

การควบคุมตำแหน่งของแขนกล 6 แกนผ่านระบบเน็ตเวิร์ค

**POSITION CONTROL OF 6 AXIS ROBOT ARM THROUGH
NETWORK SYSTEM**

ชัยนเรศ แห้วเพชร

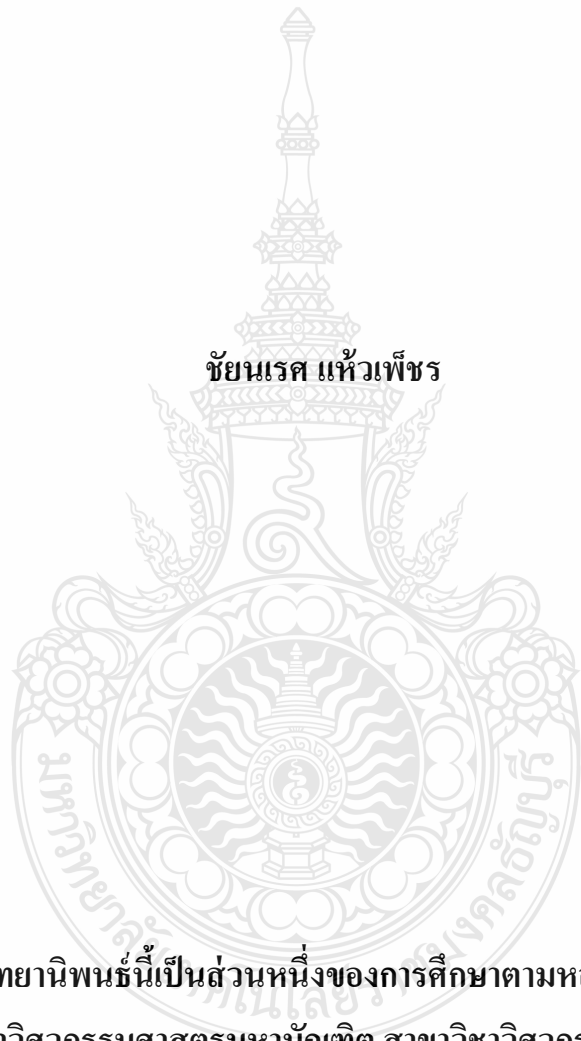
วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การควบคุมตำแหน่งของแกนกล 6 แกนผ่านระบบเน็ตเวิร์ค



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์

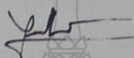
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี


ปีการศึกษา 2558

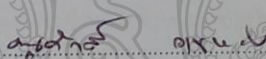
ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี


หัวข้อวิทยานิพนธ์ การควบคุมตำแหน่งของแขนกล 6 แกนผ่านระบบเน็ตเวิร์ก
Position Control of 6-Axis Robot Arm Through Network System
ชื่อ - นามสกุล นายชัยนเรศ แห้วเพชร
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปรัชญา เปรมปราณีรัตน์, Ph.D.
ปีการศึกษา 2558

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์พิพัฒน์ ปราโมทย์, Ph.D.)


..... กรรมการ
(อาจารย์รัชชยเสริญ เสวยจตุตร, Ph.D.)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์บุญศักดิ์ อ่างทอง, Dr.-Ing.)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปรัชญา เปรมปราณีรัตน์, Ph.D.)

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อนุมัติวิทยานิพนธ์ฉบับนี้
เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวกร อ่างทอง, Ph.D.)

วันที่ 3 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2559

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความเมตตาคุณอย่างสูงจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปรัชญา เปรมปราณีรัชต์ อาจารย์ที่ปรึกษาหลักวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิพัฒน์ ปราโมทย์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนูศักดิ์ จานทอง และ ดร. ธนยศเรขมัญญ์ เศรษฐบุตร ที่ได้ให้คำแนะนำและให้คำปรึกษา ตลอดจนให้ความช่วยเหลือแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ เพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ ซึ่งผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ ตลอดจนภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกลและบุคลากรที่เกี่ยวข้องทุกท่านที่ได้เอื้อเฟื้ออุปกรณ์ เครื่องมือและสถานที่ในการทำวิจัยพร้อมทั้งความช่วยเหลือในหลายๆ ด้านรวมทั้งข้อมูลที่ได้รับตามรายการอ้างอิงซึ่งมีประโยชน์เป็นอย่างยิ่งจนทำให้สามารถทำงานสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา บุพการี ญาติพี่น้อง และเพื่อนๆ ทุกคนที่ให้ความรักและกำลังใจในการศึกษาระดับปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ชยันเรศ แห้วเพชร



หัวข้อวิทยานิพนธ์	การควบคุมตำแหน่งของแขนกล 6 แกนผ่านระบบเน็ตเวิร์ค
ชื่อ-นามสกุล	นายชัยนเรศ แห้วเพชร
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปรัชญา เปรมปราณีรัชต์, Ph.D.
ปีการศึกษา	2558

บทคัดย่อ

การสื่อสารผ่านระบบเน็ตเวิร์คสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่และตรวจสอบการทำงานของแขนกลในโรงงานอุตสาหกรรมที่มีหลากหลายเพิ่มมากขึ้น นอกจากนั้นการควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่ของแขนกลในปัจจุบันโดยส่วนใหญ่แล้วยังอาศัยการระบุพิกัดตามผู้บังคับใช้งาน จึงจำเป็นที่จะต้องนำหลักการจลศาสตร์แบบพหุพันธ์ของหุ่นยนต์มาประยุกต์ใช้ร่วมกับการควบคุมแบบ PID ให้สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่องและราบเรียบ

ในขั้นแรกได้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแขนกลอนุกรมแบบ 6 แกน ด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink และจากผลการคำนวณด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แขนกลนี้จะมีขอบเขตการเคลื่อนที่ตามแนวแกน X Y และ Z อยู่ในช่วง (-81.9, 81.9), (-81.9, 75.5) และ (-4, 125.5) cm ตามลำดับ เมื่อใช้จลศาสตร์แบบพหุพันธ์เพื่อใช้ควบคุมการเคลื่อนที่ร่วมกับการควบคุมแบบ PID เมื่อผู้ใช้งานกำหนดพิกัดเป้าหมายของปลายแขนกล จะสามารถคำนวณหาองศาการหมุนของข้อต่อทั้ง 6 แกน จากผลการทดสอบด้วยแบบจำลองพบว่า ปลายแขนกลสามารถเคลื่อนที่เข้าหาตำแหน่งเป้าหมายที่มีอยู่หนึ่งจุดหรือมากกว่าได้อย่างต่อเนื่อง โดยสามารถควบคุมการเคลื่อนที่ได้ทั้งแบบวิถีตรงและวิถีโค้ง โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนจากพิกัดเป้าหมายไม่เกิน 0.5 เซนติเมตร

จากผลการทดลองกับแขนกลอนุกรมแบบ 6 แกนพบว่าโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นสามารถควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกลผ่านทางระบบเน็ตเวิร์คด้วยซอฟต์แวร์ Visual Studio.NET ได้ตามที่ต้องการ เพื่อส่งพิกัดเป้าหมายของปลายแขนกลผ่านทางระบบเน็ตเวิร์คจากคอมพิวเตอร์ของผู้ควบคุม ไปยังคอมพิวเตอร์ควบคุมการทำงานของแขนกล ผลการทดสอบพบว่า ระบบสามารถควบคุมองศาการหมุนของแขนกลให้สอดคล้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยมีค่าคลาดเคลื่อนที่ไม่เกิน 2% ซึ่งระบบจะใช้เวลาเฉลี่ยในการตอบสนองคำสั่งอยู่ที่ 1.55 วินาที

คำสำคัญ: แขนกลอนุกรมแบบ 6 แกน จลศาสตร์แบบพหุพันธ์ การควบคุมตำแหน่ง ระบบเน็ตเวิร์ค

Thesis Title	Position Control of 6-Axis Robot Arm Through Network System
Name-Surname	Mr. Chainares Haewphet
Program	Mechanical Engineering
Thesis Advisor	Assistant Professor Pradya Prempraneerach, Ph.D.
Academic Year	2015

ABSTRACT

Communication through network system can be applied to control and monitor robot arm operation in industrial production lines or in large-scale systems. However, the motion control of robot arm requires manual set-up from the user. Thus, to achieve smooth and continuous motion, the combination of inverse kinematics and PID control was used for controlling the robot movement.

First, the mathematical model of 6-axis serial robot arm has been implemented within MATLAB/Simulink software. After that, the model was used to compute the workspace along X-, Y- and Z- axes, and its movement was found at -81.9, 81.9; -81.9, 75.5; and -4, 125.5 cm, respectively. The inverse kinematics combining with PID control was then used to control its motion. When the user specified the target point, the correct rotation angles of 6-joint robot arm end-effector could be calculated. The result of the simulation showed that the robot arm end-effector could continuously move toward one or more target points, forming straight or curve path. The position error between the robot arm end-effector and the target point was < 0.5 cm.

The results of the experiment revealed that the developed software was able to control the robot-arm position through the network using Visual Studio.NET software as designed in such a way that the end-effector target location could be sent through network from the operator's computer to another robot-controlling one. Through the testing process, it was found that the developed system was able to control rotation angles of the robot arm as done in the simulation with $< 2\%$ of position error and 1.55 second of average responding time after receiving user's command.

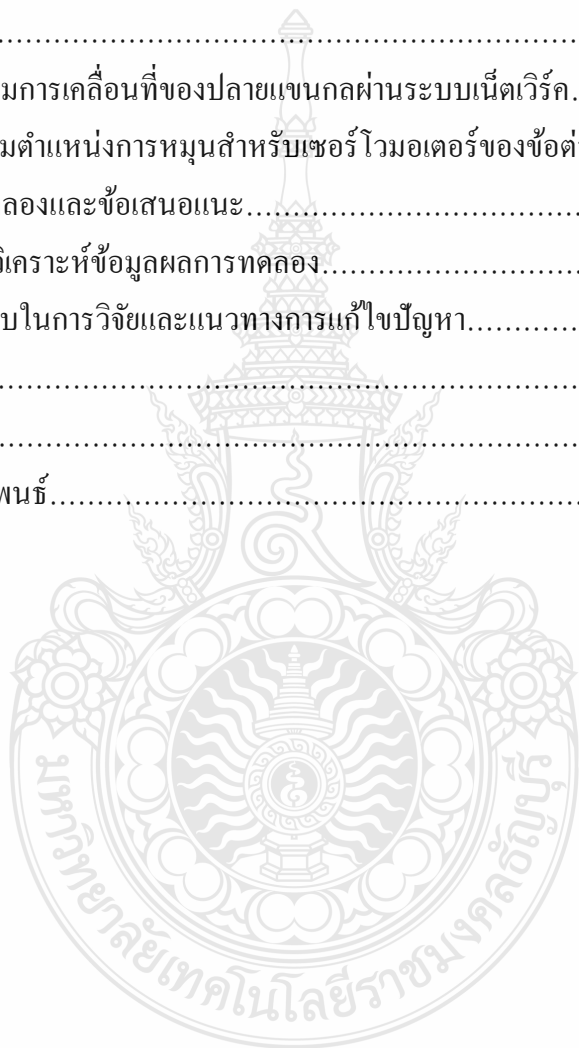
Keywords: 6-axis robot arm, inverse kinematics, position control, network system

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	(3)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	(4)
กิตติกรรมประกาศ.....	(5)
สารบัญ.....	(6)
สารบัญตาราง.....	(8)
สารบัญรูปภาพ.....	(9)
บทที่ 1 บทนำ.....	13
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	13
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์การศึกษา.....	14
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย.....	14
1.4 ขั้นตอนการทำวิจัย.....	15
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	15
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	16
2.1งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	16
2.2 ทฤษฎีหุ่นยนต์.....	16
2.3 สมการที่ใช้ในการควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่ของแขนกล.....	20
2.4 ระบบเครือข่ายคอมพิวเตอร์เน็ตเวิร์ค.....	25
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	30
3.1 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	31
3.2 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแขนกลแบบ 6 แกน.....	31
3.3 การส่งข้อมูลผ่านระบบเน็ตเวิร์ค.....	35
3.4 การควบคุมองศาการหมุนของแขนกล.....	40
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	45
4.1 การแสดงการเคลื่อนที่ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแขนกล 6 แกน ที่ใช้ในการวิจัย.....	45
4.2 การหาขอบเขตและพื้นที่การทำงานของแขนกล.....	46

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3 การควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกลด้วยสมการจลนศาสตร์แบบพิกัดเชิงตัวเลข ที่ใช้ร่วมกับตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID).....	48
4.4 การควบคุมการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลตามจุดพิกัดหรือเส้นทางการเคลื่อนที่ๆ กำหนด.....	53
4.5 การควบคุมการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลผ่านระบบเน็ตเวิร์ค.....	65
4.6 การควบคุมตำแหน่งการหมุนสำหรับเซอร์โวมอเตอร์ของข้อต่อแขนกล.....	68
บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	71
5.1 สรุปและวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดลอง.....	71
5.2 ปัญหาที่พบในการวิจัยและแนวทางการแก้ไขปัญหา.....	72
บรรณานุกรม.....	73
ภาคผนวก.....	74
ประวัติผู้จัดทำวิทยานิพนธ์.....	95



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย.....	31
ตารางที่ 3.2 ตารางข้อมูลแบบ Denavit Hartenberg ของแขนกล 6 แกน.....	34
ตารางที่ 3.3 ตารางข้อมูล Denavit Hartenberg เมื่อแทนค่า L ลงไป.....	34
ตารางที่ 3.4 คุณสมบัติของเราเตอร์ (D-Link/DIR-612).....	36
ตารางที่ 3.5 คุณสมบัติของเซอร์โวมอเตอร์ (Servo Motor) ของแขนกล.....	40
ตารางที่ 3.6 คุณสมบัติสำคัญของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์แบบเซอร์โว Acelus/ASP-180-09.....	41
ตารางที่ 3.7 คุณสมบัติสำคัญของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์แบบเซอร์โว Acelus/ASP-055-18.....	41
ตารางที่ 3.8 คุณสมบัติสำคัญของการ์ครบ-ส่งข้อมูล(DAQ) ของ NI รุ่น PCIe-6323.....	42
ตารางที่ 3.9 การเชื่อมต่อสัญญาณระหว่างการ์ครบ-ส่งข้อมูล (DAQ) ของ NI และชุดขับเคลื่อนมอเตอร์แบบเซอร์โวของ Accelus.....	43
ตารางที่ 4.1 ขอบเขตการหมุนสำหรับแต่ละข้อต่อของแขนกลแบบ 6 แกน.....	46
ตารางที่ 4.2 ขอบเขตการเคลื่อนที่ของปลายแขนกล.....	48
ตารางที่ 4.3 ข้อมูลการเคลื่อนที่ของแขนกลจากพิกัด (-13.8, -22.3, 124.5) ไปยังพิกัด (25, -25, 110) ในการจำลองการเคลื่อนที่ใน MATLAB ของแขนกล.....	55
ตารางที่ 4.4 ข้อมูลการเคลื่อนที่ของแขนกลจากจุดพิกัด A (-13.8, -22.3, 124.5) ไปยังจุดพิกัด B (25, -25, 110) ในการจำลองการเคลื่อนที่ของแขนกลในโปรแกรม MATLAB....	59
ตารางที่ 4.5 ข้อมูลการเคลื่อนที่ของแขนกลจากจุดพิกัด B (25.4, -24.7, 109.7) ไปยังจุดพิกัด C (15, -10, 110) ด้วยการจำลองการเคลื่อนที่ของแขนกลด้วยโปรแกรม MATLAB	60
ตารางที่ 4.6 ข้อมูลการเคลื่อนที่ของแขนกลจากจุด C (15.1, -10.4, 110) ไปยังพิกัด A (13.8, -22.3, 124.5).....	62
ตารางที่ 4.7 เวลาที่ใช้ในการส่งสัญญาณจากคอมพิวเตอร์ของผู้ควบคุมไปยังคอมพิวเตอร์ ควบคุมแขนกล.....	67

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 หุ่นยนต์เลียนแบบมนุษย์ที่พัฒนาขึ้น โดยบริษัทฮอนด้า.....	17
รูปที่ 2.2 แสดงความสัมพันธ์ของการบอกตำแหน่งในรูปเวกเตอร์.....	20
รูปที่ 2.3 การแปลงพิกัดแบบ Homogeneous Transform.....	21
รูปที่ 2.4 การตั้งแกนตามแบบการนำเสนอแบบ Denavit Hartenberg.....	22
รูปที่ 2.5 การควบคุมแบบพีไอดี (PID).....	25
รูปที่ 2.6 การเชื่อมต่อเครือข่ายแบบเพียร์ทูเพียร์ (Peer To Peer).....	26
รูปที่ 2.7 การเชื่อมต่อเครือข่ายแบบไคลเอนท์เซิร์ฟเวอร์ (Client/Server Network).....	27
รูปที่ 2.8 การเชื่อมต่อเครือข่ายแบบดาว (Star Network).....	27
รูปที่ 2.9 การเชื่อมต่อเครือข่ายแบบวงแหวน (Ring Network).....	28
รูปที่ 2.10 การเชื่อมต่อเครือข่ายแบบบัส (Bus Network).....	29
รูปที่ 3.1 แขนกลแบบ 6 แกนที่ใช้ในการทดลองควบคุมตำแหน่งผ่านระบบคอมพิวเตอร์เน็ตเวิร์ค.....	31
รูปที่ 3.2 แสดงภาพการตั้งแกน เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแขนกล.....	32
รูปที่ 3.3 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแขนกลด้วย MATLAB.....	35
รูปที่ 3.4 การส่งถ่ายข้อมูลผ่านเน็ตเวิร์คเพื่อควบคุมแขนกล.....	35
รูปที่ 3.5 อุปกรณ์เราเตอร์ที่ใช้ในการเชื่อมต่อระบบเน็ตเวิร์ค D-Link/DIR-612.....	36
รูปที่ 3.6 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเชื่อมต่อเน็ตเวิร์คระหว่างคอมพิวเตอร์ของผู้ควบคุมกับเราเตอร์ ด้วยสัญญาณ Wi-Fi.....	37
รูปที่ 3.7 รายละเอียดการเชื่อมต่อเน็ตเวิร์คของคอมพิวเตอร์ของผู้ควบคุม.....	38
รูปที่ 3.8 รายละเอียดการเชื่อมต่อเน็ตเวิร์คของคอมพิวเตอร์ควบคุมแขนกล.....	38
รูปที่ 3.9 โปรแกรมส่งพิกัดตำแหน่งของปลายแขนกลผ่านระบบเน็ตเวิร์ค.....	39
รูปที่ 3.10 ตัวอย่างของ Text File ที่บรรจุข้อมูลพิกัดของปลายแขนกล.....	39
รูปที่ 3.11 ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์แบบเซอร์โวของ Accelus รุ่น ASP-180-09 ที่ใช้ในการ ควบคุมเซอร์โวมอเตอร์ (Servo Motor) แกนที่ 4 และ 5.....	40
รูปที่ 3.12 ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์แบบเซอร์โวของ Accelus รุ่น ASP-055-18 ที่ใช้ในการ ควบคุมเซอร์โวมอเตอร์ (Servo Motor) แกนที่ 6.....	41
รูปที่ 3.13 การ์ดรับ-ส่งข้อมูล (DAQ) ของ NI รุ่น PCIe-6323.....	42
รูปที่ 4.1 การแสดงการเคลื่อนที่ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแขนกล 6 แกนที่ใช้ในการวิจัย...	45

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.2 ผลการจำลองขอบเขตการเคลื่อนที่ของแขนกลในระบบพิกัด (X, Y, Z) ใน 3 มิติ.....	47
รูปที่ 4.3 ผลการจำลองขอบเขตการเคลื่อนที่ของแขนกลบนระนาบ (X, Y) จากมุมมองด้านบน.....	47
รูปที่ 4.4 ผลการจำลองขอบเขตการเคลื่อนที่ของแขนกลบนระนาบ (X, Z) (ซ้าย)จากมุมมองด้านหน้า และ(Y, Z) (ขวา) จากมุมมองด้านข้าง.....	48
รูปที่ 4.5 กราฟเปรียบเทียบของสภาวะการเคลื่อนที่ของแขนกลจากจุดเริ่มต้น ไปถึงจุดสิ้นสุด เมื่อมีการ ปรับค่า อัตราขยายแบบสัดส่วน K_p เป็น 0.05, 0.1, 0.15, 0.2 และ 0.25 ตามลำดับ.....	49
รูปที่ 4.6 กราฟเปรียบเทียบตำแหน่งการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลจากจุดเริ่มต้น ไปถึงจุดสิ้นสุด เมื่อมีการปรับค่าอัตราขยายแบบสัดส่วน K_p เป็น 0.05, 0.1, 0.15, 0.2 และ 0.25 ตามลำดับ..	50
รูปที่ 4.7 กราฟเปรียบเทียบของสภาวะการเคลื่อนที่ของแขนกลจากจุดเริ่มต้น ไปถึงจุดสิ้นสุด เมื่อมีการ ปรับค่าอัตราขยายแบบอนุพันธ์ (K_d) เป็น 0.005, 0.01, 0.015, 0.02 และ 0.025 ตามลำดับ...	51
รูปที่ 4.8 กราฟเปรียบเทียบตำแหน่งการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลจากจุดเริ่มต้น ไปถึงจุดสิ้นสุด เมื่อมีการปรับค่าอัตราขยายแบบอนุพันธ์ (K_d) เป็น 0.005, 0.01, 0.015, 0.02 และ 0.025 ตามลำดับ.....	51
รูปที่ 4.9 กราฟเปรียบเทียบของสภาวะการเคลื่อนที่ของแขนกลจากจุดเริ่มต้น ไปถึงจุดสิ้นสุด เมื่อมีการ ปรับค่า อัตราขยายแบบปริพันธ์ (K_i) เป็น 0.02, 0.04, 0.06, 0.08 และ 0.1 ตามลำดับ.....	52
รูปที่ 4.10 กราฟเปรียบเทียบตำแหน่งการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลจากจุดเริ่มต้น ไปถึงจุดสิ้นสุด เมื่อมีการปรับค่าอัตราขยายแบบปริพันธ์ (K_i) เป็น 0.02, 0.04, 0.06, 0.08 และ 0.1 ตามลำดับ.....	53
รูปที่ 4.11 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเคลื่อนที่จากจุดเริ่มต้น ไปยังตำแหน่งเป้าหมาย ของแขนกล 6 แกน.....	54
รูปที่ 4.12 วิธีการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลจากจุดพิกัดเริ่มต้น ไปยังจุดพิกัดเป้าหมายบน พิกัด (x, y, z) (บนซ้าย) และในระนาบ x-y (บนขวา) และในระนาบ x-z (ล่างซ้าย) และในระนาบ y-z (ล่างขวา).....	54
รูปที่ 4.13 องศาการหมุนของแต่ละข้อต่อแขนกลจากพิกัดเริ่มต้น ไปยังพิกัดตำแหน่งเป้าหมาย.....	55
รูปที่ 4.14 การเคลื่อนที่ของแขนกลจากจุดพิกัด A (วงกลม) ไปยังจุดพิกัด B (กากบาท) และจุดพิกัด C (สามเหลี่ยม) ในระบบพิกัด (x, y, z).....	56

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.15 การเคลื่อนที่ของแกนกลจากจุดพิกัด A (วงกลม) ไปยังจุดพิกัด B (กากบาท) และจุดพิกัด C (สามเหลี่ยม) ในระบบพิกัด x-y-z (บน) และในระนาบ x-y (ล่างซ้าย) และในระนาบ x-z (ล่างขวา).....	57
รูปที่ 4.16 องศาการหมุนของแกนกลจากจุดพิกัด A (-13.8, -22.3, 124.5) ไปยังจุดพิกัด B (25, -25, 110).....	58
รูปที่ 4.17 ตำแหน่งของปลายแกนกลจากจุดพิกัด A (-13.8, -22.3, 124.5) ไปยังจุดพิกัด B (25, -25, 110).....	58
รูปที่ 4.18 องศาการหมุนของแกนกลจากจุดพิกัด B (25.4, -24.7, 109.7) ไปยังจุดพิกัด C (15, -10, 110).....	59
รูปที่ 4.19 ตำแหน่งของปลายแกนกลจากจุดพิกัด B (25.4, -24.7, 109.7) ไปยังจุดพิกัด C (15, -10, 110).....	60
รูปที่ 4.20 องศาการหมุนของแกนกลจากจุดพิกัด C (15.1, -10.4, 110) ไปยังจุดพิกัด A (13.8, -22.3, 124.5).....	61
รูปที่ 4.21 ตำแหน่งของปลายแกนกลจากพิกัดจุด C (15.1, -10.4, 110) ไปยังพิกัดจุด A (13.8, -22.3, 124.5).....	61
รูปที่ 4.22 ตำแหน่งของปลายแกนกลเมื่อเคลื่อนที่ออกจากจุดเริ่มต้น D (กากบาท) เป็นวงกลมรอบจุดศูนย์กลาง C (วงกลม) ในระนาบ x-y.....	62
รูปที่ 4.23 ลักษณะการเคลื่อนที่ของแกนกลเป็นวงกลมรอบจุดศูนย์กลาง C (0, -30, 120) ในสามมิติ..	63
รูปที่ 4.24 องศาการหมุนของข้อต่อแกนกลเมื่อเคลื่อนที่เป็นวงกลมรอบจุดศูนย์กลาง C (0, -30, 120).	63
รูปที่ 4.25 ตำแหน่งของปลายแกนกลจากจุดเริ่มต้นจนถึงจุดสุดท้ายเมื่อเคลื่อนที่เป็นวงกลมรอบจุดศูนย์กลาง C (0, -30, 120).....	64
รูปที่ 4.26 ขั้นตอนการส่งสัญญาณควบคุมแกนกลผ่านระบบคอมพิวเตอร์เน็ตเวิร์ค.....	65
รูปที่ 4.27 ซอฟต์แวร์ที่ประดิษฐ์ขึ้นจากการประยุกต์ใช้โปรแกรม VisualStudio.NET เพื่อใช้ในการส่งพิกัดเป้าหมายของปลายแกนกลไปยังจุด (-13.8, -22.3, 124.5, 0) ผ่านระบบคอมพิวเตอร์เน็ตเวิร์ค.....	66
รูปที่ 4.28 ตัวอย่างไฟล์ตัวอักษร(Text File) ที่เกิดขึ้นจากการส่งค่าพิกัดตำแหน่งของปลายแกนกลไปยังพิกัดจุด (-13.8, -22.3, 124.5, 0) ผ่านระบบเน็ตเวิร์ค.....	66

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.29 ตัวอย่างผลของการส่งตำแหน่งของปลายแกนกลผ่านระบบเน็ตเวิร์คไปยังพิกัด (25, -25, 110, 15) ด้วยซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นจาก VisualStudio.NET.....	67
รูปที่ 4.30 แผนภูมิการควบคุมการทำงานของแกนกลผ่านระบบคอมพิวเตอร์เน็ตเวิร์ค.....	69
รูปที่ 4.31 กราฟแสดงผลการเคลื่อนที่ (ครั้งที่ 1) ของแกนกลเทียบกับสัญญาณควบคุมจากคอมพิวเตอร์ ควบคุมแกนกล.....	70
รูปที่ 4.32 กราฟแสดงผลการเคลื่อนที่ (ครั้งที่ 2) ของแกนกลเทียบกับสัญญาณควบคุมจากคอมพิวเตอร์ ควบคุมแกนกล.....	70



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

เนื่องจากปัจจุบันในระบบอุตสาหกรรมมีการนำหุ่นยนต์ไปประยุกต์ใช้งานเป็นอย่างมาก ในหลากหลายรูปแบบการใช้งาน เพื่อเพิ่มขีดความสามารถของกระบวนการผลิตในระบบอุตสาหกรรม อาทิ เช่นในอุตสาหกรรมรถยนต์ได้นำหุ่นยนต์ หรือแขนกลไปใช้เพื่อเพิ่มอัตราการผลิตชิ้นงานให้ได้รวดเร็ว แม่นยำ และเพิ่มกำลังผลิตให้มากยิ่งขึ้น ด้านอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ได้นำหุ่นยนต์ไปใช้ในการผลิต ชิ้นงานที่มีความละเอียดสูงจนเกินกว่าขีดความสามารถของมนุษย์ที่จะทำได้ หรือนำไปผลิตชิ้นงานใน ระบบอุตสาหกรรมแทนแรงงานคนเพื่อลดต้นทุนการผลิต หรือแม้กระทั่งการนำหุ่นยนต์ไปใช้แทน มนุษย์ในงานอุตสาหกรรมที่มีสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสมกับมนุษย์ที่จะสามารถทำงานได้เช่น สายการผลิตที่มีอุณหภูมิสูง หรือที่ๆ ไม่มีอากาศถ่ายเท หรือที่มีสารเคมีอันตรายเป็นต้น รวมไปถึงจนถึงการ นำแขนกลไปใช้งานทางด้านทางการแพทย์เพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการรักษาผู้ป่วยให้มีประสิทธิภาพมาก ยิ่งขึ้น เช่นการผ่าตัดด้วยแขนกล ซึ่งมีความผิดพลาดน้อยและมีความละเอียดสูง รวมไปถึงจนถึงเทคโนโลยี ด้านอวกาศก็มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องอาศัยหุ่นยนต์ช่วยในการประกอบภารกิจต่างๆ ซึ่งเกินกว่า ขีดจำกัดของมนุษย์ที่จะทำได้ ดังนั้นความรู้ในเทคโนโลยีหุ่นยนต์จึงมีความจำเป็นอย่างมากทั้งในปัจจุบัน และอนาคต

อนึ่งปัจจุบันมนุษย์ได้พัฒนาเทคโนโลยีต่างๆ ขึ้นมาอย่างต่อเนื่องรวมถึงเทคโนโลยีที่ใช้ในการ ติดต่อสื่อสาร การส่งถ่ายข้อมูลสารสนเทศต่างๆ อย่างเช่นการส่งข้อมูลต่างๆ ผ่านระบบโครงข่าย คอมพิวเตอร์เน็ตเวิร์คเป็นต้น ทั้งนี้มนุษย์ได้พัฒนาเทคโนโลยีด้านการสื่อสารมาอย่างต่อเนื่องจนถึง ปัจจุบัน ทำให้ผู้คนเข้าถึงได้ง่าย และมีต้นทุนในการใช้งานที่ไม่แพงเกินไป จึงเป็นที่ใช้งานกันอย่าง แพร่หลายทุกประเทศทั่วโลก ทั้งนี้ผู้วิจัยจึงได้ตระหนักเห็นถึงคุณค่าและประโยชน์ของการบูรณา เทคโนโลยีระบบเน็ตเวิร์ค และเทคโนโลยีด้านหุ่นยนต์เข้าด้วยกัน เพราะเป็นสิ่งที่เข้าถึงได้ง่ายและมีการ ใช้งานกันอย่างแพร่หลาย ซึ่งจะนำประโยชน์ในการส่งถ่ายข้อมูลผ่านระบบเน็ตเวิร์ค เพื่อนำมา ประยุกต์ใช้ในการควบคุมแขนกล 6 แกนผ่านระบบโครงข่ายเน็ตเวิร์ค ซึ่งจะเป็ประโยชน์และความรู้ พื้นฐานสู่การพัฒนาเพื่อการควบคุมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่น ที่อยู่ทั่วทุกมุมโลกผ่านทางระบบเน็ตเวิร์ค

ซึ่งงานวิจัยนี้จะรวบรวมองค์ความรู้ที่เกี่ยวข้องกับความรู้ทางด้าน การควบคุมตำแหน่งของแขน กลแบบ 6 แกนไว้ในหัวข้อที่ 2.3 โดยจะอธิบายถึงหลักการคำนวณทางจลศาสตร์ของแขนกล โดยเฉพาะ แขนกลแบบอนุกรม อาทิเช่น สมการจลศาสตร์แบบไปข้างหน้า (Forward Kinematic) จลศาสตร์แบบ ผกผัน (Inverse Kinematic) และการคำนวณหาเมตริกซ์จาโคเบียน (Jacobian) ของแขนกล เป็นต้น ซึ่ง

เป็นหลักการสำคัญที่ใช้ในการควบคุมตำแหน่งของแขนกลให้เคลื่อนที่ไปในตำแหน่งที่ต้องการ โดยได้พัฒนาโปรแกรมการคำนวณระบบจลศาสตร์ในซอฟต์แวร์ MATLAB เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการคำนวณหาองศาการหมุนสำหรับแต่ละมอเตอร์ เพื่อกำหนดตำแหน่งของปลายแขนกลพร้อมทั้งการแสดงผลการเคลื่อนที่ของแต่ละข้อต่อของแขนกล ที่มีความรวดเร็วและแม่นยำเพื่อใช้ในการศึกษาการควบคุมการเคลื่อนที่ไปสู่ตำแหน่งต่างๆ ในหัวข้อที่ 2.4 นั้นได้อธิบายเรื่องการส่งถ่ายข้อมูลผ่านระบบเน็ตเวิร์ค โดยการประดิษฐ์ซอฟต์แวร์เพื่อใช้ในการส่งค่าข้อมูลระหว่างคอมพิวเตอร์ของผู้ควบคุม และแขนกล 6 แกนผ่านระบบคอมพิวเตอร์เน็ตเวิร์ค และยังได้รวบรวมข้อมูลพร้อมกับการประดิษฐ์โปรแกรมเพื่อควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่ของแขนกล 6 แกน โดยใช้ซอฟต์แวร์ Visual Studio.NET มาประยุกต์เข้ากับการส่งข้อมูลตำแหน่งของแขนกล 6 แกน ผ่านระบบเน็ตเวิร์คซึ่งประกอบด้วยคอมพิวเตอร์ควบคุมซึ่งผู้ปฏิบัติการ (User) จะเป็นผู้ป้อนคำสั่งของตำแหน่งแขนกลในระบบพิกัด (X,Y,Z) และส่งคำสั่งไปยังคอมพิวเตอร์ที่ควบคุมแขนกล 6 แกนผ่านระบบโครงข่ายเน็ตเวิร์คด้วยซอฟต์แวร์ Visual Studio.NET ในบทที่ 3 นั้นได้อธิบายถึงวิธีการทดลอง การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแขนกล การส่งข้อมูลผ่านระบบเน็ตเวิร์ค ขอบเขตการเคลื่อนที่ของแขนกลเอาไว้ และในบทที่ 4 ได้แสดงและอภิปรายผลการทดสอบและวิเคราะห์การควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกลแบบ 6 แกนผ่านระบบโครงข่ายเน็ตเวิร์ค

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

- 1.2.1 ศึกษาและสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับแขนกลอนุกรมแบบ 6 แกน
- 1.2.2 ศึกษาและออกแบบระบบควบคุมแขนกลผ่านโครงข่ายคอมพิวเตอร์เน็ตเวิร์ค
- 1.2.3 ศึกษาและเขียนโปรแกรมเพื่อใช้ในการควบคุมแขนกลอนุกรมแบบ 6 แกน

1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย

- 1.3.1 สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแขนกลอนุกรมแบบ 6 แกนด้วยซอฟต์แวร์ MATLAB
- 1.3.2 ออกแบบระบบการควบคุมตำแหน่งของปลายแขนกล 6 แกนด้วยสมการจลศาสตร์แบบผกผันร่วมกับหลักการลดค่าความผิดพลาดด้วยการป้อนกลับแบบ PID เพื่อนำมาควบคุมองศาการหมุนของเซอร์โวมอเตอร์ มีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 10% จากเป้าหมาย
- 1.3.3 ประดิษฐ์โปรแกรมสื่อสารผ่านเน็ตเวิร์คในวงเน็ตเวิร์คเดียวกัน ด้วยซอฟต์แวร์ Visual Studio.Net เพื่อใช้ในการควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่ของแขนกลแบบ 6 แกนที่มีระยะเวลาในการส่งข้อมูลไม่เกิน 2 วินาที และเป็นโปรแกรมที่ใช้สำหรับการควบคุมแบบทิศทางเดียวซึ่งจะไม่รับค่ากลับจากปลายทางของการควบคุม

1.4 ขั้นตอนการทำวิจัย

1.4.1 สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแขนกลอนุกรมแบบ 6 แกน ด้วยซอฟต์แวร์ MATLAB

1.4.2 ศึกษาการควบคุมอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ผ่านระบบคอมพิวเตอร์เน็ตเวิร์คด้วยซอฟต์แวร์ Visual Studio.NET

1.4.3 ศึกษาวิธีการควบคุมตำแหน่งของแขนกลอนุกรมแบบ 6 แกนด้วยสมการจลศาสตร์แบบ ผกผัน

1.4.4 ประดิษฐ์โปรแกรมเพื่อใช้จำลองและควบคุมการทำงานของแขนกล

1.4.5 ทดลองควบคุมตำแหน่งของปลายแขนกล ผ่านระบบเน็ตเวิร์ค

1.4.6 ประเมินผลการทดลองและปรับปรุงแก้ไข

1.4.7 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 เป็นพื้นฐานความรู้ของการควบคุมอุปกรณ์ต่างๆ ผ่านทางระบบคอมพิวเตอร์เน็ตเวิร์ค

1.5.2 เพื่อเป็นต้นแบบในการขยายขอบเขตการควบคุมแขนกลในโรงงานหรืออุปกรณ์ต่างๆ ในโรงงานได้ในระยะทางที่ไกลขึ้นและมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

1.5.3 เป็นพื้นฐานความรู้ในการคำนวณหาองศาการหมุนของมอเตอร์ของแขนกลแบบอนุกรม เมื่อกำหนดพิกัดตำแหน่งของปลายแขนกล

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ (2551) ได้เสนอระบบแขนกลแบบนำ-ตาม หรือระบบควบคุมแขนกลจากระยะไกล 6 องศาอิสระ สำหรับงานที่มีขนาดเล็กทั่วไป ซึ่งจากการออกแบบโดยใช้โครงสร้างแบบอนุกรม และสามารถสลับเปลี่ยนรูปแบบการทำงานได้เป็นสองแบบคือ การเคลื่อนที่แบบหยาบและแบบละเอียดเพื่อให้สามารถปรับเลือกให้เหมาะสมกับการใช้งาน ผู้วิจัยได้ใช้แขนกลนำ แฟนทอม ออมนิ (Phantom Omni) ซึ่งมีอุปกรณ์ตรวจวัดมุมของการเคลื่อนที่ของแขนกลแบบ 6 องศาอิสระได้ ซึ่งเพียงพอต่อการระบุตำแหน่ง เพื่อควบคุมแขนกลตาม ซึ่งความแม่นยำมีความแตกต่างกันตามลักษณะการเคลื่อนที่ของแขนกล โดยมีความผิดพลาดไม่เกิน 1 มิลลิเมตร และความผิดพลาดดังกล่าวอาจชดเชยได้โดยการบังคับของผู้ใช้งาน [1]

