การออกแบบระบบควบคุมแบบปรับตัวได้ เพื่อใช้ ในการควบคุมแขนกล CRS A255 แบบ 3 แกนให้เคลื่อนที่ตามเส้นทางที่กำหนด

ADAPTIVE CONTROL DESIGN FOR TRAJECTORY TRACKING OF 3-AXIS CRS A255 ROBOT MANIPULATOR ARM

คมกฤช อาษากิจ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การออกแบบระบบควบคุมแบบปรับตัวได้ เพื่อใช้ ในการควบคุมแขนกล CRS A255 แบบ 3 แกนให้เคลื่อนที่ตามเส้นทางที่กำหนด

คมกฤช อาษากิจ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบระบบควบคุมแบบปรับตัวได้ เพื่อใช้ในการควบคุมแขนกล CRS A255 แบบ 3 แกนให้เคลื่อนที่ตามเส้นทางที่กำหนด
นักศึกษา	นายคมกฤช อาษากิจ
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.ปรัชญา เปรมปราณีรัชต์
ปีการศึกษา	2554

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ นำเสนอการออกแบบระบบควบคุมแบบปรับตัวได้ ที่ไม่เชิงเส้นเพื่อใช้ควบคุมแขนหุ่นยนต์ CRS รุ่น A255 แบบ 3 แกน ให้เคลื่อนที่เป็นแบบฟังก์ชั่นซายน์ ตามที่กำหนดได้อย่างมีประสิทธิภาพตามที่ออกแบบไว้

การศึกษาเริ่มจากทำการวางแผนแบบจำลองโดยใช้ระบบควบคุมแบบปรับตัวได้ หรือที่เรียกว่า Model Reference Adaptive Control (MRAC) ในรูปแบบอ้างอิงโดยใช้ระบบควบคุมแบบปรับตัวได้ ในการจำลอง การควบคุมการเคลื่อนที่แขนหุ่นยนต์ CRS A225 แบบ 3 แกน ให้เคลื่อนที่ตามเส้นทางที่กำหนดโดยใช้โปรแกรม Matlab/Simulink ผลที่ได้จากแบบจำลองจะแสดงให้เห็นว่าระบบควบคุมแบบปรับตัวได้ สามารถประมาณค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของแขนกลในแต่ละแกนได้อย่างถูกต้องและความผิดพลาดในการเคลื่อนที่จะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ภายในเวลา 4 วินาที

ส่วนการทดลองกับแขนกลจริงจะเปรียบเทียบการเคลื่อนที่ของแขนกลระหว่างระบบควบคุมแบบพีไอดี (PID) กับระบบควบคุมแบบปรับตัวได้ (Adaptive) โดยใช้โปรแกรม LabVIEW เมื่อเส้นทางที่กำหนดเป็นแบบฟังก์ชั่นซายน์จะเห็นได้ว่าการเคลื่อนที่แบบระบบควบคุมแบบปรับตัวได้ นั้นมีค่าความผิดพลาดและแรงบิดที่ราบเรียบกว่าการเคลื่อนที่แบบระบบควบคุมแบบพีไอดี ดังนั้นระบบควบคุมแบบปรับตัวได้ จึงเหมาะที่จะนำมาควบคุมเส้นทางการเคลื่อนที่มากกว่าแบบระบบควบคุมแบบพีไอดี

คำสำคัญ: การควบคุมแบบปรับตัวได้ที่ใช้แบบจำลองอ้างอิง การเคลื่อนที่ตามเส้นทางที่กำหนด แขนกล CRS รุ่น A255

Thesis Title	Adaptive Control Design for Trajectory Tracking of 3-axis CRS A255 Robot Manipulator arm
Name - Surname	Mr. Khomkrit Asakit
Program	Mechanical Engineering
Thesis Advisor	Dr. Pradya Prempraneerach
Academic Year	2011

ABSTRACT

This thesis focuses on a design of adaptive controller for controlling a nonlinear trajectory control of a 3-axis CRS A225 robot manipulator arm such that each joint of the robot arm can track a specified sinusoidal motion effectively.

First, a simulation of the 3-axis CRS robot arm, implemented in Matlab/Simulink, is controlled by the Model Reference Adaptive Control (MRAC) that requires a reference model to estimate unknown plant parameters: moment of inertia for each link. Simulation results show that adaptation law in the adaptive control can estimate moments of each link correctly within 4 second.

Second, the sinusoidal trajectory tracking experiments are performed with the 3-axis CRS A225 robot arm using both PID and MRAC controllers, implemented in LabVIEW. For a performance comparison between PID control and MRAC control on trajectory tracking, the results with MRAC control show smaller tracking error as well as less oscillation in joint torque than that with PID control. As a result, the adaptive control is more suitable for trajectory tracking of the 3-axis CRS robot arm than the PID control.

Keywords: Model Reference Adaptive Control, Trajectory Tracking, CRS Robotic A255 ARM

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบระบบควบคุมแบบปรับตัวได้ เพื่อใช้ ในการควบคุมแขนกล CRS A255 แบบ 3 แกนให้เคลื่อนที่ตามเส้นทางที่กำหนด ADAPTIVE CONTROL DESIGN FOR TRAJECTORY TRACKING OF 3-AXIS CRS A255 ROBOT MANIPULATOR ARM
นักศึกษา	นายคมกฤช อาษากิจ
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.ปรัชญา เปรมปราณีรัชต์
ปีการศึกษา	2554

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

....ประธานกรรมการ
( )

....กรรมการ
( )

....กรรมการ
( )

....กรรมการ
( )

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
( )
วันที่..........เดือน.....................พ.ศ.........

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความเมตตากรุณาอย่างสูงจาก ดร.ปรัชญา เปรมปราณีรัชต์ประธานกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ดร. พิพัฒน์ ปราโมทย์ ดร. มนูศักดิ์ จานทอง กรรมการวิชาเอก และผู้ทรงคุณวุฒิ ที่กรุณาให้คำแนะนำและให้คำปรึกษาตลอดจนให้ความช่วยเหลือแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ ซึ่งผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอขอบคุณผู้ทรงคุณวุฒิทั้ง 3 ท่าน ที่ให้ความอนุเคราะห์ประเมินรับรองต้นแบบชิ้นงานวิจัยและให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ในการทำวิจัย ขอขอบคุณผู้ทรงคุณวุฒิทั้ง 3 ท่านที่ให้ความอนุเคราะห์ตรวจเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย ขอขอบคุณผู้เชี่ยวชาญทั้ง 3 ท่าน ที่สละเวลาอันมีค่าตอบข้อสัมภาษณ์อันเป็นผลให้งานวิจัยมีความชัดเจน ครบถ้วนและสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้จริง และขอขอบใจนักศึกษามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้ความร่วมมืออดทนในการดำเนินกิจกรรมวิจัยร่วมกันจนได้ความสมบูรณ์ของงาน ขอขอบคุณบุคลากร บัณฑิตวิทยาลัยทุกคนที่เป็นกำลังใจ และให้ความช่วยเหลือตลอดช่วงเวลาของการศึกษาและทำการวิจัย

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิประสาทวิชา บ่มเพาะจนผู้วิจัยสามารถนำเอาหลักการมาประยุกต์ใช้และอ้างอิงในงานวิจัยครั้งนี้ นอกเหนือจากนี้ขอขอบคุณผู้บริหารมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีที่มอบทุนสนับสนุนพัฒนาบุคลากรตลอดระยะเวลาในการศึกษาของผู้วิจัย

คุณค่าอันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบเพื่อบูชาพระคุณบิดา มารดา ครู อาจารย์ และผู้มีพระคุณทุกท่าน

คมกฤช อาษากิจ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย .... ค

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .... ง

กิตติกรรมประกาศ .... จ

สารบัญ .... ฉ

สารบัญตาราง .... ซ

สารบัญภาพ .... ฌ

บทที่

1 บทนำ 1

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำวิจัย 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 2

1.3 ระเบียบวิธีวิจัย 3

1.4 ขอบเขตของการวิจัย 3

1.5 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย 4

1.6 ขั้นตอนการศึกษา 5

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 6

2 ทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง 7

2.1 ความมีเสถียรภาพและไร้เสถียรภาพ 7

2.2 เสถียรภาพเชิงแบบลู่เข้า 8

2.3 เสถียรภาพแบบเอ็กโปเนนเชียล 10

2.4 เสถียรภาพเฉพาะที่และเสถียรภาพโดยรวม 10

2.5 วิธีทางตรงของลีอาปูนอป 11

2.6 ทฤษฎีจลนศาสตร์ 13

2.7 เมตริกซ์การหมุน 14

2.8 พารามิเตอร์ของ Denavit – Hartenberg 15

2.9 แนวความคิดในการควบคุมแบบปรับตัว 16

2.10 การควบคุมแบบปรับตัวได้แบบอ้างอิงกับแบบจำลอง (MRAC) 17

2.11 การออกแบบระบบควบคุมของแขนหุ่นยนต์ 19

2.12 การควบคุมตำแหน่ง 21

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ หน้า

3 วิธีดำเนินงานวิจัย 23

3.1 หุ่นยนต์ต้นแบบ CRS Robot 23

3.2 วิเคราะห์สมการการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ที่ควบคุมด้วยระบบควบคุมแบบ PD 25

3.3 วิเคราะห์การเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ CRS ที่ควบคุมด้วยระบบควบคุม Adaptive 31

4 ผลการทดลอง 36

4.1 ผลการจำลองการควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกลด้วยระบบควบคุมแบบปรับตัวได้ 36

4.2 เปรียบเทียบผลการทดลองการควบคุมการเคลื่อนที่ของเฉพาะแกนที่ 1 ระหว่าง
ระบบควบคุมแบบพีไอดีและระบบควบคุมแบบปรับตัวได้ 38

4.3 เปรียบเทียบผลการทดลองการควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกลเฉพาะแกนที่ 1 และ 2
ระหว่างระบบควบคุมแบบพีไอดีและระบบควบคุมแบบปรับตัวได้แบบมีค่าความชดเชย
สำหรับมุมของแกนที่ 2 40

4.4 เปรียบเทียบผลการทดลองการควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกลเฉพาะแกนที่ 1 และ 2
ระหว่างระบบควบคุมแบบพีไอดีและระบบควบคุมแบบปรับตัวได้แบบ
ไม่มีค่าความชดเชย 42

4.5 เปรียบเทียบผลการทดลองการควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกลเฉพาะแกนที่ 1 2 และ 3
ระหว่างระบบควบคุมแบบพีไอดีและระบบควบคุมแบบปรับตัวได้แบบมีค่าความชดเชย
สำหรับมุมของแกนที่ 2 44

4.6 เปรียบเทียบผลการทดลองการควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกลเฉพาะแกนที่ 1 2 และ 3
ระหว่างระบบควบคุมแบบพีไอดีและระบบควบคุมแบบปรับตัวได้แบบ
ไม่มีค่าความชดเชย 47

5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ 50

5.1 สรุปผลการทดลอง 50

5.2 ข้อเสนอแนะ 51

รายการอ้างอิง 52

ภาคผนวก 53

ภาคผนวก ก ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่ 54

ประวัติผู้เขียน 67

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

1.1 ความยาวและมวลและโมเมนต์ความเฉื่อยของแขนกล CRS 4

1.2 แผนงานการดำเนินงานวิจัย 5

3.1 คุณสมบัติต่างๆของแขนกล CRS รุ่น A255 ที่จะใช้ในการวิจัยนี้ 24

3.2 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของแขนกล CRS 28

3.3 ค่าของตัวแปรของแขนหุ่นยนต์ในแต่ละแกน 30

3.4 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของ Adaptive Control 33

สารบัญภาพ

ภาพที่ หน้า

1.1 แขนกล CRS แบบ 3 แกน....4

1.2 ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ การ์ดรับข้อมูลและ ไมโครคอนโทรเลอร์ 5

2.1 แนวคิดเรื่องเสถียรภาพ....8

2.2 การลู่ข้าวของตัวแปรสถานะนั้นไม่ได้แสดงถึงเสถียรภาพ....9

2.3 ระบบ Mass-Damper-Spring แบบไม่เป็นเชิงเส้น....11

2.4 ตำแหน่งและทิศทางของปลายแขนกล....13

2.5 แสดงการหมุนรอบแกน Z....14

2.6 D-H rotation for revolute joints....15

2.7 หุ่นยนต์หยิบสิ่งของที่มีมวลที่ไม่แน่นอน....17

2.8 ระบบควบคุมแบบปรับตัวได้แบบอ้างอิงกับแบบจำลอง....17

2.9 แขนแบบมีส่วนเชื่อต่อ (ข้อต่อ)2 ส่วน....20

3.1 ภาพโครงสร้างของแขนกล CRS Robotic 23

3.2 ความยาวระหว่างแต่ละแกนขนาดมุมของแต่ละแขน....24

3.3 แบบจำลองการควบคุมด้วย PD Control ของแขนกลแบบ 3 แกน ด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink....28

3.4 แผนภาพการควบคุมด้วย PID Control ของแขนกล 3 แกนด้วยโปรแกรม LabVIEW....29

3.5 การตั้งแกนของแขนหุ่นยนต์ CRS....30

3.6 แบบจำลองการควบคุมด้วย Adaptive Control ของแขนกลแบบ 3 แกน ด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink....34

3.7 แผนภาพการควบคุมด้วย Adaptive Control ของแขนกล 3 แกนด้วยโปรแกรม LabVIEW .35

4.1 ภาพการจำลองการเคลื่อนที่ของแขนกลแกนที่ 1 2 และ 3 (3 รูปในหลักด้านซ้ายและ (ค่าความผิดพลาดของแขนกลแกนที่ 1 2 และ 3) 3 รูปในหลักด้านขวา(....36

4.2 การเปรียบเทียบค่าจริงและประมาณของโมเมนต์ความเฉื่อยของแขนกลในการจำลองการเคลื่อนที่ของแขนกลแกนที่ 1 2 และ 3....37

4.3 การเปรียบเทียบการเคลื่อนที่ของแขนกลแกนที่ 1 ระหว่างการใช้ระบบควบคุมแบบพีไอดี (PID) (ซ้าย(กับการใช้ระบบควบคุมแบบปรับตัวได้ (ขวา(....38

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

4.4 การเปรียบเทียบแรงบิดที่กระทำในแต่ละข้อต่อของแขนกลระหว่างการใช้ระบบควบคุมแบบพีไอดี)PID) กับการใช้ระบบควบคุมแบบปรับตัวได้ (ซ้าย)(ขวา(....39
4.5 ค่าประมาณของโมเมนต์ความเฉื่อยของแขนกลในแกนที่ 1 39
4.6 การเปรียบเทียบการเคลื่อนที่ของแขนกลแกนที่ 1 และ 2 แบบมีค่าชดเชยสำหรับมุมของแกนที่2 ระหว่างการใช้ระบบควบคุมแบบพีไอดี (PID) (ซ้าย(กับการใช้ระบบควบคุมแบบปรับตัวได้ (ขวา(....40
4.7 การเปรียบเทียบแรงบิดที่กระทำในแต่ละข้อต่อของแขนกลแบบมีค่าชดเชยสำหรับมุมของแกนที่ 2 ระหว่างการใช้ระบบควบคุมแบบพีไอดี)PID) กั (ซ้าย)บการใช้ระบบควบคุมแบบปรับตัวได้ (ขวา(....41
4.8 ค่าประมาณของโมเมนต์ความเฉื่อยของแขนกลในแกนที่ 1 และ 2 แบบมีค่าชดเชยสำหรับมุมของแกนที่ 2 41
4.9 การเปรียบเทียบการเคลื่อนที่ของแขนกลแกนที่ 1 และ 2 แบบไม่มีค่าชดเชยระหว่างการใช้ระบบควบคุมแบบพีไอดี (PID) (ซ้าย(กับการใช้ระบบควบคุมแบบปรับตัวได้ (ขวา(....43
4.10 การเปรียบเทียบแรงบิดที่กระทำในแต่ละข้อต่อของแขนกลแบบไม่มีค่าชดเชยระหว่างการใช้ระบบควบคุมแบบพีไอดี)PID) กั (ซ้าย)บการใช้ระบบควบคุมแบบปรับตัวได้ (ขวา(....43
4.11 ค่าประมาณของโมเมนต์ความเฉื่อยของแขนกลในแกนที่ 1 และ 2แบบไม่มีค่าชดเชย 44
4.12 การเปรียบเทียบการเคลื่อนที่ของแขนกลแกนที่ 1 2 และ 3 แบบมีค่าชดเชยสำหรับมุมของแกนที่2 ระหว่างการใช้ระบบควบคุมแบบพีไอดี (PID) (ซ้าย(กับการใช้ระบบควบคุมแบบปรับตัวได้ (ขวา(....45
4.13 การเปรียบเทียบแรงบิดที่กระทำในแต่ละข้อต่อของแขนกลแบบมีค่าชดเชยสำหรับมุมของแกนที่ 2 ระหว่างการใช้ระบบควบคุมแบบพีไอดี)PID) กั (ซ้าย)บการใช้ระบบควบคุมแบบปรับตัวได้ (ขวา(....46
4.14 ค่าความเฉื่อยของแขนกลแกนที่ 1 2 และ 3 แบบมีค่าชดเชยสำหรับแกนของมุมที่ 2 46
4.15 การเปรียบเทียบการเคลื่อนที่ของแขนกลแกนที่ 1 2 และ 3 แบบไม่มีค่าชดเชยระหว่างการใช้ระบบควบคุมแบบพีไอดี (PID) (ซ้าย(กับการใช้ระบบควบคุมแบบปรับตัวได้ (ขวา(....47

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่ หน้า

4.16 การเปรียบเทียบแรงบิดที่กระทำในแต่ละข้อต่อของแขนกลแบบไม่มีค่าชดเชยระหว่างการใช้ระบบควบคุมแบบพีไอดี)PID) กั (ซ้าย)บการใช้ระบบควบคุมแบบปรับตัวได้ (ขวา(....48

4.17 ค่าประมาณของโมเมนต์ความเฉื่อยของแขนกลในแกนที่ 1 2 และ 3 แบบไม่มีค่าชดเชย ..49

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำวิจัย

ในปัจจุบันเทคโนโลยีด้านต่างๆ ได้เจริญก้าวหน้าไปมากโดยเฉพาะในโรงงานอุตสาหกรรมได้มีการนำเครื่องจักรและอุปกรณ์อัตโนมัติต่างๆ มาใช้งานแทนแรงงานคนทั้งในด้านการผลิตและรับส่งชิ้นส่วนต่างๆ ภายในโรงงานสำหรับโรงงานอุตสาหกรรมที่มีความต้องการความแม่นยำสูง จึงให้ความสำคัญเป็นอย่างมากกับเครื่องจักรที่นำมาใช้ดังนั้นระบบควบคุมที่ดีจึงมีความสำคัญและระบบควบคุมแบบต่างๆก็มีประสิทธิภาพที่แตกต่างกันออกไปแล้วแต่ประเภทและการนำไปใช้งาน จึงทำให้มีระบบการควบคุมต่างๆที่สำคัญมากขึ้น ดังจะเห็นได้จากการนำระบบการควบคุมไปใช้ในอุปกรณ์ต่างๆ ต่อมาระบบมีความซับซ้อนมากขึ้น เช่น การควบคุมแขนหุ่นยนต์ การควบคุมมอเตอร์ไฟฟ้าหรืองานควบคุมเครื่องจักรกลในโรงงานอุตสาหกรรม เป็นต้น จึงได้มีการพัฒนาทฤษฎีการควบคุมแบบต่างๆ ขึ้นมามากมาย เพื่อให้สามารถควบคุมอุปกรณ์ดังกล่าวได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ที่ผ่านมามีกลุ่มนักวิจัย Louis L. Whitcomb และคณะ [3] ได้ศึกษาการทดลองเชิงเปรียบเทียบของชุดคำสั่งควบคุมแรงปรับตัวพื้นฐานแบบใหม่สำหรับแขนหุ่นยนต์โดยระบบควบคุมนี้จัดให้มีการเคลื่อนที่ตามเส้นทางของแรงและตำแหน่งในเวลาเดียวกันเพื่อให้ที่ปลายแขนหุ่นยนต์ให้อยู่ในจุดที่ติดต่อกับผิวหน้าเรียบแข็ง ระบบควบคุมที่ใช้สมการพลวัตไม่เชิงเส้นที่ยอมรับทั่วไปและพิสูจน์ได้สำหรับแขนหุ่นยนต์ จากการทดลองเชิงเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่าระบบควบคุมพื้นฐานตัวแบบปรับตัวได้แบบใหม่จัดให้มีสมรรถภาพของทั้งระบบควบคุมพื้นฐานการไม่มีตัวแบบ (นอนโมเดล)และแบบปรับตัวไม่ได้ที่เหนือกว่าพิสัยกว้างของสภาพการปฏิบัติงาน John T. Wen และคณะ [4] ได้ศึกษาการควบคุมโดยใช้ทฤษฎีแบบลีอาปูนอปซึ่งใช้พลังงานการทำงานแบบลีอาปูนอปกับพลังงานศักย์ดัดแปลง มาวิเคราะห์ความคงที่แบบเลขชี้กำลัง เมื่อมีแรงเสียดทานแบบหนืดและแบบคูลอมบ์ และความผิดพลาดของพารามิเตอร์ของระบบเกิดขึ้น การดัดแปลงแบบเลื่อนของกฎควบคุมจึงถูกนำเสนอเพื่อเพิ่มสภาพทนทานและใช้การป้อนกลับแบบลูปนอก การควบคุมการปรับตัวมีตำแหน่งอยู่ภายในโครงสร้างเดียวกันเช่นกัน Abd Manan Ahmad และคณะ [5] ได้นำเสนอแบบจำลองของตัวควบคุมเครือข่ายประสาทเทียมสำหรับแขนหุ่นยนต์แบบสามข้อต่อ เครือข่ายนี้อยู่บนพื้นฐานการจัดตั้งตัวเองของโครงข่ายโคโฮเน็นแบบดัดแปลง ในตัวแบบที่นำเสนอ เครือข่ายวกกลับและเครือข่ายเอสโอเอ็มดัดแปลงถูกนำมาเชื่อมต่อกัน Jung Hua Yang และคณะ [6] ได้ศึกษา

ปัญหาการควบคุมหุ่นยนต์ที่ยืดหยุ่นได้ โดยใช้ระบบควบคุมแบบไม่เชิงเส้น ได้ถูกนำเสนอเป็นการแก้ปัญหาต่อปัญหาการควบคุมโดยเฉพาะอย่างยิ่ง เพื่อจัดการกับความไม่แน่นอนจากภายในและภายนอกระบบที่มีอยู่ กฎการปรับตัวได้ของระบบควบคุมแบบไม่เชิงเส้นนี้จึงถูกนำเสนอ จากนั้นการพิสูจน์ความคงที่ของระบบป้อนกลับแบบปิดโดยรวมจึงถูกวิเคราะห์ด้วยทฤษฎีแบบลีอาปูนอฟ และยังมีการจัดให้มีผลการทดลอง เพื่อสาธิตประสิทธิภาพของระบบควบคุมนี้ด้วย

เนื่องจากในระบบควบคุมในโรงงานอุตสาหกรรมโดยส่วนมากแล้วจะใช้ระบบควบคุมแบบพีไอดี (PID Controller) มาทำการควบคุมซึ่งมันก็ทำงานได้ดีในช่วงที่เราประมาณการทำงานเป็นแบบเชิงเส้น (Linearization) รอบๆจุดทำงานแต่เมื่อใดก็ตามถ้าจุดทำงานของเราเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงหรือว่าพารามิเตอร์ของระบบบางตัวมีการเปลี่ยนแปลงเช่น มวลของระบบ, ความยาว และอื่นๆหรืออาจมีพารามิเตอร์ที่เราไม่ได้นำมาคิดมันจะทำให้ระบบควบคุมที่เราออกแบบไว้เริ่มทำงานไม่ได้หรือไม่สามารถทำงานได้เลย ดังนั้น ระบบควบคุมแบบปรับตัว (Adaptive Control)ได้จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่นำมาใช้แก้ปัญหานี้ โดยทั่วไปแล้วการควบคุมแบบปรับตัวแบบอ้างอิงนั้นประกอบไปด้วย 4 ส่วนได้แก่ ระบบ (Plant) ที่ประกอบไปด้วยพารามิเตอร์ที่ไม่รู้ค่าที่แน่นอน ตัวแบบอ้างอิง (Reference Model) เพื่อการระบุหรือบ่งชี้ผลลัพธ์ที่ต้องการของระบบควบคุม กฎการควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback Control Law) ที่ประกอบไปด้วยพารามิเตอร์ที่ปรับค่าได้ และกลไกการปรับตัว (Adaptation Mechanism) สำหรับการอัพเดทพารามิเตอร์ที่ปรับค่าได้

จุดสำคัญหลักๆของการควบคุมแบบปรับตัวได้ (Adaptive Control) คือมันสามารถปรับค่าคงที่ (Gain) ของกฎการควบคุมแบบป้อนกลับได้ถ้าเมื่อระบบมีการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ ดังนั้นค่าคงที่ (Gain) จะเปลี่ยนแปลงไปตามความเหมาะสม เนื่องจากมันจะนำเอาค่าความผิดพลาดที่ได้จากระบบจริงมาเปรียบเทียบกับแบบจำลองอ้างอิงที่เราออกแบบไว้ เมื่อมีค่าความผิดพลาดเกิดขึ้นค่าคงที่ (Gain) จะมีการปรับตัวโดยอัตโนมัติ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาและคำนวณหาสมการทางพลวัตที่จะนำมาใช้ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแขนกล CRS แบบ 3 แกน

1.2.3 เพื่อศึกษาและประยุกต์ใช้ทฤษฎีการควบคุมแบบปรับตัวได้กับระบบแบบไม่เชิงเส้นของแขนกล CRS และนำมาใช้ควบคุมการเคลื่อนที่ของแบบจำลองของแขนกลตามเส้นทางที่กำหนดโดยใช้ระบบควบคุมแบบปรับตัวได้ (Adaptive Control)

1.2.4 เพื่อประยุกต์ใช้ระบบควบคุมแบบปรับตัวได้ (Adaptive Control) กับแขนกล CRS แบบ 3 แกนในการทดลองจริงเพื่อใช้ควบคุมการเคลื่อนที่ของแต่ละลิงค์ตามเส้นทางที่กำหนด

1.2.5 เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกลด้วยระบบควบคุมแบบพีไอดี (PID Control) และระบบควบคุมแบบปรับตัวได้ (Adaptive Control)

1.3 ระเบียบวิธีวิจัย

1.3.1 ศึกษาโครงสร้างและการเคลื่อนที่ของแต่ละลิงค์ของแขนกล CRS แบบ 3 แกนที่จะใช้ทดลองจริง

1.3.2 ศึกษาการหาสมการทางพลวัตของแขนกล CRS แบบ 3 แกน

1.3.3 จำลองการเคลื่อนที่ของแขนกล CRS แบบ 3 แกน โดยใช้โปรแกรม Matlab/Simulink

1.3.4 ศึกษาและออกแบบระบบควบคุมแบบปรับตัวได้ (Adaptive Control)

1.3.5 วิเคราะห์การทำงานและการควบคุมการเคลื่อนที่ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแขนกลโดยใช้ระบบควบคุมแบบปรับตัวได้ (Adaptive Control) ในการควบคุมการเคลื่อนที่ตามเส้นทางที่กำหนด

1.3.6 ทดลองการทำงานของระบบควบคุมแบบปรับตัวได้และแบบพีไอดีกับแขนกล CRS โดยใช้โปรแกรม LabVIEW

1.3.7 ปรับปรุงและแก้ไขการเคลื่อนที่ของแขนกลให้ได้ตามเส้นทางที่กำหนดไว้อย่างถูกต้องแม่นยำ

1.3.8 วิเคราะห์และสรุปผลการควบคุมโดยใช้ระบบควบคุมแบบปรับตัวได้จริง

1.4 ขอบเขตของการวิจัย

1.4.1 เพื่อศึกษาระบบควบคุมแบบปรับตัวได้ (Adaptive Control) โดยใช้ทฤษฎีลีอาปูนอฟ ในการวิเคราะห์ เพื่อใช้ช่วยในการออกแบบหากฎการควบคุม (Control Law) และกฎการปรับตัว (Adaptation Law) เพื่อใช้ในการประมาณค่าพารามิเตอร์ที่ไม่รู้ค่าของแขนกล CRS

1.4.2 เพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกล CRS ให้แต่ละลิงค์สามารถเคลื่อนที่ตามเส้นทางที่กำหนดโดยให้มีค่าความผิดพลาดได้ไม่เกิน 5 เซนติเมตร

1.4.3 พารามิเตอร์ต่างๆ ของแขนกล CRS แบบ 3 แกนที่จะใช้ในการทดสอบนั้นแสดงในตารางที่ 1.1

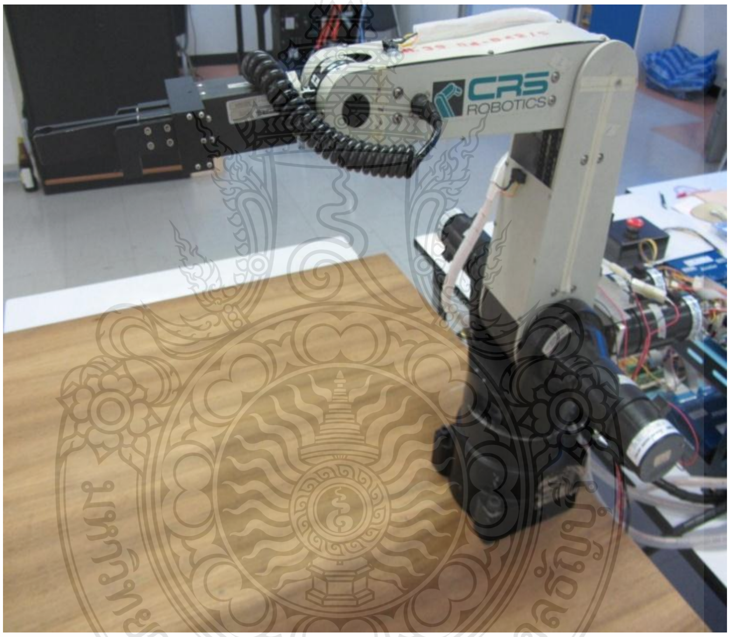
1.4.4 ความเร็วในการเคลื่อนที่ของแขนกล CRS จะไม่เกิน 0.78 rad/sec

ตารางที่ 1.1 ความยาวและมวลและโมเมนต์ความเฉื่อยของแขนกล CRS

ลิงค์ที่	โมเมนต์ความเฉื่อย (I_{yi}) $\left(kg-m^2\right)$	ความยาว (L_{yi}) (เมตร)	มวล (กิโลกรัม)
ลิงค์ 1	0.39	0.118	0.4
ลิงค์ 2	0.27	0.116	0.35
ลิงค์ 3	0.18	0.095	0.15

1.5 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

1.5.1 แขนกล CRS แบบ 3 แกน



ภาพที่ 1.1 แขนกล CRS แบบ 3 แกน

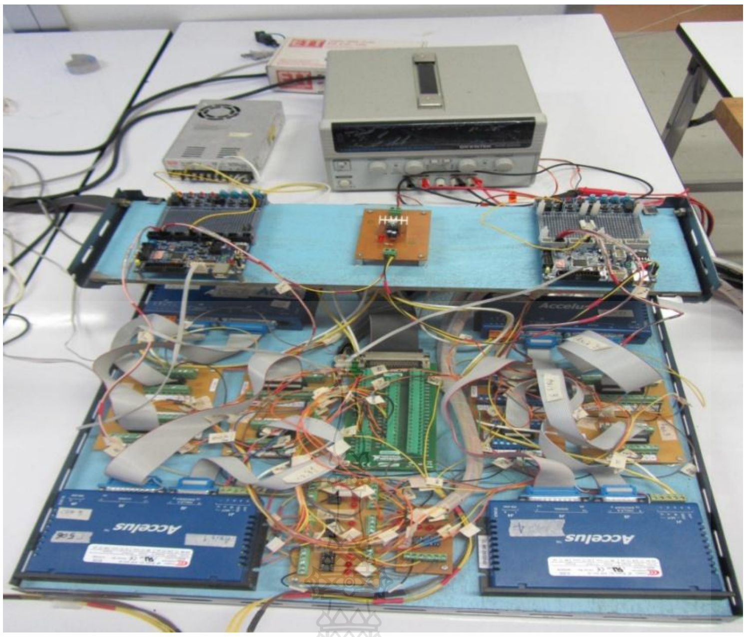
1.5.2 โปรแกรม Matlab/Simulink, และโปรแกรม LabVIEW

1.5.3 คอมพิวเตอร์ รุ่นToshiba Satellite M300 Intel Core 2 Duo T8300, 2.4GHz, 4GB DDR2.

