเทียบผลตอบสนองจากสัญญาณทั้งสอง ซึ่งผลต่างของสัญญาณทั้งสองคือค่าความผิดพลาด (Parameter error) โดยนำค่าความผิดพลาดนี้ไปใช้ในกระบวนการปรับตัวค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากกฎการปรับตัวจะเข้าสู่ส่วนควบคุมป้อนกลับ โดยกำหนดให้เป็นส่วนของกฎการควบคุมใช้การควบคุมแบบป้อนกลับ ค่าอัตราขยายที่ได้จะนำไปใช้เพื่อควบคุมระบบ ในส่วนการออกแบบกฎการปรับตัวผู้วิจัยเลือกใช้ทฤษฎีเสถียรภาพของเลียปูนอฟ

2.5 วิธีของเลียปูนอฟ

จากการวิจัยระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมจะเห็นว่าระบบไม่เป็นเชิงเส้นและแปรค่าตามเวลา การวิเคราะห์ระบบเชิงเส้นโดยทั่วไปจึงไม่สามารถนำมาใช้ได้ ดังนั้นจึงเลือกใช้วิธีของเลียปูนอฟ โดยวิธีของเลียปูนอฟกล่าวว่าระบบจะมีรูปแบบเสถียรภาพเมื่อเข้าสู่สู่สมดุล (Uniform asymptotically stable equilibrium) ที่ $x = 0$ เมื่อมีเลียปูนอฟฟังก์ชัน (Lyapunov function) $V(x)$ ซึ่งสอดคล้องกับเงื่อนไขต่อไปนี้

$$\begin{aligned}
 V(x) &\geq 0 \text{ เมื่อ } x \neq 0 \\
 V(0) &= 0 \text{ เมื่อ } x = 0 \\
 V(x) &\rightarrow \infty \text{ เมื่อ } \|x\| \rightarrow \infty
 \end{aligned}$$

นั่นคือ $V(x)$ จะต้องลดลงเรื่อยๆ ดังเช่นพลังงานที่บรรจุในระบบเมื่อเทียบกับเวลา การใช้วิธีของเลียปูนอฟในการออกแบบกฎการปรับตัวได้เสถียรภาพ ระบบจะถูกจัดเข้าไปอยู่ในกฎการควบคุมตามขั้นตอนต่อไปนี้

1. จะต้องหาสมการผิดพลาด (Error equation) ซึ่งอธิบายถึงสมการอนุพันธ์ของสัญญาณผิดพลาด (Error signal) e ซึ่งอาจจะเป็นสัญญาณขาออกผิดพลาด (Output error) $y_p - y_m$ หรือค่าสถานะผิดพลาด (State error) $x_p - x_m$
2. เลียนูนอฟฟังก์ชัน $V(x)$ ซึ่งเป็นฟังก์ชันของทั้งสัญญาณผิดพลาด (Signal error) และพารามิเตอร์ผิดพลาด (Parameter error) ซึ่งประกอบด้วยเวกเตอร์สัญญาณผิดพลาด (Signal error vector) e และเวกเตอร์พารามิเตอร์ผิดพลาด (Parameter error vector) ϕ ซึ่งก็คือผลต่างระหว่างพารามิเตอร์ของระบบจริงกับรูปแบบจำลองโดยปกติจะกำหนดให้เลียนูนอฟ $V(x)$ ให้อยู่ในรูปดังนี้

$$V = e^T P e + \phi^T \Gamma^{-1} \phi \quad (2.4)$$

โดย P และ Γ^{-1} เป็นเมทริกซ์บวกแน่นอน (Positive definite matrix)

3. คำนวณ \dot{V} ซึ่งเป็นอนุพันธ์ของ V ต่อเวลาซึ่ง \dot{V} มักอยู่ในรูป

$$\dot{V} = -e^T Q e + 2e^T P B_f \phi^T \omega + 2\phi^T \Gamma^{-1} \dot{\phi} \quad (2.5)$$

เมื่อ $B_f = [0 \ 0 \ \dots \ 1]^T$ และเมทริกซ์ Q เป็นค่าบวกแน่นอน (Positive definite) หากเราให้เทอมที่ติด ϕ เป็นศูนย์ระบบจะมีเสถียรภาพ เมทริกซ์ P และ Q สามารถถูกเลือกโดยใช้ทฤษฎีเลียนูนอฟ ซึ่งระบบที่ลู่เข้าสู่สมดุล (Asymptotically stable) จะถูกกำหนดโดยเมทริกซ์ A และความสัมพันธ์ระหว่างเมทริกซ์ P และ Q เป็นดังนี้

$$A^T P + P A = -Q \quad (2.6)$$

สมการนี้เรียกว่าสมการเลียนูนอฟ (Lyapunov equation)

4. เมื่อให้ส่วนที่มีเทอม ϕ เท่ากับศูนย์นอกจากจะทำให้ได้ระบบที่มีเสถียรภาพแล้ว ยังให้เกิดสมการที่ใช้ปรับพารามิเตอร์ของส่วนควบคุมซึ่งก็คือกฎการปรับตัว

2.5.1 ตัวควบคุมปฐมภูมิ (Primary controller)

กำหนดให้กระบวนการเป็นระบบต่อเนื่องเชิงเส้น (Linear time-variant system) และสามารถควบคุมได้ (Controllable) โดยมีสมการดังนี้

$$\begin{aligned}\dot{x}_p(t) &= A_p x_p(t) + B_p u(t) \\ y_p(t) &= C_p x_p(t)\end{aligned}\quad (2.7)$$

เมื่อ $x_p(t)$ คือ เวกเตอร์สถานะของระบบ
 $y_p(t)$ คือ เวกเตอร์ขาออกของระบบ
 $u(t)$ คือ เวกเตอร์ควบคุมของระบบ
 A_p คือ เมทริกซ์สถานะของระบบ
 B_p คือ เมทริกซ์ขาเข้าของระบบ
 C_p คือ เมทริกซ์ขาออกของระบบ

มีตัวควบคุมแบบสถานะป้อนกลับเป็น

$$u = K_r(t)r(t) - K_x^T(t)x_p(t), \quad K_x^T = (k_1 \quad k_2 \quad \dots \quad k_n) \quad (2.8)$$

เมื่อ $K_r(t)$ และ $K_x(t)$ คือ ค่าอัตราขยายเมทริกซ์ และ $r(t)$ คือ เวกเตอร์ขาเข้าอ้างอิง จากสมการ (2.8) สามารถเขียนให้อยู่ในรูป

$$u = \theta^T \omega \quad (2.9)$$

เมื่อ $\theta^T = [K_r \quad -K_x^T]$ และ $\omega = [r \quad x_p]^T$
 นำสมการ (2.8) แทนใน (2.7) สามารถเขียนสมการวงปิดได้คือ

$$\begin{aligned}\dot{x}_p(t) &= A_c x_p(t) + B_c r(t) \\ y_p(t) &= C_p x_p(t)\end{aligned}\quad (2.10)$$

เมื่อ $A_c = A_p + B_p K_x$ และ $B_c = B_p K_r$

2.5.2 โมเดลอ้างอิง (Reference model)

กำหนดให้มีรูปแบบเช่นเดียวกับกระบวนการคือ

$$\begin{aligned}\dot{x}_m(t) &= A_m x_m(t) + B_m r(t) \\ y_m(t) &= C_m x_m(t)\end{aligned}\quad (2.11)$$

- เมื่อ $x_m(t)$ คือ เวกเตอร์สถานะของโมเดลอ้างอิง
 $y_m(t)$ คือ เวกเตอร์ขาออกของโมเดลอ้างอิง
 $r(t)$ คือ เวกเตอร์ขาเข้าอ้างอิง
 A_m คือ เวกเตอร์ของโมเดลอ้างอิง
 B_m คือ เมทริกซ์ขาเข้าของโมเดลอ้างอิง
 C_m คือ เมทริกซ์ขาออกของโมเดลอ้างอิง

2.5.3 การสร้างสมการผิดพลาด (Error equation)

สมการค่าความผิดพลาดระหว่างระบบและโมเดลอ้างอิง ค่าความผิดพลาดสามารถเขียนในรูปสมการดังนี้

$$\begin{aligned}
 \dot{e}(t) &= \dot{x}_p(t) - \dot{x}_m(t) \\
 &= A_c x_p(t) + B_c r(t) - A_m x_m(t) - B_m r(t) \\
 &= A_m (x_p(t) - x_m(t)) + (A_c - A_m) x_p(t) + (B_c - B_m) r(t) \\
 &= A_m e(t) + A x_p(t) - B r(t)
 \end{aligned} \tag{2.12}$$

เมื่อ $A = A_c - A_m$ และ $B = B_c - B_m$

กำหนดให้ ϕ เป็นค่าเวกเตอร์พารามิเตอร์ผิดพลาด (Parameter error vector) คือ

$$\phi^T = [A_p - B_p K_x - A_m \quad B_p K_r - B_m] \tag{2.13}$$

นำสมการ (2.13) และ (2.9) แทนใน (2.12) จะได้

$$\begin{aligned}
 \dot{e}(t) &= A_m e(t) + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 1 \end{pmatrix} \phi^T \omega \\
 &= A_m e(t) + B_1 \phi^T \omega
 \end{aligned} \tag{2.14}$$

เมื่อ $\phi^T = [A \ B]$

2.5.4 การสร้างกฎการปรับตัว

การเลือกเลียบนอฟฟังก์ชันมีรูปแบบเป็นฟังก์ชันกำลังสอง (Quadratic function) ของผลต่างของเวกเตอร์สัญญาณผิดพลาด (e) และเวกเตอร์พารามิเตอร์ผิดพลาด (ϕ) โดยทั่วไปจะเลือกให้มีเลียบนอฟฟังก์ชันให้อยู่ในรูปแบบดังนี้

$$V = e^T(t)Pe(t) + \phi^T \Gamma^{-1} \phi \quad (2.15)$$

เมื่อ Γ คือเมทริกซ์อัตราขยายปรับตัว (Adaptive gain matrix)

เมื่อต้องการให้ระบบเป็นระบบปรับตัวที่มีเสถียรภาพเข้าสู่สมดุล (Asymptotically stable adaptive system) \dot{V} ต้องเป็นค่าลบแน่นอน (Negative definite) สามารถหา \dot{V} ได้ดังนี้

$$\dot{V} = e^T(t)(A_m^T P + PA_m)e(t) + 2e^T(t)PB_1\phi^T \omega + 2\phi^T \Gamma^{-1} \dot{\phi} \quad (2.16)$$

โดย P และ Q ต้องเป็นค่าบวกแน่นอน ซึ่งสามารถหาค่าได้โดยใช้สมการเลียบนอฟ คือ

$$A_m^T P + PA_m = -Q \quad (2.17)$$

P และ Q สามารถหาได้จากเทอมแรกทางขวาของสมการ (2.16) คือ

$$e^T(t)(A_m^T P + PA_m)e(t) = -e^T(t)Qe(t) \quad (2.18)$$

จะเห็นว่าเทอมแรกทางขวาของสมการ (2.16) มีความสอดคล้องกับสมการ (2.18) ซึ่งมีค่าเป็นลบเสมอ ดังนั้นถ้าต้องการให้ระบบมีเสถียรภาพ จะต้องกำหนดให้เทอมที่สองและสามทางขวาของสมการ (2.16) มีค่าเป็นศูนย์

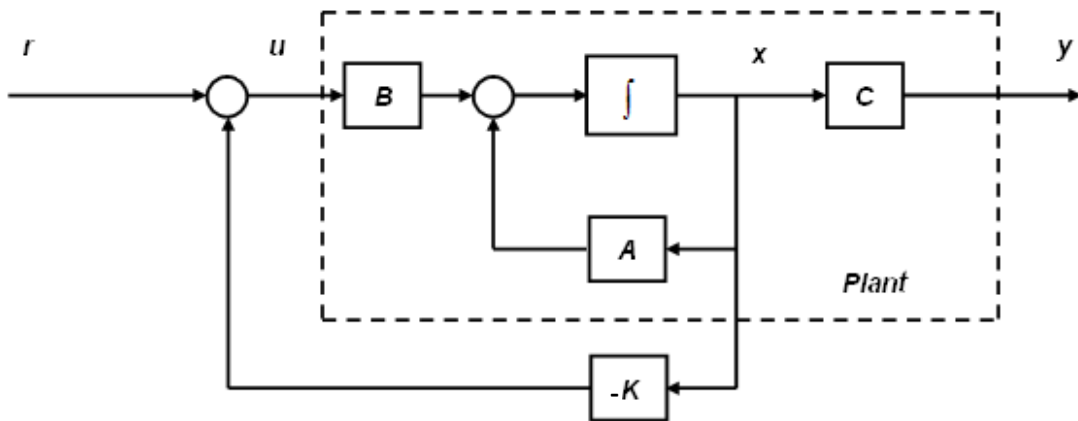
$$2e^T(t)PB_1\phi^T \omega + 2\phi^T \Gamma^{-1} \dot{\phi} = 0 \quad (2.19)$$

ซึ่งจากสมการ (2.19) ทำให้เราได้กฎการปรับตัวดังนี้

$$\dot{\phi} = -\Gamma e^T(t)PB_1\omega \quad (2.20)$$

เมื่อพิจารณา ϕ จะสอดคล้องกับสมการ (2.13) เมื่อหาอนุพันธ์ของ ϕ แล้วจะได้ค่าอัตราขยายที่ใช้การปรับตัวของระบบ

2.6 ตัวควบคุมสถานะป้อนกลับ (State Feedback Controller)



รูปที่ 2.6 โครงสร้างตัวควบคุมป้อนกลับ

พิจารณาสมการ State space ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du \end{aligned} \quad (2.21)$$

กำหนดให้เป็นระบบที่สามารถควบคุมได้ (Controllable) โดยเราต้องการใช้สัญญาณขาเข้า u ปรับปรุงการทำงานเพื่อให้ระบบมีประสิทธิภาพดีขึ้น ในการออกแบบสัญญาณขาเข้า u ใช้หลักการออกแบบ Linear quadratic regulator (LQR) โดยต้องการให้สัญญาณขาเข้า u มีค่าต่ำสุดมีฟังก์ชันคือ

$$\int_0^{\infty} (x(t)^T Q x(t) + u(t)^T R u(t)) dt \quad (2.22)$$

เมื่อ Q เป็นเมทริกซ์จริงกึ่งบวกแน่นอน (Semi positive definite real matrix) และ R เป็นเมทริกซ์จริงบวกแน่นอน (Positive definite real matrix) โดยกฎตัวควบคุมแบบป้อนกลับสถานะคือ

$$u = -Kx \quad (2.23)$$

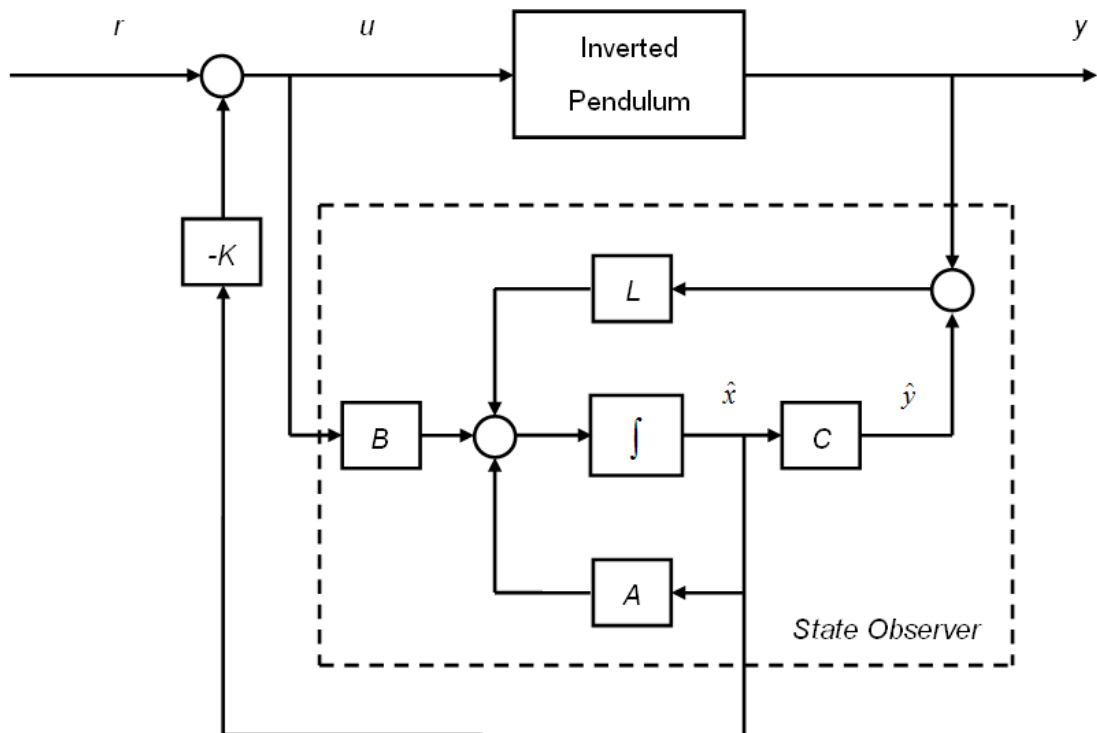
เมื่อ K คืออัตราขยายการป้อนกลับ (Feedback gain) สามารถหาได้จาก

$$K = R^{-1}B^T P \quad (2.24)$$

โดยที่ P เป็นค่ากึ่งบวกแน่นอน (Semi positive definite) มีสมการคือ

$$PA + A^T P - PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \quad (2.25)$$

เนื่องจากตัวแปรสถานะบางตัวไม่สามารถวัดค่าได้ จึงได้มีการประมาณค่าตัวแปรสถานะซึ่งเรียกว่า ตัวสังเกตมีโครงสร้างดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของตัวสังเกต

จะเห็นว่าระบบวงปิดมีสมการปริภูมิสถานะ (State space) ดังนี้

$$\dot{x} = A\hat{x}, \quad y = C\hat{x} \quad (2.26)$$

เราจะประมาณค่าสถานะด้วยการเปรียบเทียบสัญญาณขาออกที่วัดได้คือ y กับสัญญาณขาออกที่ประมาณได้ \hat{y} แล้วใช้การป้อนกลับเพื่อลดความคลาดเคลื่อนจนกระทั่งมีค่าเป็นศูนย์ สามารถเขียนในรูปแบบเมทริกซ์คือ

$$\dot{\tilde{x}} = (A - LC)\tilde{x}, \quad \tilde{x}(0) = x(0) \quad (2.27)$$

กำหนดให้ $\tilde{x} = x - \hat{x}$ หรือความคลาดเคลื่อนของตัวสังเกตสถานะ

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax, \quad y = Cx \\ \dot{\hat{x}} &= A\hat{x} + L(y - \hat{y}), \quad \hat{y} = C\hat{x} \end{aligned} \quad (2.28)$$

เมื่อ L คือเวกเตอร์อัตราขยายของตัวสังเกตและความคลาดเคลื่อนของสถานะสอดคล้องกับ

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + L(y - C\hat{x}) \quad (2.29)$$

เมื่อ \hat{x} คือค่าตัวแปรประมาณสถานะ ซึ่งค่า L จะถูกออกแบบเพื่อให้ $A - LC$ มีเสถียรภาพ

2.7 การแปลงสมการสถานะของระบบ

ในการควบคุมระบบอินเวอร์ทเพนดูลัม เราต้องการให้ตัวแปรสถานะอยู่ในรูปแบบที่สามารถควบคุมได้ (Controllable canonical form) โดยอาศัยการแปลงเวกเตอร์สถานะ $z = T^{-1}x$ สามารถหาได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \dot{z} &= T^{-1}ATz + T^{-1}Bu(t) \\ &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 \\ -a_0 & -a_1 & -a_2 & \cdots & -a_{n-1} \end{bmatrix} z + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(t) \end{aligned} \quad (2.30)$$

โดยที่เมทริกซ์การแปลง (Transformation matrix)

$$T = MW \quad (2.31)$$

เมื่อ M คือเมทริกซ์ควบคุมได้ (Controllability matrix)

$$M = [B \quad AB \quad \dots \quad A^{n-1}B] \quad (2.32)$$

และ

$$W = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & \dots & a_{n-1} & 1 \\ a_2 & a_3 & \dots & 1 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ a_{n-1} & 1 & \dots & 0 & 0 \\ 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.33)$$

โดยที่ a_0, a_1, \dots, a_{n-1} คือ สัมประสิทธิ์ของพหุนามคุณลักษณะ (Characteristic polynomial) ของสมการคุณลักษณะระบบวงเปิด

$$|sI - A_p| = s^n + a_{n-1}s^{n-1} + \dots + a_1s + a_0 = 0 \quad (2.34)$$

จากสมการ (2.31) เมื่อแทนตัวแปรเวกเตอร์สถานะ $x = Tz$ จะได้สัญญาณควบคุมสำหรับตัวแปรสถานะ z ดังนี้

$$u(t) = -KTz = -[\hat{k}_0 \quad \hat{k}_1 \quad \dots \quad \hat{k}_{n-1}]z \quad (2.35)$$

สามารถเขียนระบบป้อนกลับจากสมการ (2.30) ที่อยู่ในรูปแบบที่สามารถควบคุมได้ คือ

$$\begin{aligned} \dot{z} &= (T^{-1}AT - T^{-1}BKT)z \\ &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \\ -(a_0 + \hat{k}_0) & -(a_1 + \hat{k}_1) & -(a_2 + \hat{k}_2) & \dots & -(a_{n-1} + \hat{k}_{n-1}) \end{bmatrix} z \end{aligned} \quad (2.36)$$

โดยมีคุณลักษณะดังนี้

$$\begin{aligned} |sI - T^{-1}AT + T^{-1}BKT| &= 0 \\ &= s^{n+1} + (a_n + \hat{k}_n)s^n + (a_{n-1} + \hat{k}_{n-1})s^{n-1} + \dots + (a_1 + \hat{k}_1)s + (a_0 + \hat{k}_0) = 0 \end{aligned} \quad (2.37)$$

กลไกการปรับตัวของ MRAC จะใช้การปรับค่า k เพื่อปรับพารามิเตอร์ของระบบวงปิด หากเวกเตอร์สถานะ x_p ยังไม่อยู่ในรูปแบบที่สามารถควบคุมได้จะต้องทำการแปลงพิกัดให้อยู่ในรูปแบบที่สามารถควบคุมได้เสียก่อนจึงจะเข้าสู่กลไกการปรับตัวได้

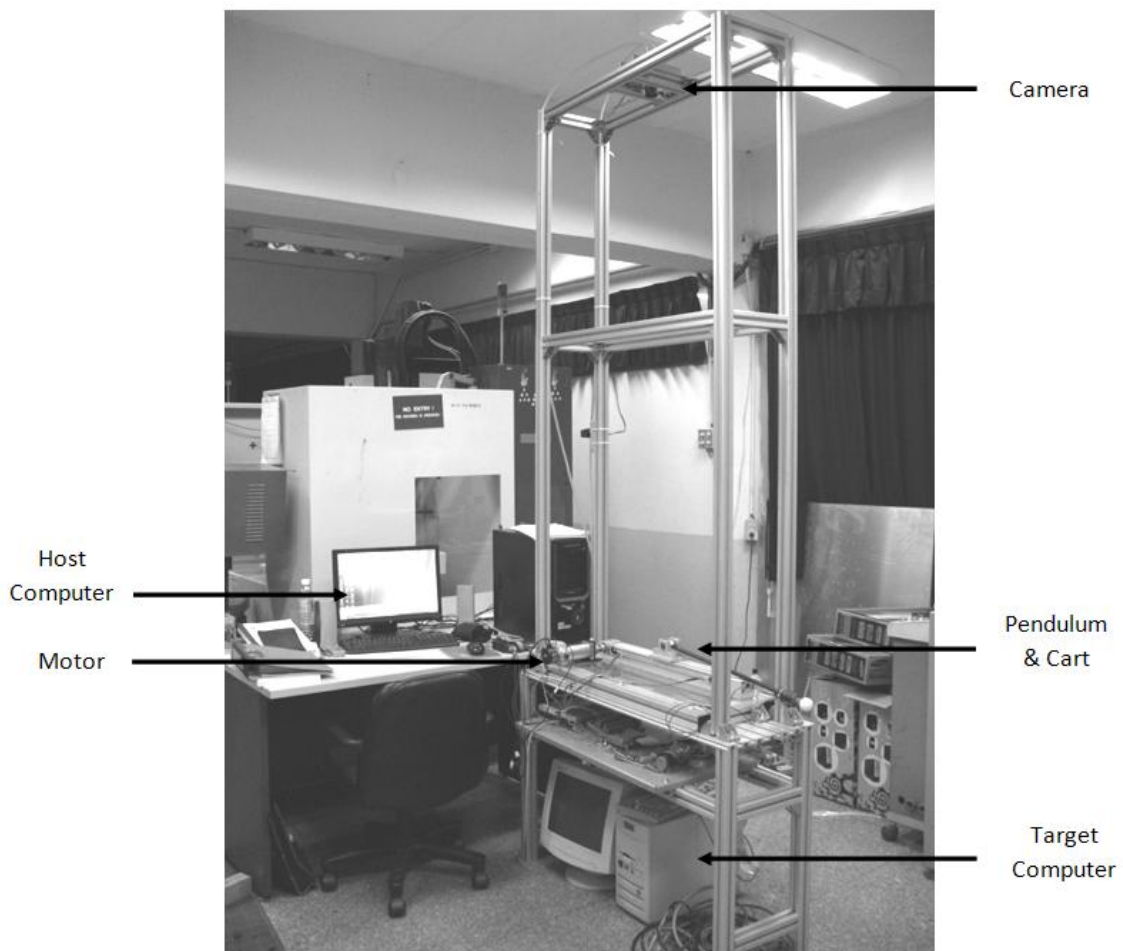


บทที่ 3

ขั้นตอนการทดลอง

3.1 ระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมที่ใช้ในการทดลอง

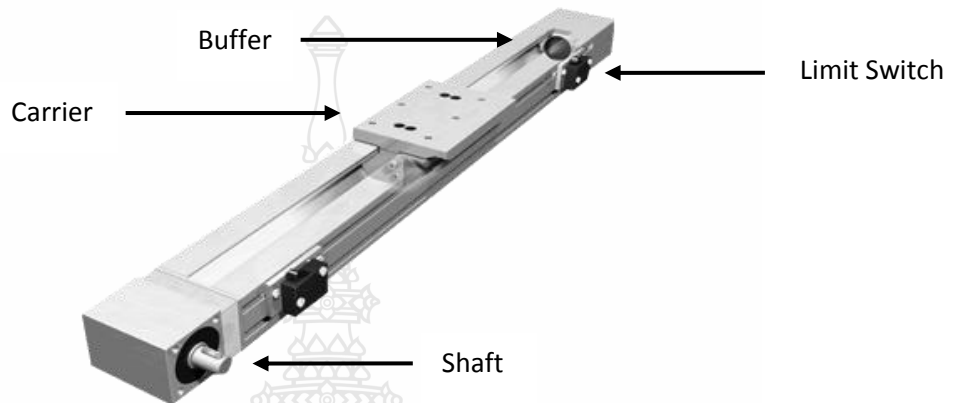
วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ใช้การทดลองระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมและรถราง โดยมีรถรางซึ่งเคลื่อนที่อยู่บนรางเลื่อนแบบเชิงเส้น (Linear drive transmission) ความยาวรางเลื่อน 0.55 m ซึ่งมีสายพานเป็นตัวส่งกำลังและมีมอเตอร์เป็นตัวขับเคลื่อน ตัวรถรางต่อกับก้านเพนดูลัมซึ่งมีจุดหมุนที่ปลายข้างหนึ่ง วัดตำแหน่งรถรางโดยใช้เอนโค้ดเดอร์ซึ่งต่อเข้ากับมอเตอร์ ส่วนการวัดมุมเอียงของเพนดูลัม ใช้กล้องความเร็วสูงซึ่งติดตั้งอยู่ด้านบน มีส่วนประกอบสำคัญคือ 1.รางเลื่อนและรถราง 2.ชุดเพนดูลัม 3.ไดร์และมอเตอร์ 4.กล้องความเร็วสูง 5.คอมพิวเตอร์ โดยมีชุดการทดลองดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 รางเลื่อนแบบเชิงเส้น

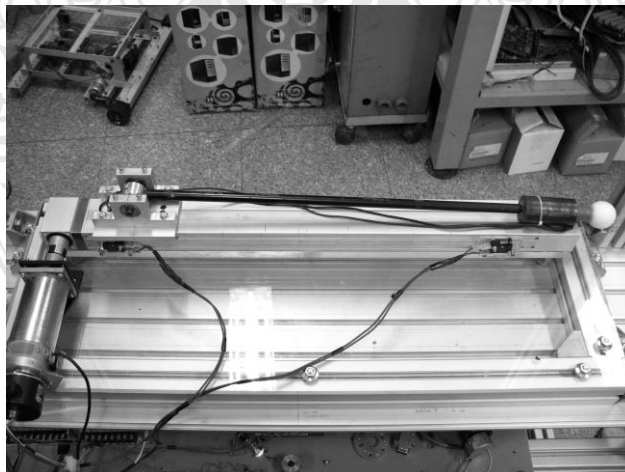
รางเลื่อนแบบเชิงเส้น ความยาว 0.55 m ที่ฐานมีตัวรูดรางซึ่งเคลื่อนที่โดยมีสายพานเป็นตัวส่งกำลัง และมีมอเตอร์ซึ่งต่อกับเฟลาเป็นตัวขับเคลื่อน ทั้งสองด้านของรางมีลิมิตสวิทช์ (Limit switch) คอยตัดการทำงานและภายในมีตัวกันกระแทก (Buffer) เพื่อกันแรงกระแทกจากตัวรูดราง ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 รางเลื่อนแบบเชิงเส้น

3.1.2 เพนดูลัม

ชุดเพนดูลัมความยาว 0.63 m ติดตั้งกับตัวรูดราง ที่ปลายเพนดูลัมติดมวลหนัก 1 kg และติดตั้งหลอดไฟกลมเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 30 mm เพื่อใช้เป็นตำแหน่งอ้างอิงให้กับกล้องความเร็วสูงในการวัดมุมเอียงของเพนดูลัม ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ชุดเพนดูลัม

3.1.3 มอเตอร์และไดร์

เซอร์โวมอเตอร์ จะต่อเข้ากับชุดรางเลื่อนเพื่อขับเคลื่อนชุดรางเลื่อน และยังต่อเข้ากับเอนโค้ดเดอร์เพื่อใช้ในการวัดตำแหน่งของรถรางซึ่งเคลื่อนที่อยู่บนรางเลื่อน ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 มอเตอร์

มอเตอร์ไดร์ ใช้ควบคุมการทำงานของมอเตอร์โดยจะรับสัญญาณการควบคุมมาจากคอมพิวเตอร์และมอเตอร์ไดร์จะควบคุมการจ่ายสัญญาณไฟเข้าสู่มอเตอร์ พร้อมทั้งรับสัญญาณเอนโค้ดเดอร์ที่ต่อกับตัวมอเตอร์ มีการเชื่อมต่อกับ Target computer ดังรูปที่ 3.5



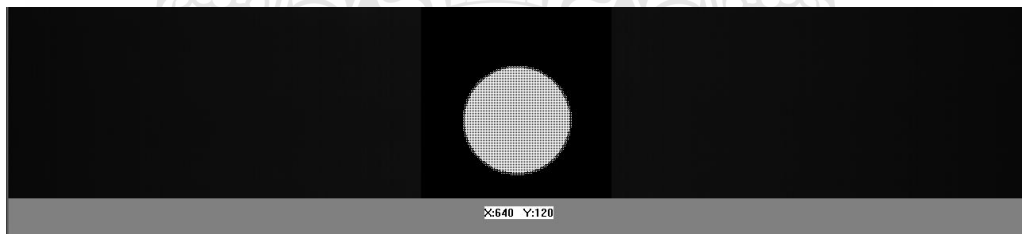
รูปที่ 3.5 มอเตอร์ไดร์

3.1.4 กล้องความเร็วสูง

กล้องดิจิทัลความเร็วสูง ใช้ในการวัดตำแหน่งปลายเพื่อหามุมเอียงของเพนดูลัม ดังรูปที่ 3.6 ที่ปลายเพนดูลัมมีหลอดไฟกลมขนาด 30 mm ติดตั้งอยู่เพื่อใช้เป็นตำแหน่งอ้างอิงให้กับกล้องในการจับภาพ ตัวกล้องติดตั้งอยู่สูงจากฐาน 1.95 m กำหนดกรอบรับภาพขนาด 1280x240 พิกเซล รับข้อมูลภาพเป็นภาพขาวเทา (Gray scale) จากนั้นทำการแปลงข้อมูลภาพให้เป็นภาพสีขาวยกกับดำโดยผ่านกระบวนการ Thresholding เพื่อแยกแยะหลอดไฟกับสิ่งแวดลอมให้มีความชัดเจนมากยิ่งขึ้น กล้องความเร็วสูงนี้จะเชื่อมต่อกับการ์ดเก็บข้อมูลภายในคอมพิวเตอร์ เพื่อรับข้อมูลภาพเพื่อนำไปประมวลผล โดยข้อมูลภาพที่ได้จากกล้องความเร็วสูงจะถูกนำไปคำนวณหาตำแหน่งจุดศูนย์กลางของหลอดไฟหรือปลายด้านบนของเพนดูลัม ซึ่งอยู่ในหน่วยพิกเซล (Pixel) โดยมีข้อมูลภาพที่ได้ดังรูปที่ 3.7, 3.8 และ 3.9



รูปที่ 3.6 กล้องความเร็วสูง



รูปที่ 3.7 ข้อมูลภาพที่ 640 พิกเซล



รูปที่ 3.8 ข้อมูลภาพที่ 280 พิกเซล



รูปที่ 3.9 ข้อมูลภาพที่ 1000 พิกเซล

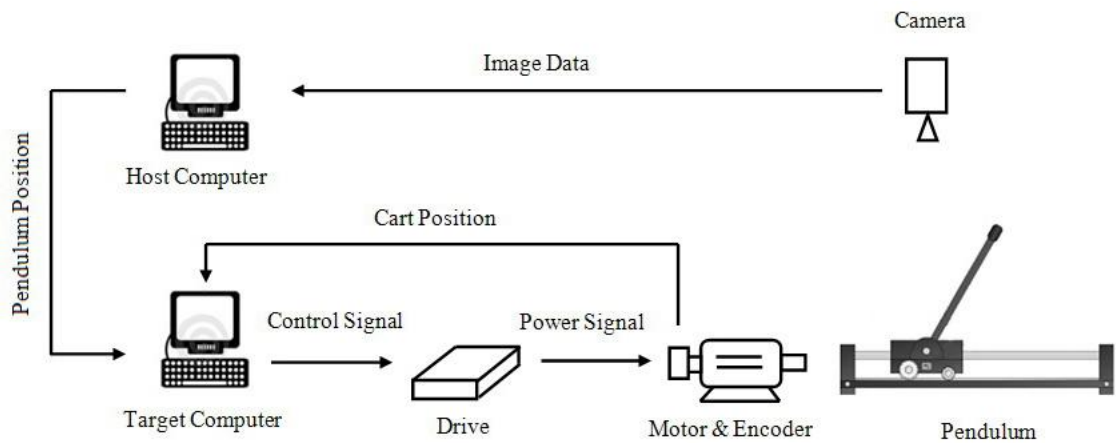
ในตำแหน่งเริ่มต้นเพนดูลัมอยู่ในตำแหน่งกึ่งกลางรางเลื่อนที่ 640 พิกเซลดังรูปที่ 3.7 เมื่อเอียงก้านเพนดูลัมจะสังเกตได้ว่าเมื่อเพนดูลัมเอียงไปทางซ้ายที่ 280 พิกเซล ดังรูปที่ 3.8 และเอียงไปขวาที่ 1000 พิกเซล ดังรูปที่ 3.9 หลอดไฟซึ่งเป็นจุดอ้างอิงจะมีขนาดใกล้เคียงกันในทุกตำแหน่ง โดยที่ 1 พิกเซล มีระยะทางเท่ากับ 0.0002857 m เมื่อได้ค่าตำแหน่งปลายของเพนดูลัมแล้วสามารถหาค่ามุมเอียงได้ดังนี้