พรพรด จันทรทัต (2555) ได้เสนอการพัฒนาซอฟต์แวร์สำหรับการควบคุมแขนกลแบบ 5 องศาอิสระและติดตั้งไว้บนรถเข็นสำหรับคนพิการ ซึ่งผู้พิการจะสามารถควบคุมการทำงานของแขนกลนี้ได้ทางผ่านสวิตช์ ซึ่งจะแบ่งการทำงานเป็นสามส่วนหลักๆ คือส่วนแรกเป็นส่วนของการระบุตำแหน่ง ส่วนที่สองเป็นส่วนของการกำหนดตำแหน่งบนแผนการเคลื่อนที่ และส่วนที่สามคือการออกแบบเพื่อความปลอดภัยของผู้ใช้งาน ซึ่งแขนกลสามารถเคลื่อนเข้าหาตำแหน่งเป้าหมายได้ โดยมีความผิดพลาดไม่เกิน 5.5 มิลลิเมตร [2]

ทวีเดช ศิริธนาพิพัฒน์ (2552) ได้ศึกษาเพื่อทำการเปรียบเทียบสำหรับการควบคุมระบบแบบเปิด-ปิด และ การควบคุมระบบแบบพีไอดี (PID) ในชุดเฟืองระบบควบคุม ซึ่งพบว่า การควบคุมกระบวนการด้วยการควบคุมแบบ PID จะสามารถรักษาเสถียรภาพของอัตราไหล และอุณหภูมิได้ดีกว่าการควบคุมกระบวนการแบบเปิด-ปิด [3]

Prempraneerach ได้ทำการศึกษาการควบคุมแขนกล OWI-353 แบบ 5 แกน โดยการประยุกต์ใช้ Jacobian pseudo-inverse ($J^\#$) และ Jacobian singularity robust inverse (J^*) ซึ่งพบว่าการใช้ Jacobian pseudo-inverse เพื่อคำนวณจลศาสตร์แบบผกผันของแขนกลแบบ 5 แกนนั้น อาจมีบางจุดที่ทำให้เกิด Singularity ได้แต่จะสามารถป้องกันการเกิด Singularity ได้โดยการประยุกต์ใช้ Jacobian singularity robust inverse กับแขนกลแบบ 5 แกน [4]

2.2 ทฤษฎีหุ่นยนต์ [5]

หุ่นยนต์ (Robot) คือเครื่องจักรกลชนิดหนึ่ง มีลักษณะโครงสร้างและรูปร่างแตกต่างกัน หุ่นยนต์ในแต่ละประเภทจะมีหน้าที่การทำงานในด้านต่างๆ ตามการควบคุมโดยตรงของมนุษย์ การ

ควบคุมระบบต่างๆ ในการสั่งงานระหว่างหุ่นยนต์และมนุษย์ สามารถทำได้โดยตรงและอัตโนมัติ โดยทั่วไปหุ่นยนต์ถูกสร้างขึ้นเพื่อสำหรับงานที่มีความยากลำบากบางอย่างเช่น งานสำรวจในพื้นที่บริเวณแคบหรืองานสำรวจดวงจันทร์ดาวเคราะห์ที่ไม่มีสิ่งมีชีวิต ปัจจุบันเทคโนโลยีของหุ่นยนต์เจริญก้าวหน้าอย่างรวดเร็ว เริ่มเข้ามามีบทบาทกับชีวิตของมนุษย์ในด้านต่างๆ เช่นด้านอุตสาหกรรมการผลิต ซึ่งต่างจากเดิมที่หุ่นยนต์มักถูกนำไปใช้ในงานอุตสาหกรรมการผลิตเป็นส่วนใหญ่ ปัจจุบันมีการนำหุ่นยนต์มาใช้งานมากขึ้นเช่น หุ่นยนต์ที่ใช้ในทางการแพทย์ หุ่นยนต์สำหรับงานสำรวจ หุ่นยนต์ที่ใช้ทำงานในอวกาศ หรือแม้แต่หุ่นยนต์ที่ถูกสร้างขึ้นเพื่อเป็นเครื่องเล่นของมนุษย์ จนกระทั่งในปัจจุบันนี้ ได้มีการพัฒนาให้หุ่นยนต์นั้นมีลักษณะที่คล้ายมนุษย์ เพื่อให้อาศัยอยู่ร่วมกันกับมนุษย์ในชีวิตประจำวันได้



รูปที่ 2.1 หุ่นยนต์เลียนแบบมนุษย์ที่พัฒนาขึ้น โดยบริษัทฮอนด้า [5]

2.2.1. การจำแนกหุ่นยนต์ตามลักษณะการเคลื่อนที่

2.2.1.1 หุ่นยนต์ชนิดที่ติดตั้งอยู่กับที่ (fixed robot)

คือหุ่นยนต์ที่สามารถเคลื่อนไหวไปมาได้ แต่ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ หุ่นยนต์ในประเภทนี้ได้แก่ แขนกลของหุ่นยนต์ที่ใช้ในงานด้านอุตสาหกรรมต่างๆ เช่นงานด้าน อุตสาหกรรมผลิตรถยนต์ แขนกลของหุ่นยนต์ที่ใช้งานในด้านการแพทย์ เช่นแขนกลที่ใช้ในการผ่าตัด หุ่นยนต์ประเภทนี้จะมีลักษณะ โครงสร้างที่มีขนาดใหญ่และมีน้ำหนักมาก ใช้พลังงานให้สามารถ เคลื่อนไหวได้จากแหล่งจ่ายพลังงานภายนอก และจะมีการกำหนดขอบเขตการเคลื่อนไหวของ หุ่นยนต์เอาไว้ ทำให้หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนไหวไปมาได้เฉพาะตำแหน่งที่ถูกกำหนดเอาไว้เท่านั้น ซึ่งถูกนำไปใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม เช่น โรงงานประกอบรถยนต์ เป็นต้น

2.2.1.2 หุ่นยนต์ชนิดที่เคลื่อนที่ได้ (mobile robot)

คือหุ่นยนต์ที่สามารถเคลื่อนไหวร่างกายไปมาได้โดยอิสระ หมายความว่า หุ่นยนต์ที่สามารถเคลื่อนย้ายตัวเองจากตำแหน่งหนึ่งไปยังอีกตำแหน่งหนึ่งได้อย่างอิสระ หรือมีการ เคลื่อนที่ไปมาในสถานที่ต่าง ๆ เช่น หุ่นยนต์ที่ใช้ในการสำรวจดวงจันทร์ขององค์การนาซ่า หุ่นยนต์ สำรวจใต้พิภพหรือหุ่นยนต์ที่ใช้ในการขนถ่ายสินค้า ซึ่งหุ่นยนต์ที่สามารถเคลื่อนไหวได้นี้ ถูก ออกแบบให้มีลักษณะของโครงสร้างให้มีขนาดเล็กและมีระบบเคลื่อนที่ไปมา รวมทั้งมีแหล่งจ่ายพลัง สำรองภายในร่างกายของตนเอง แตกต่างจากหุ่นยนต์ที่ไม่สามารถเคลื่อนที่ไปมาได้ ซึ่งจะต้องมี แหล่งจ่ายพลังงานอยู่ภายนอก

2.2.2 การจำแนกหุ่นยนต์ตามลักษณะภายนอก

2.2.2.1 หุ่นยนต์ฮิวแมนนอยด์ (Humanoid Robot) เป็นลักษณะหุ่นยนต์ที่มีรูปร่างและ ลักษณะเหมือนกับมนุษย์

2.2.2.2 แอนดรอยด์ (Android) เป็นการเรียกหุ่นยนต์คล้ายมนุษย์ที่สามารถแสดงออก เหมือนมนุษย์ แม้ว่ารากศัพท์ภาษากรีกของคำนี้หมายถึงเพศชาย แต่การใช้ในบริบทภาษาอังกฤษมัก ไม่ได้มีความหมายเจาะจงว่าเป็นเพศใด

2.2.2.3 จินอยด์ (Gynoid) เป็นการเรียกหุ่นยนต์ที่มีรูปร่างและลักษณะภายนอกคล้าย กับมนุษย์เพศหญิง

2.2.2.4 แอ็คทรอยด์ (Actriod) เป็นหุ่นยนต์ที่เลียนแบบพฤติกรรมมนุษย์ เช่น กะพริบ ตา หายใจ เป็นต้น

2.2.2.5 ไซบอร์ก (Cyborg) เป็นหุ่นยนต์ที่เชื่อมต่อกับสิ่งมีชีวิต หรือ ครึ่งคนครึ่งหุ่น

2.2.2.6 นาโนโรบอท (Nanorobot) เป็นหุ่นยนต์ขนาดเล็กมาก มีขนาดประมาณ 0.5-3 ไมครอน

2.2.3 ประโยชน์และความสามารถของหุ่นยนต์

หุ่นยนต์เริ่มเข้ามามีบทบาทกับชีวิตประจำวันของมนุษย์มากขึ้นเรื่อยๆ และเป็นเทคโนโลยีที่ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องในปัจจุบัน ทำให้ความสามารถของหุ่นยนต์ถูกพัฒนาขึ้นอย่างรวดเร็วซึ่งสามารถทำงานต่างๆ ที่มนุษย์ไม่สามารถทำได้หลายอย่าง ซึ่งการนำหุ่นยนต์เข้าใช้งานแทนมนุษย์นั้น สามารถแบ่งประเภทตามความสามารถของหุ่นยนต์ได้ ดังนี้

2.2.3.1 ความสามารถในการแพทย์

ในงานด้านการแพทย์ เริ่มนำเอาหุ่นยนต์แขนกลเข้ามามีส่วนร่วมในการช่วยทำการผ่าตัดคนไข้ เนื่องจากหุ่นยนต์นั้นสามารถทำงานในด้านที่มีความละเอียดสูงที่เกินกว่ามนุษย์จะทำได้ เช่น การนำเอาหุ่นยนต์มาใช้งานด้านการผ่าตัดสมอง ซึ่งมีความจำเป็นอย่างมากที่ต้องการความละเอียดในการผ่าตัด ดังนั้นแขนกลจึงกลายเป็นส่วนหนึ่งของการผ่าตัดในด้านการแพทย์ การทำงานของแขนกลในการผ่าตัด จะเป็นลักษณะการทำงานของกรควบคุมการผ่าตัด โดยผ่านทางแพทย์ผู้ทำการผ่าตัดอีกที ซึ่งการผ่าตัดโดยมีแขนกลเข้ามามีส่วนร่วมนั้นจะเน้นเรื่องความปลอดภัยเป็นอย่างสูง รวมทั้งความสามารถในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ รวมถึงงานเภสัชกรรมที่มีบางโรงพยาบาลนำหุ่นยนต์มาใช้ในการจ่ายยา

2.2.3.2 ความสามารถในงานวิจัย

หุ่นยนต์สามารถทำการสำรวจงานวิจัยทางด้านวิทยาศาสตร์ร่วมกับมนุษย์ เช่น การสำรวจท้องทะเลหรือมหาสมุทรที่มีความลึกเป็นอย่างมาก หรือการสำรวจบริเวณปากปล่องภูเขาไฟเพื่อเก็บบันทึกข้อมูลการเปลี่ยนแปลงต่าง ๆ ซึ่งเป็นงานเสี่ยงอันตรายที่เกินขอบเขตความสามารถของมนุษย์ที่ไม่สามารถปฏิบัติงานเพื่อทำการสำรวจเช่นนี้ได้ ทำให้ปัจจุบันมีการพัฒนาหุ่นยนต์เพื่อใช้ในงานวิจัยและสำรวจ เพื่อให้หุ่นยนต์สามารถทนทานต่อสภาพแวดล้อมและสามารถทำการควบคุมหุ่นยนต์ได้ในระยะไกลด้วยระบบบริโมทคอนโทรล โดยมีเซนเซอร์ติดตั้งที่ตัวหุ่นยนต์เพื่อใช้ในการวัดระยะทางและเก็บข้อมูลในส่วนต่างๆ ทางด้านวิทยาศาสตร์

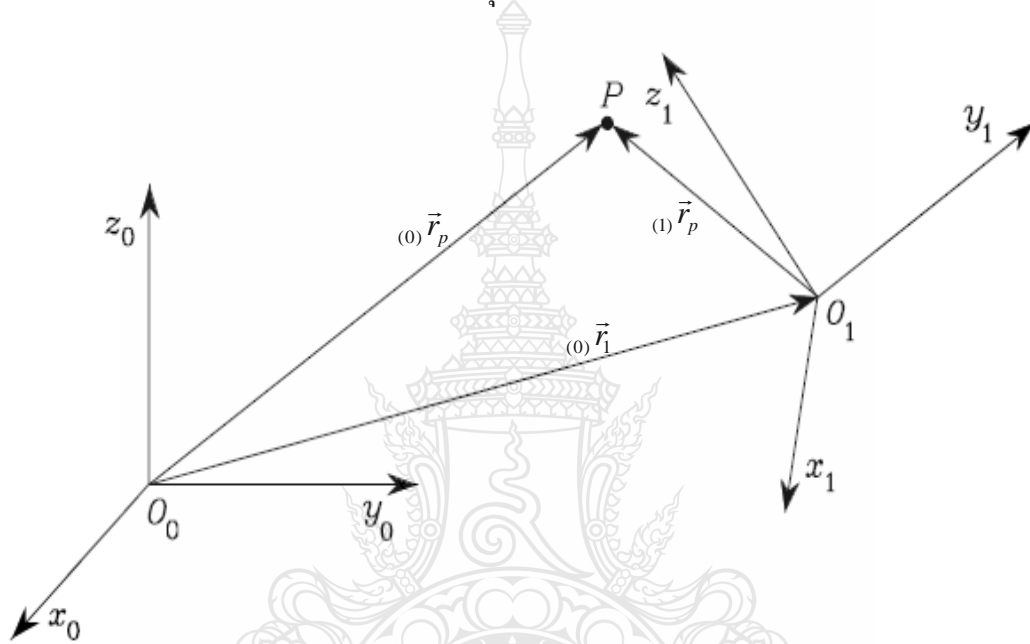
2.2.3.3 ความสามารถในงานอุตสาหกรรม

หุ่นยนต์เริ่มมีบทบาททางด้านเทคโนโลยีอุตสาหกรรมในขณะที่งานด้านอุตสาหกรรม มีความต้องการด้านแรงงานเป็นอย่างมาก การจ้างแรงงานจำนวนมากเพื่อใช้ในงานอุตสาหกรรม ทำให้ต้นทุนการผลิตของแต่ละโรงงานอุตสาหกรรม เพิ่มจำนวนสูงขึ้น และงานอุตสาหกรรมบางงานไม่สามารถที่จะใช้แรงงานเข้าไปทำได้ ซึ่งบางงานนั้นอันตรายและมีความเสี่ยงเป็นอย่างมาก หรือเป็นงานที่ต้องการความรวดเร็วและแม่นยำในการผลิตรวมทั้งเป็นการประหยัดระยะเวลา ทำให้หุ่นยนต์กลายเป็นทางออกของงานด้านอุตสาหกรรม

2.3 สมการที่ใช้ในการควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่ของแขนกล

2.3.1 การระบุตำแหน่งของแขนกลด้วยเวกเตอร์

เนื่องจากการที่จะควบคุมแขนกลให้ปลายแขนสามารถเคลื่อนที่ไปสู่ตำแหน่งต่างๆ ที่ต้องการได้นั้นจะต้องอาศัยหลักการทางจลศาสตร์ และพลศาสตร์ของการเคลื่อนที่ของแขนกลแบบ 6 แกน เพื่อคำนวณหาตำแหน่งต่างๆ ของแต่ละแกนของแขนกลที่เคลื่อนที่ไปในระบบพิกัด (X, Y, Z) โดยใช้หลักการทางเวกเตอร์เพื่อช่วยในการระบุขนาดและทิศทางในการเคลื่อนที่ของแขนกล



รูปที่ 2.2 แสดงความสัมพันธ์ของการบอกตำแหน่งในรูปเวกเตอร์ [6]

จากรูปที่ 2.2 สามารถเขียนความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบเวกเตอร์ได้ดังนี้

$${}^{(0)}\vec{r}_p = {}^{(0)}\vec{r}_1 + {}^{(0)}\vec{r}_{1p} \quad (2.1)$$

$${}^{(0)}\vec{r}_p = {}^{(0)}\vec{r}_1 + {}^{01}R_{(1)}\vec{r}_p \quad (2.2)$$

$${}^{01}R = [{}^{(0)}e_x^1 \times {}^{(0)}e_y^1 \times {}^{(0)}e_z^1] \quad (2.3)$$

$$({}^{01}R)^{-1} = ({}^{01}R)^T = ({}^{10}R) \quad (2.4)$$

$$R_x R_y \neq R_y R_x \quad (2.5)$$

$$R_x (R_y R_z) = (R_x R_y) R_z \quad (2.6)$$

เมื่อ

R คือ เมทริกซ์การหมุน (Rotation Matrix)

\vec{r} คือ เวกเตอร์ระยะกระจัด

e คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วย

เมื่อหุ่นยนต์มีการเคลื่อนที่ทั้งแบบเลื่อนและแบบหมุน ในการอธิบายการเคลื่อนที่ในระบบพิกัด(X,Y,Z) ด้วยเมตริกซ์จะช่วยลดความซับซ้อนในการคำนวณ โดยจะสามารถจัดให้อยู่ในรูปแบบเมตริกซ์การแปลงพิกัดได้ดังแสดงในสมการที่ (2.7) และในรูปที่ 2.3

2.3.2 การแปลงพิกัดแบบ Homogeneous Transformation Matrix

สามารถระบุตำแหน่งของจุด P ใดๆ เทียบกับจุดอ้างอิงเมื่อคูณด้วยเมตริกซ์การแปลงพิกัด (T) ได้ดังนี้ [4]

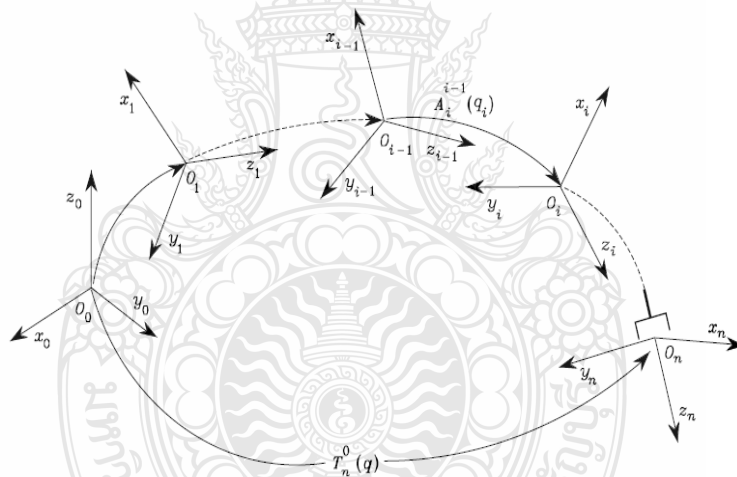
$$T_1^0 = \begin{bmatrix} R_{3 \times 3} & \vec{r}_{3 \times 1} \\ f_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^0R & ({}^0)\vec{r}_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

เมื่อ

0R คือ เมตริกซ์การหมุน (Rotation matrix) จากแกนที่ 0 ไปยังแกนที่ 1

$({}^0)\vec{r}_1$ คือ เวกเตอร์การเลื่อน (Translation Vector) จากแกนที่ 0 ไปยังแกนที่ 1

$f_{1 \times 3} = [0 \ 0 \ 0]$ คือ เวกเตอร์มิติที่ 4 ช่วยการแปลงพิกัด



รูปที่ 2.3 การแปลงพิกัดแบบ Homogeneous Transform [4]

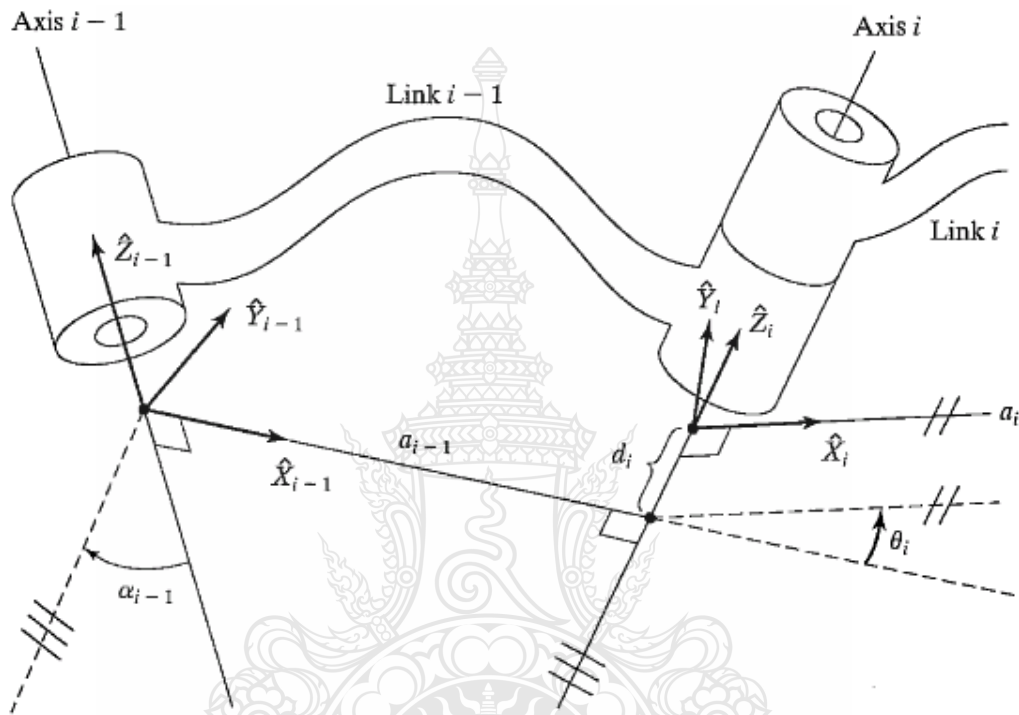
และระบบที่มีจุดอ้างอิงอยู่หลายจุด จะสามารถใช้หลักการแปลงพิกัดแบบ Homogeneous Transform ดังแสดงในสมการที่ (2.8) เพื่อระบุตำแหน่งของปลายก้านโยงสุดท้ายเมื่อเทียบกับกรอบอ้างอิงเริ่มต้น [14]

$$T_n^0 = T_1^0 T_2^1 \dots T_{n-1}^{n-2} T_n^{n-1} \quad (2.8)$$

2.3.3 หลักการนำเสนอพารามิเตอร์ของ Denavit Hartenberg

จากการวิเคราะห์โครงสร้างของแขนกลจะต้องอาศัยหลักการนำเสนอพารามิเตอร์ของ Denavit Hartenberg มาช่วยในการวิเคราะห์เพื่อหาเมตริกซ์การแปลงพิกัด และเพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณหาตำแหน่งของแต่ละก้านโยงของแขนกล ซึ่งจำเป็นที่จะต้องตั้งแกนของแต่ละจุดต่อที่

กำหนดให้เป็นจุดที่ i และ $i-1$ พร้อมกับการสร้างตารางพารามิเตอร์ของ Denavit Hartenberg Representation เพื่อกำหนดค่า α_i, a_i, d_i และ θ_i ในแต่ละแกนการหมุนของแขนกลซึ่ง Denavit Hartenberg Representation เป็นการแสดงความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบ Matrix ระหว่าง Link ที่ i และ $i-1$



รูปที่ 2.4 การตั้งแกนตามแบบการนำเสนอแบบ Denavit Hartenberg [7]

โดยสามารถเขียนเมตริกซ์การแปลงพิกัดระหว่างกันโยงที่ i และ $i-1$ โดยอาศัยหลักการของ Denavit Hartenberg Representation ได้ดังนี้

$$A_i^{i-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cos \alpha_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \alpha_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

เมื่อ

a_i คือ ระยะห่างระหว่างแกน Z_i และ Z_{i-1} ตามแนวแกน X_i

d_i คือ ระยะห่างระหว่างแกน X_i และ X_{i-1} ตามแนวแกน Z_{i-1}

α_i คือ มุมระหว่างแกน Z_i และ Z_{i-1}

θ_i คือ มุมระหว่างแกน X_i และ X_{i-1}

2.3.4 การคำนวณหาเมตริกซ์ Jacobian

เมตริกซ์ Jacobian เป็นฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการแสดงความสัมพันธ์ทางด้านคณิตศาสตร์ระหว่างความเร็วเชิงเส้นของปลายแขน และความเร็วเชิงมุมของแต่ละข้อต่อซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของสมการได้ดังนี้ [13]

$$\dot{x} = J(q)\dot{q} \quad (2.9)$$

$$\dot{q} = \begin{bmatrix} \dot{q}_1 & \dot{q}_2 & \cdots & \dot{q}_6 \end{bmatrix}^T \quad (2.10)$$

$$\dot{x}_6 = \begin{bmatrix} \dot{x}_6 & \dot{y}_6 & \dot{z}_6 \end{bmatrix}^T \quad (2.11)$$

$$J(q) = \frac{\partial f}{\partial q} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial q_1} & \frac{\partial f}{\partial q_2} & \cdots & \frac{\partial f}{\partial q_6} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

เมื่อ

\dot{x} คือ เวกเตอร์ของความเร็วเชิงเส้นของปลายแขนกล

\dot{q} คือ เวกเตอร์ของความเร็วเชิงมุม

f คือ เวกเตอร์ตำแหน่งของปลายแขนกล

$J(q)$ คือ เมตริก Jacobian ของแขนกลซึ่งเป็นฟังก์ชันของมุมของแต่ละข้อต่อ

เพื่อหาจลศาสตร์แบบผกผันในเชิงตัวเลข (Numerical Inverse Kinematic) นั้นสามารถทำได้โดยการหาเมตริกซ์ผกผันของจาโคเบียน (J^{-1}) แล้วนำมาคูณกับการเปลี่ยนแปลงของตำแหน่งปลายแขนกล (Δx_6) เพื่อคำนวณหาการเปลี่ยนแปลงมุมการหมุนของมอเตอร์ในแต่ละข้อต่อ (Δq) ดังในสมการที่ (2.13)

$$dq = J^{-1}(q)dx \quad (2.13)$$

หรือเมื่อพิจารณาการเคลื่อนที่ ในกรณีที่มีการเคลื่อนที่เล็กน้อย

$$\Delta q \approx J^{-1}(q)\Delta x \quad (2.14)$$

โดยที่

$$\Delta x = (x(t+1) - x(t)) \quad (2.15)$$

เมื่อ

Δq คือ มุมที่เกิดการเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อย

Δx คือ ตำแหน่งของปลายแขนกลที่เกิดการเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อย

$x(t+1)$ คือ ตำแหน่งของปลายแขนกลที่เวลา $t+1$

$x(t)$ คือ ตำแหน่งของปลายแขนกลที่เวลาปัจจุบัน t

ในบางกรณีอาจจะมีบางตำแหน่งที่ไม่สามารถคำนวณหาค่า $J^{-1}(q)$ ได้ เนื่องจากการเกิดสถานะเอกฐาน (Singularity) ในบางรูปแบบของการเคลื่อนที่ของแขนกล แต่จะสามารถป้องกันการเกิดสถานะเอกฐานได้โดยการใช้ Jacobian singularity robust inverse (J^*) ในกรณีที่ไม่สามารถหาค่า J^{-1} ได้ [4]

$$J^* = J^T (JJ^T + kI)^{-1} \quad (2.16)$$

เมื่อ

J^* คือ Jacobian singularity robust inverse

k คือ ค่าคงตัวที่เป็นบวก และมีค่าน้อย

I คือ เมตริกเอกลักษณ์

2.3.5 การควบคุมแบบ PID ร่วมกับสมการจลน์ศาสตร์แบบผกผันเพื่อใช้ควบคุมแขนกลแบบ 6 แกน

การควบคุมแบบ PID เป็นรูปแบบการควบคุมแบบป้อนกลับ ซึ่งเป็นการรวมการควบคุมแบบสัดส่วน (K_p) แบบอินทิกรัล (K_i) และแบบอนุพันธ์เข้าด้วยกัน (K_d) โดยนำค่าความผิดพลาดที่เวลาใดๆ $e(t)$ มาใช้เพื่อปรับค่าสัญญาณขาเข้า โดยตัวควบคุมจะพยายามลดค่าความผิดพลาดให้เหลือน้อยลงด้วยการปรับค่าสัญญาณขาเข้าของกระบวนการ [8]

$$u_p = K_p e(t) \quad (2.17)$$

$$u_i = K_i \int_0^t e(t) dt \quad (2.18)$$

$$u_d = K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.19)$$

$$u(t) = u_p + u_i + u_d \quad (2.20)$$

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.21)$$

ทดลองหาค่าจลศาสตร์แบบผกผันโดยการใช้ตัวควบคุมแบบสัดส่วน และให้ค่าความผิดพลาดของปลายแขนกลที่เวลาใดๆ มีค่าเป็น $e(t)$ ดังแสดงในสมการที่ (2.22)

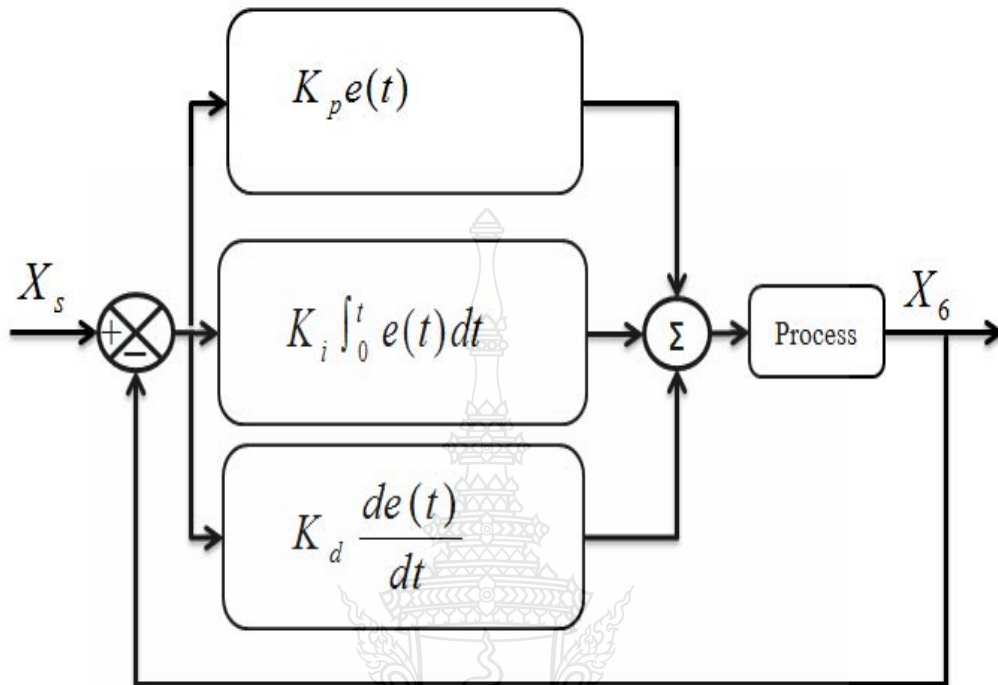
$$e(t) = x_s - x_6(t) \quad (2.22)$$

เมื่อ

$x_6(t)$ คือ ตำแหน่งของปลายแขนกลที่เวลาใดๆ

x_s คือ ตำแหน่งเป้าหมายของปลายแขนกล

สามารถเขียน Flow Chart ของการควบคุมแบบ PID ดังแสดงในรูปที่ (2.5)



รูปที่ 2.5 การควบคุมแบบพีไอดี (PID)

2.4 ระบบเครือข่ายคอมพิวเตอร์เน็ตเวิร์ค (Computer Network) [9]

เครือข่ายคอมพิวเตอร์หมายถึง ระบบที่มีคอมพิวเตอร์อย่างน้อยสองเครื่องเชื่อมต่อกัน โดยใช้สื่อกลาง และสามารถสื่อสารข้อมูลกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งทำให้ผู้ใช้คอมพิวเตอร์แต่ละเครื่องสามารถแลกเปลี่ยนข้อมูลซึ่งกันและกันได้ นอกจากนี้ยังสามารถใช้ทรัพยากรที่มีอยู่ในเครือข่ายร่วมกันได้ เช่น เครื่องพิมพ์ สแกนเนอร์ ฮาร์ดดิสก์ เป็นต้น

2.4.1 รูปแบบของเน็ตเวิร์คแบ่งได้เป็น 3 ลักษณะ ดังนี้

2.4.1.1 LAN (Local Area Network) เป็นรากฐานของเครือข่ายคอมพิวเตอร์ทั่วไป ซึ่ง LAN อาจเป็นได้ตั้งแต่เครือข่ายแบบง่ายๆ เช่น มีคอมพิวเตอร์สองเครื่องเชื่อมต่อกันด้วยสายสัญญาณ ไปจนถึงเครือข่ายที่ซับซ้อน เช่น มีคอมพิวเตอร์เป็นร้อยๆ เครื่อง เป็นต้น แต่ลักษณะสำคัญของ LAN ก็คือเครือข่ายจะครอบคลุมพื้นที่จำกัด เช่น ภายในอาคาร หรือสำนักงาน เป็นต้น

2.4.1.2 MAN (Metropolitan Area Network) เป็นเครือข่ายที่ครอบคลุมพื้นที่บริเวณกว้างขึ้น เนื่องจากการนำเครือข่ายแบบ LAN หลายๆ เครือข่ายมาเชื่อมต่อเข้าด้วยกัน ซึ่งอาจต้องใช้โครงข่ายการสื่อสารขององค์กร โทรศัพท ในการติดต่อสื่อสารแลกเปลี่ยนข้อมูลกัน

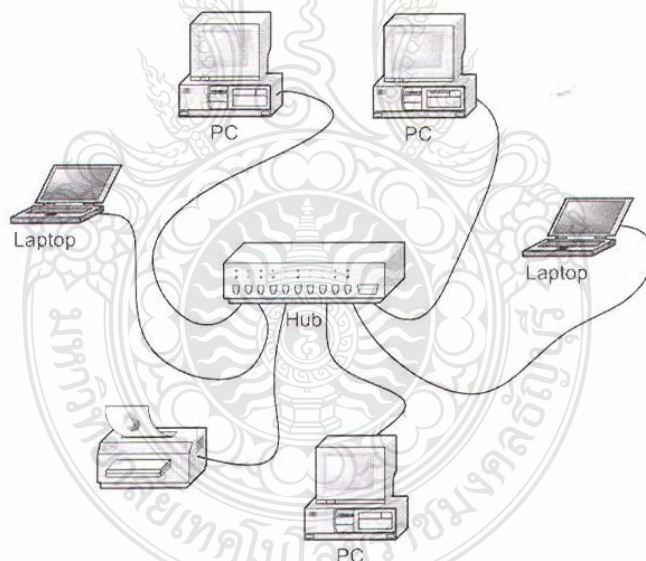
2.4.1.3 WAN (Wide Area Network) เป็นกลุ่มของคอมพิวเตอร์ที่เชื่อมต่อกันแบบ กว้างขวางอาจจะเป็นภายในประเทศหรือระหว่างประเทศเป็นการใช้ หลายๆ LAN หรือหลายๆ MAN ซึ่งอยู่คนละพื้นที่เชื่อมต่อเข้าหากัน ซึ่งการติดต่อสื่อสารกันอาจจะใช้ตั้งแต่สายโทรศัพท์จนถึง ดาวเทียมก็ได้

2.4.2 ประเภทของเครือข่ายแบ่งตามหน้าที่ของคอมพิวเตอร์

การจำแนกประเภทของเครือข่ายสามารถจำแนกได้ โดยใช้ลักษณะการแชร์ข้อมูล ของคอมพิวเตอร์หรือหน้าที่ของคอมพิวเตอร์ในแต่ละเครือข่ายเป็นเกณฑ์ เพื่อเป็นการแบ่งประเภท ของเครือข่ายซึ่งเมื่อใช้หลักการนี้แล้วเราสามารถแบ่งเครือข่ายออกได้เป็น 2 ประเภทคือ

2.4.2.1 เครือข่ายแบบเพียร์ทูเพียร์ (Peer To Peer)

เครือข่ายประเภทนี้จะไม่มีเครื่องเซิร์ฟเวอร์ และไม่มีการแบ่งชั้นความสำคัญ ของคอมพิวเตอร์ที่เชื่อมต่อเข้ากับเครือข่าย คอมพิวเตอร์ทุกเครื่องจะมีสิทธิเท่าเทียมกันในการจัดการ ใช้เครือข่าย คอมพิวเตอร์แต่ละเครื่องจะทำหน้าที่เป็นทั้งไคลเอนท์และเซิร์ฟเวอร์แล้วแต่การใช้งาน ของผู้ใช้เครือข่ายประเภทนี้

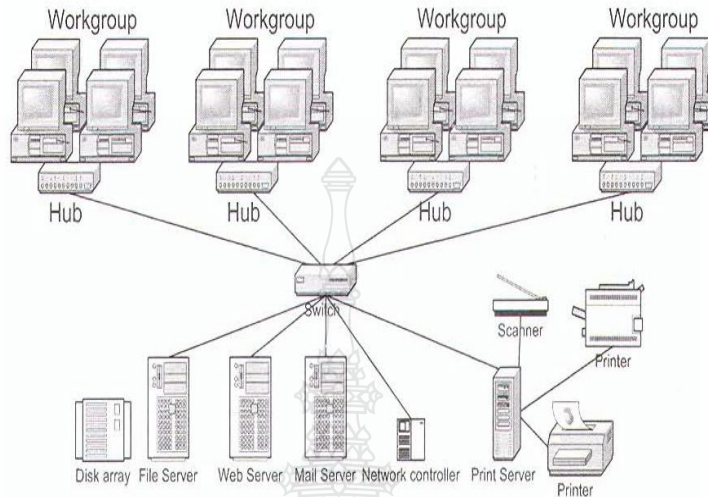


รูปที่ 2.6 การเชื่อมต่อเครือข่ายแบบเพียร์ทูเพียร์ (Peer To Peer) [9]