1.5.4 ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ Accelus รุ่น ASP-090-36 จำนวน 4 ชุด

1.5.5 การ์ดรับข้อมูล (Data Acquisition Card) รุ่น PCI-6221 ของ NI จำนวน 1 ชุด

1.5.6 ไมโครคอนโทรเลอร์ RAM 7 จำนวน 2 ชุด



ภาพที่ 1.2 ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์ การ์ดรับข้อมูลและ ไมโครคอนโทรเลอร์

1.6 ขั้นตอนการศึกษา

ตารางที่ 1.2 แผนงานการดำเนินงานวิจัย

กิจกรรม	2545 – 2555							
	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.
นำเสนอข้อมูลงานวิจัย	↔	↔						
จัดเตรียมอุปกรณ์		↔	↔	↔				
ประกอบชิ้นส่วนแขนกล				↔	↔			
วิเคราะห์การทำงานของแขนกล				↔	↔			
ออกแบบตัวควบคุม		↔	↔	↔	↔	↔		
ทดสอบตัวควบคุมปลายแขนหุ่นยนต์						↔		
วิเคราะห์และสรุปผล						↔	↔	
นำเสนอวิทยานิพนธ์								↔

1.7 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.7.1 ได้เรียนรู้หลักการคำนวณหาสมการทางพลวัตและการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แขนกล ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรม

1.7.2 ได้เรียนรู้การใช้งานอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ที่ประยุกต์ใช้กับแขนกล ที่สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาทางด้านการศึกษาและการวิจัยระบบควบคุมหุ่นยนต์ต่อไปในอนาคต

1.7.3 ได้องค์ความรู้ในการออกแบบและวิเคราะห์ระบบควบคุมแบบปรับตัวได้ (Adaptive Control) ที่สามารถนำไปใช้เป็นกระบวนการ ในการเทียบเคียงสมรรถภาพของตัวควบคุมต่างๆ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

บทที่ 2

ทฤษฎีและวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความมีเสถียรภาพและไร้เสถียรภาพ (Stability and Instability)

ในภาวะสมดุล ($x = 0$) ได้รับการกล่าวถึงว่าจะมีเสถียรภาพก็ต่อเมื่อ สำหรับ $R > 0$ ใดๆ จะ มี $r > 0$ นั่นคือว่าถ้า $\|x(0)\| < r$ ดังนั้น $\|x(t)\| < R$ เมื่อ $t \geq 0$ ทั้งหมด มิเช่นนั้นจุดสมดุลจะไม่มีเสถียรภาพ

เสถียรภาพในแนวคิดของทฤษฎีลีอาปูนอป หมายความว่าวิถีโคจรของระบบนั้นจะถูกรักษาไว้ให้อยู่ใกล้กับจุดกำเนิดหรือจุดสมดุลโดยการเริ่มที่ใกล้ ๆ จุดกำเนิดนั้นอย่างเพียงพอภายในรัศมี Rนิยามยังกล่าวว่าจุดกำเนิดนั้นคงที่ และถ้ากำหนดว่าเราไม่ต้องการให้วิถีโคจรของตัวแปรสภาวะ $x(t)$ ออกนอกลูกบอลที่มีรัศมี R (B_R) ฉะนั้นค่ารัศมี $r(R)$ นั้นแสดงถึงสภาวะเริ่มต้นอยู่ภายในลูกบอล B_r ที่เวลา 0 เมื่อเวลาผ่านไปจะรับประกันว่าตัวแปรสภาวะจะยังคงอยู่ภายในลูกบอล B_R การอธิบายถึงเสถียรภาพในทางเรขาคณิตนั้นได้ถูกบ่งชี้ด้วยเส้นโค้ง 1 และ 2 ในภาพที่ 2.1

ในทางคณิตศาสตร์ เราจะกล่าวว่า A เป็นจริงและ B เป็นจริงด้วย หรือว่า A เป็นเงื่อนไขที่เพียงพอของ B หรือ B เป็นเงื่อนไขที่จำเป็นของ A โดยใช้สัญลักษณ์ $A => B$ และ $B => A$ แล้ว A และ B มีค่าเท่ากัน ซึ่งเราจะแสดงด้วยสัญลักษณ์ $A <=> B$

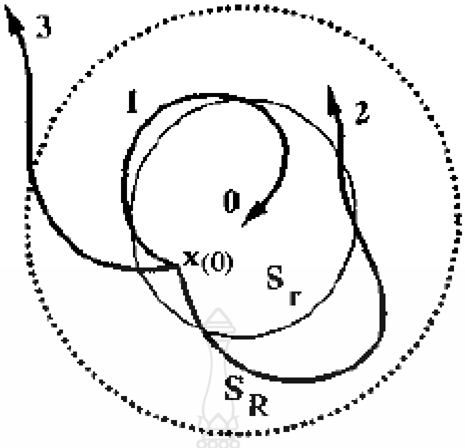
ด้วยการใช้สัญลักษณ์เหล่านี้เราจะ สามารถเขียนนิยามของเสถียรภาพได้ดังนี้

$$\forall R > 0, \exists r > 0, \ \|x(0)\| < r \quad => \quad \forall_t \geq 0, \|x(t)\| < R$$

หรือเท่ากับ

$$\forall R > 0, \exists r > 0, \ x(0) \in B_r \quad => \quad \forall_t \geq 0, x(t) \in B_R$$

โดยที่ $\forall R$ แสดงถึงทุกๆค่าของ R และ Er แสดงถึงบางค่าของ rในทางกลับกันจุดสมดุลจะไม่เสถียรถ้ามีอย่างน้อยหนึ่งลูกบอล B_R ที่สำหรับทุก ๆ $r > 0$ ไม่ว่าจะน้อยแค่ไหน ก็เป็นไปได้เสมอสำหรับวิถีทางของระบบที่จะเริ่มที่ไหนก็ได้ภายใน B_r ของลูกบอลแล้วต้องแปรสภาวะจะเคลื่อนออกจากลูกบอล B_R ดังแสดงด้วยเส้นโค้งที่ 3 ในภาพที่ 2.1 การไร้เสถียรภาพของจุดสมดุลบางทีอาจจะไม่เป็นที่ต้องการ เนื่องจากบ่อยๆ ที่นำระบบไปสู่วงจรจำกัด (Limit Cycle) หรือส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อองค์ประกอบทางกลหรือทางไฟฟ้าที่เกี่ยวข้อง



ภาพที่ 2.1 แนวคิดเรื่องเสถียรภาพ เส้นโค้งที่ 1 – เสถียรภาพแบบลู่เข้า เส้นโค้งที่ 2 – เสถียรภาพแบบวิกฤติ เส้นโค้งที่ 3 – ไม่เสถียรภาพ [2]

การขยายออก (Blowing Up) วิถีโคจรทั้งหมดนั้นใกล้กับจุดกำเนิดเคลื่อนที่ออกไปอีกเรื่อยจนไปถึงจุดที่ไม่มีที่สิ้นสุด ในระบบเชิงเส้นนั้นจะมีค่าเท่าเทียมกับความไร้เสถียรภาพของระบบ เนื่องจากโหมดที่ไม่เสถียรนั้นจะนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของตัวแปรสภาวะของระบบในรูปแบบเอ็กซโปเนนเชียลเสมอ อย่างไรก็ตามสำหรับระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น การขยายออกเป็นเพียงแค่ทางหนึ่งของความไร้เสถียรภาพในระบบไม่เชิงเส้น

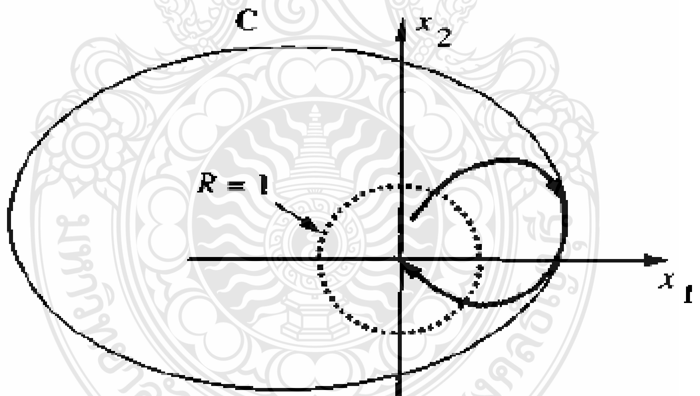
2.2 เสถียรภาพแบบลู่เข้า (Asymptotic Stability)

จุดสมดุล 0 จะเป็นแบบเสถียรภาพเชิงเส้น ถ้ามันมีความเป็นเสถียรภาพ และเงื่อนไขเพิ่มเติมคือสำหรับรัศมี $r > 0$ นั่นแสดงว่า $\|x(0)\| < r$ แล้วตัวแปรสภาวะ $x(t) \to 0$ เมื่อ $t \to \infty$ หรือเวลาผ่านไปนานๆ

เสถียรภาพแบบลู่เข้าหมายความว่าจุดสมดุลนั้นจะมีเสถียรภาพ และนอกจากนี้ตัวแปรสถานะที่เริ่มต้นใกล้กับจุดสมดุลหรือจุด 0 จริงๆแล้วตัวแปรสถานะจะมุ่งไปที่ 0 เมื่อเวลา t นั้นผ่านไปนานๆไม่มีที่สิ้นสุด วิถีโคจรของระบบจากจุดเริ่มต้น x(0) จากภายในลูกบอล B_r จะมุ่งไปที่จุดกำเนิดหรือจุด 0 ซึ่ง ลูกบอล B_r จะถูกเรียกว่า ขอบเขตของการดึงดูด (Domain Of Attraction) ของจุดสมดุล ในขณะที่ขอบเขตของการดึงดูดของจุดสมดุลนั้นจะหมายถึงบริเวณที่ใหญ่ที่สุดที่เป็นไปได้ ตัวอย่างเช่น เซตของจุดทั้งหมดที่จะทำให้ วิถีโคจรของการเคลื่อนที่เริ่มต้นในเซตของจุดเหล่านี้

ท้ายที่สุดแล้วก็จะมุ่งไปที่จุดเริ่มต้น จุดสมดุลที่มีเสถียรภาพแบบลีอาปูนอป แต่ไม่ได้มีเสถียรภาพแบบลู่เข้าจะเรียกกันว่ามีเสถียรภาพแบบก้ำกึ่ง (Marginally Stable)

อาจจะมีคำถามถึงความจำเป็นของข้อกำหนดของเสถียรภาพที่ชัดเจนในนิยามที่กล่าวก่อนหน้านี้ อย่างเช่นในเงื่อนไขที่สองของการลู่เข้าของตัวแปรสภาวะไปยังจุดสมดุล แต่อย่างไรก็ตาม มันเป็นเรื่องง่ายที่จะสร้างตัวอย่างตรงกันข้ามที่แสดงว่าการลู่เข้าของการเคลื่อนที่ของตัวแปรสภาวะนั้นจะไม่จำเป็นที่จะหมายถึงเสถียรภาพ ตัวอย่างเช่น ระบบง่าย ๆ ที่ศึกษาไว้โดย Vinograd จะมีวิถีโคจรการเคลื่อนที่ในรูปแบบที่แสดงไว้ในภาพที่ 2.2 วิถีโคจรการเคลื่อนที่ทั้งหมดที่เริ่มต้นจากจุดเริ่มต้นที่ไม่ใช่ศูนย์ภายในวงกลมขนาดหนึ่งหน่วยจะเคลื่อนที่เข้าหาเส้นโค้ง C ก่อนที่จะลู่เข้าหาจุดกำเนิด ดังนั้นจุดกำเนิดจะไม่เสถียรในแนวคิดของทฤษฎีลีอาปูนอป แม้ว่าจะมีการลู่เข้าหาจุดสมดุลของตัวแปรสถานะ ซึ่งเรียกว่าระบบนั้นไม่มีเสถียรภาพก็มีความสมเหตุสมผล เนื่องจากเส้นโค้ง ดังเช่น C นั้นอาจจะอยู่ภายนอกพื้นที่ที่ตัวแบบนั้นจะสามารถใช้ได้ ตัวอย่างเช่น พลศาสตร์การเคลื่อนที่ต่ำกว่าเสียง (Subsonic) และพลศาสตร์การเคลื่อนที่เหนือเสียง (Supersonic Dynamic) ของอากาศยานสมรรถภาพสูงนั้นแตกต่างกันโดยสิ้นเชิง ในขณะที่ปัญหาที่อยู่ระหว่างการศึกษาโดยใช้ตัวแบบ Subsonic Dynamic เส้นโค้ง C สามารถอยู่ในย่านของ Supersonic ได้



ภาพที่ 2.2 การลู่เข้าของตัวแปรสถานะนั้นไม่ได้แสดงถึงเสถียรภาพ [2]

2.3 เสถียรภาพแบบเอ็กโปเนนเชียล (Exponential Stability)

จุดสมดุล 0 นั้นจะมีเสถียรภาพแบบเอ็กโปเนนเชียล ถ้ามีจำนวนตัวเลขที่เป็นบวกเสมอ 2 ตัวคือ α และ λ ที่จะทำให้

$$\forall t > 0,\ \|x(t)\| \leq \alpha \|x(0)\| e^{-\lambda t} \tag{2.1}$$

ในบางลูกบอล B_r รอบ ๆ จุดกำเนิดหรือจุดสมดุล

ในสมการ (2.1) หมายความว่า เวกเตอร์ของตัวแปรสถานะ (State Vector) ของระบบที่มีเสถียรภาพแบบเอ็กโปเนนเชียลจะลู่เข้าไปยังจุดกำเนิดเร็วกว่าฟังก์ชั่นเอ็กโปเนนเชียลส่วนเก่า λ ที่เป็นเลขบวกเสมอนั้นจะถูกเรียกบ่อย ๆ ว่าเป็น อัตราของการลู่เข้าแบบเอ็กโปเนนเชียล ตัวอย่างเช่น ระบบที่แสดงโดยสมการ

$$\dot{x} = -(1 + sin^2 x)x$$

นั้นจะลู่เข้าหาจุดสมดุลแบบเอ็กโปเนนเชียลไปยัง $x = 0$ ด้วยอัตรา $\lambda = 1$

2.4 เสถียรภาพเฉพาะที่และเสถียรภาพโดยรวม (Local and Global Stability)

ถ้าเสถียรภาพแบบลู่เข้า หรือแบบเอ็กโปเนนเชียล ประยุกต์ใช้กับสถานะเริ่มต้นใดๆ จุดสมดุลนั้นกล่าวกันว่าจะมีเสถียรแบบลู่เข้า หรือแบบเอ็กโปเนนเชียล ในขอบเขตกว้างๆ หรือโดยรวม นอกจากนี้ยังเรียกว่าเสถียรภาพแบบลู่เข้าโดยรวม (หรือแบบเอ็กโปเนนเชียลโดยรวม)

ระบบเชิงเส้นไม่ขึ้นกับเวลานั้นอาจจะเสถียรเชิงเส้น หรือเสถียรแบบวิกฤต หรือไม่เสถียร ดังเช่นที่เห็นได้จากการแบ่งย่อยโหมดของผลลัพธ์ของระบบเชิงเส้น เสถียรภาพแบบลู่เชิงเส้นนั้นจะเป็นเป็นแบบโดยรวม (Global) และแบบเอ็กโปเนนเชียล (Exponential) เสมอ และการไร้เสถียรภาพเชิงเส้นนั้นบ่งชี้ถึงการขยายออกแบบเอ็กโปเนนเชียลเสมอ นี่อธิบายว่าทำไมแนวคิดที่อธิบายอย่างละเอียดในเรื่องเสถียรภาพที่อธิบายไปแล้วนั้นไม่ได้นำเสนอหรืออธิบายกับการศึกษาระบบเชิงเส้น ตามแนวคิดเหล่านี้นั้นจำเป็นสำหรับระบบไม่เชิงเส้นอย่างมาก

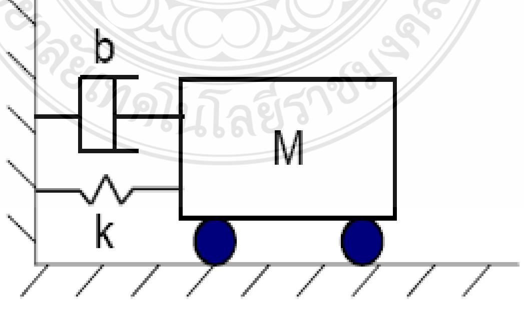
2.5 วิธีทางตรงของลีอาปูนอป (Lyapunov's Direct Method)

หลักการพื้นฐานของวิธีทางตรงของลีอาปูนอป (Lyapunov's Direct Method) ก็คือส่วนขยายในทางคณิตศาสตร์ของการสังเกตทางกายภาพพื้นฐาน ถ้าพลังงานทั้งหมดของระบบทางกล (หรือระบบทางไฟฟ้า) นั้นถูกทำให้ค่อย ๆ ลดลงอย่างต่อเนื่อง ท้ายที่สุดแล้วระบบ ไม่ว่าจะเป็นแบบเชิงเส้นหรือไม่ใช่เชิงเส้น จะต้องเคลื่อนไปที่จุดสมดุล ดังนั้นเราสามารถสรุปได้ว่าเสถียรภาพของระบบนั้นตรวจสอบได้จากความแปรปรวนของฟังก์ชั่นเกลาร์เพียงฟังค์ชั่นเดียว

ถ้าพิจารณาระบบไม่เชิงเส้นของมวล-ตัวหน่วง-สปริง (Mass-Damper-Spring) ในภาพที่ 2.3 ซึ่งสมการทางพลศาสตร์สามารถเขียนได้เป็น

$$m\ddot{x} + b\dot{x}|\dot{x}| + k_0 x + k_1 x^3 = 0 \quad (2.2)$$

เมื่อ $b\dot{x}|\dot{x}|$ แทนการสูญเสียพลังงานหรือการหน่วงแบบไม่เป็นเชิงเส้น และ $(k_0 x + k_1 x^3)$ แทนพจน์สปริงแบบไม่เชิงเส้น ถ้าสมมุติว่ามวลนั้นถูกดึงออกจากความยาวปกติของสปริงด้วยระยะไกลมาก และจากนั้นปล่อยออก การเคลื่อนที่ที่ได้จะมีเสถียรภาพหรือไหม เป็นเรื่องยากที่จะตอบคำถามนี้โดยใช้นิยามของเสถียรภาพที่ได้กล่าวมา เนื่องจากไม่มีวิธีการแก้สมการทั่วไปของสมการแบบไม่เป็นเชิงเส้นนี้ วิธีการวิเคราะห์เชิงเส้นนั้นไม่สามารถประยุกต์ใช้ได้เช่นกัน เนื่องจากการเคลื่อนที่นั้นเริ่มต้นภายนอกขอบเขตเชิงเส้น และในกรณีใด ๆ วิธีประมาณแบบเชิงเส้นของระบบนั้นเป็นแบบกึ่งเสถียรเท่านั้น อย่างไรก็ตามการตรวจสอบของพลังงานในระบบนั้นจะสามารถบอกเราได้มากเกี่ยวกับรูปแบบการเคลื่อนที่



ภาพที่ 2.3 ระบบ Mass-Damper-Spring แบบไม่เป็นเชิงเส้น [7]

พลังงานกลรวมทั้งหมด $(V(x))$ ของระบบเป็นผลรวมของพลังงานจลน์ (Kinetic Energy) และพลังงานศักย์ (Potential Energy) ของระบบดังนี้

$$V(x) = \frac{1}{2}m\dot{x}^2 + \int_0^x (k_0 x + k_1 x^3)dx$$
$$= \frac{1}{2}m\dot{x}^2 + \frac{1}{2}k_0 x^2 + \frac{1}{4}k_1 x^4 \quad (2.3)$$

ด้วยการเปรียบเทียบนิยามของเสถียรภาพและพลังงานทางกล เราสามารถที่จะเห็นความสัมพันธ์บางอย่างระหว่างพลังงานทางกลและแนวคิดเรื่องเสถียรภาพ

- สภาวะปลอดพลังงาน (Zero Energy) จะเชื่องโยมกับจุดสมดุล $(x = 0, \dot{x} = 0)$
- เสถียรภาพแบบลู่เข้าจะบ่งชี้การลู่เข้าของพลังทางกลไปยังศูนย์
- การไร้เสถียรภาพนั้นเกี่ยวข้องกับการเพิ่มขึ้นของพลังงานทางกล

ความสัมพันธ์เหล่านี้บ่งชี้ว่าปริมาณเกลาร์ซึ่งเป็นพลังงานทางกล บ่งบอกถึงขนาดของเวกเตอร์ตัวแปรสถานะ (State Vector) โดยทางอ้อม ซึ่งคุณสมบัติของการมีเสถียรภาพของระบบนั้นสามารถบ่งบอกได้จากคุณลักษณะการแปรปรวนของพลังงานกลของระบบ อัตราของความแปรปรวนของพลังงานในระหว่างการเคลื่อนที่ของระบบนั้นได้มาอย่างง่ายดายด้วยการหาอนุพันธ์อันดับที่หนึ่งในสมการ (2.2) และการใช้สมการ (2.3) เข้าช่วย จะได้

$$\dot{V}(x) = m\dot{x}\ddot{x} + (k_0 x + k_1 x^3)\dot{x} = \dot{x}(-b\dot{x}|\dot{x}|) = -b|\dot{x}|^3 \quad (2.4)$$

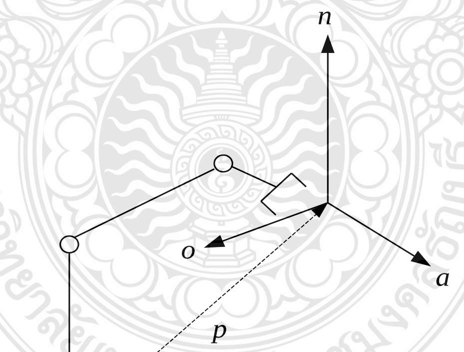
จากสมการแสดงว่าพลังงานของระบบ ที่เริ่มต้นจากค่าเริ่มต้นบางค่า นั้นถูกทำให้ค่อย ๆ ลดลงหรือสูญเสียไปอย่างต่อเนื่องโดยตัวหน่วงจนกระทั่งมวลนั้นอยู่กับที่ นั่นคือ จนกระทั่งความเร็วเป็นศูนย์ ($\dot{x} = 0$) ในทางกายภาพเป็นเรื่องง่ายที่จะเห็นว่าสุดท้ายแล้วมวลจะต้องหยุดอยู่ที่ความยาวปกติของสปริง เนื่องจากมวลจะถูกกระทำโดยแรงที่ไม่เป็นศูนย์ที่ตำแหน่งต่างๆ ที่ไม่ใช่ความยาวปกติของสปริง

วิธีการตรงของลีอาปูนอป นั้นจะขึ้นกับหลักการทั่วไปของแนวคิดที่อธิบาย ในระบบของ Mass-Spring-Damper ในข้างต้นไปจนถึงระบบที่ซับซ้อนไปยิ่งกว่านี้ เมื่อประสบกับสมการเชิงอนุพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น กระบวนการพื้นฐานของวิธีการตรงของเลียปูนอปนั้นจะสร้างฟังก์ชั่นเกลาร์

ที่เหมือนพลังงานสำหรับระบบพลวัต และตรวจสอบความแปรปรวนทางเวลาของฟังก์ชั่นเกลาร์ ในแนวทางนี้ บทสรุปอาจจะถูกเขียนขึ้นบนพื้นฐานของเสถียรภาพของเซตของสมการเชิงอนุพันธ์โดยไม่ได้ใช้นิยามของเสถียรภาพที่ยุ่งยากหรือปราศจากการรู้ผลลัพธ์โดยตรงของสมการนั้น ๆ

2.6 ทฤษฎีจลนศาสตร์ (Kinematics) [1]

เป็นการศึกษาถึงตำแหน่ง (Position) ความเร็ว (Velocity) และความเร่ง (Acceleration) ของจุดๆ ใดจุดหนึ่งรวมถึงความเร็วเชิงมุม (Angular Velocity) และความเร่งเชิงมุม (Angular Acceleration) ของวัตถุ ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้จำเป็นที่จะใช้อธิบายถึงลักษณะของวัตถุแข็งเกร็ง (Rigid Body) ตำแหน่งของวัตถุสามารถบอกได้จากตำแหน่งของจุดที่อยู่บนวัตถุ ประกอบกับตำแหน่งเชิงมุม (Angular Position) ของวัตถุนั้นหุ่นยนต์หรือแขนกลในทางจลนศาสตร์นั้นประกอบขึ้นมาจากการประกอบหรือการต่อกันของก้านโยง ซึ่งประมาณว่าก้านโยงนั้นมีคุณสมบัติเป็นวัตถุแข็งเกร็ง คือ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเมื่อมีสิ่งใดมากระทำ การต่อกันของแต่ละก้านโยงนั้นมีหลายวิธีซึ่งในการนำมาต่อกันนั้นเรียกได้ว่าเป็นจลนศาสตร์ลูกโซ่ ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน คือ ก้านโยง และข้อต่อ การบอกตำแหน่ง และการหมุนของปลายแขนกล (End Effector) สามารถแสดงอยู่ในภาพของการบอกตำแหน่งด้วยเวกเตอร์ p และการหมุนด้วยพิกัด (n,o,a)



ภาพที่ 2.4 ตำแหน่งและทิศทางของปลายแขนกล [1]