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{(x_m - x_M)}{L} \right) \quad (3.1)$$

- เมื่อ θ คือ องศาเอียงของเพนดูลัม
 x_m คือ ตำแหน่งปลายของเพนดูลัม
 x_M คือ ตำแหน่งของรกราง
 L คือ ความยาวก้านเพนดูลัม

3.2 ระบบสัญญาณการควบคุมของระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมที่ใช้ในการทดลอง

ระบบสัญญาณการควบคุมของระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมที่ใช้ในการทดลอง เริ่มต้นเมื่อเพนดูลัมเอียงจากการเคลื่อนที่ กล้องความเร็วสูงด้านบนจะจับภาพที่ตำแหน่งปลายเพนดูลัมซึ่งมีหลอดไฟกลมติดตั้งไว้เพื่อเป็นตำแหน่งอ้างอิง กล้องความเร็วสูงจะรับข้อมูลภาพและส่งข้อมูลสู่ Host computer เพื่อประมวลผลจากข้อมูลภาพเป็นค่าพิกเซลและแปลงเป็นหน่วยเมตร (m) และส่งข้อมูลตำแหน่งของเพนดูลัมสู่ Target computer ผ่าน Ethernet หลังจากนั้น Target computer จะส่งสัญญาณการควบคุม (Control signal) สู่มอเตอร์ไคร์เพื่อควบคุมการจ่ายสัญญาณไฟฟ้า (Power signal) ให้กับมอเตอร์เพื่อควบคุมการรักษาเสถียรภาพของเพนดูลัม โดยที่ตำแหน่งของรกรางจะถูกวัดโดยเอนโค้ดเดอร์ซึ่งติดตั้งอยู่ที่มอเตอร์ และส่งข้อมูลตำแหน่งของรกรางสู่ Target computer เพื่อประมวลผลต่อไป แสดงดังรูปที่ 3.10



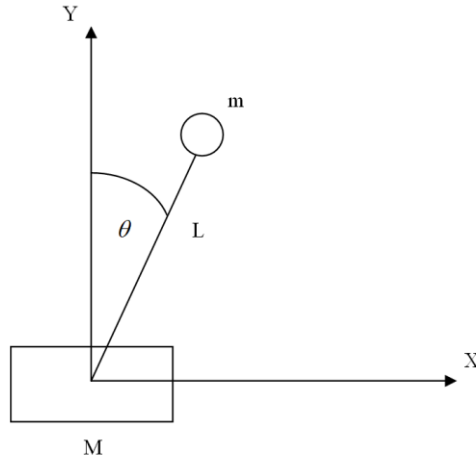
รูปที่ 3.10 โครงสร้างของระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมในการทดลอง

3.3 แบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์

ในการหาแบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์ของระบบอินเวอร์ทเพนดูลัม จะแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ การหาแบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์ของอินเวอร์ทเพนดูลัมและรถราง ซึ่งเป็นการหาสมการทางคณิตศาสตร์โดยรวมของเพนดูลัมและรถราง โดยใช้ทฤษฎีลากรองจ์มาช่วยในการหาสมการ ส่วนที่สองคือการหาสมการทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์และรางเลื่อน ซึ่งหาได้จากการหาเอกลักษณ์ของระบบโดยใช้โปรแกรม MATLAB ช่วยในการหาสมการ หลังจากนั้นจึงนำสมการทางคณิตศาสตร์ที่หาไว้ทั้งสอง เขียนรวมเป็นสมการโดยรวมของระบบ และนำสมการโดยรวมที่ได้ นำไปใช้เป็นค่าในการออกแบบตัวควบคุม และยังนำไปใช้ในการจำลองการควบคุมโดยใช้โปรแกรม MATLAB อีกด้วย

3.3.1 แบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์ของอินเวอร์ทเพนดูลัมและรถราง

ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเพนดูลัมและรถราง จะนำทฤษฎีลากรองจ์มาใช้ เนื่องจากระบบการเคลื่อนที่ของเพนดูลัมมีความซับซ้อนและไม่เป็นเชิงเส้น การใช้สมการลากรองจ์จะศึกษาได้ง่ายกว่า และเนื่องจากมวลของก้านเพนดูลัมและมวลที่ปลายเพนดูลัม เมื่อพิจารณามวลโดยรวมแล้วมีจุดศูนย์กลางถ่วงใกล้เคียงบริเวณจุดศูนย์กลางของมวลที่ปลายเพนดูลัมเพียงอย่างเดียว ดังนั้นเพื่อให้ง่ายต่อการศึกษา จึงกำหนดให้พิจารณามวลโดยรวมที่ปลายเพนดูลัมเพียงตำแหน่งเดียว โดยมีขั้นตอนดังนี้



รูปที่ 3.11 แบบจำลองอินเวอร์ทเพนดูลัมและรถราง

พิจารณาที่มวล (m)

เวกเตอร์ตำแหน่ง m คือ

$$\vec{r}_m = (x + L \sin \theta) \vec{i} + (L \cos \theta) \vec{j} \quad (3.2)$$

เวกเตอร์ความเร็ว m คือ

$$\dot{\vec{r}}_m = (\dot{x} + L \dot{\theta} \cos \theta) \vec{i} + (-L \dot{\theta} \sin \theta) \vec{j} \quad (3.3)$$

และ

$$\dot{\vec{r}}_m^2 = \dot{x}^2 + 2xL\dot{\theta} \cos \theta + (L\dot{\theta} \cos \theta)^2 + (L\dot{\theta} \sin \theta)^2 \quad (3.4)$$

จัดรูปใหม่ได้

$$\dot{\vec{r}}_m^2 = \dot{x}^2 + L^2 \dot{\theta}^2 + 2L \cos \theta \dot{\theta} \dot{x} \quad (3.5)$$

พิจารณาที่มวล (M)

เวกเตอร์ตำแหน่ง M คือ

$$\vec{r}_M = x \vec{i} \quad (3.6)$$

เวกเตอร์ความเร็ว M คือ

$$\dot{\vec{r}}_M = \dot{x}\vec{i} \quad (3.7)$$

และ

$$\vec{r}_M^2 = \dot{x}^2 \quad (3.8)$$

ดังนั้น Lagrangian function ของระบบสามารถหาได้จาก

$$L = T - V \quad (3.9)$$

พลังงานจลน์ของระบบหาได้จาก

$$T = \frac{1}{2}M\dot{r}_M^2 + \frac{1}{2}m\dot{r}_m^2 \quad (3.10)$$

นำสมการ (3.5) และ (3.8) แทนใน (3.10)

$$T = \frac{1}{2}(M+m)\dot{x}^2 + \frac{1}{2}mL^2\dot{\theta}^2 + mL\cos\theta\dot{\theta}\dot{x} \quad (3.11)$$

พลังงานศักย์ของระบบหาได้จาก

$$V = mgL\cos\theta \quad (3.12)$$

นำสมการ (3.11) และ (3.12) แทนใน (3.9)

$$L = \frac{1}{2}(M+m)\dot{x}^2 + \frac{1}{2}mL^2\dot{\theta}^2 + mL\cos\theta\dot{\theta}\dot{x} - mgL\cos\theta \quad (3.13)$$

สมการลากรองจ์คือ

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta} = Q_i \quad (3.14)$$

หาสมการในแต่ละเทอมของสมการลากรองจ์

$$\frac{\partial L}{\partial \theta} = -mL \sin \theta \dot{\theta} \dot{x} + mgL \sin \theta \quad (3.15)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} = mL\dot{\theta} + mL \cos \theta \dot{x} \quad (3.16)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} \right) = mL^2 \ddot{\theta} + mL \cos \theta \ddot{x} - mL \sin \theta \dot{\theta} \dot{x} \quad (3.17)$$

เมื่อพิจารณาพิกัดเชิงมุมของเพนดูลัม θ จะไม่มีแรงใดๆมากระทำดังนั้นจะเขียนสมการลากรองจ์ได้

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta} = 0 \quad (3.18)$$

นำ (3.15) และ (3.17) แทนใน (3.18) จะได้สมการการเคลื่อนที่ของอินเวอร์ทเพนดูลัมดังนี้

$$mL^2 \ddot{\theta} + mL \cos \theta \ddot{x} - mgL \sin \theta = 0 \quad (3.19)$$

จากสมการที่ (3.19) จะเห็นว่าเป็นสมการที่ไม่เป็นเชิงเส้น เพื่อให้ง่ายต่อการออกแบบตัวควบคุม จึงหาสมการเชิงเส้นของระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมจากสมการ (3.19) โดยการทำให้สมการเป็นเชิงเส้น (Linearization) ซึ่งมีตัวแปรของสมการคือ $[\theta \ \dot{x}] = [0 \ 0]$ จากสมการ (3.19) จัดรูปใหม่คือ

$$\ddot{\theta} = \frac{g}{L} \sin \theta - \frac{1}{L} \cos \theta \ddot{x} \quad (3.20)$$

หาสมการเชิงเส้นของระบบได้จาก

$$\ddot{\theta} = \left. \frac{\partial \ddot{\theta}}{\partial \theta} \right|_{=0} \theta + \left. \frac{\partial \ddot{\theta}}{\partial \ddot{x}} \right|_{=0} \ddot{x} \quad (3.21)$$

หาสมการในแต่ละเทอมของสมการ (3.21)

$$\left. \frac{\partial \ddot{\theta}}{\partial \theta} \right|_{=0} = \left[\frac{g}{L} \sin \theta - \frac{1}{L} \cos \theta \ddot{x} \right]_{=0} = \frac{g}{L} \quad (3.22)$$

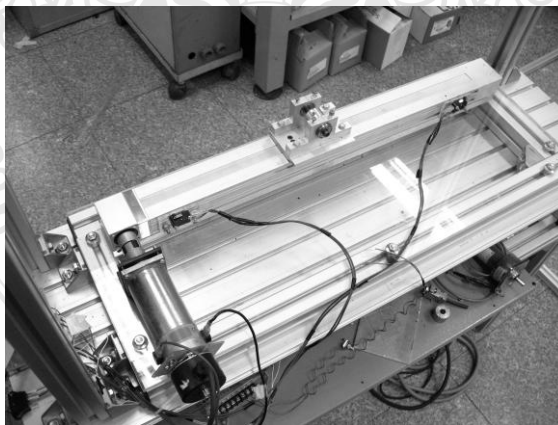
$$\left. \frac{\partial \ddot{\theta}}{\partial \ddot{x}} \right|_{=0} = \left[-\frac{1}{L} \cos \theta \right]_{=0} = -\frac{1}{L} \quad (3.23)$$

นำสมการ (3.22) และ (3.23) แทนใน (3.21) จะได้สมการเชิงเส้นของสมการการเคลื่อนที่ของเพนดูลัมคือ

$$\ddot{\theta} = \frac{g}{L} \theta - \frac{1}{L} \ddot{x} \quad (3.24)$$

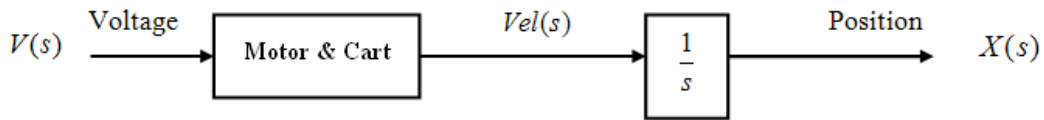
3.3.2 แบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์และรางเลื่อน

หาแบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์และรางเลื่อน ผู้ทำวิจัยได้ใช้ชุดการทดลองที่ประกอบไปด้วยชุดมอเตอร์ รางรางและรางเลื่อน ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 ชุดมอเตอร์และรางเลื่อน

ทำการทดลองโดยการเก็บข้อมูลจากการทดลอง และนำข้อมูลไปหาเอกลักษณ์ของระบบ (System identification) โดยใช้โปรแกรม MATLAB ช่วยในการหาแบบจำลองโดยมีขั้นตอนดังนี้



รูปที่ 3.13 โครงสร้างการทำงานของชุดมอเตอร์และรางเลื่อนโดยใช้ซอฟต์แวร์เพื่อหาแบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์

ในการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ เราทำการจ่ายแรงดันไฟฟ้าแบบ Step ให้กับมอเตอร์ตั้งแต่ -10V ถึง +10V เข้าสู่ระบบจากนั้นเก็บข้อมูลสัญญาณขาออกซึ่งจะได้เป็นค่าความเร็วของการเคลื่อนที่ $Vel(s)$ และนำสัญญาณที่ได้เข้าสู่การหาเอกลักษณ์ของระบบโดยใช้โปรแกรม MATLAB ช่วยในการหาค่าโดยมีฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer function) ของระบบคือ

$$G(s) = \frac{Vel(s)}{V(s)} = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (3.25)$$

เมื่อ $Vel(s)$ คือ ความเร็วในการเคลื่อนที่ของรถราง

$V(s)$ คือ แรงดันไฟฟ้าขาเข้าที่จ่ายให้กับมอเตอร์

K คือ ค่าอัตราขยาย DC ของระบบ

τ คือ เวลาคงที่ของระบบ

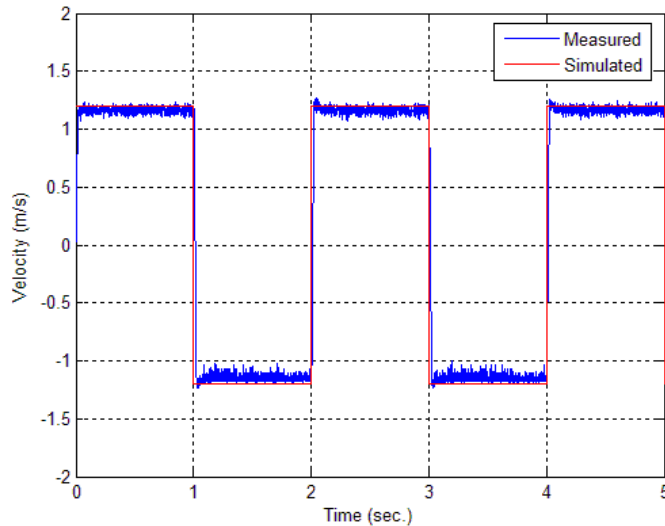
จากนั้นนำฟังก์ชันถ่ายโอนจากสมการ (3.25) มาอินทิเกรตได้สัญญาณขาออกเป็นตำแหน่ง $X(s)$ ดังนั้นฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบที่ได้เป็น

$$\frac{X(s)}{V(s)} = \frac{K_2}{s(s + K_1)} \quad (3.26)$$

จากสมการ (3.26) สามารถหาค่าตัวแปรได้คือ $K_1 = 80.52$ และ $K_2 = 18.10$ และสามารถเขียนแบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์และรถรางที่อยู่ในโดเมนเวลา ได้ดังนี้

$$\ddot{x} = K_2 V - K_1 \dot{x} \quad (3.27)$$

เมื่อได้แบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์และรางเลื่อน เราจะเปรียบเทียบสัญญาณกับระบบจริงโดยการจ่ายสัญญาณแบบขั้นบันได (Step signal) เพื่อดูผลตอบสนองดังรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 ผลตอบสนองสัญญาณขาออกจากการทดลองจริงและแบบจำลอง

3.3.3 แบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์รวมของระบบ

เมื่อได้แบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์ของอินเวอร์ทเพนดูลัมและรราง และแบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์และรราง ดังนั้นสามารถหาสมการรวมของระบบจากการนำสมการ (3.24) แทนค่าใน (3.27) จะได้

$$\ddot{\theta} = \frac{g}{L} \theta + \frac{K_1}{L} \dot{x} - \frac{K_2}{L} V \quad (3.28)$$

สามารถเขียนสมการรวมของระบบให้อยู่ในรูปสมการปริภูมิสถานะได้จาก

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax(t) + Bu(t) \\ y &= Cx(t) + Du(t) \end{aligned} \quad (3.29)$$

โดยมีตัวแปรสถานะ คือ $[\theta \ \dot{\theta} \ x \ \dot{x}]$ และสัญญาณขาเข้า คือ $[V]$

สามารถเขียนสมการปริภูมิสถานะของระบบรวมได้

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \\ x \\ \dot{x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{g}{L} & 0 & 0 & \frac{K_1}{L} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -K_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \\ x \\ \dot{x} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{K_2}{L} \\ 0 \\ K_2 \end{bmatrix} [V]$$

$$y = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \dot{\theta} \\ x \\ \dot{x} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

เขียนในรูปฟังก์ชันถ่ายโอนได้

$$\frac{X(s)}{V(s)} = \frac{-K_2 s^3 + \frac{g}{L} K_2 s}{s^4 + K_1 s^3 - \frac{g}{L} K_2 s^2 - \frac{g}{L} K_1 s} \quad (3.31)$$

ในการทดลองกำหนดค่าพารามิเตอร์ของระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมดังนี้

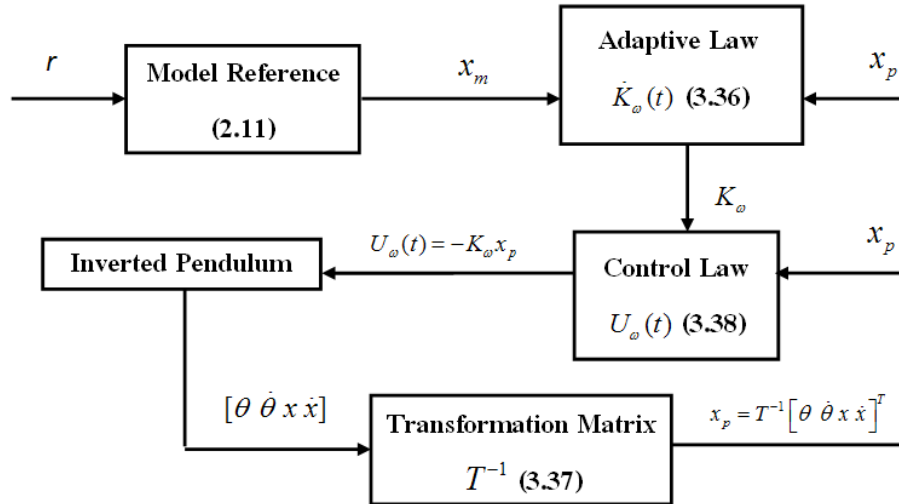
ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ของระบบอินเวอร์ทเพนดูลัม