2.4.2.2 เครือข่ายแบบไคลเอนท์เซิร์ฟเวอร์ (Client/Server Network)

ถ้าระบบเครือข่ายมีคอมพิวเตอร์ไม่มากนัก ควรสร้างเครือข่ายแบบเพียร์ทู เพียร์ เนื่องจากง่ายและค่าใช้จ่ายจะถูกกว่า แต่เมื่อเครือข่ายนั้นมีการขยายใหญ่ขึ้นจำนวนผู้ใช้งานก็มากขึ้น เช่นกัน การดูแลและการจัดการระบบก็จะซับซ้อนมากยิ่งขึ้น เครือข่ายจำเป็นต้องมีเซิร์ฟเวอร์ทำ

หน้าที่จัดการเรื่องต่างๆ และให้บริการอื่นๆ เครื่องเซิร์ฟเวอร์นั้นก็ควรที่จะเป็นเครื่องที่มีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น และสามารถบริการให้ผู้ใช้ได้หลายๆ คนในเวลาเดียวกันได้

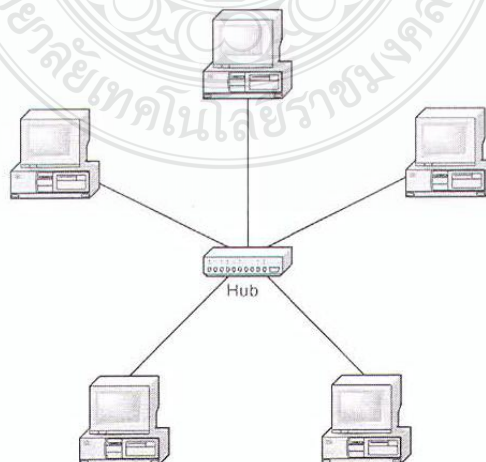


รูปที่ 2.7 การเชื่อมต่อเครือข่ายแบบไคลเอนท์เซิร์ฟเวอร์ (Client/Server Network) [9]

2.4.3 ลักษณะของการเชื่อมต่อของคอมพิวเตอร์เน็ตเวิร์คแบ่งออกเป็น 3 ประเภท

2.4.3.1 การเชื่อมต่อเครือข่ายแบบดาว (Star Network)

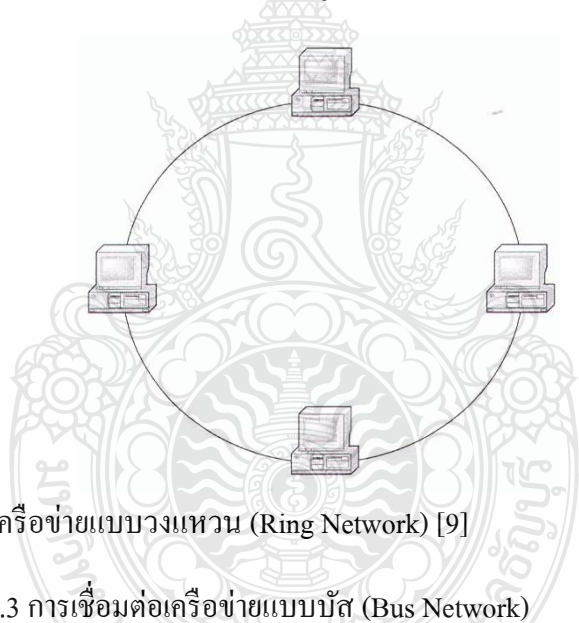
การเชื่อมต่อเครือข่ายแบบดาวนี้ คอมพิวเตอร์แต่ละเครื่องจะเชื่อมต่อด้วยสายสัญญาณเข้ากับอุปกรณ์รวมศูนย์คือฮับ (Hub) ซึ่งการเชื่อมต่อแบบนี้เมื่อคอมพิวเตอร์เครื่องใดจะส่งข้อมูลก็จะส่งไปที่ฮับก่อน และฮับจะทำหน้าที่กระจายข้อมูลไปยังทุกเครื่องที่เชื่อมเข้ากับฮับ ข้อดีของการเชื่อมต่อแบบนี้คือการรวมศูนย์การบริหารทรัพยากร แต่ถ้าหากอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางรับส่งข้อมูลหยุดทำงาน ระบบเครือข่ายจะล่มทันที



รูปที่ 2.8 การเชื่อมต่อเครือข่ายแบบดาว (Star Network) [9]

2.4.3.2 การเชื่อมต่อเครือข่ายแบบวงแหวน (Ring Network)

เป็นการเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์เข้าด้วยกันในลักษณะคล้ายรูปวงแหวนโดยใช้สายเคเบิลการเชื่อมต่อกันลักษณะดังที่แสดงในรูปที่(2.7) จะไม่มีจุดเริ่มต้น หรือจุดสุดท้ายของโครงสร้างเครือข่าย การส่งข้อมูลจะวิ่งผ่านคอมพิวเตอร์ทุกเครื่องเป็นรูปวงแหวนในทิศทางเดียวกัน เมื่อคอมพิวเตอร์เครื่องหนึ่งต้องการส่งข้อมูล มันจะทำการใส่ข้อมูลตำแหน่งของเครื่องที่มันต้องการจะส่งไปให้คอมพิวเตอร์ทุกเครื่องจะนำสัญญาณมาเช็คว่าเป็นของตนเองหรือเปล่า ถ้าไม่ใช่ ก็จะส่งไปให้เครื่องต่อไป สัญญาณจะวิ่งไปจนกระทั่งสามารถพบกับคอมพิวเตอร์เครื่องรับได้ และจะรับข้อมูลนำไปใช้เนื่องจากสัญญาณจะวิ่งไปเรื่อยๆ เป็นวงกลม จึงไม่ต้องการอุปกรณ์สำหรับปิดหัวท้าย ซึ่งระบบนี้จะใช้กับเน็ตเวิร์คที่มีคอมพิวเตอร์อยู่ไม่ไกลกันมากนัก ใช้โทเค็นเป็นสื่อในการส่งสัญญาณ โทเค็นจะถูกวิ่งผ่านไปทุกเครื่องเรื่อยๆ จนกว่าเครื่องที่ต้องการส่งข้อมูลจะดึงโทเค็นไปใช้และส่งสัญญาณออกมา เครื่องที่มีโทเค็นเท่านั้นที่จะส่งข้อมูลได้

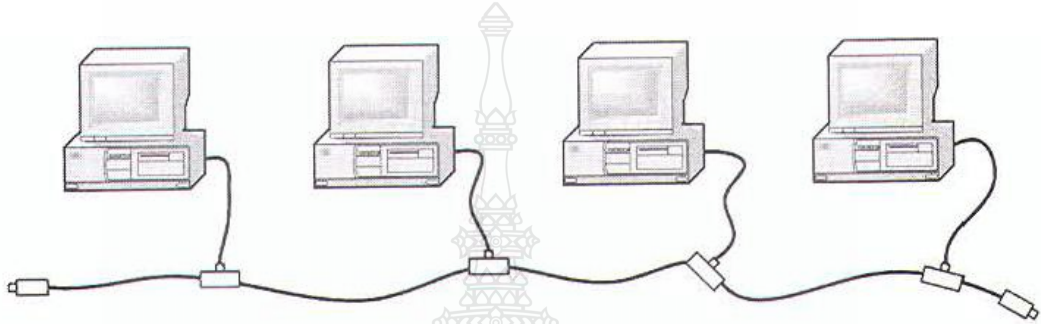


รูปที่ 2.9 การเชื่อมต่อเครือข่ายแบบวงแหวน (Ring Network) [9]

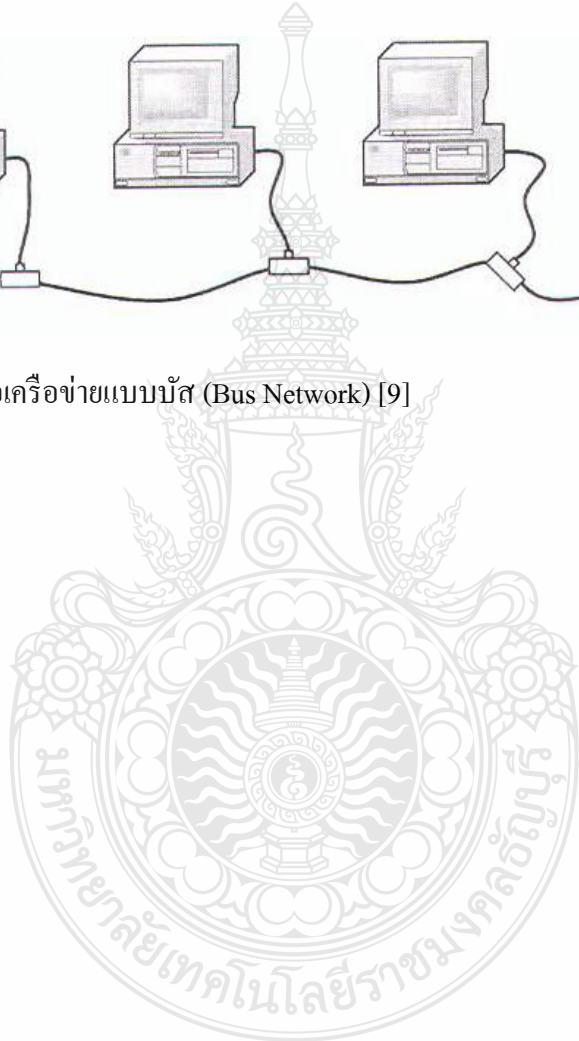
2.4.3.3 การเชื่อมต่อเครือข่ายแบบบัส (Bus Network)

เป็นเน็ตเวิร์คที่ง่ายที่สุด และเป็นที่ยอมรับอย่างกว้างขวางโดยการเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์ทุกเครื่องที่อยู่ในเครือข่ายเข้าด้วยกัน โดยการใช้สายเคเบิลเป็นสายหลัก เพื่อเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์ทุกเครื่อง โดยมีเน็ตเวิร์คการ์ดเป็นตัวเชื่อมระหว่างสายเคเบิลกับคอมพิวเตอร์ ข้อมูลจะถูกส่งออกไปตามสายเพื่อไปยังคอมพิวเตอร์ทุกๆ เครื่องที่อยู่ในเครือข่ายคอมพิวเตอร์ทุกเครื่องจะตรวจสอบว่าข้อมูลที่ส่งออกมาเป็นของตนเองหรือไม่ ถ้าไม่จะปล่อยข้อมูลผ่านไป แต่ถ้าใช่ก็จะนำข้อมูลเหล่านั้นไปใช้ ณ เวลาใดเวลาหนึ่ง คอมพิวเตอร์เครื่องเดียวเท่านั้นที่สามารถส่งข้อมูลได้ในระบบนี้คอมพิวเตอร์ไม่สามารถส่งข้อมูลได้พร้อมกันหลายเครื่องในเวลาเดียวกันเป็นสาเหตุให้ประสิทธิภาพของเน็ตเวิร์คจะน้อยลงเมื่อมีจำนวนคอมพิวเตอร์มากขึ้น สายเคเบิลที่เป็นสายกลางที่ต้อง

ใช้รับและส่งข้อมูล เรียกว่า backbone สายที่ใช้ส่วนมากจะเป็นสาย coaxial มีลักษณะคล้ายๆกับสายเคเบิลทีวี การใช้จะต้องมีอุปกรณ์ที่ปิดหัวและท้ายของสายเคเบิลด้วยเรียกว่า(เทอร์มินเนเตอร์) terminator คอยรับสัญญาณไม่ให้สะท้อนกลับไป ซึ่งอาจจะเป็นการรบกวนสัญญาณได้ การเชื่อมต่อแบบบัสเป็นวิธีที่ง่าย และสะดวกที่สุดในการติดตั้งเน็ตเวิร์ค ไม่ต้องมีฮาร์ดแวร์มากมาย มีเพียงแค่สายเคเบิล เน็ตเวิร์ค-การ์ด และเทอร์มินเนเตอร์เท่านั้น ระบบการเชื่อมต่อแบบนี้มักใช้กับเน็ตเวิร์คขนาดเล็กที่มีจำนวนเครื่องไม่มากนัก



รูปที่ 2.10 การเชื่อมต่อเครือข่ายแบบบัส (Bus Network) [9]



บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการทดลองเพื่อควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่ของแขนกลแบบ 6 แกน ผ่านระบบคอมพิวเตอร์เน็ตเวิร์ค โดยจะทำการศึกษาและทดลองการเชื่อมต่อระบบเพื่อส่งสัญญาณควบคุมตำแหน่งองศาการหมุนข้อต่อของแขนกลผ่านทางคอมพิวเตอร์เน็ตเวิร์ค ด้วยการใช้ซอฟต์แวร์ Visual Studio.Net รวมถึงการศึกษาผลของการเคลื่อนที่ของแขนกลด้วยสมการจลศาสตร์ภายใต้กระบวนการควบคุมแบบพีไอดี(PID) โดยจะทำการศึกษาผลของการเคลื่อนที่ของแขนกลที่เกิดจากการปรับค่า K_p , K_d และ K_i ของการควบคุมแบบพีไอดี (PID) และยังสามารถศึกษาเพื่อวัดผลตอบสนอง และความคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของแขนกลเทียบกับสัญญาณควบคุมที่ถูกส่งโดยคอมพิวเตอร์ของผู้ควบคุม เพื่อใช้ในการขับเคลื่อนเซอร์โวมอเตอร์ (Servo Motor) ของแต่ละข้อต่อของแขนกลแบบ 6 แกน ซึ่งจะแสดงรายละเอียดของขั้นตอน วิธีการทดลอง และอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัยดังต่อไปนี้

3.1 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

ตารางที่ 3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย

กิจกรรม	2556		2557			2558		2559	
	ก.ค	ต.ค	ม.ค	พ.ค	ก.ย	ม.ค	พค	ก.ย	ก.พ
	ถึง	ถึง	ถึง	ถึง	ถึง	ถึง	ถึง	ถึง	ถึง
1.สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแขนกลอนุกรมแบบ 6 แกน ด้วยซอฟต์แวร์ MATLAB									
2.ศึกษาการควบคุมฮาร์ดแวร์ผ่านระบบเน็ตเวิร์ค ด้วยซอฟต์แวร์ Visual Studio.NET									
3.ศึกษาวิธีการควบคุมตำแหน่งของแขนกล									

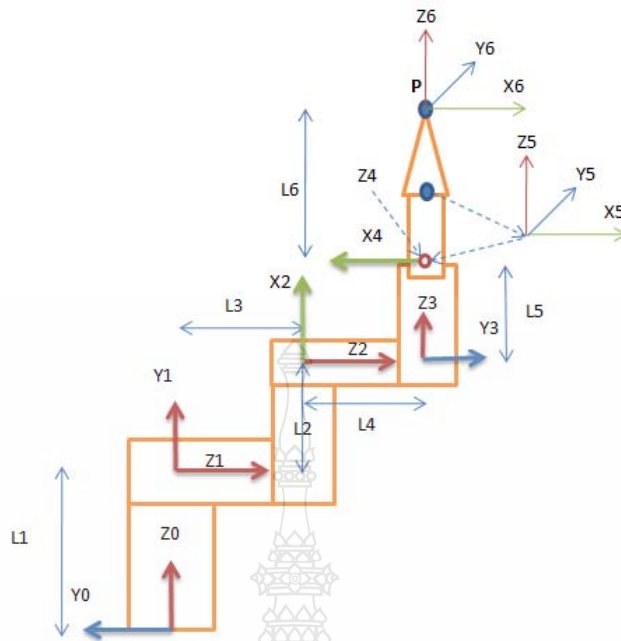
อนุกรมแบบ 6 แกน ด้วย สมการจลศาสตร์แบบ ผกผัน			
4.ประดิษฐ์โปรแกรมเพื่อ ใช้จำลองและควบคุมการ ทำงานของแขนกล			
5. ทดลองควบคุม ตำแหน่งของปลายแขนกล ผ่านระบบเน็ตเวิร์ค			
6. ประเมินผลการทดลอง และปรับปรุงแก้ไข			
7.วิเคราะห์และสรุปผล การทดลอง			
8.สรุป และจัดพิมพ์ รายงาน			

3.2 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแขนกลแบบ 6 แกน

จากการวิเคราะห์โครงสร้างของแขนกลแบบ 6 แกน และได้นำมาเขียนให้อยู่ในรูปแบบทางคณิตศาสตร์ เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณหาตำแหน่งต่างๆ ของแต่ละข้อต่อของแขนกลแบบ 6 แกนซึ่งจะสามารถเขียนให้อยู่ในรูปแบบของเมตริกซ์การแปลงพิกัด และเวกเตอร์การบอกตำแหน่ง ซึ่งจะต้องทำการตั้งแกนของแต่ละข้อต่อของแขนกลเพื่อทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ดังแสดงไว้ในรูปที่ 3.2 โดยกำหนดให้แกน Z คือแกนหมุนของแต่ละข้อต่อของแขนกล



รูปที่ 3.1 แขนกลแบบ 6 แกนที่ใช้ในการทดลองควบคุมตำแหน่งผ่านระบบคอมพิวเตอร์เน็ตเวิร์ค



รูปที่ 3.2 การตั้งแกนเพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแขนกล

เมื่อทำการตั้งแกนของแขนกลแบบ 6 แกนได้เรียบร้อยแล้ว จึงได้ทำการสร้างตารางแสดงความสัมพันธ์ของแกนต่างๆ ตามหลักการของ Denavit Hartenberg เพื่อให้สามารถนำความสัมพันธ์ของระยะ และมุมต่างๆ ของแต่ละข้อต่อไปคำนวณและสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อจำลองการเคลื่อนที่และหาตำแหน่งของปลายแขนกล โดยสามารถเขียนเมตริกซ์การแปลงพิกัด ระหว่างแกนโยงที่ i และ $i-1$ โดยอาศัยหลักการของ Denavit Hartenberg

ตารางที่ 3.2 ตารางข้อมูลแบบ Denavit Hartenberg ของแขนกล 6 แกน

i	α_i	a_i	d_i	θ_i
1	90	0	L_1	q_1
2	0	L_2	L_3	q_2
3	90	0	L_4	q_3
4	90	0	L_5	q_4
5	-90	0	0	q_5
6	0	0	L_6	q_6

จากการวัดระยะห่างของแต่ละข้อต่อของแขนกลแบบ 6 แกนได้ระยะของแต่ละข้อต่อของแขนกลดังนี้

$L_1 = 50\text{cm}$, $L_2 = 21.5\text{cm}$, $L_3 = 18.5\text{cm}$, $L_4 = 9\text{cm}$, $L_5 = 33.5\text{cm}$ และ $L_6 = 20.5\text{cm}$

จากนั้นนำค่าที่ได้ใส่ลงในตาราง Denavit Hartenberg เพื่อนำไปใช้ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ต่อไป

ตารางที่ 3.3 ตารางข้อมูล Denavit Hartenberg เมื่อแทนค่า L ลงไป

i	α_i	a_i	d_i	θ_i
1	90	0	50	q_1
2	0	21.5	18.5	q_2
3	90	0	9	q_3
4	90	0	33.5	q_4
5	-90	0	0	q_5
6	0	0	20.5	q_6

จากนั้นนำค่าที่ได้จากการสร้างตารางของ Denavit Hartenberg แทนค่าลงในเมตริกการแปลงพิกัดตามสมการที่ (3.1)

$$A_i^{i-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cos \alpha_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \alpha_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

เมื่อ

a_i คือ ระยะห่างระหว่างแกน z_i และ z_{i-1} ตามแนวแกน x_i

d_i คือ ระยะห่างระหว่างแกน x_i และ x_{i-1} ตามแนวแกน z_{i-1}

α_i คือ มุมระหว่างแกน z_i และ z_{i-1}

θ_i คือ มุมระหว่างแกน x_i และ x_{i-1}

เมื่อแทนค่า α_i, a_i, d_i และ θ_i ลงไปในเมตริกการแปลงพิกัด ดังนั้นจะสามารถเขียนเมตริกการแปลงพิกัดได้ใหม่ดังนี้

$$A_1^0 = \begin{bmatrix} \cos q_1 & 0 & \sin q_1 & 0 \\ \sin q_1 & 0 & -\cos q_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 50 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_2^1 = \begin{bmatrix} \cos q_2 & -\sin q_2 & 0 & 21.5 \\ \sin q_2 & \cos q_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 18.5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_3^2 = \begin{bmatrix} \cos q_3 & 0 & \sin q_3 & 0 \\ \sin q_3 & 0 & -\cos q_3 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 9 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_4^3 = \begin{bmatrix} \cos q_4 & 0 & \sin q_4 & 0 \\ \sin q_4 & 0 & -\cos q_4 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 33.5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_5^4 = \begin{bmatrix} \cos q_5 & 0 & \sin q_5 & 0 \\ \sin q_5 & 0 & -\cos q_5 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_6^5 = \begin{bmatrix} \cos q_6 & -\sin q_6 & 0 & 0 \\ \sin q_6 & \cos q_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 20.5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

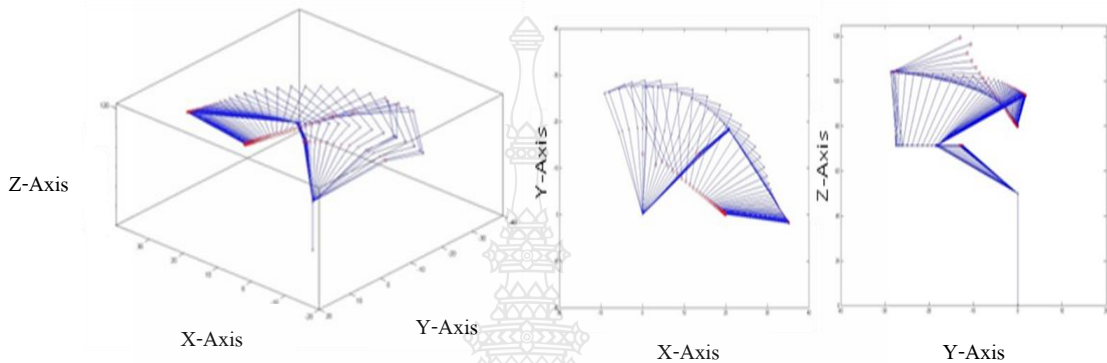
โดยอาศัยหลักการ Homogeneous Transformation Matrix จะได้สมการจลศาสตร์ไปข้างหน้า (Forward Kinematic) ของปลายแขนกล 6 แกน ซึ่งตำแหน่งของปลายแขนกลจะเป็นฟังก์ชันที่แสดงโดยเมตริกซ์ดังนี้

$$A_6^0 = A_1^0 A_2^1 A_3^2 A_4^3 A_5^4 A_6^5 \quad (3.2)$$

หรือ

$$A_6^0 = \begin{bmatrix} \cos q_1 & 0 & \sin q_1 & 0 \\ \sin q_1 & 0 & -\cos q_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 50 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \cos q_2 & -\sin q_2 & 0 & 21.5 \\ \sin q_2 & \cos q_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 18.5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \cos q_3 & 0 & \sin q_3 & 0 \\ \sin q_3 & 0 & -\cos q_3 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 9 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \cos q_4 & 0 & \sin q_4 & 0 \\ \sin q_4 & 0 & -\cos q_4 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 33.5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \cos q_5 & 0 & \sin q_5 & 0 \\ \sin q_5 & 0 & -\cos q_5 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \cos q_6 & -\sin q_6 & 0 & 0 \\ \sin q_6 & \cos q_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 20.5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

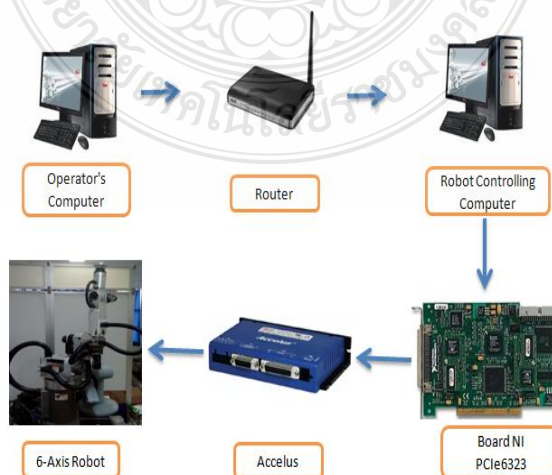
จากนั้นจึงนำข้อมูลที่ได้นำไปใช้สร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วย MATLAB โดยใช้สมการจลศาสตร์ไปข้างหน้า (Forward Kinematics) และสมการจลศาสตร์แบบผกผัน (Inverse Kinematics) ของแขนกลแบบ 6 แกนตามสมการและขั้นตอนที่แสดงไว้ในบทที่ 2 เพื่อคำนวณหาองศาการหมุนของแต่ละข้อต่อรวมถึงตำแหน่งของปลายแขนกลโดยใช้ซอฟต์แวร์ MATLAB เข้ามาช่วยในคำนวณทางคณิตศาสตร์ เพื่อช่วยให้ผลการคำนวณทางคณิตศาสตร์มีความรวดเร็ว และแม่นยำมากยิ่งขึ้น



รูปที่ 3.3 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแขนกลด้วย MATLAB

3.3 การส่งข้อมูลผ่านระบบเน็ตเวิร์ค

การควบคุมตำแหน่งของแขนกล 6 แกนผ่านระบบเน็ตเวิร์คนี้ได้นำซอฟต์แวร์ Visual Studio.Net มาประยุกต์ใช้ในการส่งพิกัดการเคลื่อนที่เพื่อใช้ในการควบคุมตำแหน่งของแขนกลผ่านทางระบบคอมพิวเตอร์เน็ตเวิร์คซึ่งมี Router เป็นตัวกลางในการเชื่อมต่อข้อมูลสัญญาณการควบคุม โดยการสร้างระบบเน็ตเวิร์คขึ้นมาเพื่อใช้ในการเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์เข้าด้วยกัน ซึ่งประกอบไปด้วยคอมพิวเตอร์ของผู้ควบคุม และคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการประมวลผลและควบคุมการทำงานของแขนกล และส่งสัญญาณการควบคุมแขนกลไปที่อุปกรณ์ฮาร์ดแวร์



รูปที่ 3.4 การส่งถ่ายข้อมูลผ่านเน็ตเวิร์คเพื่อควบคุมแขนกล

จากการออกแบบการเชื่อมต่อและส่งถ่ายข้อมูลผ่านระบบคอมพิวเตอร์เน็ตเวิร์กนี้ ผู้ทดลองได้ทำการออกแบบให้ คอมพิวเตอร์ควบคุมแขนกล (Robot Controlling Computer) ทำหน้าที่ในการประมวลผลทางคณิตศาสตร์ และส่งสัญญาณควบคุมไปที่แขนกล ทำหน้าที่เป็นคอมพิวเตอร์หลักของระบบ โดยทำหน้าที่เป็นเซิร์ฟเวอร์ (Server) ของระบบคอมพิวเตอร์เน็ตเวิร์กนี้ ซึ่งจะรับค่าตำแหน่งปลายแขนกล ที่ถูกส่งมาจากคอมพิวเตอร์ของผู้ควบคุม (Operator's Computer) โดยที่คอมพิวเตอร์ของผู้ควบคุมจะทำหน้าที่เป็นไคลเอนต์ (Client) ของระบบเน็ตเวิร์กนี้

3.3.1 ราวเตอร์ (Router) ที่ใช้ในการเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์ผ่านเน็ตเวิร์ก

เราเตอร์(Router) เป็นอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ที่ทำหน้าที่จ่าย IP Address ให้กับคอมพิวเตอร์ในเครือข่ายเพื่อใช้ในการติดต่อสื่อสารข้อมูลระหว่างคอมพิวเตอร์ในเครือข่าย และค้นหาเส้นทางการส่งข้อมูลระหว่างเครือข่ายคอมพิวเตอร์ไปยังคอมพิวเตอร์ปลายทางที่ต้องการ โดยการทดลองเพื่อเชื่อมต่อข้อมูลผ่านระบบเน็ตเวิร์กนี้จะใช้อุปกรณ์เราเตอร์ยี่ห้อ D-Link/ DIR-612 เป็นตัวกลางในการเชื่อมต่อระบบคอมพิวเตอร์ทั้งสองเครื่องเข้าด้วยกัน



รูปที่ 3.5 อุปกรณ์เราเตอร์ที่ใช้ในการเชื่อมต่อระบบเน็ตเวิร์ก D-Link/DIR-612 [10]

ตารางที่ 3.4 คุณสมบัติของเราเตอร์ (D-Link/DIR-612)

Device Interfaces	<ul style="list-style-type: none"> - 4 LAN Port - Wireless N 300 - Two 5 dBi external antenna
Minimum System Requirements	<ul style="list-style-type: none"> - Windows 8/7/Vista/XP SP3, or Mac OS X 10.4 or higher - Microsoft Internet Explorer 7, Firefox 12.0, Chrome 20.0, Safari 4.0 - Cable or DSL modem - Network interface card

Security	- WPA & WPA2 (Wi-Fi Protected Access) - Wi-Fi Protected Setup (WPS) - PIN
Power	- Input: 100 to 240 V AC, 50/60 Hz - Consumption: 12 V 0.5 A
Temperature	- Operating: 0 to 40 °C
Humidity	- Operating: 10% to 90% non-condensing

3.3.2 การเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์กับเราเตอร์ด้วยสัญญาณ Wi-Fi

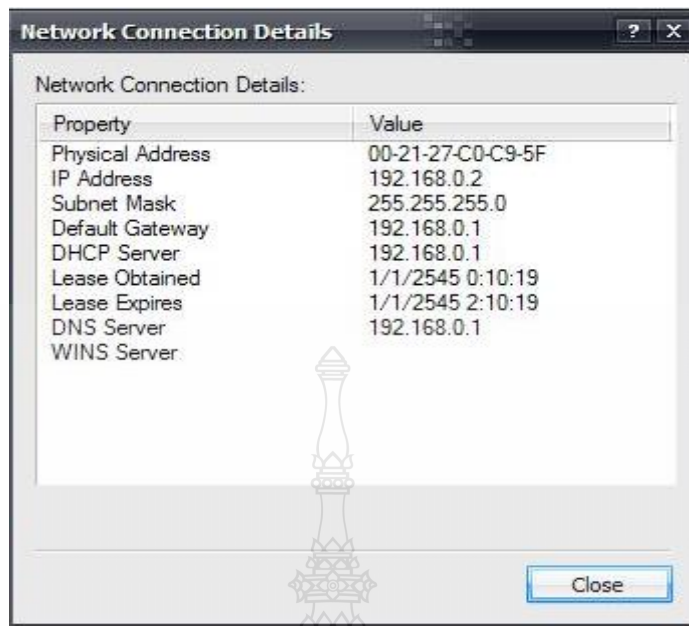
ทำการเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์ของผู้ควบคุม เข้ากับระบบเน็ตเวิร์คด้วยสัญญาณ Wi-Fi โดยใช้อุปกรณ์ TP-LINK/TL-WN321G เป็นอุปกรณ์ในการเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์ของผู้ควบคุมเข้ากับเราเตอร์ D-Link/DIR-612



รูปที่ 3.6 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเชื่อมต่อเน็ตเวิร์คระหว่างคอมพิวเตอร์ของผู้ควบคุมกับเราเตอร์ ด้วยสัญญาณ Wi-Fi [11]

3.3.3 การเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์ของผู้ควบคุมเข้ากับระบบเน็ตเวิร์ค

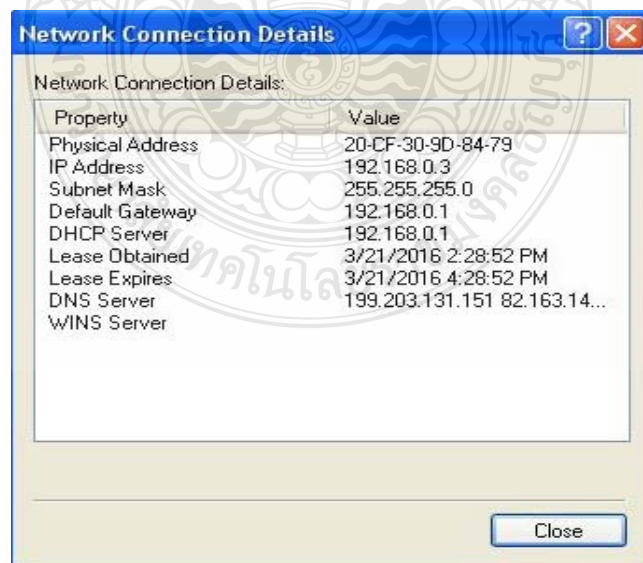
ทำการเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์ผู้ควบคุมเข้ากับระบบเน็ตเวิร์ค โดยระบบเน็ตเวิร์คนี้จะมี Default Gateway เป็น 192.168.0.1 มี IP Address สำหรับคอมพิวเตอร์ของผู้ควบคุมเป็น 192.168.0.2 และมี Physical Address เป็น 00-21-27-C0-C9-5F



รูปที่ 3.7 รายละเอียดการเชื่อมต่อเน็ตเวิร์คของคอมพิวเตอร์ของผู้ควบคุม

3.3.4 การเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์ควบคุมแขนกลเข้ากับระบบเน็ตเวิร์ค

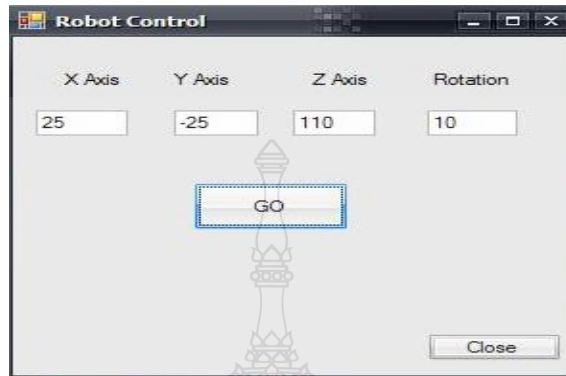
ทำการเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์ควบคุมแขนกล เข้ากับระบบเน็ตเวิร์คผ่านทางสาย LAN โดยที่ระบบคอมพิวเตอร์เน็ตเวิร์คนี้จะมี Default Gateway เป็น 192.168.0.1 มี IP Address สำหรับคอมพิวเตอร์ควบคุมแขนกลเป็น 192.168.0.3 และมี Physical Address เป็น 20-CF-30-9D-84-79



รูปที่ 3.8 รายละเอียดการเชื่อมต่อเน็ตเวิร์คของคอมพิวเตอร์ควบคุมแขนกล

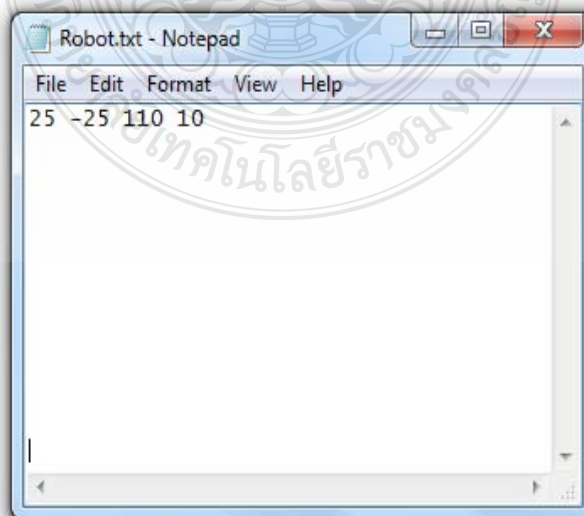
3.3.5 การใช้ส่งข้อมูลผ่านระบบเน็ตเวิร์คด้วย Visual Studio.Net

ซึ่งกระบวนการควบคุมผ่านระบบคอมพิวเตอร์เน็ตเวิร์คนี้ ได้อาศัยการทำงานร่วมกันระหว่างซอฟต์แวร์ Visual Studio.Net ที่ติดตั้งบนคอมพิวเตอร์ของผู้ควบคุม และซอฟต์แวร์ MATLAB ที่ติดตั้งบนคอมพิวเตอร์ควบคุมแขนกล



รูปที่ 3.9 โปรแกรมส่งพิกัดตำแหน่งของปลายแขนกลผ่านระบบเน็ตเวิร์ค

ซึ่งซอฟต์แวร์นี้ถูกพัฒนาขึ้นด้วย Visual Studio.Net ที่ติดตั้งบนคอมพิวเตอร์ของผู้ควบคุมนี้จะทำงานร่วมกันกับซอฟต์แวร์ MATLAB ที่ติดตั้งบนคอมพิวเตอร์ควบคุมแขนกล โดยอาศัยการส่งพิกัดตำแหน่งของปลายแขนกลผ่านระบบคอมพิวเตอร์เน็ตเวิร์ค จากคอมพิวเตอร์ของผู้ควบคุมไปยังคอมพิวเตอร์ควบคุมแขนกลในรูปแบบของไฟล์ตัวอักษร (Text File) โดยไฟล์ที่ใช้ส่งข้อมูลคือ Robot.txt ซึ่งจะมีข้อมูลพิกัดของปลายแขนกลอยู่ภายใน และซอฟต์แวร์ MATLAB จะทำการประมวลผลทางคณิตศาสตร์ด้วยจลศาสตร์แบบไปข้างหน้า (Forward Kinematic) และจลศาสตร์แบบผกผัน (Inverse Kinematic) โดยการอ่านค่าพิกัดตำแหน่งของปลายแขนกลที่ถูกส่งมาในไฟล์ Robot.txt ที่ใช้ในการส่งข้อมูลผ่านทางคอมพิวเตอร์เน็ตเวิร์ค



รูปที่ 3.10 ตัวอย่างของ Text File ที่บรรจุข้อมูลพิกัดของปลายแขนกล

3.4 การควบคุมองศาการหมุนของแขนกล

แขนกลแบบ 6 แกนที่ใช้ในการทดลองนี้ประกอบด้วยเซอร์โวมอเตอร์(Servo Motor) ทั้งหมด 6 ตัวซึ่งจะทำหน้าที่ในการควบคุมองศาการหมุน ของแต่ละแกนหมุนของแขนกลอย่างเป็นอิสระต่อกัน ซึ่งมอเตอร์แต่ละตัวจะมีขนาด รุ่น ยี่ห้อ อัตราเกียร์ทด และคุณสมบัติอื่นๆ ที่แตกต่างกันออกไปในแต่ละแกนหมุนของแขนกล