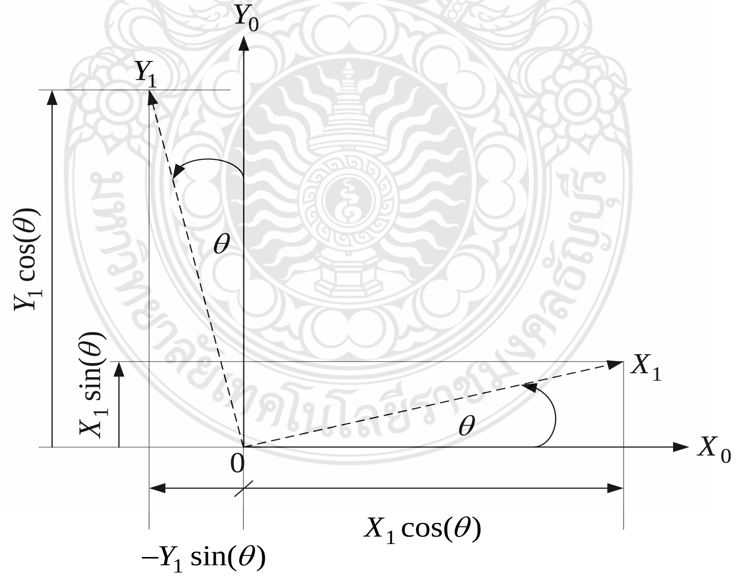
ส่วนประกอบทั้งสามกำหนดขึ้นในระบบพิกัดตามแกนคาร์ทีเซียนที่ยึดติดอยู่กับฐานที่อยู่กับที่ (Fixed Cartesian Frame at the Base) ของหุ่นยนต์ โดยที่เวกเตอร์ a คือเวกเตอร์มีขนาดหนึ่งหน่วย มีทิศทางเคลื่อนที่พุ่งเข้าไปหาวัตถุ ส่วนเวกเตอร์ o มีทิศทางตามนิ้วจับชิ้นงานสองนิ้ว ในที่นี้คือ มีทิศทางตามจุดปลายทั้งสองของนิ้วสองนิ้ว และเวกเตอร์ n คือ เวกเตอร์ที่ตั้งฉาก โดยเวกเตอร์ทั้งหมดนี้เป็นไปตามกฎมือขวา คือ

$$n = o \times a \tag{2.5}$$

การหมุนสามารถใช้วิธีการแบบอื่นได้ ดังเช่นวิธีการต่อไปนี้คือ

2.7 เมตริกซ์การหมุน

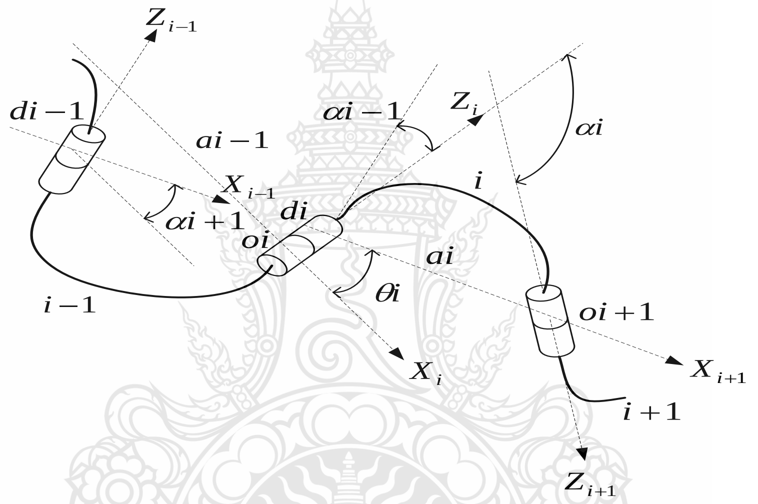
เมตริกซ์การหมุน (Rotation Matrix) สัญลักษณ์ R เป็นตัวแปรที่ระบุว่าวัตถุนั้นมีการหมุนเปลี่ยนไปจากแกนอ้างอิง จากภาพจะหาเมตริกซ์การหมุนตามรอบแกน Z แกนอ้างอิงที่ 1 หมุนไปจากแกนอ้างอิงที่ 0 รอบแกน Z เป็นมุม θ



ภาพที่ 2.5 การหมุนรอบแกน Z [1]

2.8 พารามิเตอร์ของ Denavit – Hartenberg [1]

การสร้างแขนหุ่นยนต์โดยทั่วไปนั้นมักประกอบไปด้วยก้านโยงที่ต่อกันแบบอนุกรมด้วยข้อต่อ จากนั้นจะกำหนดแกนอ้างอิงที่ติดกับวัตถุ (Body Fixed Coordinate) ในแต่ละก้านโยงเพื่อคำนวณการเปลี่ยนแกนอ้างอิงจากแต่ละก้านโยงยังปลายสุดท้าย หรือจุดปลายของแขนหุ่นยนต์โดยทั่วไปมักเป็นมือที่ใช้จับชิ้นงาน จากการคำนวณนี้สามารถบอกได้ว่าตำแหน่งใดในระนาบสามมิติ วิธีที่ยอมรับวิธีหนึ่ง ได้แก่ Denavit-Hartenberg หรือใช้ตัวย่อเรียกสั้นๆ ว่า D-H Parameters จากภาพบอกถึงพารามิเตอร์ต่าง ๆ ใน D-H Parameters ในกรณีของข้อต่อแบบหมุน (R: Revolute Joint) ตัวแปรที่เปลี่ยนแปลง (Variable) คือ มุม θ โดยระยะระหว่างข้อต่อ d คงที่



ภาพที่ 2.6 D-H Rotation for Revolute Joints [1]

นิยามของตัวแปรมีดังนี้

$a_i =$ ระยะจากแกน $Z_{i\text{-}1}$ ถึงแกน Z_i วัดตามแนวแกน X_i

$d_i =$ ระยะจากแกน $X_{i\text{-}1}$ ถึงแกน X_i วัดตามแนวแกน $Z_{i\text{-}1}$

$\alpha_i =$ มุมบิด (Twist Angle) ถึงแกน $Z_{i\text{-}1}$ กับ Z_i รอบแกน X_i

$\theta_i =$ มุมระหว่างแกน $X_{i\text{-}1}$ ถึงแกน X_i หมุนรอบแกน $Z_{i\text{-}1}$

วิธีการกำหนดแกนมีดังนี้

1. เริ่มจากที่ฐานกำหนดแกนอ้างอิงเป็น 0 ร่วมกับแกนอ้างอิงหลัก (World Coordinate Frame)

2. กำหนดแกนในแต่ละแกนโยง ตามกฎมือขวาโดยแกนหมุนเป็นแกนเริ่มต้นที่ 0 เช่น Z_0 ในส่วนของข้อต่อแบบหมุน

3. กำหนดแกนของก้านโยง ถัดไปให้ดูตามแกนการหมุนโดยให้แกนนั้นเป็นแกน Z_1

4. ทิศทางของแกน X_1 หาได้โดยได้มาจากผลลัพธ์ของ Cross Product $Z_0 \times Z_1$ แกนแต่ละแกนจะถูกกำหนดที่ส่วนปลายของข้อต่อ (Distal Joint) ของก้านโยง

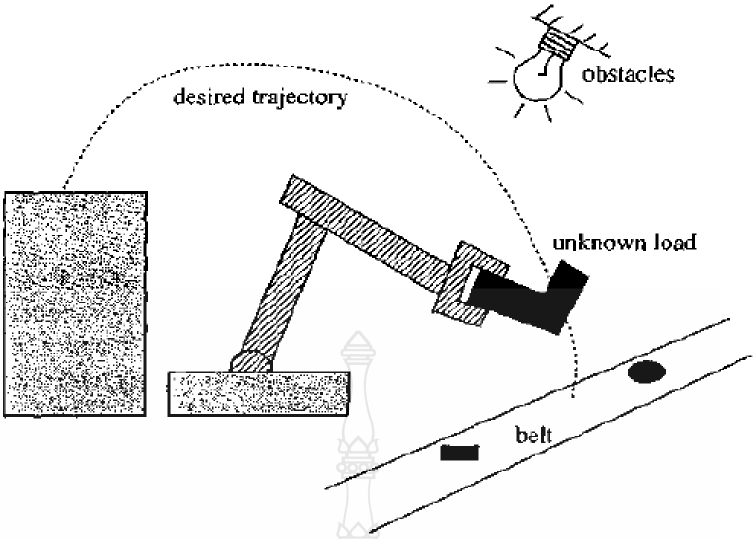
5. กรณีมีระยะออฟเซตจะมีระยะ d หรือถ้าไม่มี $d = 0$

6. แกน Z อยู่ร่วมในแนวเดียวกับแกนการหมุน

2.9 แนวความคิดในการควบคุมแบบปรับตัว (Concepts in Adaptive Control)

ระบบที่ต้องการควบคุมนั้นมีความไม่แน่นอนของค่าพารามิเตอร์ ณ ตอนเริ่มต้นก่อนทำการควบคุม นอกเสียจากว่าความไม่แน่นนอนของพารามิเตอร์นั้นถูกค่อยๆทำให้ลดลงโดยใช้ กลไกปรับตัวหรือกลไกประมาณค่าเมื่อระบบควบคุมเริ่มทำงาน อาจจะก่อให้เกิดความไม่ถูกต้องหรือไร้เสถียรภาพสำหรับระบบควบคุมได้ จุดประสงค์พื้นฐานของการควบคุมแบบปรับตัวได้นั้นก็คือการรักษาประสิทธิภาพที่คงเส้นคงวาของระบบในกรณีที่มีความไม่แน่นอนหรือความแปรปรวนที่ไม่ทราบได้ในพารามิเตอร์ของระบบ เนื่องจากความไม่แน่นอนหรือความแปรปรวนของพารามิเตอร์เกิดขึ้นในปัญหาเชิงปฏิบัติทั่วไป การควบคุมแบบปรับตัวได้นั้นจึงมีประโยชน์ในงานอุตสาหกรรมมากมาย ตัวอย่างเช่น การควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกล

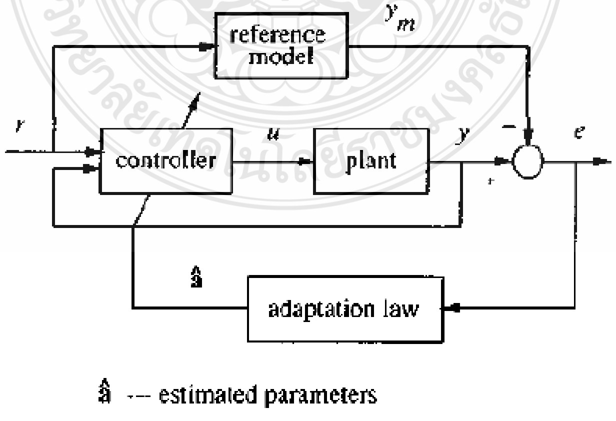
โดยทั่วไปหุ่นยนต์จะถูกใช้ในการเคลื่อนย้ายสิ่งของที่มีขนาด น้ำหนัก และการกระจายของมวลหลากหลายดังแสดงใน ภาพที่ 2.7 จะเป็นข้อจำกัดอย่างมากที่จะกำหนดว่าพารามิเตอร์น้ำหนักของสิ่งของนั้นเป็นตัวแปรที่รู้ค่าอย่างแน่นอนก่อนที่หุ่นยนต์จะหยิบจับเอาสิ่งของต่าง ๆ นั้นขึ้นมาและเคลื่อนย้ายไปที่อื่นถ้าระบบควบคุมที่ค่าคงที่ถูกใช้และให้พารามิเตอร์ของสิ่งของนั้นไม่รู้ค่าที่แน่นอน การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เมื่อหยิบสิ่งของจะไม่แม่นยำหรือไม่เสถียรได้ การควบคุมแบบปรับตัวได้สามารถให้หุ่นยนต์เคลื่อนไปหยิบสิ่งของที่มีพารามิเตอร์ที่ไม่รู้ค่าที่แน่นอนด้วยความเร็วสูงและความแม่นยำสูงได้



ภาพที่ 2.7 หุ่นยนต์หยิบสิ่งของที่มีมวลที่ไม่แน่นอน [2]

2.10 การควบคุมแบบปรับตัวได้แบบอ้างอิงกับแบบจำลอง (MRAC)

โดยทั่วไปแล้วการควบคุมแบบปรับตัวได้แบบอ้างอิงกับแบบจำลองนั้นสามารถอธิบายได้ด้วยภาพที่ 2.8 ที่ประกอบไปด้วย 4 ส่วนได้แก่ ระบบ (Plant) ที่ประกอบไปด้วยพารามิเตอร์ที่ไม่รู้ค่า แบบป้อนตัวแบบอ้างอิง (Reference Model) เพื่อการบ่งชี้ผลลัพธ์ที่ต้องการของระบบควบคุม กฎการควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback Control law) ที่ประกอบไปด้วยพารามิเตอร์ที่ปรับค่าได้ และกลไกการปรับตัว (Adaptation Mechanism) สำหรับการอัพเดทพารามิเตอร์ที่ปรับค่าได้



ภาพที่ 2.8 ระบบควบคุมแบบปรับตัวได้แบบอ้างอิงกับแบบจำลอง [2]

2.10.1 ระบบ (Plant) นั้นถูกสมมุติว่ามีโครงสร้างที่เป็นที่รู้จักกัน ถึงแม้ว่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ นั้นจะไม่รู้ค่าที่แน่นอน สำหรับระบบแบบเชิงเส้น ซึ่งหมายความว่าจำนวนของโพล (Pole) และจำนวนศูนย์ (Zero) นั้นถูกกำหนดว่าเป็นจำนวนที่รู้ แต่ตำแหน่งของโพลและศูนย์เหล่านี้จะไม่เป็นรู้ค่า สำหรับระบบแบบไม่ชิงเส้น นี่แสดงนัยว่าโครงสร้างของสมการพลวัตนั้นเป็นค่าที่รู้จัก แต่บางพารามิเตอร์จะไม่เป็นค่าที่ไม่รู้

2.10.2 แบบจำลองอ้างอิง (Reference Model) ถูกใช้เพื่อบ่งชี้การตอบสนองเชิงอุดมคติของระบบควบคุมแบบปรับตัวได้ต่อคำสั่งภายนอก จะให้การตอบสนองของระบบในทางอุดมคติซึ่งกลไกการปรับตัวได้ควรจะพยายามปรับพารามิเตอร์ต่างๆเพื่อให้ได้ผลตอบสนองดังกล่าว ตัวเลือกของตัวแบบอ้างอิงนั้นเป็นส่วนหนึ่งของการออกแบบระบบควบคุมแบบปรับตัวได้ ตัวเลือกนี้ต้องเป็นไปตามข้อกำหนด 2 ข้อ ในด้านหนึ่งตัวเลือกควรจะสะท้อนคุณลักษณะจำเพาทางด้านประสิทธิภาพในภารกิจการควบคุมต่างๆ เช่น เวลาในการแปลงเวลาในการเข้าสู่สมดุลการแกว่งของผลตอบสนองหรือคุณลักษณะจำเพาะในทางความถี่ ในอีกด้านหนึ่งพฤติกรรมเชิงอุดมคตินี้นั้นสามารถกระทำได้ด้วยระบบควบคุมแบบปรับตัวได้ นั่นคือ จะมีข้ออ้างที่เกี่ยวเนื่องกับโครงสร้างของแบบจำลอง เช่น อันดับของระบบและระดับสัมพัทธ์ของระบบ โดยสมมุติโครงสร้างของแบบจำลองของระบบ

2.10.3 ตัวควบคุม (Controller) โดยทั่วไปจะถูกจำแนกด้วยด้วยพารามิเตอร์ที่ปรับเปลี่ยนหลายๆ ตัว(ซึ่งบ่งชี้ว่าเราอาจจะได้กลุ่มของระบบควบคุมเมื่อกำหนดค่าต่างๆ ให้กับพารามิเตอร์ที่ปรับเปลี่ยนได้) ตัวควบคุมควรจะมีขีดความสามารถในการติดตามอย่างสมบูรณ์เพื่อที่จะให้ความเป็นไปได้ของการลู่หรือเบนเข้า นั่นคือ เมื่อพารามิเตอร์ของระบบนั้นเป็นที่รู้อย่างแน่นอน เมื่อพารามิเตอร์ของระบบนั้นมีค่ารู้ค่าแน่นอนแล้วพารามิเตอร์ของระบบควบคุมควรจะทำให้ผลลัพธ์ของระบบนั้นเหมือนกับผลลัพธ์ของแบบจำลองอ้างอิง เมื่อพารามิเตอร์ของระบบไม่เป็นที่รู้ค่า กลไกการปรับตัวจะปรับพารามิเตอร์ของระบบควบคุม เพื่อที่จะให้ได้การติดตามที่สมบูรณ์แบบลู่เข้า ถ้ากฎการควบคุมนั้นเป็นแบบเชิงเส้นในรูปแบบของพารามิเตอร์ที่ปรับตัวได้ กฎนั้นจะถูกเรียกว่าเป็นการเลือกพารามิเตอร์แบบเชิงเส้น การออกแบบควบคุมที่ปรับตัวได้ที่มีอยู่นั้นตามปกติแล้วต้องการการเลือกพารามิเตอร์แบบเชิงเส้นของระบบควบคุมเพื่อที่จะให้ได้กลไกการปรับตัวได้ที่มีการรับประกันเสถียรภาพและการเคลื่อนที่ของระบบลู่หรือเบนเข้าหาการเคลื่อนที่ๆ กำหนด

2.10.4 กลไกการปรับตัว (Adaptation) ถูกใช้เพื่อปรับพารามิเตอร์ต่างๆ ในกฎการควบคุม ในระบบ MRAC กฎการปรับตัวได้จะค้นหาพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อที่จะให้ได้ผลตอบสนองของระบบด้วยการควบคุมแบบปรับตัวได้ ให้เหมือนกันกับผลตอบสนองของแบบจำลองอ้างอิง หรืออีกนัยหนึ่งวัตถุประสงค์ของการปรับตัวนั้นจะทำให้ความคลาดเคลื่อนของการติดตามนั้นลู่หรือเบนเข้าหาศูนย์

เป็นที่ชัดเจนว่าความแตกต่างที่สำคัญของการควบคุมแบบปรับตัวได้จากการควบคุมธรรมดานั้นอยู่ที่การมีอยู่ของกลไกนี้ ประเด็นปัญหาที่สำคัญในการออกแบบการปรับตัวนั้นก็คือการสังเคราะห์กลไกการปรับตัวซึ่งจะรับประกันว่าระบบควบคุมจะยังคงมีเสถียรภาพและความคลาดเคลื่อนของการติดตามนั้นจะลู่หรือเบนเข้าหาศูนย์เมื่อพารามิเตอร์นั้นถูกเปลี่ยนแปลงไป แบบแผนมากมายในการควบคุมที่ไม่เป็นเชิงเส้นสามารถใช้ได้กับระบบต่างๆในปัจจุบันนี้ เช่น ทฤษฎีของลีอาปูนอฟ และทฤษฎีพักตัว (Passivity Theory) ถึงแม้ว่าการใช้งานวิธีการหนึ่งนั้นอาจจะสะดวกมากกว่าวิธีการอื่น ๆ แต่บ่อย ๆ ที่ผลลัพธ์นั้นเหมือนกัน

2.11 การออกแบบระบบควบคุมของแขนหุ่นยนต์ (Robotics as a Prototype)

ถ้าพิจารณาแขนกลในระนาบที่มีการเชื่อมต่อกันของ 2 ข้อต่อและดังแสดงในภาพที่ 2.9 ซึ่งตำแหน่งของแขนกลนั้นสามารถอธิบายได้ด้วยเวกเตอร์ q ของ 2 มุมร่วม และมีอินพุตจากตัวขับเคลื่อนที่ประกอบไปด้วย 2 เวกเตอร์ τ ของ 2 แรงบิด (Torque) ที่ประยุกต์ใช้ในข้อต่อของแขนกล พลวัตของแขนกลแบบพื้นฐานนั้นเป็นสมการแบบไม่เชิงเส้น และสามารถเขียนในรูปแบบทั่วไปได้ดังนี้

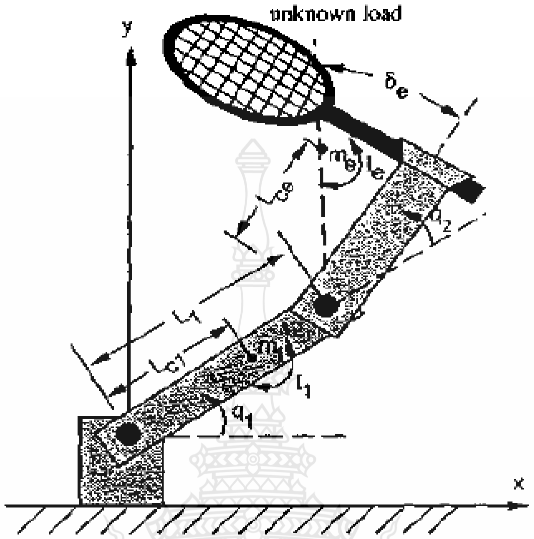
$$H(q)\ddot{q} + C(q,\dot{q})\dot{q} + g(q) = \tau \tag{2.6}$$

เมื่อ $H(q)$ เป็นแมทริกซ์ความเฉื่อยของแขนหุ่นที่มีขนาด 2 x 2 (ซึ่งเป็นจำนวนเต็มที่เป็นบวกและสมมาตร) $C(q,\dot{q})\dot{q}$ เป็น 2 เวกเตอร์ ของแรงบิด (Toque) ที่มาจากแรงบิดมีขนาด 2 x 1 ที่เคลื่อนเข้าหาศูนย์กลางและแรงบิดแบบ Coriolis (โดยที่ $C(q,\dot{q})$ เป็นแมทริกซ์แบบ 2 x 2)
$g(q)$ เป็น 2 เวกเตอร์ ของแรงบิดที่มาจากแรงดึงดูดของโลก

ปัญหาการควบคุมแบบป้อนกลับสำหรับระบบนั้นคือการคำนวณหาอินพุตของตัวขับเคลื่อนเพื่อทำภารกิจที่ต้องการ เช่น การเคลื่อนที่ตามวิถีโคจรที่ต้องการ ให้สถานะระบบที่วัดได้นั่นคือเวกเตอร์ q ของมุมร่วม และเวกเตอร์ $\dot{q}$ ของความเร็วร่วม

แมทริกซ์ของแรงเฉื่อย H นั้นจะมีค่าที่ขึ้นอยู่กับตำแหน่งร่วม q ซึ่งสามารถอธิบายให้สอดคล้องกับความเข้าใจทางกายภาพ (ตัวอย่างเช่น เมื่อมองจากส่วนบ่าของมัน แขนที่ยื่นออกไปมีจะแรงเฉื่อยที่มากกว่าแขนที่พับอยู่) แรงบิดที่มุ่งเข้าหาศูนย์กลางนั้นจะมีค่าขึ้นกับกำลังสองของความเร็วร่วมของแต่ละแกน ในขณะที่แรงบิดแบบ Coriolis นั้นเปลี่ยนแปลงไปตามผลคูณของความเร็วที่จุดร่วมที่แตกต่างกัน 2 จุดเราสามารถสังเกตได้ว่าพลังงานจลศาสตร์ของแขนหุ่นนั้นมีรูปสมการคล้าย ๆ กับ $1/2\ mv^2$ หรือพลังงานจลน์ของระบบองศาอิสระในการเคลื่อนที่ (One Degree-Of-Freedom)

$$T = \frac{1}{2}\dot{q}^T H(q)\dot{q} \tag{2.7}$$



ภาพที่ 2.9 แขนแบบมีส่วนเชื่อต่อ (ข้อต่อ) 2 ส่วน [2]

จากสูตรนี้อธิบายแมทริกซ์ความเฉื่อย $H(q)$ ค่าที่เป็นบวกแน่นอนพลังงานจลนศาสตร์นั้นจะต้องเป็นบวกสำหรับตำแหน่งข้อต่อ q ใด ๆ และความเร็วข้อต่อที่ไม่เป็นศูนย์ $\dot{q}$ ในการหาระบบควบคุมนั้นเราจะใช้ความจริงที่ว่า $H(q)$ นั้นเป็นค่าบวกแน่นอน นั่นคือว่ามีค่าคงที่ $\alpha > 0$ สำหรับตำแหน่ง q ทั้งหมดในพื้นที่ทำงานของหุ่นยนต์ที่จะทำให้

$$H(q) \geq \alpha I$$

เมื่อ I เป็นแมทริกซ์เอกลักษณ์ คุณสมบัตินี้นั้นสามารถเห็นได้โดยการสังเกตว่า ถ้าไม่มีค่า $\alpha > 0$ ดังนั้นจะมีตำแหน่ง q ในพื้นที่ทำงานซึ่งแมริกซ์แรงเฉื่อยมีค่าคุณลักษณะ (Eigenvalue) เป็นศูนย์ เนื่องจากพื้นที่ทำงานนั้นเป็นเซ็ตที่ใกล้เคียง ให้ v_0 เป็นเวกเตอร์ลักษณะ (Eigenvector) สัมพันธ์กับค่าคุณลักษณะที่เป็นศูนย์ แขนหุ่นยนต์สามารถเคลื่อนไหวด้วยความเร็วที่เป็น $(v_0/\|v_0\|)$ แต่ด้วยพลังงานจลนศาสตร์ที่ศูนย์ ซึ่งเป็นไปไม่ได้ ดังนั้น $H(q)$ เป็นบวกแน่นอน

2.12 การควบคุมตำแหน่ง (Position Control)

ให้เราสมมุติว่าแขนกลในภาพที่ 2.9 อยู่ในระนาบแนวนอน ($g(q)=0$) และจุดประสงค์คือต้องการให้แขนกลเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งสุดท้ายที่กำหนดไว้ ดังเช่นที่ระบุไว้โดยเวกเตอร์ค่าคงที่ q_d ของมุมร่วมที่ต้องการ ระบบควบคุมแบบแปรผันและอนุพันธ์ (Proportional – Derivative P.D.) หรือนั่นคือกฎการควบคุมแบบป้อนกลับที่ใช้อินพุตของ Actuator แต่ละตัวอย่างอิสระ โดยขึ้นอยู่กับความคลาดเคลื่อนตำแหน่งของแต่ละข้อต่อแต่ละขณะเวลา $\tilde{q}_j = q_j - q_{dj}$ และความเร็วของแต่ละข้อต่อ $\dot{q}_j (j = 1{,}2)$ ของแขนกล และ $\tilde{q}_j = q_j - q_{dj}$

$$\tau_j = -k_{pj}\tilde{q}_j - k_{Dj}\dot{q}_j \qquad (2.8)$$

จะได้การควบคุมตำแหน่งที่ต้องการ กฎการควบคุม (2.8) ซึ่ง k_{pj} และ k_{Dj} เป็นค่าคงที่ที่เป็นบวกเท่านั้นผลของการจัดให้แต่ละข้อต่อของแขนด้วยอุปกรณ์ทางกลแบบหยุดนิ่งซึ่งให้สปริงขดลวด (Coil-Spring) และตัวหน่วง (Damper) และมี q_{dj} ที่ต้องการเหมือนกับตำแหน่งอื่นๆ ที่เหลือระบบทางกายภาพทางอ้อม (Passive Physical System) จะแสดงการแกว่งไปมาต่อตำแหน่ง q_d ที่เหลือ

การเขียนพลวัตของระบบในสูตร $f = ma$ (นั่นคือ Newtonian) (2.6) ไม่ได้จับภาพความจริงง่ายๆ นี้อย่างง่ายได้ เพื่อที่จะทำให้การอภิปรายข้างต้นเป็นรูปเป็นร่าง วิธีการที่น่ายินดียิ่งกว่านั่นคือการเขียนพลวัตของระบบใหม่ในรูปของการถ่ายโอนพลังงาน (นั่นคือในรูป Hamiltonian) เราสามารถเขียนการสงวนพลังงานในรูป

$$\frac{1}{2}\frac{d}{dt}[\dot{q}^T H \dot{q}] = \dot{q}^T \cdot \tau \qquad (2.9)$$