มวลของเพนดูลัม (m)	1 kg
ความยาวก้านเพนดูลัม (L)	0.63 m
ความเร่งแรงโน้มถ่วงโลก (g)	9.81 m/sec ²

3.4 การออกแบบตัวควบคุม

3.4.1 การออกแบบตัวควบคุม MRAC

การออกแบบตัวควบคุม MRAC กำหนดตัวแปรขาเข้าของระบบ r เท่ากับ 0 และมีตัวแปรสถานะออกจากระบบเป็น $[\theta \ \dot{\theta} \ x \ \dot{x}]^T$ ซึ่งในการควบคุมแบบ MRAC จะใช้โมเดลแบบที่ถูกจัดให้มีรูปแบบที่สามารถควบคุมได้ จึงต้องมีการแปลงตัวแปรสถานะที่ออกจากระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมให้เป็นตัวแปรสถานะในโมเดลแบบที่ถูกจัดให้มีรูปแบบที่สามารถควบคุมได้ โดยใช้เมทริกซ์การแปลงซึ่งจะได้ตัวแปรสถานะใหม่เป็น x_p โดยโครงสร้างของระบบมีดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 โครงสร้างการออกแบบตัวควบคุม MRAC

โมเดลอ้างอิงที่จะใช้เป็นค่าอ้างอิงให้กับระบบได้มาจาก ITAE (Integral of Time multiplied by Absolute Error) โดยมีฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบวงปิด คือ

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{K}{s^2 + bs + (a + K)} \quad (3.32)$$

สัมประสิทธิ์ของสมการคุณลักษณะของโมเดลอ้างอิงที่เหมาะสมมาจาก ITAE [13] คือ

ตารางที่ 3.2 สัมประสิทธิ์ของสมการคุณลักษณะที่เหมาะสมโดย ITAE

$s + \omega_n$
$s^2 + 1.4\omega_n s + \omega_n^2$
$s^3 + 1.75\omega_n s^2 + 2.15\omega_n^2 s + \omega_n^3$
$s^4 + 2.1\omega_n s^3 + 3.4\omega_n^2 s^2 + 2.7\omega_n^3 s + \omega_n^4$

เขียนให้อยู่ในรูปแบบที่สามารถควบคุมได้จะได้เมทริกซ์โมเดลอ้างอิงจากสมการ (2.11) ซึ่งจะได้ค่า A_m , B_m และ C_m ดังนี้

$$A_m = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -\omega_n^4 & -2.7\omega_n^3 & -3.4\omega_n^2 & -2.1\omega_n \end{bmatrix}$$

$$B_m = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \text{ และ } C_m = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

จากสมการเลียปูนอฟ (2.17) กำหนดเมทริกซ์ Q และ P คือ

$$Q = \begin{bmatrix} -q_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -q_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -q_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -q_4 \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

และ

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} \\ p_{41} & p_{42} & p_{43} & p_{44} \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

จากสมการ (2.20) จะได้กฎการปรับตัวคือ

$$\dot{K}_\omega(t) = -[p_{14}e(t) + p_{24}\dot{e}(t) + p_{34}\ddot{e}(t) + p_{44}\ddot{\ddot{e}}(t)] \begin{bmatrix} \gamma_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \gamma_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \gamma_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \gamma_4 \end{bmatrix} z_p(t) \quad (3.36)$$

เมื่อค่า γ_i เสมือนค่าอัตราเร็วในการปรับตัว
ตัวแปรสถานะ x_p หาได้จาก

$$x_p = T^{-1} [\theta \ \dot{\theta} \ x \ \dot{x}]^T \quad (3.37)$$

เมื่อ T คือเมทริกซ์การแปลงและ x_p คือเวกเตอร์ใหม่ที่ได้จากการแปลงพิกัด
กำหนดกฎการควบคุมคือ

$$U_{\omega}(t) = -K_{\omega}(t)x_p(t) \quad (3.38)$$

เมื่อ K_{ω} คือ ค่าอัตราขยายป้อนกลับ ในการควบคุม MRAC ในขณะที่เริ่มต้นจะยังไม่มีค่าอัตราขยาย ดังนั้นจึงต้องหาค่าอัตราขยายเริ่มต้น (K_{ω}) ซึ่งหาได้จากสมการของระบบอินเวอร์ทเพนคูล์ม ซึ่งอยู่ในรูปแบบที่สามารถควบคุมได้โดยใช้สมการ (3.31) และตารางที่ 3.1 เป็นค่าพารามิเตอร์ในการคำนวณ จากสมการ (2.7) สามารถหาเมทริกซ์ A_p , B_p และ C_p ได้ดังนี้

$$A_p = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{g}{L}K_1 & \frac{g}{L}K_2 & -K_1 \end{bmatrix}$$

$$B_p = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \text{ และ } C_p = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{K_2}{L} & 0 \\ -\frac{g}{L}K_2 & 0 & -K_2 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.39)$$

สามารถหาค่า K_{ω} เพื่อใช้เป็นค่าอัตราขยายเริ่มต้นโดยใช้ LQR จากรูปแบบที่สามารถควบคุมได้โดย กำหนดค่า $Q = \text{diag}\{10000 \ 0 \ 1 \ 0\}$ และ $R = 0.0001$ ซึ่งจะได้ค่าอัตราขยายเริ่มต้น (K_{ω}) คือ

$$K_{\omega} = [10000.00 \ 7471.92 \ 1870.26 \ 20.59] \quad (3.40)$$

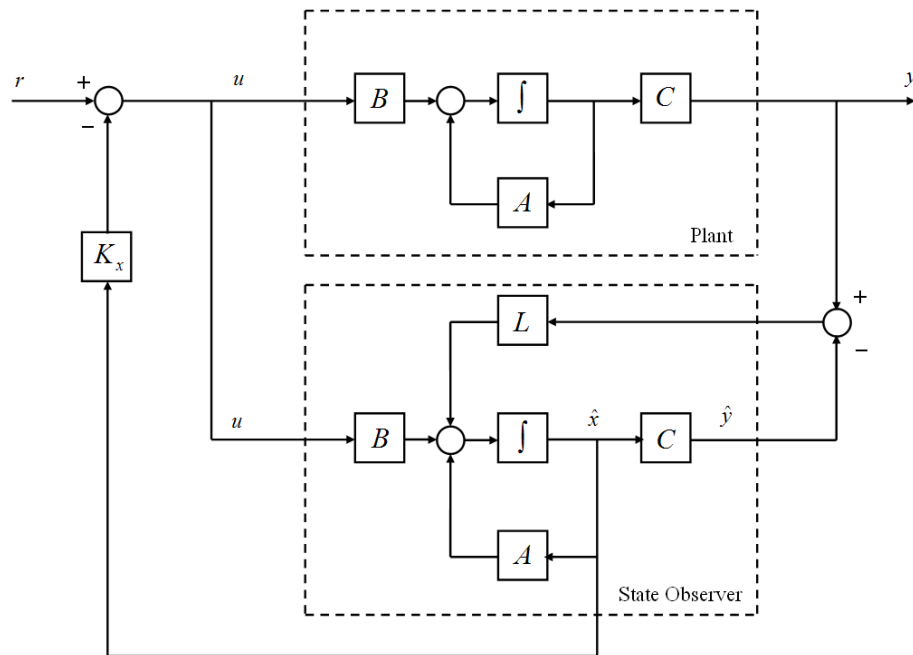
หาเมทริกซ์การแปลงจากสมการ (2.31) จะได้

$$T(x) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{K_2}{L} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{K_2}{L} \\ -\frac{g}{L}K_2 & 0 & -K_2 & 0 \\ 0 & -\frac{g}{L}K_2 & 0 & -K_2 \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

และสามารถหา T^{-1} ได้

$$T^{-1} = \begin{bmatrix} -\frac{L^2}{gK_2} & 0 & -\frac{L^2}{gK_2} & 0 \\ 0 & -\frac{L^2}{gK_2} & 0 & -\frac{L^2}{gK_2} \\ \frac{L}{K_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{L}{K_2} & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.42)$$

3.4.2 การออกแบบตัวควบคุมสถานะป้อนกลับ



รูปที่ 3.16 โครงสร้างการออกแบบตัวควบคุมสถานะป้อนกลับ

การออกแบบตัวควบคุมสถานะป้อนกลับได้นำหลักการ LQR มาใช้ในการออกแบบโดยกำหนดตัวแปรขาเข้าของระบบ r เท่ากับ 0 และใช้ตัวสังเกตการณ์เป็นตัวประมาณค่าตัวแปรสถานะ เนื่องจากมีตัวแปรบางตัวไม่สามารถวัดค่าได้ กำหนดกฎการควบคุมคือ

$$u = -K_x x \quad (3.43)$$

สามารถหาค่าอัตราขยาย K_x ออกแบบโดยใช้หลักการควบคุม LQR โดยใช้สมการ (3.30) และตารางที่ 3.1 เป็นค่าพารามิเตอร์ในการคำนวณ กำหนดค่า $Q = \text{diag}\{10000 \ 100 \ 5000 \ 0\}$ และ $R = 1$ สามารถหาค่าอัตราขยาย K_x ได้คือ

$$K_x = [198.86 \ 44.69 \ 70.71 \ 58.10] \quad (3.44)$$

สามารถหาค่าเมทริกซ์ L เพื่อใช้ในการประมาณค่าตัวแปรสถานะดังรูปที่ 3.16 โดยใช้หลักการ LQR กำหนดค่า $Q = \text{diag}\{100 \ 10 \ 2000 \ 10\}$ และ $R = \text{diag}\{0.01 \ 0.01\}$ สามารถหาค่า L ได้คือ

$$L = \begin{bmatrix} 111.1992 & 39.7364 & 0 & 65.9862 \\ 0 & 0 & 457.3124 & 0.9920 \end{bmatrix} \quad (3.45)$$



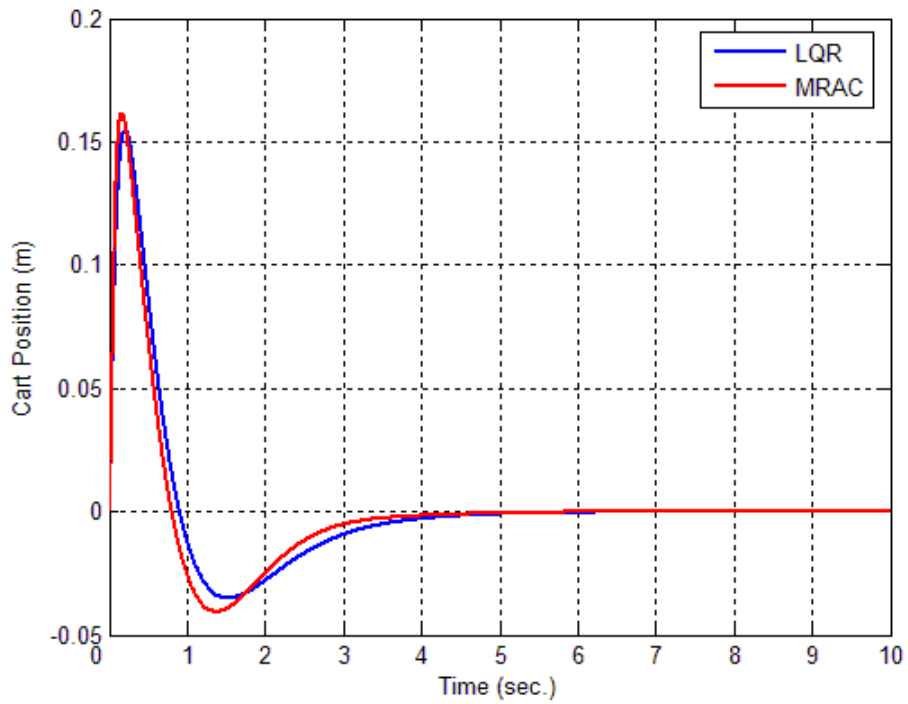
บทที่ 4

ผลการทดลอง

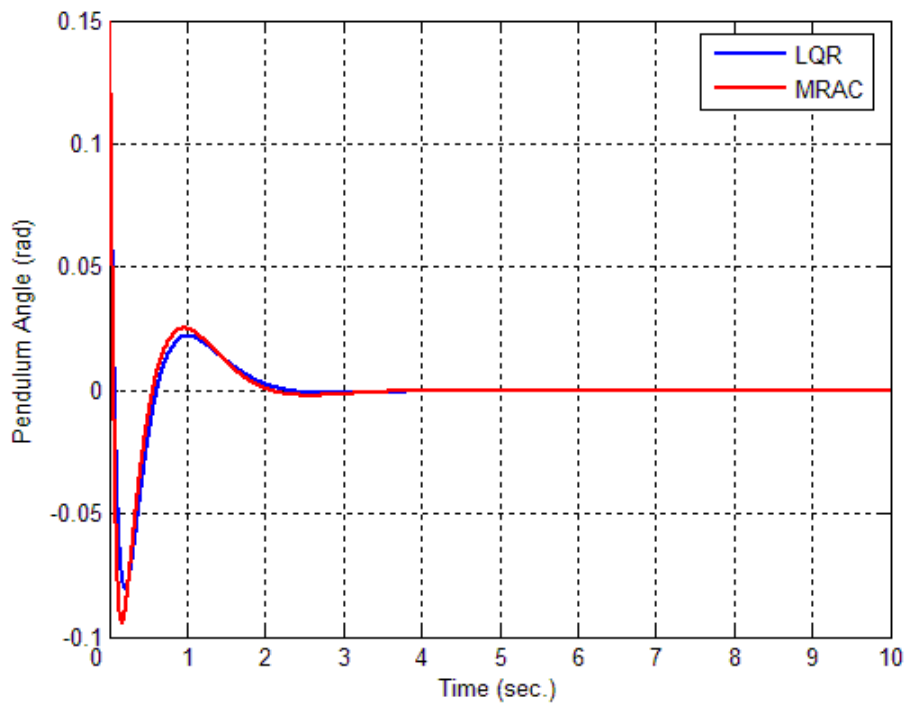
ในบทนี้จะกล่าวถึงการทดลอง การทำงานของตัวควบคุมการรักษาเสถียรภาพของอินเวอร์ทเพนดูลัม จากการออกแบบตัวควบคุมในหัวข้อที่ 3.4 โดยมีตัวควบคุมสองตัวเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวควบคุมแบบมีค่าอัตราขยายคงที่ และตัวควบคุมแบบมีค่าอัตราขยายแบบปรับตัว ได้นั้นคือ ตัวควบคุมแบบ LQR และ MRAC ตามลำดับ โดยแบ่งการทดลองออกเป็นสองส่วนคือ ในส่วนแรกจะทำการทดลองจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB เพื่อทดสอบว่าตัวควบคุมที่ออกแบบไว้ สามารถนำมาใช้ในการรักษาเสถียรภาพของระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมได้หรือไม่ ซึ่งในระหว่างการจำลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์หากมีข้อผิดพลาดจะสามารถปรับปรุงตัวควบคุมให้มีประสิทธิภาพมากที่สุดก่อนนำไปใช้กับการทดลองระบบจริง ในการจำลองจะแบ่งการจำลองได้ดังนี้ การจำลองแรกเป็นการจำลองการรักษาเสถียรภาพของระบบ ส่วนการจำลองที่สองเป็นการจำลองการรักษาเสถียรภาพ ในขณะที่มีการเคลื่อนที่ของรถรางเพื่อเป็นการทดสอบตัวรบกวนภายในระบบ โดยที่อินเวอร์ทเพนดูลัมสามารถเคลื่อนที่ติดตามตำแหน่งอ้างอิงแบบ Sine wave และยังสามารถรักษาเสถียรภาพอยู่ได้ ส่วนการทดลองที่สองจะทำการทดลองกับชุดการทดลองจริงในห้องปฏิบัติการ โดยแบ่งการทดลองเช่นเดียวกับการจำลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