ตารางที่ 3.5 คุณสมบัติของเซอร์โวมอเตอร์ (Servo Motor) ของแขนกล

แกนที่	Servo Motor		HD Gear		พลั้/รอบ	Count/ รอบ
	ยี่ห้อ	รุ่น	รุ่น	ratio		
1	Yakawa	UGRMEM-04MA	HDUC	1:78	-	-
2	ABBrobotic	PS60/4-71P-LSS	SHF	1:80	1000	4000
3	SGM 20W	none	SHF 20-50	1:50	2500	10000
4	Yakawa	SGM01	HDUC	1:50	2500	10000
5	Yakawa	SGM01	HDUC	1:50	2500	10000
6	SanyoDenki	T402-011	HDUC	1:50	2048	8192

3.4.1 การควบคุมเซอร์โวมอเตอร์ด้วยบอร์ดขับเคลื่อนมอเตอร์ของ Accelus

เซอร์โวมอเตอร์ของแขนกลแต่ละตัวจะถูกควบคุมด้วยชุดขับเคลื่อนมอเตอร์แบบเซอร์โว(Servo Driver) ซึ่งจะต้องมีการป้อนค่าพารามิเตอร์ลงไป ในชุดขับเคลื่อนมอเตอร์แบบเซอร์โว (Servo Driver) แต่ละตัวให้เหมาะสมกับคุณสมบัติของมอเตอร์ที่ต่อ พ่วงกันอยู่กับ Servo Driver นั้นๆ ซึ่งสามารถทำได้โดยการใช้ซอฟต์แวร์ CME2 ในการปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์แบบเซอร์โว(Servo Driver)



รูปที่ 3.11 ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์แบบเซอร์โวของ Accelus รุ่น ASP-180-09 ที่ใช้ในการควบคุมเซอร์โวมอเตอร์(Servo Motor) แกนที่ 4 และ 5 [12]

ตารางที่ 3.6 คุณสมบัติสำคัญของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์แบบเซอร์โว Acelus/ASP-180-09

Peak Current	9 (6.4)	Adc (Arms)
Continuous current	3 (2.1)	Adc (Arms) per phase
Peak Output Power	1.59	kw
Continuous Output Power	0.53	kw
Peak current	10	Adc
Continuous current	3.3	Adc
Current loop	20	kHz (update rate)
Velocity & position loop	4	kHz (update rate)
Analog Input	±10	Vdc



รูปที่ 3.12 ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์แบบเซอร์โวของ Accelus รุ่น ASP-055-18 ที่ใช้ในการควบคุมเซอร์โวมอเตอร์ (Servo Motor) แกนที่ 6 [12]

ตารางที่ 3.7 คุณสมบัติสำคัญของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์แบบเซอร์โว Acelus/ASP-055-18

Peak Output Current	18 (12.73)	Amps DC (Amps ACrms)
Continuous Output current	6 (4.24)	Adc (Arms) per phase
HVmin~HVmax	20	Vdc
	~55	Transformerisolated
Peak Input Current	20	Adc
Continuous Input Current	6.7	Adc
Current loop update rate	20	kHz

3.4.2 การส่งสัญญาณจากคอมพิวเตอร์เพื่อควบคุมแขนกลด้วยการรับ-ส่งข้อมูล(DAQ) ของ NI รุ่น PCIe-6323

เนื่องจากชุดขับเคลื่อนมอเตอร์แบบเซอร์โว (Servo Driver) ของมอเตอร์แต่ละแกน นั้น จะต้องรับค่าสัญญาณจากตัวควบคุมภายนอกเพื่อนำมาประมวลผล และส่งสัญญาณ Output ไปควบคุมเซอร์โวมอเตอร์ ที่เชื่อมต่ออยู่ในแต่ละแกนของแขนกล และการทดลองนี้ได้เลือกใช้การรับ-ส่งข้อมูล(DAQ) ของ NI รุ่น PCIe-6323เพื่อใช้ในการส่งสัญญาณควบคุมไปที่ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์แบบเซอร์โว (Servo Driver) ซึ่งการส่งสัญญาณของการรับ-ส่งข้อมูล (DAQ) ของ NI รุ่น PCIe-6323 นี้สามารถส่งสัญญาณได้ทั้งสัญญาณควบคุมแบบ Analog (± 10 VDC) และสัญญาณควบคุมแบบ Digital ($0,5$ VDC) และสัญญาณนี้จะถูกส่งไปยังชุดขับเคลื่อนมอเตอร์แบบเซอร์โว(Servo Driver) เพื่อควบคุมองศาการหมุนของมอเตอร์ในแต่ละแกนให้เป็นไปตามผลที่ได้จากการคำนวณทางคณิตศาสตร์โดยซอฟต์แวร์ MATLAB บนคอมพิวเตอร์ควบคุมแขนกล



รูปที่ 3.13 การรับ-ส่งข้อมูล(DAQ) ของ NI รุ่น PCIe-6323 [15]

ตารางที่ 3.8 คุณสมบัติสำคัญของการรับ-ส่งข้อมูล(DAQ) ของ NI รุ่น PCIe-6323

<u>Digital Input</u>		
Voltage Range	0-5	VDC
<u>Digital Output</u>		
Voltage Range	0-5	VDC
Current Drive Single	24	mA
Current Drive All	1	A

<u>Analog Input</u>		
Single-Ended Channels	32	Channels
Range	-10 to 10VDC	
Accuracy	2.2	mV
<u>Analog Output</u>		
Number of Channels	4	Channels
Range	-10 to 10	VDC
Accuracy	3.27	mV
Update Rate	900	kS / s
Current Drive Single	5	mA

3.4.3 การเชื่อมต่อสัญญาณระหว่างการ์ดรับ-ส่งข้อมูล(DAQ) ของ NI รุ่น PCIe-6323 และ ชุดขับเคลื่อนมอเตอร์แบบเซอร์โวของ Accellus

กระบวนการในการควบคุมการทำงานของมอเตอร์ ของแต่ละแกนหมุนนี้จะต้องอาศัยการทำงานร่วมกันระหว่างการ์ดรับ-ส่งข้อมูล(DAQ) ของ NI รุ่น PCIe-6323 และชุดขับเคลื่อนมอเตอร์แบบเซอร์โวของ Accellus โดยการส่งสัญญาณควบคุมทั้งแบบดิจิทัล(Digital) และอะนาล็อก (Analog) การ์ดรับ-ส่งข้อมูล(DAQ) ของ NI รุ่น PCIe-6323 ไปยังชุดขับเคลื่อนมอเตอร์แบบเซอร์โวของ Accellus เพื่อควบคุมองศาการหมุนของมอเตอร์ในแต่ละแกนหมุน โดยที่ซอฟต์แวร์ MATLAB จะเป็นตัวประมวลผลสมการจลศาสตร์แบบพหุคูณเชิงตัวเลขร่วมกับการควบคุมแบบพีไอดี(PID) และส่งสัญญาณควบคุมไปยังการ์ดรับ-ส่งข้อมูล(DAQ) ของ NI ให้สอดคล้องกับผลที่ได้จากการคำนวณทางคณิตศาสตร์ด้วยซอฟต์แวร์ MATLAB

ตารางที่ 3.9 การเชื่อมต่อสัญญาณระหว่างการ์ดรับ-ส่งข้อมูล (DAQ) ของ NI และชุดขับเคลื่อนมอเตอร์แบบเซอร์โวของ Accellus

ช่องสัญญาณของ Accellus		ช่องสัญญาณของ DAQ NI PCIe6323			
	Description	Port No.	Description	Port No.	
Motor 4	Enable	[IN2] Enable input	17	P0.8	52
	Command	Signal Ground	22	D GND	12
		+/-10V Ref input	25	AO GND	55

	Command	+/-10V Ref input	26	AO2	22
Motor4	Encoder	Encoder A	11	PFI5/P1.5	6
		Encoder B	9	PFI7/P1.7	38
Motor 5	Enable	[IN2] Enable input	17	PFI1/P1.1	10
		Signal Ground	22	D GND	18
	Command	+/-10V Ref input	25	AO 1	21
		+/-10V Ref input	26	AO GND	54
	Encoder	Encoder A	11	PFI3/P1.3	42
		Encoder B	9	PFI11/P2.3	46
Motor 6	Enable	[IN2] Enable input	17	PFI6/P1.6	5
		Signal Ground	22	D GND	53
	Command	+/-10V Ref input	25	AO 0	22
		+/-10V Ref input	26	AO GND	55
	Encoder	Encoder A	11	PFI8/P2.0	37
		Encoder B	9	PFI10/P2.2	45



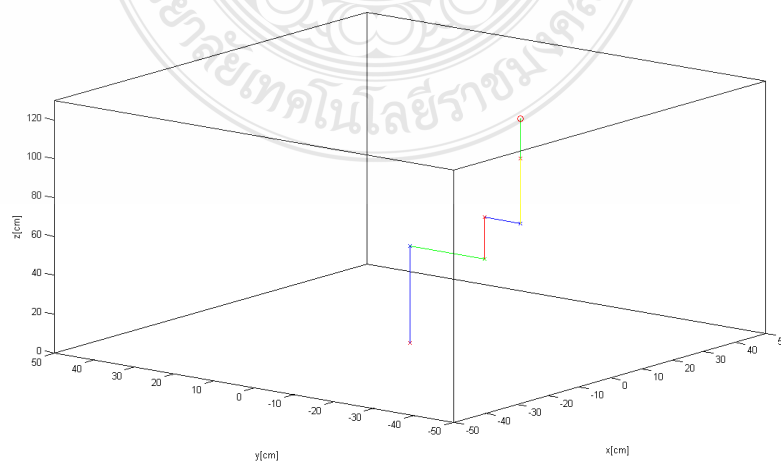
บทที่ 4

ผลการทดลอง

เมื่อได้ทำการทดลองสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแขนกลแบบ 6 แกนและทดสอบเพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกลผ่านระบบคอมพิวเตอร์เน็ตเวิร์ค โดยในบทนี้จะได้อธิบายถึงผลที่ได้จากการทดลองสำหรับงานวิจัยนี้ ซึ่งจะแบ่งผลของการวิจัยออกเป็น 6 ส่วนคือ 1) การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแขนกล 6 แกนด้วยซอฟต์แวร์ MATLAB 2) การหาของเขตและพื้นที่การทำงานของแขนกล 3) การควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกลด้วยสมการจลนศาสตร์แบบผกผันเชิงตัวเลขที่ใช้ร่วมกับตัวควบคุมแบบ PID 4) การควบคุมการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลตามจุดพิกัดหรือเส้นทางการเคลื่อนที่ๆ กำหนด 5) การทดสอบส่งสัญญาณควบคุมแขนกลผ่านระบบคอมพิวเตอร์เน็ตเวิร์ค 6) องศาการเคลื่อนที่ของแขนกลเมื่อเทียบกับสัญญาณควบคุมแบบอะนาล็อก (Analog) ซึ่งจะแสดงรายละเอียดของผลที่ได้จากการทำวิจัยไว้ในบทนี้

4.1 การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแขนกลแบบ 6 แกน

ในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแขนกลแบบ 6 แกนนี้ใช้หลักการคำนวณสมการจลนศาสตร์ไปข้างหน้าร่วมกับการแปลงระบบพิกัด เพื่อนำมาช่วยในการวิเคราะห์ขอบเขตพื้นที่การทำงานของแขนกล และใช้ในการควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่ของแขนกล โดยมีซอฟต์แวร์ MATLAB ที่ติดตั้งบนคอมพิวเตอร์ควบคุมแขนกล เป็นตัวช่วยในการคำนวณหามุมมององศาการหมุนของมอเตอร์ในแกนต่างๆ สำหรับซอฟต์แวร์ MATLAB ที่ผู้วิจัยเป็นผู้พัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกลแบบ 6 แกนจะมีการแสดงการเคลื่อนที่ของแต่ละแกนดังในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 การแสดงการเคลื่อนที่ของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแขนกล 6 แกนที่ใช้ในการวิจัย

โดยที่สภาวะเริ่มต้นในการเตรียมความพร้อมการทำงานของแขนกลในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นจะแสดงในรูปที่ 4.1 โดยมีค่า $(\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5, \theta_6) = (0, \pi/2, \pi/2, \pi/2, 0, 0)$ ตามลำดับ

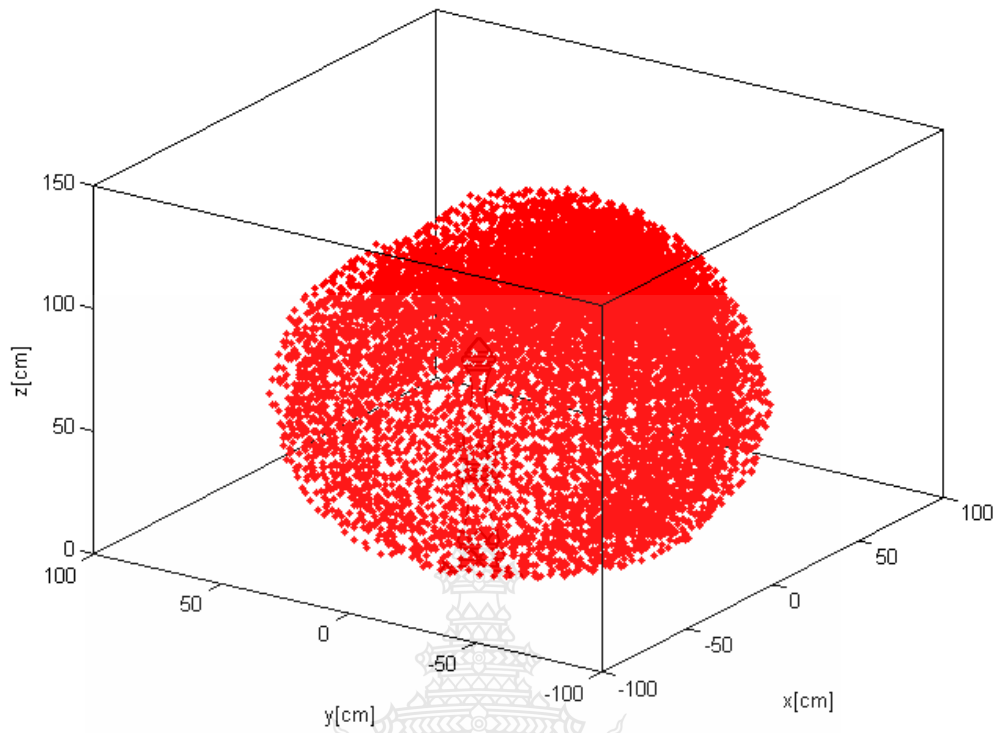
4.2 การหาขอบเขตและพื้นที่การทำงานของแขนกล

เนื่องจากแขนกลเป็นหุ่นยนต์ชนิดที่ติดตั้งอยู่กับที่ (fixed robot) ฉะนั้นจึงมีขอบเขตของการเคลื่อนที่ของแขนกลอย่างมีขีดจำกัด เพราะหากแขนกลพยายามเคลื่อนที่ไปในจุดที่ไม่สามารถเคลื่อนที่ไปได้จะส่งผลให้การคำนวณทางคณิตศาสตร์ของแขนกลเกิดภาวะเอกฐาน (Singularity) ขึ้นได้จึงจำเป็นที่จะต้องป้องกันการเกิดภาวะเอกฐาน โดยการกำหนดขอบเขตของการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลเอาไว้ โดยในแต่ละข้อต่อแขนกล จะต้องมีการกำหนดขอบเขตองศาการหมุนไว้เพื่อป้องกันไม่ให้อุปกรณ์เกิดการชำรุดเสียหายจากการปรับองศาการหมุนของมอเตอร์ จนเกินขีดจำกัดของโครงสร้างแขนกลที่ถูกออกแบบไว้

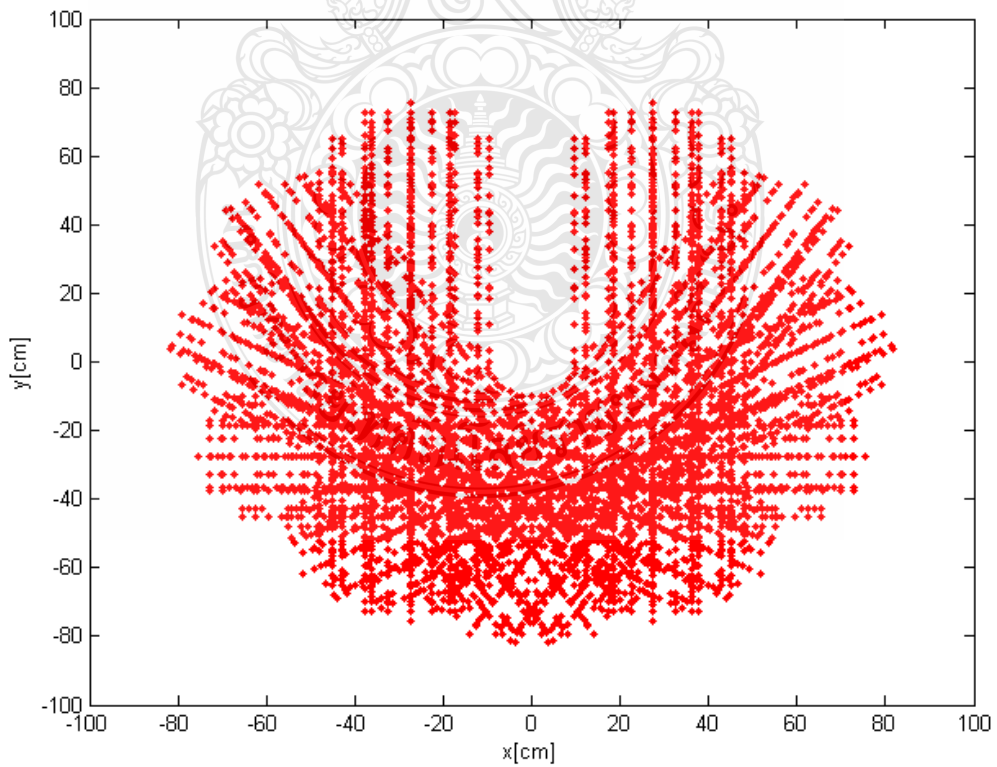
ตารางที่ 4.1 ขอบเขตการหมุนสำหรับแต่ละข้อต่อของแขนกลแบบ 6 แกน

องศาการหมุนของ	ระยะองศาการหมุนมากที่สุดด้าน	
	ลบ(องศา)	บวก(องศา)
Motor 1	-90	90
Motor 2	0	180
Motor 3	0	180
Motor 4	0	180
Motor 5	-90	90
Motor 6	-180	180

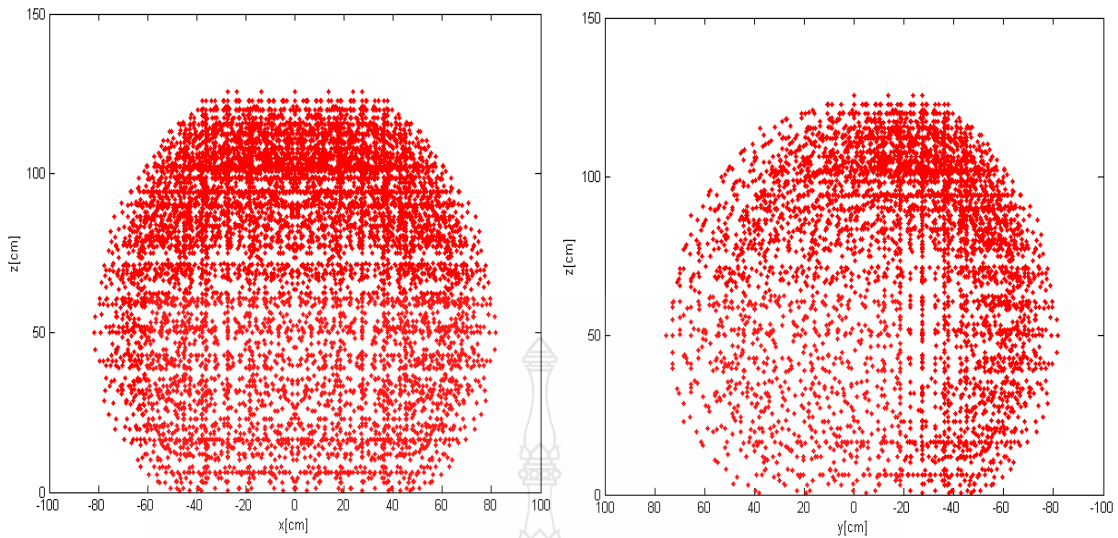
นำขอบเขตการหมุนสำหรับแขนกลไปใช้ในทดลองโดยใช้ซอฟต์แวร์ MATLAB ในการคำนวณหาพื้นที่การใช้งานของแขนกล (Work Space) ซึ่งข้อมูลที่ได้จากผลการคำนวณทางคณิตศาสตร์แสดงไว้ในรูปที่ 4.2, 4.3, 4.4 และ ตารางที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ผลการจำลองขอบเขตการเคลื่อนที่ของแกนกลในระบบพิกัด (X, Y, Z) ใน 3 มิติ



รูปที่ 4.3 ผลการจำลองขอบเขตการเคลื่อนที่ของแกนกลบนระนาบ (X, Y) จากมุมมองด้านบน



รูปที่ 4.4 ผลการจำลองขอบเขตการเคลื่อนที่ของแขนกลบนระนาบ (X, Z) (ซ้าย) จากมุมมองด้านหน้า และ(Y, Z) (ขวา) จากมุมมองด้านข้าง

จากผลการคำนวณหาขอบเขตการเคลื่อนที่ของแขนกลด้วยจำลองโครงสร้างทางคณิตศาสตร์ของแขนกล พบว่าแขนกลมีระยะเคลื่อนที่สูงสุดทั้งด้านลบและด้านบวกบนพิกัด (X, Y, Z) ตามที่แสดงไว้ในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ขอบเขตการเคลื่อนที่ของปลายแขนกล

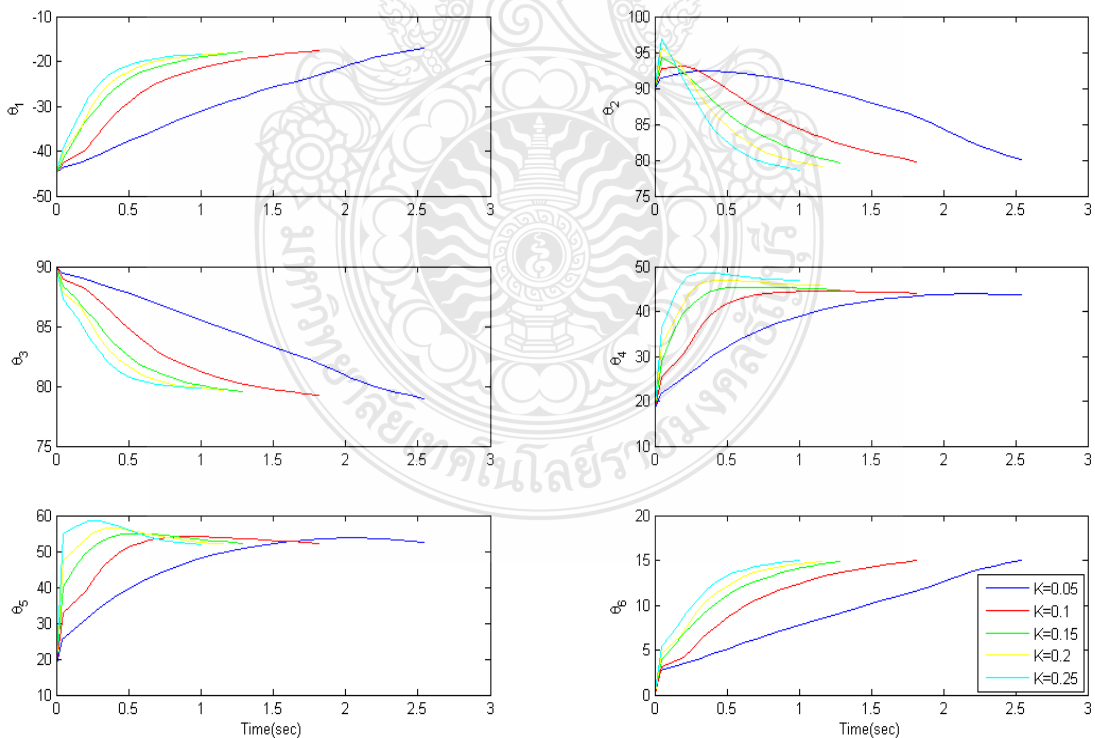
แกน	ระยะเคลื่อนที่	ระยะเคลื่อนที่
	สูงสุดด้านลบ(cm)	สูงสุดด้านบวก(cm)
X	-81.9	81.9
Y	-81.9	75.5
Z	-4	125.5

4.3 การควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกลด้วยสมการจลนศาสตร์แบบพหุผันเชิงตัวเลขที่ใช้ร่วมกับตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID)

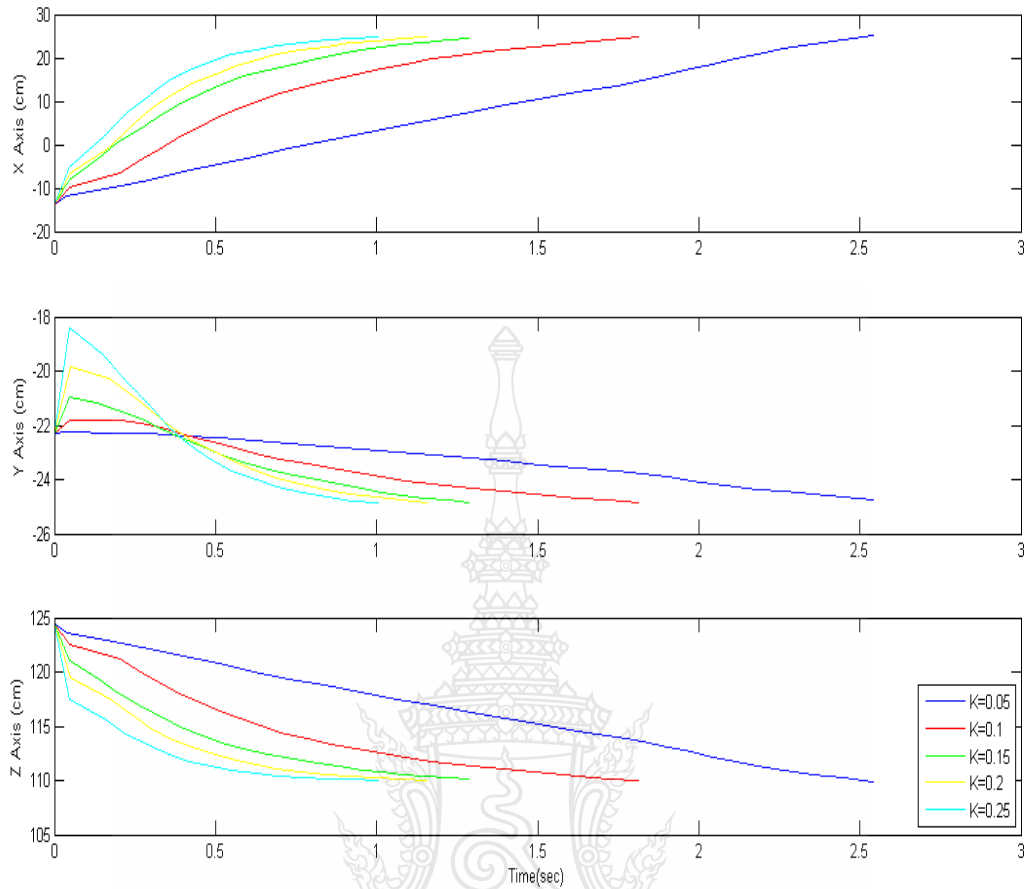
ในส่วนนี้ได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของแขนกลโดยใช้สมการจลนศาสตร์แบบพหุผันเชิงตัวเลขที่ใช้ร่วมกับตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID) ซึ่งจะทำการทดลองผลตอบสนองต่อการเคลื่อนที่ของแขนกลเมื่อทำการปรับค่าอัตราขยาย K_p , K_d และ K_i เพื่อศึกษาผลที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของแขนกล โดยจะแบ่งผลการทดลองออกเป็น 3 ส่วนดังนี้

4.3.1 ศึกษาผลกระทบในการเคลื่อนที่ซึ่งเกิดจากการปรับค่าอัตราขยายสัดส่วน (K_p) ในตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID)

ทำการศึกษาการเคลื่อนที่ของแขนกลจากจุด A = (-13.8, -22.3, 124.5) ไปยังจุด B = (25, -25, 110) โดยการปรับค่าตัวแปรควบคุม K_p เป็น 0.05, 0.1, 0.15, 0.2 และ 0.25 ตามลำดับ โดยกำหนดให้ค่า $K_d = 0.005$ และ $K_i = 0.02$ ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการเคลื่อนที่ตามกราฟในรูปที่ 4.5 และ 4.6 และจากการวิเคราะห์ผลการเคลื่อนที่ขององศาการหมุนในแต่ละแกนพบว่าเมื่อค่า K_p มีค่าน้อยๆ จะส่งผลให้แขนกลต้องใช้เวลามากขึ้นในการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลในการเข้าหาตำแหน่งเป้าหมาย แต่ถ้าหากให้ค่า K_p มีค่ามากเกินไปจะทำให้เกิดการเคลื่อนที่แบบจับปล้นหรือเกิดการกระชากในการเคลื่อนที่ของแขนกล แต่ก็จะทำให้แขนกลสามารถเคลื่อนที่เข้าหาตำแหน่งเป้าหมายได้เร็วมากขึ้น ซึ่งจากการทดลองพบว่าค่า K_p ที่เหมาะสมกับการควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกลควรมีค่า K_p อยู่ระหว่าง 0.1 ถึง 0.15 ซึ่งจะทำให้แขนกลเคลื่อนที่เข้าหาตำแหน่งเป้าหมายได้เร็วและไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งอย่างจับปล้น หรือเกิดการกระชาก แต่สำหรับงานที่ต้องการความละเอียดอ่อน ควรใช้ค่า K_p เป็น 0.05 จะทำให้แขนกลมีความต่อเนื่องในการเข้าหาเป้าหมาย แต่จะทำให้ต้องใช้เวลาในการเคลื่อนที่เพิ่มมากขึ้น



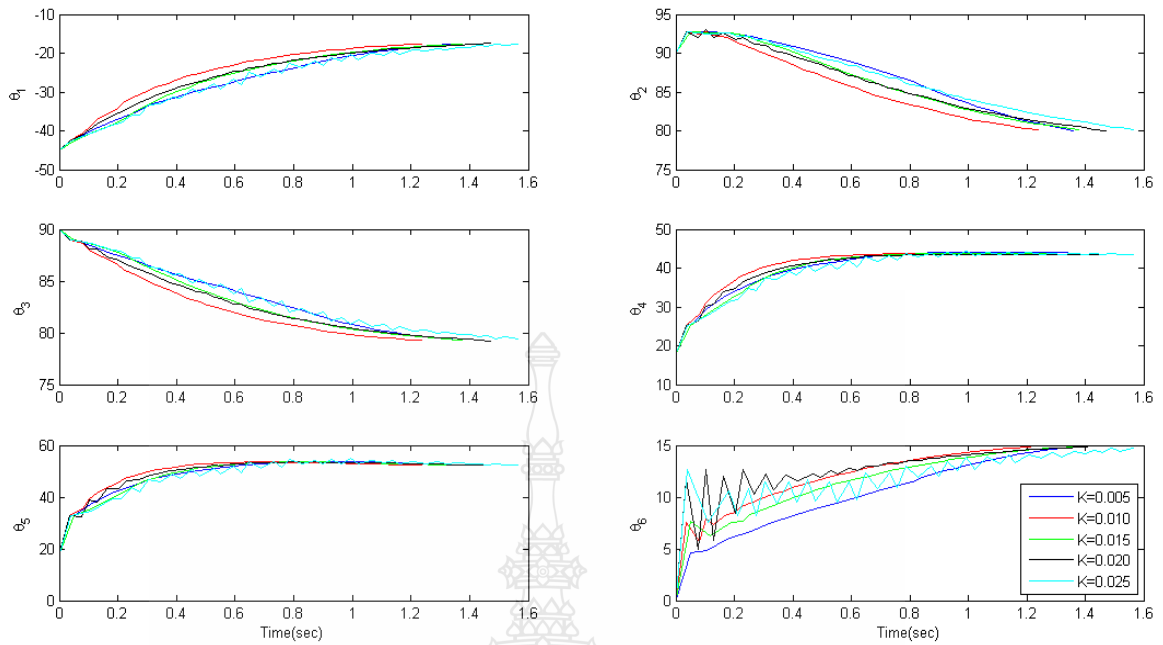
รูปที่ 4.5 กราฟเปรียบเทียบองศาการเคลื่อนที่ของแขนกลจากจุดเริ่มต้นไปถึงจุดสิ้นสุด เมื่อมีการปรับค่าอัตราขยายแบบสัดส่วน K_p เป็น 0.05, 0.1, 0.15, 0.2 และ 0.25 ตามลำดับ



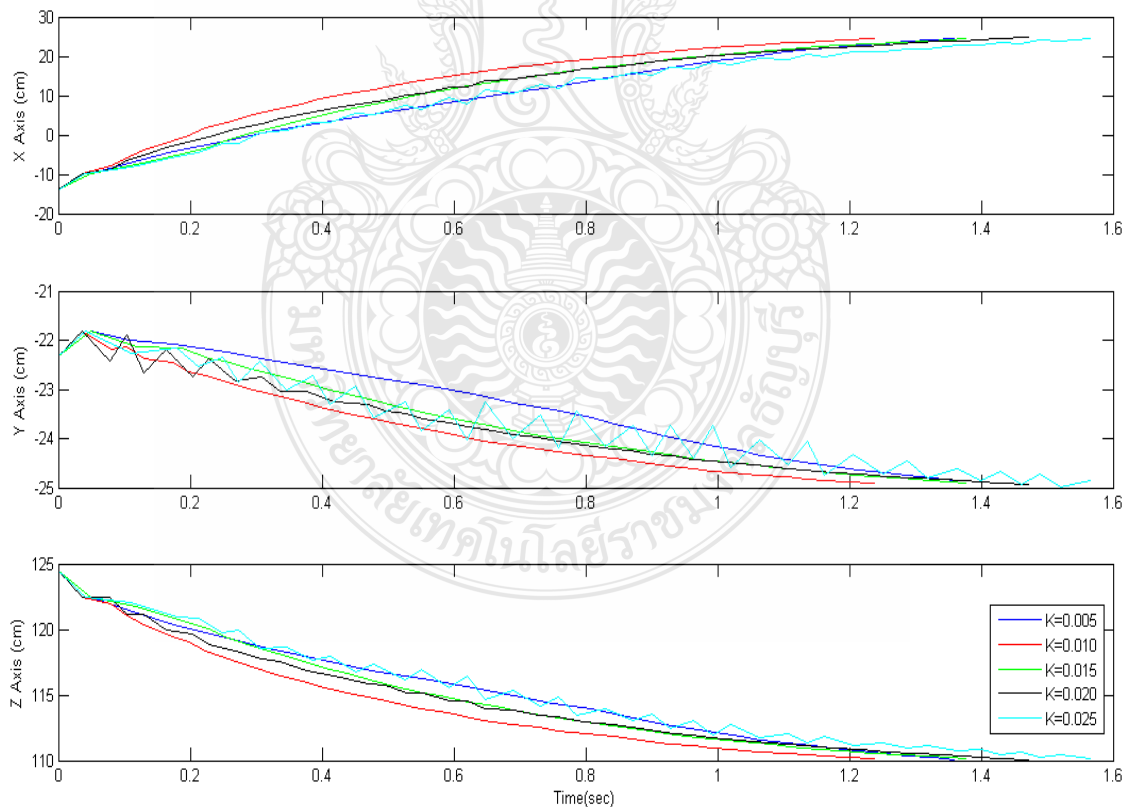
รูปที่ 4.6 กราฟเปรียบเทียบตำแหน่งการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลจากจุดเริ่มต้น ไปถึงจุดสิ้นสุด เมื่อมีการปรับค่า อัตราขยายแบบสัดส่วน K_p เป็น 0.05, 0.1, 0.15, 0.2 และ 0.25 ตามลำดับ

4.3.2 ศึกษาผลกระทบการเคลื่อนที่ซึ่งเกิดจากการปรับค่าอัตราขยายอนุพันธ์ (K_d) ในตัวควบคุมแบบพีไอดี(PID)

ทำการศึกษาการเคลื่อนที่ของแขนกลจากจุด A = (-13.8, -22.3, 124.5) ไปยังจุด B = (25, -25, 110) โดยการปรับค่าตัวแปรควบคุม K_d เป็น 0.005, 0.01, 0.015, 0.02 และ 0.025 ตามลำดับ โดยกำหนดให้ค่า $K_p = 0.1$ และ $K_i = 0.02$ ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการเคลื่อนที่ตามกราฟในรูปที่ 4.7 และ 4.8 จากการวิเคราะห์ผลการเคลื่อนที่ขององศาการหมุนในแต่ละแกนพบว่าเมื่อค่า K_d มีค่าเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้แขนกลเข้าหาตำแหน่งเป้าหมายได้เร็วขึ้นเพียงเล็กน้อย แต่จะทำให้เกิดการสั่นเพิ่มมากขึ้นในช่วงเริ่มต้นในการเคลื่อนที่ไปหาตำแหน่งเป้าหมาย ดังนั้นสำหรับแขนกลนี้ควรมีค่า K_d อยู่ระหว่าง 0.005 หรือ 0.010 ซึ่งจะทำให้แขนกลเคลื่อนที่เข้าหาตำแหน่งเป้าหมายโดยไม่เกิดการสั่นที่มากเกินไป โดยการสั่นนี้เกิดจากอนุพันธ์เชิงตัวเลขของค่าความผิดพลาด