ซึ่งด้านซ้ายมือเป็นอนุพันธ์ของพลังงานจลนศาสตร์ของแขน และส่วนด้านขวามือแสดง Input ของกำลังจาก Actuator สมการ (2.9) ไม่ได้หมายความว่าพจน์ Coriolis และพจน์ที่มุ่งไปที่ศูนย์กลางของสมการ (2.6) ได้หายไป แต่เพียงแค่ว่าตอนนี้พจน์เหล่านั้นได้รับการอธิบายอย่างเป็นนัยเนื่องจากพจน์เหล่านี้มาจากความแปรปรวนทางเวลาของแมทริกซ์แรงเฉื่อย H ความเสถียรและข้อพิสูจน์การเบนเข้าหากันสำหรับตัวควบคุมแบบอนุพันธ์ตามสัดส่วนข้างต้นนั้นสามารถที่จะได้มาอย่างง่ายๆ ให้เราใช้ Input ของการควบคุมในรูปทั่วไปยิ่งกว่าสมการที่ (2.8) นั่นคือ

$$\tau = -k_p\tilde{q} - k_D\dot{q} \tag{2.10}$$

เมื่อ K_p และ K_D เป็นแมทริกซ์คงที่สมมาตรที่เป็นบวกแน่นอน (ตัวควบคุมอนุพันธุ์แบบสัดส่วน (2.8) ที่ตอบสนองในรูปแบบเส้นทแยงมุม K_p และ K_D) และให้เราพิจารณาพลังงานกล V ทั้งหมด ที่จะเกี่ยวข้องกับระบบถ้ากฎการควบคุม (2.10) นั้นถูกประยุกต์ใช้โดยสปริงและตัวหน่วง นั่นคือ

$$V = \frac{1}{2}\left[\dot{q}^T H\dot{q} + \tilde{q}^T k_p\tilde{q}\right]$$

เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมแบบปิด (Closed Loop Behavior) ของระบบควบคุม เราจะใช้พลังงานกล V เสมือนนี้เป็นฟังก์ชั่น Lyapunov ที่คล้ายกันมากกับฟังก์ชั่นที่เราเลือกสำหรับระบบ Mass-Spring-Damper ที่ไม่เป็นเชิงเส้น อนุพันธ์ที่แปรตามเวลาของ V นั้นสามารถเขียน (กำหนดไว้ใน (2.9)) เป็น

$$\dot{V} = \dot{q}^T(\tau + k_p\tilde{q})$$

ซึ่งใช้กฎการควบคุม (2.10) เป็น

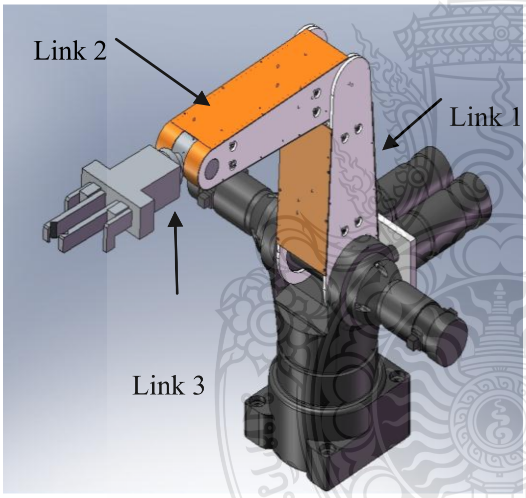
$$\dot{V} = -\dot{q}^T K_D\dot{q} \leq 0$$

ไม่น่าประหลาดใจเลย $\dot{V}$ เป็นค่าที่ติดลบซึ่งจะทำให้พลังงานของระบบค่อย ๆ ลดลงด้วยตัวหน่วง (Damper) เสมือนตอนนี้เราต้องการเพียงแค่ตรวจสอบว่าระบบไม่สามารถที่จะค้างอยู่ที่ระดับพลังงานที่ $\dot{V}$ เท่ากับ 0 ในขณะที่ q ไม่เท่ากับ q_d หรือเพื่อทำให้มันเป็นเชิงเทคนิคยิ่งกว่า อ้างอิงทฤษฎีเซ็ตของความแปรปรวน เนื่องจาก $\dot{V} = 0$ บ่งชี้ว่า $\dot{q} = 0$ ซึ่งในทางกลับกันบ่งชี้ว่า $\ddot{q} = H^{-1}K_p\tilde{q}$ อาจจะมี $\dot{V}$ เป็น 0 เฉพาะถ้า $\tilde{q} = 0$ ดังนั้นระบบจะลู่เข้าสู่สถานะที่ต้องการ

บทที่ 3
วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 หุ่นยนต์ต้นแบบ CRS Robot

จากโครงสร้างของหุ่นยนต์ต้นแบบ CRS Robotic แบบ 5 แกนซึ่งประกอบด้วยลิงค์และมือจับ (End Effecter) ที่มีจุดหมุน 5 จุดซึ่งมือจับเป็นส่วนประกอบสุดท้ายที่ต่อเข้ากับข้อต่อสุดท้ายของแขนกล และแขนกล CRS Robotic ตัวนี้มีอายุการใช้งานมานานจึงทำให้ชิ้นส่วนบางส่วนเกิดความเสียหายและไม่มีอะไหล่เปลี่ยนเช่น เฟืองเกียร์แกนที่ 1 หรือฐานเสียหายไป ดังนั้นจึงทำการทดลองการเคลื่อนที่ได้เพียง 3 แกนเท่านั้น โดยแขนที่ 1 ซึ่งจะเป็นแกนที่อยู่ด้านล่างสุด ติดกับฐานนั้นใช้งานไม่ได้ จึงเปลี่ยนการนับแกนที่ 2 เป็นแกนที่1 แทนดังแสดงในภาพที่ 3.1



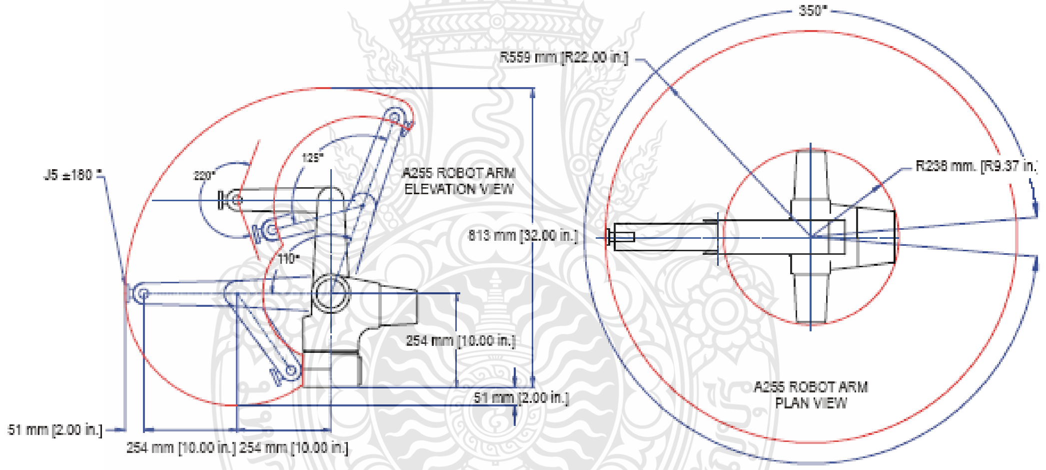
ภาพที่ 3.1 โครงสร้างของแขนกล CRS Robotic

ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของแขนกลในแต่ละแกนที่จะนำมาใช้ในการทำงานวิจัยนั้นมีความสำคัญอย่างมาก ต่อความสำเร็จและความถูกต้องในการควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกลในการศึกษาวิจัย ค่าพารามิเตอร์บางอย่างสามารถหาได้ เช่น ความยาวโดยการวัดขนาด มวลโดยการชั่งน้ำหนัก บางอย่างมีความซับซ้อนที่สามารถได้มาจากการคำนวณทางคณิตศาสตร์ เช่น โมเมนต์ความเฉื่อยของแต่ละแกน จาโคเบียนเมทริกซ์ เมทริกซ์ความเฉื่อยและเมทริกซ์แรงบิดจากความโน้มถ่วง เป็นต้น

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติต่างๆของแขนกล CRS รุ่น A255 ที่จะใช้ในการวิจัยนี้

Axis	Range of Motion	Maximum speed	Default Acceleration	Gear Ratio	Torque Rating
Joint 1	0° ถึง $+110^{\circ}$	$210^{\circ}/s$	$498^{\circ}/s^2$	72:1	9.6 N-m [85 in.-lb]
Joint 2	-125° ถึง 0°	$210^{\circ}/s$	$498^{\circ}/s^2$	72:1	9.6 N-m [85 in.-lb]
Joint 3	$\pm 110^{\circ}$	$675^{\circ}/s$	$2240^{\circ}/s^2$	72:1	2.7 N-m [24.3 in.-lb]

ค่าพารามิเตอร์แรกคือพื้นการทำงาน (Workspace) ที่แขนกล CRS สามารถเคลื่อนที่ไปได้หรือเข้าถึงได้ซึ่งแสดงในภาพที่ 3.2 นอกจากนั้นยังแสดงขนาดมุมของแต่ละแกนของแขนกล CRS ที่สามารถเคลื่อนที่ไปได้



ภาพที่ 3.2 ภาพความยาวระหว่างแต่ละแกนขนาดมุมของแต่ละแขน

ข้อสังเกตของแขนกล CRS รุ่น A255 นั้นจะมีความสัมพันธ์ในการเคลื่อนที่ของแต่ละข้อต่อคือเมื่อมีคำสั่งให้แกนที่ 1, 2, 3 เคลื่อนเป็นมุมองศา $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ ตามลำดับ แต่แกนที่ 2 จะเป็นมุม $\theta_1 + \theta_2$ ส่วนแกนที่ 3 จะหมุนไปเป็นมุม $\theta_1 + \theta_2 + \theta_3$ ดังนั้นเพื่อให้แขนในแกนที่ 2 และ 3 เคลื่อนหรือหมุนไปตามองศาที่กำหนด จะต้องมีการชดเชยองศาการหมุนด้วยมุม θ_1 สำหรับแกนที่ 2 และชดเชยองศาการหมุนด้วยมุม $\theta_1 + \theta_2$ สำหรับแกนที่ 3

3.2 วิเคราะห์สมการการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ที่ควบคุมด้วยระบบควบคุมแบบ PD

ในการวิเคราะห์สมการการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ที่มีการเชื่อมต่อของ 3 ลิงค์ดังภาพที่ 3.1 ซึ่งตำแหน่งของแต่ละข้อต่อนั้นสามารถอธิบายได้ด้วยเวคเตอร์ที่มีขนาด 3 x 1 q ของมุมร่วม และอินพุต ของตัวขับเคลื่อนหรือมอเตอร์ประกอบไปด้วยเวคเตอร์ที่มีขนาด 3 x 1 τ ของแรงบิด (Torque) ที่ประยุกต์ใช้ที่แต่ละข้อต่อของแขนกล สมการพลวัตของแขนกลอย่างง่าย นั้นเป็นแบบไม่เชิงเส้นและสามารถเขียนในรูปแบบทั่วไปได้ดังนี้

$$H(q)\ddot{q} + C(q,\dot{q})\dot{q} + g(q) = \tau$$

โดยที่ $H(q), C(q,\dot{q})$ และ $g(q)$ คือ เมทริกซ์ความเฉื่อย, เมทริกซ์แรงบิดสู่ศูนย์กลางและ Corolis และ เมทริกซ์แรงบิดจากความโน้มถ่วง ตามลำดับ
สมการพลวัตของแขนกลแบบ 3 แกนสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & H_{13} \\ H_{21} & H_{22} & H_{23} \\ H_{31} & H_{32} & H_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \\ \ddot{q}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \\ G_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

ในการจำลองการเคลื่อนที่ของแขนกลแบบ 3 แกน ต้องหาค่า $\ddot{q}_1$, $\ddot{q}_2$ และ $\ddot{q}_3$ จากการแก้สมการทางคณิตศาสตร์โดยใช้วิธีอินเวอรสเมตริกซ์ H เพื่อแก้สมการดังนี้

$$\begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \\ \ddot{q}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} & H_{13} \\ H_{21} & H_{22} & H_{23} \\ H_{31} & H_{32} & H_{33} \end{bmatrix}^{-1} \left[-\begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \\ G_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} \right] \quad (3.2)$$

$$\begin{aligned} \ddot{q}_1 &= invH_{11}\{-C_{11}\dot{q}_1 - C_{12}\dot{q}_2 - C_{13}\dot{q}_3 + \tau_1\} + invH_{12}\{-C_{21}\dot{q}_1 - C_{22}\dot{q}_2 - C_{23}\dot{q}_3 + \tau_2\} \\ &\quad + invH_{13}\{-C_{31}\dot{q}_1 - C_{32}\dot{q}_2 - C_{33}\dot{q}_3 + \tau_3\} \\ \ddot{q}_2 &= invH_{21}\{-C_{11}\dot{q}_1 - C_{12}\dot{q}_2 - C_{13}\dot{q}_2 + \tau_1\} + invH_{22}\{-C_{21}\dot{q}_1 - C_{22}\dot{q}_2 - C_{23}\dot{q}_3 + \tau_2\} \\ &\quad + invH_{23}\{-C_{31}\dot{q}_1 - C_{32}\dot{q}_2 - C_{33}\dot{q}_3 + \tau_3\} \\ \ddot{q}_3 &= invH_{31}\{-C_{11}\dot{q}_1 - C_{12}\dot{q}_2 - C_{13}\dot{q}_2 + \tau_1\} + invH_{32}\{-C_{21}\dot{q}_1 - C_{22}\dot{q}_2 - C_{23}\dot{q}_3 + \tau_2\} \\ &\quad + invH_{33}\{-C_{31}\dot{q}_1 - C_{32}\dot{q}_2 - C_{33}\dot{q}_3 + \tau_3\} \end{aligned}$$

เพื่อจำลองการเคลื่อนที่ของแขนกลแบบ 3 แกนตามเส้นทางและความเร็วที่กำหนด ด้วยระบบควบคุมแบบ PID แรงบิดของแต่ละข้อต่อ τ_1 , τ_2 และ τ_3 สามารถคำนวณได้จาก

$$\begin{bmatrix}\tau_1\\ \tau_2\\ \tau_3\end{bmatrix} = -\left[K_p\right]\begin{bmatrix}\tilde{q}_1\\ \tilde{q}_2\\ \tilde{q}_3\end{bmatrix} - \left[K_D\right]\begin{bmatrix}\dot{\tilde{q}}_1\\ \dot{\tilde{q}}_2\\ \dot{\tilde{q}}_3\end{bmatrix} - \left[K_i\right]\begin{bmatrix}\int \tilde{q}_1 dt\\ \int \tilde{q}_2 dt\\ \int \tilde{q}_3 dt\end{bmatrix} \tag{3.3}$$

นำสมการของระบบควบคุมแบบ PID (3.3) แทนลงในสมการพลวัตแบบจำลองของแขนกล (3.2) เพื่อจะทำการจำลองการควบคุมการเคลื่อนที่โดยใช้โปรแกรม Matlab/Simulink โดยที่เมทริกซ์ $H(q)$ และ $C(q,\dot{q})$ สามารถคำนวณหาได้จากสมการลากรานซ์ (Lagrange Equation) ซึ่งมีส่วนประกอบดังนี้

$$H_{11} = I_1 + I_2 + I_3 + \left(\frac{L_1^2 m_1}{4}\right) + L_1^2 m_2 + L_1^2 m_3 + \left(\frac{L_2^2 m_2}{4}\right) + L_2^2 m_3 + \left(\frac{L_3^2 m_3}{4}\right)$$
$$+ L_1 L_3 m_3 \cos(q_2 + q_3) + L_1 L_2 m_2 \cos(q_2) + 2 L_1 L_2 m_3 \cos(q_2) + L_2 L_3 m_3 \cos(q_3)$$

$$H_{12} = I_2 + I_3 + \left(\frac{L_2^2 m_2}{4}\right) + L_2^2 m_3 + \left(\frac{L_3^2 m_3}{4}\right) + \left(\frac{L_1 L_3 m_3 \cos(q_2 + q_3)}{2}\right) + \left(\frac{L_1 L_2 m_2 \cos(q_2)}{2}\right)$$
$$+ L_1 L_2 m_3 \cos(q_2) + L_2 L_3 m_3 \cos(q_3)$$

$$H_{13} = I_3 + \left(\frac{L_3^2 m_3}{4}\right) + \left(\frac{L_1 L_3 m_3 \cos(q_2 + q_3)}{2}\right) + \left(\frac{L_2 L_3 m_3 \cos(q_3)}{2}\right)$$

$$H_{21} = I_2 + I_3\left(\frac{L_2^2 m_2}{4}\right) + L_2^2 m_3 + \left(\frac{L_3^2 m_3}{4}\right) + \left(\frac{L_1 L_3 m_3 \cos(q_2 + q_3)}{2}\right) + \left(\frac{L_1 L_2 m_2 \cos(q_2)}{2}\right)$$
$$+ L_1 L_2 m_3 \cos(q_2) + L_2 L_3 m_3 \cos(q_3)$$

$$H_{22} = I_2 + I_3\left(\frac{L_2^2 m_2}{4}\right) + L_2^2 m_3 + \left(\frac{L_3^2 m_3}{4}\right) + L_2 L_3 m_3 \cos(q_3)$$

$$H_{23} = \left(\frac{m_3 L_3^2}{4}\right) + \left(\frac{L_2 m_3 \cos(q_3) L_3}{2}\right) + I_3$$

$$H_{31} = I_3\left(\frac{L_3^2 m_3}{4}\right) + \left(\frac{L_1 L_3 m_3 \cos(q_2 + q_3)}{2}\right) + \left(\frac{L_2 L_3 m_3 \cos(q_3)}{2}\right)$$

$$H_{32} = \left(\frac{m_3 L_3^2}{4}\right) + \left(\frac{L_2 m_3 \cos(q_3)}{2}\right) + I_3$$

$$H_{33} = \left(\frac{m_3 L_3^2}{4}\right) + I_3$$

$$C_{11} = \left(\frac{3L_1 L_3 m_3(\sin(q_1 + q_3))}{2}\right) - \left(\frac{3L_1 L_2 m_2 \sin(q_1)}{2}\right) - 3L_1 L_2 m_3 \sin(q_1)$$

$$C_{12} = 0$$

$$C_{13} = \left(\frac{L_1 L_3 m_3(\sin(q_1 + q_3))}{2}\right) - \left(\frac{L_2 L_3 m_3 \sin(q_3)}{2}\right)$$

$$C_{21} = L_1 L_2 m_3 \sin(q_2)\left(\frac{L_1 L_2 m_2(\sin(q_1))}{2}\right) - L_1 L_2 m_3 \sin(q_1) - \left(\frac{L_1 L_3 m_3 \sin(q_1 + q_3)}{2}\right)$$

$$+ \left(\frac{L_1 L_3 m_3(\sin(q_2 + q_3))}{2}\right) - \left(\frac{L_1 L_2 m_2 \sin(q_2)}{2}\right)$$

$$C_{22} = 0$$

$$C_{23} = \left(\frac{L_2 L_3 m_3 \sin(q_3)}{2}\right)$$

$$C_{31} = \left(\frac{L_1 L_3 m_3(\sin(q_2 + q_3))}{2}\right) - \left(\frac{L_1 L_3 m_3 \sin(q_1 + q_3)}{2}\right) + \left(\frac{L_2 L_3 m_3(\sin(q_3))}{2}\right)$$

$$C_{32} = \left(\frac{L_2 L_3 m_3(\sin(q_3))}{2}\right)$$

$$C_{33} = 0$$

$$G_1 = \left(\frac{g l_2 m_2 \cos(\tau_1 + \tau_2)}{2}\right) + g l_2 m_3 \cos(\tau_1 + \tau_2) + \left(\frac{g l_1 m_1 \cos(\tau_1)}{2}\right) + g l_1 m_2 \cos(\tau_1) +$$

$$g l_1 m_3 \cos(\tau_1) + \left(\frac{g l_3 m_3 \cos(\tau_1 + \tau_2 + \tau_3)}{2}\right)$$

$$G_2 = \left(\frac{g l_2 m_2 \cos(\tau_1 + \tau_2)}{2}\right) + g l_2 m_3 \cos(\tau_1 + \tau_2)\left(\frac{g l_3 m_3 \cos(\tau_1 + \tau_2 + \tau_3)}{2}\right)$$

$$G_3 = \left(\frac{g l_3 m_3 \cos(\tau_1 + \tau_2 + \tau_3)}{2}\right)$$

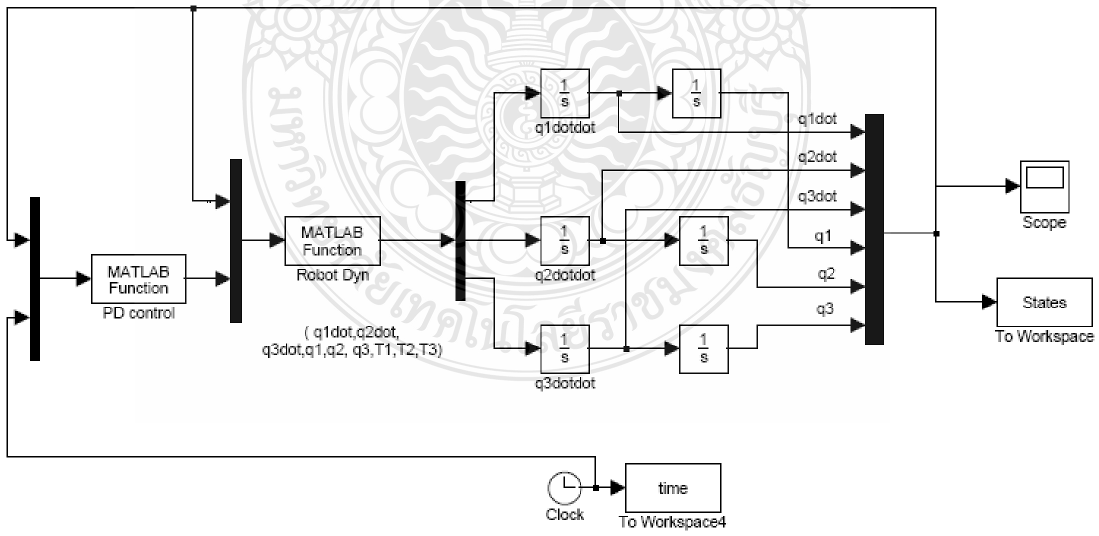
โดยที่คุณสมบัติต่างๆ ของแขนกล CRS แบบ 3 ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของแขนกล CRS

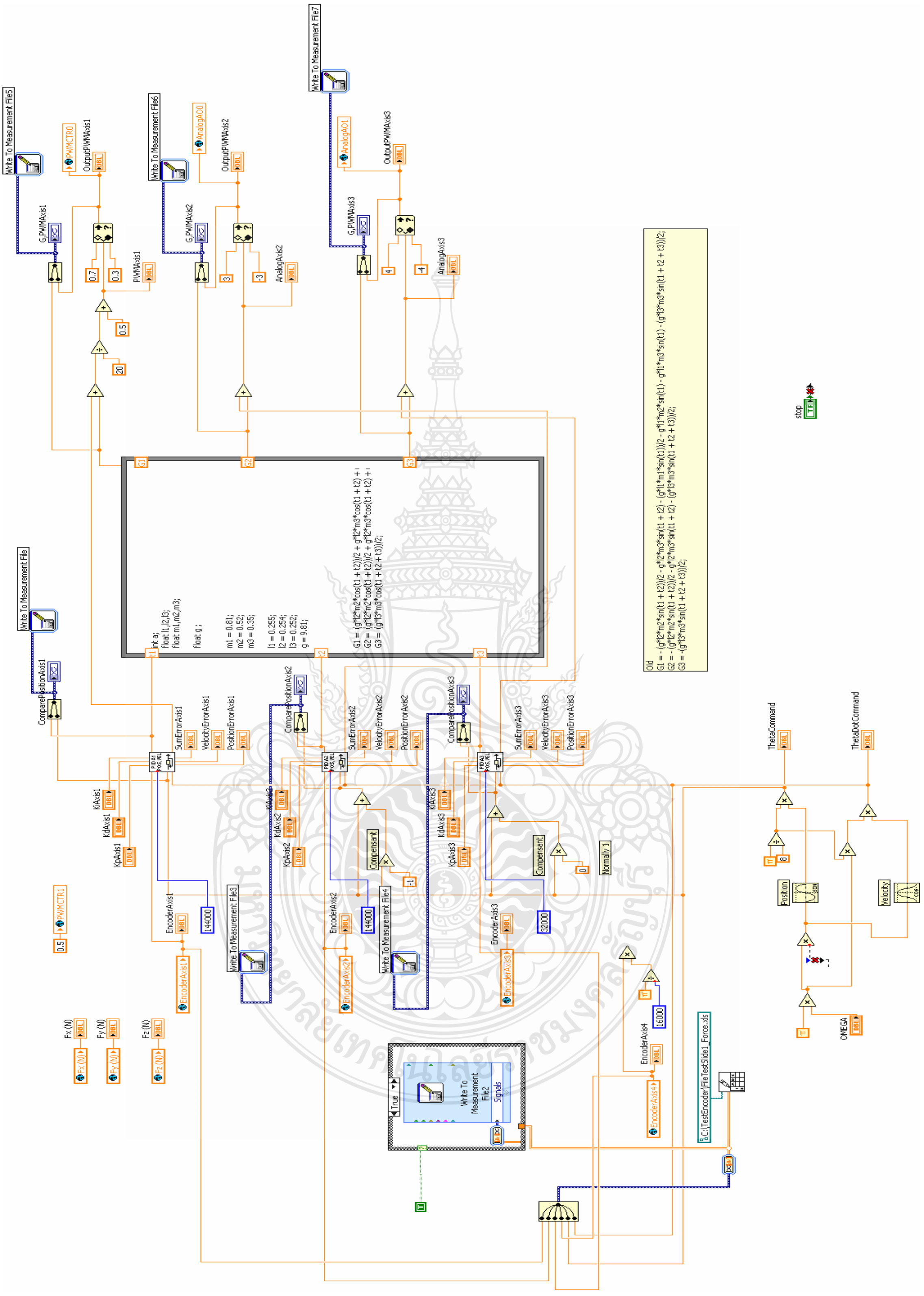
ลิงค์ที่	ความยาว-L (m)	โมเมนต์ความเฉื่อย-I $(Kg-m^2)$	K_d	K_p	K_i
ลิงค์ 1	0.255	0.39	-15	-20	20
ลิงค์ 2	0.254	0.27	-35	-17	40
ลิงค์ 3	0.252	0.18	-0.4	-0.45	0.3

เมื่อแทนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ในตารางที่ 3.2 จะได้ค่า $H_{11}, H_{12} H_{13}, H_{21}, H_{22}, H_{23}, H_{31}, H_{32}, H_{33}$ $C_{11}, C_{12}, C_{13,} C_{21}, C_{22}, C_{23}, C_{31}, C_{32}, C_{33}$ เพื่อนำไปแทนค่าลงในสมการพลวัตของหุ่นยนต์ แล้วใช้โปรแกรม Matlab/Simulink ช่วยในการจำลองการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์และคำนวณหาค่าของแรงบิด (toque) โดยใช้ระบบควบคุมแบบ PD ตามที่กำหนดไว้

จากสมการข้างต้นนำมาสร้างแบบจำลอง PID Control ด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink ได้ดังภาพที่ 3.3 และแผนภาพการควบคุมด้วย PID Control ด้วยโปรแกรม LabVIEW ดังภาพที่ 3.4 ดังนี้

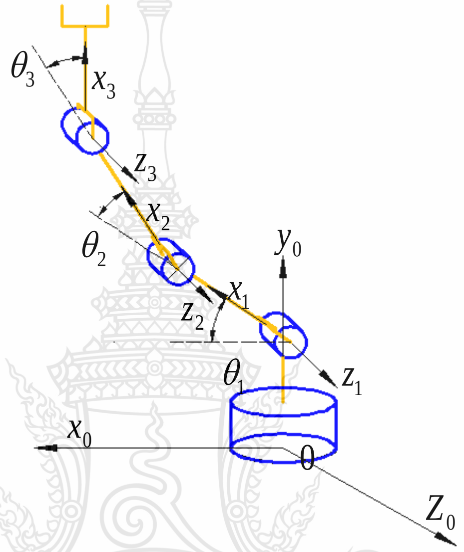


ภาพที่ 3.3 แบบจำลองการควบคุมด้วย PD Control ของแขนกลแบบ 3 แกน ด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink



ภาพที่ 3.4 แผนภาพการควบคุมด้วย PID Control ของแขนกล 3 แกนด้วยโปรแกรม LabVIEW

การหาสมการจลน์ศาสตร์ของแขนกลจำเป็นต้องอาศัยตัวแปร D-H และการระบุระบบพิกัด (Coordinate System) ที่จะใช้กับแต่ละข้อต่อของแขนกลแต่เนื่องข้อจำกัดจากที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ซึ่งทำให้แขนกล CRS นี้สามารถเคลื่อนที่ได้เฉพาะในระนาบ 2 มิติ ดังนั้นผู้วิจัยจึงใช้การอธิบายด้วยระบบพิกัดเป็นแบบเชิงขั้ว (Polar coordinate) แทนแบบคาร์ทีเชียนในพิกัดแบบ 3 มิติของแขนกล CRS ทั้ง 3 แกนดังในภาพที่ 3.5



ภาพที่ 3.5 การตั้งแกนของแขนหุ่นยนต์ CRS

ตารางที่ 3.3 ค่าของตัวแปรของแขนหุ่นยนต์ในแต่ละแกน

i	a_{i-1}	α_{i-1}	d_{i-1}	θ_i
0	0	0	0.254*	0
1	0.254*	90°	0	$0 < \theta_1 < 150^\circ$
2	0.254*	0	0	$0 < \theta_2 < 300^\circ$
3	0.254*	0	0	$0 < \theta_3 < 120^\circ$

หมายเหตุ * หน่วยเป็น เมตร

จากภาพที่ 3.5 เราสามารถใช้สมการจลน์ศาสตร์ในการหาพิกัดตำแหน่งของปลายแต่ละข้อต่อในแต่ละแกนได้ดังสมการที่ (3.4) – (3.6)

Link 1:
$$\left.\begin{aligned} x_1 &= L_1 \cos\theta_1 \\ y_1 &= L_1 \sin\theta_1 \end{aligned}\right\} \tag{3.4}$$

Link 2:
$$\left.\begin{aligned} x_2 &= L_1 \cos\theta_1 + L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ y_2 &= L_1 \sin\theta_1 + L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \end{aligned}\right\} \tag{3.5}$$

Link 3:
$$\left.\begin{aligned} x_2 &= L_1 \cos\theta_1 + L_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) + L_3 \cos(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \\ y_2 &= L_1 \sin\theta_1 + L_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) + L_3 \sin(\theta_1 + \theta_2 + \theta_3) \end{aligned}\right\} \tag{3.6}$$