4.1 การจำลองการควบคุมการรักษาเสถียรภาพของระบบอินเวอร์ทเพนดูลัม

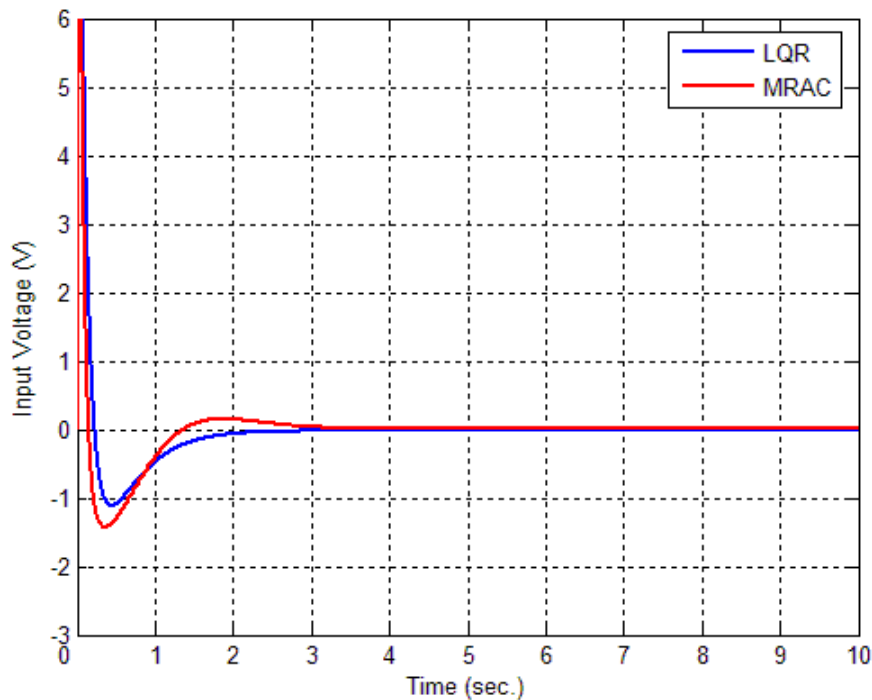
การจำลองการควบคุมการรักษาเสถียรภาพของอินเวอร์ทเพนดูลัมจะใช้โปรแกรม MATLAB จำลองการควบคุมโดยใช้ตัวควบคุมแบบ LQR และ MRAC เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพตัวควบคุมทั้งสองแบบ ในการควบคุมตำแหน่งของรถรางและรักษาเสถียรภาพจากการออกแบบตัวควบคุมในหัวข้อ 3.4 โดยจุดประสงค์คือต้องการให้เพนดูลัมรักษาเสถียรภาพอยู่ได้ ณ จุดสมดุลโดยไม่มีตัวรบกวนจากภายนอกและรถรางเคลื่อนที่อยู่บริเวณกึ่งกลางของรางเลื่อน โดยกำหนดให้รถรางเริ่มต้นที่ตำแหน่งกึ่งกลางของรางเลื่อนเท่ากับ 0 m มุมเอียงเริ่มต้นของเพนดูลัมเท่ากับ 0.15 rad จากสมการโมเดลอ้างอิง (2.11) กำหนดค่า $\omega_n = 10 \text{ rad/s}$ และสมการกฎการปรับตัว (3.36) กำหนดค่า $\gamma_i = \text{diag}\{1000 \ 1000 \ 1000 \ 1000\}$ ผลการจำลองการควบคุมการรักษาเสถียรภาพของอินเวอร์ทเพนดูลัมแสดงดังรูปที่ 4.1, 4.2 และ 4.3



รูปที่ 4.1 ผลการจำลองการรักษาเสถียรภาพระหว่างตำแหน่งของรถรางกับเวลา



รูปที่ 4.2 ผลการจำลองการรักษาเสถียรภาพระหว่างมุมของเพนดูลัมกับเวลา

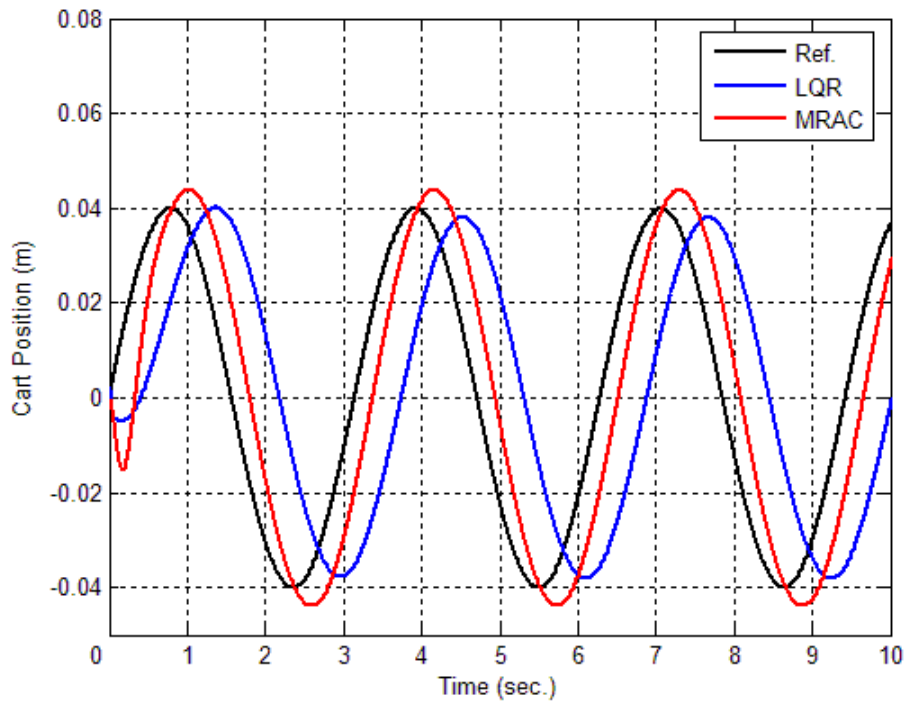


รูปที่ 4.3 ผลการจำลองการรักษาเสถียรภาพระหว่างสัญญาณโวลต์ขาเข้ากับเวลา

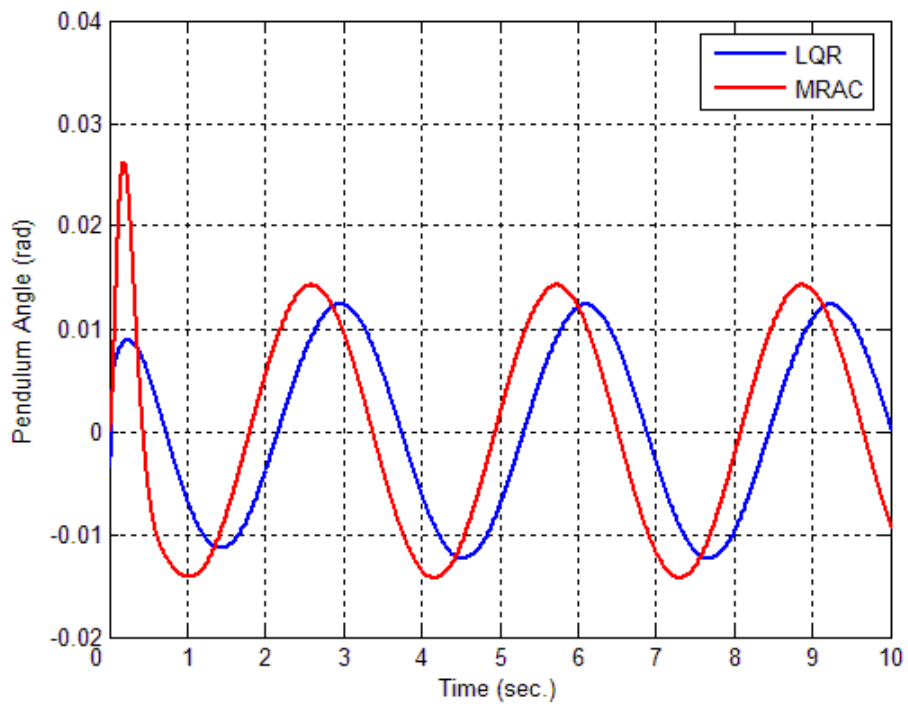
จากผลการทดลองการรักษาเสถียรภาพของระบบอินเวอร์ทเพนดูลัม จะเห็นว่าตัวควบคุม LQR และ MRAC มีระยะเวลาการเข้าสู่จุดสมดุลที่ใกล้เคียงกันที่ประมาณ 4 วินาที เมื่อพิจารณาผลตอบสนองตำแหน่งของรูดังรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าตัวควบคุม MRAC จะเกิดโอเวอร์ชูท (Overshoot) มากกว่าการควบคุม LQR เล็กน้อยก่อนเข้าสู่สมดุล เมื่อพิจารณามุมเอียงของเพนดูลัมก่อนเข้าสู่สมดุลดังรูปที่ 4.2 มีมุมก่อนเข้าสู่สมดุลที่ใกล้เคียงกัน และตัวควบคุมทั้งสองยังสามารถรักษาเสถียรภาพของเพนดูลัมอยู่ได้

4.2 การจำลองการควบคุมการติดตามตำแหน่งของระบบอินเวอร์ทเพนดูลัม

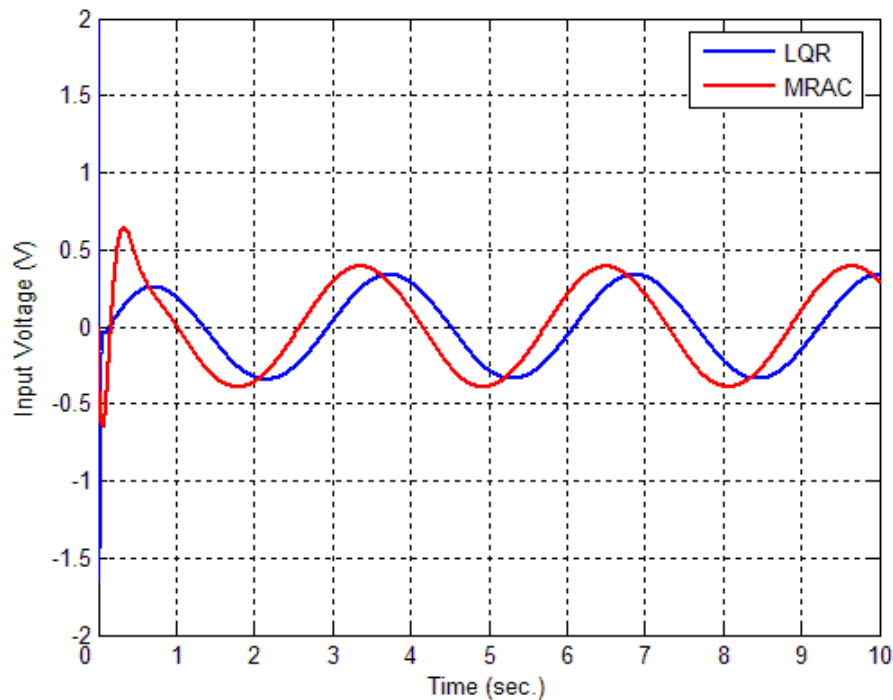
การจำลองการควบคุมการติดตามตำแหน่งของระบบอินเวอร์ทเพนดูลัม มีจุดประสงค์เพื่อทดสอบระบบเมื่อมีการรบกวนภายในระบบ โดยในการจำลองการติดตามตำแหน่งนี้จะใส่สัญญาณขาเข้าอ้างอิงให้กับรูดังโดยที่รูดังจะเคลื่อนที่ในลักษณะ Sine wave โดยต้องการให้รูดังเคลื่อนที่ติดตามตำแหน่งตามสัญญาณอ้างอิงได้ใกล้เคียงมากที่สุด และเพนดูลัมยังสามารถรักษาเสถียรภาพอยู่ได้ โดยกำหนดสัญญาณอ้างอิงลักษณะ Sine wave โดยรูดังจะมีระยะของการเคลื่อนที่ ระหว่าง ± 0.04 m และมีความถี่ 2Hz จากจุดกึ่งกลางของรูดังเคลื่อน กำหนดให้รูดังเริ่มต้นที่ตำแหน่งกึ่งกลางของรูดังเคลื่อนเท่ากับ 0 m มุมเอียงเริ่มต้นของเพนดูลัมเท่ากับ 0 rad ส่วนค่าการทดลองกำหนดค่าต่างๆ เช่นเดียวกับการจำลองการควบคุมการรักษาเสถียรภาพของอินเวอร์ทเพนดูลัมในหัวข้อ 4.1 ผลการจำลองการควบคุมการติดตามตำแหน่งของระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมแสดงดังรูปที่ 4.4, 4.5 และ 4.6



รูปที่ 4.4 ผลการจำลองการควบคุมการติดตามตำแหน่งระหว่างตำแหน่งของรถรางกับเวลา



รูปที่ 4.5 ผลการจำลองการควบคุมการติดตามตำแหน่งระหว่างมุมของเพนดูลัมกับเวลา



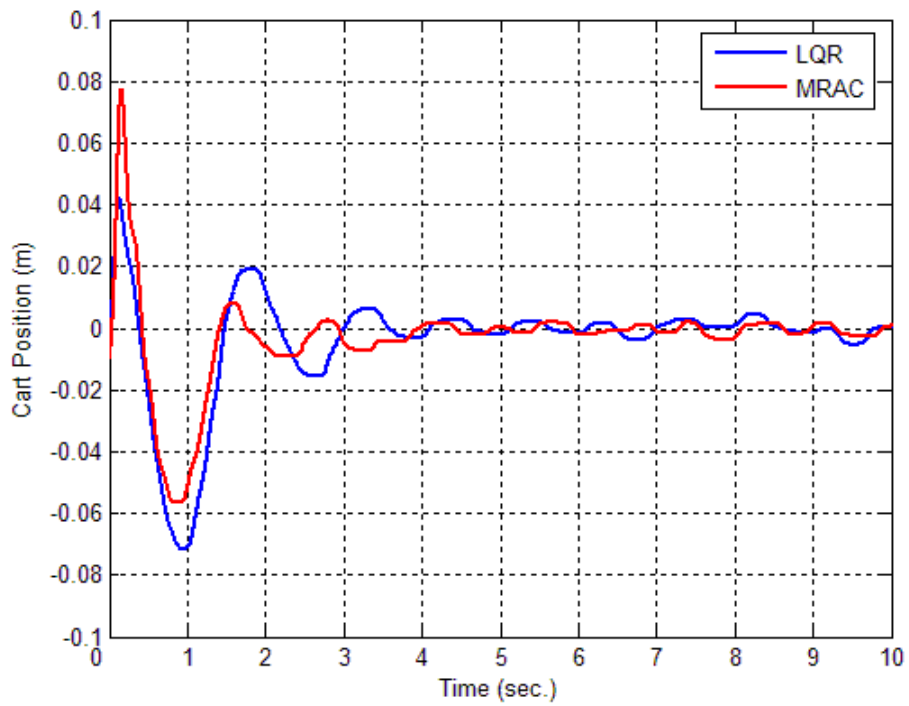
รูปที่ 4.6 ผลการจำลองการควบคุมการติดตามตำแหน่งระหว่างสัญญาณโวลต์เข้ากับเวลา

ผลการจำลองการควบคุมการติดตามตำแหน่งของระบบอินเวอร์ทเพนดูลัม เมื่อพิจารณาตำแหน่งของเพนดูลัมดังรูปที่ 4.4 ตัวควบคุม LQR จะมีตอบสนองต่อสัญญาณอ้างอิงที่ช้ากว่าสัญญาณอ้างอิงประมาณ 0.5 วินาที ส่วนตัวควบคุม MRAC สามารถติดตามตำแหน่งได้ใกล้เคียงกับสัญญาณอ้างอิง เมื่อพิจารณามุมเอียงของเพนดูลัมดังรูปที่ 4.5 จะสังเกตว่าตัวควบคุม MRAC จะตอบสนองได้เร็วกว่าตัวควบคุม LQR และตัวควบคุมทั้งสองยังสามารถรักษาเสถียรภาพของเพนดูลัมอยู่ได้

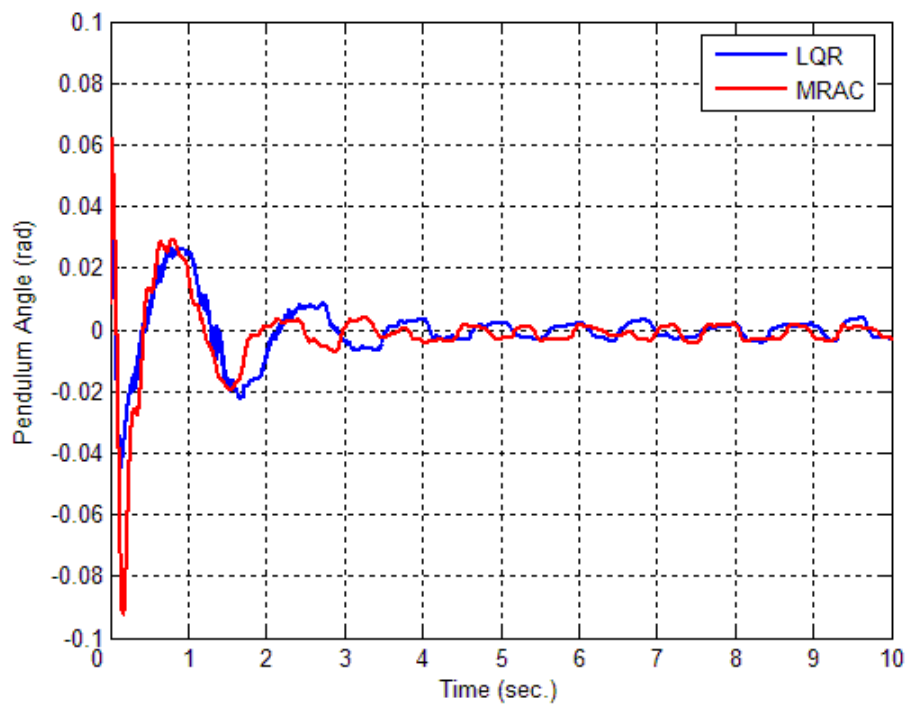
4.3 การทดลองการควบคุมการรักษาเสถียรภาพของระบบอินเวอร์ทเพนดูลัม

หลังจากได้จำลองตัวควบคุมการรักษาเสถียรภาพ ของระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมด้วยโปรแกรม MATLAB ทำให้สามารถปรับปรุงค่าการทดลองได้อย่างมีประสิทธิภาพและแก้ไขข้อผิดพลาดหลายๆ ประการ หลังจากนั้นจึงนำตัวควบคุมที่ได้จากการจำลองมาทดลองกับชุดการทดลองจริง แต่เนื่องจากระบบที่ใช้ในการทดลองจริงมีแรงเสียดทานจากรางเลื่อนซึ่งมีผลต่อระบบ จึงมีการปรับค่าการทดลองเล็กน้อย เพื่อให้ตัวควบคุมมีความเหมาะสมต่อระบบมากที่สุด

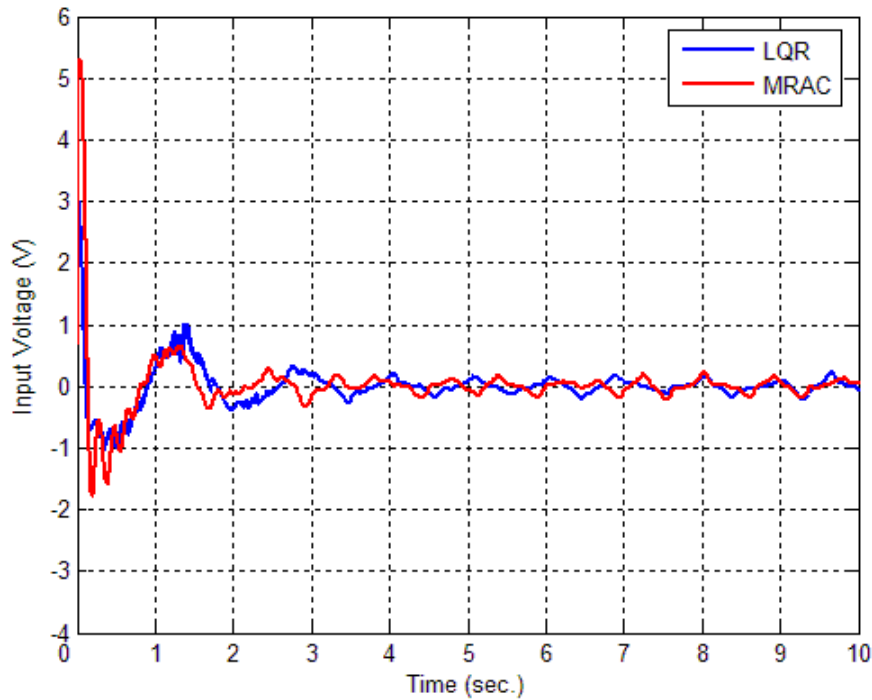
การทดลองการควบคุมการรักษาเสถียรภาพของระบบอินเวอร์ทเพนดูลัม กำหนดการทดลองเช่นเดียวกับการจำลองการควบคุมการรักษาเสถียรภาพของอินเวอร์ทเพนดูลัมในหัวข้อที่ 4.1 จากสมการโมเดลอ้างอิง (2.11) กำหนดค่า $\omega_n = 20 \text{ rad/s}$ และสมการกฎการปรับตัว (3.36) กำหนดค่า $\gamma_i = \text{diag}\{3000 \ 3000 \ 3000 \ 3000\}$ ผลการทดลองการควบคุมการรักษาเสถียรภาพของอินเวอร์ทเพนดูลัมแสดงดังรูปที่ 4.7, 4.8 และ 4.9



รูปที่ 4.7 ผลการทดลองการรักษาเสถียรภาพระหว่างตำแหน่งของรถรางกับเวลา



รูปที่ 4.8 ผลการทดลองการรักษาเสถียรภาพระหว่างมุมของเพนดูลัมกับเวลา

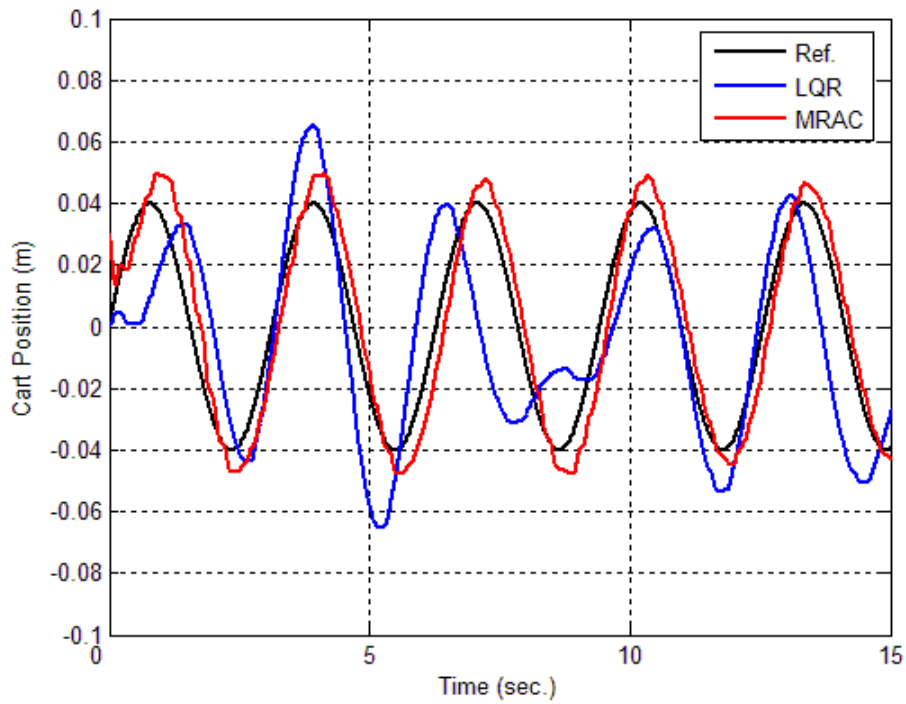


รูปที่ 4.9 ผลการทดลองการรักษาเสถียรภาพระหว่างสัญญาณ โวลต์ขาเข้ากับเวลา

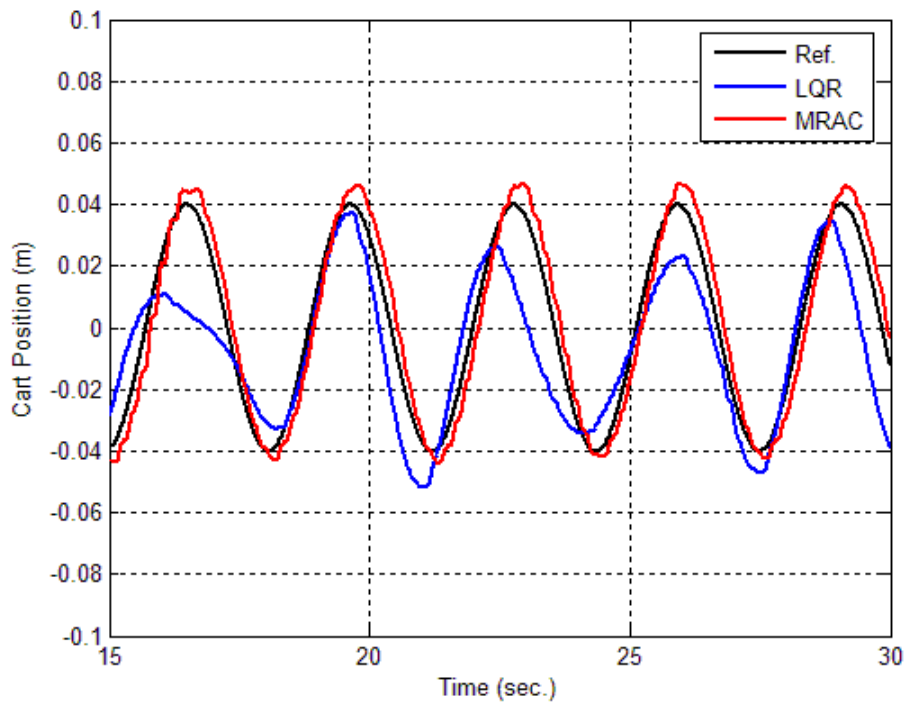
จากผลการทดลองตัวควบคุมการทดลองการรักษาเสถียรภาพ ของระบบอินเวอร์ทเพนดูลัม เมื่อพิจารณาที่ตำแหน่งของรตรางดังรูปที่ 4.7 จะสังเกตว่าตัวควบคุม LQR และ MRAC สามารถเข้าสู่ตำแหน่งสมดุลได้ในเวลาใกล้เคียงกันที่ 4 วินาที แต่ตัวควบคุม LQR จะมีการแกว่งของรตรางเข้าสู่สมดุลมากกว่าตัวควบคุม MRAC เพียงเล็กน้อย เมื่อพิจารณามุมของเพนดูลัมดังรูปที่ 4.8 จะสังเกตว่าตัวควบคุม LQR และ MRAC มีมุมการเอียงที่ใกล้เคียงกันก่อนที่จะเข้าสู่สมดุล และตัวควบคุมทั้งสองยังสามารถรักษาเสถียรภาพของเพนดูลัมอยู่ได้

4.4 การทดลองการควบคุมการติดตามตำแหน่งของระบบอินเวอร์ทเพนดูลัม

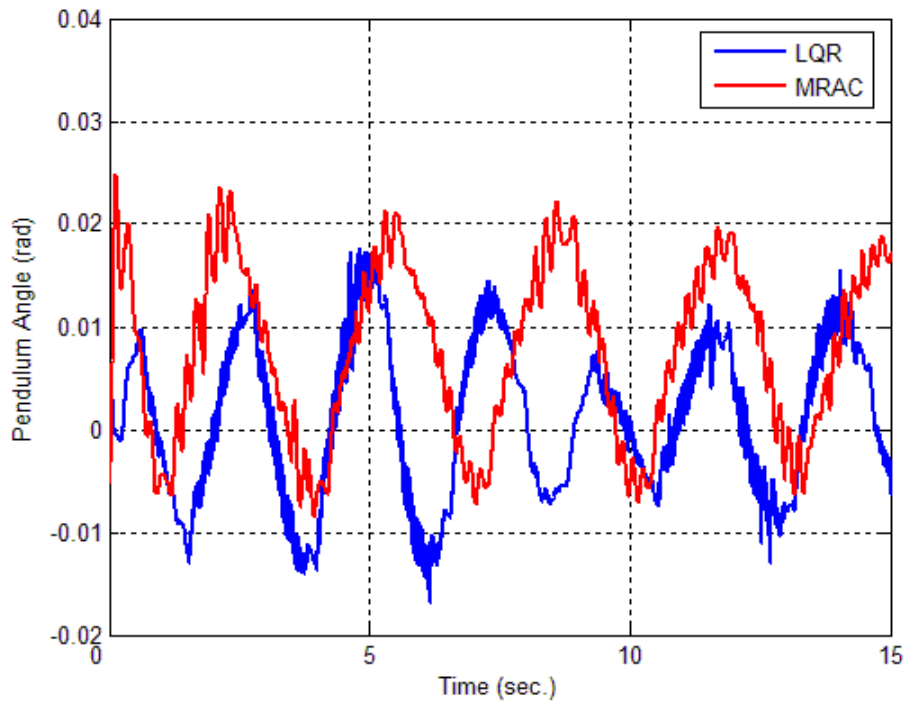
การทดลองการควบคุมการติดตามตำแหน่งของระบบอินเวอร์ทเพนดูลัม จะทำการทดลองเช่นเดียวกับการจำลองการควบคุมการติดตามตำแหน่งของระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมในหัวข้อที่ 4.2 จากสมการโมเดลอ้างอิง (2.11) กำหนดค่า $\omega_n = 25 \text{ rad/s}$ และสมการกฎการปรับตัว (3.36) กำหนดค่า $\gamma_i = \text{diag}\{1000 \ 1000 \ 1000 \ 1000\}$ ผลการจำลองการควบคุมการติดตามตำแหน่งของระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมแสดงดังรูปที่ 4.10, 4.11, 4.12, 4.13, 4.14 และ 4.15



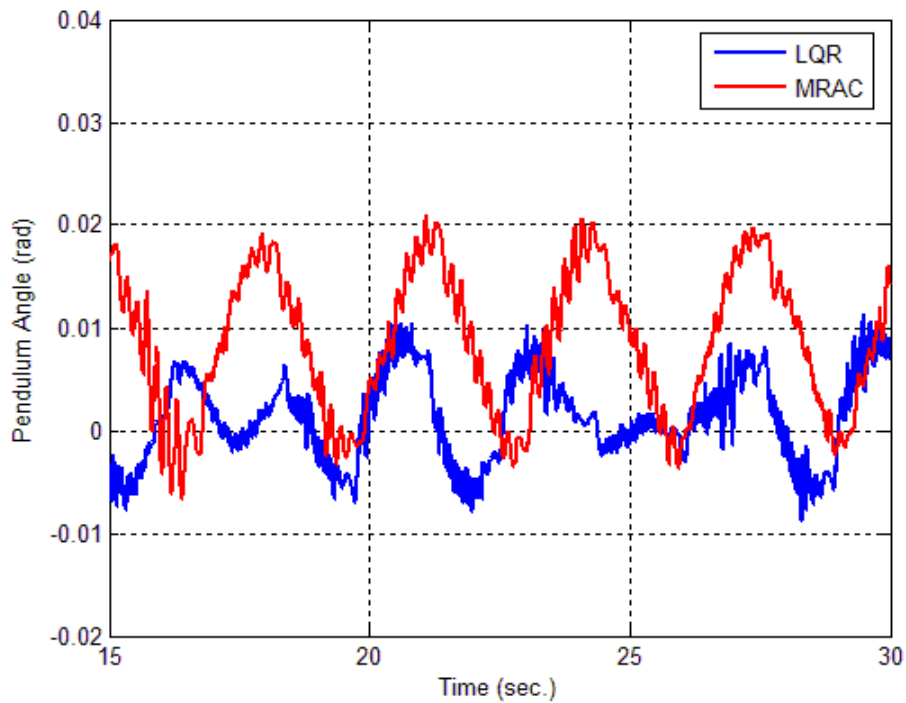
รูปที่ 4.10 ผลการทดลองการควบคุมการติดตามตำแหน่งระหว่างตำแหน่งของรถรางกับเวลา ในช่วงเวลา 0-15 sec.



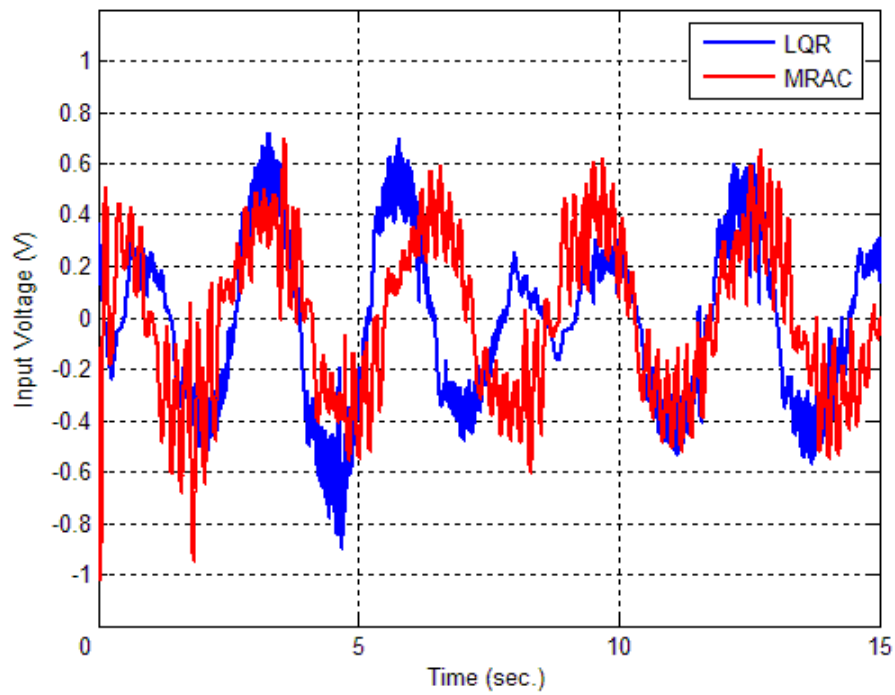
รูปที่ 4.11 ผลการทดลองการควบคุมการติดตามตำแหน่งระหว่างตำแหน่งของรถรางกับเวลา ในช่วงเวลา 15-30 sec.



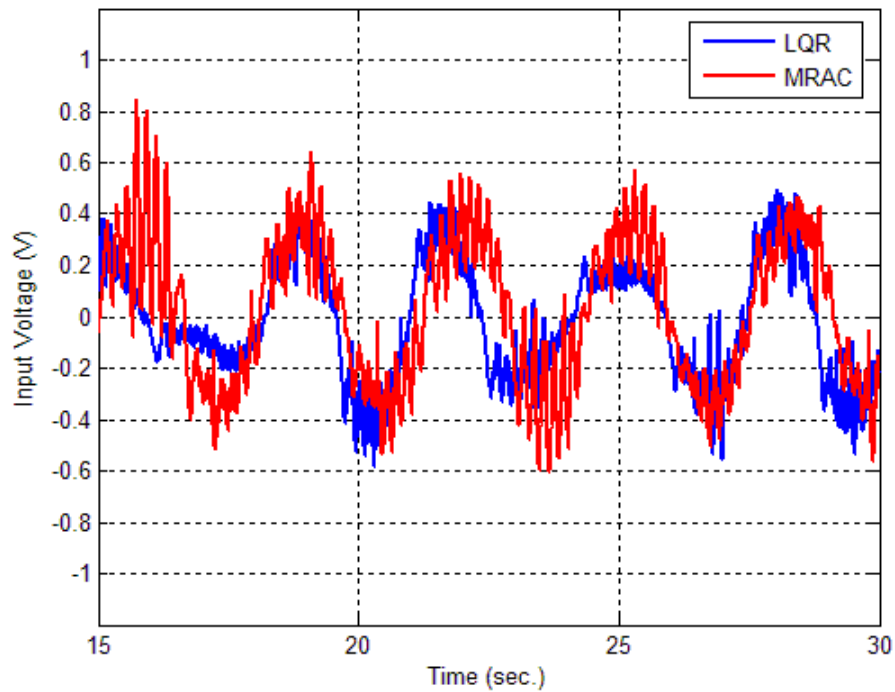
รูปที่ 4.12 ผลการทดลองการควบคุมการติดตามตำแหน่งระหว่างมุมของเพนดูลัมกับเวลา ในช่วงเวลา 0-15 sec.



รูปที่ 4.13 ผลการทดลองการควบคุมการติดตามตำแหน่งระหว่างมุมของเพนดูลัมกับเวลา ในช่วงเวลา 15-30 sec.



รูปที่ 4.14 ผลการทดลองการควบคุมการติดตามตำแหน่งระหว่างสัญญาณ โวลต์ขาเข้ากับเวลา ในช่วงเวลา 0-15 sec.



รูปที่ 4.15 ผลการทดลองการควบคุมการติดตามตำแหน่งระหว่างสัญญาณ โวลต์ขาเข้ากับเวลา ในช่วงเวลา 15-30 sec.

ผลการทดลองการควบคุมการติดตามตำแหน่งของระบบอินเวอร์ทเพนดูลัม เมื่อพิจารณาตำแหน่งของเพนดูลัมดังรูปที่ 4.10 และ 4.11 ตัวควบคุม LQR จะมีการเหลื่อมล้ำของสัญญาณออกจากสัญญาณอ้างอิงในช่วงวินาทีที่ 4 ถึง 10 และในช่วงวินาทีที่ 12 ถึง 18 ส่วนตัวควบคุม MRAC สังเกตว่า จะมีค่าโอเวอร์ชูทเกิดขึ้นเล็กน้อย แต่ยังสามารถติดตามตำแหน่งได้ใกล้เคียงกับสัญญาณอ้างอิง เมื่อพิจารณามุมเอียงของเพนดูลัมดังรูปที่ 4.12 และ 4.13 ตัวควบคุม LQR จะมีการแกว่งของสัญญาณที่ไม่คงที่ ส่วนตัวควบคุม MRAC จะมีการแกว่งของสัญญาณที่คงที่ และตัวควบคุมทั้งสองยังสามารถรักษาเสถียรภาพของเพนดูลัมอยู่ได้



บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมแบบปรับตัวชนิด MRAC สำหรับระบบอินเวอร์ทเพนดูลัม ตัวควบคุมความเสถียรภาพถูกออกแบบโดยทฤษฎีเลียปูนอฟ โดยจุดประสงค์คือต้องการควบคุมให้เพนดูลัมสามารถรักษาเสถียรภาพ ณ ตำแหน่งสมดุล เพื่อเปรียบเทียบตัวควบคุมที่มีค่าอัตราขยายแบบปรับตัว และตัวควบคุมที่มีค่าอัตราขยายคงที่จึงได้นำตัวควบคุม LQR มาใช้ในการทดลองเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการควบคุม ในเบื้องต้นได้จำลองการทดลองของระบบโดยใช้โปรแกรม MATLAB การหาแบบจำลองสมการทางคณิตศาสตร์ของระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมได้นำสมการลากรองจ์มาช่วยในการหาแบบจำลอง แต่เนื่องจากสมการการเคลื่อนที่ของระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมที่หาได้เป็นสมการที่ไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นจึงได้ประมาณแบบจำลองสมการคณิตศาสตร์ของระบบโดยการทำให้เป็นเชิงเส้นเสียก่อน แล้วจึงนำไปใช้ในการออกแบบตัวควบคุมต่อไป นอกจากนี้ระบบมีตัวแปรบางตัวที่ไม่ทราบค่าจึงได้ใช้ตัวสังเกตมาช่วยในการประมาณค่าตัวแปรสถานะ

การทดลองแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ ส่วนแรกการทดลองการควบคุมการรักษาเสถียรภาพของระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมโดยมีจุดประสงค์คือ ต้องการให้เพนดูลัมสามารถรักษาเสถียรภาพเอาไว้ได้ ส่วนการทดลองที่สองคือการทดลองการควบคุมการติดตามตำแหน่งของระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมเพื่อทดสอบระบบเมื่อมีตัวรบกวนภายในระบบ โดยมีจุดประสงค์คือทดสอบความสามารถของตัวควบคุมในการติดตามตำแหน่งตามสัญญาณขาเข้าอ้างอิง โดยที่เพนดูลัมยังสามารถรักษาเสถียรภาพเอาไว้ได้ โดยมีการปรับความถี่ของการเคลื่อนที่ในลักษณะ Sine wave ที่ความถี่ 2Hz เพื่อดูผลตอบสนองของระบบจากตัวควบคุมที่ได้ออกแบบไว้ แต่เนื่องจากมีแรงเสียดทานจากตัวรางเลื่อน ดังนั้นตัวควบคุมที่ได้จากการจำลอง จึงต้องมีการปรับปรุงให้มีความเหมาะสมต่อระบบการทดลองจริงอีกเล็กน้อย

จากผลการจำลองและผลการทดลองการรักษาเสถียรภาพของระบบอินเวอร์ทเพนดูลัม ในหัวข้อที่ 4.1 และ 4.3 พบว่าในการทดลองตัวควบคุม LQR และ MRAC สามารถรักษาเสถียรภาพของระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมเอาไว้ได้ นั่นคือสามารถเลี้ยงให้เพนดูลัมให้ตั้งตรงอยู่ได้ โดยใช้เวลาในการเข้าสู่จุดสมดุลประมาณ 4 วินาที ซึ่งผลการทดลองกับระบบจริงมีทิศทางเดียวกับผลการจำลองโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ ส่วนผลการจำลองการควบคุมการติดตามตำแหน่งของระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมในหัวข้อที่ 4.2 เพื่อพิจารณาดำเนินการของรตรางดังรูปที่ 4.4 ตัวควบคุม LQR มีการตอบสนองที่ช้า

กว่าค่าสัญญาณอ้างอิงประมาณ 0.5 วินาที ส่วนตัวควบคุม MRAC สามารถติดตามตำแหน่งสัญญาณอ้างอิงได้ใกล้เคียงกับสัญญาณอ้างอิง ส่วนผลการทดลองการควบคุมการติดตามตำแหน่งของระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมในหัวข้อที่ 4.4 เพื่อพิจารณาค่าแห่งของรตรางดังรูปที่ 4.10 และ 4.11 ตัวควบคุม LQR มีการเหลื่อมล้ำของสัญญาณเมื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณขาเข้าอ้างอิง โดยมีการเหลื่อมล้ำของสัญญาณในช่วงวินาทีที่ 4 ถึง 10 และเกิดขึ้นอีกในช่วงวินาทีที่ 12 ถึง 18 ซึ่งจะเห็นว่าตัวควบคุม LQR พยายามรักษาตำแหน่งการเคลื่อนที่ให้เป็นไปตามสัญญาณอ้างอิง แต่เนื่องจากการตอบสนองที่ไม่คงที่จึงทำให้เกิดการเหลื่อมล้ำของสัญญาณ ส่วนตัวควบคุม MRAC เมื่อพิจารณาการติดตามสัญญาณอ้างอิงจะเห็นว่ามิโอเวอร์ชุต เกิดขึ้นเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับสัญญาณขาเข้าอ้างอิง แต่ยังคงติดตามตำแหน่งได้ใกล้เคียงและคงที่กับสัญญาณอ้างอิงตลอดช่วงการทดลอง และเพนดูลัมยังคงรักษาเสถียรภาพเอาไว้ได้ เมื่อพิจารณามุมของเพนดูลัมดังรูปที่ 4.12 และ 4.13 ตัวควบคุม MRAC จะมีสัญญาณที่คงที่กว่าตั้งแต่ 0 ถึง 0.02 rad ส่วนตัวควบคุม LQR จะมีการแกว่งของสัญญาณที่ไม่คงที่ตั้งแต่ 0 ถึง 0.015 rad

เมื่อพิจารณาตัวควบคุม LQR และ MRAC แล้วจะเห็นได้ว่าการทดลองการรักษาเสถียรภาพ ตัวควบคุมทั้งสองสามารถเข้าสู่สมดุลและรักษาเสถียรภาพของระบบเอาไว้ได้ และยังสามารถเข้าสู่สมดุลได้ในเวลาที่ใกล้เคียงกัน ส่วนในการทดลองการติดตามตำแหน่งตัวควบคุม LQR มีการเหลื่อมล้ำของสัญญาณและไม่คงที่ ส่วนตัวควบคุม MRAC สามารถติดตามตำแหน่งใกล้เคียงและคงที่ แสดงให้เห็นว่าค่าอัตราขยายมีความยืดหยุ่น สามารถปรับค่าไปตามสัญญาณอ้างอิงในระบบได้ใกล้เคียงกว่าตัวควบคุม LQR

5.2 ปัญหาที่พบในการวิจัยและแนวทางในการแก้ปัญหา

- 5.2.1 กล้องความเร็วสูงที่ติดตั้งอาจมีมุมเอียงเกิดขึ้นในขณะที่ทำการทดลองเล็กน้อย เนื่องจากการสั่นสะเทือนของชุดการทดลอง ดังนั้นจึงควรมีการปรับเทียบ (Calibration) กล้องทุกครั้งก่อนทำการทดลอง เพื่อให้ผลการทดลองมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้น
- 5.2.2 มีสัญญาณรบกวนทางไฟฟ้าภายในระบบ ทำให้การทำงานของมอเตอร์ไม่นิ่ง และต้องทำการปรับออฟเซต (Offset) การจ่ายไฟก่อนทำการทดลอง ดังนั้นจึงควรแยกอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับการทดลองออกจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าและควรมีอุปกรณ์กรองไฟ เพื่อลดการรบกวนจากสัญญาณทางไฟฟ้า

5.3 ข้อเสนอแนะและแนวทางการพัฒนา

- 5.3.1 เนื่องจากรางเลื่อนที่ใช้ในการทดลองมีระยะ 0.55 m และกึ่งกลางความเร็วสูงมีระยะในการจับภาพที่แคบทำให้เกิดข้อจำกัดในการเคลื่อนที่ของเพนดูลัม ดังนั้นจึงควรเพิ่มความยาวของรางเลื่อน และติดตั้งกึ่งกลางความเร็วสูงให้อยู่ห่างจากวัตถุมากขึ้นเพื่อทำให้เกิดมุมที่กว้างมากขึ้น
- 5.3.2 เนื่องจากตัวควบคุม MRAC ยังมีสัญญาณโอเวอร์ชูทเกิดขึ้น เพื่อให้ระบบมีเสถียรภาพและสัญญาณมีความคงที่ของมากขึ้น จึงควรเพิ่มตัวควบคุมภายในระบบ เช่น ตัวควบคุม โรบัสต์ เพื่อให้สัญญาณของระบบมีความคงที่มากยิ่งขึ้น
- 5.3.3 เนื่องจากการวิจัยระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมและรอราง มีการทดลองการรักษาเสถียรภาพ ณ จุดสมดุลบนเท่านั้น ดังนั้นเพื่อเพิ่มความหลากหลายในการทดลองระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมจึงควรเพิ่มการทดลองระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมแบบเหวี่ยงขึ้น (Swing up) จากจุดสมดุลล่างขึ้นสู่จุดสมดุลบน



เอกสารอ้างอิง

- [1] Han Y., Tzoneva R. and Behardien S., **“MATLAB, LabVIEW and FPGA Linear Control of an Inverted Pendulum,”** IEEE (Electronic), 2007, pp. 1-7, IEEE organization/IEEEXplorer (15 February 2009)
- [2] Panya S., **“Hybrid PD-Sliding Mode Controller Design for Inverted Pendulum on Cart System,”** Control Engineering, School of Control Engineering, King Mongkut’s Institute of Technology Ladkrabang, 2007
- [3] Muskinja N. and Tovornik B., **“Adaptive State Controller for Inverted Pendulum,”** 2005, Available : <http://med.ee.nd.edu/> (23 March 2009)
- [4] Nundrakwang S., **“Swinging Up and Stabilizing Control of The Inverted Pendulum On Cart,”** Control Engineering, School of Control Engineering, King Mongkut’s Institute of Technology Ladkrabang, 2005
- [5] Keo L., **“Implementation and Controller Design of A Mobile Inverted Pendulum,”** Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, 2006
- [6] Zhang W., **“Two Stage Inverted Pendulum,”** 1996, Available : <http://www.aptronix.com/-fuzzynet>, (5 August 2009)
- [7] Printrakoon W., **“Swinging Up and Stabilizing Controllers for Rotational Inverted Pendulum System,”** Control Engineering, School of Control Engineering, King Mongkut’s Institute of Technology Ladkrabang, 2008
- [8] Wangwarunyoo W., **“Inverted Pendulum Control by Using Image Sensing and Fuzzy Logic,”** Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, 2001
- [9] Borikuppakul P., **“Design of an Adaptive Integral Backstepping Controller for Permanent Magnet Synchronous Motors,”** Electrical Engineering, School of Electrical Engineering, King Mongkut’s University of Technology North Bangkok, 2003
- [10] Eiamampai C., **“Position Control of DC Motors by MRAC,”** Electrical Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut’s Institute of Technology Ladkrabang, 2008
- [11] Slotine E. J. and Weiping L., **“Applied Nonlinear Control,”** Prentice-Hall International Editions, 1991, pp. 57-83
- [12] Narendra S. K. and Annaswamy M. A., **“Stable Adaptive System,”** Prentice-Hall International Inc., 1989, pp. 50-62

- [13] Richard C. D. and Robert H. B., “**Solution Manual to Accompany Modern Control Systems,**” Prentice-Hall International Inc., 2008, pp. 205-207
- [14] มนุสึศักดิ์ จานทอง และ ธนัช ศรีพนม, “**การออกแบบตัวควบคุมสำหรับเซอร์โวนิวแมติกในระบบที่ไม่มีเสถียรภาพ,**” การประชุมทางวิชาการ การพัฒนาชนบทที่ยั่งยืน, มกราคม 2552, มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2552





ภาคผนวก

ภาคผนวก ก รายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

ภาคผนวก ข โปรแกรมที่ใช้ในการทดลอง

ภาคผนวก ค ผลงานวิจัยตีพิมพ์เผยแพร่



ภาคผนวก ก
รายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

ก.1 เครื่องคอมพิวเตอร์ (Computer)

เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลใช้ในการทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของระบบอินเวอร์ทเพน-ดูล้ม โดยใช้การทำงานของคอมพิวเตอร์สองเครื่องคือ Host computer ใช้เป็นเครื่องคอมพิวเตอร์หลักในการควบคุมการรักษาเสถียรภาพของระบบโดยใช้โปรแกรม MATLAB พร้อมทั้งรับข้อมูลภาพจากกล้องความเร็วสูงและ Target computer ใช้ในการรับข้อมูลตำแหน่งของรตรางจากเอนโค้ดเดอร์และควบคุมการทำงานของไคร้เพื่อควบคุมมอเตอร์

ก.2 รางเลื่อนแบบเชิงเส้น

ตัวรางเลื่อนรุ่น PDU2 ผลิตโดย HEPCO ทำจากอลูมิเนียมมีความเสียดทานต่ำสามารถรับน้ำหนักได้ 5 N-m โดยมีข้อมูลจำเพาะดังตารางที่ ก.1

ตารางที่ ก.1 ข้อมูลจำเพาะของรางเลื่อน

Pulley radius	r	(cm)	1.53
Max linear force	Fmax	(N)	280
Linear move per shaft rev		(mm)	96
Weight of whole T slot beam unit		(kg)	$0.0022 \times L + 1.4$
Weight of whole plain unit		(kg)	$0.0035 \times L + 1.4$

ก.3 มอเตอร์และไคร้

เซอร์โวมอเตอร์รุ่น TS3738N4E11 ผลิตโดย Shibura Engineering Work Co., LTD มีข้อมูลจำเพาะดังตารางที่ ก.2

ตารางที่ ก.2 ข้อมูลจำเพาะของมอเตอร์

Rated Output	80 W
Rated Speed	2800 rpm
Rated Torque	2.6 kg-cm

มอเตอร์ไคร้รุ่น ASP-090-09 ผลิตโดย Copley Controls Corp. มีข้อมูลจำเพาะดังตารางที่ ก.3

ตารางที่ ก.3 ข้อมูลจำเพาะของไคร้

Input		Output		
Volts	Amps	Volts	Amps	
20-90 DC	10 DC peak	90 DC max.	3 DC cont.	9 DC peak

ก.4 กล้องความเร็วสูง

กล้องดิจิทัลความเร็วสูงรุ่น Inspecta-5 Frame Grabber ผลิตโดย Mikrotron GmbH มีข้อมูลจำเพาะดังตารางที่ ก.4

ตารางที่ ก.4 ข้อมูลกล้องความเร็วสูง

Video input	8 Bit
Video data format	Full camera link
Video data bandwidth	660 Mbytes/sec.
Transfer rate	400 MByte/sec.
Frame rate	600 frame/sec.
Power supply	+3.3 V DC/2,5 A +5V

ก.5 เอนโค้ดเดอร์แบบหมุนสำหรับวัดตำแหน่งรอราง

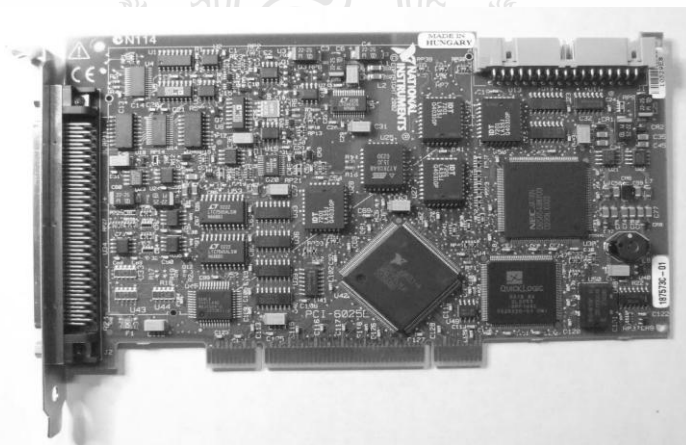
เอนโค้ดเดอร์แบบหมุน รุ่น R01337 ผลิตโดย IFM Electronic ติดตั้งอยู่ด้านปลายซึ่งต่อกับเพลลาของมอเตอร์ ใช้ทำหน้าที่รับสัญญาณการหมุนของมอเตอร์เพื่อนำมาคำนวณหาระยะทางการเคลื่อนที่ของรอราง มีความละเอียด 2048 พัลส์ต่อการหมุน 1 รอบ ซึ่งสามารถนำสัญญาณพัลส์นี้มาคำนวณหาระยะทางของมอเตอร์โดยใช้ข้อมูลจากตารางที่ ก.1 ซึ่ง 1 พัลส์สามารถวัดตำแหน่งระยะทางได้ 0.000046875 m การติดตั้งเอนโค้ดเดอร์แบบหมุนกับมอเตอร์แสดงดังรูปที่ ก.1



รูปที่ ก.1 เอนโค้ดเดอร์แบบหมุน

ก.6 การ์ด DAQ

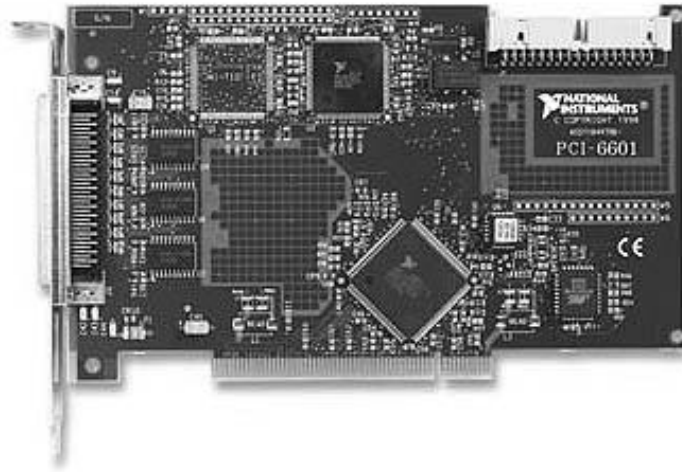
การ์ด DAQ NI PCI-6025E ผลิตโดย National Instruments ทำหน้าที่เก็บข้อมูลและแปลงสัญญาณทั้ง Analog (I/O), Digital (I/O), Timing (I/O) และ Trigger โดยมีการแปลงสัญญาณจากดิจิทัลเป็นอนาล็อกหรืออนาล็อกเป็นดิจิทัล เก็บข้อมูลสัญญาณทางไฟฟ้าและเซนเซอร์ซึ่งรับสัญญาณจากอุปกรณ์ที่ใช้ทดลอง และนำไปประมวลผล



รูปที่ ก.2 การ์ด DAQ

ก.7 การ์ด Counter/Timer

การ์ด Counter/Timer PCI NI-6601 ผลิตโดย National Instruments ทำหน้าที่จับเวลาและนับจำนวนสัญญาณจากเอนโค้ดเดอร์ ใช้วัดความกว้างและความถี่โดยรับสัญญาณพัลส์จากเอนโค้ดเดอร์ที่ต่อกับมอเตอร์ที่ใช้ทดลอง



รูปที่ ก.3 การ์ด Counter/Timer





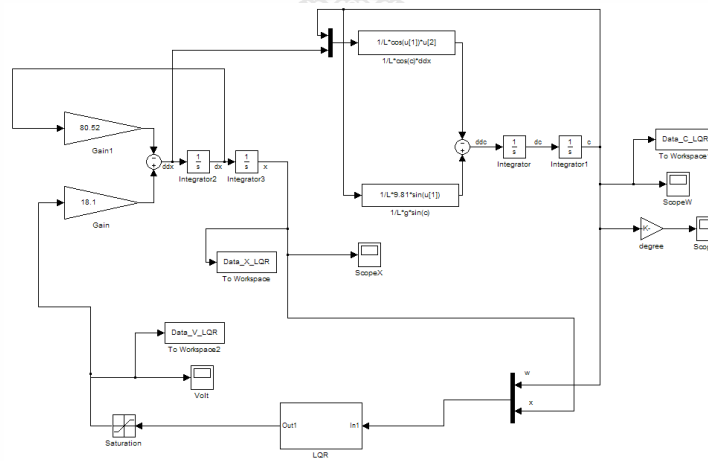
ภาคผนวก ข
โปรแกรมที่ใช้ในการทดลอง

ในการจำลองการทดลองระบบอินเวอร์ทเพนดูลัมในการวิจัย จะใช้โปรแกรม MATLAB เพื่อจำลองการทดลองก่อนการทำการทดลองจริงเพื่อผลการทำงานของตัวควบคุมที่ได้ออกแบบไว้ และจึงนำค่าที่ได้ไปใช้กับการทดลองจริง โดยแบ่งเป็นบล็อกโปรแกรมการจำลองและการทดลองดังนี้

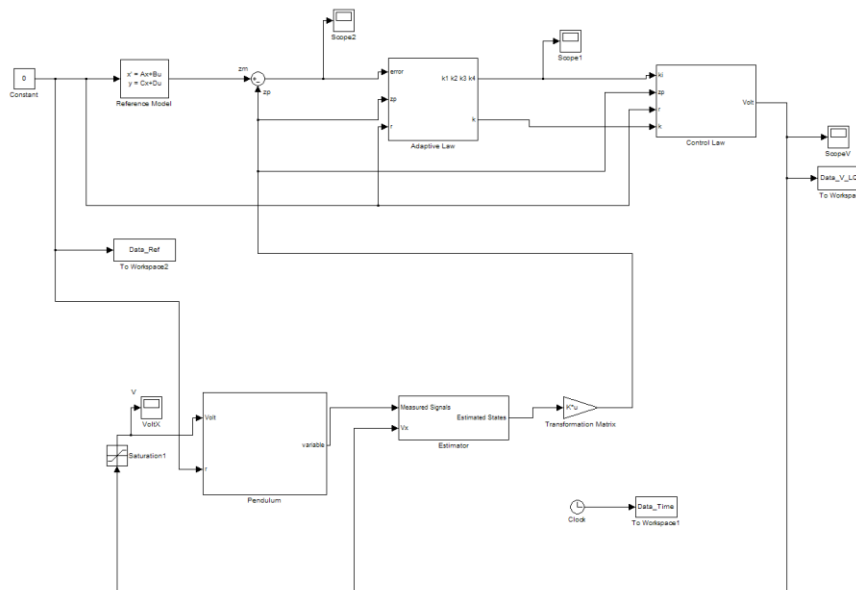
ข.1 โปรแกรมที่ใช้ในการจำลองระบบอินเวอร์ทเพนดูลัม

บล็อกการจำลองการควบคุมการรักษาเสถียรภาพ และการควบคุมการติดตามตำแหน่ง สามารถแบ่งเป็นตัวควบคุม LQR และ MRAC ดังนี้

ข.1.1 บล็อกการจำลองการควบคุมการรักษาเสถียรภาพของระบบอินเวอร์ทเพนดูลัม

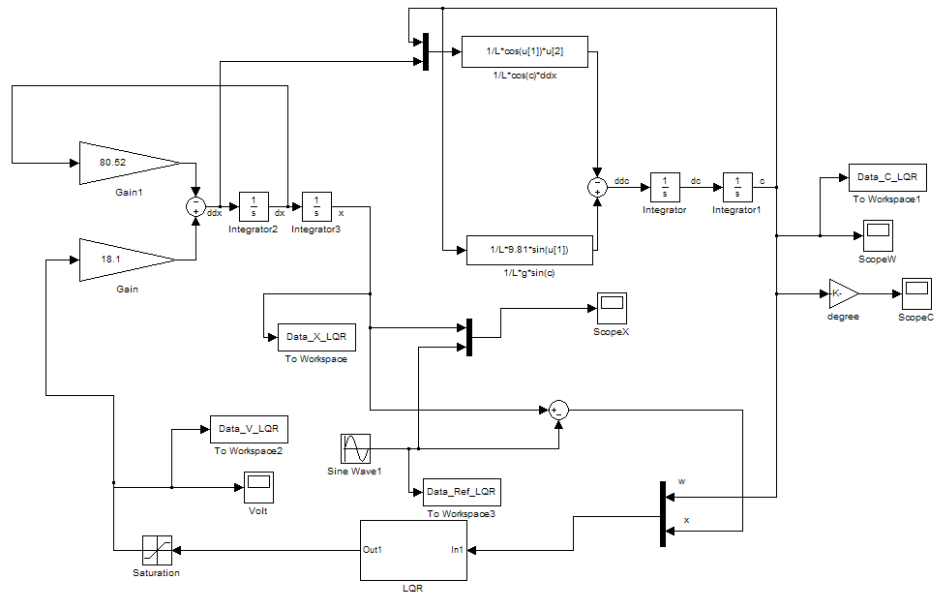


รูปที่ ข.1 บล็อกตัวควบคุม LQR สำหรับการจำลองการควบคุมการรักษาเสถียรภาพ

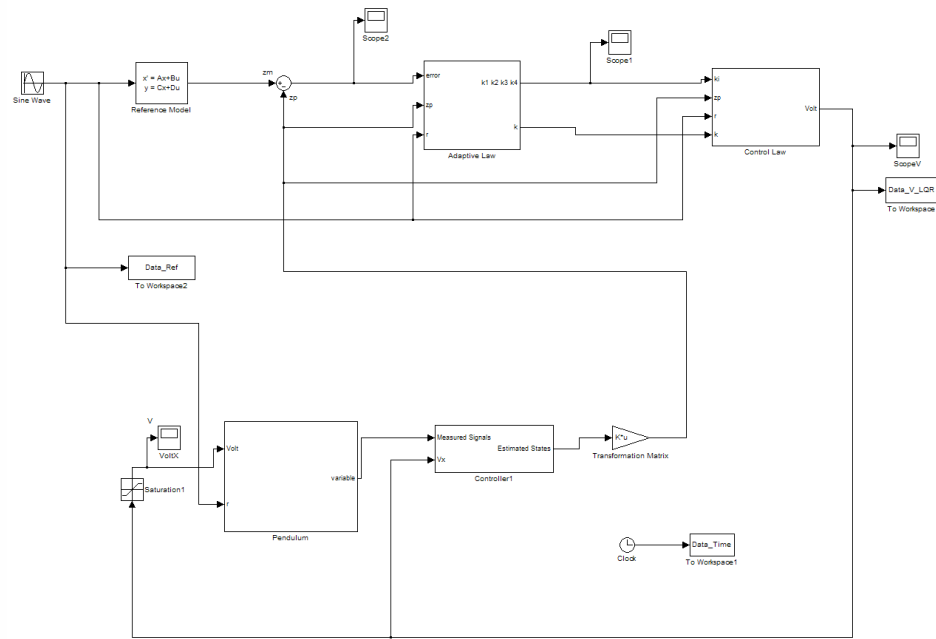


รูปที่ ข.2 บล็อกตัวควบคุม MRAC สำหรับการจำลองการควบคุมการรักษาเสถียรภาพ

ข.1.2 ปล๊อการจำลองการควบคุมการติดตามตำแหน่งของระบบอินเวอร์ทเพนดูลัม



รูปที่ ข.3 ปล๊อตัวควบคุม MRAC สำหรับการจำลองการควบคุมการติดตามตำแหน่ง

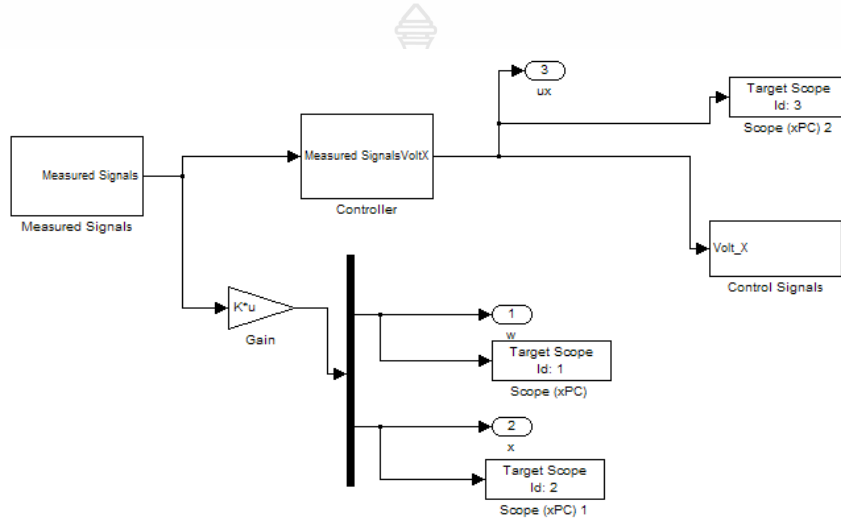


รูปที่ ข.4 ปล๊อตัวควบคุม MRAC สำหรับการจำลองการควบคุมการติดตามตำแหน่ง

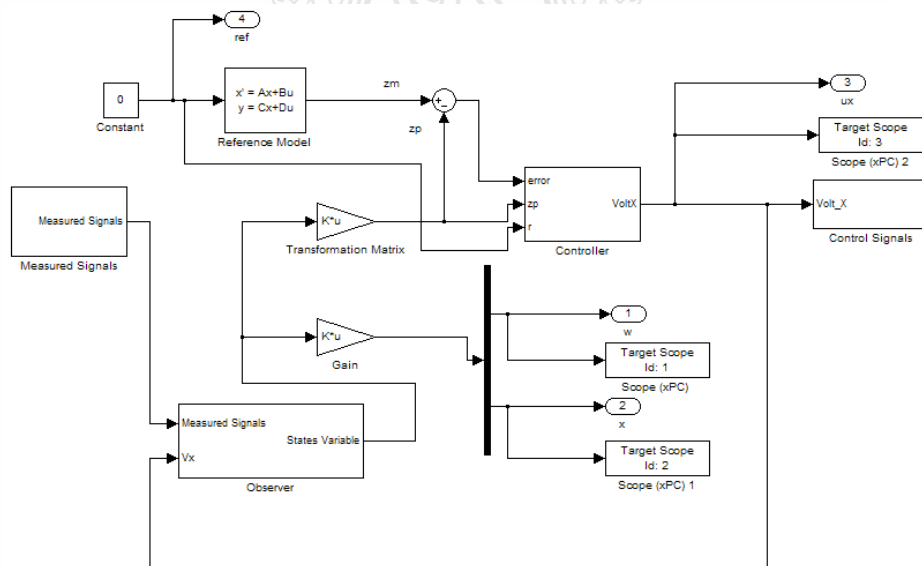
ข.2 โปรแกรมที่ใช้ในการทดลองระบบอินเวอร์ทเพนดูลัม

บล็อกการทดลองการควบคุมการรักษาเสถียรภาพ และการควบคุมการติดตามตำแหน่ง สามารถแบ่งเป็นตัวควบคุม LQR และ MRAC ดังนี้

ข.2.1 บล็อกการทดลองการควบคุมการรักษาเสถียรภาพของระบบอินเวอร์ทเพนดูลัม

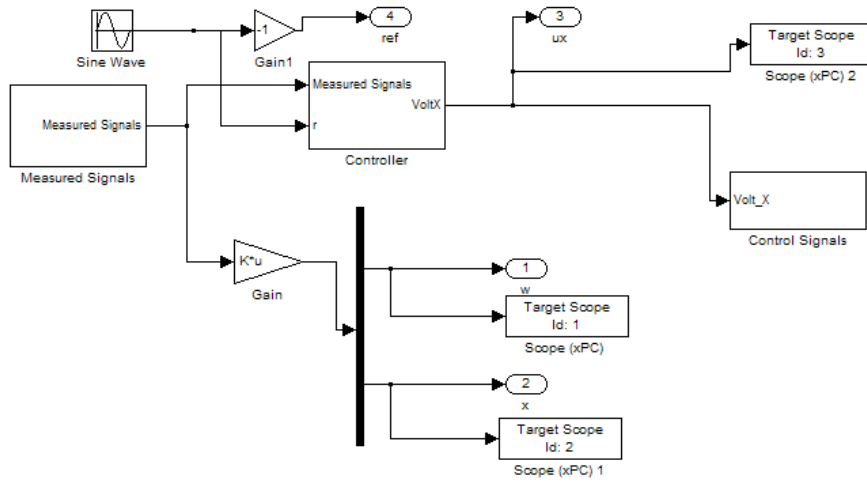


รูปที่ ข.5 บล็อกตัวควบคุม LQR สำหรับการทดลองการควบคุมการรักษาเสถียรภาพ

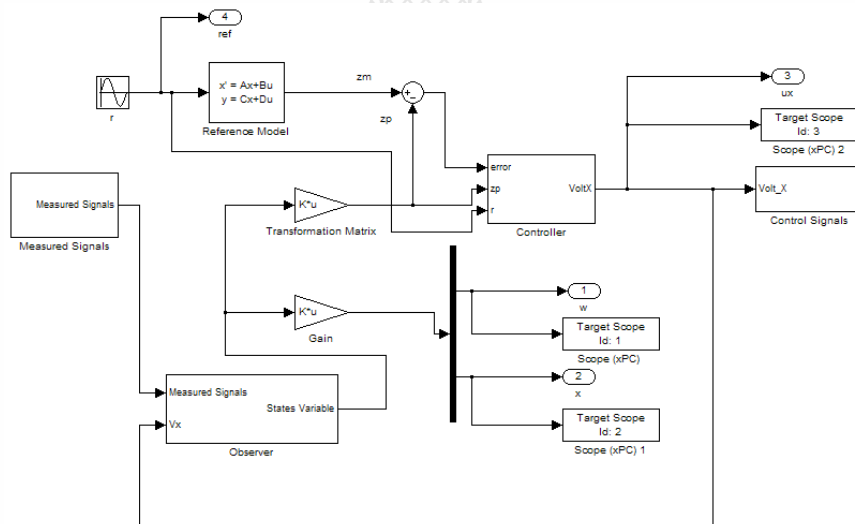


รูปที่ ข.6 บล็อกตัวควบคุม MRAC สำหรับการทดลองการควบคุมการรักษาเสถียรภาพ

ข.2.2 บล็อกการทดลองการควบคุมการติดตามตำแหน่งของระบบอินเวอร์ท์เพนดูลัม



รูปที่ ข.7 บล็อกตัวควบคุม MRAC สำหรับการทดลองการควบคุมการติดตามตำแหน่ง



รูปที่ ข.8 บล็อกตัวควบคุม MRAC สำหรับการทดลองการควบคุมการติดตามตำแหน่ง



ภาคผนวก ค

ผลงานวิจัยตีพิมพ์เผยแพร่

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - นามสกุล นายณัฐพงษ์ จิตมานะ
วัน เดือน ปีเกิด 20 กรกฎาคม 2527
ที่อยู่ 67/224 ม.ชวนชื่นบางเขน หมู่1 ถนนแจ้งวัฒนะ
แขวงทุ่งสองห้อง เขตหลักสี่ กรุงเทพฯ 10210
ประวัติการศึกษา สำเร็จการศึกษาระดับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมเครื่องกล
จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เมื่อ พ.ศ.2550

ผลงานวิจัย

ณัฐพงษ์ จิตมานะ, การออกแบบตัวควบคุมแบบปรับตัวได้ชนิดโมเดลอ้างอิงสำหรับระบบ
ลูกตุ้มผกผัน, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 24 วันที่ 20-22
ตุลาคม 2553 มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