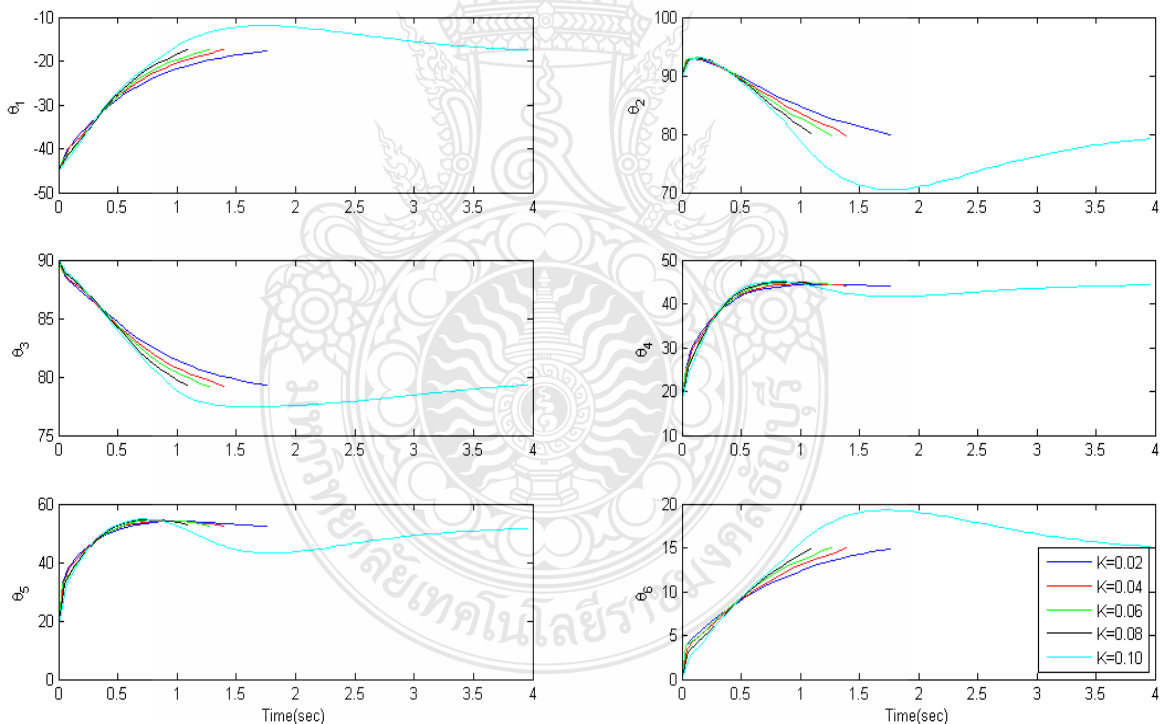
รูปที่ 4.7 กราฟเปรียบเทียบของผลการเคลื่อนที่ของแขนกลจากจุดเริ่มต้นไปถึงจุดสิ้นสุด เมื่อมีการปรับค่าอัตราขยายแบบอนุพันธ์ (K_d) เป็น 0.005, 0.01, 0.015, 0.02 และ 0.025 ตามลำดับ



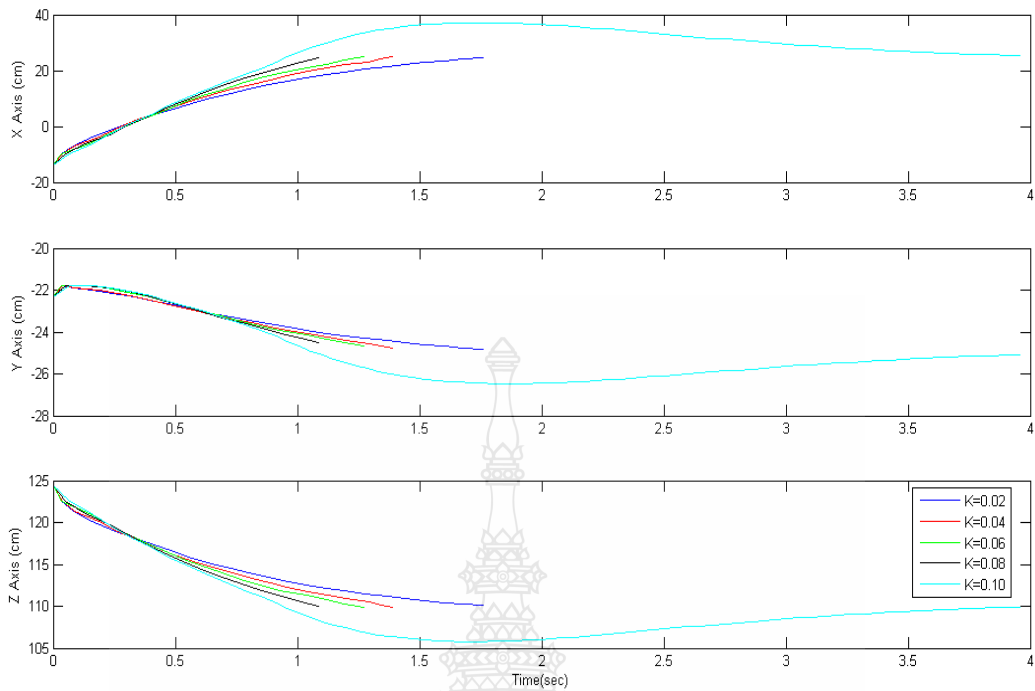
รูปที่ 4.8 กราฟเปรียบเทียบตำแหน่งการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลจากจุดเริ่มต้นไปถึงจุดสิ้นสุด เมื่อมีการปรับค่าอัตราขยายแบบอนุพันธ์ (K_d) เป็น 0.005, 0.01, 0.015, 0.02 และ 0.025 ตามลำดับ

4.3.3 ศึกษาผลกระทบในการเคลื่อนที่ซึ่งเกิดจากการปรับอัตราขยายปริพันธ์ (K_i) ในตัวควบคุมแบบพีไอดี (PID)

ทำการศึกษาการเคลื่อนที่ของแขนกลจากจุด A = (-13.8, -22.3, 124.5) ไปยังจุด B = (25, -25, 110) โดยการปรับค่าตัวแปรควบคุม K_i เป็น 0.02, 0.04, 0.06, 0.08 และ 0.10 ตามลำดับ โดยกำหนดให้ค่า $K_p = 0.1$ และ $K_d = 0.005$ ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการเคลื่อนที่ตามกราฟในรูปที่ 4.9 และ 4.10 จากการวิเคราะห์ผลการเคลื่อนที่ขององศาการหมุนในแต่ละแกนพบว่าเมื่อค่า K_i มีค่ามากขึ้นจะส่งผลให้แขนกลเคลื่อนที่เข้าหาตำแหน่งเป้าหมายได้เร็วมากยิ่งขึ้น แต่ถ้าหากป้อนค่า K_i ให้มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 0.10 จะส่งผลให้แขนกลเกิดความไม่เสถียรขณะเข้าหาตำแหน่งเป้าหมาย จึงทำให้แขนกลเคลื่อนที่เลยเป้าหมายและเคลื่อนที่กลับเข้าหาตำแหน่งเป้าหมายได้ช้ามาก จึงส่งผลให้แขนกลต้องใช้เวลามากในการเข้าหาตำแหน่งเป้าหมาย เมื่อ K_i ให้มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 0.10 ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าค่า K_i ที่เหมาะสมสำหรับแขนกลควรอยู่ระหว่าง $K_i = 0.06$ ถึง 0.08



รูปที่ 4.9 กราฟเปรียบเทียบองศาการเคลื่อนที่ของแขนกลจากจุดเริ่มต้นไปถึงจุดสิ้นสุด เมื่อมีการปรับค่าอัตราขยายแบบปริพันธ์ (K_i) เป็น 0.02, 0.04, 0.06, 0.08 และ 0.1 ตามลำดับ

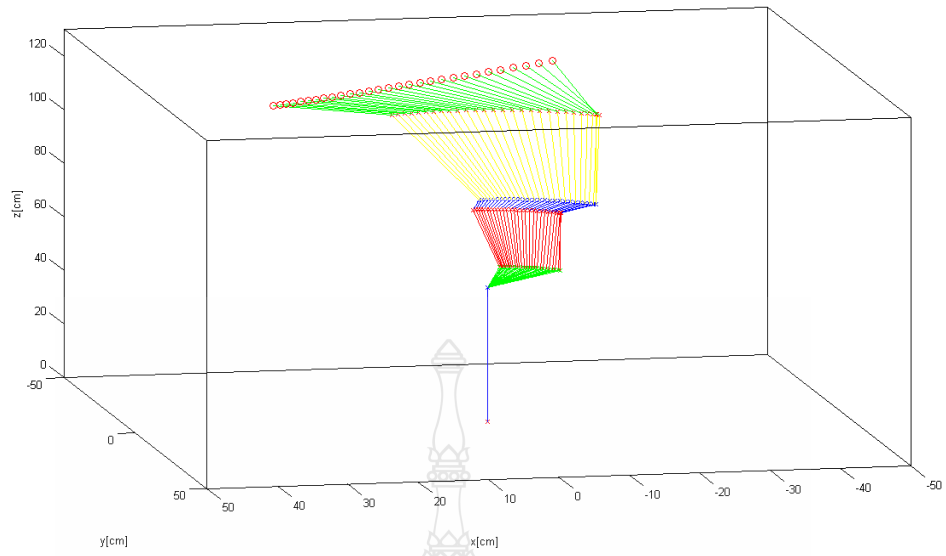


รูปที่ 4.10 กราฟเปรียบเทียบตำแหน่งการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลจากจุดเริ่มต้น ไปถึงจุดสิ้นสุด เมื่อมีการปรับค่าอัตราขยายแบบปริพันธ์ (K_i) เป็น 0.02, 0.04, 0.06, 0.08 และ 0.10 ตามลำดับ

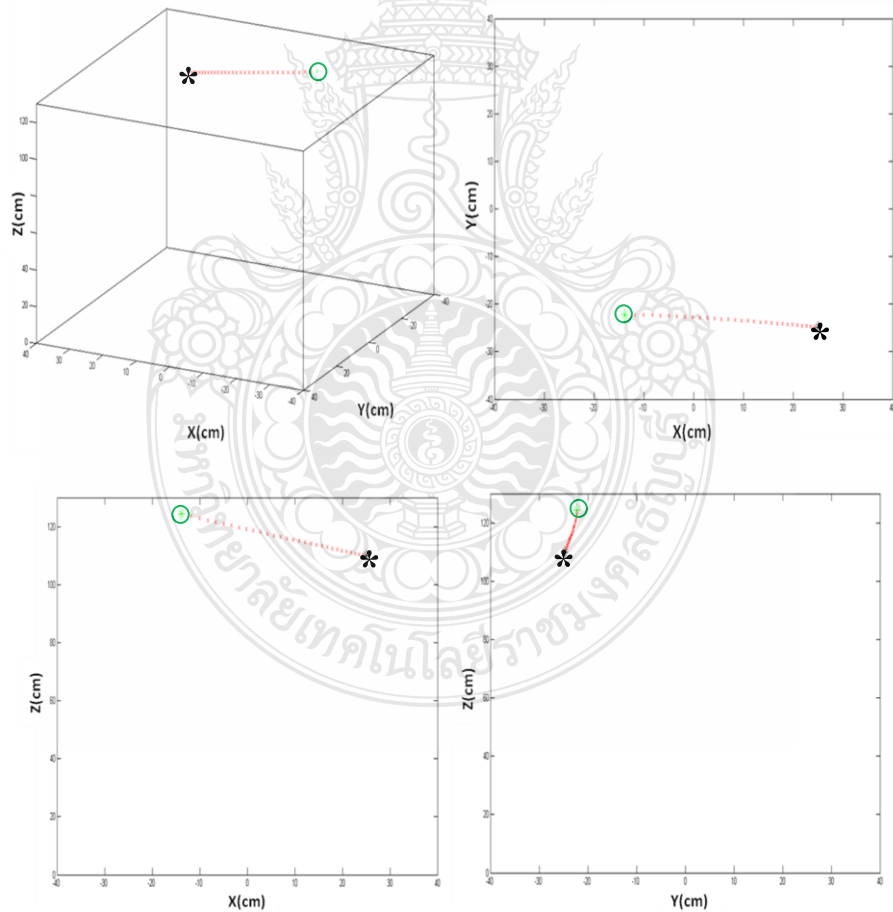
4.4 การควบคุมการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลตามจุดพิกัดหรือเส้นทางการเคลื่อนที่ที่กำหนด

4.4.1 วิธีการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลจากจุดพิกัดเริ่มต้น ไปสู่พิกัดตำแหน่งเป้าหมายที่กำหนด

การคำนวณที่จะทำให้ปลายแขนกลแบบ 6 แกนสามารถเคลื่อนที่จากจุดพิกัดหนึ่งไปยังอีกจุดพิกัดหนึ่งได้อย่างถูกต้องนั้นจะใช้สมการจลศาสตร์แบบผกผัน ที่ใช้ค่าความผิดพลาดของตำแหน่งปลายแขนกลที่ใช้ป้อนกลับด้วยระบบควบคุมแบบพีไอดี (PID) เนื่องจากตำแหน่งของปลายแขนกลที่อยู่บนพิกัด (x, y, z) จะเป็นฟังก์ชันที่ขึ้นอยู่กับตัวแปรทั้งหมด 6 ตัวคือมุมมองของมอเตอร์ทั้ง 6 ตัวที่ติดตั้งอยู่ในแต่ละข้อต่อของแขนกล โดยระบบจะทำการประมวลผลแบบเป็นขั้นตอนทีละน้อย และปลายแขนกลจะเคลื่อนที่เข้าหาตำแหน่งเป้าหมายใกล้ขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งตำแหน่งของปลายแขนกลจะมีค่าความผิดพลาดจากตำแหน่งเป้าหมายไม่เกิน 0.5 เซนติเมตร ทั้งแนวแกน X Y และ Z จึงจะหยุดการเคลื่อนที่ของแขนกล และจากการทดลองโดยให้พิกัดของจุดพิกัดเริ่มต้นของปลายแขนกลอยู่ที่ตำแหน่ง (x, y, z) = (-13.8, -22.3, 124.5) และมีจุดพิกัดตำแหน่งเป้าหมายของการเคลื่อนที่ที่คือจุด (x, y, z) = (25, -25, 110) จะได้ผลของการทดลองจากการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตามรูปที่ 4.11



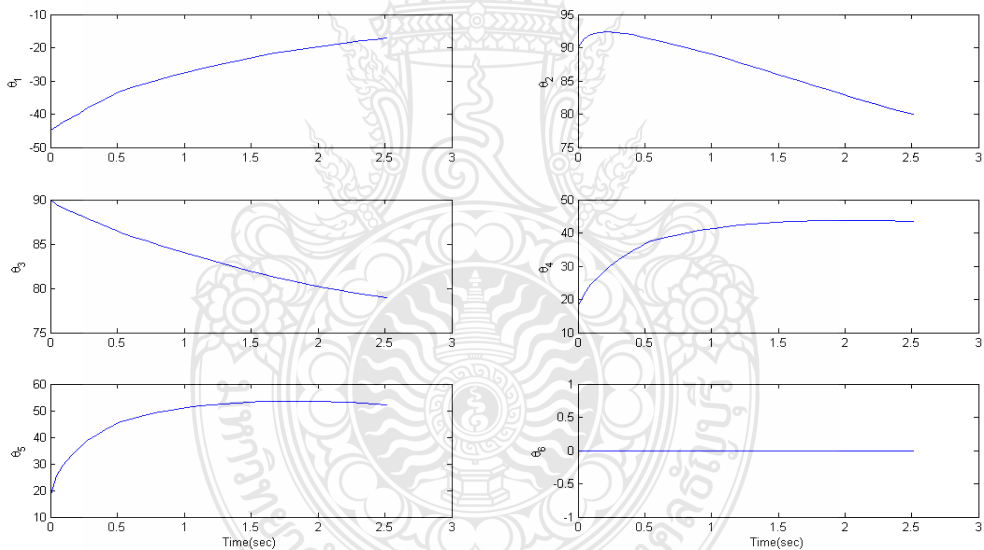
รูปที่ 4.11 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการเคลื่อนที่จากจุดเริ่มต้นไปยังตำแหน่งเป้าหมายของแขนกล 6 แกน



รูปที่ 4.12 วิธีการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลจากจุดพิกัดเริ่มต้นไปยังจุดพิกัดเป้าหมายบนพิกัด (x, y, z) (บนซ้าย) และในระนาบ x-y (บนขวา) และในระนาบ x-z (ล่างซ้าย) และในระนาบ y-z (ล่างขวา)

เมื่อวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของตำแหน่งปลายแขนกลในแบบ 2 มิติ คือมองจากด้านบน (top view) ที่เป็นระนาบ (x, y) และมองจากด้านข้าง (side view) ที่เป็นระนาบ (y, z) และจากด้านหน้า (front view) ที่เป็นระนาบ (x, z) พบว่าวิถีของการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลจากจุดเริ่มต้นไปยังจุดสุดท้ายนั้น มีวิถีของการเคลื่อนที่เกือบเป็นเส้นตรง โดยจะเห็นได้จากการพิจารณาการเคลื่อนที่ของตำแหน่งปลายแขนกลในรูปที่ 4.11 และ 4.12 โดยที่วงกลมสีเขียวคือจุดเริ่มต้นและดอกจันสีดำคือจุดสุดท้ายของการเคลื่อนที่

เมื่อพิจารณาผลที่ได้จากการเคลื่อนที่ตามจุดพิกัดที่กำหนด ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาผลการเคลื่อนที่ของแขนกลพบว่า มุมของแต่ละข้อต่อของแขนกลในแต่ละแกนนั้น จะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง ซึ่งจะทำให้ปลายแขนกลเคลื่อนที่เข้าหาตำแหน่งเป้าหมายในลักษณะเป็นเส้นตรงอย่างต่อเนื่อง โดยสามารถรวบรวมผลของการเคลื่อนที่จากจุดพิกัด (-13.8, -22.3, 124.5) ไปยังจุดพิกัด (25, -25, 110) ไว้ในตารางที่ 5.1 พร้อมคำนวณค่าความผิดพลาดของตำแหน่งปลายแขนกลที่มากที่สุด 0.2 ซึ่งไม่เกิน 0.5 cm ตามที่กำหนดไว้



รูปที่ 4.13 องศาการหมุนของแต่ละข้อต่อแขนกลจากจุดพิกัดเริ่มต้น ไปยังจุดพิกัดตำแหน่งเป้าหมาย

ตารางที่ 4.3 ข้อมูลการเคลื่อนที่ของแขนกลจากพิกัด (-13.8, -22.3, 124.5) ไปยังพิกัด (25, -25, 110)

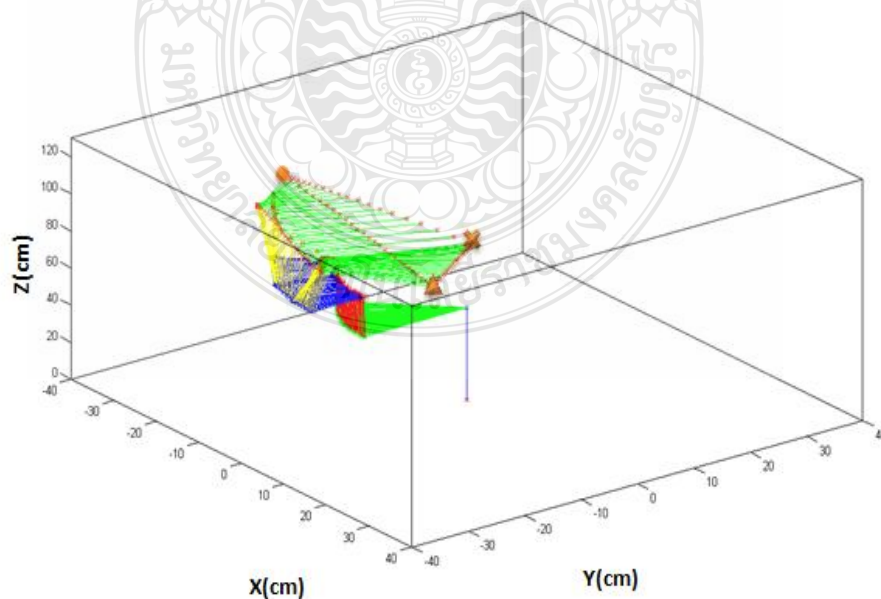
ในการจำลองการเคลื่อนที่ใน MATLAB ของแขนกล

ตำแหน่ง	จุดเริ่มต้น	ตำแหน่งเป้าหมาย	จุดสุดท้าย	ผลการเปลี่ยนแปลง	ความคลาดเคลื่อน
X(cm)	-13.8	25	24.9	38.7	0.1
Y(cm)	-22.3	-25	-24.8	-2.5	-0.2

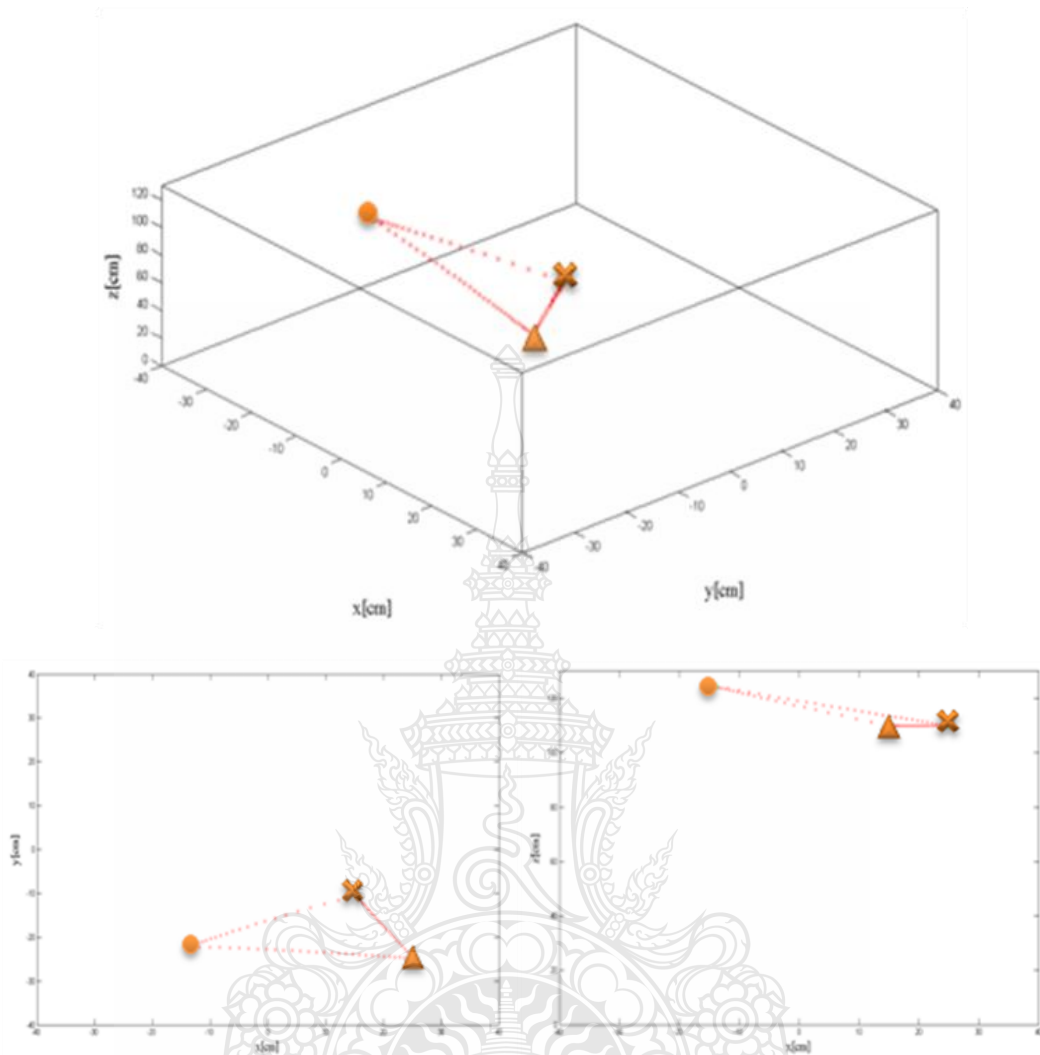
Z(cm)	124.5	110	109.9	-14.6	0.1
Theta1(deg)	-45		-17.2	27.8	
Theta2(deg)	90		80	-10	
Theta3(deg)	90		79	-11	
Theta4(deg)	18	-	43.5	25.5	-
Theta5(deg)	18		52.4	34.4	
Theta6(deg)	0		0	0	

4.4.2 วิธีการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลตามพิกัดที่กำหนดแบบหลายๆ จุดแบบต่อเนื่อง

เพื่อศึกษาการเคลื่อนที่ของแขนกลตามจุดพิกัดที่กำหนดหลายๆ จุดที่ต้องการแบบต่อเนื่อง จึงได้ทำการทดลองโดยให้แขนกลเคลื่อนที่ไปทั้งหมด 3 จุดพิกัดโดยวิธีการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลในการทดสอบนี้ จะลักษณะคล้ายรูปสามเหลี่ยมคือมีจุดพิกัดเริ่มต้นของการเคลื่อนที่อยู่ที่จุดพิกัด A โดยพิกัดของจุด A = (-13.8, 22.3, 124.5) และจุดพิกัดที่สองของการเคลื่อนที่คือจุด B โดยพิกัดของจุด B = (25, -25, 110) เมื่อปลายแขนกลเคลื่อนที่มาถึงจุดพิกัด B แล้วจะเคลื่อนที่ต่อไปยังจุดพิกัดที่สามหรือจุดพิกัด C โดยมีพิกัดการเคลื่อนที่ของจุดพิกัด C = (15, -10, 110) และเมื่อปลายแขนกลเคลื่อนที่มาถึงจุดพิกัด C แล้วก็จะเคลื่อนที่กลับไปยังจุดพิกัดเริ่มต้น A ซึ่งเมื่อพิจารณาแล้วจะพบว่าวิถีของการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลมีลักษณะเป็นรูปสามเหลี่ยม



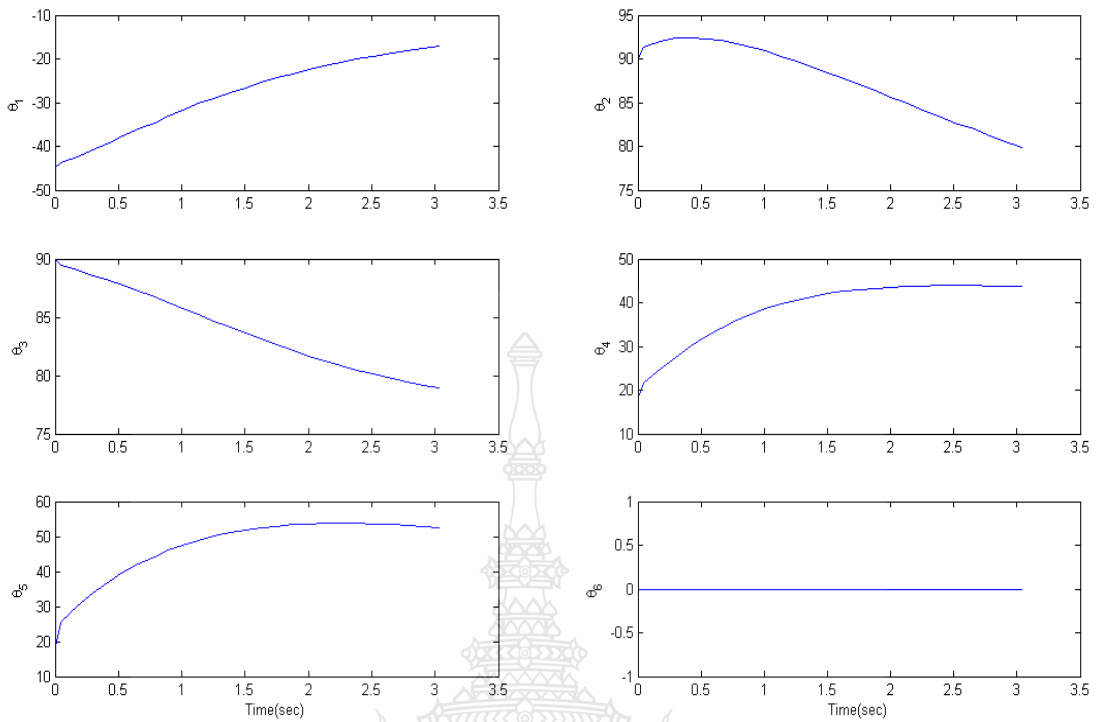
รูปที่ 4.14 การเคลื่อนที่ของแขนกลจากจุดพิกัด A (วงกลม) ไปยังจุดพิกัด B (กากบาท) และจุดพิกัด C (สามเหลี่ยม) ในระบบพิกัด (x, y, z)



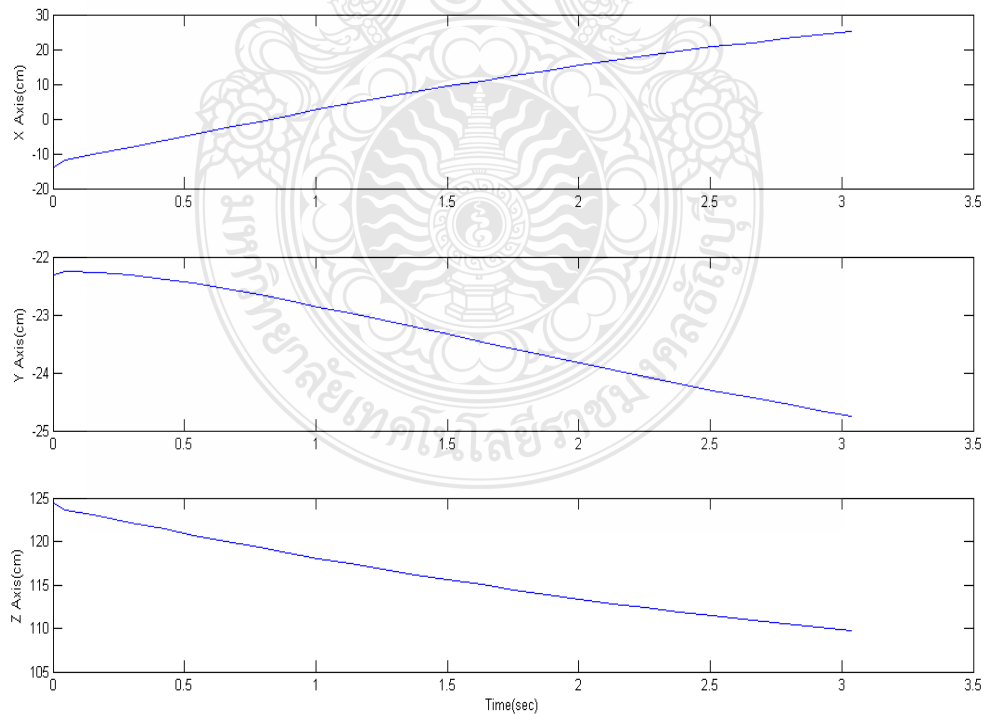
รูปที่ 4.15 การเคลื่อนที่ของแขนกลจากจุดพิกัด A (วงกลม) ไปยังจุดพิกัด B (กากบาท) และจุดพิกัด C (สามเหลี่ยม) ในระบบพิกัด x-y-z (บน) และในระนาบ x-y (ล่างซ้าย) และในระนาบ x-z (ล่างขวา)

4.4.2.1 การเคลื่อนที่ของแขนกลจากจุดพิกัด A (-13.8, -22.3, 124.5) ไปยังจุดพิกัด B (25, -25, 110)

เมื่อพิจารณาผลที่ได้จากการเคลื่อนที่ของแขนกลจากจุดพิกัด A ไป B และ C พบว่า มุมของข้อต่อของแขนกลในแต่ละแกนนั้น จะมีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้เกิดการเคลื่อนที่ของปลายแขนกล โดยสามารถรวบรวมผลของการเคลื่อนที่ของแขนกลจากจุดพิกัด A (-13.8, -22.3, 124.5) ไปยังจุดพิกัด B (25, -25, 110) ไว้ในรูปที่ 4.16, 4.17 และตารางที่ 4.4 แสดงการคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งปลายแขนกลไม่เกิน 0.5 cm ตามที่กำหนดไว้



รูปที่ 4.16 องศาการหมุนของแขนกลจากจุดพิกัด A (-13.8, -22.3, 124.5) ไปยังจุดพิกัด B (25, -25, 110)



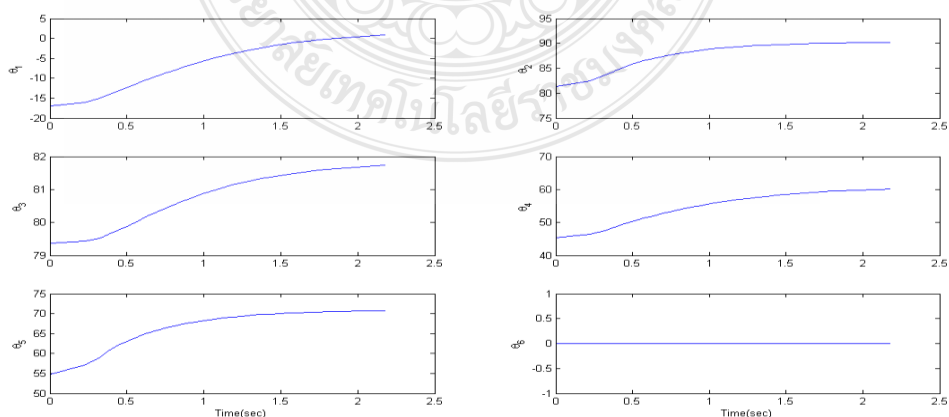
รูปที่ 4.17 ตำแหน่งของปลายแขนกลจากจุดพิกัด A (-13.8, -22.3, 124.5) ไปยังจุดพิกัด B (25, -25, 110)

ตารางที่ 4.4 ข้อมูลการเคลื่อนที่ของแขนกลจากจุดพิกัด A (-13.8, -22.3, 124.5) ไปยังจุดพิกัด B (25, -25, 110) ในการจำลองการเคลื่อนที่ของแขนกลในโปรแกรม MATLAB

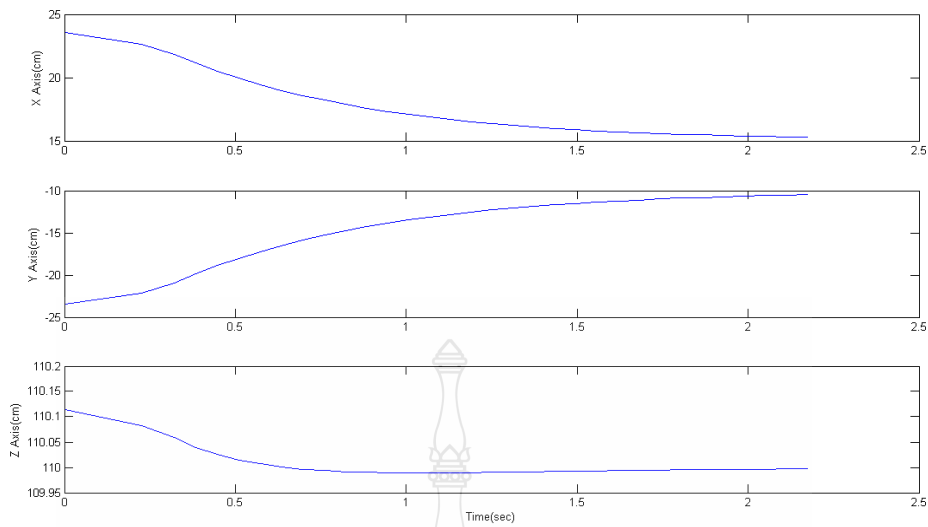
ตำแหน่ง	จุดเริ่มต้น (A)	ตำแหน่งเป้าหมาย (B)	จุดสุดท้าย	การเปลี่ยนแปลง	ความคลาดเคลื่อน
X(cm)	-13.8	25	25.4	39.2	-0.4
Y(cm)	-22.3	-25	-24.7	-2.4	-0.3
Z(cm)	124.5	110	109.7	-14.8	0.3
Theta1(deg)	-45		-16.9	28.1	
Theta2(deg)	90		79.8	-10	
Theta3(deg)	90		78.9	-11	
Theta4(deg)	18	-	43.8	25.8	-
Theta5(deg)	18		52.5	34.5	
Theta6(deg)	0		0	0	

4.4.2.2 การเคลื่อนที่ของแขนกลจากจุดพิกัด B (25.4, -24.7, 109.7) ไปยังจุดพิกัด C (15, -10, 110)

จากการทดลองให้แขนกลเคลื่อนที่จากจุดพิกัด B (25.4, -24.7, 109.7) ไปยังจุดพิกัด C (15, -10, 110) พบว่าแขนกลสามารถเคลื่อนที่ไปได้โดยมีวิธีการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงจากจุดพิกัด B (25, -25, 110) ไปจนถึงจุดพิกัด C (15, -10, 110) โดยได้เขียนกราฟแสดงการเคลื่อนที่ของแขนกลดังในรูปที่ 4.18 และ 4.19 และในตารางที่ 4.5 แสดงการคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งปลายแขนกลไม่เกิน 0.5 cm ตามที่กำหนดไว้



รูปที่ 4.18 องศาการหมุนของแขนกลจากจุดพิกัด B (25.4, -24.7, 109.7) ไปยังจุดพิกัด C (15, -10, 110)



รูปที่ 4.19 ตำแหน่งของปลายแขนกลจากจุดพิกัด B (25.4, -24.7, 109.7) ไปยังจุดพิกัด C (15, -10, 110)

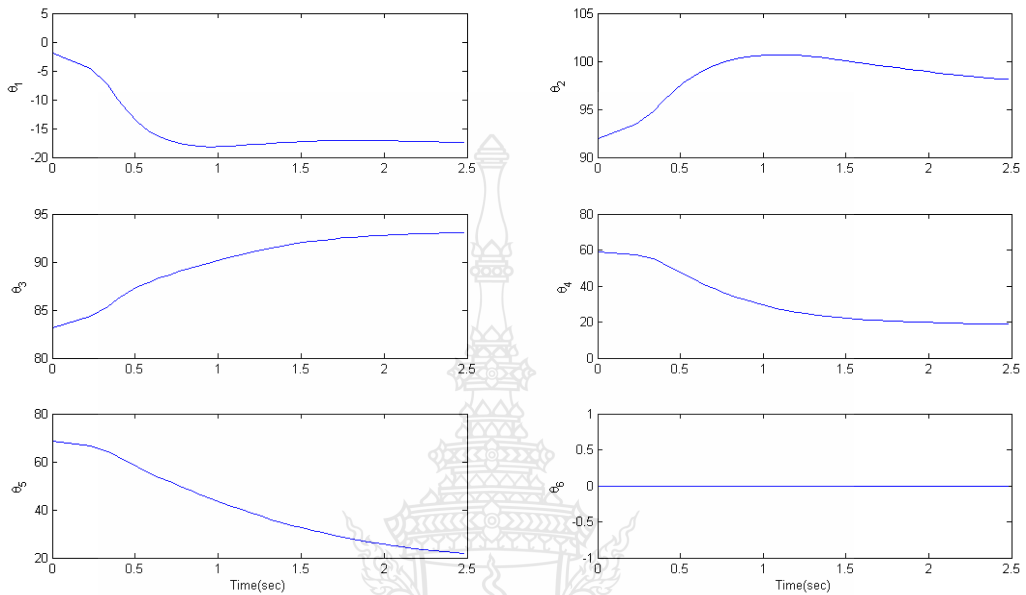
ตารางที่ 4.5 ข้อมูลการเคลื่อนที่ของแขนกลจากจุดพิกัด B (25.4, -24.7, 109.7) ไปยังจุดพิกัด C (15, -10, 110) ด้วยการจำลองการเคลื่อนที่ของแขนกลด้วยโปรแกรม MATLAB

ตำแหน่ง	จุดเริ่มต้น (B)	ตำแหน่งเป้าหมาย (C)	จุดสุดท้าย	การเปลี่ยนแปลง	ความคลาดเคลื่อน
X(cm)	25.4	15	15.1	-10.3	0.0
Y(cm)	-24.7	-10	-10.4	14.3	0.4
Z(cm)	109.7	110	110.0	0.3	0.0
Theta1(deg)	-16.9		1.4	18.3	
Theta2(deg)	79.8		90.7	11	
Theta3(deg)	78.9		81.5	3	
Theta4(deg)	43.8		60.0	16.2	-
Theta5(deg)	52.5		71.1	18.5	
Theta6(deg)	0		0	0	

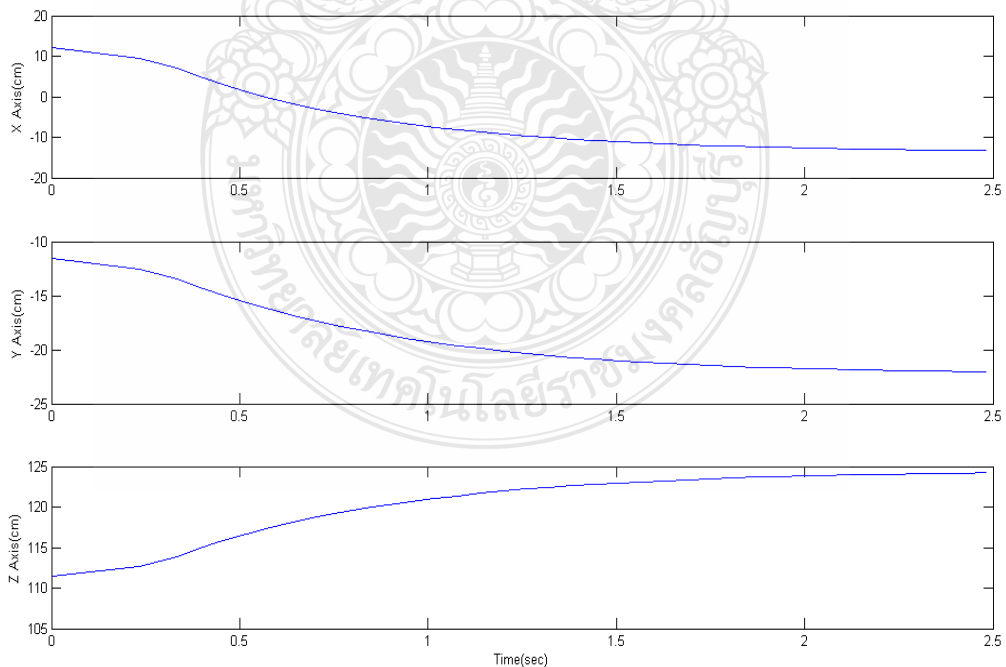
4.4.2.3 การเคลื่อนที่ของแขนกลจากจุดพิกัด C (15.1, -10.4, 110) ไปยังจุดพิกัด A (13.8, -22.3, 124.5)

จากผลการทดลองให้แขนกลเคลื่อนที่จากจุดพิกัด C (15.1, -10.4, 110) ไปยังจุดพิกัด A (13.8, -22.3, 124.5) พบว่าแขนกลสามารถเคลื่อนที่ไปได้โดยมีวิธีการเคลื่อนที่เป็น

เส้นตรงจากจุดพิกัด C (15.1, -10.4, 110) ไปจนถึงจุดพิกัด A (13.8, -22.3, 124.5) โดยสามารถเขียนกราฟแสดงการเคลื่อนที่ของแขนกลตามรูปที่ 4.20, 4.21 และในตารางที่ 4.6 แสดงการคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งปลายแขนกลไม่เกิน 0.5cm ตามที่กำหนดไว้



รูปที่ 4.20 องศาการหมุนของแขนกลจากจุดพิกัด C (15.1, -10.4, 110) ไปยังจุดพิกัด A (13.8, -22.3, 124.5)



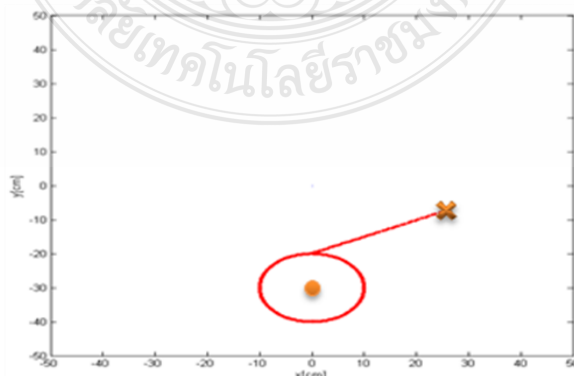
รูปที่ 4.21 ตำแหน่งของปลายแขนกลจากพิกัดจุด C (15.1, -10.4, 110) ไปยังพิกัดจุด A (13.8, -22.3, 124.5)

ตารางที่ 4.6 ข้อมูลการเคลื่อนที่ของแขนกลจากจุด C (15.1, -10.4, 110) ไปยังพิกัด A (13.8, -22.3, 124.5)

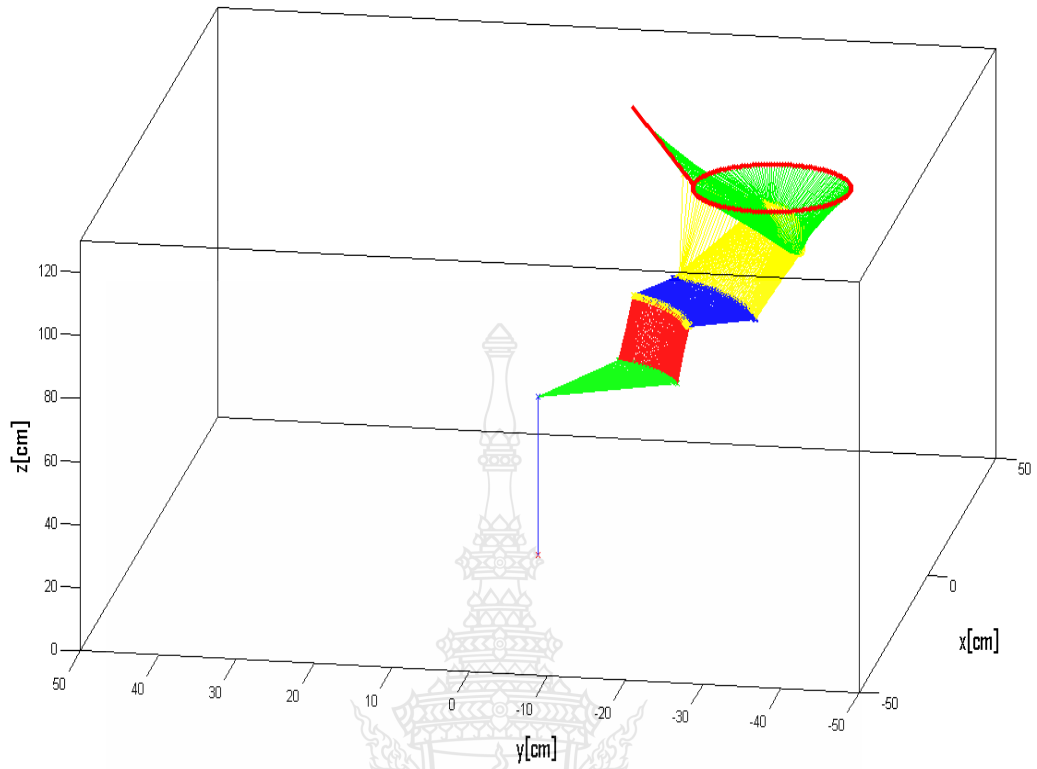
ตำแหน่ง	จุดเริ่มต้น (C)	ตำแหน่งเป้าหมาย (A)	จุดสุดท้าย	การเปลี่ยนแปลง	ความคลาดเคลื่อน
X	15.1	-13.8	-13.5	-28.6	-0.3
Y	-10.4	-22.3	-21.9	-11.6	-0.4
Z	110.0	124.5	124.0	14.1	0.5
Theta1	1.4		-16.1	-17.4	
Theta2	90.7		98.9	8	
Theta3	81.5		93.2	12	
Theta4	60.0	-	19.6	-40.4	-
Theta5	71.1		23.1	-48.0	
Theta6	0		0	0	

4.4.3 การเคลื่อนที่ของปลายแขนกลแบบวิถีโค้ง

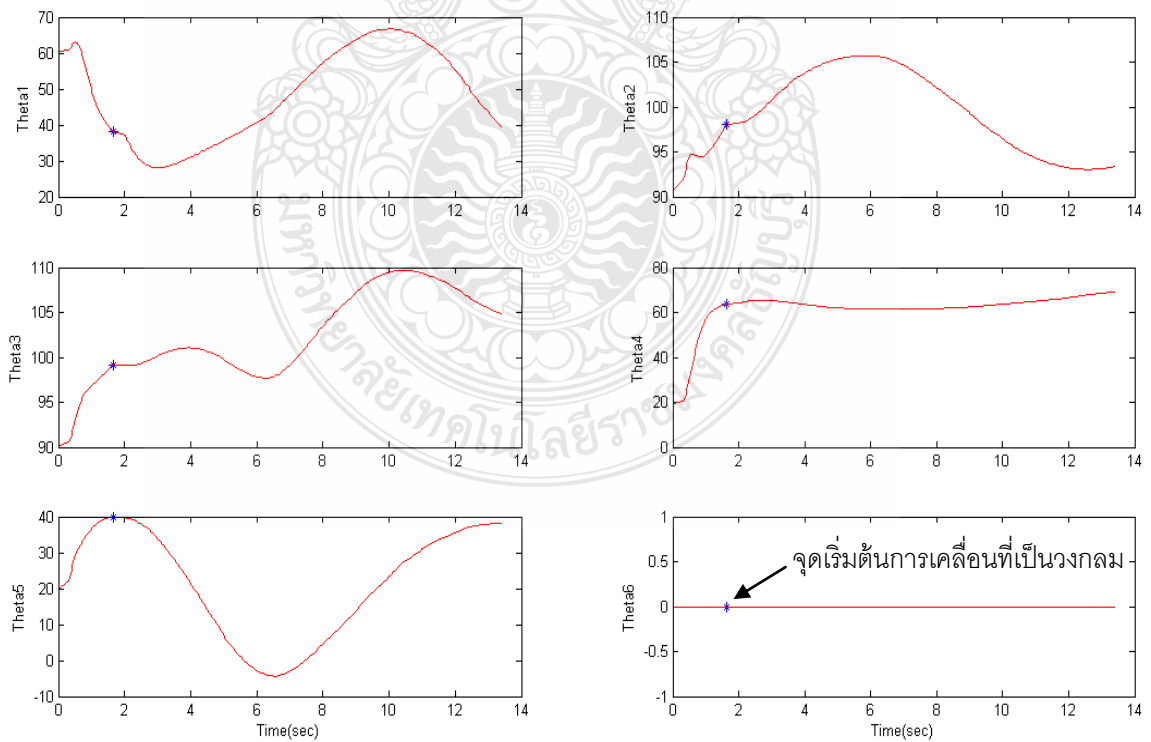
จากผลการทดลองในเบื้องต้นในหัวข้อที่ 4.4.1 และ 4.4.2 พบว่าการเคลื่อนที่จากจุดเริ่มต้นไปยังตำแหน่งเป้าหมายโดยใช้หลักการจลศาสตร์แบบผกผันในการคำนวณหาองศาการหมุนของข้อต่อแขนกลจะส่งผลให้การเคลื่อนที่ของปลายแขนกลจากจุดเริ่มต้นไปถึงจุดสุดท้ายมีวิถีการเคลื่อนที่แบบเป็นเส้นตรง และในหัวข้อนี้จะทำการทดลองเพื่อศึกษาผลที่เกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของแขนกลในลักษณะวิถีโค้ง โดยทดลองให้แขนกลเคลื่อนที่จากจุดเริ่มต้น D (25.13, -7.55, 124.5) แล้วจึงเคลื่อนที่เป็นวงกลมรอบจุดศูนย์กลาง C (0, -30, 120) โดยมีรัศมีการเคลื่อนที่เท่ากับ $R = 10$ ซึ่งสามารถพิจารณาผลการเคลื่อนที่ในแบบวิถีโค้งได้ตามรูปที่ 4.22



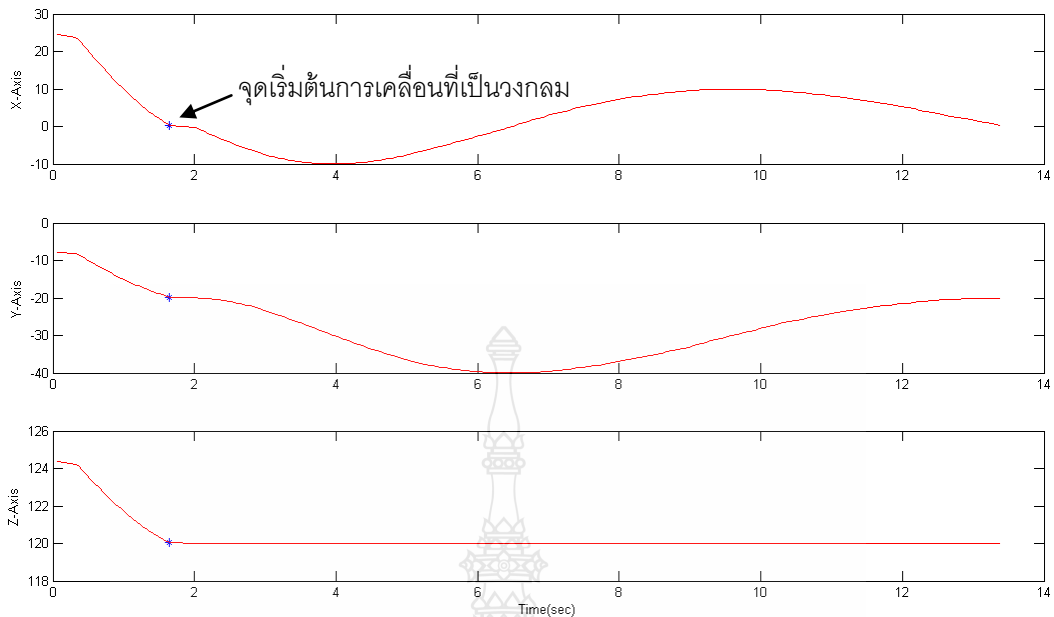
รูปที่ 4.22 ตำแหน่งของปลายแขนกลเมื่อเคลื่อนที่ออกจากจุดเริ่มต้น D (กากบาท) เป็นวงกลมรอบจุดศูนย์กลาง C (วงกลม) ในระนาบ x-y



รูปที่ 4.23 ลักษณะการเคลื่อนที่ของแขนกลเป็นวงกลมรอบจุดศูนย์กลาง C (0, -30, 120) ในสามมิติ



รูปที่ 4.24 องศาการหมุนของข้อต่อแขนกลเมื่อเคลื่อนที่เป็นวงกลมรอบจุดศูนย์กลาง C (0, -30, 120)



รูปที่ 4.25 ตำแหน่งของปลายแขนกลจากจุดเริ่มต้นจนถึงจุดสุดท้ายเมื่อเคลื่อนที่เป็นวงกลมรอบจุดศูนย์กลาง C (0, -30, 120)

จากผลการทดลองพบว่าการใช้หลักการจลศาสตร์แบบพหุผันสามารถควบคุมการเคลื่อนที่ของปลายแขนกล 6 แกนให้เคลื่อนที่ไปในลักษณะของวิถีตรงและวิถีโค้งผสมกันได้ โดยการสร้างฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์สำหรับการเคลื่อนที่แบบเป็นวงกลมของแขนกล 6 แกนตามที่ได้แสดงไว้ในสมการที่ 4.1, 4.2 และ 4.3

$$X_s = X_c - R \times \cos(\beta) \tag{4.1}$$

$$Y_s = Y_c - R \times \cos(\beta) \tag{4.2}$$

$$Z_s = Z_c \tag{4.3}$$

โดยที่

X_s คือตำแหน่งเป้าหมายของปลายแขนกลตามแนวแกน X

Y_s คือตำแหน่งเป้าหมายของปลายแขนกลตามแนวแกน Y

Z_s คือตำแหน่งเป้าหมายของปลายแขนกลตามแนวแกน Z

X_c คือจุดศูนย์กลางการเคลื่อนที่ตามแนวแกน X

Y_c คือจุดศูนย์กลางการเคลื่อนที่ตามแนวแกน Y

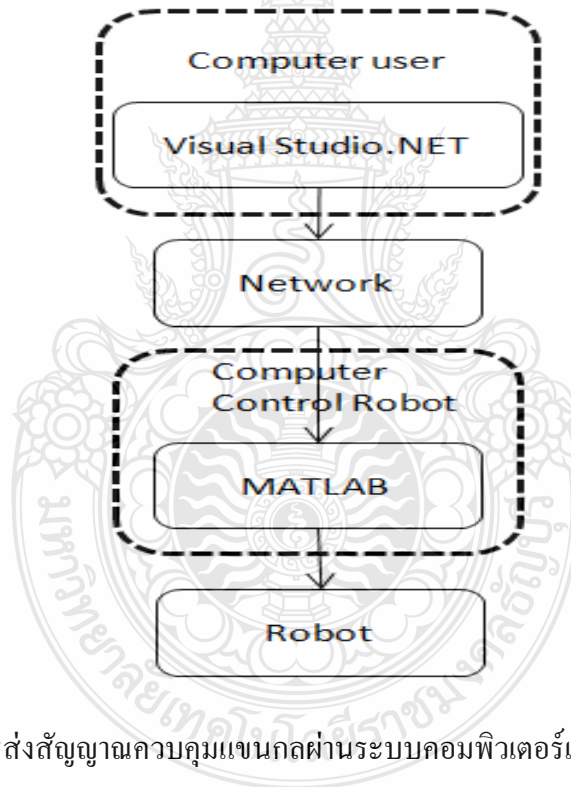
Z_c คือจุดศูนย์กลางการเคลื่อนที่ตามแนวแกน Z

R คือรัศมีของการเคลื่อนที่

β คือมุมของการเคลื่อนที่แบบเป็นวงกลม

4.5 การควบคุมการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลผ่านระบบเน็ตเวิร์ค

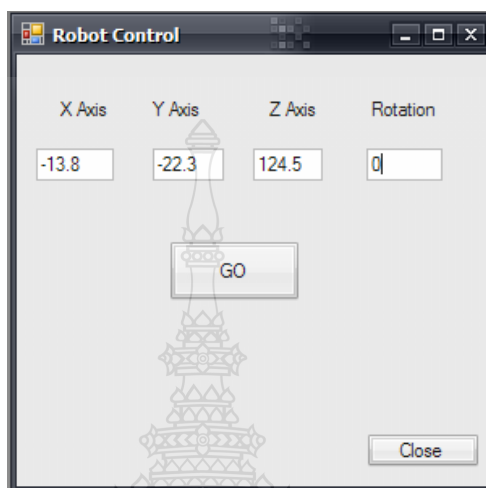
วิธีการควบคุมตำแหน่งของแขนกลผ่านระบบเน็ตเวิร์คนี้ ได้ออกแบบระบบการเชื่อมโยงข้อมูลผ่านระบบคอมพิวเตอร์เน็ตเวิร์คโดยการนำซอฟต์แวร์ Visual Studio.Net มาประยุกต์ใช้ในการส่งพิกัดการเคลื่อนที่ในรูปแบบของไฟล์ตัวอักษร (Text File) โดยมีเราเตอร์ (Router) เป็นตัวกลางในการเชื่อมต่อการส่งถ่ายข้อมูลการควบคุมแขนกล โดยการสร้างระบบเน็ตเวิร์คขึ้นมาเพื่อใช้ในการเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์เข้าด้วยกัน ซึ่งประกอบไปด้วยคอมพิวเตอร์ของผู้ควบคุม และคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการประมวลผลเพื่อควบคุมการทำงานของแขนกลเพื่อส่งสัญญาณควบคุมจากคอมพิวเตอร์ผ่านการ์ดรับ-ส่งข้อมูล (DAQ) ของ NI รุ่น PCIe-6323 ไปยังชุดขับเคลื่อนมอเตอร์แบบเซอร์โว (Servo Driver) เพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกล



รูปที่ 4.26 ขั้นตอนการส่งสัญญาณควบคุมแขนกลผ่านระบบคอมพิวเตอร์เน็ตเวิร์ค

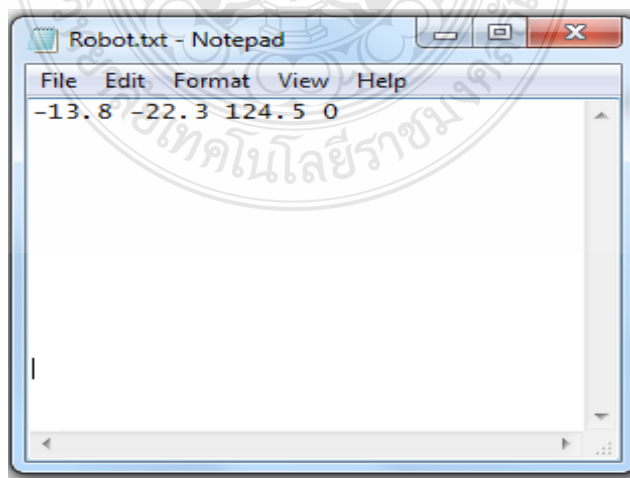
จากการประยุกต์ใช้ซอฟต์แวร์ Visual Studio.Net ในการส่งพิกัดเป้าหมายปลายแขนกล ซึ่งจะประกอบด้วย Text Box ทั้งหมด 4 ช่องที่สามารถกรอกตัวเลขลงไปได้โดยประกอบไปด้วยช่อง X-Axis, Y-Axis, Z-Axis และ Rotation ตามลำดับซึ่งช่องสำหรับป้อนค่า Rotation นี้คือค่าองศาการหมุนที่จุดปลายสุดของแขนกลหรือองศาการหมุนสำหรับแกนที่ 6 ของแขนกลส่วน X-, Y-, และ Z-Axis นั้นจะเป็นตำแหน่งของปลายแขนกลในระบบพิกัดคาร์ทีเซียนที่ต้องการให้ปลายแขนกลเคลื่อนที่ไป เมื่อทำการป้อนค่าพิกัดของปลายแขนกลเรียบร้อยแล้ว จากนั้นทำการคลิก (Click) ที่ปุ่ม “GO” คอมพิวเตอร์

ของผู้ควบคุมจะส่งไฟล์ตัวอักษร(Text File) ที่มีชื่อว่า Robot.txt ไปยังคอมพิวเตอร์ควบคุมแขนกล ซึ่งมีตำแหน่งปลายทางของการส่งข้อมูลผ่านระบบเน็ตเวิร์คอยู่ที่ “\\Mechanicb6f48d\EquationRobot\Robot.txt”



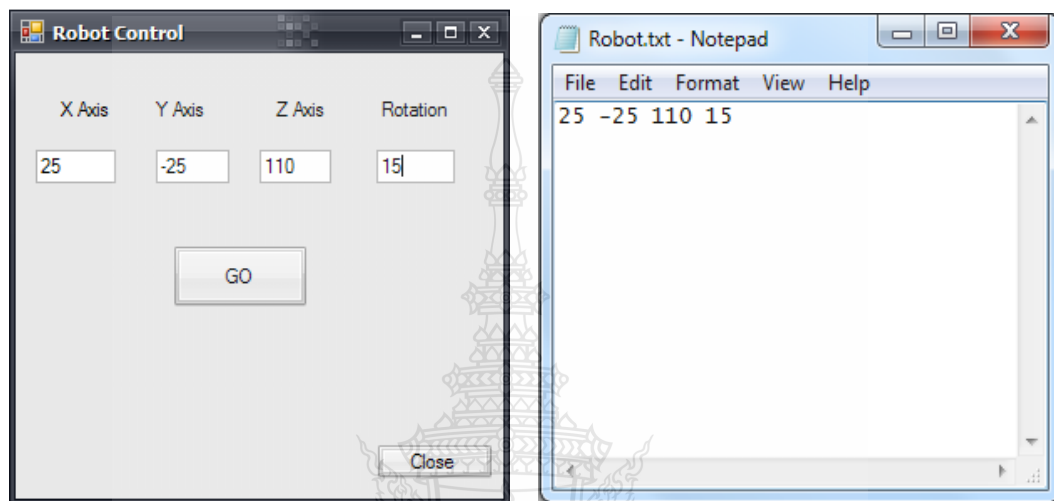
รูปที่ 4.27 ซอฟแวร์ที่ประดิษฐ์ขึ้นจากการประยุกต์ใช้โปรแกรม VisualStudio.NET เพื่อใช้ในการส่งพิกัดเป้าหมายของปลายแขนกลไปยังจุด (-13.8, -22.3, 124.5, 0) ผ่านระบบคอมพิวเตอร์เน็ตเวิร์ค

เมื่อไฟล์ Robot.txt ถูกส่งมายังคอมพิวเตอร์ปลายทางแล้ว ข้อมูลในนั้นจะประกอบด้วยตัวเลขทั้งหมด 4 ตัว ซึ่งจะเป็นตัวเลขที่มีค่าเดียวกันกับตัวเลขที่ถูกส่งมาด้วย VisualStudio.NET ซึ่งประกอบด้วยพิกัดตำแหน่งในแกน X, Y, Z และองศาการหมุน (Rotation) ของปลายแขนกลตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 4.27 และ 4.28 ตามลำดับ



รูปที่ 4.28 ตัวอย่างไฟล์ตัวอักษร(Text File) ที่เกิดขึ้นจากการส่งค่าพิกัดตำแหน่งของปลายแขนกลไปยังพิกัดจุด (-13.8, -22.3, 124.5, 0) ผ่านระบบเน็ตเวิร์ค

จากการทดลองได้ทำการการออกแบระบบ โดยให้คอมพิวเตอร์ควบคุมแขนกลทำการสแกน (Scan) ทุกๆ 1วินาทีเพื่ออ่านค่าไฟล์ตัวอักษร(Text File) ที่ส่งมาจากคอมพิวเตอร์ของผู้ควบคุม เมื่อพบการเปลี่ยนแปลงของค่าพิกัดเป้าหมายของปลายแขนกล คอมพิวเตอร์ควบคุมแขนกลจะเริ่มทำการประมวลผลเพื่อควบคุมการทำงานของแขนกลทันที



รูปที่ 4.29 ตัวอย่างผลของการส่งตำแหน่งของปลายแขนกลผ่านระบบเน็ตเวิร์คไปยังพิกัด (25, -25, 110, 15) ด้วยซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นจาก VisualStudio.NET

และได้ทำการทดลองเพื่อวัดเวลาที่ใช้ในการส่งสัญญาณควบคุมแขนกลผ่านระบบเน็ตเวิร์ค โดยทำการวัดเวลาที่คอมพิวเตอร์ของผู้ควบคุมส่งค่าพิกัดไปยังคอมพิวเตอร์ควบคุมแขนกลแล้วเริ่มต้นประมวลผลเพื่อควบคุมแขนกล ซึ่งได้บันทึกผลการทดลองไว้ในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 เวลาที่ใช้ในการส่งสัญญาณจากคอมพิวเตอร์ของผู้ควบคุมไปยังคอมพิวเตอร์ควบคุมแขน-

ครั้งที่	เวลาที่ใช้(วินาที)	เวลาเฉลี่ย(วินาที)
1	1.61	
2	1.38	
3	1.55	1.55
4	1.71	
5	1.52	

จากผลการทดลองเพื่อวัดเวลาในการตอบสนองของระบบ โดยทำการวัดทั้งหมด 5 ครั้งพบว่า เวลาเฉลี่ยที่คอมพิวเตอร์ควบคุมแขนกลจะใช้ในการตอบสนองคำสั่งในการเคลื่อนที่ของแขนกลให้ไป ยังพิกัดเป้าหมายอยู่ที่ 1.55 วินาที

4.6 การควบคุมตำแหน่งการหมุนสำหรับเซอร์โวมอเตอร์ของข้อต่อแขนกล

เมื่อทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกล และการส่งพิกัดที่ต้องการเพื่อควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลผ่านระบบเน็ตเวิร์คเรียบร้อยแล้ว จากนั้นจึงได้ทำการทดลองเพื่อทดสอบการควบคุมตำแหน่งองศาการหมุนของเซอร์โวมอเตอร์ทั้งหมด 3 แกน โดยเลือกที่จะใช้เซอร์โวมอเตอร์ของแขนกลในแกนที่ 4, 5 และ 6 ตามที่แสดงในรูปที่ 3.1 เพื่อใช้ในการทดสอบการควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกลผ่านระบบเน็ตเวิร์ค เพื่อศึกษาผลตอบสนองต่อการเคลื่อนที่ของแขนกลในการทดลอง โดยกำหนดให้สัญญาณขาออกแบบอนาล็อก (Analog Output) จาก การ์ดรับ-ส่งข้อมูล(DAQ) ของ NI มีความต่างศักย์ไม่เกิน 10Vdc สามารถขับเซอร์โวมอเตอร์แกนที่ 4 และ 5 ให้หมุนไปได้ 90 องศา และแกนที่ 6 ให้หมุนไปได้ 180 องศา โดยสามารถเขียนเป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างองศาการหมุนของมอเตอร์และความต่างศักย์ไฟฟ้ากระแสตรงได้ดังนี้

$$\text{Command 4} = (\text{Theta}4 \times 10) / 90 \quad (4.4)$$

$$\text{Command 5} = (\text{Theta}5 \times 10) / 90 \quad (4.5)$$

$$\text{Command 6} = (\text{Theta}6 \times 10) / 180 \quad (4.6)$$

โดยที่

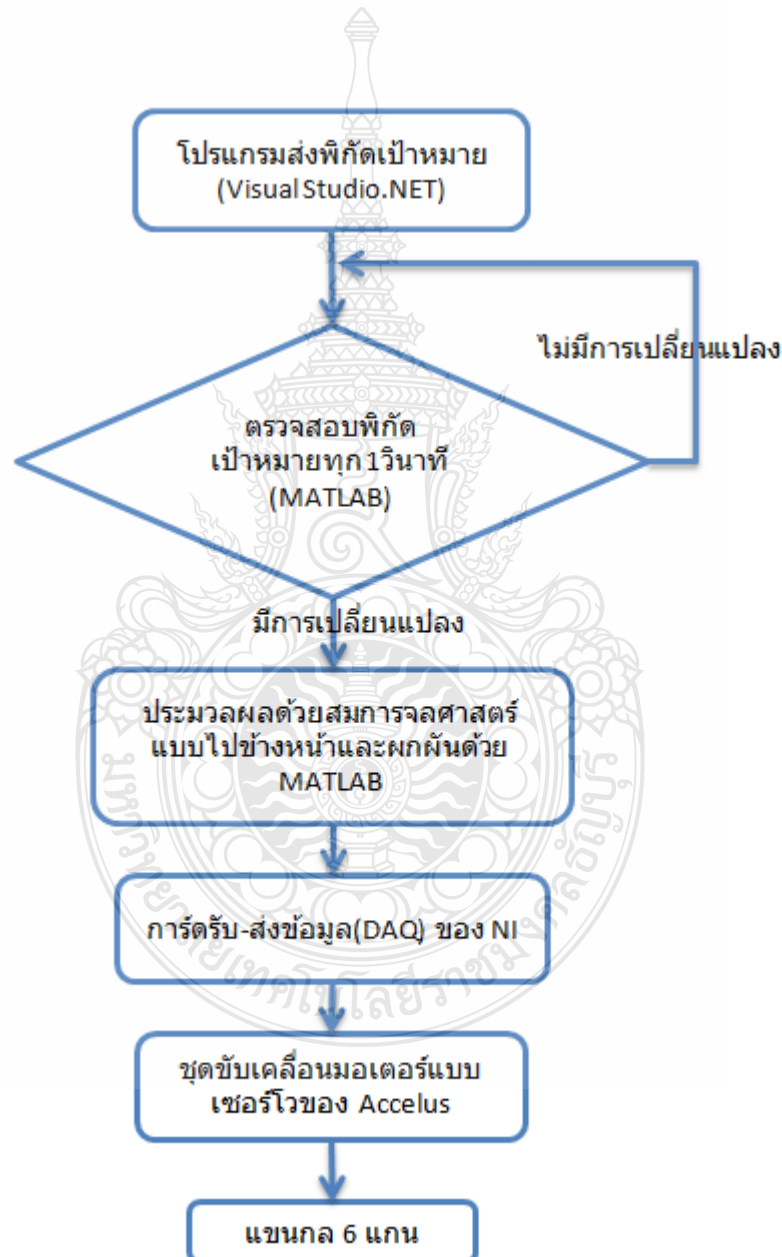
Command 4 คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ควบคุมองศาการหมุนของมอเตอร์แกนที่ 4

Command 5 คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ควบคุมองศาการหมุนของมอเตอร์แกนที่ 5

Command 6 คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้ากระแสตรงที่ใช้ควบคุมองศาการหมุนของมอเตอร์แกนที่ 6

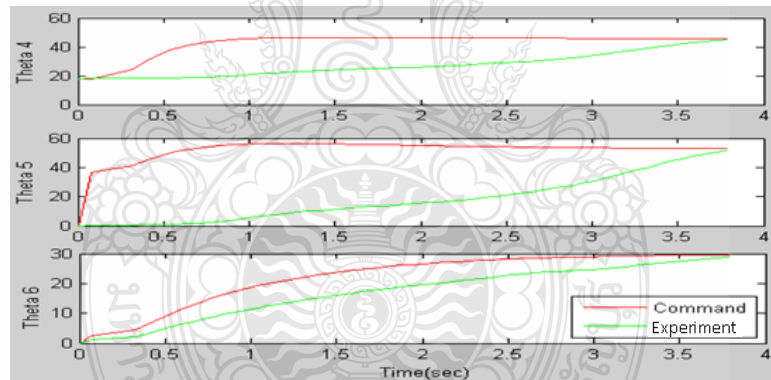
จากนั้นระบบจะทำงานตามขั้นตอนโดยโปรแกรม MATLAB จะทำการสแกน(Scan) ทุกๆ 1 วินาทีเพื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงจุดพิกัดตำแหน่งเป้าหมายที่ถูกส่งมาผ่านระบบเน็ตเวิร์ค และเมื่อพบการเปลี่ยนแปลงจุดพิกัดเป้าหมายโปรแกรม MATLAB จะเริ่มทำการประมวลผลด้วยสมการจลนศาสตร์แบบไปข้างหน้าและแบบผกผันแบบเป็นขั้นตอนทีละน้อย และจะทำการวนลูปเพื่อคำนวณหาองศาการหมุนและส่งสัญญาณควบคุมไปที่มอเตอร์ของข้อต่อแขนกลในแต่ละแกน จนกว่าผลที่ได้ทางคณิตศาสตร์ของปลายแขนกลจะมีค่าความผิดพลาดจากตำแหน่งเป้าหมายน้อยกว่า 0.5cm ระบบก็จะหยุดทำการประมวลผลด้วยสมการจลนศาสตร์แบบไปข้างหน้าและแบบผกผัน แล้วระบบจะกลับมาเริ่มทำการสแกน(Scan) เพื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงจุดพิกัดตำแหน่งเป้าหมายที่ถูกส่งมาผ่าน

ระบบเน็ตเวิร์คอีกครั้ง ซึ่งจะมีขั้นตอนและกระบวนการทำงานของระบบตามแผนภูมิการไหล(Flow Chart) ตามที่แสดงไว้ในรูปที่ 4.30 ซึ่งจากการทดลองกับแขนกลจริงนี้จะต้องใช้เวลาในการประมวลผลต่อหนึ่งรอบการเคลื่อนที่ มากกว่าการทดสอบด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เนื่องจากซอฟต์แวร์ MATLAB ที่ใช้ประมวลผลเพื่อควบคุมแขนกลจริง จะต้องเพิ่มฟังก์ชันของการควบคุมการรับ-ส่งข้อมูล(DAQ) ของ NI เข้าไปในระบบเพื่อประมวลผลรับและส่งสัญญาณเพื่อควบคุมการทำงานของแขนกล

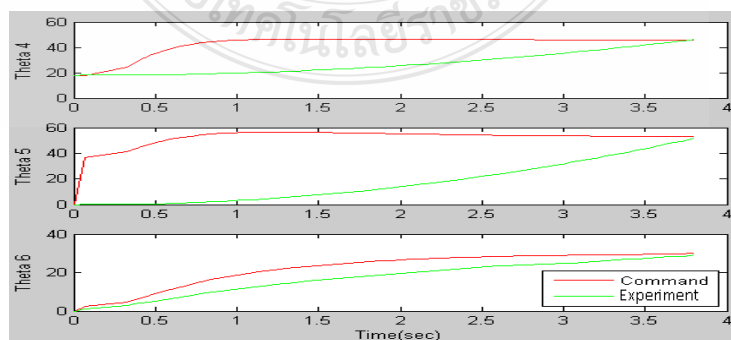


รูปที่ 4.30 แผนภูมิการควบคุมการทำงานของแขนกลผ่านระบบคอมพิวเตอร์เน็ตเวิร์ค

จากนั้นทำการทดลองให้แขนกลเคลื่อนที่จากจุดพิกัด $E = (-19.45, -19.45, 125)$ ไปยังจุดพิกัด $F = (25, -25, 110)$ โดยมีองศาเริ่มต้นของการหมุน $(q_4, q_5, q_6) = (18, 0, 0)$ องศา และองศาสุดท้ายของการเคลื่อนที่ที่เป็น $(q_4, q_5, q_6) = (45, 53, 30)$ องศา จากการทดลองพบว่าตำแหน่งสุดท้ายของการเคลื่อนที่ที่มีองศาการหมุนเป็น $(q_4, q_5, q_6) = (45.5, 52.2, 29.7)$ องศา ซึ่งมีผลคลาดเคลื่อนจากตำแหน่งเป้าหมาย Error = (0.5, -0.8, -0.3) องศา หรือเมื่อคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์ของความคลาดเคลื่อน จะได้เป็น %Error = (1.1%, 1.51%, 1%) ตามลำดับ และจากการทดลองพบว่า การเคลื่อนที่ของมอเตอร์ของแขนกลในแกนที่ 4 และ 5 จะมีการออกตัวในช่วงเริ่มต้นของการเคลื่อนที่ค่อนข้างช้ากว่าเมื่อเทียบกับการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ของแขนกลในแกนที่ 6 ซึ่งจากการวิเคราะห์ถึงโครงสร้างของแขนกลพบว่า การเคลื่อนที่ในช่วงออกตัวที่ช้าของมอเตอร์ในแกนที่ 4 และ 5 นี้เกิดขึ้นเนื่องจากความเฉื่อยของมวลที่มอเตอร์ได้รับจากตัวโครงสร้างของแขนกล จึงทำให้ผลตอบสนองต่อสัญญาณควบคุมการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ของแขนกลในแกนที่ 5 และ 6 จะช้ากว่าเมื่อเทียบกับผลตอบสนองของมอเตอร์ของแขนกลในแกนที่ 6 ดังแสดงในรูปที่ 4.31 และ 4.32 และ การตอบสนองต่อสัญญาณควบคุมที่ช้านี้ อาจจะปรับปรุงได้ด้วยการปรับค่าพารามิเตอร์ของบอร์ดขับเคลื่อนเซอร์โวมอเตอร์ของแขนกล



รูปที่ 4.31 กราฟแสดงผลการเคลื่อนที่ (ครั้งที่ 1) ของแขนกลเทียบกับสัญญาณควบคุมจากคอมพิวเตอร์ควบคุมแขนกล



รูปที่ 4.32 กราฟแสดงผลการเคลื่อนที่ (ครั้งที่ 2) ของแขนกลเทียบกับสัญญาณควบคุมจากคอมพิวเตอร์ควบคุมแขนกล

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปและวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดลอง

จากผลการทดสอบด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์พบว่าแกนกลนี้จะมีขอบเขตการเคลื่อนที่ตามแนวแกน X Y และ Z อยู่ในช่วง (-81.9, 81.9), (-81.9, 75.5) และ (-4, 125.5) เซนติเมตรตามลำดับ และจากการศึกษาผลกระทบจากตัวควบคุมแบบพีไอดี(PID) ด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์พบว่าเมื่อค่าอัตราขยายสัดส่วน (K_p) มีค่าเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้แกนกลใช้เวลาในการเคลื่อนที่เข้าหาค่าหนึ่งเป้าหมายน้อยลง แต่ถ้าหากมากเกินไปก็จะทำให้เกิดปัญหาการเคลื่อนที่ไวเกินไปและจะทำให้เกิดความไม่เสถียรในการเคลื่อนที่ ซึ่งค่าอัตราขยายสัดส่วน (K_p) ควรมีค่าอยู่ระหว่าง 0.1 ถึง 0.15 และจากการทดลองปรับเพิ่มค่าอัตราขยายอนุพันธ์ (K_d) ให้มีค่ามากขึ้นจะทำให้แกนกลเข้าหาค่าหนึ่งเป้าหมายได้เร็วขึ้นเล็กน้อย แต่ถ้าหากว่าค่าอัตราขยายอนุพันธ์ (K_d) มีค่ามากกว่า 0.02 แกนกลจะเริ่มเกิดการสั่นในระหว่างการเคลื่อนที่ไปยังเป้าหมายซึ่งค่าอัตราขยายอนุพันธ์ (K_d) ควรมีค่าอยู่ระหว่าง 0.005 ถึง 0.01 และเมื่อปรับเพิ่มค่าอัตราขยายปริพันธ์ (K_i) ให้เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้แกนกลเคลื่อนที่เข้าหาค่าหนึ่งเป้าหมายได้เร็วขึ้น แต่ถ้าค่าอัตราขยายปริพันธ์ (K_i) มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 0.1 จะทำให้เกิดความไม่เสถียร และแกนกลอาจจะไม่สามารถเคลื่อนที่เข้าหาค่าหนึ่งเป้าหมายได้ซึ่งค่าอัตราขยายปริพันธ์ (K_i) ควรมีค่าอยู่ระหว่าง 0.06 ถึง 0.08 และผลจากการทดลองด้วยโปรแกรม MATLAB โดยใช้สมการศาสตร์แบบไปข้างหน้าและผกผันเพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ของปลายแกนกลพบว่า ปลายแกนกลสามารถเคลื่อนที่เข้าหาค่าหนึ่งเป้าหมายที่มีอยู่หนึ่งจุดหรือมากกว่าได้อย่างต่อเนื่อง โดยสามารถควบคุมการเคลื่อนที่ได้ทั้งแบบวิถีตรงและวิถีโค้ง โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนจากพิกัดเป้าหมายไม่เกิน 0.5 เซนติเมตร

ในส่วนการทดลองกับแกนกลแบบ 6 แกน โดยจะควบคุมการเคลื่อนที่ของแกนกลแค่เพียง 3 แกนสุดท้ายที่ต่อกับปลายแกนกล พบว่าการควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่ของแกนกลด้วยระบบคอมพิวเตอร์เน็ตเวิร์กนั้น สามารถทำได้โดยการประยุกต์ใช้โปรแกรม Visual Studio.Net ที่ติดตั้งบนคอมพิวเตอร์ของผู้ควบคุมเพื่อส่งพิกัดเป้าหมายในการเคลื่อนที่ของแกนกลผ่านระบบเน็ตเวิร์กไปในรูปแบบของไฟล์ตัวอักษร (Text File) จากนั้นโปรแกรม MATLAB ที่ประมวลผลทางคณิตศาสตร์อยู่บนคอมพิวเตอร์ควบคุมแกนกลจะอ่านค่าพิกัดเป้าหมายที่อยู่ในไฟล์ตัวอักษร (Text File) แล้วทำการประมวลผลเพื่อควบคุมการทำงานของแกนกลผ่านการรับ-ส่งข้อมูล (DAQ) ของ NI เพื่อส่งสัญญาณเอาพุต (Output) ไปควบคุมองศาการหมุนของเซอร์โวมอเตอร์ที่ติดตั้งอยู่บนแกนกลในสามแกน

สุดท้าย ซึ่งจะมีค่าความคลาดเคลื่อนเมื่อเทียบกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์น้อยกว่า 2% โดยระบบ จะใช้เวลาเฉลี่ยประมาณ 1.55 วินาทีในการตอบสนองต่อคำสั่งที่ถูกส่งผ่านระบบคอมพิวเตอร์ เน็ตเวิร์ค

5.2 ปัญหาที่พบในการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.2.1 เซอร์โวมอเตอร์ที่ใช้ในการทดลองอาจมีผลตอบสนองที่ช้ากว่าสัญญาณควบคุมอยู่ใน ระดับหนึ่ง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องปรับแต่งค่าพารามิเตอร์ของชุดขับเคลื่อนมอเตอร์แบบเซอร์โวให้ เหมาะสมมากขึ้น เพื่อควบคุมการทำงานของเซอร์โวมอเตอร์ให้มีผลตอบสนองที่ไวมากขึ้น

5.2.2 การรับและส่งสัญญาณควบคุมจากการ์ดรับ-ส่งข้อมูล (DAQ) ของ NI ไปยังตัวควบคุม เซอร์โวมอเตอร์ของ Accelus อาจมีสัญญาณรบกวนจากภายนอก ดังนั้นในบางจุด อาจจะต้องใช้สายหุ้มฉนวนพิเศษ เพื่อป้องกันการรบกวนจากสัญญาณภายนอก

5.2.3 เวลาที่ใช้ในการตอบสนองต่อการควบคุมผ่านระบบเน็ตเวิร์ค สามารถพัฒนาให้ไวขึ้น ได้โดยการเพิ่มความถี่ในการสแกน (Scan) เพื่อตรวจสอบตำแหน่งเป้าหมายที่ส่งมาผ่านระบบ เน็ตเวิร์คให้มีความถี่เพิ่มมากขึ้น และเพื่อให้แกนกลเคลื่อนที่ตามคำสั่งได้เร็วขึ้นอีกด้วย



บรรณานุกรม

- [1] วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ. (2551). ระบบแขนกลนำและตาม 6 องศาอิสระสำหรับงานขนาดเล็ก. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 22 ประจำปี 2551. มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต.
- [2] พรพรด จันทรทัต. (2555). การพัฒนาซอฟต์แวร์ควบคุมแขนกลเพื่อคนพิการ การประชุมวิชาการระดับชาติ ด้านคอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ ครั้งที่ 8 ปี 2555. จังหวัดชลบุรี.
- [3] ทวีเดช ศิริธนาพิพัฒน์. (2552). การควบคุมระบบแบบ เปิด-ปิด และแบบ PID ในชุดฝึกระบบควบคุมการประจุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23 พฤศจิกายน 2552. จังหวัดเชียงใหม่.
- [4] Prempraneerach, P. (2010). Implementation of Resolved Motion Rate Controller with 5-Axis Robot Manipulator Arm. The First TSME International Conference on Mechanical Engineering 20-22 October, 2010, Ubon Ratchathani.
- [5] Wikipedia/หุ่นยนต์ (Online), 2015, Available from: <http://th.wikipedia.org/wiki/หุ่นยนต์>, (13 Feb 2015).
- [6] Bruno Siciliano, Lorenzo, Luigi Villani & Giuseppe Oriolo. (2009). Robotics Modelling Planning and Control. Springer ISBN: 978-1-84628-641-4.
- [7] John J. Cragg. (2004). Introduction to Robotics Mechanical and Control, International Edition. Third Edition. Pearson Prentice Hall, Pearson Education International. ISBN 0-13-123629-6.
- [8] Karl Johan Aström & Richard M. Murray. (2009). Feedback Systems. Princeton University Press New Jersey. ISBN-13: 978-0-691-13576-2.
- [9] จุฑชัย แพงจันทร์, อนุ โขต วุฒิพรพงษ์(2003), เงาะระบบ Network ฉบับสมบูรณ์, ISBN 974-9661-05-2.
- [10] D-LINK (Online), 2016, Available from: <http://www.dlink.co.th/product/n300-wireless-fast-ethernet-router-4/?lang=th>, (25 Feb 2016).
- [11] TP-LINK(Online), 2016, Availablefrom:<http://www.tplink.com/be/products/details/?model=TL-WN321G>, (26 Feb 2016)
- [12] CopleyControls (Online), 2016, Available from:<http://www.copleycontrols.com/Motion/Products/Drives/Digital/accelus-junus.html>, (15 Mar 2016)

- [13] Mark W. Spong, Seth Hutchinson, and M.Vidyasagar. (2005). Robot Modeling and Control. JOHN WILEY & SONG, INC. ISBN: 978-0-471-64990-8.
- [14] Reza N.Jazar. (2010). Theory of Applied Robotics Kinematics, Dynamics and control. Springer New York. Dordrecht Heidelberg London. ISBN 978-1-4419-1749-2.
- [15] National Instruments (Online), 2016, Available from:<http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/en/nid/207406>, (16 Feb 2016).



ภาคผนวก





ภาคผนวก ก

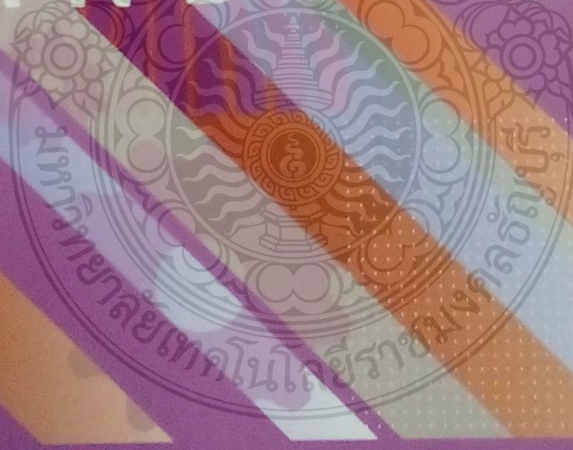
ผลงานตีพิมพ์เผยแพร่

Program Brochure and Abstracts of **RSU** 

รวมบทความ
การประชุมวิชาการระดับชาติ
มหาวิทยาลัยรังสิต ประจำปี 2558
24 เมษายน 2558

THAI
LAND

แพทยศาสตร์ วิทยาศาสตร์กายภาพ
และวิทยาศาสตร์สุขภาพ
วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี
สถาปัตยกรรมศาสตร์และศิลปะและการออกแบบ
มนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์
วิจัยพัฒนาการเรียนการสอน
วิจัยสถาบัน



รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณานิพนธ์ต้นฉบับ

- | | |
|--|--------------------------------|
| 1. นายศิวแพทย์ ดร.วิวัฒน์ ชัยชนะศิริวิมล | กรมปศุสัตว์ |
| 2. รองศาสตราจารย์ ดร.พรหมราช ทวีพงษ์ประภา | ข้าราชการบำนาญ |
| 3. ศาสตราจารย์ ดร.สมบูรณ์ ธนาสุภวิวัฒน์ | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 4. รองศาสตราจารย์ ดร.กัญญิกิทธิ นิธิ โยธินันท์ | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 5. รองศาสตราจารย์ ดร.จินตวีร์ กลัเอสังข์ | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 6. รองศาสตราจารย์ ดร.ยศนันต์ มีมาก | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 7. รองศาสตราจารย์ ดร.สังศรี กุลประไพ | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 8. รองศาสตราจารย์ ดร.สมใจ เฟื่องปรีชา | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 9. รองศาสตราจารย์ เกศจักร ดร. รุทธิ สวัสดิ์ | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 10. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คณพล จันทรมาน | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 11. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นภวรรณ เต็มดีจันทกุล | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 12. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิยม ช่างอนันต์สกุล | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 13. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.โสธรา กนกพานนท์ | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 14. อาจารย์ ดร.จันทิมา อังคพณิชกิจ | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 15. อาจารย์ ดร.จิรบุณย์ ทัศนบรรจง | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 16. อาจารย์ ดร.เอี่ยมพร พิภัสสรณ | จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย |
| 17. อาจารย์ ดร.ยุพา ชิตทอง | บริษัท ปัญญา คอนซัลแตนท์ จำกัด |
| 18. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เกษมสันต์ พิพัฒนศิริศักดิ์ | มหาวิทยาลัยกรุงเทพ |
| 19. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภัทรภร สังขปรีชา | มหาวิทยาลัยกรุงเทพ |
| 20. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ร้อยตำรวจเอกหญิง ดร.มัลลิกาผลอนันต์ | มหาวิทยาลัยกรุงเทพ |
| 21. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุวาท กิจอุสดี | มหาวิทยาลัยกรุงเทพ |
| 22. อาจารย์ ดร.ไกรฤกษ์ ปิ่นแก้ว | มหาวิทยาลัยกรุงเทพ |
| 23. รองศาสตราจารย์ ดร.สุวัฒนา จิตตศตวรรษ | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| 24. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐชูดา วิจิตรจามรี | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| 25. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นันทิยา นาญสกุลลักษณ์ | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| 26. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พงษ์เทพ วัลโพชน์ | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| 27. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรทิพย์ สิริสุนทรลักษณ์ | มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |
| 28. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.แมนมาศ ลีลัสัยกุล | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| 29. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุดารัตน์ สารสว่าง | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| 30. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อมรรัตน์ พรหมบุญ | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| 31. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อดิษฐ์ พรหมินทร์ | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |

รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาพนธ์ต้นฉบับ (ต่อ)

- | | |
|--|--|
| 32. รองศาสตราจารย์ ดร.ศศิวิมล มีอำพล | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| 33. อาจารย์ ดร.จินตนา ศิริวรราชัย | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| 34. อาจารย์ ดร.พิกุล เอกวางกูร | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| 35. อาจารย์ ดร.ไพฑูรย์ เจตธำรงชัย | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| 36. อาจารย์ ดร.วารุณี ถักน โขชคดี | มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| 37. รองศาสตราจารย์ ดร.สิทธิศักดิ์ อุปริงค์ | มหาวิทยาลัยขอนแก่น |
| 38. รองศาสตราจารย์ พันตแพทย์ ดร.ธีระศักดิ์ คำรุ่งเรือง | มหาวิทยาลัยขอนแก่น |
| 39. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คณะ ศีลสัตย์ | มหาวิทยาลัยขอนแก่น |
| 40. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กุลวดี อภิชาติบุตร | มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ |
| 41. รองศาสตราจารย์ ดร.มาลีวัล เลิศสาครศิริ | มหาวิทยาลัยเซนต์หลุยส์ |
| 42. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ผกาวัลย์ พุ่มสุทัศน์ | มหาวิทยาลัยเซนต์หลุยส์ |
| 43. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุวรรณีย์ ละอองปักษิณ | มหาวิทยาลัยเซนต์หลุยส์ |
| 44. รองศาสตราจารย์ ดร.ไพบูรณ์ เกียรติโกมล | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี |
| 45. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิทยา จินตโกวิท | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 46. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นนทลี พรธาดาวิทย์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |
| 47. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภชิพร บุญส่ง | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |
| 48. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุดาพร กุณฑลบุตร | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |
| 49. อาจารย์ ดร.อรวิทย์ อุปลัมภานนท์ | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |
| 50. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เกษญา กิจเกิดแสง | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร |
| 51. อาจารย์ ดร.วิษณุพร เทียบจตุรัส | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร |
| 52. อาจารย์ ดร.มงคลกร ศรีวิชัย | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์ |
| 53. รองศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ บุญหาวัน | มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี |
| 54. รองศาสตราจารย์ ดร.จรัญ มะลูลีม | มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ |
| 55. รองศาสตราจารย์ กิตติ ศิริพิศลภ | มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ |
| 56. รองศาสตราจารย์ ภาวดี สมภักดี | มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ |
| 57. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปกป้อง ศรีสนิท | มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ |
| 58. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พจนานา ชูแปแก้ว | มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ |
| 59. อาจารย์ ดร.เกรียงไกร วัฒนาสวัสดิ์ | มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ |
| 60. อาจารย์ ดร.จันทิมา อังคพนิชกิจ | มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ |
| 61. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิตินัน บุญภาพ คอมมอน | มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์ |
| 62. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วัลย์พร รัตนเศรษฐ | มหาวิทยาลัยธุรกิจบัณฑิตย์ |
| 63. รองศาสตราจารย์ ดร.นิรัช สุขสังข์ | มหาวิทยาลัยนเรศวร |

รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาพนันระดับต้นฉบับ (ต่อ)

- | | |
|--|----------------------|
| 64. อาจารย์ ดร.อิสราวุธ ประเสริฐสังข์ | มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ |
| 65. รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์ประเสริฐ หกสุวรรณ | มหาวิทยาลัยบูรพา |
| 66. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พงษ์เสฐียร เหลืองอลงกต | มหาวิทยาลัยบูรพา |
| 67. อาจารย์ ดร.ปรัชญา แก้วแก่น | มหาวิทยาลัยบูรพา |
| 68. อาจารย์ ดร.ภัทราวดี มากมี | มหาวิทยาลัยบูรพา |
| 69. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาคภูมิ วรรณภา | มหาวิทยาลัยมหาสารคาม |
| 70. ศาสตราจารย์ ดร.พีรพรรณ ต้นอารีย์ | มหาวิทยาลัยมหิดล |
| 71. รองศาสตราจารย์ ดร.เฉลิมพร องค์กร โสภณ | มหาวิทยาลัยมหิดล |
| 72. รองศาสตราจารย์ ดร.โยธิน แสงวงศ์ | มหาวิทยาลัยมหิดล |
| 73. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภูเบศร์ สมุทรจักร | มหาวิทยาลัยมหิดล |
| 74. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรพงษ์ เลิศสิทธิชัย | มหาวิทยาลัยมหิดล |
| 75. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ จรัมพร โห้ดำของ | มหาวิทยาลัยมหิดล |
| 76. ศาสตราจารย์ ทันตแพทย์หญิง ละอองทอง ใจงาม | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 77. ศาสตราจารย์ พลอากาศโท พูนลาภ เอี่ยมเจริญ | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 78. รองศาสตราจารย์ ดร.กฤษณ์ ทอมลิส | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 79. รองศาสตราจารย์ ดร.กฤษดา เกิดดี | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 80. รองศาสตราจารย์ ดร.กาญจนา จันทร์ประเสริฐ | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 81. รองศาสตราจารย์ ดร.กาญจนา สุริยะพรหม | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 82. รองศาสตราจารย์ ดร.ดวงพร สุวรรณกุล | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 83. รองศาสตราจารย์ ดร.ทัศนีย์ ปัญจนาถ | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 84. รองศาสตราจารย์ ดร.ธีระศักดิ์ พิชร์วิภาส | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 85. รองศาสตราจารย์ ดร.พินิจ งามสม | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 86. รองศาสตราจารย์ ดร.ภิรมย์ จันทวาร | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 87. รองศาสตราจารย์ ดร.รุจา ผลสวัสดิ์ | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 88. รองศาสตราจารย์ ดร.วรรณวิมล อารยะปราณี | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 89. รองศาสตราจารย์ ดร.วลัยพร นันทศุภวัฒน์ | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 90. รองศาสตราจารย์ ดร.วิมล ชอบชื่นชม | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 91. รองศาสตราจารย์ ดร.สิริมา กิจวัฒน์ชัย | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 92. รองศาสตราจารย์ นันทชัย ทองแป้น | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 93. รองศาสตราจารย์ ปรกณี พรหมวิทย์ | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 94. รองศาสตราจารย์ ยุพกนิษฐ์ พ่วงวีระกุล | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 95. รองศาสตราจารย์ เขียวลักษณ์ พิมายนอก | มหาวิทยาลัยรังสิต |

รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาพนธ์ต้นฉบับ (ต่อ)

- | | |
|--|-------------------|
| 96. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กนกพร ฉายะบุระกุล | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 97. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.โกวิท รพีพิศาล | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 98. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย จิตรเหล่าอาพร | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 99. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดวงทิพย์ เจริญรักษ์ เฝื่อนนิษิตี | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 100. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนวรรณ อัสวไพบูลย์ | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 101. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นฤพนธ์ ไชยยศ | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 102. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญขันธ์ สุขเขียว | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 103. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุษบา พิพิธพร | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 104. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปถมพร สุกปลั่ง | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 105. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประยูร โคสงวน | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 106. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิยสุดา มา้ว | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 107. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พนิดา สามพรานไพบูลย์ | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 108. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรพิมล หุติศิลป์ | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 109. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พัฒน์ พิสิษฐเกษม | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 110. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เพียงจันทร์ จริงจิตร | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 111. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มงคล เทียนประเทืองชัย | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 112. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รุจาภา แห่งเกษร | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 113. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วราพร ถักยณณม้าย | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 114. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วัลย์ภรณ์ นาคพันธุ์ | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 115. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ กระจุกสู้น | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 116. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิวรรธน์ ปานะสิริพันธ์ | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 117. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จุฑาทิพย์ สามเจริญ | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 118. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริกุล จันทร์สว่าง | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 119. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชนก ภู่อำไพ | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 120. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมชาย เก็กเจริญ | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 121. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.सानนท์ จิรมณี | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 122. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อวิรุทธ์ เจริญทรัพย์ | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 123. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อังคณา พันธุ์หล่อ | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 124. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อารยา มุ่งชำนาญกิจ | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 125. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อำภาพร นามวงศ์พรหม | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 126. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุบล สรรพัญพงษ์ | มหาวิทยาลัยรังสิต |

รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิที่พิจารณานิพนธ์ต้นฉบับ (ต่อ)

- | | |
|--|-------------------|
| 127. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ร้อยคำ เรวโทหญิง ดร. อัจฉราวรรณ ทงณี | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 128. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ญาณวุฒิ สุขขญาญกุล | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 129. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชรรมศักดิ์ เขียวรสกุล | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 130. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประเสริฐ สิริรินาน | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 131. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นทพ. พิสิษฐ์ นามจันทร์ | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 132. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ศิริวรรณ วาสกร | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 133. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เสมอ สอนประสม | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 134. พลอากาศโท ศุภกฤต อริยะปรีชา | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 135. อาจารย์ ดร. กฤษณา ศรีแผ้ว | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 136. อาจารย์ ดร. กัญ อนันตสมบุญ | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 137. อาจารย์ ดร. กัญจน์นิตา สุเขาวินทร์ | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 138. อาจารย์ ดร. กัลยรัตน์ หล่อมณีไพฑูริย์ | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 139. อาจารย์ ดร. เกียรติศักดิ์ อุดมสินโรจน์ | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 140. อาจารย์ ดร. เกียรติศักดิ์ ใหม่เจริญกุล | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 141. อาจารย์ ดร. ฉลองรัฐ เฉอมาลัยหลมารค | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 142. อาจารย์ ดร. ฉัตรวิญญู อังกสิทธิ์ | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 143. อาจารย์ ดร. เฉลิมพร เข็นเขือก | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 144. อาจารย์ ดร. ชิตสุดา ชัยศักดิ์มานุกุล | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 145. อาจารย์ ดร. ชุติรัตน์ เจริญพร | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 146. อาจารย์ ดร. ณกมล จันทร์สม | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 147. อาจารย์ ดร. ดวงฤทัย ศรีแดง | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 148. อาจารย์ ดร. ธีระ เฉษะมณีสถิตย์ | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 149. อาจารย์ ดร. นครเทพ พิทยสุกรายณ์ | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 150. อาจารย์ ดร. นริศรา ภาควิธิ | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 151. อาจารย์ ดร. น้ำอ้อย ก๊กติวงศ์ | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 152. อาจารย์ ดร. นิภา กิมสูงเนิน | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 153. อาจารย์ ดร. นิ่มนวล วิเศษสรพร | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 154. อาจารย์ ดร. ปิยภรณ์ ชูชีพ | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 155. อาจารย์ ดร. พัชรา สุนทรฐิติเจริญ | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 156. อาจารย์ ดร. พิชญ มนต์ปิติ | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 157. อาจารย์ ดร. ไพกานท์ รักษาสุทธิพันธ์ | มหาวิทยาลัยรังสิต |
| 158. อาจารย์ ดร. มณีเพ็ญ อภิบาลศรี | มหาวิทยาลัยรังสิต |

รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณานิพนธ์ต้นฉบับ (ต่อ)

159. อาจารย์ ดร.รัชชก ขำศิริ	มหาวิทยาลัยรังสิต
160. อาจารย์ ดร.รัตพงษ์ สอนสุภาพ	มหาวิทยาลัยรังสิต
161. อาจารย์ ดร.วรุฒม์ เอมอุดม	มหาวิทยาลัยรังสิต
162. อาจารย์ ดร.วันทิกา เกรื่อน้ำคำ	มหาวิทยาลัยรังสิต
163. อาจารย์ ดร.ศรันย์ ธิติลักษณ์	มหาวิทยาลัยรังสิต
164. อาจารย์ ดร.ศรีสมร พุ่มสะอาด	มหาวิทยาลัยรังสิต
165. อาจารย์ ดร.สมพงษ์ หิรัญมาศสุวรรณ	มหาวิทยาลัยรังสิต
166. อาจารย์ ดร.สัญญาพงศ์ ลิ้มประเสริฐ	มหาวิทยาลัยรังสิต
167. อาจารย์ ดร.สันติ กิจลือเกียรติ	มหาวิทยาลัยรังสิต
168. อาจารย์ ดร.สุทธสิศดิ์ จันทวงษ์โส	มหาวิทยาลัยรังสิต
169. อาจารย์ ดร.สุพัฒน์ มูลสิน	มหาวิทยาลัยรังสิต
170. อาจารย์ ดร.สุพัตรา ประดับพงษ์	มหาวิทยาลัยรังสิต
171. อาจารย์ ดร.สุพัตรา วัฒนสาธิตอาภา	มหาวิทยาลัยรังสิต
172. อาจารย์ ดร.สุพินดา เลิศฤทธิ	มหาวิทยาลัยรังสิต
173. อาจารย์ ดร.สุมาลี สว่าง	มหาวิทยาลัยรังสิต
174. อาจารย์ ดร.สุรพล ศรีวิทยา	มหาวิทยาลัยรังสิต
175. อาจารย์ ดร.อรพินท์ จิตควิสุทธิกุล	มหาวิทยาลัยรังสิต
176. อาจารย์ ดร.อาภา หวังเกียรติ	มหาวิทยาลัยรังสิต
177. อาจารย์ ว่าที่ร้อยตรี ดร.ภุชพัฒน์ ชาญกิจ	มหาวิทยาลัยรังสิต
178. อาจารย์ เสรี วังสัไพจิตร	มหาวิทยาลัยรังสิต
179. อาจารย์ต่อศักดิ์ อุทัยไขฟ้า	มหาวิทยาลัยรังสิต
180. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ บัญชา อินทะกุล	มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่
181. อาจารย์ ดร.สุกษิมาณี ศรีเอี่ยม	มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์
182. ศาสตราจารย์ พลตรี ทันทแพทย์ รังษิต บุญคุ้ม	มหาวิทยาลัยเวสเทิร์น
183. อาจารย์ ดร. พุฒวิทย์ บุญนาค	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
184. อาจารย์ ดร.ราชนันท์ บุญธิมา	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
185. รองศาสตราจารย์ ดร.ปิยากร หวังมหาพร	มหาวิทยาลัยศรีปทุม
186. รองศาสตราจารย์ ดร.สกันธ์ กุ้งงามดี	มหาวิทยาลัยศรีปทุม
187. อาจารย์ ดร.อนุพงษ์ อวิรุทธา	มหาวิทยาลัยศรีปทุม
188. รองศาสตราจารย์ ดร.ชัยสิทธิ์ ด้านกิตติกุล	มหาวิทยาลัยศิลปากร
189. รองศาสตราจารย์ ดร.นรินทร์ รัตนจันทร์	มหาวิทยาลัยศิลปากร
190. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไชยยศ ไพวิทยศิริธรรม	มหาวิทยาลัยศิลปากร

รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาพนธัตันฉบับ (ต่อ)

- | | |
|--|--|
| 191. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุษย์ฉวี ชีรวาทย์ | มหาวิทยาลัยศิลปากร |
| 192. อาจารย์ ดร.สิทธิเชษฐ พลเวียง | มหาวิทยาลัยศิลปากร |
| 193. รองศาสตราจารย์ ดร.ทวีศักดิ์ จินตานุรักษ์ | มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมมาธิราช |
| 194. รองศาสตราจารย์ ดร.สมคิด พรหมจู้ | มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมมาธิราช |
| 195. รองศาสตราจารย์ สมพิศ สุขแสน | มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมมาธิราช |
| 196. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มนวิภา วรจิระ | มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมมาธิราช |
| 197. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สังวรณ์ ังคระโท | มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมมาธิราช |
| 198. เรือเอก ดร.อภิสิทธิ์ ทรงบัณฑิตย์ | มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมมาธิราช |
| 199. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.น้ำฝน อัสวมณีน | มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย |
| 200. อาจารย์ ดร.ภาสกร เชื้อสว | มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย |
| 201. อาจารย์ ดร.มานะ ศรีรยาคิววัฒน์ | มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย |
| 202. อาจารย์ ดร.ลลิตา หงษ์รัตนวงศ์ | มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย |
| 203. อาจารย์ ดร.อัศวิน ปสุธรรม | มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย |
| 204. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อรพินท์ สีขาว | มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ |
| 205. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ว่าที่ร้อยตรี ธนวิศิษฎ์ มหพฤทธิไพศาล | มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย |
| 206. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เกษขจรหญิง ดร.สุภารัตน์ จันทร์เหลือง | มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี |
| 207. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภาดา คุปตานนท์ | โรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัยรังสิต |
| 208. รองศาสตราจารย์ ดร.วัลย์ลักษณ์ อัศวธีรวงศ์ | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง |
| 209. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐกร สงคราม | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง |
| 210. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สือพงษ์ ลื่อนาม | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง |
| 211. อาจารย์ ดร.ปณายุ ไชยรัตนานนท์ | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง |
| 212. อาจารย์ ดร.อุกฤษฏ์ วิษริฎทัย | สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง |
| 213. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปราโมทย์ ลื่อนาม | สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์ |
| 214. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พัทริยา นล็กเพ็ชร | สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์ |
| 215. อาจารย์ ดร.พัชรวรรณ นุชประเสริฐ | สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์ |

การควบคุมตำแหน่งของแขนกล 6 แกน ด้วยจลศาสตร์แบบผกผันผ่านระบบเน็ตเวิร์ค

Position Control of 6-Axis Robot Arm Using Inverse Kinematics Through Network

ชัยนเรศ แห้วเพชร^{1*} และ ปรัชญา เปรมปราณีรัชต์²

Chainares Haewphet^{1*} and Pradya Prempraneeerach²

¹นักศึกษาระดับปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ถนนรังสิต-นครนายก ตำบลคลองหก อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12110

²อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ถนนรังสิต-นครนายก ตำบลคลองหก อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12110

^{*1} Graduate student of Mechanical Engineering, Department of Engineering (Mechanical Engineering),

Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi (RMUTT), Pathumthani 12120

² Lecturer of Department of Engineering (Mechanical Engineering), Faculty of Engineering,

Rajamangala University of Technology Thanyaburi (RMUTT), Pathumthani 12120

* Corresponding author, Email: chainaresh@hotmail.com

บทคัดย่อ

การควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่ของแขนกล 6 แกนนั้นเป็นสิ่งที่มีความซับซ้อนต่อการคำนวณอย่างยิ่ง ซึ่งจำเป็นต้องนำหลักการจลศาสตร์แบบผกผันของหุ่นยนต์มาประยุกต์ใช้ร่วมกับการควบคุมแบบ PID เพื่อประยุกต์ใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของตำแหน่งปลายแขนกลผ่านระบบเน็ตเวิร์ค โดยการประดิษฐ์ซอฟต์แวร์เพื่อส่งค่าตำแหน่งเป้าหมายบนพิกัด (X, Y, Z) ของปลายแขนกล ระหว่างคอมพิวเตอร์ควบคุม ซึ่งทำหน้าที่กำหนดตำแหน่งของปลายแขนกล และ คอมพิวเตอร์ประมวลผลซึ่งควบคุมการทำงานจำลองแขนกลโดยตรงที่เชื่อมโยงผ่านระบบเน็ตเวิร์ค

คำสำคัญ: แขนกล 6 แกน การควบคุมตำแหน่ง ระบบเน็ตเวิร์ค

Abstract

The motion control of 6-axis robot arm requires a complicated calculation. Thus, we need to properly apply inverse kinematics, which is one of the important robotic principles, along with PID control technique for controlling the tip of robot arm position through a network system. Moreover, we created a software for sending a desired location (X, Y, Z) of the tip of robot arm through the

network from a controlling computer to a processing computer which can directly control the robot arm model.

Keywords: 6 Axis robot, position control, network system

1. บทนำ

เนื่องจากปัจจุบันในระบบอุตสาหกรรมมีการนำหุ่นยนต์ไปประยุกต์ใช้งานเป็นอย่างมาก และหลากหลายรูปแบบการใช้งานตามแต่สภาพการที่เหมาะสมแก่การใช้งาน เพื่อเพิ่มขีดความสามารถของกระบวนการผลิตในระบบอุตสาหกรรม อาทิเช่นในอุตสาหกรรมรถยนต์ได้นำหุ่นยนต์ หรือแขนกลไปใช้เพื่อเพิ่มอัตราการผลิตชิ้นงานให้ได้เร็ว และมากยิ่งขึ้นด้านอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ได้นำหุ่นยนต์ไปใช้ในการผลิตชิ้นงานที่มีความละเอียดสูงจนเกินกว่าขีดความสามารถของมนุษย์ที่จะทำได้ หรือนำไปผลิตชิ้นงานในระบบอุตสาหกรรมแทนแรงงานคนที่มีต้นทุนการผลิตที่สูงกว่า หรือแม้กระทั่งการนำหุ่นยนต์ไปใช้แทนมนุษย์ในงานอุตสาหกรรมที่มีสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสมกับมนุษย์ที่จะทำงานได้เช่นสายการผลิตที่มีอุณหภูมิสูง หรือที่ๆ มีอากาศไม่ถ่ายเท หรือที่ๆ มีสารเคมีอันตรายเป็นต้น รวมไปถึงจนถึงการนำแขนกลไปใช้งานทางด้านการแพทย์เพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการรักษาผู้ป่วยให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น เช่นการผ่าตัดด้วยแขนกล ซึ่งมีความผิดพลาดน้อยและมีความละเอียดสูง รวมไปถึงจนถึงเทคโนโลยีด้านอวกาศก็มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องอาศัยหุ่นยนต์ช่วยในการประกอบภารกิจต่างๆ ซึ่งเกินกว่าขีดจำกัดของมนุษย์ที่จะทำได้ ดังนั้นความรู้ในเทคโนโลยีหุ่นยนต์จึงมีความจำเป็นอย่างมากทั้งในปัจจุบันและอนาคต

อนึ่งปัจจุบันมนุษย์ได้พัฒนาเทคโนโลยีต่างๆ ขึ้นมาอย่างต่อเนื่องรวมถึงเทคโนโลยีที่ใช้ในการติดต่อสื่อสาร การส่งถ่ายข้อมูลสารสนเทศต่างๆ อย่างเช่นการส่งข้อมูลต่างๆ ผ่านระบบโครงข่ายเน็ตเวิร์คเป็นต้น ทั้งนี้มนุษย์ได้พัฒนาเทคโนโลยีด้านการสื่อสารมาอย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน ทำให้ผู้คนเข้าถึงได้ง่ายและมีต้นทุนในการใช้งานที่ไม่แพงเกินไปจึงเป็นที่ใช้งานกันอย่างแพร่หลายทั่วประเทศทั่วโลก ทั้งนี้ผู้วิจัยจึงได้ตระหนักเห็นถึงคุณค่าและประโยชน์ของการบูรณาการเทคโนโลยีระบบเน็ตเวิร์คและเทคโนโลยีด้านหุ่นยนต์เข้าด้วยกัน เพราะเป็นสิ่งที่จะเข้าถึงได้ง่ายและมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลาย ซึ่งจะนำประโยชน์ในการส่งถ่ายข้อมูลผ่านระบบเน็ตเวิร์คเพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการควบคุมแขนกล 6 แกนผ่านระบบโครงข่ายเน็ตเวิร์ค ซึ่งจะเป็ประโยชน์และความรู้พื้นฐานสู่การพัฒนาเพื่อการควบคุมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่น ที่อยู่ทั่วทุกมุมโลกผ่านทางระบบเน็ตเวิร์ค

ซึ่งงานวิจัยนี้จะรวบรวมองค์ความรู้ที่เกี่ยวข้องกับความรู้ทางการควบคุมตำแหน่งของแขนกล 6 แกนไว้ในหัวข้อที่ 3 โดยจะอธิบายถึงหลักการคำนวณทางจลศาสตร์ของระบบหุ่นยนต์ โดยเฉพาะแขนกลแบบอนุกรม อาทิเช่น ทฤษฎีจลศาสตร์แบบไปข้างหน้า (Forward Kinematic), จลศาสตร์แบบผกผัน (Inverse Kinematic) และจาโคเบียน (Jacobian) เป็นต้น ซึ่งเป็นหลักการสำคัญที่ใช้ในการควบคุมตำแหน่งของแขนกลให้เคลื่อนที่ไปในตำแหน่งที่ต้องการ โดย

ได้พัฒนาระบบจลศาสตร์ในซอฟต์แวร์ MATLAB เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการคำนวณให้มีความรวดเร็วและแม่นยำเพื่อใช้ในการศึกษาการควบคุมการเคลื่อนที่ไปสู่ตำแหน่งๆ และในหัวข้อที่ 4 นั้นได้อธิบายเรื่องการส่งถ่ายข้อมูลผ่านระบบเน็ตเวิร์ค โดยการประดิษฐ์ซอฟต์แวร์เพื่อใช้ในการส่งค่าข้อมูลระหว่างคอมพิวเตอร์ของผู้ควบคุม และแขนกล 6 แกนผ่านโครงข่ายเน็ตเวิร์ค และยังได้รวบรวมข้อมูลพร้อมกับการประดิษฐ์โปรแกรมเพื่อควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่ของแขนกล 6 แกน โดยใช้ซอฟต์แวร์ Visual Studio.NET มาประยุกต์เข้ากับการส่งข้อมูลตำแหน่งของแขนกล 6 แกน ผ่านระบบเน็ตเวิร์คซึ่งประกอบด้วยคอมพิวเตอร์ควบคุมซึ่งผู้ปฏิบัติการ (User) จะเป็นผู้ป้อนคำสั่งของตำแหน่งแขนกลบนพิกัด (X,Y,Z) และส่งคำสั่งไปยังคอมพิวเตอร์ที่ควบคุมแขนกล 6 แกน ผ่านระบบโครงข่ายเน็ตเวิร์คด้วยซอฟต์แวร์ และในหัวข้อที่ 5 และ 6 ได้แสดงผลการทดสอบและวิเคราะห์การควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกลแบบ 6 แกนผ่านระบบโครงข่ายเน็ตเวิร์ค ซึ่งเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

วินุชย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ (2551) ได้เสนอระบบแขนกลแบบนำตาม หรือระบบควบคุมระยะไกล 6 องศาอิสระ สำหรับทำงานขนาดเล็กทั่วไป ซึ่งการออกแบบโดยใช้โครงสร้างแบบอนุกรม และสามารถสับเปลี่ยนรูปแบบการทำงานได้เป็นสองแบบคือ การเคลื่อนที่แบบหยาบ และแบบละเอียดเพื่อให้สามารถปรับเลือกให้เหมาะสมกับการใช้งาน ผู้วิจัยได้ใช้แขนกลนำแฟนท่อม ออมนิ (Phantom Omni) ซึ่งมีอุปกรณ์ตรวจวัดมุมของการเคลื่อนที่ 6 องศาอิสระได้ ซึ่งเพียงพอต่อการระบุตำแหน่ง เพื่อควบคุมแขนกลตามซึ่งความแม่นยำมีความแตกต่างกันตามลักษณะการเคลื่อนที่ของแขนกล โดยมีความผิดพลาดไม่เกิน 1 มิลลิเมตร และความผิดพลาดดังกล่าวอาจชดเชยได้โดยการบังคับของผู้ใช้งาน

พรพรด จันทรทัต (2555) ได้เสนอการพัฒนาซอฟต์แวร์สำหรับการควบคุมแขนกลแบบ 5 องศาอิสระติดตั้งบนรถเข็นคนพิการ ซึ่งผู้พิการสามารถควบคุมการทำงานผ่านสวิทช์ ซึ่งจะแบ่งการทำงานเป็นสามส่วน คือส่วนแรกเป็นการระบุตำแหน่ง ส่วนที่สองเป็นการกำหนดแผนการเคลื่อนที่ และส่วนที่สามคือการออกแบบเพื่อความปลอดภัย ซึ่งแขนกลสามารถเคลื่อนเข้าหาตำแหน่งเป้าหมายได้ โดยมีค่าความผิดพลาดไม่เกิน 5.5 มิลลิเมตร

ทวิเดช ศิริธนาพิพัฒน์ (2552) ได้ศึกษาเปรียบเทียบการควบคุมระบบแบบเปิด-ปิด และ แบบ PID ในชุดฝึกอบรมควบคุม ซึ่งพบว่าการควบคุมกระบวนการด้วยการควบคุมแบบ PID จะสามารถรักษาเสถียรภาพของอัตราการไหล และอุณหภูมิ ได้ดีกว่าการควบคุมกระบวนการแบบเปิด-ปิด

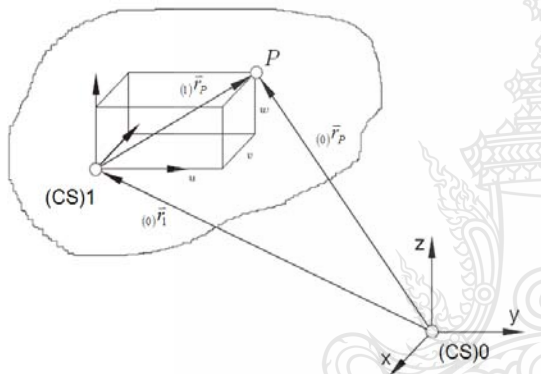
Prempraneerach (2010) ได้ทำการศึกษาการควบคุมแขนกล OWI-353 แบบ 5 แกน โดยการประยุกต์ใช้ Jacobian pseudo-inverse ($J^{\#}$) และ Jacobian singularity robust inverse (J^*) ซึ่งพบว่าการใช้ Jacobian pseudo-inverse เพื่อกำหนดจลศาสตร์แบบผลผันของแขนกล 5 แกนนั้น อาจมีบางจุดที่ทำให้เกิด Singularity ได้ แต่จะสามารถป้องกันการเกิด Singularity ได้โดยการประยุกต์ใช้ Jacobian singularity robust inverse กับแขนกล 5 แกน

2. วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาและออกแบบการควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่ของปลายแขนกล 6 แกนโดยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และประยุกต์ใช้สมการจลศาสตร์แบบผลผันร่วมกับการควบคุมแบบ PID เพื่อให้ปลายแขนกลเคลื่อนที่เข้าหาจุดพิกัดที่ต้องการ และประดิษฐ์โปรแกรมเพื่อกำหนดตำแหน่งของปลายแขนกล 6 แกนผ่านระบบเน็ตเวิร์ค

3. สมการเพื่อการคำนวณตำแหน่งของแขนกล

เนื่องจากการที่จะควบคุมแขนกลให้ปลายแขนสามารถเคลื่อนที่ไปสู่ตำแหน่งต่างๆ ที่ต้องการ ได้นั้นจะต้องอาศัยหลักการทางจลศาสตร์ และพลศาสตร์ เมื่อการเคลื่อนที่นั้นใช้ความเร็วต่ำ และสูงตามลำดับ เพื่อคำนวณหาตำแหน่งต่างๆ ของแต่ละแกนของหุ่นยนต์ที่เคลื่อนที่ไปในระบบพิกัด (X, Y, Z) โดยใช้เวกเตอร์เพื่อจะช่วยให้ระบุได้ทั้งขนาดและทิศทางในการเคลื่อนที่ของแขนกล



รูปที่ 1 การบอกตำแหน่งในการเคลื่อนที่ด้วยเวกเตอร์

จากรูปที่ 1 สามารถเขียนความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบเวกเตอร์ได้ดังนี้

$${}^{(0)}\vec{r}_p = {}^{(0)}\vec{r}_1 + {}^{(0)}\vec{r}_{1p} \quad (1)$$

$${}^{(0)}\vec{r}_p = {}^{(0)}\vec{r}_1 + {}^{01}R_{(1)}\vec{r}_p \quad (2)$$

$${}^{01}R = [{}^{(0)}e_x \times {}^{(0)}e_y \times {}^{(0)}e_z] \quad (3)$$

$$({}^{01}R)^{-1} = ({}^{01}R)^T = ({}^{10}R) \quad (4)$$

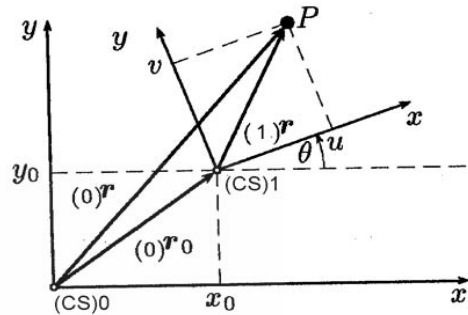
เมื่อ

R คือ เมตริกซ์การหมุน (Rotation Matrix)

\vec{r} คือ เวกเตอร์ระยะกระจัด

e คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วย

เมื่อหุ่นยนต์มีการเคลื่อนที่ทั้งแบบเลื่อนและแบบหมุน ในการอธิบายการเคลื่อนที่ในระบบพิกัด (X,Y,Z) ด้วยเมตริกซ์ จะช่วยลดความซับซ้อนในการคำนวณ โดยจะสามารถจัดให้อยู่ในรูปแบบเมตริกซ์การแปลงพิกัดได้ ดังแสดงในสมการที่ (5) และในรูปที่ 2 นี้



รูปที่ 2 การระบุตำแหน่ง และการหมุน

โดยสามารถระบุตำแหน่งของจุด P ใดๆ เทียบกับจุดอ้างอิงเมื่อคูณด้วยเมตริกซ์การแปลงพิกัด (T) ได้ดังนี้ (Bruno Siciliano, Lorenzo, Luigi Villani & Giuseppe Oriolo, 2009)

$$T_1^0 = \begin{bmatrix} R_{3 \times 3} & \vec{r}_{3 \times 1} \\ f_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^{01}R & {}^{(0)}\vec{r}_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

เมื่อ

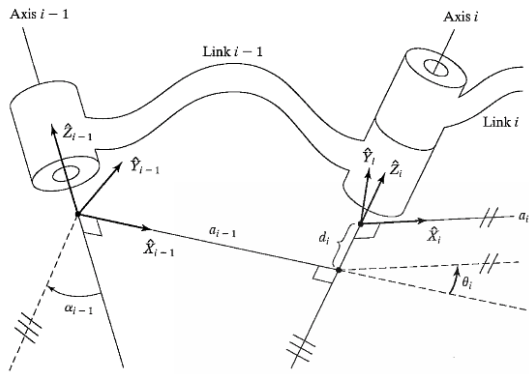
${}^{01}R$ คือ เมตริกซ์การหมุน (Rotation matrix) จากแกนที่ 0 ไปยังแกนที่ 1

${}^{(0)}\vec{r}_1$ คือ เวกเตอร์การเคลื่อน (Translation Vector) จากแกนที่ 0 ไปยังแกนที่ 1

$f_{1 \times 3} = [0 \ 0 \ 0]$ คือ เวกเตอร์มิติที่ 4 ช่วยการแปลงพิกัด และระบบที่มีจุดอ้างอิงอยู่หลายจุด จะสามารถที่จะใช้หลักการแปลงพิกัดแบบ Homogeneous ดังแสดงในสมการที่ (6) มาใช้เพื่อระบุตำแหน่งของปลายก้านโยงสุดท้ายเมื่อเทียบกับกรอบอ้างอิงเริ่มต้น

$$T_i^0 = T_1^0 T_2^1 \dots T_{i-1}^{i-2} T_i^{i-1} \quad (6)$$

จากนั้นจะต้องอาศัยหลักการนำเสนอพารามิเตอร์ของ Denavit Hartenberg มาช่วยในการวิเคราะห์หาเมตริกซ์การแปลงพิกัด เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณหาตำแหน่งของแต่ละก้านโยงของแขนกล ซึ่งจำเป็นที่จะต้องตั้งแกนของแต่ละจุดต่อ ที่กำหนดเป็นจุด i และ i-1 พร้อมกับการสร้างตาราง Denavit Hartenberg เพื่อกำหนดค่า α_i, a_i, d_i และ θ_i ในแต่ละแกนการหมุนของแขนกล



รูปที่ 3 การตั้งแกนโดยใช้การนำเสนอแบบ Denavit Hartenberg (John J. Craig, 2004)

เมตริกซ์การแปลงพิกัด ระหว่างแกน โยงที่ i และ i-1 โดยอาศัยหลักการของ Denavit Hartenberg ได้ดังนี้

$$T_i^{i-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

เมื่อ a_i คือ ระยะห่างระหว่างแกน z_i และ z_{i-1} ตามแนวแกน x_i

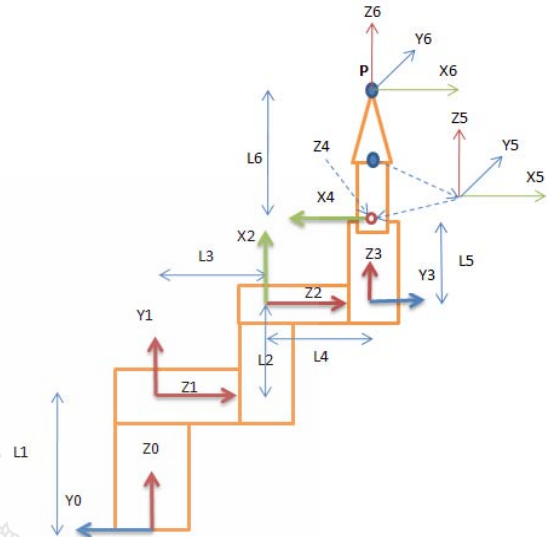
d_i คือ ระยะห่างระหว่างแกน x_i และ x_{i-1}

ตามแนวแกน z_{i-1}

α_i คือ มุมระหว่างแกน z_i และ z_{i-1}

θ_i คือ มุมระหว่างแกน x_i และ x_{i-1}

ในรูปที่ 4 ได้แสดงการตั้งแกนของแขนกลแบบ 6 แกนที่ใช้ในการทดลอง โดยใช้หลักการของ Denavit Hartenberg เพื่อสร้างแบบจำลองทางจลศาสตร์ของแขนกล 6 แกน โดยกำหนดให้แกน Z ของแต่ละแกนเป็นแกนหมุน และนำข้อมูลที่ได้ออกการตั้งแกนไปวิเคราะห์เพื่อทำการสร้างตาราง Denavit Hartenberg ดังในตารางที่ 1



รูปที่ 4 การกำหนดแกนของแขนกล 6 แกน

ตารางที่ 1 Denavit-Hartenberg สำหรับแขนกล 6 แกน

i	α_i	a_i	d_i	θ_i
1	90	0	L_1	q_1
2	0	L_2	L_3	q_2
3	90	0	L_4	q_3
4	90	0	L_5	q_4
5	-90	0	0	q_5
6	0	0	L_6	q_6

เมื่อนำค่าที่ได้จากตารางที่ 1 ไปแทนลงในเมตริกซ์การแปลงพิกัดจะได้ดังนี้

$$T_1^0 = \begin{bmatrix} \cos q_1 & 0 & \sin q_1 & 0 \\ \sin q_1 & 0 & -\cos q_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & L_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_2^1 = \begin{bmatrix} \cos q_2 & -\sin q_2 & 0 & L_2 \cos q_2 \\ \sin q_2 & \cos q_2 & 0 & L_2 \sin q_2 \\ 0 & 0 & 1 & L_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_3^2 = \begin{bmatrix} \cos q_3 & 0 & \sin q_3 & 0 \\ \sin q_3 & 0 & -\cos q_3 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & L_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_4^3 = \begin{bmatrix} \cos q_4 & 0 & \sin q_4 & 0 \\ \sin q_4 & 0 & -\cos q_4 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & L_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_5^4 = \begin{bmatrix} \cos q_5 & 0 & -\sin q_5 & 0 \\ \sin q_5 & 0 & \cos q_5 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_6^5 = \begin{bmatrix} \cos q_6 & -\sin q_6 & 0 & 0 \\ \sin q_6 & \cos q_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

โดยอาศัยหลักการ Homogeneous transformation จะได้สมการจลศาสตร์ไปข้างหน้า (Forward Kinematic) ของปลายแขนกล 6 แกน ซึ่งตำแหน่งของปลายแขนกลจะเป็นฟังก์ชันที่แสดงโดยเมตริกซ์ ดังในสมการที่ (7) (Reza N.Jazar, 2010)

$$T_6^0 = T_1^0 T_2^1 T_3^2 T_4^3 T_5^4 T_6^5 \quad (7)$$

ในส่วนการคำนวณจลศาสตร์แบบผกผัน (Inverse Kinematic) ของแขนกล 6 แกน จะอาศัยหลักการคำนวณหาจาโคเบียน (Jacobian) ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงเส้นของปลายแขนและความเร็วเชิงมุมของแต่ละข้อต่อ ดังแสดงในสมการที่ (8) (Mark W. Spong, Seth Hutchinson, and M.Vidyasagar, 2005)

$$\dot{x}_6 = J(q)\dot{q} \quad (8)$$

โดยที่

$$J(q) = \frac{\partial f}{\partial q} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial q_1} & \frac{\partial f}{\partial q_2} & \dots & \frac{\partial f}{\partial q_6} \end{bmatrix} \quad (9)$$

เมื่อ

$f = T_6^0 [x_0 \ y_0 \ z_0]^T$ คือ เวกเตอร์ตำแหน่งปลายแขนกลหรือก้านโยงที่ 6

$\dot{q} = [\dot{q}_1 \ \dot{q}_2 \ \dots \ \dot{q}_6]^T$ คือ เวกเตอร์ความเร็วเชิงมุมของแต่ละข้อต่อ

$\dot{x}_6 = \begin{bmatrix} \dot{x}_6 & \dot{y}_6 & \dot{z}_6 \end{bmatrix}^T$ คือ เวกเตอร์ความเร็วเชิงเส้นของปลายแขนกลหรือปลายก้านโยงที่ 6

เพื่อหาจลศาสตร์แบบผกผันในเชิงตัวเลข

(Numerical Inverse Kinematic) นั้นจะสามารถกระทำได้โดยการหาเมตริกซ์ผกผันของจาโคเบียน (J^{-1}) แล้วนำมาคูณกับการเปลี่ยนแปลงของตำแหน่งปลายแขนกล (Δx_6) เพื่อคำนวณหาการเปลี่ยนแปลงมุมการหมุนของแต่ละข้อต่อ (Δq) ดังในสมการที่ (10)

$$dq = J^{-1}(q)dx_6 \quad (10)$$

หรือ

$$\Delta q \approx J^{-1}(q)\Delta x_6 \quad (11)$$

โดยที่

$$\Delta x_6 = (x_6(t+1) - x_6(t)) \quad (12)$$

เมื่อ

$x_6(t+1)$ คือ ตำแหน่งของปลายแขนกลที่เวลา $t+1$

$x_6(t)$ คือ ตำแหน่งของปลายแขนกลที่เวลาปัจจุบัน t

จากสมการ (11) การคำนวณหา J^{-1} สามารถใช้ Jacobian pseudo-inverse ($J^\#$) ในสมการที่ (13) แต่อาจมีบางตำแหน่งที่ไม่สามารถหาค่า J^{-1} ได้ เนื่องจากเกิดสถานะเอกฐาน (Singularity) ในบางรูปแบบในการเคลื่อนที่ของก้านโยงต่างๆ แต่จะสามารถป้องกันการเกิด Singularity ได้โดยการใช้ Jacobian singularity robust inverse (J^*) ในกรณีที่ไม่สามารถหาค่า $J^\#$ ได้ ดังแสดงในสมการที่ (14) (Prempraneerach, P, 2010)

$$J^\# = J^T (JJ^T)^{-1} \quad (13)$$

$$J^* = J^T (JJ^T + kI)^{-1} \quad (14)$$

เมื่อ J^* คือ Jacobian singularity robust inverse

k คือ ค่าคงตัวที่เป็นบวกและมีค่าน้อยๆ

I คือ เมตริกเอกลักษณ์

การควบคุมตำแหน่งของปลายแขนกลด้วยการควบคุมแบบ PID เป็นการรวมการควบคุมแบบสัดส่วน (K_p) แบบอินทิกรัล (K_i) และแบบอนุพันธ์เข้าด้วยกัน (K_d) โดยนำค่าความผิดพลาด $e(t)$ มาใช้เพื่อปรับค่าสัญญาณขาเข้า โดยตัวควบคุมจะพยายามลดค่าผิดพลาดให้เหลือน้อยลงด้วยการปรับค่าสัญญาณขาเข้าของกระบวนการ ดังแสดงในสมการ (15) (Karl Johan Aström & Richard M. Murray, 2009)

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (15)$$

ทดลองหาค่าจลศาสตร์แบบผกผันโดยการใช้ตัวควบคุมแบบสัดส่วน และให้ค่าความผิดพลาดของปลายแขนกลที่เวลาใดๆ มีค่าเป็น $e(t)$ ดังแสดงในสมการที่ (16)

$$e(t) = x_s - x_6(t) \quad (16)$$

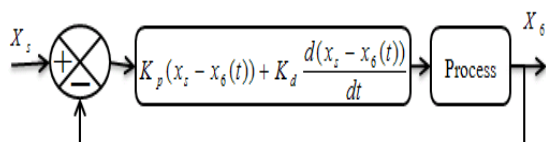
เมื่อ $x_6(t)$ คือ ตำแหน่งของปลายแขนกล

x_s คือ ตำแหน่งเป้าหมายของปลายแขนกล

ดังนั้นจะได้สัญญาณการควบคุมแขนกลในสมการที่ (17)

$$u(t) = K_p (x_s - x_6(t)) + K_d \frac{d(x_s - x_6(t))}{dt} \quad (17)$$

สามารถเขียน Flow Chart ของการควบคุม ดังแสดงในรูปที่ 5



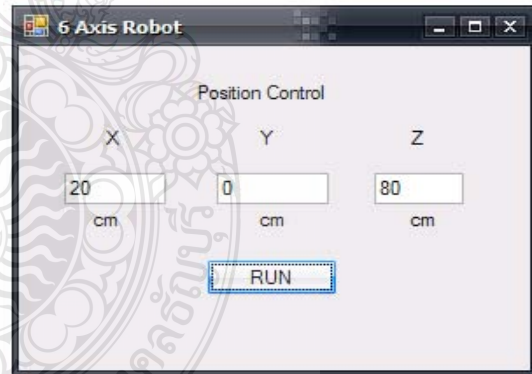
รูปที่ 5 Flow Chart การควบคุมแขนกลด้วยตัวควบคุมสัดส่วน

ทำการทดสอบการเคลื่อนที่ของแขนกลตามขั้นตอนตามรูปที่ 5 โดยการสร้างแบบจำลองทาง

คณิตศาสตร์ด้วย MATLAB โดยการปรับค่าตัวควบคุม ขยายสัดส่วน เพื่อศึกษาลักษณะการเคลื่อนที่ของแขนกล

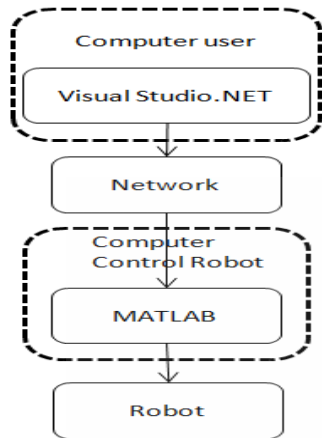
4. การควบคุมแขนกล 6 แกนผ่านเน็ตเวิร์ค

การส่งคำสั่งการควบคุมตำแหน่งของปลายแขนกล 6 แกน ผ่านระบบเน็ตเวิร์ค โดยการส่งคำสั่งตำแหน่งของปลายแขนกล โดยอาศัยการทำงานร่วมกันระหว่างซอฟต์แวร์ Visual Studio.NET และ MATLAB ซึ่งการเชื่อมโยงการทำงานนั้น จะแบ่งส่วนของการทำงาน โดยใช้ Visual Studio.NET กำหนดและส่งค่าเป้าหมายการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลผ่านโครงข่ายเน็ตเวิร์คไปยัง MATLAB จากนั้น MATLAB จะทำการประมวลผลเพื่อคำนวณหาองศาการหมุนของแต่ละข้อต่อจากสมการจลศาสตร์แบบผกผันในสมการที่ (11) ภายใต้การควบคุมแบบ PID Control



รูปที่ 6 โปรแกรมควบคุมตำแหน่งของปลายแขนกลด้วย Visual Studio.NET

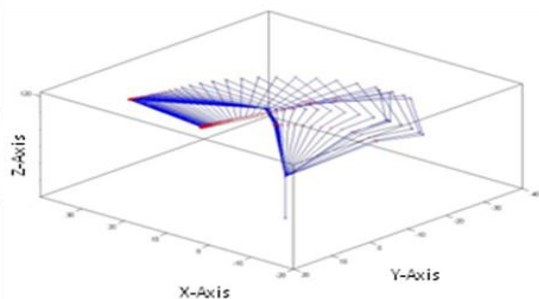
โดยหลักการสำคัญของการทำงานของ Visual Studio.NET จะส่งคำสั่งของตำแหน่งแขนกลไปในรูปแบบของ Text File ซึ่งจะประกอบด้วยตำแหน่งของปลายแขนกลบนพิกัด (X, Y, Z) และ MATLAB จะทำการอ่านค่าพิกัดที่ระบุไว้ใน Text File ที่ส่งมาผ่านระบบเน็ตเวิร์ค ซึ่งกระบวนการส่งถ่ายข้อมูลการควบคุมแขนกล จะทำงานตามขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 7



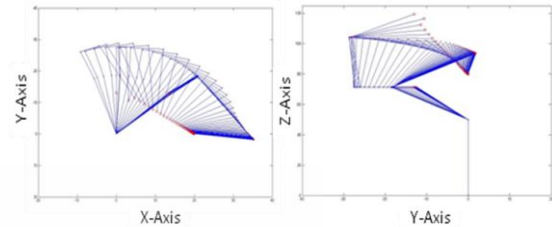
รูปที่ 7 ขั้นตอนการส่งค่าตำแหน่งแขนกลผ่านเน็ตเวิร์ค

5. ผลการวิจัยและข้อวิจารณ์

จากผลการทดลองพบว่า เมื่อมีการป้อนคำสั่งให้ปลายแขนกลเคลื่อนที่ไปในพิกัด (X,Y,Z) ลงบนหน้าต่างโปรแกรม Visual Studio.NET จากนั้นค่าพิกัดปลายแขนกลจะถูกส่งผ่านเน็ตเวิร์คไปยังโปรแกรม MALAB เพื่อประมวลผลการคำนวณจลศาสตร์ของแขนกล 6 แกน จากการทดลองพบว่า เมื่อมีการส่งข้อมูลจากโปรแกรม Visual Studio.NET โดยคอมพิวเตอร์เครื่องส่งการไปยังโปรแกรม MATLAB ที่ได้ติดตั้งอยู่บนคอมพิวเตอร์เครื่องรับนั้น จะเริ่มประมวลผลการคำนวณสมการจลศาสตร์หลังจากที่ป้อนคำสั่งประมาณไม่เกิน 0.5 วินาที จึงแสดงให้เห็นว่าคอมพิวเตอร์ทั้งสองเครื่องสามารถทำงานร่วมกันได้ โดยการเชื่อมโยงการทำงานผ่านระบบเน็ตเวิร์คระหว่าง คอมพิวเตอร์ส่งการ กับคอมพิวเตอร์ควบคุมแขนกลได้จริง ตามที่ได้ออกแบบไว้

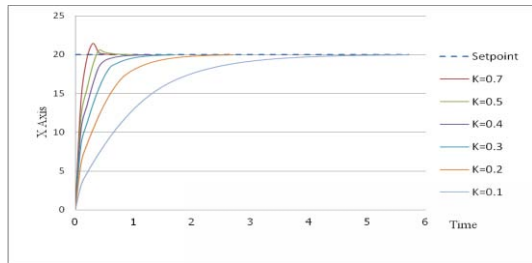


รูปที่ 8 การเคลื่อนที่ของแขนกล 6 แกนบนพิกัด XYZ

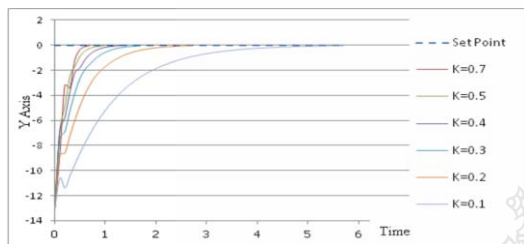


รูปที่ 9 การเคลื่อนที่ของแขนกล 6 แกนบนระนาบ XY และ YZ

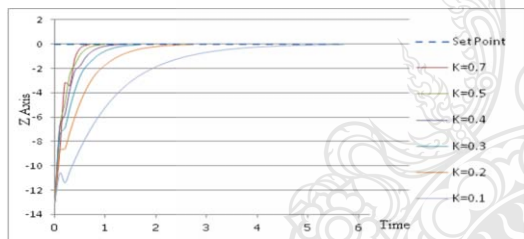
ในรูปที่ 8 แสดงการเคลื่อนที่ของแขนกลในแบบสามมิติจากจุดเริ่มต้นที่พิกัด (0, -13, 119.5) ไปยังจุดสุดท้ายที่พิกัด (20, 0, 80) เมื่อพิจารณาการเคลื่อนที่ในช่วงเริ่มต้น ของการเคลื่อนที่ของแขนกล ดังในรูปที่ 8 และ 9 จะพบว่าระยะการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลที่เวลา t และ $t+1$ นั้นจะมีค่ามาก เนื่องจากค่า $\Delta \mathbf{x}_6$ ที่มีค่ามากในช่วงเริ่มต้นของการเคลื่อนที่ จะส่งผลให้มุมการหมุนของแต่ละแกน Δq มีค่า มากตามไปด้วย ซึ่งจะสอดคล้องกับสมการ $\Delta q \approx J^{-1}(q)\Delta x$ และจากผลการจำลองทางคณิตศาสตร์พบว่า $\Delta \mathbf{x}_6$ นั้นจะสอดคล้องกับการเคลื่อนที่ของแขนกลในแบบสามมิติ โดยจะมีค่าความผิดพลาดตอนเริ่มต้นที่มีค่ามากและตำแหน่งของปลายแขนจะคู่เข้าพิกัดเป้าหมายทั้งในแกน X, Y และ Z ดังแสดงในรูปที่ 8 และ 9 หรือการเคลื่อนที่ของแขนกลในช่วงแรกนั้นจะเข้าหาเป้าหมายได้รวดเร็ว และจะค่อยๆ ช้าลงเมื่อเข้าใกล้เป้าหมายมากขึ้น และตำแหน่งสุดท้ายของการเคลื่อนที่จะมีค่าความผิดพลาดจากตำแหน่งเป้าหมายไม่เกิน 1 มิลลิเมตร ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนที่น้อยกว่า เมื่อเทียบกับงานวิจัยของ พรพรด จันทรทัต (2555) ที่ได้เสนอการพัฒนาซอฟต์แวร์สำหรับการควบคุมแขนกลแบบ 5 องศาอิสระที่มีค่าความคลาดเคลื่อนจากตำแหน่งเป้าหมายอยู่ที่ 5.5 มิลลิเมตร ซึ่งความแตกต่างของความคลาดเคลื่อน อาจเป็นผลจากการประยุกต์ใช้ระบบควบคุม PID เข้ากับแขนกล 6 แกนซึ่งจะช่วยปรับค่าความผิดพลาดให้ลดลงได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 10 การเคลื่อนที่ของปลายแขนกลเข้าหาจุดที่กีดเป้าหมายในมิติ X



รูปที่ 11 การเคลื่อนที่ของปลายแขนกลเข้าหาจุดที่กีดเป้าหมายในมิติ Y



รูปที่ 12 การเคลื่อนที่ของปลายแขนกลเข้าหาจุดที่กีดเป้าหมายในมิติ Z

และจากการทดลองใช้ค่าการควบคุมอัตราขยายสัดส่วน เป็น 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 และ 0.6 ตามลำดับ พบว่าการใช้ค่าการควบคุมแบบสัดส่วนที่มีค่าน้อย ($k = 0.1, 0.2$) จะส่งผลให้ปลายแขนกลเคลื่อนที่เข้าหาตำแหน่งเป้าหมายได้ช้า ซึ่งจะใช้เวลาในการเข้าหาตำแหน่งเป้าหมาย ดังแสดงในรูปที่ 10, 11 และ 12 ดังนั้นจึงได้ทำการปรับค่าการควบคุมอัตราขยายสัดส่วนให้มีค่าสูงขึ้น ($k = 0.5, 0.6$) พบว่าแขนกลจะเคลื่อนที่เข้าหาเป้าหมายได้เร็วขึ้น หรือ ค่าความผิดพลาดของตำแหน่งลดลงอย่างรวดเร็ว แต่จะก่อให้เกิดการ Over Shoot ซึ่งจะทำให้แขนกลเคลื่อนที่เลยตำแหน่งเป้าหมาย และแกว่งไปมาก่อนเข้าหาตำแหน่งเป้าหมาย ซึ่งไม่เหมาะสมกับการนำไปใช้งาน

ที่ต้องการความแม่นยำสูง จากผลการทดลองพบว่าค่าการควบคุมอัตราขยายสัดส่วนที่เหมาะสมสำหรับแขนกล ควรอยู่ระหว่าง 0.3-0.4 ซึ่งทำให้การเคลื่อนที่ไม่ช้าเกินไป และไม่ทำให้เกิดปัญหา Over Shoot ขึ้น ซึ่งปลายแขนกลจะลู่เข้าหาตำแหน่งเป้าหมายได้อย่างรวดเร็ว แม่นยำ และลดค่าความผิดพลาดให้น้อยได้อย่างมีประสิทธิภาพ

6. บทสรุป

การควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกล 6 แกนผ่านเน็ตเวิร์คสามารถทำได้โดยอาศัยการเชื่อมโยงการทำงานร่วมกัน ระหว่างคอมพิวเตอร์สั่งการซึ่งมีโปรแกรม Visual Studio.NET ส่งค่าพิกัดเป้าหมายการเคลื่อนที่ผ่านระบบเน็ตเวิร์คในรูปของ Text File และคอมพิวเตอร์ที่ใช้ควบคุมแขนกลจะรับค่าพิกัดเป้าหมายและประมวลผลด้วยโปรแกรม MATLAB เพื่อควบคุมให้แขนกลเคลื่อนที่ไปยังเป้าหมายที่ระบุไว้ โดยอาศัยหลักการทางจลศาสตร์ เพื่อนำมาคำนวณหาตำแหน่งแบบเป็นขั้น (incremental position control) และควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกลด้วยระบบควบคุมแบบ PID ซึ่งทำให้แขนกลเคลื่อนที่เข้าหาตำแหน่งเป้าหมายได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งตำแหน่งสุดท้ายของการเคลื่อนที่นั้นจะมีค่าผิดพลาดไม่เกิน 1 มิลลิเมตร จากตำแหน่งเป้าหมาย

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณทางมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ได้ให้การสนับสนุนการทำวิจัยครั้งนี้

8. เอกสารอ้างอิง

ทวีเดช ศิริธนาพิพัฒน์. (2552). การควบคุมระบบแบบ

- เปิด-ปิด และแบบ PID ในชุดฝึกระบบควบคุม การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23 พฤศจิกายน 2552. จังหวัดเชียงใหม่.
- พรพรด จันทร์ทัด. (2555). การพัฒนาซอฟต์แวร์ควบคุมแขนกลเพื่อคนพิการ. การประชุมทางวิชาการระดับชาติ ด้านคอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ ครั้งที่ 8 ปี 2555. จังหวัดชลบุรี.
- วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ. (2551). ระบบแขนกลนำและตาม 6 องศาอิสระสำหรับงานขนาดเล็ก. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 22 ประจำปี 2551. มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต.
- Bruno Siciliano, Lorenzo, Luigi Villani & Giuseppe Oriolo. (2009). Robotics Modelling Planning and Control. Springer ISBN: 978-1-84628-641-4
- John J. Cragg. (2004). Introduction to Robotics Mechanical and Control, International Edition. Third Edition. Pearson Prentice Hall, Pearson Education International. ISBN 0-13-123629-6.
- Karl Johan Aström & Richard M. Murray. (2009). Feedback Systems. Princeton University Press New Jersey. ISBN-13: 978-0-691-13576-2 .
- Mark W. Spong, Seth Hutchinson, and M. Vidyasagar. (2005). Robot Modeling and Control. JOHN WILEY & SONG, INC. ISBN: 978-0-471-64990-8
- Prempraneerach, P. (2010). Implementation of Resolved Motion Rate Controller with 5-Axis Robot Manipulator Arm. The First TSME International Conference on Mechanical Engineering 20-22 October, 2010, Ubon Ratchathani.
- Reza N. Jazar. (2010). Theory of Applied Robotics Kinematics, Dynamics and control. Springer New York Dordrecht Heidelberg London. ISBN 978-1-4419-1749-2.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	นายชันเรศ แห้วเพชร
วัน เดือน ปีเกิด	8 กันยายน 2528
การศึกษา	ปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยศิลปากร
ประวัติการทำงาน	เป็นวิศวกรออกแบบระบบอัตโนมัติ ที่บริษัท บอยด์ เทคโนโลยี (ประเทศไทย) จำกัด 700/677 ม.7 ต.ดอนหัวฬ่อ อ.เมือง จ.ชลบุรี 2000, 2557-ปัจจุบัน
เบอร์โทรศัพท์	081-0457556
อีเมล	chainaresh@hotmail.com