และจาโคเบียนเมทริกซ์ $= \begin{bmatrix} \dfrac{\partial x_3}{\partial\theta_1} & \dfrac{\partial x_3}{\partial\theta_2} & \dfrac{\partial x_3}{\partial\theta_3} \\ \dfrac{\partial y_3}{\partial\theta_1} & \dfrac{\partial y_3}{\partial\theta_2} & \dfrac{\partial y_3}{\partial\theta_3} \end{bmatrix}$

3.3 วิเคราะห์การเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ CRS ที่ควบคุมด้วยระบบควบคุม Adaptive

ถ้าให้นิยามของความผิดพลาดของตัวแปรที่ไม่รู้ค่า (Parameter Error): $\tilde{a} = \hat{a} - a$ โดยที่ a และ $\hat{a}$ คือค่าประมาณของตัวแปรที่ไม่รู้ค่าและค่าความผิดพลาดในการเคลื่อนที่ของแต่ละข้อต่อ (Joint Error): $s = \dot{\tilde{q}} + \Lambda\tilde{q}$ โดยที่ $\tilde{q} = q - q_d$ โดยที่ q และ q_d คือองศาการเคลื่อนที่ของแขนกลจริงและของคำสั่งในแต่ละข้อต่อ

จากทฤษฎีของ Lyapunov พลังงานทั้งหมดของแขนกลจะเท่ากับพลังงานจลน์บวกกับพลังงานศักดิ์ และค่าที่ได้จะต้องมากกว่าศูนย์เสมอ จึงได้สมการเป็น

$$V = \frac{1}{2}\left[s^T H s\right] + \frac{1}{2}\left[\tilde{a}^T \Gamma^{-1} \tilde{a}\right] \tag{3.7}$$

เมื่อหาอนุพันธ์ของพลังงานทั้งหมด V เทียบกับเวลาจะได้

$$\dot{V} = \frac{1}{2}\dot{s}^T Hs + \frac{1}{2}s^T H\dot{s} + \frac{1}{2}s^T \dot{H}s + \frac{1}{2}\dot{\tilde{a}}^T \Gamma^{-1}\tilde{a} + \frac{1}{2}\tilde{a}^T \Gamma^{-1}\dot{\tilde{a}} \quad (3.8)$$

เมื่อแทนค่า

$$s = \dot{\tilde{q}} + \Lambda\tilde{q} = \dot{q} - \dot{q}_d + \Lambda\tilde{q} \quad \text{โดยที่} \quad \dot{q}_r = \dot{q}_d - \Lambda\tilde{q}$$

และ

$$\dot{s} = \ddot{\tilde{q}} + \Lambda\dot{\tilde{q}} = \ddot{q} - \ddot{q}_r \quad (3.9)$$

จากสมการของแขนกล

$$H\ddot{q} + C\dot{q} + g = \tau$$

$$H\ddot{q} = \tau - C\dot{q} - g \quad \text{โดยที่} \quad \dot{q} = s + \dot{q}_r$$

$$H\ddot{q} = \tau - C(s + \dot{q}_r) - g \quad (3.10)$$

จากสมการที่ (3.9) แทน ลงไปในสมการที่ (3.8) และจัดรูปใหม่ได้

$$\dot{V} = s^T H(\ddot{q} - \ddot{q}_r) + \frac{1}{2}s^T \dot{H}s + \dot{\tilde{a}}^T \Gamma^{-1}\tilde{a} \quad (3.11)$$

แทนค่าสมการ (3.10) ลงในสมการ (3.11) และจัดรูปใหม่ได้

$$\dot{V} = s^T\left(\tau - C(s + \dot{q}_r) - g\right) - s^T H\ddot{q}_r + \frac{1}{2}s^T \dot{H}s + \dot{\tilde{a}}^T \Gamma^{-1}\tilde{a}$$

$$\dot{V} = -s^T Cs + \frac{1}{2}s^T \dot{H}s + s^T(\tau - C\dot{q}_r - g) - s^T H\ddot{q}_r + \dot{\tilde{a}}^T \Gamma^{-1}\tilde{a}$$

$$\dot{V} = s^T(\tau - H\ddot{q}_r - C\dot{q}_r - g) + \dot{\tilde{a}}^T \Gamma^{-1}\tilde{a} \quad \text{โดยที่} \quad H\ddot{q}_r + C\dot{q}_r + g = Ya$$

$$\dot{V} = s^T(\tau - Ya) + \dot{\tilde{a}}^T \Gamma^{-1}\tilde{a} \quad (3.12)$$

เมื่อกำหนดให้กฎการควบคุม (Control Law): $\tau = Y\hat{a} - K_D s$ (3.13)

และแทนสมการ (3.13) ลงในสมการ (3.12) จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$\dot{V} = s^T(Y\hat{a} - Ya - K_D s) + \dot{\tilde{a}}^T \Gamma^{-1}\tilde{a}$$

$$\dot{V} = s^T Y\tilde{a} - s^T K_D s + \dot{\tilde{a}}^T \Gamma^{-1}\tilde{a} \tag{3.14}$$

เมื่อกำหนดให้กฎการปรับตัวได้ (Adaptation Law): $\dot{\hat{a}} = -\Gamma Y^T s$

$$\dot{\hat{a}}^T = -s^T Y\Gamma^T \tag{3.15}$$

และแทนสมการ (3.15) ลงในสมการ (3.14)

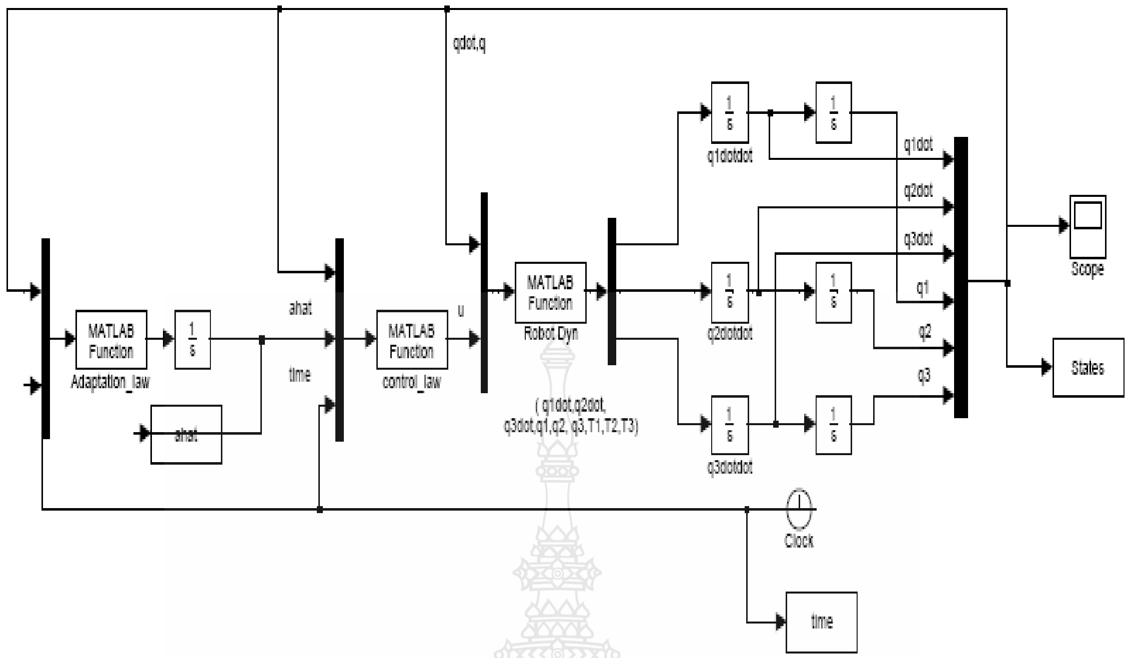
$$\dot{V} = -s^T K_D s + s^T Y\tilde{a} + (-s^T Y\Gamma^T)(\Gamma^{-1}\tilde{a})$$
$$\dot{V} = -s^T K_D s$$

เมื่อใช้สมการข้างต้นและกำหนดค่าพารามิเตอร์ตามตารางที่ 3.4 และใช้สมการของ Control Law ในสมการที่ (3.13) ซึ่งอนุพันธ์ V จะมีค่าเป็นลบเสมอ ดังนั้นจากทฤษฎีลีอาปูนอปสามารถบอกได้ว่าระบบจะมีเสถียรภาพ และ Adaptation Law ในสมการที่ (3.15) ร่วมกับสมการพลวัตของแขนกล (3.10) เพื่อจะได้ค่า $\dot{\hat{a}}$ ในการประมาณค่าพารามิเตอร์ที่เรายังไม่รู้ เราจึงสามารถจำลองการเคลื่อนที่ของแขนกลโดยใช้โปรแกรม Matlab/Simulink เพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนของหุ่นยนต์ตามเส้นทางการเคลื่อนที่ที่กำหนดไว้จากสมการข้างต้นนำมาสร้างแบบจำลองของแขนกลที่ควบคุมด้วย Adaptive Control ได้ดังภาพที่ 3.6 ดังนี้

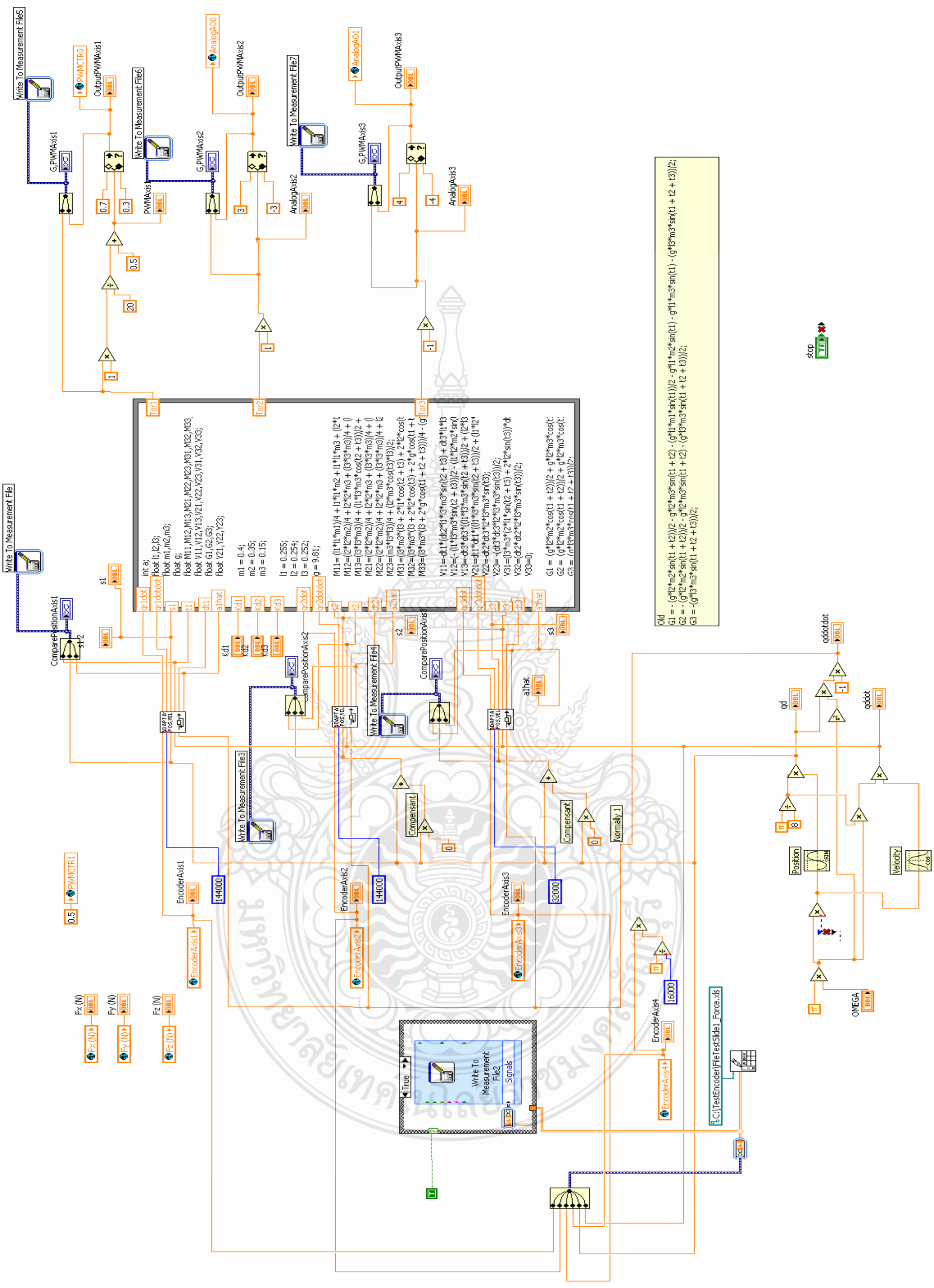
ตารางที่ 3.4 ค่าพารามิเตอร์ต่างๆของ Adaptive Control

ลิงค์ที่	ความยาว-L (m)	โมเมนต์ความเฉื่อย-I $(Kg-m^2)$	K_d	Λ	Γ
ลิงค์ 1	0.255	0.39	100	150	100
ลิงค์ 2	0.254	0.27	220	200	225
ลิงค์ 3	0.252	0.18	250	290	280

จากสมการข้างต้นนำมาสร้างแบบจำลอง Adaptive Control ด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink ได้ดังภาพที่ 3.6 และแผนภาพการควบคุมด้วย Adaptive Control ด้วยโปรแกรม LabVIEW ดังภาพที่ 3.7 ดังนี้



ภาพที่ 3.6 แบบจำลองการควบคุมด้วย Adaptive Control ของแขนกลแบบ 3 แกน ด้วยโปรแกรม Matlab/Simulink

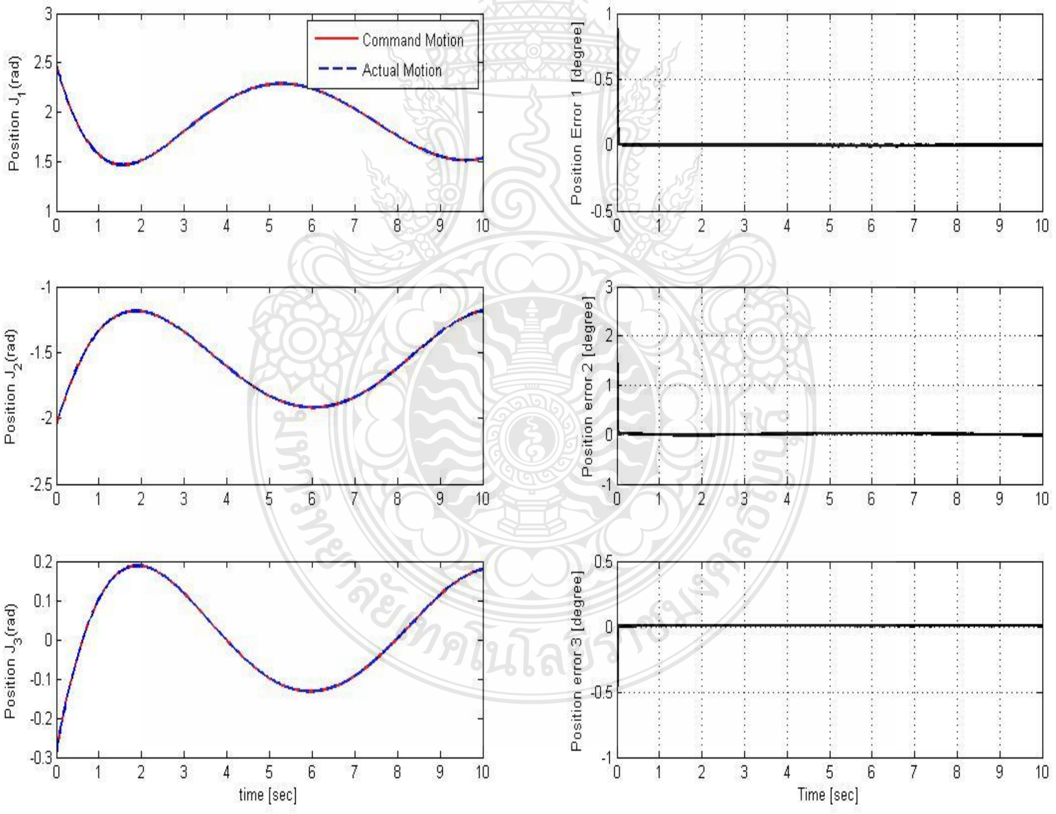


ภาพที่ 3.7 แผนภาพการควบคุมด้วย Adaptive Control ของแขนกล 3 แกนด้วยโปรแกรม LabVIEW

บทที่ 4
ผลการทดลอง

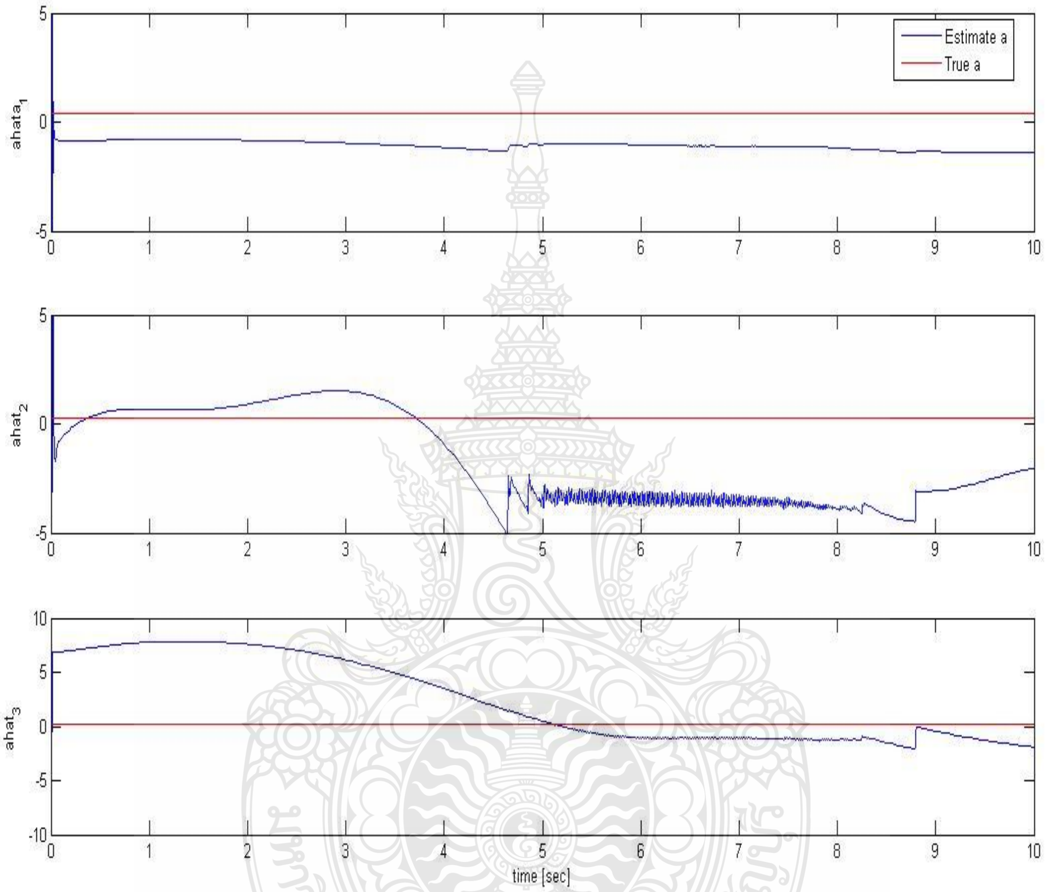
4.1 ผลการจำลองการควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกลด้วยระบบควบคุมแบบปรับตัวได้

จากการสร้างแบบจำลองของแขนกล 3 แกนที่ควบการเคลื่อนที่ด้วยระบบควบคุมแบบปรับตัวได้ (Adaptive Control) โดยใช้โปรแกรม Matlab/Simulink ในการจำลองคำสั่งในการเคลื่อนของแต่ละข้อต่อจะเป็นแบบโพลิโนเมียว (Polynomial) ได้กราฟค่าการเคลื่อนที่ของแขนกลแกนที่ 1 2 และ 3 ตามภาพที่ 4.1 ซึ่งสรุปได้ว่าการเคลื่อนที่ในแบบจำลองเคลื่อนที่ได้ราบเรียบและสามารถเคลื่อนที่ตามเส้นทางที่ได้กำหนดไว้ และส่วนอีกกราฟเป็นค่าความผิดพลาด $(\tilde{q})$ ของแกนที่ 1 2 และ 3 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าความผิดพลาดมีค่าเข้าใกล้ศูนย์



ภาพที่ 4.1 ภาพการจำลองการเคลื่อนที่ของแขนกลแกนที่ 1 2 และ 3 (3 รูปในหลักด้านซ้าย) และค่าความผิดพลาดของแขนกลแกนที่ 1 2 และ 3 (3 รูปในหลักด้านขวา)

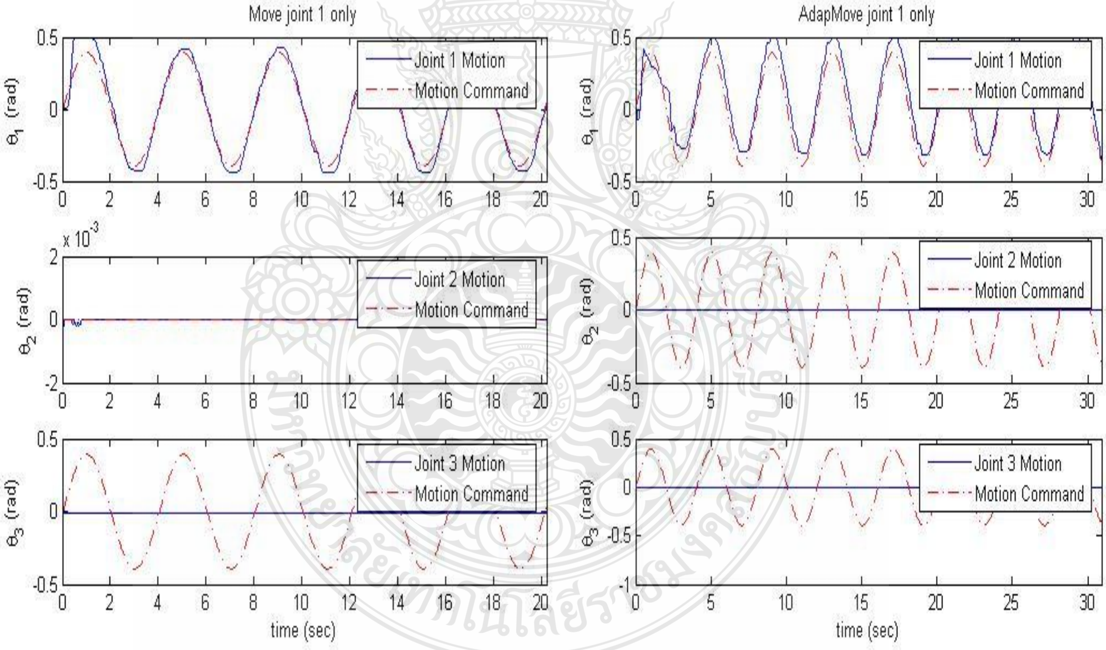
จากภาพที่ 4.2 เป็นกราฟแสดงการประมาณค่าของโมเมนต์ความเฉื่อยของแขนกลในแกนที่ 1 2 และ 3 ในการแบบจำลองการเคลื่อนที่ ผลการเคลื่อนที่ของแต่ละแกนจะเห็นได้ว่าค่าประมาณของโมเมนต์ความเฉื่อยนั้นลู่เข้าหาค่าโมเมนต์ความเฉื่อยจริงในแต่ละแกนการเคลื่อนที่เข้าใกล้จุดที่ได้กำหนดและจะมีค่าที่ราบเรียบไปเรื่อยๆ



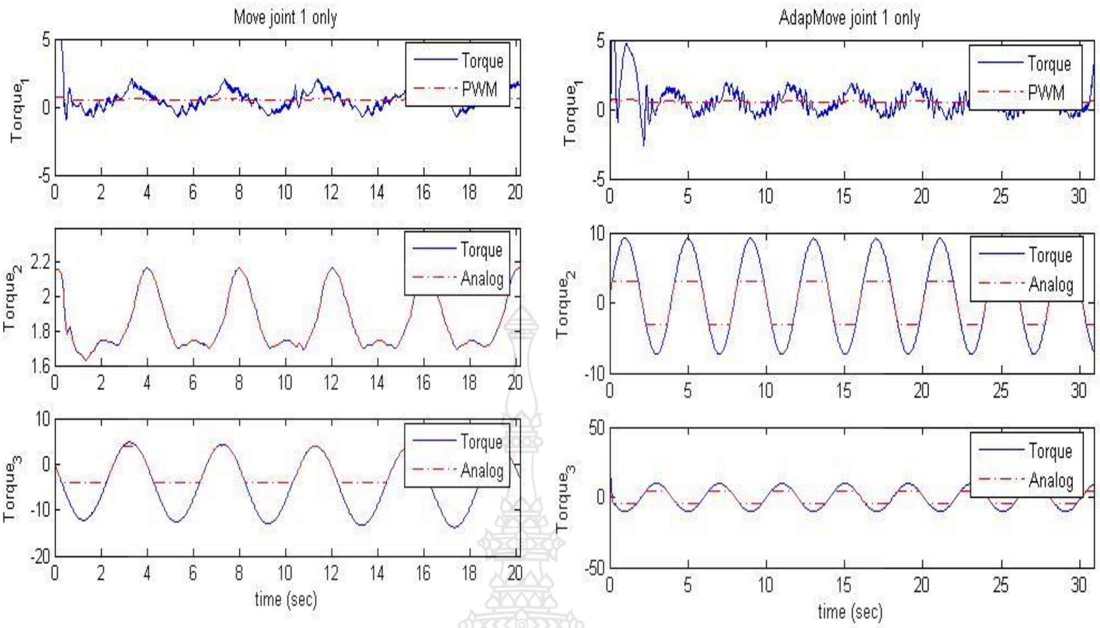
ภาพที่ 4.2 การเปรียบเทียบค่าจริงและประมาณของโมเมนต์ความเฉื่อยของแขนกลในการจำลองการเคลื่อนที่ของแขนกลแกนที่ 1 2 และ 3

4.2 เปรียบเทียบผลการทดลองการควบคุมการเคลื่อนที่ของเฉพาะแกนที่ 1 ระหว่างระบบควบคุมแบบพีไอดีและระบบควบคุมแบบปรับตัวได้

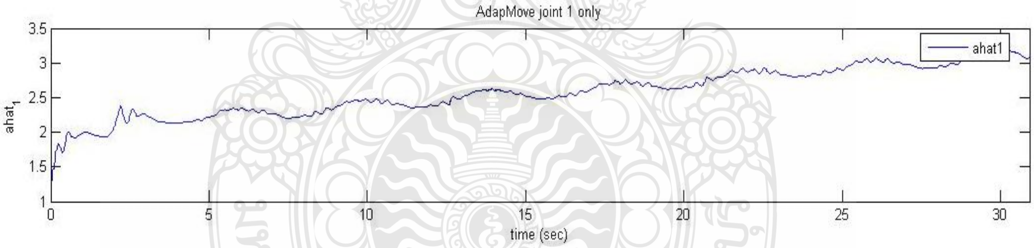
จากการทดลองได้กำหนดให้แขนกลแกนที่ 1 เคลื่อนที่เพียงแกนเดียวโดยให้การเคลื่อนที่เป็นแบบฟังก์ชั่นซายน์ (sine) $\frac{\pi}{8}\sin(\omega t)$ ซึ่งได้ล็อกแกนที่ 2 และ 3 ไม่ให้เคลื่อนที่โดยได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ $m_1 = 0.4Kg, l_1 = 0.255m, K_p = -15, K_i = -35, K_d = -0.4, Kd_1 = 36,$ $\gamma_1 = -40$ ทำให้ได้กราฟออกมาตามภาพที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าการเคลื่อนที่ที่ควบคุมด้วยระบบควบคุมพีไอดี สามารถควบคุมแขนกลแกนที่ 1 ให้เคลื่อนที่ตามเส้นทางได้แม่นยำ และราบเรียบกว่าที่ควบคุมด้วยระบบควบคุมแบบ Adaptive ส่วนกราฟของแรงบิดในแต่ละข้อต่อตามภาพที่ 4.4 ระบบการควบคุมแบบ Adaptive มีค่าการเคลื่อนที่ที่เข้าใกล้ศูนย์ได้ดีกว่าระบบการควบคุมแบบพีไอดี จะเห็นค่าจากกราฟเมื่อเริ่มต้นแรงบิดจะเยอะเมื่อเวลาผ่านไปแรงบิดก็จะลดลงและเคลื่อนที่กลับไปกลับมาเพียงเล็กน้อยเพื่อให้เคลื่อนที่เป็นเส้นตรงที่ได้กำหนด



ภาพที่ 4.3 การเปรียบเทียบการเคลื่อนที่ของแขนกลแกนที่ 1 ระหว่างการใช้ระบบควบคุมแบบพีไอดี (PID) (ซ้าย) กับการใช้ระบบควบคุมแบบปรับตัวได้ (Adaptive Control) (ขวา)



ภาพที่ 4.4 การเปรียบเทียบแรงบิดที่กระทำในแต่ละข้อต่อของแขนกลระหว่างการใช้ระบบควบคุมแบบพีไอดี (PID) (ซ้าย) กับการใช้ระบบควบคุมแบบปรับตัวได้ (Adaptive Control) (ขวา)

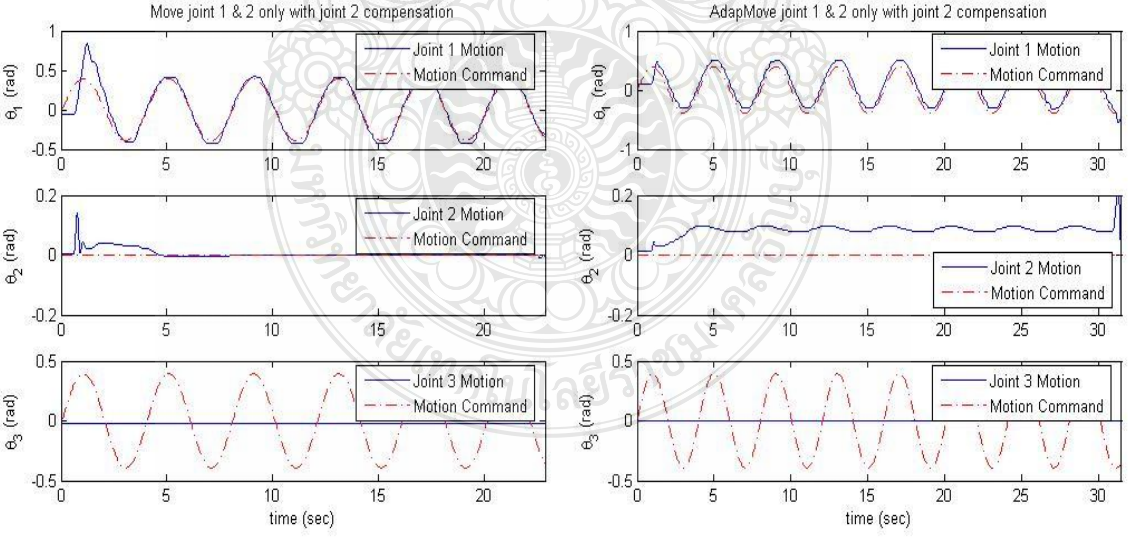


ภาพที่ 4.5 ค่าประมาณของโมเมนต์ความเฉื่อยของแขนกลในแกนที่ 1

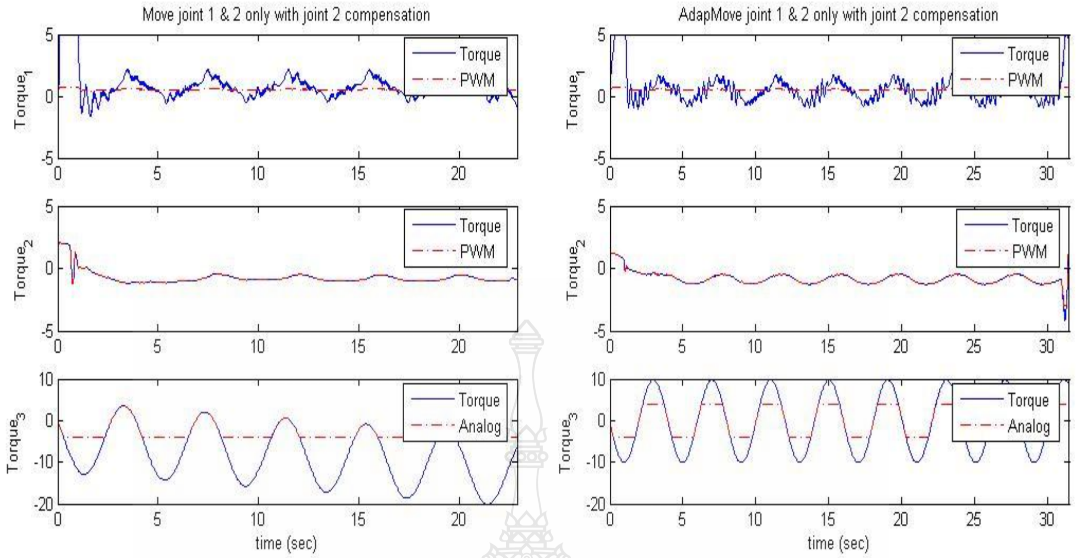
จากภาพที่ 4.5 แสดงค่าประมาณของโมเมนต์ความเฉื่อยของแขนกลในแกนที่ 1 ซึ่งค่าความเฉื่อยที่ได้จะมีค่าที่เริ่มต้นเป็นศูนย์และจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นตามเวลาโดยการเคลื่อนที่ของแขนกลแกนที่ 1 แกนเดียวทำให้ได้ค่าประมาณของโมเมนต์ความเฉื่อยอยู่ที่ค่าประมาณ 3 – 3.5 $\left(kg - m^2\right)$

4.3 เปรียบเทียบผลการทดลองการควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกลเฉพาะแกนที่ 1 และ 2 ระหว่างระบบควบคุมแบบพีไอดีและระบบควบคุมแบบปรับตัวได้แบบมีค่าความชดเชยสำหรับมุมของแกนที่ 2

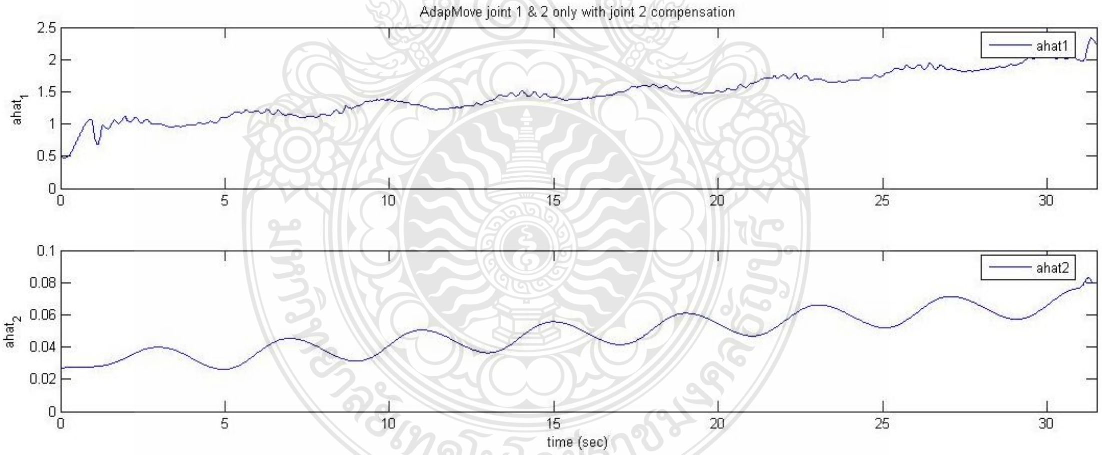
จากการทดลองได้กำหนดให้แขนกลแกนที่ 1 และ 2 เคลื่อนที่เพียงแกนเดียวโดยให้การเคลื่อนที่เป็นแบบฟังก์ชั่นซายน์ (sine) $\frac{\pi}{8}\sin(\omega t)$ ซึ่งได้ล็อกแกนที่ 3 ไม่ให้เคลื่อนที่โดยได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ $m_1 = 0.4Kg, l_1 = 0.255m,\ K_p = -15, K_i = -35, K_d = -0.4, Kd_1 = 36,$ $\Delta_1 = 0.6, \gamma_1 = -40 m_2 = 0.35Kg, l_2 = 0.254m, K_p = -20, K_i = -17, K_d = -0.45, Kd_2 = 42,$ $\Delta_2 = 0.5, \gamma_1 = -1$ ทำให้ได้กราฟออกมาตามภาพที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าการเคลื่อนที่ที่ควบคุมด้วยระบบควบคุมพีไอดีสามารถควบคุมแขนกลแกนที่ 1 ให้เคลื่อนที่ตามเส้นทางได้แม่นยำ และราบเรียบกว่าที่ควบคุมด้วยระบบควบคุมแบบ Adaptive และการเคลื่อนที่ของแขนกลแกนที่ 2 ซึ่งมีค่าแบบชดเชยทำให้การเคลื่อนที่ด้วยระบบควบคุมพีไอดี เข้าใกล้ศูนย์และราบเรียบมากกว่าแบบควบคุมที่ควบคุมด้วยระบบควบคุมแบบ Adaptive ส่วนกราฟของแรงบิดในแต่ละข้อต่อตามภาพที่ 4.7 ของแขนกลแกนที่ 1 และ 2 ที่ควบคุมด้วยระบบควบคุมแบบ Adaptive มีค่าแรงบิดที่น้อยกว่าหรือเข้าใกล้ศูนย์ได้ดีกว่าระบบการควบคุมแบบพีไอดี จะเห็นค่าจากกราฟเมื่อเริ่มต้นแรงบิดจะเยอะ เมื่อเวลาผ่านไปแรงบิดก็จะลดลงและเคลื่อนที่กลับไปกลับมาเพียงเล็กน้อยเพื่อให้เคลื่อนที่เป็นเส้นตรงที่ได้กำหนด



ภาพที่ 4.6 การเปรียบเทียบการเคลื่อนที่ของแขนกลแกนที่ 1 และ 2 แบบมีค่าชดเชยสำหรับมุมของแกนที่2 ระหว่างการใช้ระบบควบคุมแบบพีไอดี (PID) (ซ้าย) กับการใช้ระบบควบคุมแบบปรับตัวได้ (Adaptive Control) (ขวา)



ภาพที่ 4.7 การเปรียบเทียบแรงบิดที่กระทำในแต่ละข้อต่อของแขนกลแบบมีค่าชดเชยสำหรับมุมของแกนที่ 2 ระหว่างการใช้ระบบควบคุมแบบพีไอดี (PID) (ซ้าย) กับการใช้ระบบควบคุมแบบปรับตัวได้ (Adaptive Control) (ขวา)

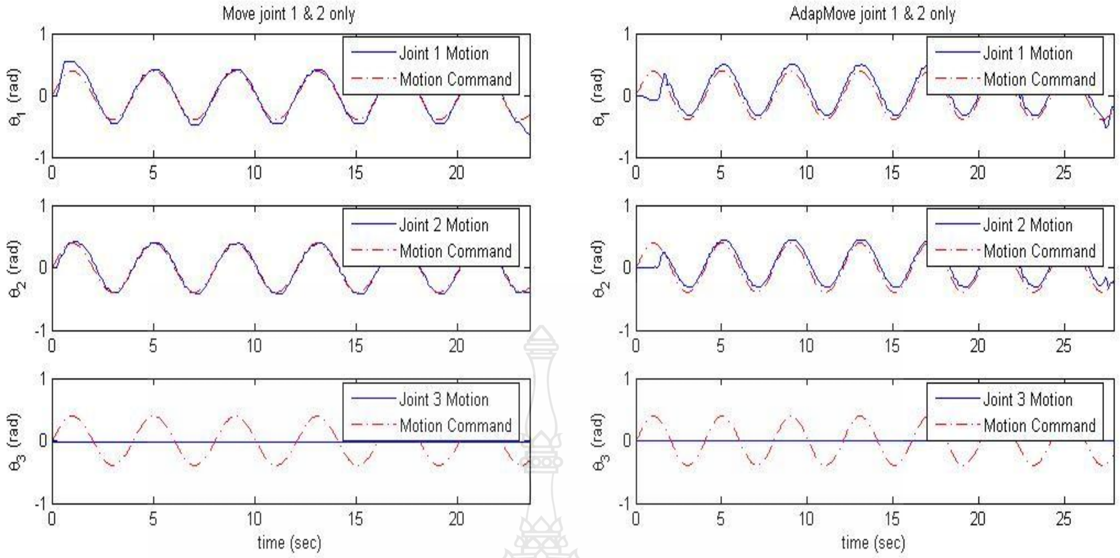


ภาพที่ 4.8 ค่าประมาณของโมเมนต์ความเฉื่อยของแขนกลในแกนที่ 1 และ 2 แบบมีค่าชดเชยสำหรับมุมของแกนที่ 2

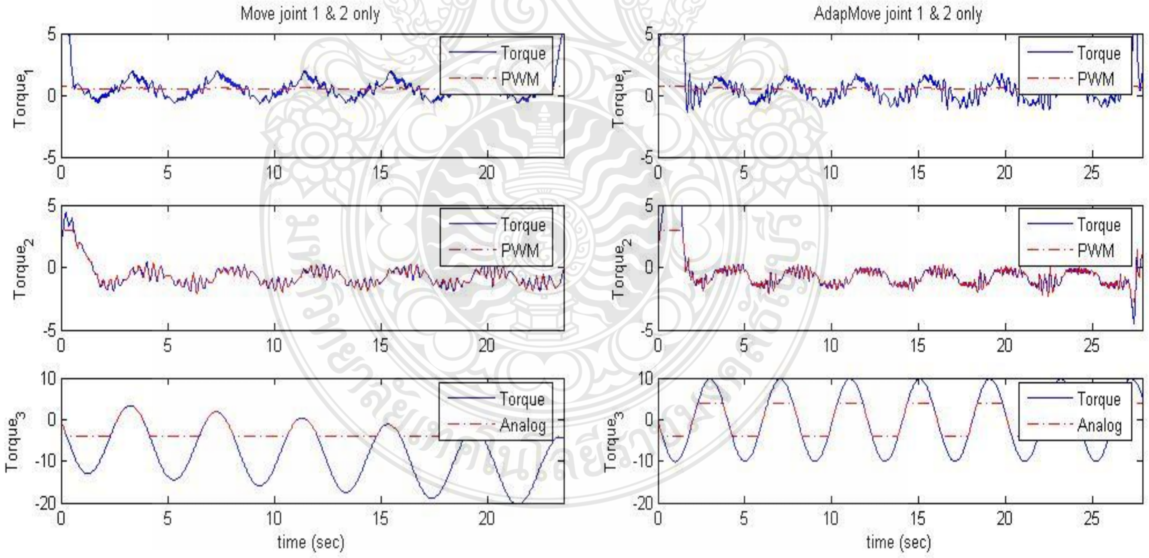
จากภาพที่ 4.8 การค่าประมาณของโมเมนต์ความเฉื่อยของแขนกลในแกนที่ 1 และ 2 แบบมีค่าชดเชย ซึ่งแขนกลแกนที่ 1 มีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยที่ได้จะมีค่าเริ่มต้นเป็นศูนย์และจะค่อยๆเพิ่มขึ้นตามเวลาโดยการทดลองนี้เราได้ทดลองการเคลื่อนที่ของแกนที่ 1 และ 2 ให้เคลื่อนที่พร้อมกันแต่เราได้กำหนดให้แกนที่ 2 มีค่าการชดเชยจึงทำให้กราฟที่ออกมาของแกนที่ 1 มีค่าใกล้เคียงกับการทดลองให้แกนที่ 1 เคลื่อนที่เพียงแกนเดียวโดยมีค่าประมาณ 2 – 2.5 $\left(kg-m^2\right)$ ส่วนแกนที่ 2 แบบมีค่าชดเชยกราฟที่ออกมาจะมีค่าโมเมนต์ความเฉยที่น้อยมากหรือเข้าใกล้ศูนย์ได้ค่าประมาณ 0.08 – 0.1 $\left(kg-m^2\right)$

4.4 เปรียบเทียบผลการทดลองการควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกลเฉพาะแกนที่ 1 และ 2 ระหว่างระบบควบคุมแบบพีไอดีและระบบควบคุมแบบปรับตัวได้แบบไม่มีค่าความชดเชย

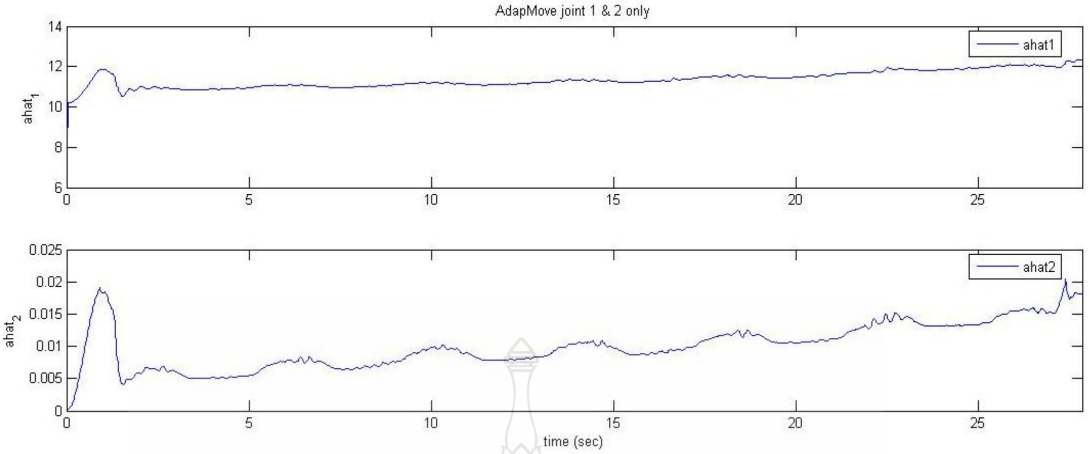
จากการทดลองได้กำหนดให้แขนกลแกนที่ 1และ 2 เคลื่อนที่เพียงแกนเดียวโดยให้การเคลื่อนที่เป็นแบบฟังก์ชั่นซายน์ (sine) $\frac{\pi}{8}\sin(\omega t)$ ซึ่งได้ล็อกแกนที่ 3 ไม่ให้เคลื่อนที่โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ $m_1 = 0.4Kg, l_1 = 0.255mK_p = -15, K_i = -35, K_d = -0.4, Kd_1 = 36,$ $\Delta_1 = 0.6, \gamma_1 = -40 m_2 = 0.35Kg, l_2 = 0.254m, K_p = -20, K_i = -17, K_d = -0.45, Kd_2 = 42,$ $\Delta_2 = 0.5, \gamma_1 = -1$ ทำให้ได้กราฟออกมาตามภาพที่ 4.9 จะเห็นได้ว่าการเคลื่อนที่ที่ควบคุมด้วยระบบควบคุมพีไอดีสามารถควบคุมแขนกลแกนที่ 1 และ 2 ให้เคลื่อนที่ตามเส้นทางได้แม่นยำ และราบเรียบกว่าที่ควบคุมด้วยระบบควบคุมแบบ Adaptive ส่วนกราฟของแรงบิดในแต่ละข้อต่อตามภาพที่ 4.10 ของแขนกลแกนที่ 1 และ 2 ที่ควบคุมด้วยระบบควบคุมแบบ Adaptive มีค่าแรงบิดที่น้อยกว่าหรือเข้าใกล้ศูนย์ได้ดีกว่าระบบการควบคุมแบบพีไอดี จะเห็นค่าจากกราฟเมื่อเริ่มต้นแรงบิดจะเยอะ เมื่อเวลาผ่านไปแรงบิดก็จะลดลงและเคลื่อนที่กลับไปกลับมาเพียงเล็กน้อยเพื่อให้เคลื่อนที่เป็นเส้นตรงที่ได้กำหนด



ภาพที่ 4.9 การเปรียบเทียบการเคลื่อนที่ของแขนกลแกนที่ 1 และ 2 แบบไม่มีค่าชดเชยระหว่างการใช้ระบบควบคุมแบบพีไอดี (PID) (ซ้าย) กับการใช้ระบบควบคุมแบบปรับตัวได้ (Adaptive Control) (ขวา)



ภาพที่ 4.10 การเปรียบเทียบแรงบิดที่กระทำในแต่ละข้อต่อของแขนกลแบบไม่มีค่าชดเชยระหว่างการใช้ระบบควบคุมแบบพีไอดี (PID) (ซ้าย) กับการใช้ระบบควบคุมแบบปรับตัวได้ (Adaptive Control) (ขวา)



ภาพที่ 4.11 ค่าประมาณของโมเมนต์ความเฉื่อยของแขนกลในแกนที่ 1 และ 2 แบบไม่มีค่าชดเชย

จากภาพที่ 4.11 แสดงค่าประมาณของโมเมนต์ความเฉื่อยของแขนกลในแกนที่ 1 และ 2 แบบไม่มีค่าชดเชย จากกราฟที่ได้จะเห็นว่าเมื่อเราทดลองโดยการเคลื่อนที่พร้อมกันของแขนกลแกนที่ 1 และ 2 แบบไม่มีค่าชดเชยทำให้มีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของแกนที่ 1 มีค่าเพิ่มมากขึ้นซึ่งมากกว่าการทดลองของแกนที่ 1 และ 2 แบบที่มีค่าชดเชยในแกนที่ 2 โดยได้ค่าประมาณ 12 – 14 $\left(kg-m^2\right)$ ส่วนแกนที่ 2 มีค่าประมาณของโมเมนต์ความเฉื่อยที่มีค่าใกล้เคียงกับการทดลองของแกนที่ 1 และ 2 แบบที่มีค่าชดเชยค่าประมาณ 0.015 – 0.02 $\left(kg-m^2\right)$

4.5 เปรียบเทียบผลการทดลองการควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกลเฉพาะแกนที่ 1 2 และ 3 ระหว่างระบบควบคุมแบบพีไอดีและระบบควบคุมแบบปรับตัวได้แบบมีค่าความชดเชยสำหรับมุมของแกน ที่ 2

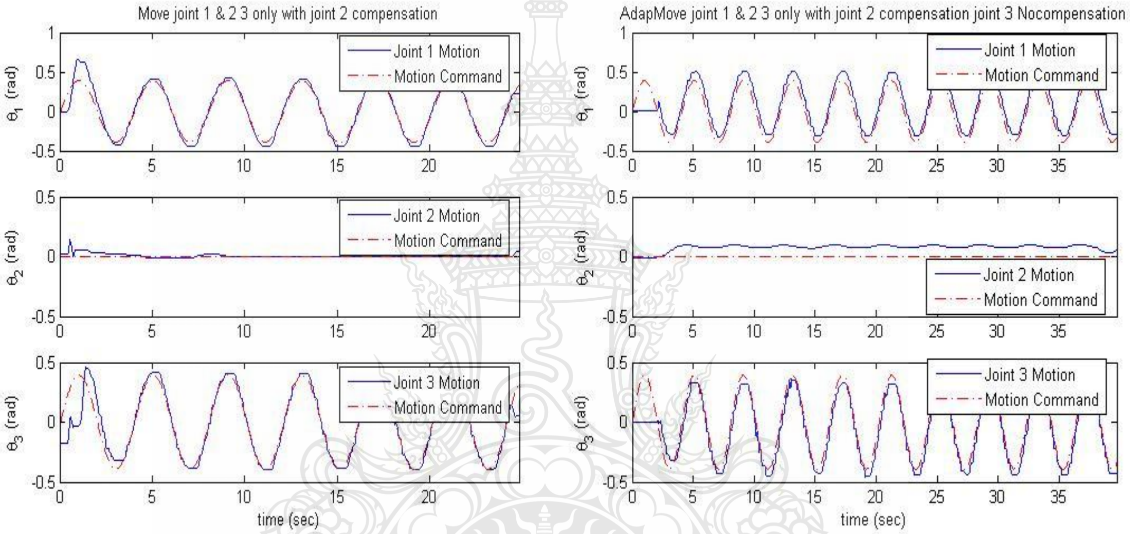
จากการทดลองได้กำหนดให้แขนกลแกนที่ 1 2 และ 3 เคลื่อนที่โดยให้การเคลื่อนที่เป็นแบบฟังก์ชั่นซายน์ (sine) $\frac{\pi}{8}\sin(\omega t)$ โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ ทำให้ได้กราฟออกมาตามภาพที่ 4.12

$m_1 = 0.4Kg, l_1 = 0.255m, \quad K_p = -15, K_i = -35, K_d = -0.4 \ , Kd_1 = 36, \Delta_1 = 0.6, \gamma_1 = -40$

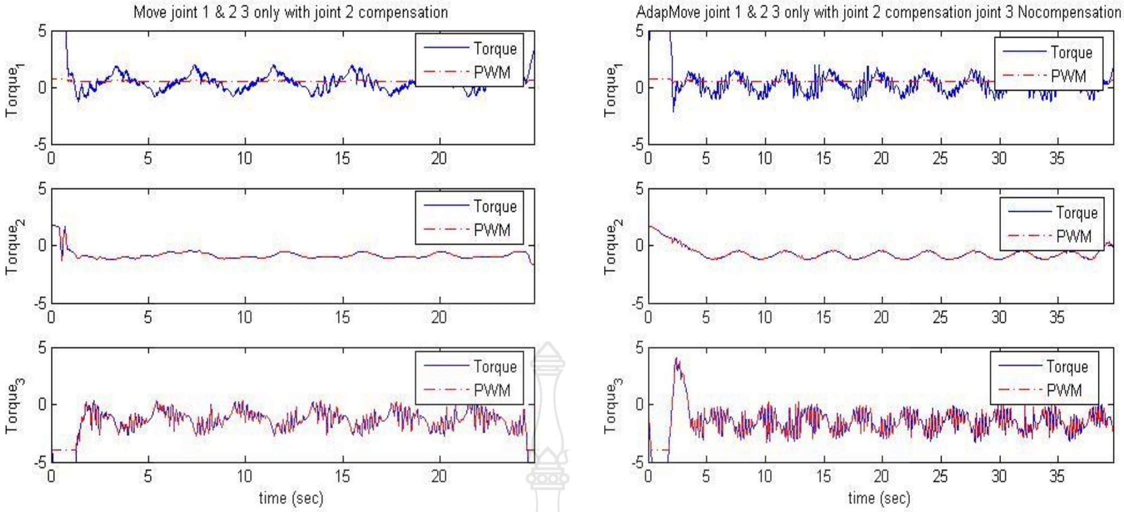
$m_2 = 0.35Kg, l_2 = 0.254m, K_p = -20, K_i = -17, K_d = -0.45, Kd_2 = 42, \Delta_2 = 0.5, \gamma_2 = -1$

$m_3 = 0.15Kg, l_3 = 0.252m, K_p = 20, K_i = 40, K_d = 0.3, Kd_3 = 26, \Delta_3 = 1.1, \gamma_3 = -15$ จะเห็นได้ว่าการเคลื่อนที่ที่ควบคุมด้วยระบบควบคุมพีไอดีสามารถควบคุมแขนกลแกนที่ 1 ให้เคลื่อนที่ตามเส้นทางได้แม่นยำ และราบเรียบกว่าที่ควบคุมด้วยระบบควบคุมแบบ Adaptive และการเคลื่อนที่

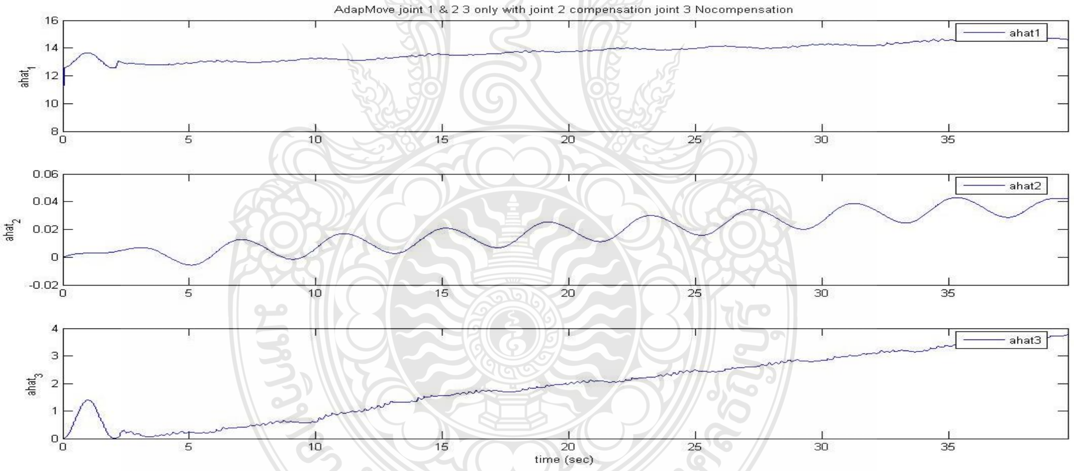
ของแขนกลแกนที่ 2 ซึ่งมีค่าแบบชดเชยทำให้การเคลื่อนที่ด้วยระบบควบคุมพีไอดี เข้าใกล้ศูนย์และราบเรียบมากกว่าแบบควบคุมที่ควบคุมด้วยระบบควบคุมแบบ Adaptive และการเคลื่อนที่ของแขนกลแกนที่ 3 ให้เคลื่อนที่ตามเส้นทางได้แม่นยำ และราบเรียบกว่าที่ควบคุมด้วยระบบควบคุมแบบ Adaptive ส่วนกราฟของแรงบิดในแต่ละข้อต่อตามภาพที่ 4.13 ของแขนกลแกนที่ 1 2 และ 3 ที่ควบคุมด้วยระบบควบคุมแบบ Adaptive มีค่าแรงบิดที่น้อยกว่าหรือเข้าใกล้ศูนย์ได้ดีกว่าระบบการควบคุมแบบพีไอดี จะเห็นค่าจากกราฟเมื่อเริ่มต้นแรงบิดจะเยอะ เมื่อเวลาผ่านไปแรงบิดก็จะลดลงและเคลื่อนที่กลับไปกลับมาเพียงเล็กน้อยเพื่อให้เคลื่อนที่เป็นเส้นตรงที่ได้กำหนด



ภาพที่ 4.12 การเปรียบเทียบการเคลื่อนที่ของแขนกลแกนที่ 1 2 และ 3 แบบมีค่าชดเชยสำหรับมุมของแกนที่2 ระหว่างการใช้ระบบควบคุมแบบพีไอดี (PID) (ซ้าย) กับการใช้ระบบควบคุมแบบปรับตัวได้ (Adaptive Control) (ขวา)



ภาพที่ 4.13 การเปรียบเทียบแรงบิดที่กระทำในแต่ละข้อต่อของแขนกลแบบมีค่าชดเชยสำหรับมุมของแกนที่ 2 ระหว่างการใช้ระบบควบคุมแบบพีไอดี (PID) (ซ้าย) กับการใช้ระบบควบคุมแบบปรับตัวได้ (Adaptive Control) (ขวา)



ภาพที่ 4.14 ค่าความเฉื่อยของแขนกลแกนที่ 1 2 และ 3 แบบมีค่าชดเชยสำหรับแกนของมุมที่ 2

จากภาพที่ 4.14 การค่าประมาณของโมเมนต์ความเฉื่อยของแขนกลในแกนที่ 1 2 และ 3 แบบมีค่าชดเชยสำหรับมุมของแกนที่ 2 โดยแกนที่ 1 เมื่อให้การเคลื่อนที่พร้อมกันทั้ง 3 แกนจึงทำให้แกนที่ 1 มีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยที่มากขึ้นเล็กน้อยมีค่าประมาณ 14 – 16 $(kg-m^2)$ ส่วนแกนที่ 2 เรากำหนดให้มีค่าชดเชย จึงทำให้ค่าประมาณโมเมนต์ความเฉื่อยมีค่าประมาณ 0.04 – 0.06 $(kg-m^2)$ และมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ส่วนแกนที่ 3 จะมีค่าประมาณของโมเมนต์ความเฉื่อยเริ่มต้นที่ศูนย์และเมื่อเวลาผ่านไปทำให้มีค่าโมเมนต์ความเฉื่อยเพิ่มขึ้นโดยมีค่าประมาณ 3 – 4 $(kg-m^2)$

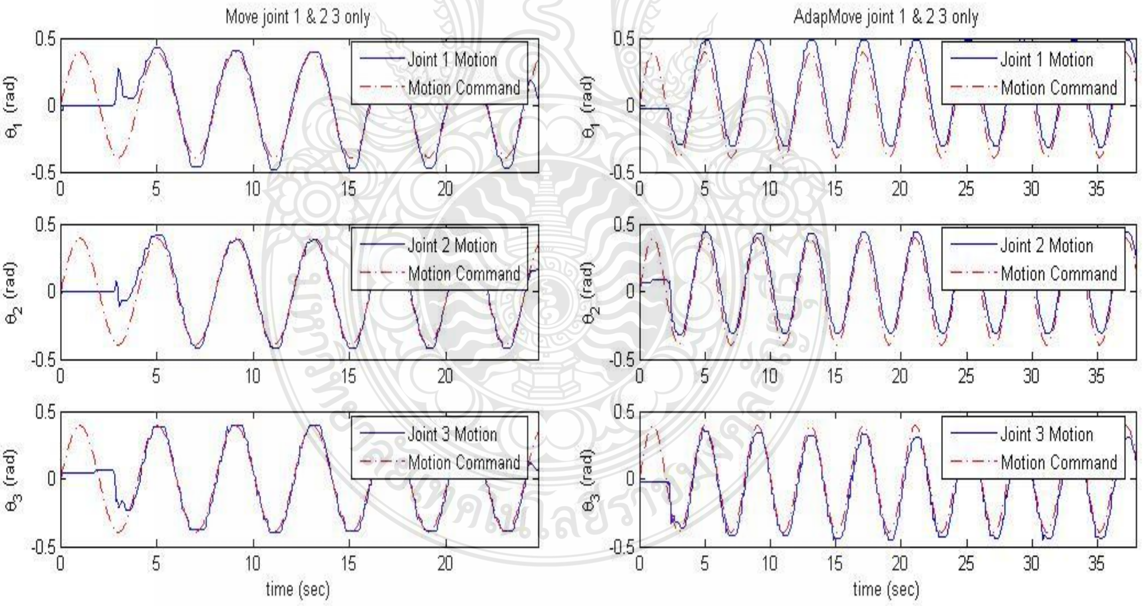
4.6 เปรียบเทียบผลการทดลองการควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกลเฉพาะแกนที่ 1 2 และ 3 ระหว่างระบบควบคุมแบบพีไอดีและระบบควบคุมแบบปรับตัวได้แบบไม่มีค่าความชดเชย

จากการทดลองได้กำหนดให้แขนกลแกนที่ 1 2 และ 3 เคลื่อนที่โดยให้การเคลื่อนที่เป็นแบบฟังก์ชั่นซายน์ (sine) $\frac{\pi}{8}\sin(\omega t)$ โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ ทำให้ได้กราฟออกมาตามภาพที่ 4.15

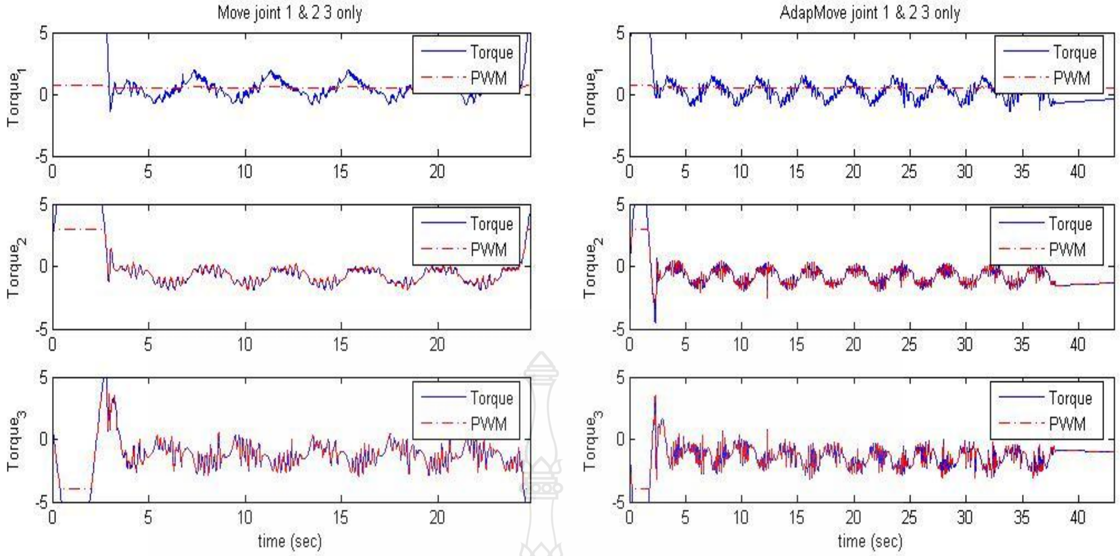
$m_1 = 0.4Kg, l_1 = 0.255m,\ K_p = -15, K_i = -35, K_d = -0.4\ , Kd_1 = 36, \Delta_1 = 0.6, \gamma_1 = -40$

$m_2 = 0.35Kg, l_2 = 0.254m, K_p = -20, K_i = -17, K_d = -0.45, Kd_2 = 42, \Delta_2 = 0.5, \gamma_2 = -1$

$m_3 = 0.15Kg, l_3 = 0.252m, K_p = 20, K_i = 40, K_d = 0.3, Kd_3 = 26, \Delta_3 = 1.1, \gamma_3 = -15$ จะเห็นได้ว่าการเคลื่อนที่ที่ควบคุมด้วยระบบควบคุมพีไอดีสามารถควบคุมแขนกลแกนที่ 1 2 และ 3ให้เคลื่อนที่ตามเส้นทางได้แม่นยำ และราบเรียบกว่าที่ควบคุมด้วยระบบควบคุมแบบ Adaptive ส่วนกราฟของแรงบิดในแต่ละข้อต่อตามภาพที่ 4.16 ของแขนกลแกนที่ 1 2 และ 3 ที่ควบคุมด้วยระบบควบคุมแบบ Adaptive มีค่าแรงบิดที่น้อยกว่าหรือเข้าใกล้ศูนย์ได้ดีกว่าระบบการควบคุมแบบพีไอดี จะเห็นค่าจากกราฟเมื่อเริ่มต้นแรงบิดจะเยอะ เมื่อเวลาผ่านไปแรงบิดก็จะลดลงและเคลื่อนที่กลับไปกลับมาเพียงเล็กน้อยเพื่อให้เคลื่อนที่เป็นเส้นตรงที่ได้กำหนด

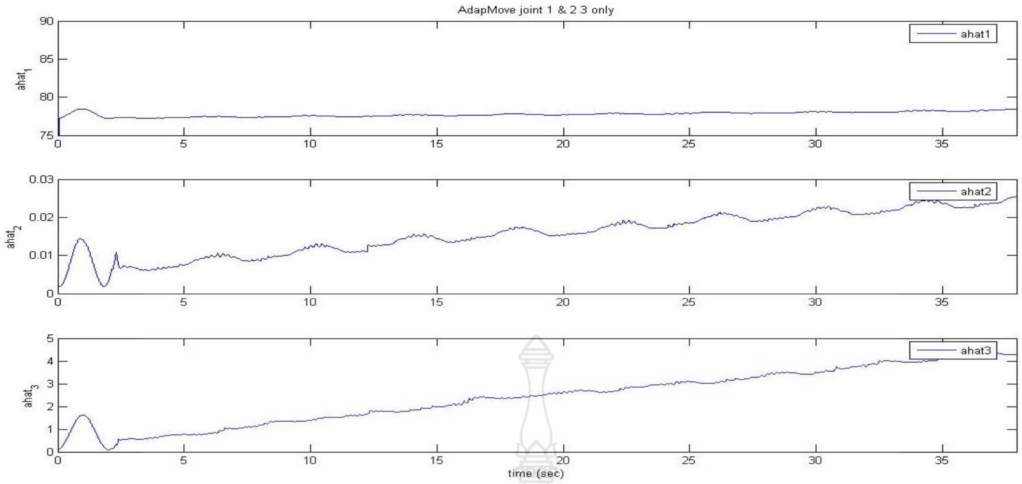


ภาพที่ 4.15 การเปรียบเทียบการเคลื่อนที่ของแขนกลแกนที่ 1 2 และ 3 แบบไม่มีค่าชดเชยระหว่างการใช้ระบบควบคุมแบบพีไอดี (PID) (ซ้าย) กับการใช้ระบบควบคุมแบบปรับตัวได้ (Adaptive Control) (ขวา)



ภาพที่ 4.16 การเปรียบเทียบแรงบิดที่กระทำในแต่ละข้อต่อของแขนกลแบบไม่มีค่าชดเชยระหว่างการใช้ระบบควบคุมแบบพีไอดี (PID) (ซ้าย) กับการใช้ระบบควบคุมแบบปรับตัวได้ (Adaptive Control) (ขวา)

จากภาพที่ 4.17 แสดงค่าประมาณของโมเมนต์ความเฉื่อยของแขนกลในแกนที่ 1 และ 2 แบบไม่มีค่าชดเชย ซึ่งค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของแกนที่ 1 มีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าการทดลองการเคลื่อนที่ของแขนกลแกนที่ 1 2 และ 3 แบบมีค่าชดเชยในแกนที่ 2 ซึ่งค่าประมาณ 75 – 80 $\left(kg-m^2\right)$ จากค่าโมเมนต์ความเฉื่อยที่เพิ่มมากขึ้นนั้นอาจเป็นเพราะมีการเคลื่อนที่พร้อมกันทั้ง 3 แกนจึงทำให้เกิดค่าโมเมนต์ความเฉื่อยเพิ่มมากขึ้น ส่วนแกนที่ 2 ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยที่ได้มีค่าที่ใกล้เคียงกับการทดลองการเคลื่อนที่ของแขนกลแกนที่ 1 2 และ 3 แบบมีค่าชดเชยแกนที่ 2 โดยมีค่าประมาณ 0.02 – 0.03 $\left(kg-m^2\right)$ ส่วนแกนที่ 3 เมื่อกำหนดให้เคลื่อนที่พร้อมกันทั้ง 3 แกนค่าโมเมนต์ความเฉื่อยจะเพิ่มขึ้นมากกว่าการทดลองการเคลื่อนที่ของแขนกลแกนที่ 1 2 และ 3 แบบมีค่าชดเชยแกนที่ 2 โดยมีค่าประมาณ 4 – 5 $\left(kg-m^2\right)$



ภาพที่ 4.17 ค่าประมาณของโมเมนต์ความเฉื่อยของแขนกลในแกนที่ 1 2 และ 3 แบบไม่มีค่าชดเชย

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการนำเสนอการออกแบบระบบควบคุมแบบปรับตัวได้ เพื่อใช้ในการควบคุมแขนกล CRS A255 แบบ 3 แกนให้เคลื่อนที่ตามเส้นทางที่กำหนด และ เปรียบเทียบระหว่าง ระบบควบคุมแบบพีไอดี (PID) กับระบบควบคุมแบบรับตัวได้ (Adaptive) ในควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกล ในการทำการสร้างแบบจำลองการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์แบบ 3 แกนโดยระบบควบคุมทั้งสองแบบจะใช้โปรแกรม Matlab/Simulink ส่วนในการควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ CRS จริงโดยระบบควบคุมทั้งสองแบบจะใช้โปรแกรม LabVIEW

จากผลการทดลองที่ได้จะเห็นว่าการเคลื่อนที่ๆควบคุมด้วยระบบควบคุมแบบปรับตัวได้ (Adaptive) นั้นจะมีค่าแรงบิดที่ราบเรียบกว่า การเคลื่อนที่ๆควบคุมด้วยระบบควบคุมแบบพีไอดี (PID) แต่ในการควบคุมแบบปรับตัวได้ จะมีค่าความผิดพลาดตอนท้ายที่มากกว่าการควบคุมแบบพีไอดีและจากกราฟของผลการทดลองการเคลื่อนที่อาจจะไม่ราบเรียบ ซึ่งอาจจะเกิดจากการที่เราไม่ทราบค่ามวลของแต่ละลิงค์ของแขนหุ่นยนต์ที่แน่นอน เนื่องจากเป็นหุ่นยนต์เก่าที่ไม่มีข้อมูลของหุ่นยนต์แล้ว ดังนั้นเมื่อเราได้ทำการจำลองการเคลื่อนที่โดยใช้โปรแกรม Matlab/Simulink โดยใช้ค่ามวลของแต่ละแกนที่ได้จากการประมาณด้วยโปรแกรม Solidwork เราอาจจะได้ค่ามวลที่ไม่ตรงกับมวลจริงของแขนหุ่นยนต์ จึงทำให้การใช้สมการทางพลศาสตร์ในระบบควบคุมแบบปรับตัวได้เกิดการคลาดเคลื่อนไป ซึ่งส่งผลให้การเคลื่อนที่ของแขนกลอาจจะได้ค่าที่ไม่ราบเรียบและเกิดการแกว่งมากกว่าผลที่ได้จากการจำลองการเคลื่อนที่ ถึงอย่างไรก็ตามการควบคุมแบบปรับตัวได้นั้นจะสามารให้ค่าโมเมนต์ความเฉื่อยของแขนหุ่นยนต์จริงได้ ดังนั้นการเคลื่อนที่ๆควบคุมด้วยระบบควบคุมแบบปรับตัวได้ จะเหมาะที่จะนำมาควบคุมเส้นทางการเคลื่อนที่ของแขนกลมากกว่าแบบระบบควบคุม PID สำหรับระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงของมวลหรือโมเมนต์ความเฉื่อยระหว่างการปฏิบัติงาน ซึ่งจะสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานทางอุตสาหกรรมต่างๆ ได้

5.2 ข้อเสนอแนะ

จากที่ได้ทำการทดลองการออกแบบระบบควบคุมแบบปรับตัวได้ เพื่อใช้ ในการควบคุมแขนกล CRS A255 แบบ 3 แกนให้เคลื่อนที่ตามเส้นทางที่กำหนด มีข้อเสนอแนะคือ ถ้าเราไม่ทราบค่ามวลที่แน่นอนของแขนหุ่นยนต์ในแต่ละแกน ควรถอดแต่ละแกนออกมาชั่งน้ำหนักให้ได้ค่ามวลตรงตามความเป็นจริงเพราะถ้าค่ามวลที่เราได้ไม่ตรงกับค่ามวลของจริงเมื่อเราทำแบบจำลองมาได้กราฟที่ราบเรียบแต่พอเราได้ไปทดลองกับแขนกลจริงแล้วจะทำให้การปรับตั้งของระบบควบคุมค่าเพี้ยนไปและจะทำให้การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ไม่ราบเรียบเหมือนที่เราได้จากแบบจำลอง

รายการอ้างอิง

[1] ผศ.ดร.สถาพร ลักษณะเจริญ. (2548).**วิศวกรรมหุ่นยนต์ Robotics Engineering**.กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ ส.ส.ท. (ไทย-ญี่ปุ่น)

[2] Jean-Jacques E.Slotine, **Applied Nonlinear Control**. New Jersey: Prentice-Hall, QA402.35.S56 1991.

[3] Louis L. Whitcomb, Suguru Arimoto, Tomohide Naniwa, and Fumio Ozaki, "**Adaptive Model-Based Hybrid Control of Geometrically Constrained Robot Arms**" IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol.13, No.1, February 1997.

[4] John T. Wen, Kenneth Kreuts, and David S. Bayard, "**A New Class of Energy Based Control Laws for Revolute Robot Arms: Tracking Control, Robustness Enhancement and Adaptive Control**" Jet Propulion Laboratory, California Institute of Technology, 4800 Oakgrove Dr., Mail Stop 198-330 Pasadena, CA 91109.

[5] Abd Manan Ahmad, Lee Ing Chen, and Fatimah Mohamad, "**Simulation of Stable-Adaptive Control of Robot Arm Using Self-organizing Neural Network**" 2002 Student Conference on Research and Development Proceedings, Shah Alam, Malaysia.

[6] Jung Hua Yang, Feng Li Lian, and Li Chen Fu, "**Nonlinear Adaptive Control for Flexible-Link Manipulators**" IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol.13, No.1, February 1997.

[7] เอกสารการสอน วิชา **Applied Nonlinear Control Systems**, ดร.ปรัชญา เปรมปราณีรัชต์

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่

เรื่องเต็มการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ ๔๙ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผู้ทรงคุณวุฒิภายในมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
สาขาสถาปัตยกรรมศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์

คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์

1. ก้าธร กุศล 2. สุวัฒนา ธาดานิติ 3. ประสงค์ เอี่ยมอนันต์

สาขาวิชาเทคโนโลยีทางอาคาร คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์

4. ชนิกานต์ ยิ้มประยูร

สาขาวิชาผังเมืองและสภาพแวดล้อม คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์

5. ธนภณ พันเสน

สาขาวิชาภูมิสถาปัตยกรรม คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์

6. ไพศาล เทพวงศ์ศิริรัตน์ 7. วันดี พินิจวรสิน

ภาควิชาพืชสวน คณะเกษตร

8. ณัฏฐ พิชกรรม 9. อลิศรา มีนะกนิษฐ

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์

10. สันติ ชินานุวัติวงศ์ 11. สุธาวิน สถาปิตานนท์ 12. กิจพัฒน์ ภูวววรรณ 13. วันชัย ยอดสุดใจ
14. อภินิติ โชติสังกาศ

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

15. เมตตา เจริญพานิช 16. เทอดไทย วัฒนธรรม 17. มึ่งหาย พรรณวดี 18. ไพศาล คงคาฉุยฉาย
19. อรรถศักดิ์ จารีย์ 20. นันทิยา หาญศุภลักษณ์ 21. มานพ เจริญไชยตระกูล 22. มนตรี สว่างพฤกษ์
23. ปวีนา สุริยจันทรกาส

ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์

24. ดวงฤดี ฉายสุวรรณ 25. อรทัย จงประทีป 26. ปฏิภาณ จุ้ยเจิม 27. ยืนพิกา บันสิทธิ์
28. อภิชาติ โรจนโรวรรณ 29. บุษบา ตั้งเจริญรุ่งนี่ 30. ปริญญา ฉกาจนโรดม 31. วิศิษฐ์ โล้เจริญรัตน์
32. อมรรัตน์ เลิศวรสิริกุล 33. ราชธีร์ เดรโพศาลเจริญกิจ

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์

34. สมหญิง ไทยนิมิต 35. ขุนภาภา ตามศรีอินทร์ 36. ชูเกียรติ การะเกตุ 37. วิวุฒศักดิ์ สินสินทิพย์
38. ธีรสิทธิ์ เกษตรเกษม 39. คุลิต ธนเพทาย 40. ปฐมาภรณ์ ศรีสงคุธรรม 41. สุนคร พรานนท์สถิตย์
42. ศิริโรจน์ ศิริสุขประเสริฐ 43. เด่นชัย วรรศวล 44. หมู่สันต์ หงษ์สมบัติ 45. สัญชัย เดชานุภาพสุทธา
46. พิสุทธิ์ รพีศักดิ์ 47. มิติ รุ่ธานุรักษ์ 48. วินัย พฤกษะวัน 49. ศรีจิตรา เจริญสายานพรัตน์

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์

50. ชวลิต กิตติชัยการ 51. สัจจาทิพย์ ทัศนิยมันท์ 52. มงคล วีโรจน์สกุลชัย 53. ยภัชาต แจ้งบำรุง
54. วิชัย ศิวะโกศิษฐ 55. ณัฐศักดิ์ บุญมี 56. ปิ่นวงศ์ พุทธาทิติลักษณ์เลิศ 57. จิระชัย มีงบรรเจิดสุข
58. ประพจน์ ขุนทอง 59. กรรณิกันต์ ชูประเสริฐ 60. วรางค์รัตน์ จันทลาไร 61. เกรียงไกร อัศวมาศบันลือ

ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์

62. ฉัตรนนัช จิระเดชะ 63. ภัทราภรณ์ สุวรรณวิทยา 64. วินัย เลียงจาริญสิทธิ์

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์

65. รุ่งรัตน์ ภิสัชเพ็ญ 66. สุวิวัฒน์ สินธุรพนกุล 67. จุฑา พิชิตลำเค็ญ 68. วรวุฒิ หวังวิชรกุล
69. จันทร์ศิริ สิงห์เถื่อน 70. วิสุทธิ์ สุพิทักษ์ 71. จักรพันธ์ ตรีวะเทพย์พันธ์

ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน

72. สมยศ เชิญอักษร

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าเครื่องกลการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์

73. สุเมธ แสงงาม

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการผลิต คณะวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์

74. หวี งามวิไลกร

ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอกมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
สาขาสถาปัตยกรรมศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์

1. ปราโมทย์ เดชะอำไพ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
2. จตุพร วุฒิกนกกาญจน์ สายวิชาเทคโนโลยีวัสดุ คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
3. ภาวิณี ชัยประเสริฐ สายวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
4. สุชัชวีร์ ชัยสิทธิ์ศักดิ์ สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
5. สมเกียรติ ศุภเดช สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
6. ชนินทร์ ทินโนภาส คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
7. ชัยสิทธิ์ ด่านกิตติกุล คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร
8. ชำนาญ บุญญาพุทธิพงศ์ คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
9. พยุงศักดิ์ จุลยุเสน สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
10. อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
11. ธีรธรรม บุณยะกุล ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
12. ศิวบรรณ ชูเกพันธุ์ ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
13. สิริลักษณ์ เจียรากร สายวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะพลังงาน สิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
14. ปานทหัย บัวศรี ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
15. ยุทธนา ชำสุวรรณ์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

30. สถ.วศ.41/O212 ประสิทธิภาพการผลิตเหล็กแท่งโดยใช้การออกแบบการทดลอง
กรณีศึกษาโรงงานอุตสาหกรรมผลิตเหล็กกล้า 242
The Efficiency for Producing Billets Using Designed Experiments
Case Study of a Steel-making Company
โดย ธวัชชัย ยงเนตร

31. สถ.วศ.42/O217 อิทธิพลของทังสเตนคาร์ไบด์ที่มีผลต่อการนำไฟฟ้าของทองแดงสำหรับ
ทำวัสดุหน้าสัมผัสไฟฟ้า 253
Effect of Tungsten Carbide on Electrical Conductivity of Copper for
Electrical Contact Materials
โดย จุฑามาส บำรุงกุล สิริพร โรจนนันต์ เกศราพร วทัญญู
สุรศิษฐ์ โรจนนันต์ และเรืองเดช ธงศรี

32. สถ.วศ.43/O232 การศึกษามูลค่าความเสียหายจากเหตุการณ์ไฟฟ้าขัดข้องของธุรกิจโรงแรม
ในประเทศไทย โดยใช้วิธีการวิเคราะห์ความถดถอย 261
The Electrical Outage Cost Study in Hotel Thailand by Regression
Analysis
โดย ขจรศักดิ์ พรจันเท้า ภานุวัฒน์ เทียนศรี
พรระพีพัฒน์ ภาสบุตร และวรรัตน์ ปัตรประกร

33. สถ.วศ.44/O234 Residual Strain Adjustment to Enhance Machinable Glass-Ceramics
Forming as a Restorative Dental Material 270
By Pornpimol Kuntajinda Tepiwan Jitwatcharakomol
Chana Raksiri and Duangrudee Chaysuwan

34. สถ.วศ.45/O238 การใช้เทคนิคเติมจนเต็ม Fill until Full (FuF) เพื่อการประดิษฐ์ส่วนประกอบ
อิเล็กทรอนิกส์ 278
The Applications of Fill until Full (FuF) for Electronics Component
โดย พิมพ์ศิริพร นาคเจริญ และสุเนตร พรานนท์สถิตย์

35. สถ.วศ.46/O246 การออกแบบระบบควบคุมแบบ Adaptive Control เพื่อใช้ในการควบคุม
แขน Puma Robot ให้เคลื่อนที่ตามเส้นทางที่กำหนด 286
Design of Adaptive Control System for Trajectory Tracking of Puma
Robot Arm
โดย คมกฤช อาษากิจ และปรัชญา เปรมปราณีรัชต์

สาขาสถาปัตยกรรมศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 49

การออกแบบระบบควบคุมแบบ ADAPTIVE CONTROL เพื่อใช้ในการควบคุมแขน PUMA ROBOT ให้เคลื่อนที่ตามเส้นทางที่กำหนด

DESIGN OF ADAPTIVE CONTROL SYSTEM FOR TRAJECTORY TRACKING OF PUMA ROBOT ARM

คมกฤช อาษากิจ[1] และ ปรัชญา เปรมปราณีรัชต์[1]

Khomkrit Asakit[1] and Pradya Prempraneerach[1]

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ นำเสนอการออกแบบตัวควบคุม Adaptive Control ที่ไม่เชิงเส้นเพื่อใช้ควบคุมแขนหุ่นยนต์ที่เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ให้มีการเคลื่อนที่ และใช้ปลายแขนของหุ่นยนต์ในการเคลื่อนย้ายวัตถุจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่ง ตามที่กำหนดได้อย่างมีประสิทธิภาพตามที่ออกแบบไว้

โดยการศึกษาเริ่มจากทำการวางแผนแบบจำลองโดยใช้ตัวควบคุมแบบปรับตัวได้ Model Reference Adaptive Control (MRAC) ในรูปแบบอ้างอิงโดยใช้ Adaptive Control ในการจำลองเพื่อประมาณค่าพารามิเตอร์ที่เรายังไม่รู้ พร้อมกับแบบจำลองแขนหุ่นยนต์แบบสองข้อต่อ ทางคณิตศาสตร์หลังจากศึกษาจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแขนกล และตัวควบคุมแล้วจึงนำไปเปรียบเทียบเพื่อให้การทำงานของแขนกลและปลายของแขนกลแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เคลื่อนที่ตามเส้นทางที่กำหนดได้อย่างแม่นยำ

ABSTRACT

This thesis focuses on a design of adaptive controller for a trajectory control of a robot arm that is modeled by nonlinear mathematic equations such that the robot end effector can perform a pick-and-place operation effectively according to design specification.

This study begins with a simulation using the Model Reference Adaptive Control (MRAC) along with a reference model to estimate unknown plant parameters. Also, motion of the two-link robot arm is simulated for a trajectory following task. After studying mathematic model of robot arm, the MRAC controller will be implemented for trajectory tracking tasks.

Key Word: Model Reference Adaptive Control (MRAC), Adaptive Control, Robot Arm

E-mail address: Khomkrit@hotmail.com

[1] ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

Department of Mechanical Engineering,Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thunyaburi.

คำนำ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีด้านต่างๆ ได้เจริญก้าวหน้าไปมากโดยเฉพาะในโรงงานอุตสาหกรรมได้มีการนำเครื่องจักรและอุปกรณ์อัตโนมัติต่างๆ มาใช้งานแทนแรงงานคนทั้งในด้านการผลิตและรับส่งชิ้นส่วนต่างๆ ภายในโรงงานสำหรับโรงงานอุตสาหกรรมที่มีความต้องการความแม่นยำสูง จึงให้ความสำคัญเป็นอย่างมากกับเครื่องจักรที่นำมาใช้ดังนั้นระบบควบคุมที่ดีจึงมีความสำคัญและระบบควบคุมแบบต่างๆ ก็มีประสิทธิภาพที่แตกต่างกันออกไปแล้วแต่ประเภทและการนำไปใช้งาน จึงทำให้มีระบบการควบคุมต่างๆที่สำคัญมากขึ้น ดังจะเห็นได้จากการนำระบบการควบคุมไปใช้ในอุปกรณ์ต่างๆ ต่อมาระบบมีความซับซ้อนมากขึ้นซึ่งส่วนใหญ่เป็นระบบที่ไม่มีเสถียรภาพ เช่น การควบคุมแขนหุ่นยนต์ การควบคุมมอเตอร์ หรืองานควบคุมเครื่องจักรกลในด้านอุตสาหกรรมเป็นต้น จึงเกิดทฤษฎีการควบคุมมากมาย เพื่อให้สามารถควบคุมอุปกรณ์ดังกล่าวได้อย่างมีประสิทธิภาพ ที่ผ่านมามีกลุ่มนักวิจัย Louis L. Whitcomb และคณะ [3] ได้ศึกษาการทดลองเชิงเปรียบเทียบของชุดคำสั่งควบคุมแรงปรับตัวพื้นฐานตัวแบบใหม่สำหรับแขนหุ่นยนต์โดยเครื่องควบคุมนี้จัดให้มีการแกะรอยวิถีโคจรของแรงและตำแหน่งในเวลาเดียวกันของแขนหุ่นยนต์ที่ทูลทิปของมันอยู่ในจุดที่ติดต่อกับผิวหน้าเรียบแข็ง ชุดคำสั่งคงที่เกี่ยวกับตัวแบบพลวัตไม่เป็นเส้นตรงสำตัวแข็งที่ยอมรับทั่วไปและพิสูจน์ได้สำหรับแขนหุ่นยนต์การทดลองเชิงเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่าเครื่องควบคุมพื้นฐานตัวแบบปรับตัวได้แบบใหม่จัดให้มีสมรรถภาพของทั้งเครื่องควบคุมพื้นฐานการไม่มีตัวแบบ(นอนโมเดล)และแบบปรับตัวไม่ได้ที่เหนือกว่าพิสัยกว้างของสภาพการปฏิบัติงาน John T. Wen และคณะ [4] ได้ศึกษาการทำงานแบบลีอาปูนอฟโดยใช้พลังงานการทำงานแบบลีอาปูนอฟกับพลังงานศักย์ดัดแปลง มาวิเคราะห์ความคงที่แบบเลขชี้กำลัง เมื่อมีแรงเสียดทานแบบหนืดและแบบคูลอมบ์ และความผิดพลาดของพารามิเตอร์ของตัวแบบเกิดขึ้นการดัดแปลงแบบเลียนของกฎควบคุมจึงถูกนำเสนอเพื่อเพิ่มสภาพทนทานและยกระดับวงแหวนรอบนอก การควบคุมการปรับตัวมีตำแหน่งอยู่ภายในโครงสร้างเดียวกันเช่นกัน การกำหนดเส้นตรงในพารามิเตอร์จึงถูกได้มาและกฎควบคุมการปรับตัวคงที่เชิงเส้นกำกับระดับโลกก็ได้รับมาโดยการแทนที่พารามิเตอร์ตัวแบบในกฎควบคุมแบบไม่ปรับตัวโดยการประมาณค่า Abd Manan Ahmad และคณะ [5] ได้นำเสนอแบบจำลองของตัวควบคุมเครือข่ายประสาทสำหรับแขนหุ่นยนต์สามการเชื่อมต่อ เครือข่ายนี้อยู่บนพื้นฐานแผนที่การจัดตั้งตัวเองของโคโฮเน็นแบบดัดแปลง ในตัวแบบที่นำเสนอ เครือข่ายวกกลับและเครือข่ายเอสโอเอ็มดัดแปลงถูกเชื่อมต่อกัน Jung Hua Yang และคณะ [6] ได้ศึกษาปัญหาการควบคุมหุ่นยนต์ที่ยืดหยุ่นได้ โดยผังควบคุมแบบไม่เชิงเส้น ได้ถูกนำเสนอเป็นการแก้ปัญหาต่อปัญหาการควบคุมโดยเฉพาะอย่างยิ่ง เพื่อจัดการกับความไม่แน่นอนของตัวแบบที่มีอยู่ เวอร์ชันปรับตัวได้ของกฎควบคุมแบบไม่เชิงเส้นนี้จึงถูกนำเสนอ จากนั้นการพิสูจน์ความคงที่ของระบบวงจรปิดโดยรวมจึงถูกมอบให้ทางการวิเคราะห์แบบลีอาปูนอฟ และยังมีการจัดให้มีผลการทดลองอย่างกว้างขวาง เพื่อสาธิตประสิทธิภาพของเครื่องควบคุม

เนื่องจากในระบบควบคุมในโรงงานอุตสาหกรรมโดยส่วนมากแล้วจะใช้ PID Controller มาทำการควบคุมซึ่งมันก็ทำงานได้ดีในช่วงที่เรา Liberalization รอบๆจุดทำงานแต่เมื่อใดก็ตามถ้าจุดทำงานของเราเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงหรือว่า parameter บางตัวมีการเปลี่ยนแปลงเช่น มวลของระบบ, ความยาว และอื่นๆหรืออาจมี parameter ที่เราไม่ได้นำมาคิดมันจะทำให้ controller ที่เราออกแบบไว้เริ่มทำงานไม่ได้หรือไม่สามารถทำงานได้เลย ดังนั้น adaptive control จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่นำมาใช้แก้ปัญหานี้ โดยทั่วไปแล้วการควบคุมแบบปรับตัว

แบบอ้างอิงนั้นประกอบไปด้วย 4 ส่วนได้แก่ ระบบ (plant) ที่ประกอบไปด้วยพารามิเตอร์ที่ไม่รู้จัก ตัวแบบอ้างอิง (reference model) เพื่อการบ่งชี้ผลลัพธ์ที่ต้องการของระบบควบคุม กฎการควบคุมผลสะท้อนกลับ (feedback control law) ที่ประกอบไปด้วยพารามิเตอร์ที่ปรับได้ และกลไกการปรับตัว (adaptation mechanism) สำหรับการอัพเดทพารามิเตอร์ที่ปรับได้

จุดสำคัญหลักๆของการควบคุมแบบ Adaptive control คือมันสามารถปรับ gain ของตัวเองได้ถ้าเมื่อระบบมีการเปลี่ยนแปลง parameter ดังนั้นค่า gain จะเปลี่ยนแปลงไปตามความเหมาะสม เนื่องจากมันจะนำเอาค่าความผิดพลาดที่ได้จาก plant จริงมาเปรียบเทียบกับ model ที่เราออกแบบเมื่อได้ที่มีค่าความผิดพลาดเกินขึ้น ค่า gain จะมีการปรับตัวโดยอัตโนมัติ

วิธีการดำเนินงานวิจัย

วิเคราะห์สมการการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์โดยพิจารณาแขนที่เป็นแบบราบ มีการเชื่อมต่อ 2 ส่วน และมีส่วนเชื่อมต่อ (รูปที่1) ซึ่งตำแหน่งนั้นสามารถอธิบายได้ด้วย 2-vector q ของมุมร่วม และ Input ของ Actuator ประกอบไปด้วย 2-vector τ ของแรงบิด (Torque) ที่ประยุกต์ใช้ที่ข้อต่อของแขน พลวัตของแขนกลแบบพื้น ๆ นั้นเป็นแบบไม่เชิงเส้นและสามารถเขียนในรูปแบบทั่วไปได้ดังนี้

$$H(q)\ddot{q} + C(q,\dot{q})\dot{q} + g(q) = \tau \qquad (1)$$

โดยที่ $H(q)$: เป็นแมทริกซ์ความเฉื่อยของแขนหุ่นแบบ 2 x 2 (ซึ่งเป็นจำนวนเต็มที่เป็นบวกสมมาตร)

$C(q,\dot{q})\dot{q}$: เป็น 2-vector ของแรงบิด (toque) ที่เคลื่อนเข้าหาศูนย์กลางและแรงบิด Coriolis

$g(q)$: เป็น 2-vector ของแรงบิดที่มาจากแรงดึงดูดของโลก

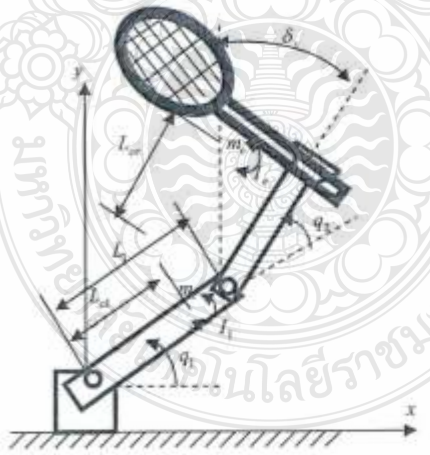


Figure 1 An articulated two-link manipulator

1. วิเคราะห์สมการการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ด้วย PD Control

สมการไดนามิคสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \end{bmatrix}+\begin{bmatrix} -h\dot{q}_2 & -h(\dot{q}_1+\dot{q}_2) \\ h\dot{q}_1 & 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix}$$

จากสมการไดนามิคของแขนกลสามารถจัดให้อยู่ในรูปสมการ (1)

$$H_{11}\ddot{q}_1 + H_{12}\ddot{q}_2(-h\dot{q}_2 - h(\dot{q}_1+\dot{q}_2))\dot{q}_1 = \tau_1$$

$$H_{21}\ddot{q}_1 + H_{22}\ddot{q}_2(-h\dot{q}_1)\dot{q}_2 = \tau_2$$

หาค่า $\ddot{q}_1$ และ $\ddot{q}_2$ จากการแก้สมการทางคณิตศาสตร์โดยใช้วิธีอินเวอร์สเมตริกซ์ เพื่อแก้สมการ

$$\begin{bmatrix} \ddot{q}_1 \\ \ddot{q}_2 \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{21} & H_{22} \end{bmatrix}^{-1}\left[-\begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix}+\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix}\right]$$

$$\ddot{q}_1 = invH_{11}\{-C_{11}\dot{q}_1 - C_{12}\dot{q}_2 + \tau_1\} + invH_{12}\{-C_{21}\dot{q}_1 - C_{22}\dot{q}_2 + \tau_2\}$$

$$\ddot{q}_2 = invH_{21}\{-C_{11}\dot{q}_1 - C_{12}\dot{q}_2 + \tau_1\} + invH_{22}\{-C_{21}\dot{q}_1 - C_{22}\dot{q}_2 + \tau_2\}$$

หาค่า τ_1 และ τ_2 จาก

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} = -[K_P]\begin{bmatrix} \tilde{q}_1 \\ \tilde{q}_2 \end{bmatrix} - [K_D]\begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix}$$

$$\tilde{q}_1 = q_1 - q_{d1}$$

$$\tilde{q}_2 = q_2 - q_{d2}$$

นำสมการต่างๆที่ได้จากข้างต้นมาแทนลงในแบบจำลอง PD Control โดยกำหนดค่า Function Dynamic Model โดยใช้ Matlab/Simulink ในการจำลองเพื่อหาค่าการเคลื่อนที่ของแขนของหุ่นยนต์ดังนี้

$$H_{11} = a_1 + 2a_3\cos q_2 + 2a_4\sin q_2,\ H_{12} = H_{21} = a_2 + a_3\cos q_2 + a_4\sin q_2$$

$$H_{22} = a_2,\ h = a_3\sin q_2 - a_4\cos q_2$$

โดยให้

$$a_1 = I_1 + m_1 l_{c1}^2 + I_e + m_e l_{ce}^2 + m_e l_1^2,\ a_2 = I_e + m_e l_{ce}^2$$

$$a_3 = m_e l_1 l_{ce}\cos\delta_e,\ a_4 = m_e l_1 l_{ce}\sin\delta_e$$

โดยมีเงื่อนไขในตัวอย่างนี้คือ

$m_1 = 1, l_1 = 1, m_e = 2, \delta_e = 30^\circ, I_1 = 0.12, l_{c1} = 0.5, I_e = 0.25, l_{ce} = 0.6, q_1 = 0, q_2 = 0, q_{d1} = 60^\circ, q_{d2} = 90^\circ$ $K_D = 100, K_p 20K_D$ เมื่อแก้สมการแล้วจะได้ค่า $H_{11}, H_{12}, H_{21}, H_{22}$ เพื่อนำไปหาค่าการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ แล้วใช้โปรแกรม Matlab/Simulink จำลองการเคลื่อนที่ของแขนของหุ่นยนต์และค่าของแรงบิด (toque) เป็นแบบ PD Control ตามที่กำหนดไว้

2. วิเคราะห์สมการการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ด้วย Adaptive Control (MRAC)

Parameter Error: $\tilde{a} = \hat{a} - a$

Joint Error: $s = \dot{\tilde{q}} + \Lambda \tilde{q}$ โดยที่ $\tilde{q} = q - q_d$

จากทฤษฎีของ Lyapunov Function พลังงานทั้งหมดจะเท่ากับพลังงานจลน์บวกกับพลังงานศักดิ์และค่าที่ได้จะต้องมากกว่าศูนย์เสมอ จึงได้สมการเป็น

$$V = \frac{1}{2}\left[s^T H s\right] + \frac{1}{2}\left[\tilde{a}^T \Gamma^{-1} \tilde{a}\right]$$

หา

$$\dot{V} = \frac{1}{2}\dot{s}^T H s + \frac{1}{2}s^T H \dot{s} + \frac{1}{2}s^T \dot{H} s + \frac{1}{2}\dot{\tilde{a}}^T \Gamma^{-1} \tilde{a} + \frac{1}{2}\tilde{a}^T \Gamma^{-1} \dot{\tilde{a}} \quad (1)$$

จะได้

$$s = \dot{\tilde{q}} + \Lambda \tilde{q} = \dot{q} - \dot{q}_d + \Lambda \tilde{q} \qquad \text{โดยที่ } \dot{q}_r = \dot{q}_d - \Lambda \tilde{q}$$

$$\dot{s} = \ddot{\tilde{q}} + \Lambda \dot{\tilde{q}} = \ddot{q} - \ddot{q}_r \quad (2)$$

จากสมการของ Robot

$$H\ddot{q} + C\dot{q} + g = \tau \quad (3)$$

$$H\ddot{q} = \tau - C\dot{q} - g \quad \text{โดยที่ } \dot{q} = s + \dot{q}_r$$

$$H\ddot{q} = \tau - C(s + \dot{q}_r) - g \quad (3a)$$

จากสมการที่ (1) แทน ลงไปในสมการที่ (2)

$$\dot{V} = s^T H(\ddot{q} - \ddot{q}_r) + \frac{1}{2}s^T \dot{H} s + \dot{\tilde{a}}^T \Gamma^{-1} \tilde{a} \quad (4)$$

แทนค่าสมการ (3a) ลงในสมการ (4)

$$\dot{V} = s^T\left(\tau - C(s + \dot{q}_r) - g\right) - s^T H \ddot{q}_r + \frac{1}{2}s^T \dot{H} s + \dot{\tilde{a}}^T \Gamma^{-1} \tilde{a}$$

$$\dot{V} = -s^T C s + \frac{1}{2}s^T \dot{H} s + s^T(\tau - C\dot{q}_r - g) - s^T H \ddot{q}_r + \dot{\tilde{a}}^T \Gamma^{-1} \tilde{a}$$

$$\dot{V} = s^T(\tau - H\ddot{q}_r - C\dot{q}_r - g) + \dot{\tilde{a}}^T \Gamma^{-1} \tilde{a} \quad \text{โดยที่ } H\ddot{q}_r + C\dot{q}_r + g = Ya$$

$$\dot{V} = s^T(\tau - Ya) + \dot{\tilde{a}}^T \Gamma^{-1} \tilde{a} \quad (5)$$

Control Law: $\tau = Y\hat{a} - K_D s$ (6)

แทนสมการ (6) ลงในสมการ (5)

$$\dot{V} = s^T(Y\hat{a} - Ya - K_D s) + \dot{\tilde{a}}^T \Gamma^{-1} \tilde{a}$$

$$\dot{V} = s^T Y\tilde{a} - s^T K_D s + \dot{\tilde{a}}^T \Gamma^{-1} \tilde{a} \quad (7)$$

Adaptation Law: $\dot{\hat{a}} = -\Gamma Y^T s$

$$\dot{\hat{a}}^T = -s^T Y \Gamma^T \quad (8)$$

แทนสมการ (8) ลงในสมการ (7)

$$\dot{V} = -s^T K_D s + s^T Y \tilde{a} + (-s^T Y \Gamma^T)(\Gamma^{-1} \tilde{a})$$

$$\dot{V} = -s^T K_D s$$

จากสมการข้างต้นเรากำหนดค่า Parameter ดังนี้

$\Gamma = diag[0.03 \quad 0.05 \quad 0.1 \quad 0.3], a_1 = 3.3, a_2 = 0.97, a_3 = 1.04, a_4 = 0.6, q_{d1}(t) = 30^{\circ}(1-\cos(2\pi t))$
$q_{d2}(t) = 45^{\circ}(1-\cos(2\pi t))$ เมื่อแก้สมการแล้วได้ค่า Control Law และ Adaptation Law นำไปหาการประมาณค่าพารามิเตอร์ที่เรายังไม่รู้และหาการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ โดยใช้โปรแกรม Matlab/Simulink จำลองการเคลื่อนที่ของแขนของหุ่นยนต์แบบ Adaptive control (MRAC) ตามที่กำหนดไว้

ผลการทดลอง

1. ทดลองแก้สมการการเคลื่อนที่ของแขนของหุ่นยนต์จากค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ตามที่ได้กำหนดไว้ในหัวข้อ 2.1 เพื่อศึกษาการเคลื่อนที่ของแขนของหุ่นยนต์และค่าของแรงบิด โดยใช้การควบคุมแบบ PD Control มุมเริ่มต้นของLink 1 = 60° และมุมเริ่มต้นของ Link 2 = 90° และเส้นทางการเคลื่อนที่ที่ต้องการเป็น $q_{d1}(t) = 30^{\circ}(1-\cos(2\pi t))$ และ $q_{d2}(t) = 45^{\circ}(1-\cos(2\pi t))$

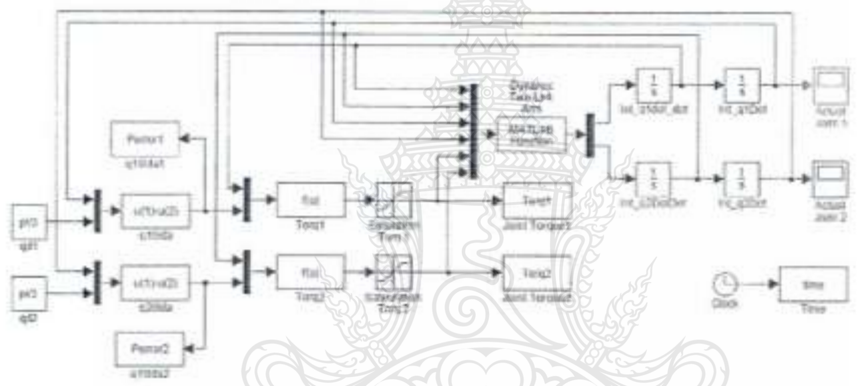


Figure 2 A model of PD Control two-link robot arm to solve equation of trajectory by Matlab/Simulimk

2. ทดลองแก้สมการการเคลื่อนที่ของแขนของหุ่นยนต์จากค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ตามที่ได้กำหนดไว้ในหัวข้อ 2.2 เพื่อศึกษาการเคลื่อนที่ของแขนของหุ่นยนต์และค่าของแรงบิด (toque) โดยใช้การควบคุมแบบ Adaptive control (MRAC) และเส้นทางการเคลื่อนที่ที่ต้องการเป็น $q_{d1}(t) = 30^{\circ}(1-\cos(2\pi t))$ และ $q_{d2}(t) = 45^{\circ}(1-\cos(2\pi t))$

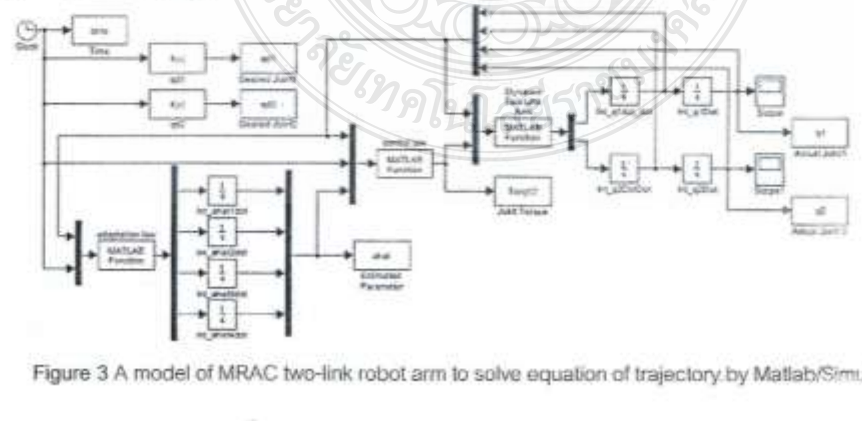


Figure 3 A model of MRAC two-link robot arm to solve equation of trajectory by Matlab/Simulink

3. กราฟใน Figure 4 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าความผิดพลาดของตำแหน่งและแรงบิดของ Link 1 และ Link 2 ระหว่าง PD Control กับ Adaptive Control (MRAC)

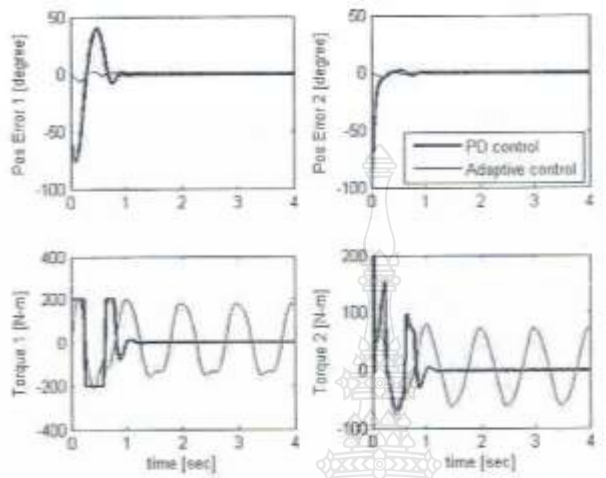


Figure 4 Comparison of position errors link 1 and link 2 (Top Row) between PD Control with Adaptive Control, and control torques link 1 and link 2 (Bottom Row)

4. กราฟใน Figure 5 แสดงการเปรียบเทียบระหว่างการประมาณค่าพารามิเตอร์ของ PD control กับ Adaptive control

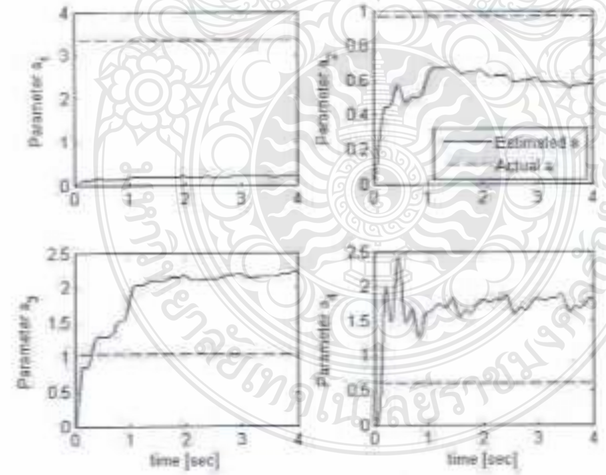


Figure 5 Comparison of parameter estimates $\hat{a}_1, \hat{a}_2, \hat{a}_3, \hat{a}_4$ (blue) and a_1, a_2, a_3, a_4 (red)

ผลจากการออกแบบระบบควบคุมแบบ Adaptive Control เพื่อใช้ในการควบคุมแขน Puma Robot ให้เคลื่อนที่ตามเส้นทางที่กำหนด โดยใช้โปรแกรม Matlab/Simulink จำลองสมการทางคณิตศาสตร์ของแขนกล โดย

ใช้แบบควบคุม Adaptive control ผลการทดลองที่ได้จะเห็นว่ากราฟที่ได้ (Figure 4) มานั้นเป็นกราฟของตำแหน่ง Error ของ Link1 และ Error ของ Link2 โดยเส้นกราฟจะมีค่าความผิดพลาดเข้าใกล้ 0 ตามที่เรากำหนดมุมองศาของ Joint 1 และ Joint 2 ที่ Link 1จะอยู่ที่ตำแหน่ง 60° และ Link 2 จะอยู่ที่ตำแหน่ง 90° ส่วนกราฟการควบคุมแรงบิดของ Link 1 และการควบคุมแรงบิดของ Link 2 นั้นเมื่อเราใส่ Input ค่า K_D, K_p ทำให้ Joint เคลื่อนที่เข้าหาองศาที่เรากำหนด

สรุป

จากการนำเสนอการออกแบบระบบควบคุมแบบ Adaptive Control เพื่อใช้ในการควบคุมแขนหุ่นยนต์แบบสองข้อต่อ ให้เคลื่อนที่ตามเส้นทางที่กำหนด เพื่อเปรียบเทียบการเคลื่อนที่ของแขนกล ระหว่าง PD Control กับ Adaptive Control โดยทั้งสองใช้โปรแกรม Matlab/Simulink จากผลการทดลองที่ได้จะเห็นว่าการเคลื่อนที่แบบ Adaptive Control นั้นจะมีค่า Error และแรงบิดที่ราบเรียบกว่า การเคลื่อนที่แบบ PD Control ดังนั้น การเคลื่อนที่ที่ควบคุมโดย Adaptive Control เหมาะที่จะนำมาควบคุมเส้นทางการเคลื่อนที่ของแขนกลมากกว่าแบบ PD Control โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานทางอุตสาหกรรมและสามารถนำไปใช้เป็นกระบวนการ ในการเทียบเคียงสมรรถภาพของตัวควบคุมต่างๆได้

เอกสารอ้างอิง

[1] ผศ.ดร.สถาพร ลักษณะเจริญ. (2548).**วิศวกรรมหุ่นยนต์** Robotics Engineering.กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ ส.ส.ท. (ไทย-ญี่ปุ่น)

[2] Jean-Lacques E.Slotine, Applied Nonlinear Control. New Jersey: Prentice-Hall

[3] Louis L. Whitcomb, Suguru Arimoto, Tomohide Naniwa, and Fumio Ozaki, "Adaptive Model-Based Hybrid Control of Geometrically Constrained Robot Arms" IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol.13, No.1, February 1997

[4] John T. Wen, Kenneth Kreuts, and David S. Bayard, "A New Class of Energy Based Control Laws for Revolute Robot Arms: Tracking Control, Robustness Enhancement and Adaptive Control" Jet Propulion Laboratory, California Institute of Technology, 4800 Oakgrove Dr., Mail Stop 198-330 Pasadena, CA 91109.

[5] Abd Manan Ahmad, Lee Ing Chen, and Fatimah Mohamad, "Simulation of Stable-Adaptive Control of Robot Arm Using Self-organizing Neural Network" 2002 Student Conference on Research and Development Proceedings, Shah Alam, Malaysia.

[6] Jung Hua Yang, Feng Li Lian, and Li Chen Fu, "Nonlinear Adaptive Control for Flexible-Link Manipulators" IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol.13, No.1, February 1997.

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ขอรับรองว่าผลงานวิจัย

เรื่อง

การออกแบบระบบควบคุมแบบ Adaptive Control
เพื่อใช้ในการควบคุมแขน Puma Robot ให้เคลื่อนที่ตามเส้นทางที่กำหนด

โดย

คมกฤช อาษากิจ และปรัชญา เปรมปราณีรัชต์

ได้ผ่านการพิจารณาจากคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ

สาขาสถาปัตยกรรมศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์

และได้นำเสนอในการประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 49
ระหว่างวันที่ 1 - 4 กุมภาพันธ์ 2554

(รองศาสตราจารย์ ดร.พนิต เข็มทอง)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ
ประธานคณะกรรมการดำเนินงานจัดประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 49

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ - สกุล	นายคมกฤช อามากิจ
วัน เดือน ปีเกิด	20 สิงหาคม 2525
ที่อยู่	354/1 ถ.สกล-อุดร ต.ธาตุเชิงชุม อ.เมือง จ.สกลนคร 47000
การศึกษา	สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
	สาขาวิศวกรรมหลังการเก็บเกี่ยวและแปรสภาพ
	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปี พ.ศ. 2547
ประสบการณ์ทำงาน	
พ.ศ.2551 – ปัจจุบัน	Toyo-Thai Corporation PCL.
	ตำแหน่ง Piping Engineer
พ.ศ.2551 – พ.ศ.2551	Qualitech Engineering and Construction CO., LTD
	ตำแหน่ง QC Engineer
พ.ศ.2548 – พ.ศ.2550	Technology Service and Consulting 1656 CO., LTD
	ตำแหน่ง Field Engineer

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี