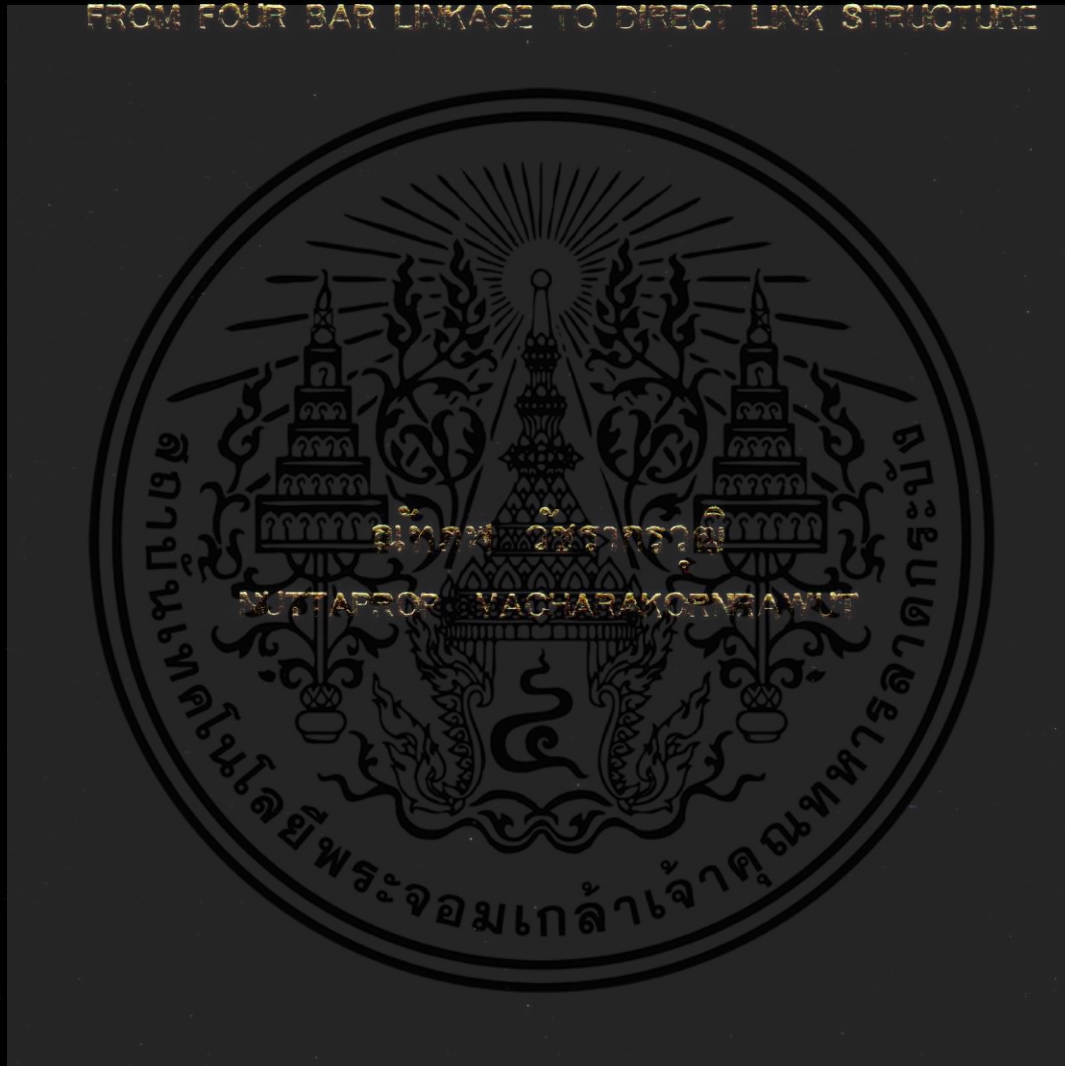


เมทริกซ์การย้ายบนพื้นฐานหลักการ DH
สำหรับการแทนที่หุ่นยนต์โครงสร้างกลไกสี่ข้อต่อ ด้วย โครงสร้างข้อต่อตรง

DH-BASED TRANSFORMATION MATRIX FOR ROBOT REPLACEMENT
FROM FOUR BAR LINKAGE TO DIRECT LINK STRUCTURE



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอัตโนมัติ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2559

KMITL-2016-EN-M-257-116

เมทริกซ์การย้ายบนพื้นฐานหลักการ DH
สำหรับการแทนที่หุ่นยนต์โครงสร้างกลไกสี่ข้อต่อ ด้วย โครงสร้างข้อต่อตรง

DH-BASED TRANSFORMATION MATRIX FOR ROBOT REPLACEMENT
FROM FOUR BAR LINKAGE TO DIRECT LINK STRUCTURE



ณัทภพ วัชรการวุฒิ

NUTTAPROP VACHARAKORNRAWUT

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอัตโนมัติ

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

DH-BASED TRANSFORMATION MATRIX FOR ROBOT REPLACEMENT
FROM FOUR BAR LINKAGE TO DIRECT LINK STRUCTURE



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN AUTOMATION ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2016

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ เมทริกซ์การย้ายบนพื้นฐานหลักการ DH สำหรับการแทนที่หุ่นยนต์โครงสร้างกลไกสี่ข้อต่อ
ด้วยโครงสร้างข้อต่อตรง
Thesis Title DH-Based Transformation Matrix for Robot Replacement from Four Bar
Linkage to Direct Link Structure
นักศึกษ นายณัทภพ วัชรการวุฒิ
รหัสประจำตัว 54613452
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมอัตโนมัติ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.ไสว พงศ์สวัสดิ์
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2016-EN-M-257-116

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์	ลายมือชื่อ
รศ.ประภาช อุดคึกิมาพันธุ์	
ผศ.ดร.ธีรวัฒน์ เทพมณี	
ผศ.ดร.เชิดพงษ์ ดีเลิศไพบูลย์	
รศ.ดร.พิทยา ปานนิล	
รศ.ดร.ไสว พงศ์สวัสดิ์	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันศุกร์ที่ 8 กรกฎาคม พ.ศ. 2559 เวลา 10.00-12.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 3

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วันที่ 8 กรกฎาคม พ.ศ. 2559

หัวข้อวิทยานิพนธ์	เมทริกซ์การย้ายบนพื้นฐานหลักการ DH สำหรับการแทนที่ หุ่นยนต์โครงสร้างกลไกสี่ข้อต่อ ด้วย โครงสร้างข้อต่อตรง
นักศึกษา	นายณัทภพ วัชรารกวุฒิ
รหัสประจำตัว	54613452
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมอัตโนมัติ
พ.ศ.	2559
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.ไสว พงศ์สวัสดิ์

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ นำเสนอเทคนิคการแปลงข้อมูลตำแหน่งของ Tool Center Point(TCP) ในระนาบสามมิติ ด้วยการนำค่าองศาการเคลื่อนที่ของแต่ละข้อต่อ ของหุ่นยนต์แขนกลแกนอิสระ 6 แกน ที่มีลักษณะโครงสร้างแบบ Four bar link (FBL) ไปเป็นค่าองศาการเคลื่อนที่ของแต่ละข้อต่อ ของหุ่นยนต์แขนกล ที่มีลักษณะโครงสร้างแบบ Direct Link (DL) ซึ่งเทคนิคที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ ฉบับนี้มีจุดประสงค์ที่จะลดเวลาในการติดตั้ง การกำหนดค่า และการทำโปรแกรมเพื่อการติดตั้งแทนที่ ของหุ่นยนต์แขนกลใหม่ ที่มีการทำงานแบบเดิม ในวิทยานิพนธ์ได้ประยุกต์ใช้ Forward และ Inverse Kinematic มาทำการวิเคราะห์โครงสร้างของของหุ่นยนต์แขนกล FBL และ DL และนำ ข้อมูลการทำงานจริงของหุ่นยนต์แขนกลเดิมมาคำนวณ และแทนค่าในโครงสร้างของหุ่นยนต์แขนกล ใหม่ ผลการคำนวณและการสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม Matlab แสดงผลได้สอดคล้องกับการทำงาน จริงที่ออกแบบไว้ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับการใช้งานจริงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต่ออ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis	DH-Based Transformatoin Matrix For Robot Replacement from Four Bar Linkage to Direct Link Structure
Student	Mr.Nuttaprop Vacharakornrawut
Student ID.	54613452
Degree	Master of Engineering
Program	Automation Engineering
Year	2016
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr. Sawai Pongswatd

ABSTRACT

This thesis presents the technique to convert TCP(Tool Center Point) position of joints value from 6-DOF four bars link structure (FBLS) robot into 6-DOF direct link structure (DLS) robot. The technique proposed to achieve the robot replacement and introduce of new effective robot model for working in same task. The collected data in set of joint value from FBLS that are joint angle, joint length, end effect position, rotation and moving or working path are analyzed based on forward and inverse kinematic with DH (Denavit and Hartenbberg) Parameters. Then, convert and configure to new model of robot parameters that is DLS to work in the same task. This technique has been studied and simulated by using Matlab software. Effectiveness of the proposed technique is verified by simulation and experimental result.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.ไสว พงศ์สวัสดิ์ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหาตลอดจนให้ความรู้ ทั้งทางโลก และ ทาง ธรรมที่ดีแก่ข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ทุกท่านใน สาขาวิชา วิศวกรรมอัตโนมัติ ที่กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนข้อชี้แนะ จนในที่สุดทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้

ขอขอบพระคุณ นาย วรภค วัชรารวุฒิ และ นางเขมิกา วัชรารวุฒิ ผู้เป็นบิดา และ มารดา ที่ดีของข้าพเจ้า อีกทั้งครอบครัวของข้าพเจ้าที่ได้เป็นทั้งแรงบันดาลใจ และ เชื้อเพลิงชีวิตของข้าพเจ้ามาตลอด

ขอขอบคุณภรรยาของข้าพเจ้า คุณ พิมพ์ฉวี วัชรารวุฒิ ที่เป็นเสมือนคู่คิด และเป็นกำลังใจ ในการผลักดันให้ข้าพเจ้าทำให้ทุกอย่างดีขึ้นได้ตลอดมา วิทยานิพนธ์ และ ปริญญาบัตร ฉบับนี้ สามารถสำเร็จได้ เพราะ ภรรยาของข้าพเจ้าคอยเคียงข้าง และ พยายามตลอด

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับทุกท่านที่กล่าวมา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่งของข้าพเจ้า ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่าน ทั้งที่ได้กล่าวไว้ และ ไม่ได้กล่าวไว้ ที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และ ถวายทอดประสพการณ์ที่ดี ให้แก่ข้าพเจ้า สุดท้ายนี้ ข้าพเจ้าขอฝากถึงทุกท่านที่ได้หยิบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้อ่าน ความพยายาม เป็นของจริงแท้แน่นอน

นาย ณิชกภ วัชรารวุฒิ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	4
1.1.1 On-Line Programming (ONLP).....	4
1.1.2 Off-Line Programming (OFLP).....	5
1.2 ตัวอย่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	8
1.2.1 งานวิจัยเกี่ยวกับโครงสร้างของหุ่นยนต์แขนกล.....	8
1.2.2 งานวิจัยเกี่ยวกับการทำแบบจำลองของหุ่นยนต์แขนกล.....	9
1.2.3 งานวิจัยเกี่ยวกับการทดสอบการใช้งานแบบจำลองของหุ่นยนต์แขนกล.....	10
1.3 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	11
1.4 ขอบเขตการวิจัย.....	11
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการวิจัย และ สมมุติฐานของการวิจัย.....	12
2.1 กล่าวนำ.....	12
2.2 หุ่นยนต์สำหรับอุตสาหกรรม(Industrial Robot)	12
2.2.1 ลักษณะของหุ่นยนต์ (Overview of Robots)	13
2.2.1.1 Degree of Freedom.....	13
2.2.1.2 โครงพิกัดอ้างอิง (The Reference Frames).....	14
2.2.1.3 ข้อต่อหุ่นยนต์ (Robot Joints).....	15
2.2.1.4 ส่วนประกอบของหุ่นยนต์ (Robot Component).....	15
2.2.2 Articulated Robots หรือ Anthropomorphic.....	16
2.2.3 ข้อดีของ Articulated Robot	17
2.2.4 พื้นที่การทำงาน Articulated Robot.....	17
2.3 Forward Kinematics: The Arm Equation	17
2.4 ทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการวิจัย.....	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.1.3.2.2 Sub Fucntion file :	
fforkine_fourbarlink.....	57
3.1.3.2.3 Sub Fucntion file :	
finvkinе_Directlink.....	57
3.1.3.2.4 Sub Fucntion file :	
fforkine_Directlink.....	58
3.1.3.2.5 Sub Fucntion file :	
fplotjoint_fbl.....	58
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	59
4. ผลการทดลอง.....	59
4.1 ผลการทดลองโปรแกรม PG_0.....	59
4.2 ผลการทดลองโปรแกรม PG_3.....	66
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และ ข้อเสนอแนะ	80
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	80
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	81
บรรณานุกรม.....	82
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก.....	84
ภาคผนวก ข.....	102

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงค่า D-H Parameter ของแขนกลรุ่น Standford.....	33
3.1 แสดงค่า D-H Parameter ของหุ่นยนต์แขนกลรุ่น UX150.....	41
3.2 แสดงค่า D-H Parameter ของหุ่นยนต์แขนกลรุ่น BX-100L.....	42
3.3 แสดงข้อมูลองศาข้อต่อของแขนกลรุ่น UX150 โปรแกรม PG_0.....	59
3.4 แสดงข้อมูลองศาข้อต่อของแขนกลรุ่น UX150 โปรแกรม PG_3.....	59
4.1 แสดงผลการแปลงข้อมูลองศาข้อต่อของแขนกลรุ่น BX100L โปรแกรม PG_0.....	60
4.2 ตำแหน่ง TCP โปรแกรม PG 0 สเต็ปที่ 1 ระหว่างแขนกลรุ่น BX100L และ UX150.....	61
4.3 ตำแหน่ง TCP โปรแกรม PG 0 สเต็ปที่ 2 ระหว่างแขนกลรุ่น BX100L และ UX150.....	61
4.4 ตำแหน่ง TCP โปรแกรม PG 0 สเต็ปที่ 3 ระหว่างแขนกลรุ่น BX100L และ UX150.....	62
4.5 ตำแหน่ง TCP โปรแกรม PG 0 สเต็ปที่ 4 ระหว่างแขนกลรุ่น BX100L และ UX150.....	62
4.6 ตำแหน่ง TCP โปรแกรม PG 0 สเต็ปที่ 5 ระหว่างแขนกลรุ่น BX100L และ UX150.....	63
4.7 ตำแหน่ง TCP โปรแกรม PG 0 สเต็ปที่ 6 ระหว่างแขนกลรุ่น BX100L และ UX150.....	63
4.8 ตำแหน่ง TCP โปรแกรม PG 0 สเต็ปที่ 7 ระหว่างแขนกลรุ่น BX100L และ UX150.....	64
4.9 แสดงตำแหน่งพิกัด โปรแกรม PG0 TCP ของ UX150 บนระนาบสามมิติ.....	65
4.10 แสดงตำแหน่งพิกัด โปรแกรม PG0 TCP ของ BX100L บนระนาบสามมิติ.....	65
4.11 แสดงผลการแปลงข้อมูลองศาข้อต่อของแขนกลรุ่น BX100L โปรแกรม PG_3.....	66
4.12 ตำแหน่ง TCP โปรแกรม PG 3 สเต็ปที่ 1 ระหว่างแขนกลรุ่น BX100L และ UX150.....	67
4.13 ตำแหน่ง TCP โปรแกรม PG 3 สเต็ปที่ 2 ระหว่างแขนกลรุ่น BX100L และ UX150.....	67
4.14 ตำแหน่ง TCP โปรแกรม PG 3 สเต็ปที่ 3 ระหว่างแขนกลรุ่น BX100L และ UX150.....	68
4.15 ตำแหน่ง TCP โปรแกรม PG 3 สเต็ปที่ 4 ระหว่างแขนกลรุ่น BX100L และ UX150.....	68
4.16 ตำแหน่ง TCP โปรแกรม PG 3 สเต็ปที่ 5 ระหว่างแขนกลรุ่น BX100L และ UX150.....	69
4.17 ตำแหน่ง TCP โปรแกรม PG 3 สเต็ปที่ 6 ระหว่างแขนกลรุ่น BX100L และ UX150.....	69
4.18 ตำแหน่ง TCP โปรแกรม PG 3 สเต็ปที่ 7 ระหว่างแขนกลรุ่น BX100L และ UX150.....	70
4.19 ตำแหน่ง TCP โปรแกรม PG 3 สเต็ปที่ 8 ระหว่างแขนกลรุ่น BX100L และ UX150.....	70
4.20 ตำแหน่ง TCP โปรแกรม PG 3 สเต็ปที่ 9 ระหว่างแขนกลรุ่น BX100L และ UX150.....	71
4.21 ตำแหน่ง TCP โปรแกรม PG 3 สเต็ปที่ 10 ระหว่างแขนกลรุ่น BX100L และ UX150.....	71
4.22 ตำแหน่ง TCP โปรแกรม PG 3 สเต็ปที่ 11 ระหว่างแขนกลรุ่น BX100L และ UX150.....	72
4.23 ตำแหน่ง TCP โปรแกรม PG 3 สเต็ปที่ 12 ระหว่างแขนกลรุ่น BX100L และ UX150.....	72
4.24 ตำแหน่ง TCP โปรแกรม PG 3 สเต็ปที่ 13 ระหว่างแขนกลรุ่น BX100L และ UX150.....	73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตั้งชื่ออ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.25 ตำแหน่ง TCP โปรแกรม PG 3 สเต็ปที่ 14 ระหว่างแกนกลุ่ม BX100L และ UX150.....	73
4.26 ตำแหน่ง TCP โปรแกรม PG 3 สเต็ปที่ 15 ระหว่างแกนกลุ่ม BX100L และ UX150.....	74
4.27 ตำแหน่ง TCP โปรแกรม PG 3 สเต็ปที่ 16 ระหว่างแกนกลุ่ม BX100L และ UX150.....	74
4.28 ตำแหน่ง TCP โปรแกรม PG 3 สเต็ปที่ 17 ระหว่างแกนกลุ่ม BX100L และ UX150.....	75
4.29 ตำแหน่ง TCP โปรแกรม PG 3 สเต็ปที่ 18 ระหว่างแกนกลุ่ม BX100L และ UX150.....	75
4.30 ตำแหน่ง TCP โปรแกรม PG 3 สเต็ปที่ 19 ระหว่างแกนกลุ่ม BX100L และ UX150.....	76
4.31 ตำแหน่ง TCP โปรแกรม PG 3 สเต็ปที่ 20 ระหว่างแกนกลุ่ม BX100L และ UX150.....	76
4.32 ตำแหน่ง TCP โปรแกรม PG 3 สเต็ปที่ 21 ระหว่างแกนกลุ่ม BX100L และ UX150.....	77
4.33 แสดงตำแหน่งพิกัด TCP โปรแกรม PG3 ของ UX150 บนระนาบสามมิติ.....	78
4.34 แสดงตำแหน่งพิกัด TCP โปรแกรม PG3 ของ BX100L บนระนาบสามมิติ.....	79

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 กราฟแสดงจำนวนประมาณหุ่นยนต์แขนกลที่ใช้งานอยู่ในอุตสาหกรรมภาคต่างๆ.....	1
1.2 กราฟแสดงค่าประมาณการส่งออกหุ่นยนต์แขนกลรายปีของภาคอุตสาหกรรมส่วนเหนือ ของประเทศสหรัฐอเมริกา.....	2
1.3 ตัวอย่าง หุ่นยนต์แขนกลรุ่นใหม่ บริษัท Kawasaki รุ่น BX200L [1].....	3
1.4 ตัวอย่าง หุ่นยนต์แขนกลรุ่นเก่าบริษัท Kawasaki รุ่น UX150 [2].....	3
1.5 ผังกระบวนการทำโปรแกรมของหุ่นยนต์แขนกลตามลักษณะวิธีการ.....	4
1.6 ภาพตัวอย่างวิธีการทำ On-Line Programming.....	5
1.7 ภาพจำลองการเชื่อมต่อของอุปกรณ์การทำ Off-Line Programming.....	6
1.8 กราฟแสดงเวลาโดยประมาณที่ใช้ในการทำโปรแกรมของหุ่นยนต์แขนกล หนึ่งตัวในแต่ละขั้นตอน.....	7
1.9 ภาพตัวอย่าง ของหุ่นยนต์แขนกล KUKA รุ่น KR 16KS.....	8
1.10 ภาพขนาดบล็อกแก่งเหล็ก และ เส้นทางการเชื่อมของแขนกล.....	9
1.11 ภาพตัวอย่าง ของหุ่นยนต์แขนกล FARAMAN รุ่น AM1.....	9
1.12 ภาพตัวอย่าง ของหุ่นยนต์แขนกล ABB รุ่น IRB1400 M97A.....	10
1.13 ภาพตัวอย่างการจำลองหุ่นยนต์แขนกลในโปรแกรม Robotstudio.....	11
2.1 Articulate Robot.....	12
2.2 Degree of Freedom.....	13
2.3 โครงกัทอั้งอิงฐาน.....	14
2.4 โครงกัทอั้งอิงข้อต่อ.....	14
2.5 โครงกัทอั้งอิง Tool.....	15
2.6 พื้นที่ความสามารถการหมุนที่เป็นไปได้ของหุ่นยนต์.....	17
2.7 หุ่นยนต์ที่มีลักษณะเป็นแขน.....	17
2.8 จำลองระบบระนาบสามมิติ x, y, z.....	17
2.9 ตำแหน่งของจุด P อ้างอิงความสัมพันธ์ เทียบกับ แกนระนาบสามมิติ x, y, z.....	19
2.10 เวกเตอร์ P ในแกนระนาบสามมิติ x, y, z.....	20
2.11 เวกเตอร์ n, o และ a ในแกนระนาบสามมิติ x, y, z.....	21
2.12 ตำแหน่ง และ ทิศทางของกรอบอั้งอิง F ในแกนระนาบสามมิติ x, y, z.....	21
2.13 ตำแหน่ง และ ทิศทางของกรอบอั้งอิง F หลังเคลื่อนที่เท่ากับเวกเตอร์ D.....	22
2.14 ตำแหน่ง และ ทิศทางของกรอบอั้งอิง F ก่อนการหมุนแกน X.....	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

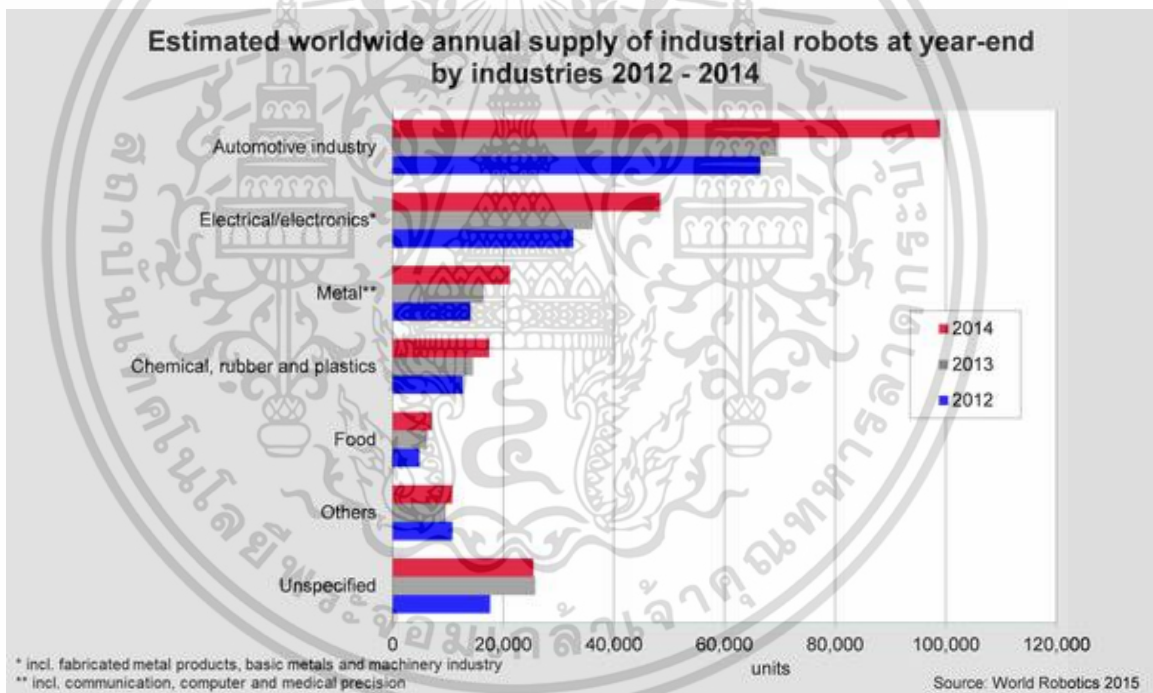
รูปที่	หน้า
2.15 ตำแหน่ง และ ทิศทางของกรอบอ้างอิง F หลังการหมุนแกน X.....	23
2.16 ภาพฉาย แกน y-z แสดงตำแหน่ง และ ทิศทางของกรอบอ้างอิง F หลังการหมุนแกน X.....	24
2.17 ตำแหน่ง และ ทิศทางของกรอบอ้างอิง F หลังการหมุนแกน Z 90 องศา.....	25
2.18 ตำแหน่ง และ ทิศทางของกรอบอ้างอิง F หลังทำการเคลื่อนที่เป็นระยะ $[4,-3,7]$	26
2.19 ตำแหน่ง และ ทิศทางของกรอบอ้างอิง F และจุด P หลังการหมุนแกน Y 90 องศา.....	26
2.20 ตำแหน่ง และ ทิศทางของกรอบอ้างอิง F หลังการหมุนแกน a 90 องศา.....	27
2.21 ตำแหน่ง และ ทิศทางของกรอบอ้างอิง F หลังทำการเคลื่อนที่เป็นระยะ $[4,-3,7]$	27
2.22 ตำแหน่ง และ ทิศทางของกรอบอ้างอิง F และจุด P หลังการหมุนแกน o 90 องศา.....	27
2.23 กระบวนการเคลื่อนย้ายกรอบอ้างอิง F โดยวิธีการ Denavit-Hartenberg.....	31
2.24 ภาพร่างของแขนกลรุ่น Standford.....	33
3.1 ภาพลำดับขั้นตอน และ แนวคิดของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้.....	38
3.2 แสดงระยะ และ ขนาดของหุ่นยนต์แขนกล Kawasaki – UX150.....	39
3.3 แสดงระยะ และ ขนาดของหุ่นยนต์แขนกล Kawasaki – BX100L.....	40
3.4 แสดงลำดับ และ แนวคิดขั้นตอนของโปรแกรม Matlab ที่เขียนในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้.....	56
5.1 แสดงผลเปรียบเทียบ เวลาที่ต้องใช้ในการทำ OFLP ก่อน และ หลัง จากประยุกต์ใช้งานเทคนิคในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้.....	80

บทที่ 1

บทนำ

ทุกวันนี้การขยายตัวของอุตสาหกรรมโลกนั้น มีการเติบโตตลอดเวลาตามอัตราการเพิ่มของประชากรตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ซึ่งส่งผลให้ภาคอุตสาหกรรมการผลิตต่างๆ เกิดการพัฒนา และประยุกต์ใช้ทรัพยากร โดยนำเทคโนโลยีเข้ามาเป็นส่วนหนึ่งในการผลิตเพื่อเพิ่มพูน ความเร็ว ศักยภาพ และ อีกทั้งควบคุมคุณภาพในสายการผลิต เพื่อที่จะสามารถตอบสนองต่ออุปสงค์ของตลาดได้

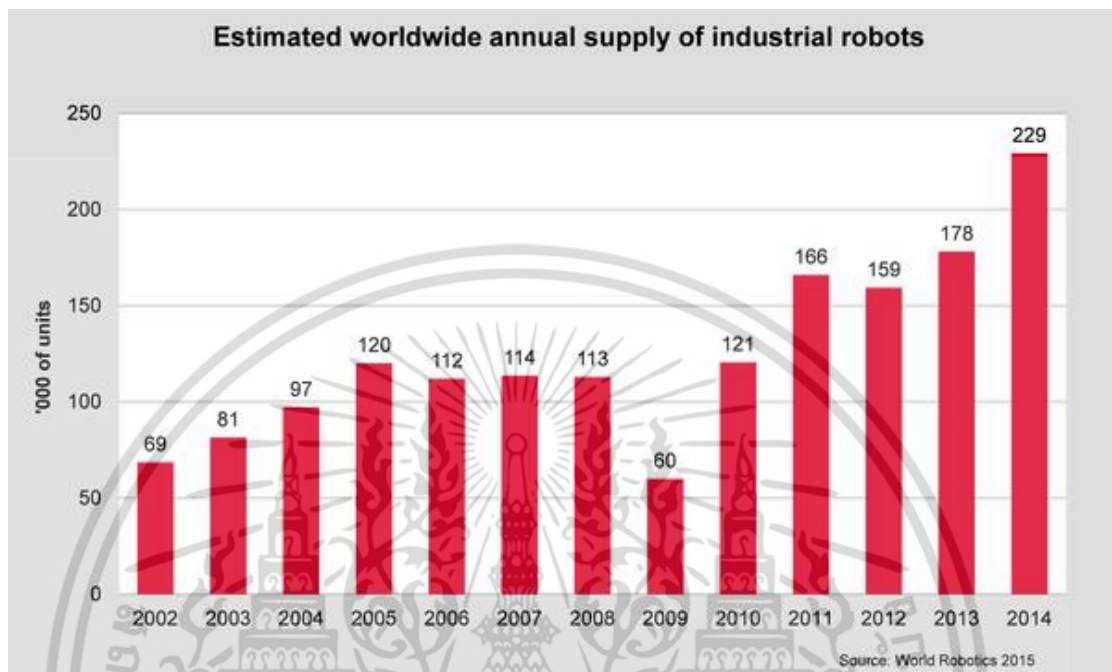
เทคโนโลยีหนึ่งที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้งาน และ พัฒนาอย่างต่อเนื่องควบคู่ไปกับ การขยายตัวของตลาดในอุตสาหกรรมคือ เทคโนโลยีหุ่นยนต์แขนกล ยกตัวอย่างอุตสาหกรรมตามการผลิตต่างๆ ดังที่แสดงในรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 กราฟแสดงจำนวนประมาณหุ่นยนต์แขนกล
ที่ใช้งานอยู่ในอุตสาหกรรมภาคต่างๆ [1]

เทคโนโลยีหุ่นยนต์แขนกลนั้น ถูกนำเสนอ และ ทดลองเริ่มประยุกต์การใช้งานครั้งแรกใน อุตสาหกรรมยานยนต์ในประเทศสหรัฐอเมริกา เมื่อปี ค.ศ.1960 ในงานประกอบ และ ยกจับชิ้นส่วน ชิ้นงาน จนถึง ปี.ศ.1980 จึงถูกนำมาประยุกต์ใช้ในงานเชื่อมประกอบตัวถังยานยนต์ เนื่องจากความ แม่นยำ ความรวดเร็ว และ ประสิทธิภาพ ในการผลิตที่เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดจากการใช้งานใน สายการผลิตจริง ส่งผลให้เทคโนโลยีหุ่นยนต์แขนกล ถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายมากขึ้น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับ อนุญาต ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จนกระทั่งในปีค.ศ. 2005 หุ่นยนต์แขนกลที่ส่งออกต่อปีจากภาคอุตสาหกรรมส่วนเหนือประเทศสหรัฐอเมริกา นั้นมีจำนวนเพิ่มขึ้นมากกว่า 120,000 ตัว และ คาดการณ์ว่าในปี ค.ศ.2014 การส่งออกเพื่อใช้งานจะขยายตัวไปถึงมากกว่า 220,000 ตัว ดังที่แสดงในรูปที่ 1.2



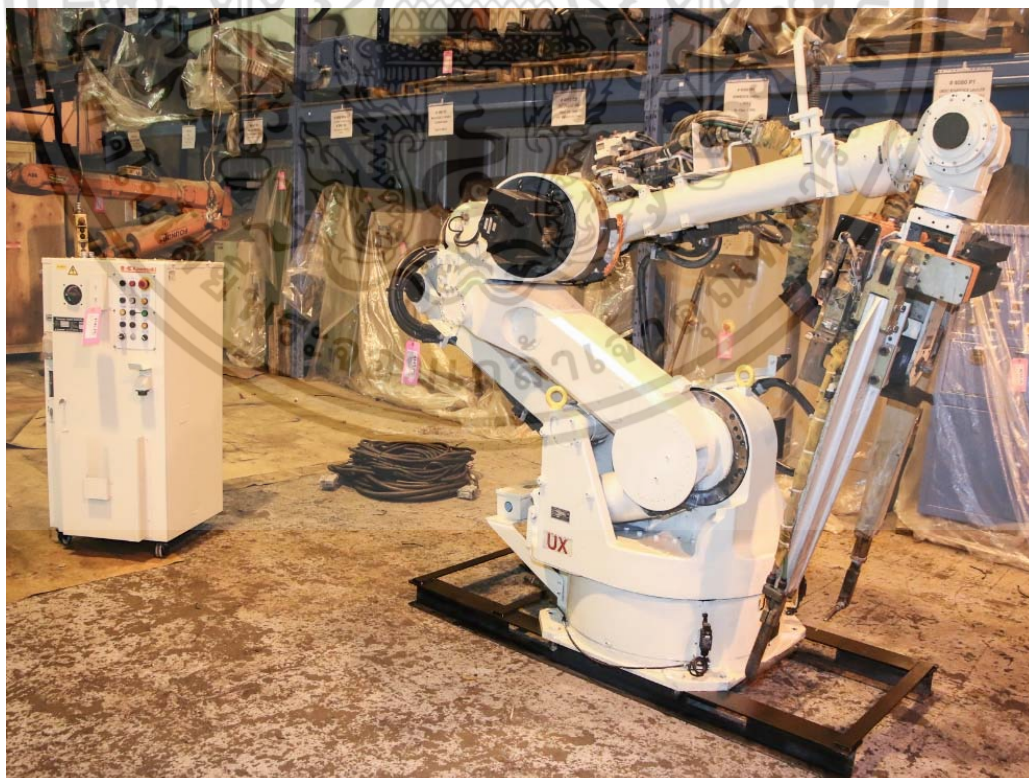
รูปที่ 1.2 กราฟแสดงค่าประมาณการส่งออกหุ่นยนต์แขนกลรายปีของภาคอุตสาหกรรมส่วนเหนือของประเทศสหรัฐอเมริกา [1]

สถานการณ์ในปัจจุบัน หุ่นยนต์แขนกล ที่ปฏิบัติงานอยู่ในอุตสาหกรรมจากอดีตนั้น ผู้ผลิตชิ้นส่วนได้มีการประกาศยกเลิกการผลิตชิ้นส่วนอะไหล่ต่างๆ สืบเนื่องด้วยอายุขัยของเครื่องจักร และการพัฒนาของเทคโนโลยีที่ดีขึ้น เพราะเหตุนี้หุ่นยนต์แขนกลรุ่นใหม่ ที่มีความสามารถในการผลิตที่ดีกว่า อีกทั้งระบบความปลอดภัย ระบบควบคุมที่สามารถรองรับเทคโนโลยีสมัยใหม่ ส่งผลผู้ประกอบการในภาคอุตสาหกรรมเริ่มทำการ เปลี่ยน และ ปลดประจำการหุ่นยนต์แขนกลรุ่นเก่า ตามวัฏจักรของการเปลี่ยนถ่าย และซ่อมบำรุง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.3 หุ่นยนต์แขนกลรุ่นใหม่ บริษัท Kawasaki รุ่น BX200L



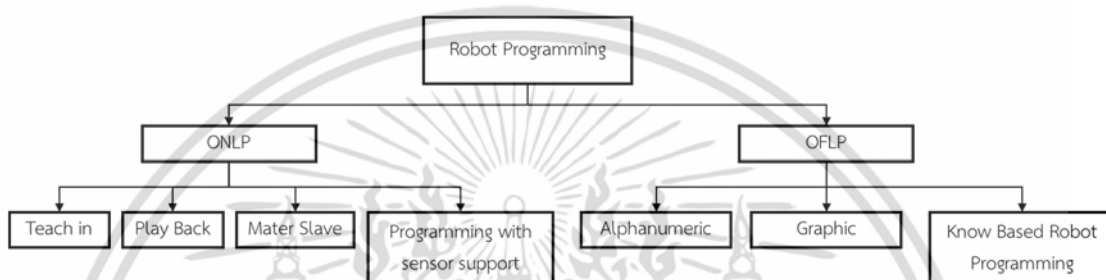
รูปที่ 1.4 หุ่นยนต์แขนกลรุ่นเก่าบริษัท Kawasaki รุ่น UX150

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

เนื่องจากหุ่นยนต์ในอุตสาหกรรมนั้นถือเป็นเครื่องจักรชนิดหนึ่ง ซึ่งเหมือนเครื่องจักรทั่วไปที่ปฏิบัติงานตามเงื่อนไขของผู้ใช้งาน ดังนั้นในการนำหุ่นยนต์แขนกลมาใช้งานในอุตสาหกรรม จึงต้องมีการทำโปรแกรม เพื่อให้หุ่นยนต์แขนกลนั้นเคลื่อนที่เข้าหาชิ้นงาน หรือ หยิบจับชิ้นงานได้ตามที่ต้องการ กระบวนการทำโปรแกรมของหุ่นยนต์แขนกลสามารถจำแนกตามลักษณะวิธีการ ได้ดังนี้

- วิธีการที่ 1 : On-Line Programming (ONLP)
- วิธีการที่ 2 : Off-Line Programming (OFLP)



รูปที่ 1.5 ผังกระบวนการทำโปรแกรมของหุ่นยนต์แขนกลตามลักษณะวิธีการ

1.1.1 On-Line Programming (ONLP)

“On-Line Programming” หรือ ONLP คือ การทำโปรแกรมของแขนกลโดยการที่ซึ่ง (Teaching or Programming by manual guiding robot) วิธีการทำโปรแกรมนี้จำเป็นที่จะต้องบังคับแขนกลที่หน้างานผ่านคอนโซล (Teach pendant) โดยมีผู้ควบคุมและส่งคำสั่งให้แขนกลโดยตรง โดยที่แขนกลจะเคลื่อนที่ทีละท่าทาง (Motion) เพื่อบันทึกแต่ละท่าทางเป็นสเต็ป (Step) โดยการนำบันทึกแต่ละสเต็ปมาทำงานต่อเนื่องกัน จะได้ เส้นทางเคลื่อนที่ของแขนกล (Trajectory) ดังนั้นโปรแกรมที่ได้จากการเก็บบันทึกด้วยวิธีนี้จะถูกจัดบันทึกอยู่ในรูปแบบของ ตำแหน่ง และ เส้นทางเคลื่อนที่

- ข้อดีของการทำโปรแกรมด้วยวิธีการ ONLP
 - ไม่ยุ่งยาก และ ซ้ำซ้อนสามารถทำได้โดยตรงผ่านคอนโซลแขนกล
 - ตำแหน่งการเคลื่อนที่ของแขนกลถูกควบคุม และ ยืนยันโดยผู้ปฏิบัติงาน
 - คุณภาพ และ ตำแหน่งของ Tool Center Point (TCP) ที่มีค่าผิดพลาดถูกชดเชยหน้างาน โดยผู้ปฏิบัติงานโดยตรง (ขึ้นตรงกับทักษะของผู้ปฏิบัติงาน)
- ข้อเสียของการทำโปรแกรมด้วยวิธีการ ONLP
 - มีความเสี่ยงที่จะเกิดอุบัติเหตุ ระหว่าง คน กับเครื่องจักรสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ในกรณีที่มีแขนกลทำงานร่วมกันหลายตัว มีความเสี่ยงสูง ที่โปรแกรมจะชนกับเส้นทางการเคลื่อนที่ของแขนกลตัวอื่นระหว่างปฏิบัติงานเนื่องจากมีความซับซ้อนและยากที่จะยืนยันการเคลื่อนที่ที่ทับซ้อนกันของแขนกลได้ถี่ถ้วน
- สายการผลิตไม่สามารถดำเนินการผลิตต่อเนื่องได้ เพราะการทำ ONLP ต้องใช้งานแขนกลที่ติดตั้งเสร็จเรียบร้อยในโรงงานโดยตรง
- ไม่สามารถทำโปรแกรมในพื้นที่โรงงานที่มีลักษณะซับซ้อนได้



รูปที่ 1.6 วิธีการทำ On-Line Programming

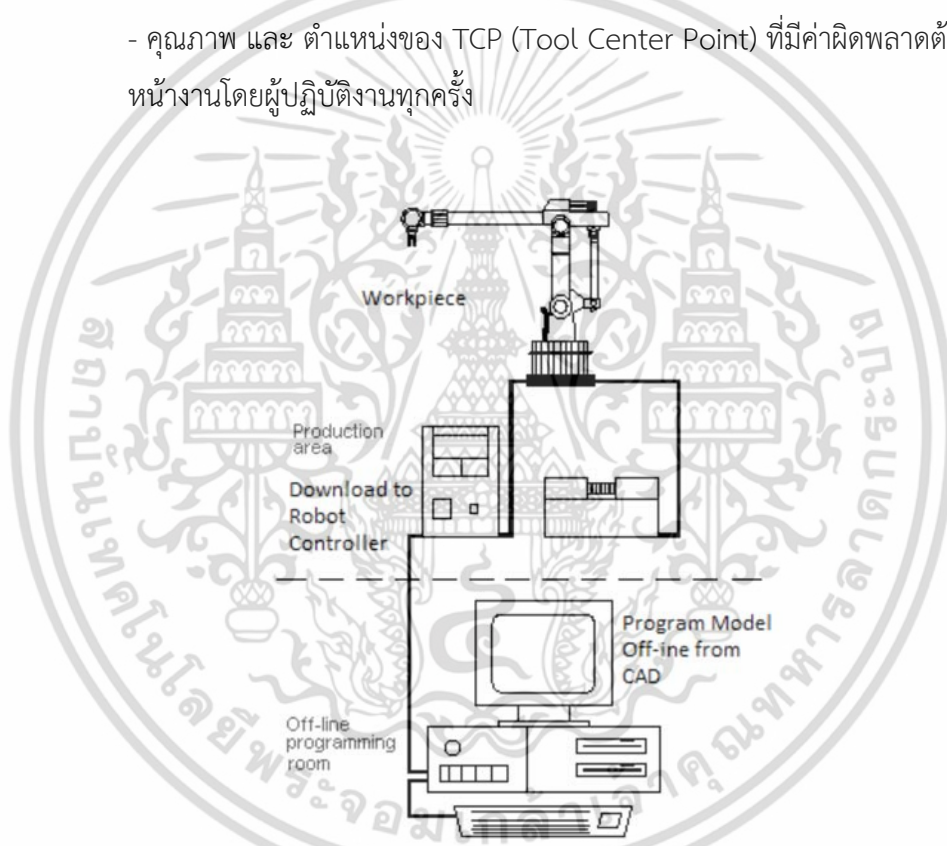
1.1.2 Off-Line Programming (OFLP)

“Off-line programming and simulation” หรือ OFLP คือ การสร้างข้อมูล รวบรวม และ ทำโปรแกรมของหุ่นยนต์แขนกล โดยใช้แบบจำลองของโครงสร้าง ลักษณะ แขนกล และ สถานที่ปฏิบัติงานจริง เพื่อตรวจสอบการเคลื่อนที่ของแขนกลว่าสามารถเอื้อมจับชิ้นงาน หรือ เข้าสู่ชิ้นงานได้หรือไม่ อีกทั้ง เพื่อตรวจสอบการชน และ กีดขวาง ระหว่างสิ่งแวดล้อม กับ โครงสร้างของแขนกล และ สิ่งกีดขวางต่างๆในเส้นทางการเคลื่อนที่ของแขนกล

- ข้อดีของการทำโปรแกรมด้วยวิธีการ OFLP
 - เนื่องจากโปรแกรมจำลองสามมิติที่ใช้ในการทำ OFLP เกิดจากการคำนวณแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ส่งผลให้ประสิทธิภาพ ความแม่นยำ และความถูกต้องสูง
 - สายการผลิตสามารถผลิตได้ต่อเนื่อง ไม่จำเป็นต้องหยุดสายการผลิตเพื่อทำการจำลอง
 - โครงสร้างของโปรแกรม มีการจัดแจง และ จัดระเบียบ ทำให้ง่ายต่อการจัดเก็บ สามารถนำมาใช้งานต่อเพื่อ ปรับปรุง หรือ แก้ไขได้ง่าย
 - สามารถจำลอง และทำโปรแกรมของแขนกล กับ ชิ้นงานที่อยู่ในช่วงพัฒนาได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

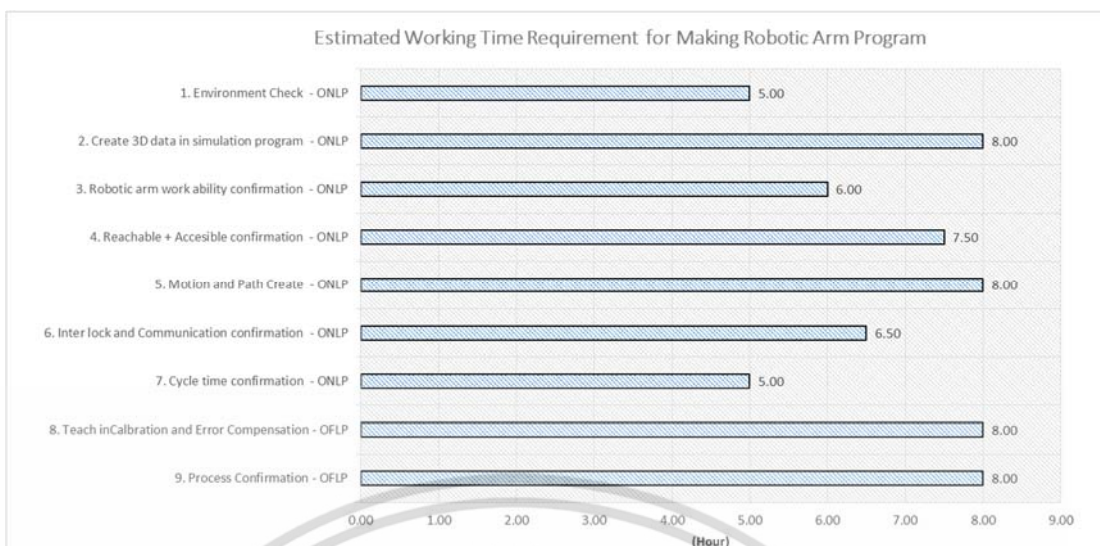
- การทดสอบการจำลองแนวการเคลื่อนที่ของแขนกลร่วมกัน เพื่อเช็คการขีดขวาง และใส่สัญญาณ Interlock เพื่อสื่อสารกันสามารถทำได้ง่าย
- ลดระยะเวลาที่ใช้งานหน้างานสำหรับช่วงเวลาปรับปรุง และ เปลี่ยนแปลงเครื่องจักร สำหรับการผลิตสินค้ารุ่นใหม่
- หลังจากทำแบบจำลองเสร็จสมบูรณ์ สามารถนำแบบจำลองกลับมาใช้งานได้ตลอด
- ข้อเสียของการทำโปรแกรมด้วยวิธีการ OFLP
 - ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการเริ่มต้นสูง
 - ตำแหน่งของ TCP ที่ได้นั้นไม่ตรงกับตำแหน่งหน้างาน 100% เนื่องจากค่าผิดพลาดที่เกิดจาก ตัวแขนกล ชี้นงาน การติดตั้ง หรือ ปัจจัยภายนอกอื่นๆ
 - คุณภาพ และ ตำแหน่งของ TCP (Tool Center Point) ที่มีค่าผิดพลาดต้องถูกชดเชยหน้างานโดยผู้ปฏิบัติงานทุกครั้ง



รูปที่ 1.7 การเชื่อมต่อของอุปกรณ์การทำ Off-Line Programming

ซึ่งในปัจจุบันสามารถสรุปขั้นตอนการทำโปรแกรมหุ่นยนต์แขนกลออกมาได้โดยสังเขป และสามารถอธิบายขั้นตอนกระบวนการทำโปรแกรมของ แขนกล ต่อเวลาที่ใช้ไปในแต่ละขั้นตอนโดยประมาณตามรูปที่ 1.8 ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.8 กราฟแสดงเวลาโดยประมาณที่ใช้ในการทำโปรแกรม
ของหุ่นยนต์แขนกลหนึ่งตัวในแต่ละขั้นตอน

จากรูปที่ 1.8 สามารถอธิบายขั้นตอนการโปรแกรมของหุ่นยนต์แขนกลตัวหนึ่งได้ โดย OFLP ในสุดท้ายนั้นเมื่อทำการอัปเดตไปยังแขนกลที่หน้างาน ก็ยังต้องทำการ Teach in ในกระบวนการสุดท้ายเพื่อชดเชยค่าผิดพลาดที่เกิดจากปัจจัยภายนอก โดยผู้ปฏิบัติงานอีกครั้ง ดังนั้นจะเห็นได้ว่าในกระบวนการทำโปรแกรมหุ่นยนต์แขนกลของอุตสาหกรรมจะประกอบด้วยกระบวนการทั้ง 2 วิธีร่วมกัน ซึ่งสามารถแยกเหตุผลหลักของการทำโปรแกรมของแขนกลโดยคร่าวๆ ได้ดังนี้

1. แขนกลที่นำมาใช้งานติดตั้งเพื่อทำหน้าที่ใหม่ในสายการผลิต
2. สายการผลิตมีการออกแบบสินค้ารุ่นใหม่
3. ปรับปรุงประสิทธิภาพกำลังการผลิต
4. แขนกลที่นำมาใช้งานติดตั้งเพื่อทำหน้าที่แทนแขนกลเก่าในสายการผลิต

สำหรับเหตุผลดังกล่าวของข้อที่ 1 ถึง 3 จะเห็นว่าผู้ปฏิบัติงานมีความจำเป็นที่จะต้องทำ OFLP และ ONLP ตั้งแต่ขั้นตอนแรกใหม่ เนื่องจากแขนกลนั้นไม่สามารถ เคลื่อนที่เพื่อทำหน้าที่ใหม่ หรือ เข้าหาชิ้นงานใหม่ นอกเหนือจากโปรแกรมเก่าที่มีอยู่ด้วยตัวเองได้ สำหรับหัวข้อที่ 4 โดยทั่วไปผู้ปฏิบัติงานจะทำเหมือนกับข้อที่ 1 และ 3 ตามที่กล่าวมา ถึงแม้ว่าทางผู้ปฏิบัติงานจะมีข้อมูลอ้างอิงที่มีจากการทำ OFLP และ ONLP ของแขนกลเก่าอยู่ก็ตาม ส่งผลให้ทางผู้ปฏิบัติงานต้องเสียเวลาในการทำขั้นตอนที่ 3,4 และ 5 ในรูปที่ 1.8 อีกครั้งหนึ่ง เพื่อให้ได้โปรแกรมของแขนกลใหม่

1.2 ตัวอย่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึง ตัวอย่างผลงานการวิจัยด้านต่างๆ ที่มีการศึกษาของหุ่นยนต์แขนกล

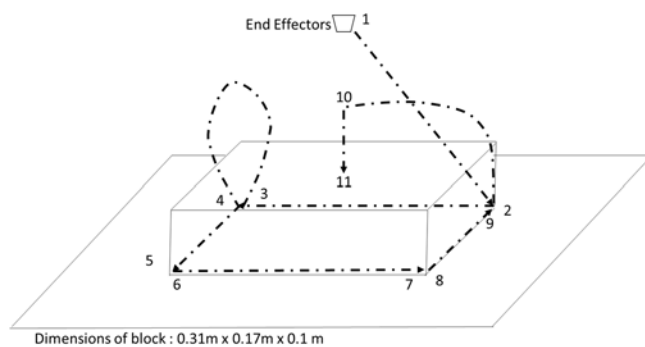
1.2.1 งานวิจัยเกี่ยวกับโครงสร้างของหุ่นยนต์แขนกล

ตัวอย่างการวิจัยที่กล่าวถึง [7] ได้มีการศึกษา ลักษณะโครงสร้างของหุ่นยนต์แขนกล KUKA รุ่น KR-16KS Robot ที่ใช้ในกระบวนการเชื่อม ตามรูปที่ 1.9



รูปที่ 1.9 ภาพตัวอย่าง ของหุ่นยนต์แขนกล KUKA รุ่น KR 16KS

โดยในการวิจัยนี้ เน้นการศึกษาไปยังกระบวนการคำนวณหา Forward Kinematic และ Inverser Kinematic ของหุ่นยนต์แขนกล เพื่อนำสมการดังกล่าวที่ได้ มาทำการคำนวณหา ค่า ข้อต่อองศา ในแต่ละแกนของหุ่นยนต์แขนกล ที่ต้องใช้ในการเคลื่อนที่ไปยังจุดที่ต้องการ ผลการทดลองในการวิจัยดังกล่าว ได้ทำการพิสูจน์ผลการคำนวณ และ ความถูกต้องของสมการ โดย ให้หุ่นยนต์แขนกลรุ่นดังกล่าวทำการเชื่อมตัวบล็อกแท่งเหล็ก เข้ากับผิวชิ้นงาน ด้วยค่าที่คำนวณได้



รูปที่ 1.10 บล็อกแท่งเหล็ก และ เส้นทางการเชื่อมของแขนกล

1.2.2 งานวิจัยเกี่ยวกับการทำแบบจำลองของหุ่นยนต์แขนกล

ตัวอย่างการวิจัยที่กล่าวถึง [8] ได้มีการศึกษา ลักษณะโครงสร้างของหุ่นยนต์แขนกล FARAMAN รุ่น AM1 ที่ใช้ในกระบวนการเชื่อมดังรูปที่ 1.11



รูปที่ 1.11 หุ่นยนต์แขนกล FARAMAN รุ่น AM1

โดยในการวิจัยนี้ เน้นการศึกษาไปยังการ พัฒนาแบบจำลองของหุ่นยนต์แขนกลรุ่นดังกล่าว ด้วยการใช้งานโปรแกรม CATIA V5 และทำการเปรียบเทียบผลการจำลองของ แขนกลกับผลการคำนวณจากสมการ Forward Kinematic และ Inverse Kinematic เพื่อพิสูจน์ และพิจารณาถึงค่าผิดพลาดที่เกิดขึ้น

จากการทดลองในการวิจัยนี้ แบบจำลองของหุ่นยนต์แขนกลรุ่นดังกล่าว หลังจากเคลื่อนที่ข้อต่อเป็นองศาตามที่กำหนด สามารถให้ค่าตำแหน่งสุดท้ายบนระนาบสามมิติ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตรงกับผลการคำนวณจากสมการ Forward Kinematic และ Inverse Kinematic หรือไม่ โดยผลการทดลองสรุปออกมาในการเปรียบเทียบค่าผิดพลาดของตำแหน่ง กับ การเคลื่อนแต่ละข้อต่อของแขนกล

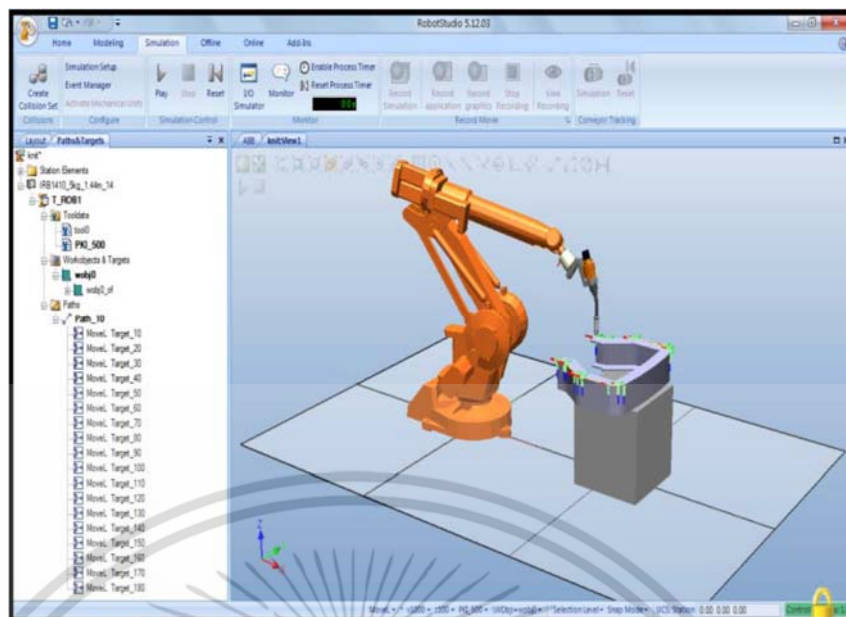
1.2.3 งานวิจัยเกี่ยวกับการทดสอบการใช้งานแบบจำลองของหุ่นยนต์แขนกล

ตัวอย่างการวิจัยที่กล่าวถึง [9] ได้มีการศึกษา ลักษณะโครงสร้างของหุ่นยนต์แขนกล ABB รุ่น IRB1400 M97A ที่ใช้ในกระบวนการเชื่อมเช่นกันดังรูปที่ 1.12



รูปที่ 1.12 ตัวอย่างของหุ่นยนต์แขนกล ABB รุ่น IRB1400 M97A

โดยในการวิจัยนี้ เน้นการศึกษาในหัวข้อการเปรียบเทียบผลประโยชน์ ที่ได้จากการใช้งานโปรแกรมแบบจำลองหุ่นยนต์แขนกล Robotstudio ในการทำโปรแกรมการเคลื่อนที่ของ แขนกลเพื่อเชื่อมชิ้นงาน ซึ่งภายในโปรแกรม Robotstudio ได้จำลองสิ่งแวดล้อม และตำแหน่งของชิ้นงานตามจริง ดังรูปที่ 1.13



รูปที่ 1.13 การจำลองหุ่นยนต์แขนกลในโปรแกรม Robotstudio

1.3 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้เขียนจึงมีความมุ่งหมายที่จะลดความซ้ำซ้อน และ ความลำบากในการทำโปรแกรมของแขนกลใหม่ ที่จะมาทำหน้าที่แทนแขนกลเก่า โดยการนำโปรแกรมของแขนกลเก่าที่ใช้งานอยู่มาทำการคำนวณทาง คณิตศาสตร์ เข้าประยุกต์ และ ดัดแปลง เพื่อลดเวลา และ เพิ่มประสิทธิภาพที่ต้องใช้ในการทำโปรแกรมของแขนกลตัวใหม่ ตามหัวข้อดังต่อไปนี้

1. เพื่อวิจัย และ ทดสอบกระบวนการคิดในการทำโปรแกรมของหุ่นยนต์แขนกล
2. เพื่อเสนอแนวทางในการลดความซ้ำซ้อน และ ยุ่งยากทำโปรแกรมหุ่นยนต์แขนกล
3. เพื่อลดระยะเวลาที่ใช้ และ ลดค่าใช้จ่ายที่เกิดจากการทำโปรแกรมหุ่นยนต์แขนกล
4. เพื่อพิสูจน์สมมุติฐานในการแปลงข้อมูลของหุ่นยนต์แขนกลที่มีความแตกต่างระหว่างโครงสร้างทางกายภาพ

1.4 ขอบเขตการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการวิจัยหุ่นยนต์แขนกลสองรุ่น โดยเปรียบเทียบแขนกลปัจจุบันที่มีการใช้งานอยู่ รุ่น UX150 ของบริษัท Kawasaki ซึ่งทุกวันนี้ทำหน้าที่จับส่งชิ้นส่วนงานในสายการผลิตรถยนต์เทียบกับ หุ่นยนต์แขนกลรุ่นใหม่ BX100L ของบริษัท Kawasaki ที่จะถูกนำมาใช้งานแทนแขนกลตัวเก่าในสายการผลิต โดยหุ่นยนต์แขนกลรุ่นใหม่นั้นจะใช้งานเครื่องมือเดิม และ ทำหน้าที่เดียวกันในสายการผลิต วิธีการทดสอบ เงื่อนไข และ การคำนวณทางคณิตศาสตร์จะประมวล และ แสดงผลผ่านโปรแกรม Matlab โดยผลการทดลองจะจำลองภาพเปรียบเทียบของหุ่นยนต์แขนกลทั้งสองชนิด และ ข้อมูลตำแหน่ง ของ TCP ในระนาบแกนสามมิติ [15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

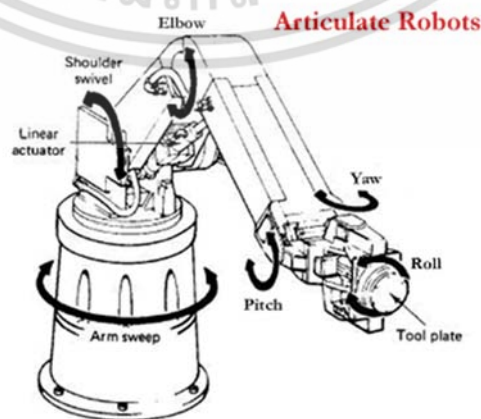
ทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการวิจัย และ สมมุติฐานของการวิจัย

2.1 กล่าวนำ

หุ่นยนต์ (Robot) เป็นอุปกรณ์ทางกลที่ประกอบด้วยแขน (Link) ข้อต่อ (Joint) ตัวตรวจจับที่เป็นเซนเซอร์ (Sensor) และ ขับเคลื่อนด้วยตัวกระทำ (Actuator) โดยควบคุมผ่านการเขียนซอฟต์แวร์การจับ และ เส้นทางของแขนหุ่นยนต์ วัสดุ เครื่องมือ และ อุปกรณ์สำหรับงานต่างๆในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน ดังนั้นการออกแบบระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ จะต้องตอบโจทยความต้องการของงานว่า สิ่งที่ต้องการนั้นคืออะไร ต้องการชนิดของหุ่นยนต์ประเภทไหน ต้องการการเคลื่อนที่เป็นเช่นไร และใช้ซอฟต์แวร์อะไรในการสร้างฟังก์ชัน เป็นต้น โดยในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎี และ ข้อมูลต่างๆ ที่นำมาใช้ในการออกแบบแขนหุ่นยนต์ ประกอบด้วยส่วนต่างๆต่อไปนี้

2.2 หุ่นยนต์สำหรับอุตสาหกรรม (Industrial Robot)

หุ่นยนต์สำหรับอุตสาหกรรม (Industrial Robot) ถูกวางรูปแบบให้มีลักษณะคล้ายคลึงแขนทางกายภาพของมนุษย์ โดยมีท่อนแขนจากหัวไหล่ถึงข้อศอก (Upper Arm) ท่อนแขนจากข้อศอกกับข้อมือ (Fore arm) และนิ้ว (Fingers) จนสุดแขน ส่วนอก (Chest) และแขนถูกติดเข้าที่ฐาน (Base) ของตัวหุ่นยนต์ ส่วนข้อต่อต่างๆของหุ่นยนต์จะมีชื่อเรียกว่า ไหล่ (Shoulder) ข้อศอก (Elbow) และข้อมือ (Wrist) ส่วนนิ้วของหุ่นยนต์จะเรียกว่า End - Effect ซึ่งอาจเป็น Tool หรือตัวจับ (Gripper) ที่ติดอยู่กับหุ่นยนต์ การเคลื่อนไหวของหุ่นยนต์ขึ้นอยู่กับลักษณะทางโครงสร้างของการเขียนโปรแกรมผ่านคอมพิวเตอร์ โดยหุ่นยนต์นี้จะรู้จักกันในนาม “Anthropomorphic หรือ Articulated Robots”



รูปที่ 2.1 Articulate Robot

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

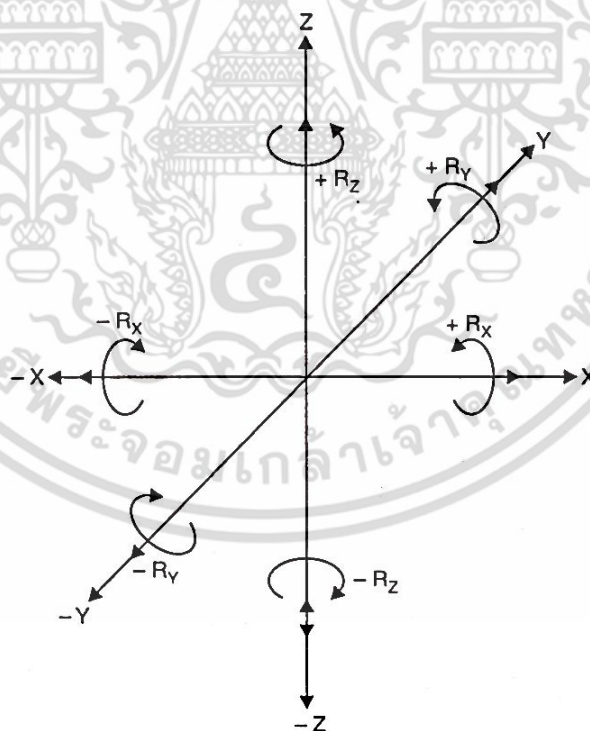
2.2.1 ลักษณะของหุ่นยนต์ (Overview of Robots)

ความเข้าใจสำคัญที่เป็นพื้นฐานเกี่ยวกับการนำหุ่นยนต์มาใช้งานอุตสาหกรรม รายละเอียดข้อมูลมีดังต่อไปนี้

2.2.1.1 Degree of Freedom

Degree of Freedom (DOF) หรือ ลำดับชั้นความอิสระ ในระบบของเครื่องจักรกล คือ จำนวนที่บ่งบอกถึงความสามารถ และอิสระในการเคลื่อนที่ หรือ การหมุนเพื่อเคลื่อนย้ายตำแหน่งของเครื่องจักร หรือ สิ่งของใดๆ ในระนาบสามมิติ โดยกำหนดให้ การเคลื่อนที่ในระนาบสามมิติมีทั้งหมด 6 แบบดังต่อไปนี้

1. การเคลื่อนที่ในแนวแกน X หรือ การเคลื่อนที่ไปด้านหน้า และ ด้านหลัง
2. การเคลื่อนที่ในแนวแกน Y หรือ การเคลื่อนที่ไปด้านข้าง ซ้ายและขวา
3. การเคลื่อนที่ในแนวแกน Z หรือ การเคลื่อนที่ ขึ้นและลง
4. การหมุนในแนวแกน X หรือ การหมุนแบบเอียงซ้าย เอียงขวา
5. การหมุนในแนวแกน Y หรือ การหมุนแบบเอียงไปข้างหน้า และหลัง
6. การหมุนในแนวแกน Z หรือ การหมุนไปตามระนาบ



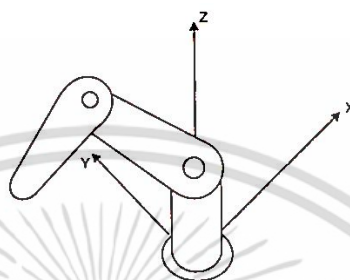
รูปที่ 2.2 Degree of Freedom

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.1.2 โครงพิกัดอ้างอิง (The Reference Frames)

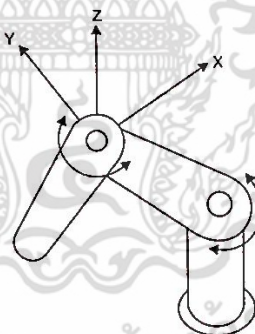
การอ้างอิงมี 3 ประเภท โดยพิจารณาจากโครงสร้างหุ่นยนต์

1. โครงพิกัดอ้างอิงฐาน (Base Reference Frame) เป็นแกนพื้นฐาน x, y, z ซึ่งเป็นแกนของฐาน อาจกำหนดไว้ให้หมุนรอบแกน z ตามความต้องการของงาน พิกัดอ้างอิงของฐานนี้เป็นระบบสากลของการอ้างอิงของหุ่นยนต์



รูปที่ 2.3 โครงพิกัดอ้างอิงฐาน

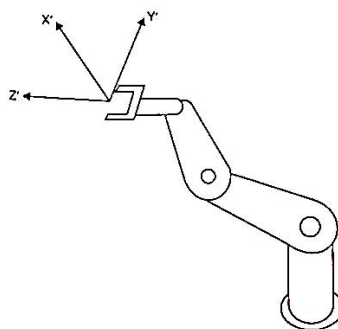
2. โครงพิกัดอ้างอิงข้อต่อ (Joint Reference Frame) เป็นแกนอ้างอิงที่กำหนดตำแหน่งข้อต่อ แต่ละข้อของหุ่นยนต์โดยตำแหน่ง และการหมุน ของข้อต่อหุ่นยนต์ที่เปลี่ยนไป โครงพิกัดอ้างอิงจะเปลี่ยนแปลงตาม



รูปที่ 2.4 โครงพิกัดอ้างอิงข้อต่อ

3. โครงพิกัดอ้างอิง Tool (Tool Center Point หรือ TCP1) เป็นจุดที่อ้างอิง โดยกำหนดที่จุดปลายสุดแขนหรือมือของหุ่นยนต์ โดยจุดปลายหรือโครงพิกัดอ้างอิงนี้จะมีความสัมพันธ์กับโครงพิกัดอ้างอิงของฐานโดยการถ่ายโอนพิกัด (Coordinates Transformation)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 โครงพิกัดอ้างอิง Tool

2.2.1.3 ข้อต่อหุ่นยนต์ (Robot Joints)

ข้อต่อแขนหุ่นยนต์ทำขึ้นเพื่อสร้างการเคลื่อนไหว อาจเป็นเส้นตรง หมุน หรือเป็นทรงต่างๆ ข้อต่อที่การเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงจะเรียกว่า ข้อต่อแบบ Prismatic ส่วนข้อต่อสร้างการเคลื่อนที่แบบหมุนจะเรียกว่า ข้อต่อแบบ Revolute และข้อต่อที่หมุนได้รอบจะเรียกว่า ข้อต่อแบบ Spherical

การเคลื่อนไหวของข้อต่อสามารถใช้ในการขับเคลื่อนโดยใช้ระบบไฮดรอลิก (Hydraulic) ระบบนิวแมติก (Pneumatic) หรือระบบไฟฟ้า (Electric Drive) โดยระบบขับเคลื่อน ไฮดรอลิกและนิวแมติกสามารถใช้สำหรับการยกวัตถุที่มีน้ำหนักมาก และสำหรับวัตถุน้ำหนักเบาจะใช้ระบบขับเคลื่อนไฟฟ้าก็เพียงพอ ส่วนมากแขนหุ่นยนต์ที่ใช้ในงานอุตสาหกรรมนิยมใช้ข้อต่อแบบ Prismatic หรือแบบ Revolute

2.2.1.4 ส่วนประกอบของหุ่นยนต์ (Robot Component)

สำหรับหุ่นยนต์ทางอุตสาหกรรมเพื่อให้ถูกต้องตรงกับความสามารถ จึงต้องทราบถึงส่วนประกอบ ดังต่อไปนี้

1. แขน (Arms) คือ หลายๆ แขนและหลายๆข้อต่อนำมารวมกันเป็นร่างของหุ่นยนต์จะถูกเรียกเป็นแมนิพูเลเตอร์ (Manipulator) ซึ่งคือเครื่องจักรกลของหุ่นยนต์
2. Tool หรือ End – Effectors คือ ส่วนที่เชื่อมต่อส่วนปลายของแขนที่เป็นฐานที่ตั้งของมือหุ่นยนต์ โดยมี Tool หัวต่างๆที่มีหน้าที่แตกต่างกันไปตามการใช้งาน อาทิเช่น ฟันสี หัวเชื่อมอินเล็กโทรด ตัวจับ หรือเครื่องมือตามการออกแบบต่างๆ เป็นต้น
3. ตัวกระทำ (Actuators) คือ ส่วนส่งกำลังไปยังส่วนข้อต่อของหุ่นยนต์ โดยจะสร้างการหมุนหรือการเปลี่ยนการเคลื่อนที่ของแขนต่างๆ ระบบส่งกำลังเป็นได้ทั้งระบบไฮดรอลิก หรือนิวเมติกส์ และมอเตอร์ชนิดเซอร์โว (Servo-motor) หรือ สเตปปีงมอเตอร์ (Stepper Motor)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. เซ็นเซอร์ (Sensors) คือ ส่วนจดจำตำแหน่งของแขนหุ่นยนต์ทั้งการเคลื่อนที่หรือหยุดนิ่ง โดยระยะการเคลื่อนไหวขึ้นอยู่กับการป้อนกลับของข้อมูลที่ได้รับโดยเซ็นเซอร์ เซ็นเซอร์นี้รวมถึงทำหน้าที่เก็บรวมข้อมูล
5. ตัวควบคุม (Controllers) คือ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ที่รับสัญญาณจากเซ็นเซอร์ และเป็นตัวจัดการให้ชุดขับเคลื่อนเข้าใจรูปแบบการเคลื่อนที่ การสร้างการเคลื่อนที่อาจจะเข้ากัน หรือไม่เข้ากันกับสิ่งที่ต้องการ โดยค่าความต่างจะถูกส่งกลับมาในรูปของค่าความผิดพลาด (Error) จากนั้นตัวควบคุมจะปรับให้เข้ากับ output ที่อ้างอิง จากนั้นจึงส่งข้อมูลไปยังอุปกรณ์ตัวกระตุ้นย้อนกลับ ค่าของการควบคุมและค่าของการป้อนกลับจะเป็นค่าที่อยู่ในระบบควบคุม
6. ซอฟต์แวร์ (Software) คือ ซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์และอุปกรณ์ผ่านโค้ด การคำนวณสู่การขับเคลื่อน แปลงเป็นตำแหน่งที่ต้องการ รวมทั้งความเร็วและความถูกต้องของการขับเคลื่อนจาก Kinematics Equations โดยการขับเคลื่อนจะเชื่อมต่อกับระบบคอมพิวเตอร์ ภาษาโปรแกรมมีทั้งภาษาระดับล่างที่เหมือนภาษาเครื่องจักร หรือเป็นภาษาขั้นสูงที่นิยมใช้ในปัจจุบัน

2.2.2 Articulated Robots หรือ Anthropomorphic

Articulated Robot หรือ Anthropomorphic Robot (3R) คือ หุ่นยนต์ประกอบด้วยข้อต่อเป็นแขนที่มีการเคลื่อนที่เป็นแบบหมุนได้ (Rotary Joint) มีความสามารถหมุนได้หลากหลายไปตามระนาบต่างๆ ซึ่งหุ่นยนต์ประเภทนี้ช่วยเพิ่มความสามารถของหุ่นยนต์ให้เพิ่มสูงขึ้น โดยมีข้อต่อแขนสำหรับการเคลื่อนที่มากกว่าหนึ่งข้อต่อเป็นต้นไป โดยแต่ละส่วนจะมีความสามารถที่ใช้งานขึ้นอยู่กับการออกแบบและฟังก์ชันที่ต้องการ หุ่นยนต์ที่มีข้อต่อแขนแบบหมุนนี้นิยมใช้ในงานที่มีความแม่นยำสูงในการเคลื่อนที่ จะพบแขนหุ่นยนต์ประเภทนี้ได้ในอุตสาหกรรมสายการผลิต โดยจะใช้ประโยชน์จากหุ่นยนต์นี้ในเรื่องความยืดหยุ่นสูงของข้อต่อแขนของหุ่นยนต์ ที่สามารถโค้งงอ และเคลื่อนที่ได้หลายทิศทาง ข้อต่อแขนหลายๆ แขนจะใช้การควบคุมหรือการดำเนินการหลายๆ ส่วนได้ในพร้อมกันเพียงครั้งเดียว ในตัวอย่างเช่น ข้อต่อแขนแบบหมุนที่ทำให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปกลับในพื้นที่ระนาบงานที่แตกต่างกัน นักวิจัยที่พัฒนาหุ่นยนต์จะต้องพัฒนาหุ่นยนต์เมื่อต้องการนำ Articulated Robot นี้ มาใช้ในงานต่างๆ อาทิ เช่น การสอนให้หุ่นยนต์เดิน และการพัฒนาการเคลื่อนไหว โดยข้อแขนต่างๆ ของหุ่นยนต์จะถูกโปรแกรมให้สามารถติดต่อกับข้อแขนอื่นๆ ได้ นอกจากนั้นสามารถใช้งานได้อย่างอิสระ มีระดับการใช้งานที่มากขึ้น ในอนาคตหุ่นยนต์ในลักษณะนี้เพราะสามารถในงานในฟังก์ชันที่มีระดับความยากได้มาก

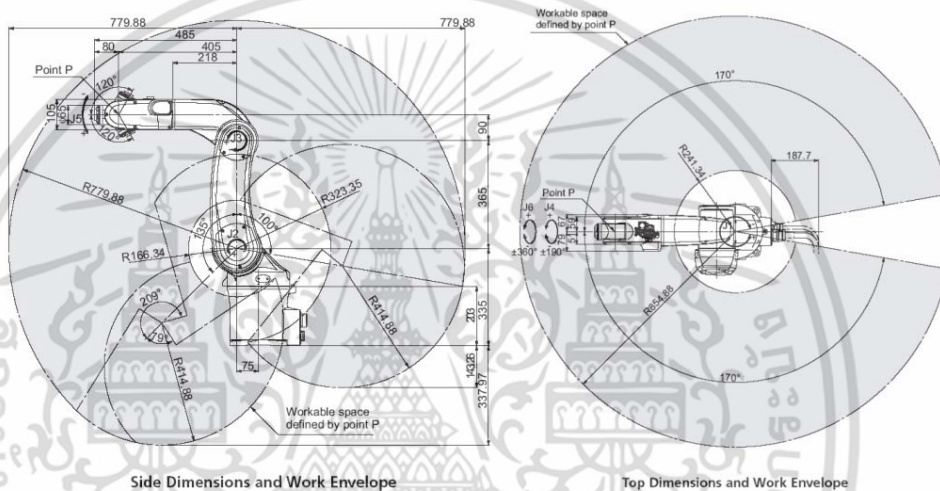
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 ข้อดีของ Articulated Robot

1. สามารถเคลื่อนที่ตามเส้นทางได้ต่อเนื่อง ตัวอย่างเช่น การประยุกต์ใช้กับการพ่นสีหรือการเชื่อม
2. สามารถใช้กับการเคลื่อนที่ที่ละเอียดๆ โดยมีค่าความผิดพลาดเล็กน้อย

2.2.4 พื้นที่การทำงาน Articulated Robot

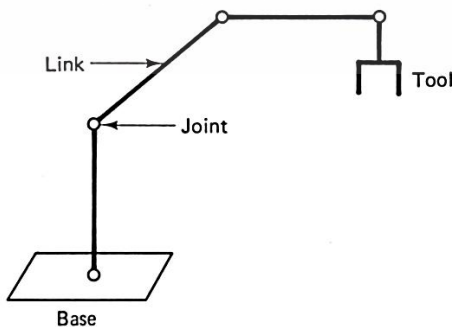
เนื่องจากเป็นแขนหุ่นยนต์แบบข้อต่อหมุน ที่มีทั้งหมด 3 ข้อต่อที่ ซึ่งสามารถเคลื่อนที่และ หมุนได้ทั้งในแกน x, y, z ดังนั้นจึงมีรูปร่างพื้นที่ระยะการเคลื่อนไปได้ตามรูป ดังนี้



รูปที่ 2.6 พื้นที่ระยะความสามารถการเคลื่อนที่ไปได้ของหุ่นยนต์ Articulated

2.3 Forward Kinematics: The Arm Equation [2]

แขนหุ่นยนต์มีลักษณะเป็นวัตถุแข็งเกร็ง (Rigid Body) เป็นแขนหลายๆ อันนำมาเชื่อมต่อเข้าด้วยกันโดยใช้ข้อต่อ ดังรูปที่ 2.7 ปลายเป็นข้อหนึ่งของแขน ริมสุดจะติดแน่นกับฐานส่วนปลายของแขนอีกอันจะเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ ปลายเป็นข้อที่เคลื่อนที่นี้จะต่อเข้ากับ Tool



รูปที่ 2.7 หุ่นยนต์ที่มีลักษณะเป็นแขน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 ทฤษฎีพื้นฐานที่ใช้ในการวิจัย

2.4.1 เมทริกซ์ (Matrix) และการใช้งาน

เมทริกซ์ คือกลุ่มของจำนวนหรือสมาชิกของจำนวนใดๆ เขียนเรียงกันเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าหรือจัตุรัส กล่าวคือเรียงเป็นแถวในแนวนอน และเรียงเป็นแถวในแนวตั้ง เรามักเขียนเมทริกซ์เป็นตารางที่ไม่มีเส้นแบ่งและเขียนวงเล็บคร่อมตารางไว้ (ไม่ว่าจะเป็นวงเล็บโค้งหรือวงเล็บเหลี่ยม) เช่น

$$\begin{bmatrix} a & b & c \\ d & e & f \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \\ e & f \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

โดย สมาชิกของเมทริกซ์จะเป็นจำนวนใดก็ได้ เช่น จำนวนจริง จำนวนเชิงซ้อน บางครั้งอาจจะเป็นเมทริกซ์ หรือ สมาชิกของระบบทางพีชคณิตใดๆก็ได้ การเขียนแสดงสัญลักษณ์ (เมทริกซ์) จะใช้วงเล็บ [] หรือ () แต่ในที่นี้จะใช้วงเล็บ []

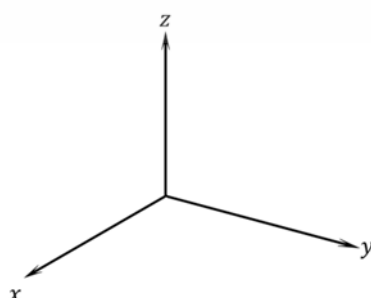
ถ้าเมทริกซ์มี m แถว จำนวน n หลัก จะสามารถเรียกเมทริกซ์ได้ว่า $m \times n$ เมทริกซ์ (m by n matrix) และ กล่าวได้ว่าเมทริกซ์นั้นมีมิติ (dimension หรือ order) เท่ากับ $m \times n$ โดยสามารถเขียนแทนได้ดังนี้

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \cdots & \cdots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & \cdots & a_{mn} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

$$\text{โดย } A = A_{m \times n} = [a_{ij}] \text{ เมื่อ } i = 1, 2, \dots, m$$

$$\text{และ } j = 1, 2, \dots, n$$

โดยเนื้อหาของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะมีการประยุกต์ใช้ เมทริกซ์ เพื่อระบุค่าต่างๆในระบบระนาบสามมิติ x, y, z ตามรูป 2.8 ตามหัวข้อต่อไป



รูปที่ 2.8 จำลองระบบระนาบสามมิติ x, y, z

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.1.1 ระบุตำแหน่งของจุดในระนาบสามมิติ (Point in 3D-Space)

สมมุติให้จุด P อยู่ ณ ตำแหน่งหนึ่งในแกนระนาบสามมิติ เราสามารถอธิบายถึงตำแหน่งของจุด P อ้างอิงความสัมพันธ์ เทียบกับ แกนระนาบสามมิติได้ตามรูปที่ 2.9

$$P = a_x\hat{i} + b_y\hat{j} + c_z\hat{k} \quad (2.3)$$

โดยที่ a_x , b_y และ c_z คือ ปริมาณสเกลาร์เทียบกับแกน x, y และ z ตามลำดับของจุดเปรียบเทียบกับจุดเริ่มต้นของแกนแต่ละกรอบอ้างอิงในระนาบสามมิติ เพราะฉะนั้น ตำแหน่งของพิกัด หรือ จุด อื่นๆในระนาบสามมิติสามารถอธิบายได้ด้วยรูปสมการ (2.3) ดังที่อธิบายเช่นเดียวกัน



รูปที่ 2.9 ตำแหน่งของจุด P อ้างอิงความสัมพันธ์ เทียบกับ แกนระนาบสามมิติ x, y, z

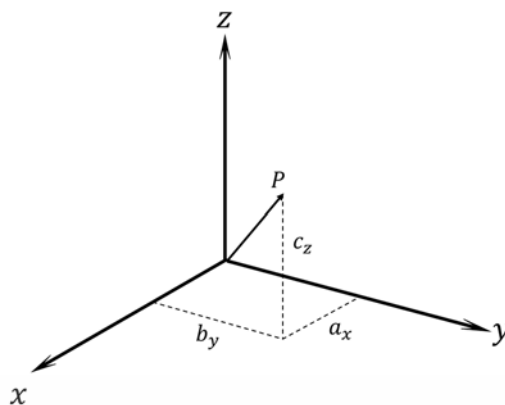
2.4.1.2 ระบุขนาด และ ทิศทางของเวกเตอร์ในระนาบสามมิติ (Vector in 3D-Space)

เวกเตอร์ทางคณิตศาสตร์ คือ หน่วยปริมาณหนึ่งซึ่งประกอบด้วย ปริมาณ และ ทิศทาง เช่น ในระนาบสามมิติ มี P ที่เริ่มจากจุด A ไปยังจุด B เราสามารถเขียนสมการแทนรูปของเวกเตอร์ได้ดังด้วยสมการ (2.4) นี้

$$\vec{P}_{AB} = (B_x - A_x)\hat{i} + (B_y - A_y)\hat{j} + (B_z - A_z)\hat{k} \quad (2.4)$$

ถ้าหากว่าเวกเตอร์ P มีจุดเริ่มต้นเดียวกันกับแกนอ้างอิงในระนาบสามมิติ เห็นได้ว่า สามารถเขียนสมการแทนเวกเตอร์ P ตามรูปที่ 2.10 ได้ดังนี้

$$\vec{P} = a_x\hat{i} + b_y\hat{j} + c_z\hat{k} \quad (2.5)$$



รูปที่ 2.10 เวกเตอร์ P ในแกนระนาบสามมิติ x, y, z

โดยที่ a_x, b_y และ c_z คือส่วนประกอบของเวกเตอร์ที่แสดงปริมาณสเกลาร์เทียบกับแกน x, y และ z ตามลำดับของ ส่วนหัวของเวกเตอร์ เทียบกับจุดเริ่มต้นของแกนแต่ละกรอบอ้างอิงในระนาบสามมิติ โดยเราสามารถเขียนแทนรูปสมการของเวกเตอร์ P ในรูปของ เมทริกซ์ ได้ดังสมการ

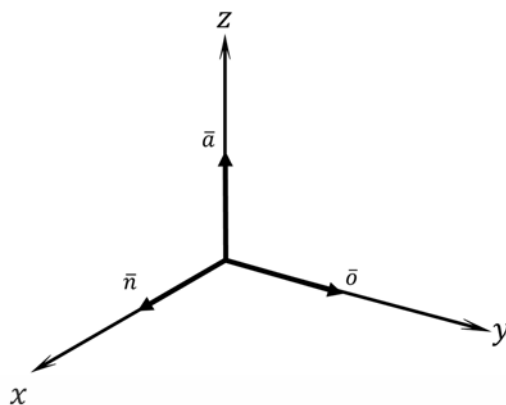
$$\vec{P} = \begin{bmatrix} a_x \\ b_y \\ c_z \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

โดยเนื้อหาภายในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้ การแทนค่าเวกเตอร์ และ อธิบายสมการพีชคณิตของแต่ละแกนในระนาบสามมิติด้วยเมทริกซ์ดังตัวอย่างที่กล่าวมา

2.4.1.3 ระบุตำแหน่งของกรอบอ้างอิงในระนาบสามมิติ (Frame in 3D-Space)

สมมุติให้กรอบอ้างอิงหนึ่งเรียกแทนด้วย F มีจุดเริ่มต้น เดียวกันกับระนาบสามมิติ ซึ่งกรอบอ้างอิงนี้ประกอบด้วยเวกเตอร์หนึ่งหน่วย สาม ตัว ต่างทำมุมตั้งฉากซึ่งกันและกัน โดยเวกเตอร์แต่ละตัวเขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ \hat{n}, \hat{o} และ \hat{a} อ้างอิงตามรูปที่ 2.11 เราสามารถอธิบายความสัมพันธ์ของเวกเตอร์หนึ่งหน่วยทั้งสามตัวของกรอบอ้างอิง F ในรูปแบบเมทริกซ์ ได้ดังสมการ

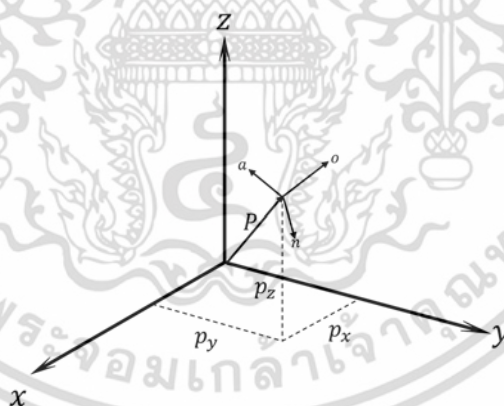
$$F = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x \\ n_y & o_y & a_y \\ n_z & o_z & a_z \end{bmatrix} \quad (2.7)$$



รูปที่ 2.11 เวกเตอร์ \vec{n} , \vec{o} และ \vec{a} ในแกนระนาบสามมิติ x, y, z

หากว่ากรอบอ้างอิง F ดังที่อธิบายไปไม่ได้มีจุดเริ่มต้น เดียวกันกับระนาบสามมิติแต่มีพิกัดอยู่ที่จุด P ในระนาบสามมิติ ตามรูปที่ 2.12 เราสามารถอธิบายพิกัด และ ทิศทางของกรอบอ้างอิง F ในรูปแบบเมทริกซ์ ได้ดังสมการ

$$F = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & P_x \\ n_y & o_y & a_y & P_y \\ n_z & o_z & a_z & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$



รูปที่ 2.12 ตำแหน่ง และ ทิศทางของกรอบอ้างอิง F ในแกนระนาบสามมิติ x, y, z

2.4.1.4 การเคลื่อนย้ายในระนาบสามมิติ (Transformation in 3D-Space)

ในเบื้องต้น ทิศทางและ การเคลื่อนที่ในระนาบสามมิติของเวกเตอร์ วัตถุ หรือ กรอบอ้างอิงใดๆ สามารถแจกแจงลักษณะการหมุน และ เคลื่อนที่โดยพื้นฐานตามนี้

- การเคลื่อนที่เพียงอย่างเดียว (Pure Translation)
- การหมุนรอบแกนเพียงอย่างเดียว (Pure Rotation about a axis)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การเคลื่อนที่ และ การหมุนร่วมกัน (Combine of Translation and Rotation)

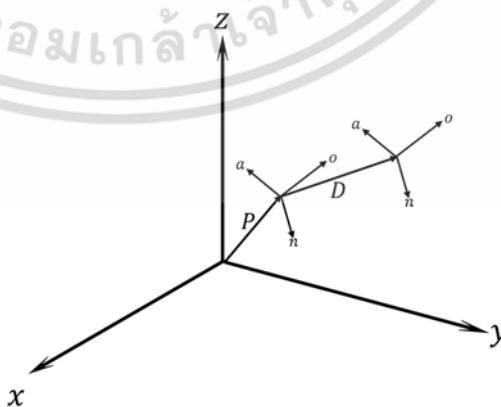
2.4.1.4.1 การเคลื่อนที่เพียงอย่างเดียว (Pure Translation)

การเคลื่อนที่เพียงอย่างเดียว หมายถึง กรณีที่ กรอบอ้างอิงใดๆ (เวกเตอร์ วัตถุ หรือ ตัวกรอบอ้างอิงเอง) มีการเคลื่อนที่ตามทิศทางของระนาบกรอบอ้างอิงเอง เพียงอย่างเดียว โดย ไม่มีการหมุนรอบแกนใดๆ สมมติให้ เมทริกซ์ T แทนการเคลื่อนที่ด้วยเวกเตอร์ขนาด D ในระนาบสามมิติ เราสามารถเขียนอธิบาย เมทริกซ์ T ได้ดังสมการ

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & d_x \\ 0 & 1 & 0 & d_y \\ 0 & 0 & 1 & d_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

โดยที่ d_x , d_y และ d_z คือส่วนประกอบของเวกเตอร์ D ที่แสดงตำแหน่งของ ส่วนหัวของเวกเตอร์ เทียบกับจุดเริ่มต้นของแต่ละแกน (x, y, z) ในกรอบอ้างอิงระนาบสามมิติ ถ้าหากว่าตำแหน่งของกรอบอ้างอิง F ตามสมการที่ 2.8 มีเคลื่อนที่เพียงอย่างเดียวเท่ากับ T เราจะสามารถหาตำแหน่งใหม่ของกรอบอ้างอิง F ตามรูปประกอบ 2.13 ได้ตามการคูณเมทริกซ์ดังนี้

$$F = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & d_x \\ 0 & 1 & 0 & d_y \\ 0 & 0 & 1 & d_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & P_x \\ n_y & o_y & a_y & P_y \\ n_z & o_z & a_z & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & P_x + d_x \\ n_y & o_y & a_y & P_y + d_y \\ n_z & o_z & a_z & P_z + d_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

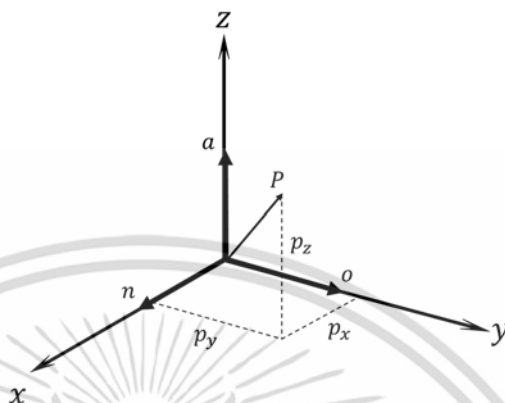


รูปที่ 2.13 ตำแหน่ง และ ทิศทางของกรอบอ้างอิง F หลังเคลื่อนที่เท่ากับเวกเตอร์ D

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

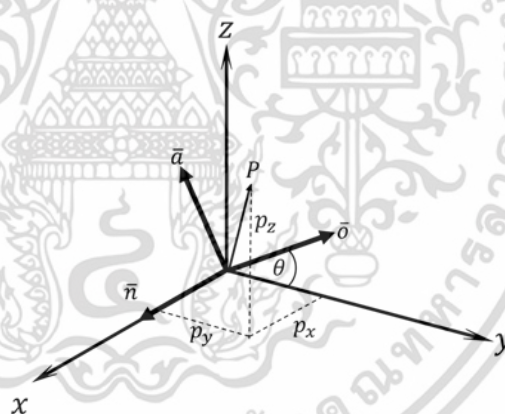
2.4.1.4.2 การหมุนรอบแกนเพียงอย่างเดียว (Pure Rotation about a axis)

ในเบื้องต้นเราจะให้สมมุติกรอบอ้างอิง F ตามสมการที่ 2.8 ซึ่งอยู่ตำแหน่งเดียวกันกับ จุดเริ่มต้นของแกนในระนาบสามมิติ โดยแต่ละแกนของ F (\bar{n} , \bar{o} , \bar{a}) ขนานไปกับแกนของระนาบสามมิติ (x, y, z) ตามรูปที่ 2.14



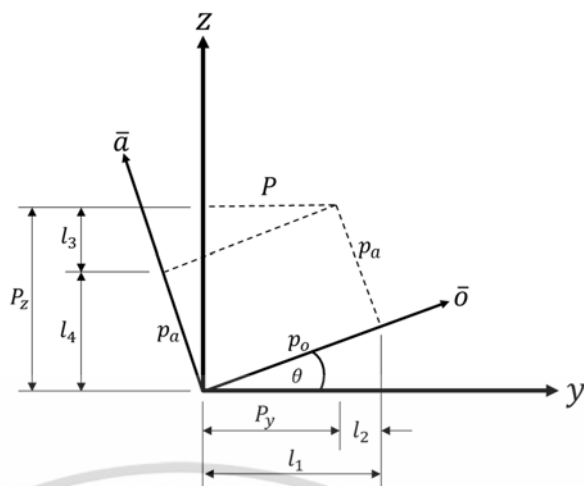
รูปที่ 2.14 ตำแหน่ง และ ทิศทางของกรอบอ้างอิง F ก่อนการหมุนแกน X

โดยที่ตำแหน่งของกรอบอ้างอิง F มีการหมุนรอบแกน X ของระนาบสามมิติเท่ากับ θ ตามรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 ตำแหน่ง และ ทิศทางของกรอบอ้างอิง F หลังการหมุนแกน X

ตำแหน่งของกรอบอ้างอิง F มีการเปลี่ยนแปลงจากการหมุน โดยถ้าหากฉายภาพไปยังแกน $y-z$ ของรูปที่ 2.15 จะเห็นความสัมพันธ์ที่เกิดจากการหมุนแกน x ดังแสดงในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 ภาพฉาย แกน y-z แสดงตำแหน่ง และ ทิศทาง
ของกรอบอ้างอิง F หลังการหมุนแกน X

เราสามารถเขียนอธิบายความสัมพันธ์ของตัวแปรตามรูปที่ 2.9 ให้อยู่ในรูปสมการ
พีชคณิตได้ดังนี้

$$P_x = P_n \quad (2.11)$$

$$P_y = l_1 - l_2 = P_o \cos \theta - P_a \sin \theta \quad (2.12)$$

$$P_z = l_3 + l_4 = P_o \sin \theta + P_a \cos \theta \quad (2.13)$$

และ สามารถแปลงสมการให้อยู่ในรูปของเมทริกซ์ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_n \\ P_o \\ P_a \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

เพราะฉะนั้นในกรณีเดียวกัน ถ้าหากกรอบอ้างอิง F หมุนในแกน y หรือ z จะสามารถหา
ความสัมพันธ์ได้ด้วยวิธีเดียวกันโดย สามารถสรุปสมการ การหมุนของแต่ละแกนในรูป
เมทริกซ์ได้ดังนี้

$$Rot(x, \theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & C\theta & -S\theta \\ 0 & S\theta & C\theta \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

$$Rot(y, \theta) = \begin{bmatrix} C\theta & 0 & S\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -S\theta & 0 & C\theta \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

$$Rot(z, \theta) = \begin{bmatrix} C\theta & -S\theta & 0 \\ S\theta & C\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.1.4.3 การเคลื่อนที่ และ การหมุนร่วมกัน (Combine of Translation and Rotation)

การเคลื่อนที่ และ การหมุนร่วมกัน หมายถึง กรอบอ้างอิงใดๆ มีการเคลื่อนที่ตามกรอบที่วัตถุอ้างอิง และมีทิศทางการหมุนตามแกนของกรอบที่วัตถุอ้างอิง ซึ่งมีการดำเนินการ ตามลำดับ โดยการเคลื่อนที่ และ การหมุนร่วมกันนั้นๆ จะสามารถอธิบายได้ 2 วิธีลักษณะคือ

- เคลื่อนที่และหมุนโดยใช้แกน และ กรอบอ้างอิงของระนาบสามมิติ (Universe Frame - x, y, z)

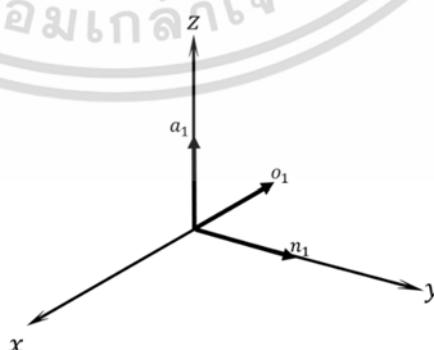
- เคลื่อนที่และหมุนโดยใช้แกน และ กรอบอ้างอิงของตัวเอง ($\bar{n}, \bar{o}, \bar{a}$)

ซึ่งในเบื้องต้นนั้น เราจะกำหนดให้ กรอบอ้างอิงของตัวเอง หรือ ของวัตถุใดๆ ($\bar{n}, \bar{o}, \bar{a}$) ให้มีทิศทางขนานกันกับ กรอบอ้างอิงของระนาบสามมิติ (Universe Frame - x, y, z) ทุกครั้งไป อ้างอิงตามรูปที่ 2.11

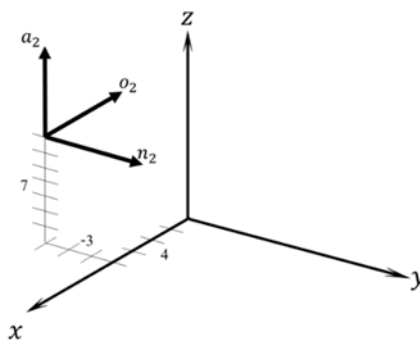
ความแตกต่างกันระหว่างการเคลื่อนที่ และ การหมุนของทั้งสองลักษณะคือ ลำดับในการคูณของเมทริกซ์ ซึ่งจะส่งผลให้การเคลื่อนที่ และ การหมุนของแต่ละครั้งมีผลแตกต่างกันอย่างสิ้นเชิง ยกตัวอย่าง อธิบายดังต่อไปนี้

ตัวอย่างที่ 1. การเคลื่อนที่และหมุนโดยใช้แกน และ กรอบอ้างอิงของระนาบสามมิติ (x, y, z)

- (1) กำหนดให้จุด $P(7,3,2)$ อยู่ในกรอบอ้างอิง F
- (2) ลำดับที่ 1 ให้กรอบอ้างอิง F หมุนรอบแกน Z 90 องศา (อ้างอิงตามรูปที่ 2.17)
- (3) ลำดับที่ 2 ให้กรอบอ้างอิง F ทำการเคลื่อนที่เป็นระยะ $[4, -3, 7]$ (อ้างอิงตามรูปที่ 2.18)
- (4) ลำดับที่ 3 ให้กรอบอ้างอิง F หมุนรอบแกน Y 90 องศา (อ้างอิงตามรูปที่ 2.19)



รูปที่ 2.17 ตำแหน่ง และ ทิศทางของกรอบอ้างอิง F หลังการเคลื่อนย้ายลำดับที่ 1



รูปที่ 2.18 ตำแหน่ง และ ทิศทางของกรอบอ้างอิง F หลังทำการเคลื่อนย้ายลำดับที่ 2



รูปที่ 2.19 ตำแหน่ง และ ทิศทางของกรอบอ้างอิง F และจุด P หลังการเคลื่อนย้ายลำดับที่ 3

จากการเคลื่อนที่ และ หมุนตามลำดับดังกล่าว สามารถหาตำแหน่งสุดท้ายของกรอบอ้างอิง F และ จุดอ้างอิง P เทียบกับกรอบอ้างอิงของระนาบสามมิติ P_{xyz} ได้ตามสมการดังต่อไปนี้

$$P_{xyz} = Rot(y, 90)Trans(4, -3, 7)Rot(z, 90)P_{noa} \tag{2.18}$$

$$P_{xyz} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 4 \\ 0 & 1 & 0 & -3 \\ 0 & 0 & 1 & 7 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 7 \\ 3 \\ 2 \\ 1 \end{bmatrix} \tag{2.19}$$

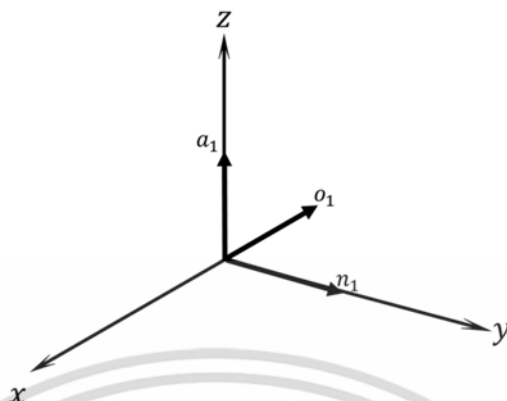
$$P_{xyz} = \begin{bmatrix} 9 \\ 4 \\ -1 \\ 1 \end{bmatrix} \tag{2.20}$$

ตัวอย่างที่ 2. การเคลื่อนที่และหมุนโดยใช้แกน และ กรอบอ้างอิงของวัตถุ ($\vec{n}, \vec{o}, \vec{a}$)

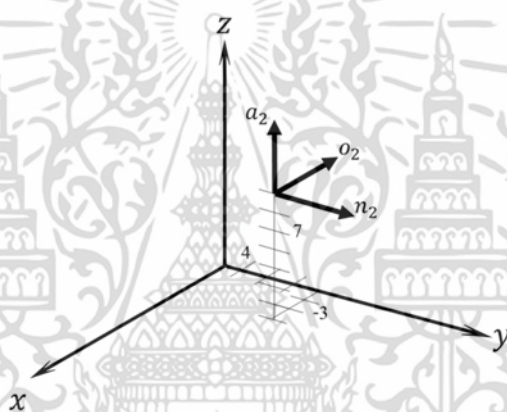
- (1) กำหนดให้จุด $P(7,3,2)$ อยู่ในกรอบอ้างอิง F
- (2) ลำดับที่ 1 กำหนดให้หมุนกรอบอ้างอิง F หมุนรอบแกน a 90 องศา (อ้างอิงตามรูปที่ 2.20)
- (3) ลำดับที่ 2 ให้ทำการเคลื่อนที่ที่เป็นระยะ $[4, -3, 7]$ (อ้างอิงตามรูปที่ 2.21)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

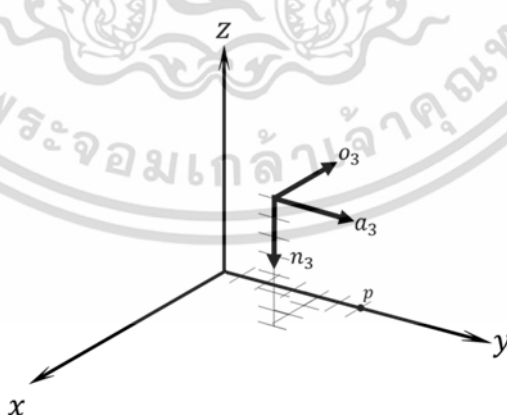
(4) ลำดับที่ 3 ให้หมุนรอบแกน o เป็นมุม 90 องศา (อ้างอิงตามรูปที่ 2.22)



รูปที่ 2.20 ตำแหน่ง และ ทิศทางของกรอบอ้างอิง F หลังการเคลื่อนย้ายลำดับที่ 1



รูปที่ 2.21 ตำแหน่ง และ ทิศทางของกรอบอ้างอิง F หลังทำการเคลื่อนย้ายลำดับที่ 2



รูปที่ 2.22 ตำแหน่ง และ ทิศทางของกรอบอ้างอิง F และจุด P หลังการเคลื่อนย้ายลำดับที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการเคลื่อนที่ และ หมุนตามลำดับดังกล่าว สามารถหาตำแหน่งสุดท้ายของกรอบอ้างอิง F และ จุดอ้างอิง P เทียบกับกรอบอ้างอิงของระนาบสามมิติ P_{xyz} ได้ตามสมการดังต่อไปนี้

$$P_{xyz} = Rot(\bar{a}, 90)Trans(4, -3, 7)Rot(\bar{o}, 90)P_{noa} \quad (2.21)$$

$$P_{xyz} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 4 \\ 0 & 1 & 0 & -3 \\ 0 & 0 & 1 & 7 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 7 \\ 3 \\ 2 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

$$P_{xyz} = \begin{bmatrix} 0 \\ 6 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

จากคำตอบ P_{xyz} ของตัวอย่างที่ 1 และ 2 ที่กล่าวมาแสดงให้เห็นว่า แม้ลำดับของการเคลื่อนที่ และ หมุนที่เกิดขึ้นจะเหมือนกัน แต่คำตอบสุดท้ายของตำแหน่ง และ ทิศทางกรอบอ้างอิง F กับจุดอ้างอิง P ไม่ได้อยู่บนตำแหน่งเดียวกัน ผลเนื่องจาก ลำดับ ในการคูณของเมทริกซ์ที่แตกต่างกัน สาเหตุเพราะ การเคลื่อนที่และหมุน ที่เกิดขึ้นของตัวอย่างทั้งสองนั้นกระทำโดย ใช้กรอบอ้างอิง ที่แตกต่างกัน

2.4.1.5 อินเวอร์สเมทริกซ์ (INVERSE MATRICES)

สำหรับวิทยานิพนธ์ในฉบับนี้ ทำการหา อินเวอร์สเมทริกซ์ เพื่อใช้ในการคำนวณหาตำแหน่ง และ องศาที่ต้องการ โดยย้อนกลับจากจุดสุดท้ายที่ต้องการให้ แขนกล เอ็มไป หรือ หยิบจับ ดังนั้น เมทริกซ์ที่นำมาใช้งาน เพื่อหาอินเวอร์สเมทริกซ์ จะเป็นเมทริกซ์ที่บ่งบอกตำแหน่งทิศทาง และ องศาของการหมุน หรือ Transformation Matrix โดยวิธีการหา อินเวอร์สของเมทริกซ์นั้นจะทำตามลำดับต่อไปนี้

- คำนวณหาค่า Determinant ของเมทริกซ์
- คำนวณหา Transpose ของเมทริกซ์
- หา Adjoint เมทริกซ์ จาก Transpose ของเมทริกซ์
- หาร Adjoint เมทริกซ์ ที่กล่าวมาด้วยค่า Determinant

เพื่อให้ง่ายต่อการเข้าใจ เราจะยกตัวอย่างการหาอินเวอร์สของเมทริกซ์ดังต่อไปนี้

ตัวอย่างที่ 1 การหาอินเวอร์สของเมทริกซ์ $Rot(x, \theta)$

$$Rot(x, \theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & C\theta & -S\theta \\ 0 & S\theta & C\theta \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

1. หาค่า Determinant ของ Matrix $Rot(x, \theta)$

$$\det = 1(C^2\theta + S^2\theta) + 0 = 1 \quad (2.25)$$

2. หา Transpose ของ Matrix $Rot(x, \theta)$

$$Rot(x, \theta)^T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & C\theta & S\theta \\ 0 & -S\theta & C\theta \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

3. หา Adjoint เมทริกซ์ ของเมทริกซ์ตามสมการที่ 2.26

$$Rot(x, \theta)^T_{minor} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & C\theta & S\theta \\ 0 & -S\theta & C\theta \end{bmatrix} = Rot(x, \theta)^T \quad (2.27)$$

4. ทหาร เมทริกซ์ ที่กล่าวมาด้วยค่า Determinant แต่เนื่องจากค่า Determinant ของเมทริกซ์ มีค่าเท่ากับ 1 ดังนั้นจะเห็นได้ว่า อินเวอร์สเมทริกซ์ $Rot(x, \theta)$ จะมีค่าดังนี้

$$Rot(x, \theta)^{-1} = Rot(x, \theta)^T \quad (2.28)$$

จากตัวอย่างดังกล่าวที่ยกมาจะเห็นว่าอินเวอร์สเมทริกซ์ของ $Rot(x, \theta)$ มีค่าเท่ากับเมทริกซ์ Transpose ของตัวเอง เนื่องจาก $Rot(x, \theta)$ มีคุณลักษณะเป็นเมทริกซ์ Unitary กล่าวคือ Adjoint ของ Transpose เมทริกซ์นั้นมีค่า เท่ากับ Transpose ของตัวเอง ดังนั้นเราสามารถหา อินเวอร์ส ของเมทริกซ์ Transformation ได้ด้วยวิธีเดียวกัน โดยการทำการ Transpose ในส่วนของ Rotation Matrix จากนั้นจึง คำนวณส่วนของ Position ด้วยการคูณดอทโปรดักของเวกเตอร์โดยมีทิศทางตรงกันข้ามตามลำดับ

$$T = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & P_x \\ n_y & o_y & a_y & P_y \\ n_z & o_z & a_z & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$T^{-1} = \begin{bmatrix} n_x & n_y & n_z & -\bar{P} \cdot \bar{n} \\ o_x & o_y & o_z & -\bar{P} \cdot \bar{o} \\ a_x & a_y & a_z & -\bar{P} \cdot \bar{a} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

2.4.2 Forward and Inverse Kinematic of Robots

สมมุติสถานการณ์ให้แขนกล ชนิดใดๆที่เราศึกษาอยู่ โดยเราทราบข้อมูลของแขนกล ทั้งหมด เช่น ระยะห่างระหว่างข้อต่อหนึ่ง ถึง ข้อต่อหนึ่ง หรือ ค่าองศาที่หมุนไปของแต่ละข้อต่อ และ การตั้งค่าต่างๆ จากนั้นนำข้อมูลที่เราทราบ มาคำนวณหาตำแหน่ง และ องศาของแขนกล ที่เคลื่อนไปในระนาบแกนสามมิติ เราเรียกกระบวนการคำนวณแบบนี้ว่า Forward Kinematic

ถ้าหากในสถานการณ์ที่กลับกัน โดยเรามีข้อมูลของ ตำแหน่งและองศาที่ต้องการใดๆ ในระนาบสามมิติ เพื่อให้แขนกล เคลื่อนที่เข้าหาตำแหน่งนั้น เราจึงต้องคำนวณหาค่าข้อต่อ แต่ละข้อต่อ ของแขนกล เราเรียกกระบวนการคำนวณย้อนกลับนี้ว่า Inverse Kinematic

เพราะฉะนั้นหลักการ เบื้องต้นของการออกแบบ แขนกล จะเริ่มจากการทำโครงร่าง ของแขนกล และหาสมการ Forward Kinematic หลังจากนั้นจึงนำสมการที่หาค่าตำแหน่งสุดท้ายของแขนกลนั้น มาคำนวณย้อนกลับไปหาสมการ Inverse Kinematic เพื่อหาค่าข้อต่อ แต่ละข้อต่อ ที่แขนกลต้องหมุนไป โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะอธิบาย และ กล่าวถึงวิธีการหา Forward Kinematic โดยใช้วิธีการของ Denavit-Hartenberg และทำการแก้สมการเพื่อหา Inverse Kinematic ของแขนกล ซึ่งจะอธิบายในหัวข้อต่อไป

2.4.2.1 Denavit-Hartenberg Representation of Forward Kinematic Equation of Robot

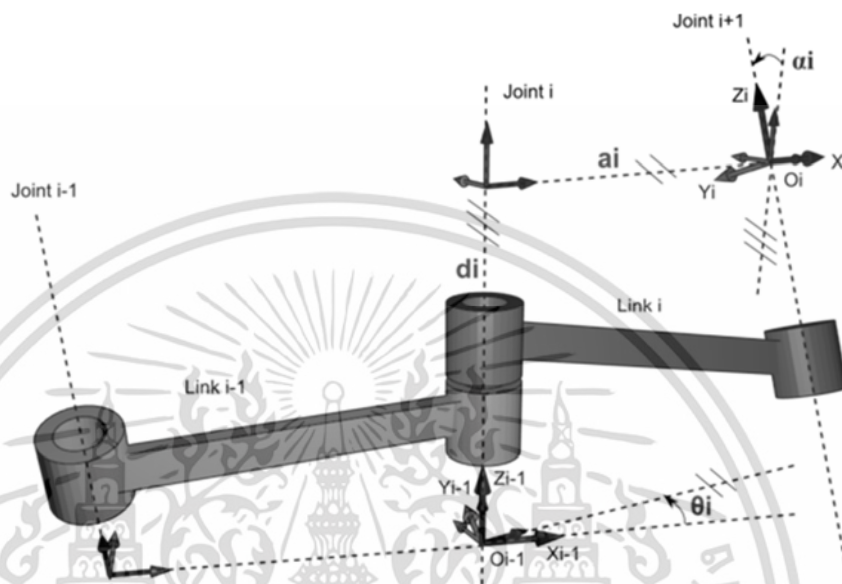
ในปี 1955 Denavit-Hartenberg ได้ตีพิมพ์หัวข้อลงในวารสาร ASME Journal of Applied Mechanics หัวข้อที่นำเสนอมานั้นเป็นวิธี และ กระบวนการเพื่อคำนวณหาตำแหน่งของแขนกลในระนาบสามมิติ ซึ่งต่อมาในภายหลังหลักการดังกล่าวถูกนำมาประยุกต์ใช้งานอย่างแพร่หลาย และ กลายเป็นหนึ่งในโมเดลมาตรฐานที่นำมาใช้ในการคำนวณการเคลื่อนที่ของแขนกล [2]

ในการนำหลักการ และ เทคนิคนี้มาใช้งาน เราจะต้องทำการกำหนดกรอบอ้างอิงของแต่ละข้อต่อของแขนกล จากนั้นจึงหาความสัมพันธ์ของกรอบอ้างอิงจากข้อต่อนึง ไปถึงกรอบอ้างอิงของข้อต่อถัดไปโดยใช้ Transformation Matrix ในการอธิบายระยะทางการเคลื่อนที่ และ การหมุน ของความสัมพันธ์ดังกล่าว

เริ่มด้วยการสมมุติให้ แขนกล ดังรูปที่ 2.23 ประกอบด้วยข้อต่อทั้งหมด 3 ข้อ โดยที่

แต่ละข้อต่ออาจอยู่ในรูปแบบ การหมุน หรือ สไลด์ เราจะทำการกำหนดกรอบอ้างอิงที่แต่

ละข้อต่อ โดยเริ่มที่ข้อต่อแรกด้วยการแทนสัญลักษณ์ $Joint : i - 1$ ตามด้วย $Joint : i$ และ $Joint : i + 1$ ตามลำดับ โดยระยะทางที่เชื่อมต่อของแต่ละข้อต่อ จะถูกกำหนดแทนด้วย $Link : i - 1$ และ $Link : i$ ตามลำดับ โดยที่ $Link : i - 1$ จะหมายถึงความระยะทางระหว่าง $Joint : i - 1$ กับ $Joint : i$ เรียงลำดับกันไป



รูปที่ 2.23 การเคลื่อนย้ายกรอบอ้างอิง F โดยวิธีการ Denavit-Hartenberg [14]

โดยมีหลักการเคลื่อนที่แกนอ้างอิงจาก $Joint : i - 1$ ไปยัง $Joint : i$ และ $Joint : i + 1$ ตามลำดับการเคลื่อนที่และการหมุนของ Denavit-Hartenberg ดังนี้

- ลำดับที่ 1 ทำการ หมุนรอบแกนอ้างอิง Z_{i-1} โดยค่าองศาที่หมุนไปจะแทนด้วยสัญลักษณ์ θ_i (มุมระหว่างแกน X_{i-1} ถึง X_i หมุนรอบแกน Z_{i-1})
- ลำดับที่ 2 ทำการ เคลื่อนย้ายแกนอ้างอิงในแนวระนาบ Z_{i-1} โดยระยะที่เคลื่อนที่ไปแทนด้วยสัญลักษณ์ d_i (ระยะจากแกน X_{i-1} ถึง X_i วัดตามแนวแกน Z_{i-1})
- ลำดับที่ 3 เคลื่อนย้ายแกนอ้างอิงในแนวระนาบ X_{i-1} โดยระยะที่เคลื่อนที่ไปแทนด้วยสัญลักษณ์ a_i (ระยะจากแกน Z_{i-1} ถึง Z_i วัดตามแนวแกน X_i)
- ลำดับที่ 4 หมุนรอบแกนอ้างอิง X_{i-1} โดยค่าองศาที่หมุนไปจะแทนด้วยสัญลักษณ์ α_i (มุมบิดระหว่างแกน Z_{i-1} ถึง Z_i รอบแกน X_i)

โดยมีหลักการกำหนดแกนดังต่อไปนี้

1. เริ่มจากฐานของแขนกล กำหนดแกนอ้างอิงเป็น ตำแหน่งแรก ร่วมกับแกนอ้างอิงของระนาบสามมิติ
2. กำหนดแกนอ้างอิงถัดไปของแต่ละข้อต่อ โดยให้แกน Z มีทิศทางในแนวเดียวกันกับการหมุน หรือ การเคลื่อนที่

ด้วยการเคลื่อนย้ายและ การหมุนแกนอ้างอิงตามลำดับที่ตั้งที่อ้างอิง เราจะสามารถเขียนอธิบายความสัมพันธ์การเคลื่อนที่ของกรอบอ้างอิงระหว่าง *Joint : i* ไปยัง *Joint : i + 1* ด้วย Transformation Matrix ได้ดังนี้

$${}^i T_{i+1} = A_{i+1} = Rot(z_{i-1}, \theta_i) \times Trans(0,0, d_i) \times Trans(a_i, 0,0) \times Rot(x_{i-1}, \alpha_i) \quad (2.31)$$

$${}^i T_{i+1} = A_{i+1} = \begin{bmatrix} C\theta_i & -S\theta_i & 0 & 0 \\ S\theta_i & C\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C\alpha_i & -S\alpha_i & 0 \\ 0 & S\alpha_i & C\alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

$$A_{i+1} = \begin{bmatrix} C\theta_i & -S\theta_i C\alpha_i & S\theta_i S\alpha_i & a_i C\theta_i \\ S\theta_i & C\theta_i C\alpha_i & -C\theta_i S\alpha_i & a_i S\theta_i \\ 0 & S\alpha_i & C\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

จากสมการดังกล่าวเราจะนำมาประยุกต์ใช้ในการหา Transformation Matrix จากตั้งแต่ต้นทางของแขนกล หรือ ฐานของแขนกล ไปยังปลายทางของแขนกลที่จับชิ้นงาน หรือ Tool Center Point (TCP) โดยการนำสมการข้างต้น มาคูณกันเป็นลำดับไป ดังนั้นความสัมพันธ์ที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของกรอบอ้างอิงตั้งแต่จากฐานของแขนกล ไปยังส่วนที่จับชิ้นงาน จะอธิบายได้ด้วยรูปสมการการคูณเมทริกซ์ดังนี้

$${}^R T_H = {}^B T_1 \quad {}^1 T_2 \quad {}^2 T_3 \quad \dots \quad {}^{n-1} T_n = A_1 A_2 A_3 \dots A_n \quad (2.35)$$

โดยที่

R คือ ตำแหน่งฐานของแขนกล หรือ ข้อต่อก่อนหน้า

H คือ ตำแหน่งปลายของแขนกล หรือ ข้อต่อถัดไป

n คือจำนวนของข้อต่อของแขนกล

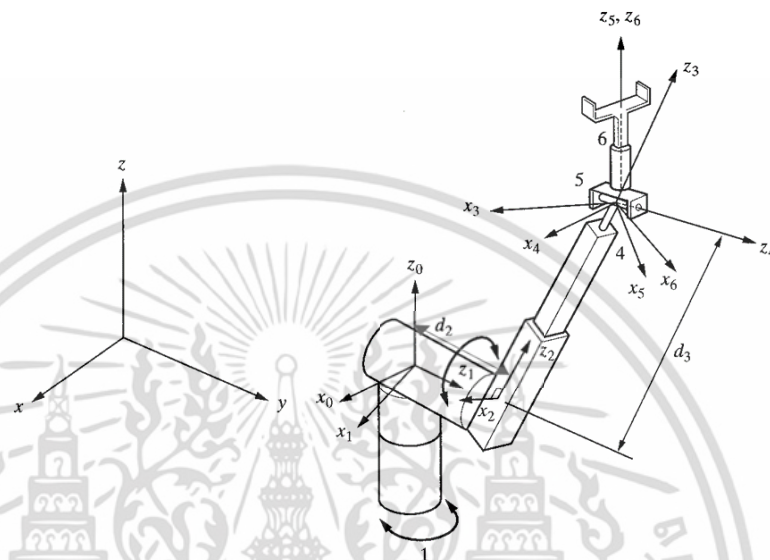
เช่น สำหรับแขนกล ที่มีจำนวนข้อต่อ 6 ข้อ จะมีสมการ A ทั้งหมดจำนวน 6 สมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2.2 Forward Kinematic and Inverse Kinematic

by Denavit-Hartenberg Representation

ในหัวข้อนี้เราจะทำตัวอย่างในการหาสมการ Forward Kinematic และ Inverse Kinematic ของแขนกลตามรูปที่ 2.24 โดยใช้วิธีการของ Denavit-Hartenberg ในการดำเนินการ



รูปที่ 2.24 ภาพร่างของแขนกลรุ่น Stanford

จากรูปที่ 2.24 เราจะเริ่มด้วยการทำการหาค่า D-H Parameter โดยอาศัยหลักการเคลื่อนที่ตามลำดับ ในหัวข้อที่กล่าวมา ซึ่งจะหาความสัมพันธ์ในการเคลื่อนที่ และการหมุนของกรอบอ้างอิงระหว่างแต่ละข้อต่อของแขนกล เริ่มจากฐานของแขนกล ไปยังส่วนปลายที่จับชิ้นงาน ตามตารางข้างล่างดังนี้

ตารางที่ 2.1 แสดงค่า D-H Parameter ของแขนกลรุ่น Stanford

#	θ	d	a	α
1	θ_1	0	0	-90
2	θ_2	d_2	0	90
3	0	d_3	0	0
4	θ_4	0	0	-90
5	θ_5	0	0	90
6	θ_6	0	0	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 2.1 เราสามารถนำค่า D-H Parameter ดังกล่าวมาหา Transformation Matrix ของแต่ละ Link ได้ โดยการนำข้อมูลที่บันทึกในตารางแทนค่าลงไปในสมการที่ 2.34 จะได้สมการที่อธิบายความสัมพันธ์ของแต่ละข้อต่อดังต่อไปนี้

$$A_1 = \begin{bmatrix} C\theta_1 & 0 & -S\theta_1 & 0 \\ S\theta_1 & 0 & C\theta_1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} C\theta_2 & 0 & S\theta_2 & a_2 C\theta_2 \\ S\theta_2 & 0 & -C\theta_2 & a_2 S\theta_2 \\ 0 & 1 & 0 & d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} C\theta_3 & -S\theta_3 & 0 & 0 \\ S\theta_3 & C\theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

$$A_4 = \begin{bmatrix} C\theta_4 & 0 & -S\theta_4 & 0 \\ S\theta_4 & 0 & C\theta_4 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.39)$$

$$A_5 = \begin{bmatrix} C\theta_5 & 0 & S\theta_5 & 0 \\ S\theta_5 & 0 & -C\theta_5 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.40)$$

$$A_6 = \begin{bmatrix} C\theta_6 & -S\theta_6 & 0 & 0 \\ S\theta_6 & C\theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.41)$$

โดยที่ความสัมพันธ์ของกรอบอ้างอิงที่ฐานของแขนกลไปยังยังส่วนปลายของแขนกลสามารถอธิบายได้ดังนี้

$${}^R T_H = A_1 A_2 A_3 A_4 A_5 A_6 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & P_x \\ n_y & o_y & a_y & P_y \\ n_z & o_z & a_z & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.42)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} n_x &= c_1 [c_2 (c_4 c_5 c_6 - s_4 s_6) - s_2 s_5 c_6] - s_1 (s_4 s_5 c_6 + c_4 s_6) \\ n_y &= s_1 [c_2 (c_4 c_5 c_6 - s_4 s_6) - s_2 s_5 c_6] + c_1 (s_4 s_5 c_6 + c_4 s_6) \\ n_z &= -s_2 (c_4 c_5 c_6 - s_4 s_6) - c_2 s_5 c_6 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}o_x &= c_1[-c_2(c_4c_5s_6 + s_4c_6) + s_2s_5s_6] - s_1(-s_4c_5c_6 + c_4s_6) \\o_y &= s_1[-c_2(c_4c_5s_6 + s_4c_6) + s_2s_5s_6] + c_1(-s_4c_5c_6 + c_4s_6) \\o_z &= s_2(c_4c_5s_6 + s_4c_6) + c_2s_5s_6\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}a_x &= c_1(c_2c_4s_5 + s_2c_5) - s_1s_4s_5 \\a_y &= s_1(c_2c_4s_5 + s_2c_5) + c_1s_4s_5 \\a_z &= -s_2c_4s_5 + c_2c_5\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}p_x &= c_1s_2d_3 - s_1d_2 \\p_y &= s_1s_2d_3 + c_1d_2 \\p_z &= c_2d_3\end{aligned}$$

จากสมการ Forward Kinematic ข้างต้นของแขนกล Stanford เราจะทำการหา Inverse Kinematic ของแขนกลโดยการหา Inverse Matrix ของแต่ละ Transformation Matrix จากนั้นจึงนำมาคำนวณโดยการคูณย้อนกลับไป ซึ่งสามารถสรุปคำตอบของแขนกลรุ่น Stanford ได้ดังต่อไปนี้

$$\theta_1 = \tan^{-1}\left(\frac{p_y}{p_x}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{d_2}{\pm\sqrt{r^2 - d_2^2}}\right) \text{ โดยที่ } r = \sqrt{p_x^2 + p_y^2} \quad (2.43)$$

$$\theta_2 = \tan^{-1}\frac{c_1p_x + s_1p_y}{p_z} \quad (2.44)$$

$$d_3 = s_2(c_1p_x + s_1p_y) + c_2p_z \quad (2.45)$$

$$\theta_4 = \tan^{-1}\frac{-s_1a_x + c_1a_y}{c_2(c_1a_x + s_1a_y) + s_2a_z} \quad (2.46)$$

โดยที่ $\theta_4 = \theta_4 + 180^\circ$ ต่อเมื่อ $\theta_5 < 0$

$$\theta_5 = \tan^{-1}\frac{-c_4[c_2(c_1a_x + s_1a_y) - s_2a_z] + s_4[-s_1a_x + c_1a_y]}{s_2(c_1a_x + s_1a_y) + c_2a_z} \quad (2.47)$$

และ $\theta_6 = \tan^{-1}\left(\frac{s_6}{c_6}\right)$ โดยที่

$$\begin{aligned}s_6 &= -c_5\{c_4[c_2(c_1o_x + s_1o_y) - s_2o_z] + s_4[-s_1o_x + c_1o_y]\} \\&\quad + s_5\{s_2(c_1o_x + s_1o_y) + c_2o_z\}\end{aligned} \quad (2.48)$$

$$c_6 = -s_4[c_2(c_1o_x + s_1o_y) - s_2o_z] + c_4[-s_1o_x + c_1o_y] \quad (2.49)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตัวอย่างที่แสดงมาบ่งบอกถึงวิธี และ ขั้นตอนการคำนวณ เพื่อหาค่าต่างๆของ กระบวนการ Forward Kinematic และ Inverse Kinematic ที่ใช้ในการหาตำแหน่งการเคลื่อนที่ของ ปลายตำแหน่งของแขนกลเทียบกับ ฐาน ของแขนกล โดยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะนำวิธีการ และ ข้อมูลตั้งที่กล่าวไปมาประยุกต์ใช้งานกับหุ่นยนต์แขนกลที่มีใช้ในอุตสาหกรรม

2.5 สมมุติฐานของการวิจัย.

จากจุดประสงค์ที่กล่าวไปในหัวข้อที่ 1.3 และเนื้อหาที่กล่าวมาภายในบทที่ 2 นั้น ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ มีจุดประสงค์ที่จะนำการคำนวณทางคณิตศาสตร์มาประยุกต์ และ ลดกระบวนการทำงานที่เกิดขึ้นจากกระบวนการทำ Simulation โดยมีสมมุติฐานในวิทยานิพนธ์ เพื่อพิสูจน์ดังนี้

1. แขนกล สองตัว ที่มีเงื่อนไขแตกต่างทางกายภาพกัน จะส่งผลให้สมการ Forward Kinematic ของแต่ละตัวแตกต่างกัน
2. แขนกล สองตัว ที่มีเงื่อนไขแตกต่างทางกายภาพกัน สามารถเอื้อมไปยังจุดเดียวกันได้ โดยใช้ข้อมูลการหมุนไปแต่ละองศาของ ข้อต่อแขนกลตัวใดตัวหนึ่งมาอ้างอิง สามารถเป็นไปได้

บทที่ 3

แนวคิด และ ขั้นตอนของการศึกษา

3.1 แนวคิด และ ขั้นตอนของการศึกษา

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้นำปัญหาที่เกิดขึ้นที่หน้างานจากการปฏิบัติงานของหุ่นยนต์แขนกลในโรงงานผลิตรถยนต์แห่งหนึ่ง โดยปัญหาที่เกิดขึ้น มีสาเหตุหลัก มาจากเทคโนโลยีหุ่นยนต์ แขนกลในสายการผลิตที่ปฏิบัติงานอยู่ในปัจจุบัน ถึงช่วงปลดระวางประจำการจากผู้ผลิตแขนกล ทำให้อุปกรณ์ และ ชิ้นส่วนสำรองต่างๆ ไม่สามารถสั่งสำรองเพิ่มเติมได้ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องสั่งซื้อหุ่นยนต์แขนกลรุ่นใหม่ เพื่อเข้ามาปฏิบัติหน้าที่ที่เดิมแทนหุ่นยนต์แขนกลรุ่นเก่า

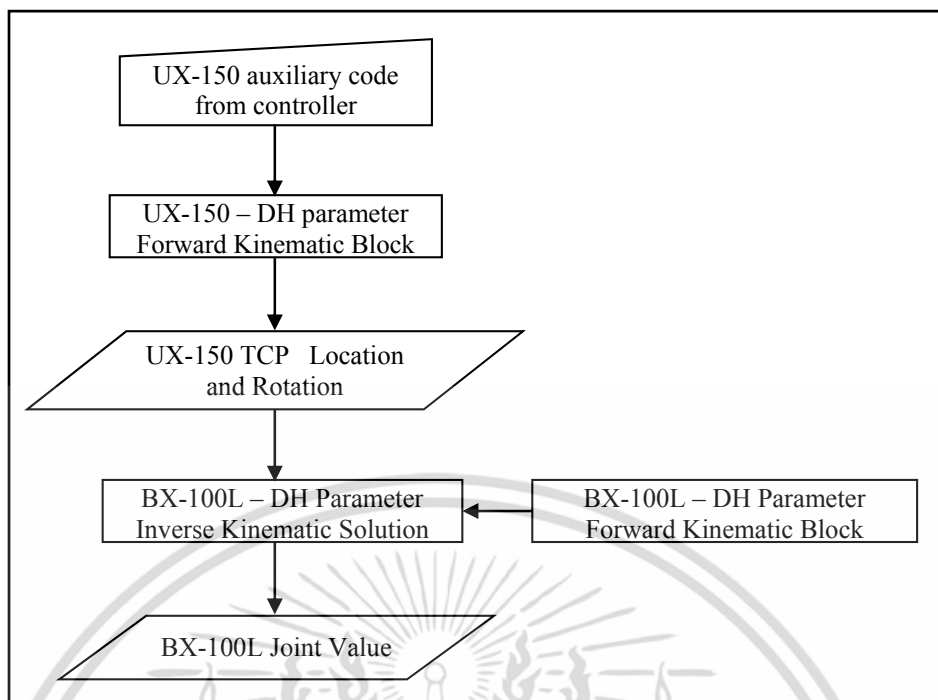
เพื่อให้หุ่นยนต์แขนกลรุ่นใหม่ที่สั่งมานั้น สามารถปฏิบัติงานได้ดังเช่นหุ่นยนต์แขนกลรุ่นเก่า ดังนั้น วิศวกรออกแบบการผลิต จึงต้องทำการศึกษารูปแบบโปรแกรมจำลองของแขนกลรุ่นใหม่ เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ตั้งแต่ต้น โดยไม่สามารถนำข้อมูลเก่าใดๆ ของหุ่นยนต์แขนกลรุ่นเก่าที่มีอยู่มาประยุกต์ใช้งานให้เกิดประโยชน์ และ ลดเวลาการทำงานลงได้ ด้วยสาเหตุที่เกิดเหตุการณ์เช่นนี้ เพราะ ลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างกัน ระหว่างหุ่นยนต์แขนกลรุ่นเก่า และ หุ่นยนต์แขนกลรุ่นใหม่ตามเทคโนโลยีที่พัฒนาขึ้น

ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะมุ่งเน้นการศึกษาโดยใช้ข้อมูลของหุ่นยนต์แขนกลรุ่นเก่าที่มีอยู่เพื่อลดเวลาที่เป็นต้องใช้ในการทำแบบจำลองหุ่นยนต์แขนกลตัวใหม่ ของอุตสาหกรรมลง โดยมีเงื่อนไขทางกายภาพดังนี้

1. หุ่นยนต์แขนกลตัวใหม่ที่นำมาทดแทนตัวเก่าต้องมี ระยะเวลาทำงาน ครอบคลุมเทียบเท่า หรือมากกว่า หุ่นยนต์แขนกลตัวเก่า
2. หุ่นยนต์แขนกลตัวใหม่ที่นำมาทดแทน ต้องใช้งานอุปกรณ์ที่ติดตั้งตรงส่วนปลาย ต้องเป็นอุปกรณ์เดียวกันกับ ที่ใช้ปฏิบัติงานอยู่ของหุ่นยนต์แขนกลตัวเก่า

ดังนั้น แนวคิด ในการศึกษาของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จึงนำหลักการทางคณิตศาสตร์มาใช้งาน โดย นำข้อมูลองศาข้อต่อของหุ่นยนต์แขนกลรุ่นเก่ามาคำนวณด้วยวิธี Forward Kinematic เพื่อหากรอบอ้างอิง Tool Center Point (TCP) ของหุ่นยนต์แขนกลรุ่นเก่าในระนาบสามมิติ จากนั้นจึง นำตำแหน่งของกรอบอ้างอิงที่คำนวณมา ทำการหาค่าข้อต่อองศาของหุ่นยนต์แขนกลรุ่นใหม่ด้วยวิธี Inverse Kinematic ด้วยแนวคิดนี้ จะส่งผลให้ วิศวกรออกแบบการผลิต สามารถลดระยะเวลาของขั้นตอนที่ศึกษาความเป็นไปได้ของหุ่นยนต์แขนกลรุ่นใหม่ในโปรแกรมจำลองได้อย่างมากมาย โดยสามารถสรุปแนวคิด และ ขั้นตอนกระบวนการดังรูปที่ 3.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



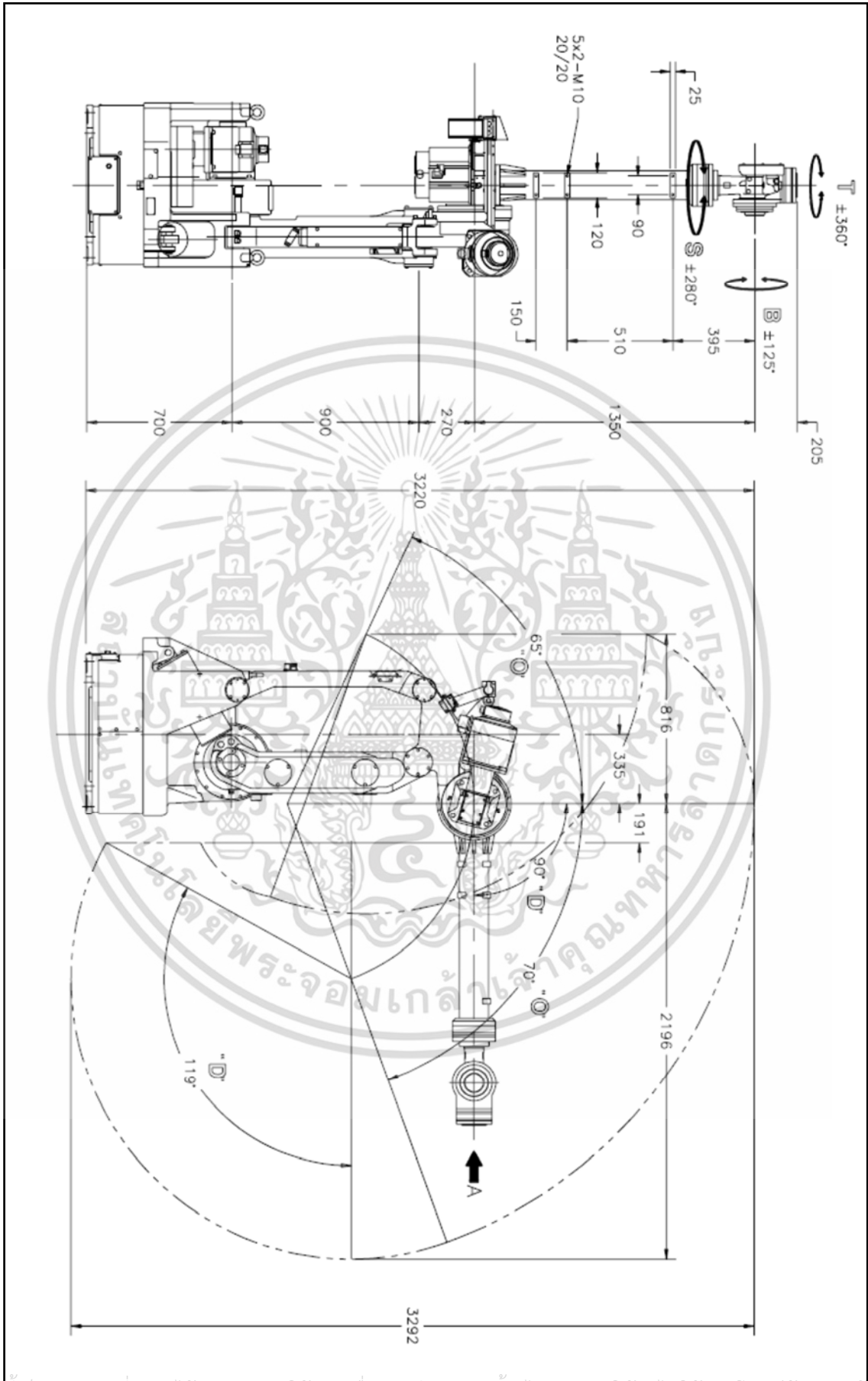
รูปที่ 3.1 ภาพลำดับขั้นตอน และ แนวคิดของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

จากลำดับขั้นตอน และ แนวคิดที่ได้นำเสนอไปเราสามารถออกแบบขั้นตอนการศึกษา เพื่อให้สอดคล้องกับแนวคิด ได้ตามลำดับหัวข้อหลักดังต่อไปนี้

1. ขั้นตอน รวบรวม ข้อมูลเชิงกายภาพของแขนกล
2. ขั้นตอน คำนวณเชิงวิศวกรรมศาสตร์ของแขนกล
3. ขั้นตอน การออกแบบการทดลอง และ พิสูจน์ผล

3.1.1 ขั้นตอนรวบรวม และ วิเคราะห์ข้อมูลเชิงกายภาพแขนกล

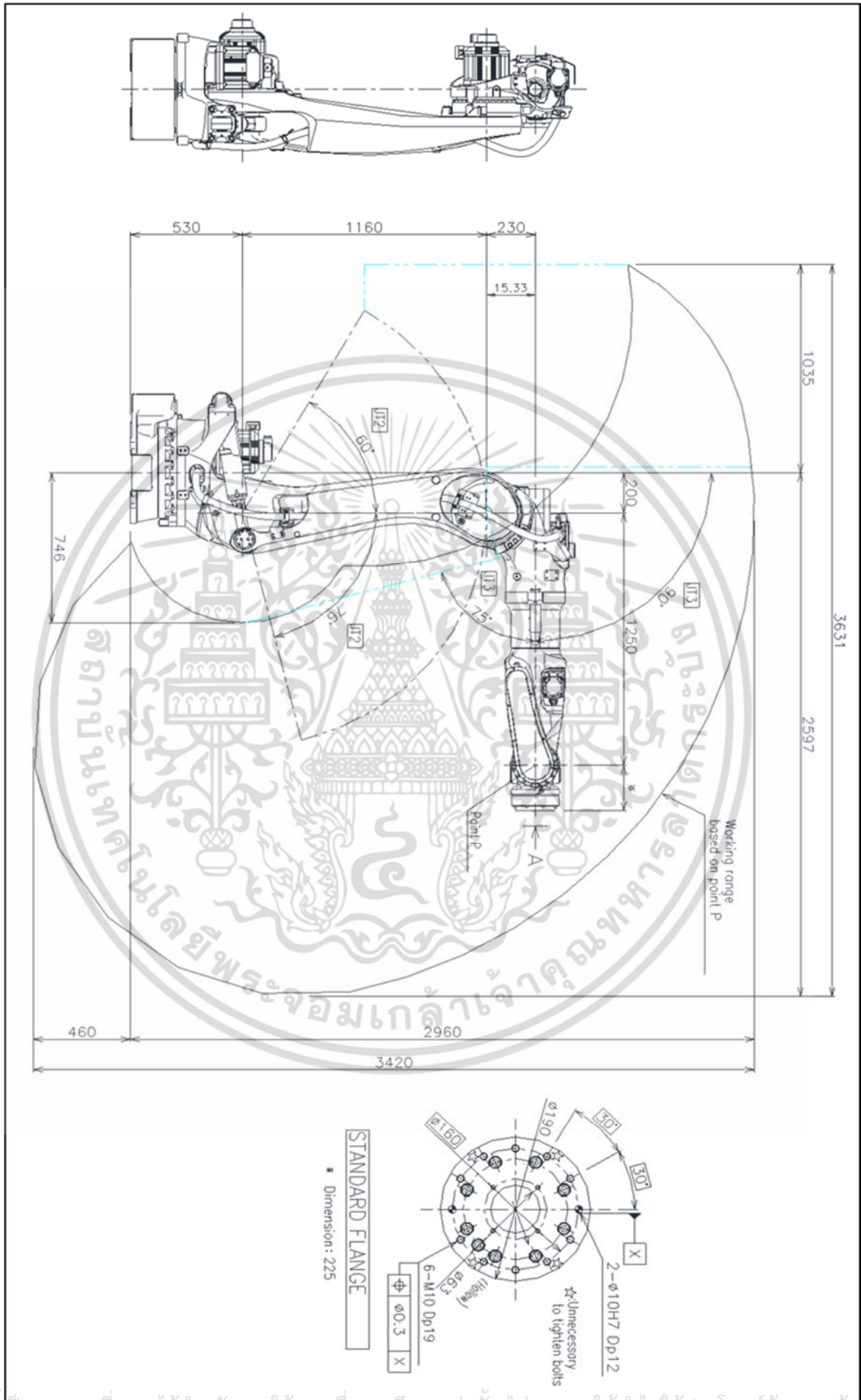
แขนกลที่นำมาใช้ในการศึกษาของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นหุ่นยนต์แขนกลชนิดที่ออกแบบมา สำหรับปฏิบัติงานได้หลากหลาย โดยขึ้นอยู่กับ อุปกรณ์ ที่ติดตั้งเข้าไปเพื่อทำหน้าที่ อาทิ เช่น ติดตั้งปืนเชื่อมตัวถัง หรือ ติดตั้งอุปกรณ์สำหรับยึดจับชิ้นงาน โดยหุ่นยนต์แขนกลรุ่นเก่าที่ปฏิบัติงานอยู่ปัจจุบันคือ หุ่นยนต์รุ่น UX150 อ้างอิงรูปที่ 3.2 ของบริษัท Kawasaki สำหรับ หุ่นยนต์แขนกลรุ่นใหม่ที่จะนำมาปฏิบัติงานแทนในอนาคต คือ หุ่นยนต์รุ่น BX100L อ้างอิงรูปที่ 3.3 ของบริษัท Kawasaki



รูปที่ 3.2 ระยะ และ ขนาดของหุ่นยนต์แขนกล Kawasaki – UX150

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 3.3 ระยะ และ ขนาดของหุ่นยนต์แขนกล Kawasaki – BX100L



เอกสารนี้เป็นเอกสารของบริษัทที่สงวนไว้สำหรับใช้เฉพาะในวงจำกัดเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากบริษัทผู้ผลิต
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากข้อมูลดังกล่าวที่แสดงดังรูปที่ 3.2 และ 3.3 เราจะนำค่าระยะทาง และ ทิศทาง การหมุนไป ของกรอบอ้างอิงของข้อต่อ ระหว่าง ข้อต่อนึง ถึงยังข้อต่อลำดับถัดไป มาทำการ วิเคราะห์ และ หาดำแหน่งกรอบอ้างอิงของแต่ละข้อต่อในระนาบสามมิติ ด้วยวิธีการของ Denavit-Hartenberg ตามที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 ดังนั้นการหาค่าเพิ่มเติมทำเป็นตาราง D-H Parameter ของหุ่นยนต์แขนกลแต่ละรุ่น จะสามารถสรุปออกมาเป็นข้อมูลในตารางตามลำดับได้ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3.1 แสดงค่า D-H Parameter ของหุ่นยนต์แขนกลรุ่น UX150

D-H Parameter Table (UX-150)					
JT	θ		d_i	a_i	α
1	θ_1	90	700	135	-90
1TRANS	θ_1	0	-250	0	0
2A	θ_{2A}	0	250	x_1	0
2B	θ_{2B}	-90	0	x_2	180
3	θ_3	0	0	0	90
4	θ_4	0	1350	0	-90
5A	θ_{5A}	-90	0	205	0
5B	θ_{5B}	90	0	0	90
6	θ_6	90	0	0	0

โดยที่ $X_1 = 900 \times \sin(\sum \theta_2) + 200$

$X_2 = 900 \times \sin(\sum \theta_2) + 270$

โดย

JT1 และ JT1TRANS คือค่า DH Parameter จากตำแหน่งข้อต่อที่ 1 ไปยังข้อต่อที่ 2
 JT2A และ JT2B คือ DH Parameter จากตำแหน่งข้อต่อที่ 2 ไปยังข้อต่อที่ 3
 JT3 คือ DH Parameter จากตำแหน่งข้อต่อที่ 3 ไปยังข้อต่อที่ 4
 JT4 คือ DH Parameter จากตำแหน่งข้อต่อที่ 4 ไปยังข้อต่อที่ 5
 JT5A และ JT5B คือ DH Parameter จากตำแหน่งข้อต่อที่ 5 ไปยังข้อต่อที่ 6
 JT6 คือ DH Parameter จากตำแหน่งข้อต่อที่ 6 ไปปลายของแขนกล

ตารางที่ 3.2 แสดงค่า D-H Parameter ของหุ่นยนต์แขนกลรุ่น BX-100L

D-H Parameter Table (BX-100L)					
JT	θ		d_i	a_i	α
1	θ_1	90	530	200	-90
2	θ_2	-90	0	1160	180
3A	θ_{3A}	0	0	230	90
3B	θ_{3B}	0	1250	0	0
4	θ_4	0	0	0	-90
5A	θ_{5A}	-90	0	363	0
5B	θ_{5B}	90	0	0	90
6	θ_6	90	0	0	0

โดย

JT1 คือค่า DH Parameter จากตำแหน่งข้อต่อที่ 1 ไปยังข้อต่อที่ 2

JT2 คือ DH Parameter จากตำแหน่งข้อต่อที่ 2 ไปยังข้อต่อที่ 3

JT3A และ JT3B คือ DH Parameter จากตำแหน่งข้อต่อที่ 3 ไปยังข้อต่อที่ 4

JT4 คือ DH Parameter จากตำแหน่งข้อต่อที่ 4 ไปยังข้อต่อที่ 5

JT5A และ JT5B คือ DH Parameter จากตำแหน่งข้อต่อที่ 5 ไปยังข้อต่อที่ 6

JT6 คือ DH Parameter จากตำแหน่งข้อต่อที่ 6 ไปยังปลายของแขนกล

อ้างอิงข้อมูลดังที่แสดงในตาราง ที่ 3.1 และ 3.2 แสดงให้เห็นความแตกต่างของแขนกลทั้ง 2 ชนิดได้ โดยที่โครงสร้างของแขนกลรุ่น UX150 ที่ความสัมพันธ์ของกรอบอ้างอิงข้อต่อลำดับที่ 2 กับ ข้อต่อลำดับที่ 3 มีความสัมพันธ์ในลักษณะของ Four Bar Linkage ในขณะที่โครงสร้างของแขนกลรุ่น BX100L นั้นไม่มี จึงเป็นเหตุผลที่เราไม่สามารถนำข้อมูลองศาการเคลื่อนที่ของแขนกลรุ่น UX150 มาประยุกต์ใช้งานในแขนกลรุ่น BX100L ได้ ดังนั้นเพื่อให้สามารถนำข้อมูลดังกล่าวมาใช้งานได้ จึงต้องมีการแปลงข้อมูลองศาข้อต่อของแขนกล UX150 ไปเป็นตำแหน่งของกรอบอ้างอิงในระนาบสามมิติ แล้วจึงทำการคำนวณย้อนกลับมาเป็นข้อมูลองศาข้อต่อของแขนกล BX100L

3.1.2 ขั้นตอนคำนวณเชิงวิศวกรรมศาสตร์ของแขนกล

จากข้อมูล D-H Parameter ในตารางที่ 3.1 และ 3.2 เราจะสามารถหา Transformation Matrix ของหุ่นยนต์แขนกลทั้งสองรุ่นได้ดังนี้

3.1.2.1 Transformation Matrix ของแขนกล UX150

จากข้อมูลในตารางที่ 3.1 เราสามารถหาสมการ Forward Kinematic ของแขนกล UX150 ได้จาก Transformation Matrix ดังนี้

$${}^0T_1_6 = {}^0T_{5B} {}^{5B}T_6 = [A_{Fourbarlink} A_4 A_{5A} A_{5B}] [A_6] \quad (3.1)$$

โดยที่

$$A_{Fourbarlink} = \begin{bmatrix} C_1 C_3 & S_1 & C_1 S_3 & a_1 C_1 + S_1 d_{1TRANS} + C_1 X_1 + S_1 d_{2A} \\ S_1 C_3 & -C_1 & S_1 S_3 & a_1 S_1 - C_1 d_{1TRANS} + S_1 X_1 - C_1 d_{2A} \\ S_3 & 0 & -C_3 & -X_2 + d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

$$A_4 = \begin{bmatrix} C_4 & 0 & -S_4 & 0 \\ S_4 & 0 & C_4 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

$$A_{5A} = \begin{bmatrix} C_{5A} & -S_{5A} & 0 & a_{5A} C_{5A} \\ S_{5A} & C_{5A} & 0 & a_{5A} S_{5A} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$A_{5B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

$$A_6 = \begin{bmatrix} C_6 & -S_6 & 0 & 0 \\ S_6 & C_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

3.1.2.2 Transformation Matrix ของแขนกล BX100L

จากข้อมูลในตารางที่ 3.2 เราสามารถหาสมการ Forward Kinematic ของแขนกล BX100L ได้จาก Transformation Matrix ดังนี้

$${}^0T_2_6 = [A_1 A_2 A_{3A} A_{3B} A_4 A_{5A} A_{5B}] [A_6] \quad (3.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

$$A_1 = \begin{bmatrix} C_1 & 0 & -S_1 & a_1 C_1 \\ S_1 & 0 & C_1 & a_1 S_1 \\ 0 & -1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} C_2 & S_2 & 0 & a_2 C_2 \\ S_2 & -C_2 & 0 & a_2 S_2 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

$$A_{3A} = \begin{bmatrix} C_{3A} & 0 & S_{3A} & a_3 C_{3A} \\ S_{3A} & 0 & -C_{3A} & a_3 S_{3A} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

$$A_{3B} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_{3B} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

$$A_4 = \begin{bmatrix} C_4 & 0 & -S_4 & 0 \\ S_4 & 0 & C_4 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

$$A_{5A} = \begin{bmatrix} C_{5A} & -S_{5A} & 0 & a_{5A} C_{5A} \\ S_{5A} & C_{5A} & 0 & a_{5A} S_{5A} \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

$$A_{5B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

$$A_6 = \begin{bmatrix} C_6 & -S_6 & 0 & 0 \\ S_6 & C_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

เนื่องจากในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ มีข้อบังคับเบื้องต้นในเรื่องของการใช้งาน
อุปกรณ์ติดตั้งของแขนกลตัวเก่า ดังนั้น เราสามารถหาความสัมพันธ์ของแขนกลทั้งสองรุ่น
ได้ใหม่ โดยการนำสมการที่ 3.1 และ 3.7 มากระทำดังนี้
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$${}^0T_{1_6} = {}^0T_{2_6} \quad (3.16)$$

$$[A_{FourbarlinkA_4A_{5A}A_{5B}}][A_6] = [A_1A_2A_{3A}A_{3B}A_4A_{5A}A_{5B}][A_6] \quad (3.17)$$

ทำการคูณทั้งสองข้างของสมการด้วย Inverse Matrix ของ $[A_6]$

$$[A_{FourbarlinkA_4A_{5A}A_{5B}}][A_6][A_6]^{-1} = [A_1A_2A_{3A}A_{3B}A_4A_{5A}A_{5B}][A_6][A_6]^{-1} \quad (3.18)$$

$$[A_{FourbarlinkA_4A_{5A}A_{5B}}] = [A_1A_2A_{3A}A_{3B}A_4A_{5A}A_{5B}] \quad (3.19)$$

$${}^0T_{1_{5B}} = {}^0T_{2_{5B}} \quad (3.20)$$

ดังนั้นจะเห็นว่า Transformation Matrix ที่ข้อต่อลำดับที่ 6 ของแขนกลทั้งสองรูน นั้น มีคุณลักษณะเหมือนกัน เพราะฉะนั้น เราจึงสามารถที่จะนำค่าองศาข้อต่อของแขนกลรูนเก่า มาใช้ในแขนกลรูนใหม่ได้ เฉพาะข้อต่อลำดับที่ 6 เท่านั้น ดังนั้นการคำนวณสมการ Forward Kinematic ของแขนกลทั้งสองรูนจึงเริ่มจากข้อต่อลำดับแรก จนถึงลำดับที่ 5 จึงเพียงพอสำหรับในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

3.1.2.3 การคำนวณ Forward Kinematic ของแขนกล UX150

$${}^0T_{1_{5B}} = [A_{FourbarlinkA_4A_{5A}A_{5B}}] \quad (3.21)$$

$${}^R T_H^{UX150} = {}^0T_{1_{5B}} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & P_x \\ n_y & o_y & a_y & P_y \\ n_z & o_z & a_z & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

โดยที่

$$n_x = -c_1c_3c_4s_{5A} - s_1s_4s_{5A} - c_1s_3c_{5A}$$

$$n_y = -s_1c_3c_4s_{5A} + c_1s_4s_{5A} - s_1s_3c_{5A}$$

$$n_z = -s_3c_4s_{5A} + c_3c_{5A}$$

$$o_x = -c_1c_3s_4 + s_1c_4$$

$$o_y = -s_1c_3s_4 - c_1c_4$$

$$o_z = -s_3s_4$$

$$a_x = c_1c_3c_4c_{5A} + s_1s_4c_{5A} - c_1s_3s_{5A}$$

$$a_y = s_1c_3c_4c_{5A} - c_1s_4c_{5A} - s_1s_3s_{5A}$$

$$a_z = s_3c_4c_{5A} + c_3s_{5A}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
p_x &= a_{5A}c_1c_3c_4c_{5A} + a_{5A}s_1s_4c_{5A} + c_1s_3[d_4 - a_{5A}s_{5A}] + a_1c_1 \\
&\quad + s_1d_{1TRANS} + c_1x_1 + s_1d_{2A} \\
p_y &= a_{5A}s_1c_3c_4c_{5A} - a_{5A}c_1s_4c_{5A} + s_1s_3[d_4 - a_{5A}s_{5A}] + a_1s_1 \\
&\quad - c_1d_{1TRANS} + s_1x_1 - c_1d_{2A} \\
p_z &= a_{5A}s_3c_4c_{5A} - c_3[d_4 - a_{5A}s_{5A}] + -x_2 + d_1
\end{aligned}$$

3.1.2.4 การคำนวณ Forward Kinematic ของแขนกล BX100L

$${}^0T_{5B} = A_1A_2A_3A_4A_5A_6 \quad (3.23)$$

$$R_{TH}^{BX100L} = {}^0T_{5B} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & P_x \\ n_y & o_y & a_y & P_y \\ n_z & o_z & a_z & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

โดยที่

$$\begin{aligned}
n_x &= -c_1c_2c_3c_4s_5 - c_1c_2s_3c_5 - c_1s_2s_3c_4s_5 \\
&\quad + c_1s_2c_3c_5 - s_1s_4s_5 \\
n_y &= -s_1c_2c_3c_4s_5 - s_1c_2s_3c_5 - s_1s_2s_3c_4s_5 \\
&\quad + s_1s_2c_3c_5 + c_1s_4s_5 \\
n_z &= s_2c_3c_4s_5 + s_2s_3c_5 - c_2s_3c_4s_5 - c_2c_3c_5 \\
o_x &= -c_1c_2c_3s_4 - c_1s_2s_3s_4 + s_1c_4 \\
o_y &= -s_1c_2c_3s_4 - s_1s_2s_3s_4 - c_1c_4 \\
o_z &= s_2c_3s_4 - c_2s_3s_4 \\
a_x &= c_1c_2c_3c_4c_5 - c_1c_2s_3s_5 + c_1s_2s_3c_4c_5 + c_1s_2c_3s_5 + s_1s_4c_5 \\
a_y &= s_1c_2c_3c_4c_5 - s_1c_2s_3s_5 + s_1s_2s_3c_4c_5 + s_1s_2c_3s_5 - c_1s_4c_5 \\
a_z &= -c_4c_5 + s_2s_3s_5 - c_2s_3c_4c_5 + c_2c_3s_5 \\
p_x &= a_5c_1c_2c_3c_4c_5 - a_5c_1c_2s_3s_5 + d_3c_1c_2s_3 + a_3c_1c_2c_3 + \\
&\quad a_5c_1s_2s_3c_4c_5 + a_5c_1s_2c_3s_5 - d_3c_1s_2c_3 + a_3c_1s_2s_3 + \\
&\quad a_2c_1c_2 + a_5s_1s_4c_5 + a_1c_1 \\
p_y &= a_5s_1c_2c_3c_4c_5 - a_5s_1c_2s_3s_5 + d_3s_1c_2s_3 + a_3s_1c_2c_3 + \\
&\quad a_5s_1s_2s_3c_4c_5 + a_5s_1s_2c_3s_5 - d_3s_1s_2c_3 + a_3s_1s_2s_3 + \\
&\quad a_2s_1c_2 - a_5c_1s_4c_5 + a_1s_1 \\
p_z &= -a_5s_2c_3c_4c_5 + a_5s_2s_3s_5 - d_3s_2s_3 - a_3s_2c_3 + a_5c_2s_3c_4c_5 \\
&\quad + a_5c_2c_3s_5 - d_3c_2c_3 + a_3c_2s_3 - a_2c_2 + d_1
\end{aligned}$$

จากสมการ Forward Kinematic ของแขนกลที่คำนวณมาได้นั้น ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เราจะทำการหาค่าข้อต่อองศาให้กับหุ่นยนต์แขนกลรุ่นใหม่ ดังนั้น เราจึงจะนำสมการ Forward Kinematic ตามสมการที่ 3.24 ของแขนกล BX100L มาทำการหา Inverse Kinematic ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.2.5 การคำนวณ Inverse Kinematic ของแขนกล BX100L

การหา Inverser Kinematic จะต้องทำการหา Inverse Tranformation Matrix ทั้งหมด ของแขนกล โดย Inverse Transformation Matrix ของ แขนกลรุ่น BX100L แสดงดังต่อไปนี้

$${}^0T_1^{-1} = \begin{bmatrix} C_1 & S_1 & 0 & a_1 \\ 0 & 0 & -1 & d_1 \\ -S_1 & -C_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

$${}^1T_2^{-1} = \begin{bmatrix} C_2 & S_2 & 0 & -a_2 \\ S_2 & -C_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

$${}^2T_{3B}^{-1} = \begin{bmatrix} C_{3A} & S_{3A} & 0 & -a_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ S_{3A} & -C_{3A} & 0 & -d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

$${}^3T_4^{-1} = \begin{bmatrix} C_4 & S_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ -S_4 & C_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

$${}^4T_{5B}^{-1} = \begin{bmatrix} -S_{5A} & C_{5A} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ C_{5A} & S_{5A} & 0 & a_{5A} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

จาก Inverse Transformation Matrix ที่แสดงข้างบน นำมาคูณกันเพื่อหาค่าองค์ประกอบของแขนกลดังนี้ กำหนดให้

$${}^0T_{5B} = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = [RHS] \quad (3.30)$$

เพื่อหาค่าองค์ประกอบของแต่ละข้อต่อ เราจึงต้องทำการคูณ เมทริกซ์ ${}^0T_{5B}$ โดย Inverse Transformation Marix ของแต่ละข้อต่อเข้าไป ดังนี้

$$[{}^0T_1^{-1}][RHS] = {}^1T_{5B} = [A_2A_{3A}A_{3B}A_4A_{5A}A_{5B}] \quad (3.31)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$${}^0T_1^{-1}[RHS] = \begin{bmatrix} C_1n_x + S_1n_y & C_1o_x + S_1o_y & C_1a_x + S_1a_y & C_1p_x + S_1p_y - a_1 \\ -n_z & -o_z & -a_z & -p_z + d_1 \\ -S_1n_x + C_1n_y & -S_1o_x + C_1o_y & -S_1a_x + C_1a_y & -S_1p_x + C_1p_y \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

และ

$${}^1T_{5B} = [A_2A_{3A}A_{3B}A_4A_{5A}A_{5B}] \quad (3.34)$$

$${}^1T_{5B} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} a_{11} &= -C_2C_3C_4S_5 - C_2S_3C_5 - S_2S_3C_4S_5 + S_2C_3C_5 \\ a_{21} &= -S_2C_3C_4S_5 - S_2S_3C_5 + C_2S_3C_4S_5 - C_2C_3C_5 \\ a_{31} &= S_4S_5 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a_{12} &= -C_2C_3S_4 - S_2S_3S_4 \\ a_{22} &= -S_2C_3S_4 + C_2S_3S_4 \\ a_{32} &= -C_4 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a_{13} &= C_2C_3C_4C_5 - C_2S_3S_5 + S_2S_3C_4C_5 + S_2C_3S_5 \\ a_{23} &= C_4C_5 - S_2S_3S_5 + C_2S_3C_4C_5 - C_2C_3S_5 \\ a_{33} &= -S_4C_5 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a_{14} &= a_5C_2C_3C_4C_5 - a_5C_2S_3S_5 + d_3C_2S_3 \\ &\quad + a_3C_2C_3 + a_5S_2S_3C_4C_5 + a_5S_2C_3S_5 - d_3S_2C_3 \\ &\quad + a_3S_2S_3 + a_2C_2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a_{24} &= a_5S_2C_3C_4C_5 - a_5S_2S_3S_5 + d_3S_2S_3 \\ &\quad + a_3S_2C_3 - a_5C_2S_3C_4C_5 - a_5C_2C_3S_5 + d_3C_2C_3 \\ &\quad - a_3C_2S_3 + a_2C_2 \end{aligned}$$

$$a_{34} = -a_5S_4C_5$$

จากเมทริกซ์สมการที่ 3.32 และ 3.35 ตำแหน่งที่ 3x3 และ ตำแหน่งที่ 3x4 สามารถหาความสัมพันธ์ได้สองสมการดังนี้

$$-S_1a_x + C_1a_y = -S_4C_5 \quad (3.36)$$

$$-S_1p_x + C_1p_y = -a_5S_4C_5 \quad (3.37)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำสมการที่ 3.37 ทหารด้วย สมการที่ 3.36 และจัดเรียงใหม่จะได้สมการใหม่ดังนี้

$$\frac{s_1}{c_1} = \frac{a_5 a_y - p_y}{p_x - a_5 a_x} \quad (3.38)$$

ดังนั้นคำตอบของค่าของข้อต่อลำดับที่ 1 คือ

$$\theta_1 = \text{atan2}(a_5 a_y - p_y, p_x - a_5 a_x) \quad (3.39)$$

จากสมการ Forward Kinematic (4) ของ BX100L จะเห็นได้ว่า ตำแหน่ง p_x, p_y และ p_z ของข้อต่อลำดับที่ 3 จะสามารถหาได้ โดยการคูณ ด้วย Transformatio Matrix ในแนวแกน p_z เข้าไปเป็นระยะ -363 มิลลิเมตร ดังนั้น เราจะทำการหาค่าของค่าของข้อต่อที่ 2 และ 3 โดยการแยกพิจารณาเฉพาะ ข้อต่อลำดับที่ 1 ถึง 3

$$[RHS2] = {}^0T_{3B} = [A_1 A_2 A_{3A} A_{3B}] = \begin{bmatrix} n2_x & o2_x & a2_x & p2_x \\ n2_y & o2_y & a2_y & p2_y \\ n2_z & o2_z & a2_z & p2_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

โดยที่

$$\begin{aligned} p2_x &= p_x - a_x 363 \\ p2_y &= p_y - a_y 363 \\ p2_z &= p_z - a_z 363 \end{aligned}$$

และนำเมทริกซ์ ${}^0T_{3B}$ คูณด้วย Inverse Transformation Matrix

$$[{}^0T_1^{-1} {}^1T_2^{-1}] \quad (3.41)$$

$$[{}^1T_2^{-1}] [{}^0T_1^{-1}] [RHS2] = [A_{3A} A_{3B}] \quad (3.42)$$

$$[{}^1T_2^{-1}] [{}^0T_1^{-1}] [RHS] = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & b_{24} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & b_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.43)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

$$b_{11} = C_1 C_2 n_{2x} + S_1 C_2 n_{2y} - S_2 n_{2z}$$

$$b_{21} = C_1 S_2 n_{2x} + S_1 S_2 n_{2y} + C_2 n_{2z}$$

$$b_{31} = S_1 n_{2x} - C_1 n_{2y}$$

$$b_{12} = C_1 C_2 o_{2x} + S_1 C_2 o_{2y} - S_2 o_{2z}$$

$$b_{22} = C_1 S_2 o_{2x} + S_1 S_2 o_{2y} + C_2 o_{2z}$$

$$b_{32} = S_1 o_{2x} - C_1 o_{2y}$$

$$b_{13} = C_1 C_2 a_{2x} + S_1 C_2 a_{2y} - S_2 a_{2z}$$

$$b_{23} = C_1 S_2 a_{2x} + S_1 S_2 a_{2y} + C_2 a_{2z}$$

$$b_{33} = S_1 a_{2x} - C_1 a_{2y}$$

$$b_{14} = C_1 C_2 p_{2x} + S_1 C_2 p_{2y} - C_2 a_1 - S_2 p_{2z} + S_2 d_1 - a_2$$

$$b_{24} = C_1 S_2 p_{2x} + S_1 S_2 p_{2y} - S_2 a_1 + C_2 p_{2z} - C_2 d_1$$

$$b_{34} = S_1 p_{2x} - C_1 p_{2y}$$

และ

$$[A_{3A} A_{3B}] = \begin{bmatrix} c_3 & 0 & s_3 & d_3 s_3 + a_3 c_3 \\ s_3 & 0 & -c_3 & -d_3 c_3 + a_3 s_3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.44)$$

จากเมทริกซ์สมการที่ 3.43 และ 3.44 ตำแหน่งที่ 1x4 และ ตำแหน่งที่ 2x4

เราสามารถหาความสัมพันธ์ได้สองสมการดังนี้

$$d_3 s_3 + a_3 c_3 = C_1 C_2 p_{2x} + S_1 C_2 p_{2y} - C_2 a_1 - S_2 p_{2z} + S_2 d_1 - a_2 \quad (3.45)$$

$$-d_3 c_3 + a_3 s_3 = C_1 S_2 p_{2x} + S_1 S_2 p_{2y} - S_2 a_1 + C_2 p_{2z} - C_2 d_1 \quad (3.46)$$

ทำการยกกำลัง 2 สมการที่ 3.45 และ 3.46

$$d_3^2 s_3^2 + a_3^2 c_3^2 + 2d_3 s_3 a_3 c_3 = [C_2(K) + S_2(Z) - a_2]^2 \quad (3.47)$$

$$-d_3^2 c_3^2 + a_3^2 s_3^2 - 2d_3 s_3 a_3 c_3 = [S_2(K) - C_2(Z)]^2 \quad (3.48)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

$$K = C_1 p 2_x + S_1 p 2_y - a_1 \quad (3.49)$$

$$Z = -p 2_z + d_1 \quad (3.50)$$

นำสมการที่ 3.47 และ 3.48 บวกรวมกัน และ ทำการจัดเรียงสมการใหม่

$$d_3^2 s_3^2 + a_3^2 c_3^2 - d_3^2 c_3^2 + a_3^2 s_3^2 = (a_3^2 + d_3^2)(s_3^2 + c_3^2) \quad (3.51)$$

$$\begin{aligned} & [C_2(K) + S_2(Z) - a_2]^2 + [S_2(K) - C_2(Z)]^2 \\ &= C_2^2 K^2 + S_2^2 Z^2 + a_2^2 + 2C_2 K S_2 Z - 2C_2 K a_2 - 2S_2 Z a_2 \\ &+ S_2^2 K^2 + C_2^2 Z^2 - 2C_2 K S_2 Z \end{aligned} \quad (3.52)$$

โดยสมการที่ 3.51 และ 3.52 เท่ากัน แล้วทำการจัดเรียงสมการใหม่

$$C_2 K + S_2 Z = \frac{d_3^2 + a_3^2 - K^2 - Z^2 - a_2^2}{-2a_2} \quad (3.53)$$

ดังนั้นคำตอบของคาของข้อต่อลำดับที่ 2 คือ

$$\theta_2 = \text{atan2}(K, -Z) - \text{atan2}(Y, \pm\sqrt{K^2 + Z^2 - Y^2}) \quad (3.54)$$

โดยที่

$$K = C_1 p 2_x + S_1 p 2_y - a_1$$

$$Z = -p 2_z + d_1$$

$$Y = \frac{d_3^2 + a_3^2 - K^2 - Z^2 - a_2^2}{-2a_2}$$

จากคำตอบขององศาข้อต่อลำดับที่ 2 จะเห็นว่าด้วยสัญลักษณ์ \pm ทำให้

คำตอบของข้อต่อนี้มีค่าทั้งหมด 2 คำตอบ

จากเมทริกซ์สมการที่ 3.43 และ 3.44 ตำแหน่งที่ 1×4 และ ตำแหน่งที่ 2×4

$$d_3 s_3 + a_3 c_3 = A \quad (3.55)$$

$$-d_3 c_3 + a_3 s_3 = B \quad (3.56)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

$$A = C_1 C_2 p_{2x} + S_1 C_2 p_{2y} - C_2 a_1 - S_2 p_{2z} + S_2 d_1 - a_2$$

$$B = C_1 S_2 p_{2x} + S_1 S_2 p_{2y} - S_2 a_1 + C_2 p_{2z} - C_2 d_1$$

เราสามารถหาความสัมพันธ์โดยนำสมการทั้งสองมาหารกัน ได้ดังนี้

$$\frac{d_3 s_3 + a_3 c_3}{-d_3 c_3 + a_3 s_3} = \frac{A}{B} \quad (3.57)$$

จัดสมการที่ 3.57 ได้ใหม่เป็น

$$\frac{s_3}{c_3} = \frac{Ad_3 + Ba_3}{Aa_3 - Bd_3} \quad (3.58)$$

ดังนั้นคำตอบของค่าของข้อต่อลำดับที่ 3 คือ

$$\theta_3 = \text{atan2}(Ad_3 + Ba_3, Aa_3 - Bd_3) \quad (3.59)$$

โดยที่

$$A = C_1 C_2 p_{2x} + S_1 C_2 p_{2y} - C_2 a_1 - S_2 p_{2z} + S_2 d_1 - a_2$$

$$B = C_1 S_2 p_{2x} + S_1 S_2 p_{2y} - S_2 a_1 + C_2 p_{2z} - C_2 d_1$$

ดังนั้นคำตอบของค่าของข้อต่อลำดับที่ 1 ได้ดัง สมการที่ 3.59

นำสมการเมทริกซ์ที่ 3.32 คูณด้วยอินเวอร์สของ Inverse Transformation Matrix $[{}^0T_1^{-1} \quad {}^1T_2^{-1} \quad {}^2T_3^{-1}]$ เพื่อหาค่าองศาข้อต่อลำดับที่ 4 และ 5 จะได้ว่า

$$[{}^2T_3^{-1}][{}^1T_2^{-1}][{}^0T_1^{-1}][RHS2] = [A_4 A_{5A} A_{5B}] \quad (3.60)$$

$$[{}^2T_3^{-1}][{}^1T_2^{-1}][{}^0T_1^{-1}][RHS] = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.61)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

$$\begin{aligned} c_{11} &= C_1 C_2 C_3 n_x + S_1 C_2 C_3 n_y - S_2 C_3 n_z \\ &\quad + C_1 S_2 S_3 n_x + S_1 S_2 S_3 n_y + C_2 S_3 n_z \\ c_{21} &= S_1 n_x - C_1 n_y \\ c_{31} &= C_1 C_2 S_3 n_x + S_1 C_2 S_3 n_y - S_2 S_3 n_z \\ &\quad - C_1 S_2 C_3 n_x - S_1 S_2 C_3 n_y - C_2 C_3 n_z \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c_{12} &= C_1 C_2 C_3 o_x + S_1 C_2 C_3 o_y - S_2 C_3 o_z \\ &\quad + C_1 S_2 S_3 o_x + S_1 S_2 S_3 o_y + C_2 S_3 o_z \\ c_{22} &= S_1 o_x - C_1 o_y \\ c_{32} &= C_1 C_2 S_3 o_x + S_1 C_2 S_3 o_y - S_2 S_3 o_z \\ &\quad - C_1 S_2 C_3 o_x - S_1 S_2 C_3 o_y - C_2 C_3 o_z \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c_{13} &= C_1 C_2 C_3 a_x + S_1 C_2 C_3 a_y - S_2 C_3 a_z \\ &\quad + C_1 S_2 S_3 a_x + S_1 S_2 S_3 a_y + C_2 S_3 a_z \\ c_{23} &= S_1 a_x - C_1 a_y \\ c_{33} &= C_1 C_2 S_3 a_x + S_1 C_2 S_3 a_y - S_2 S_3 a_z \\ &\quad - C_1 S_2 C_3 a_x - S_1 S_2 C_3 a_y - C_2 C_3 a_z \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} c_{14} &= C_1 C_2 C_3 p_x + S_1 C_2 C_3 p_y - C_2 C_3 a_1 - S_2 C_3 p_z + S_2 C_3 d_1 \\ &\quad - C_3 a_2 + C_1 S_2 S_3 p_x + S_1 S_2 S_3 p_y - S_2 S_3 a_1 + C_2 S_3 p_z \\ &\quad - C_2 S_3 d_1 - a_3 \\ c_{24} &= S_1 p_x - C_1 p_y \\ c_{34} &= C_1 C_2 S_3 p_x + S_1 C_2 S_3 p_y - C_2 S_3 a_1 - S_2 S_3 p_z + S_2 S_3 d_1 \\ &\quad - S_3 a_2 - C_1 S_2 C_3 p_x - S_1 S_2 C_3 p_y + S_2 C_3 a_1 - C_2 C_3 p_z \\ &\quad + C_2 C_3 d_1 - d_3 \end{aligned}$$

และ

$$[A_4 A_5 A A_5 B] = \begin{bmatrix} -C_4 S_5 & -S_4 & C_4 C_5 & a_5 C_4 C_5 \\ -S_4 S_5 & C_4 & S_4 C_5 & a_5 S_4 C_5 \\ -C_5 & 1 & -S_5 & -a_5 S_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.62)$$

จากสมการที่ 3.61 และ 3.62 ตำแหน่งที่ 1x2 และ ตำแหน่งที่ 2x2 เราสามารถหาความสัมพันธ์ได้สองสมการดังนี้

$$s_4 = -[C_1 C_2 C_3 o_x + S_1 C_2 C_3 o_y - S_2 C_3 o_z + C_1 S_2 S_3 o_x + S_1 S_2 S_3 o_y + C_2 S_3 o_z] \quad (3.63)$$

$$c_4 = S_1 o_x - C_1 o_y \quad (3.64)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 3.63 และ 3.64 เราสามารถหาค่าองศาของข้อต่อลำดับที่ 4 ได้ดังนี้

$$\theta_4 = \text{atan2}(s_4, c_4) \quad (3.65)$$

จากสมการที่ 3.61 และ 3.62 ตำแหน่งที่ 3×1 และ ตำแหน่งที่ 3×3 เราสามารถหาความสัมพันธ์ได้สองสมการดังนี้

$$c_5 = -[C_1 C_2 S_3 n_x + S_1 C_2 S_3 n_y - S_2 S_3 n_z - C_1 S_2 C_3 n_x - S_1 S_2 C_3 n_y - C_2 C_3 n_z] \quad (3.66)$$

$$s_5 = -[C_1 C_2 S_3 a_x + S_1 C_2 S_3 a_y - S_2 S_3 a_z - C_1 S_2 C_3 a_x - S_1 S_2 C_3 a_y - C_2 C_3 a_z] \quad (3.67)$$

จากสมการที่ 3.66 และ 3.67 เราสามารถหาค่าองศาของข้อต่อลำดับที่ 4 ได้ดังนี้

$$\theta_5 = \text{atan2}(s_5, c_5) \quad (3.68)$$

จากวิธีการหาสมการ Inverse Kinematic ข้างต้น จะได้คำตอบดังที่แสดงในสมการที่ 3.39, 3.54, 3.59, 3.65 และ 3.68 ซึ่งแสดงค่าองศาของแต่ละข้อต่อแขนกลลำดับที่ 1,2,3,4 และ 5 ของแขนกลตามลำดับ

ดังนั้น จากสมการข้างต้น เราสามารถหาค่าองศาของแต่ละข้อต่อแขนกล เมื่อเรารู้ตำแหน่งพิกัดตำแหน่งใดๆ ในระนาบสามมิติ ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ตำแหน่งพิกัดที่เราจะใช้ในการอ้างอิง คือตำแหน่ง TCP ของหุ่นยนต์แขนกลรุ่นเก่า UX150 ซึ่งแปลงเป็นค่าพิกัดผ่านสมการ Forward Kinematic ดังที่ได้แสดงไปในหัวข้อที่ 3.1.2.3

3.1.3. ขั้นตอน การออกแบบการทดลอง และ พิสูจน์ผล

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะแบ่งขั้นตอนการ ทดลอง และ พิสูจน์ผลออกเป็นลำดับตั้ง หัวข้อดังต่อไปนี้

3.1.3.1 หลักการการออกแบบการทดลอง และ การพิสูจน์ผล

จากสมมุติฐานของการศึกษาที่กล่าวไปในหัวข้อที่ 2.2 ดังนี้

1. แขนกล สองตัว ที่มีเงื่อนไขแตกต่างกันทางกายภาพกัน จะส่งผลให้สมการ Forward Kinematic ของแต่ละตัวแตกต่างกัน
2. แขนกล สองตัว ที่มีเงื่อนไขแตกต่างกันทางกายภาพกัน สามารถเอื้อมไปยังจุดเดียวกันได้ โดยใช้ข้อมูลการหมุนของแต่ละองศาของ ข้อต่อแขนกลตัวใดตัวหนึ่งมา อ้างอิง สามารถเป็นไปได้

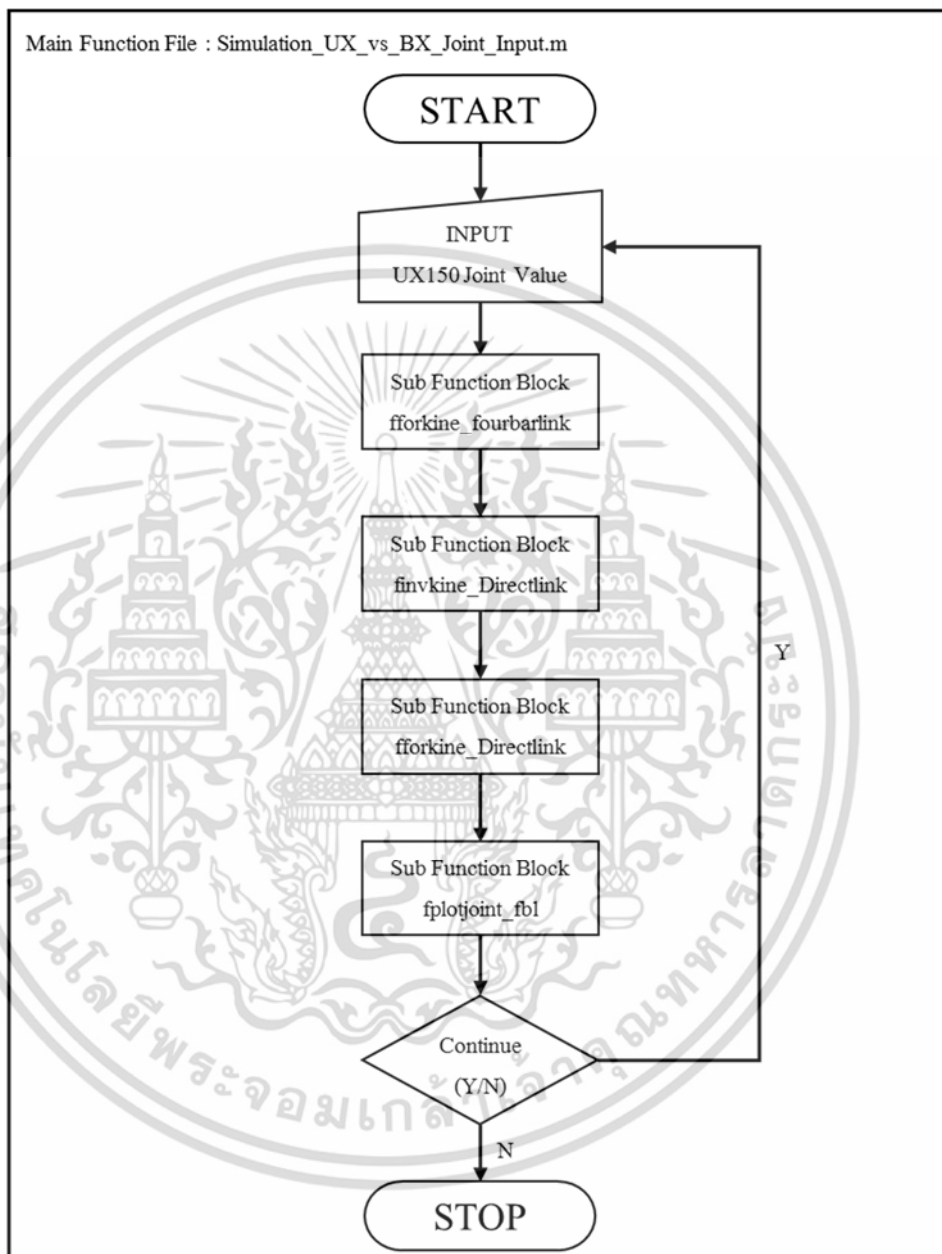
เห็นได้ว่าสมมุติฐานในข้อที่ 1. นั้นจะสามารถอธิบายได้จากการหาสมการ Forward Kinematic ในหัวข้อที่ 3.1.2.2 และ 3.1.2.3 ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า สมการ Forward Kinematic ของหุ่นยนต์แขนกลทั้งสอง มีโครงสร้างสมการแตกต่างกันตามโครงสร้างของแขนกลทั้งสองรุ่น

สำหรับสมมุติฐานในหัวข้อที่ 2. ด้วยข้อมูลและ สมการที่มี จะสามารถหาค่าตำแหน่ง พิกัด TCP ของแขนกลรุ่น UX150 ในระนาบสามมิติได้ และ สามารถหาค่าองศาของ แต่ละข้อต่อของแขนกลรุ่น BX100L ได้ จากข้อมูลดังกล่าวทั้งสองที่อยู่ในรูปของ สมการคณิตศาสตร์

ดังนั้น ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จึงเลือกทำการทดลองในโปรแกรม Matlab เพื่อทำการ คำนวณ โดยนำค่าพิกัดข้อต่อของแขนกลทั้งสองรุ่นดังกล่าวที่คำนวณได้ ทำการวาด และ แสดงผลออกมาเป็นรูปจำลองสามมิติ แสดงตำแหน่งของข้อต่อแต่ละลำดับของแขนกลทั้งสองรุ่น เพื่อพิสูจน์ผลการทดลอง

3.1.3.2 การทดลอง และ การพิสูจน์ผล

ขั้นตอนการเขียนโปรแกรมสำหรับ ทดลอง และ พิสูจน์ผลในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สามารถเขียนสรุปออกมาเป็น Flow chart ได้ดังนี้



รูปที่ 3.4 แสดงลำดับ และ แนวคิดขั้นตอนของโปรแกรม Matlab ที่เขียนในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่สามารถอธิบายความหมายของแต่ละ Function Block ต่างๆใน Flow chart ดังกล่าว ได้ดังต่อไปนี้

3.1.3.2.1 Main Function file : Simulation_UX_vs_BX_Joint_Input

เป็นไฟล์ฟังก์ชันหลักทำหน้าที่ เรียกไฟล์ฟังก์ชันย่อยต่างๆขึ้นมาทำงาน เพื่อคำนวณ ประมวลผลข้อมูล และ แสดงผล ตามลำดับ

3.1.3.2.2 Sub Function file : fforkine_fourbarlink

เป็นไฟล์ฟังก์ชันย่อยทำหน้าที่ นำข้อมูลองศาข้อต่อทั้ง 5 ของ UX150 ที่ได้จากการกรอกโดย user มาคำนวณ Forward Kinematic เพื่อหาค่าพิกัดตำแหน่ง TCP และตำแหน่งของแต่ละข้อต่อ บนระนาบสามมิติ

โดยภายในฟังก์ชันมีข้อมูลประกอบดังต่อไปนี้

1. D-H Parameter ของ แขนกลรุ่น UX150
2. Transformation Matrix ของ UX150 โดยนำค่า D-H Parameter ใช้

โดยมี

1. Input คือ ค่าองศาข้อต่อทั้ง 5 ของ UX150
2. Output ของฟังก์ชันที่ได้คือ
 - Transformation Matrix ของแต่ละข้อต่อของ UX150
 - ตำแหน่ง TCP ของ UX150

3.1.3.2.3 Sub Function file : finvkin_Directlink

เป็นไฟล์ฟังก์ชันย่อยทำหน้าที่ นำตำแหน่งพิกัด TCP ของ UX150 มาคำนวณสมการ Inverse Kinematic ของ BX100L เพื่อหาค่าองศาของแต่ละข้อต่อ โดยภายในฟังก์ชันมีข้อมูลประกอบดังต่อไปนี้

1. D-H Parameter ของ แขนกลรุ่น BX100L
2. สมการ Inverse Kinematic ของแขนกลรุ่น BX100L

โดยมี

1. Input คือ ค่า TCP ของ UX150 ที่ได้จาก fforkine_fourbarlink
2. Output ของฟังก์ชันที่ได้คือ ค่าองศาของแต่ละข้อต่อของ BX100L

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3.2.4 Sub Function file : fforkine_Directlink

เป็นไฟล์ฟังก์ชันย่อยทำหน้าที่ นำข้อมูลองศาข้อต่อทั้ง 5 ของ BX100L ที่ได้จากฟังก์ชัน finvkin_Directlink มาคำนวณ Forward Kinematic เพื่อหาค่าพิกัดตำแหน่ง TCP และตำแหน่งของแต่ละข้อต่อบนระนาบสามมิติ โดยภายในฟังก์ชันมีข้อมูลประกอบดังต่อไปนี้

1. D-H Parameter ของ แขนกลรุ่น BX100L
2. Transformation Matrix ของ BX100L โดยนำค่า D-H Parameter ใช้งาน

โดยมี

1. Input คือ ค่าองศาข้อต่อทั้ง 5 ของ BX100L ที่ได้จาก finvkin_Directlink
2. Output ของฟังก์ชันที่ได้คือ
 - Transformation Matrix ของแต่ละข้อต่อของ BX100L
 - ค่าองศาข้อต่อของ BX100L ที่อยู่ในรูปสำหรับใช้งานในงานจริง

3.1.3.2.5 Sub Function file : fplotjoint_fbl

เป็นไฟล์ฟังก์ชันย่อยทำหน้าที่ นำข้อมูล Transformation Matrix ของ Robot BX100L และ UX150 มาทำการวาด และ แสดงผล แบบ เดี่ยว และ เปรียบเทียบ

โดยมี

1. Input คือ Transformation Matrix ของ BX100L และ UX150

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะทำการทดลอง ด้วยการใช้อำนาจองศาข้อต่อ โดยสามารถอ้างอิงโปรแกรม Matlab ดังกล่าวได้ในภาคผนวก และ อ้างอิงจากโปรแกรมของแขนกลรุ่น UX150 ที่ปฏิบัติงานทำหน้าที่ยกชิ้นส่วน เพื่อประกอบตัวถังรถยนต์ในอุตสาหกรรมรถยนต์หนึ่ง โดยข้อมูลที่นำมาแปลงผลทั้งหมดจำนวน 2 โปรแกรม คือ

1. PG_0 คือ โปรแกรมที่สั่งให้แขนกลออกจากท่าตั้งต้นไปยังท่าเตรียมพร้อมปฏิบัติงาน
2. PG_3 คือ โปรแกรมที่สั่งให้แขนกลออกจากท่าเตรียมพร้อมไปปฏิบัติงาน

ซึ่งสามารถสรุปค่าองศาข้อต่อของแขนกลรุ่น UX150 ในแต่ละแกนออกมาได้ตามตารางดังต่อไปนี้

ตารางที่ 3.3 แสดงข้อมูลองศาข้อต่อของแขนกลรุ่น UX150 โปรแกรม PG_0

Step No.	UX-150 Joint number (Degrees) - PG_0					
	1	2	3	4	5	6
1	50.2236	-38.7698	-46.2574	1.4456	-43.6824	-56.7579
2	7.2057	10.4418	-69.35	2.6953	-20.3201	12.4232
3	30.1811	-37.0033	-14.9512	0.9917	-72.7801	57.8569
4	27.2849	-2.0911	-48.1277	0.4454	-40.5498	60.6986
5	-2.3315	-6.9016	-52.3219	-0.7456	-34.6907	91.2362
6	16.1683	-23.2566	-55.7728	1.7495	-40.2843	-15541
7	7.6252	-28.4834	-56.5647	1.4412	-33.8405	-22.2872

ตารางที่ 3.4 แสดงข้อมูลองศาข้อต่อของแขนกลรุ่น UX150 โปรแกรม PG_3

Step No.	UX-150 Joint number (Degrees) - PG_3					
	1	2	3	4	5	6
1	11.0257	14.681	-67.6713	2.5453	-22.052	8.7698
2	11.7866	44.9276	-48.7749	1.5155	-41.2628	-10.8033
3	-8.7679	47.3626	-45.9831	3.5302	-43.5034	7.6121
4	-8.913	32.9963	-34.6024	1.1576	-55.0903	9.6441
5	-8.8457	25.8652	-27.5321	2.427	-61.2828	8.5316
6	12.955	22.2647	-28.6679	2.9683	-61.0594	-12.2206
7	13.0171	15.8738	-19.0998	2.3754	-69.8398	-11.6866
8	17.9966	-54.607	-1.8834	3.2809	-88.4238	-15.9764
9	19.5328	-44.1822	-5.7148	-0.1927	-81.4183	50.4837
10	20.6378	-14.1678	-10.7767	-0.2433	-76.4441	68.1109
11	22.2745	-14.0606	-21.2348	0.7712	-66.2029	65.7334
12	30.1811	-37.0033	-14.9512	0.9917	-72.7801	57.8569
13	30.0813	-28.4866	-27.6776	1.4462	-59.5773	57.517
14	30.0516	-18.5242	-38.766	0.9411	-49.3355	57.647
15	29.9806	-9.4531	-47.2327	0.8902	-41.0802	57.6725
16	27.2849	-2.0911	-48.1277	0.4454	-40.5498	60.6986
17	-2.3315	-6.9016	-52.3219	-0.7456	-34.6907	91.2362
18	16.1683	-23.2566	-55.7728	1.7495	-40.2843	-1.5541
19	50.2236	-38.7696	-46.2574	1.4462	-43.6821	-56.7589
20	50.2236	-38.7696	-46.2574	1.4462	-43.6821	-56.7589
21	50.2236	-38.7696	-46.2574	1.4462	-43.6821	-56.7589

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลอง

4. ผลการทดลอง

การทดลองในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะมีเริ่มต้นการทดลอง โดยการนำค่าองศาข้อต่อของแขนกลรุ่น UX150 จากตารางที่ 3.3 และ 3.4 มาทำการป้อนข้อมูลแต่ละในสแต็ป ใสในโปรแกรม Matlab หลังจากที่ทำกรกรอกข้อมูลเสร็จทีละหนึ่งสแต็ป โปรแกรมจะทำการคำนวณ เพื่อหาค่าตอบค่าข้อต่อองศาที่ของแขนกลรุ่น BX100L จากนั้นจึง แสดงผลการทดลองในรูปแบบจำลองสถานการณ์ของแขนกล จำนวนทั้งหมด 3 ภาพ โดยประกอบด้วย

1. ภาพจำลองสถานการณ์ ลักษณะท่าทาง และ ปลายของแขนกล BX100L ไปยังตำแหน่งของ แขนกลรุ่น UX150
2. ภาพจำลองสถานการณ์ ลักษณะท่าทาง และ ปลายของแขนกล UX150
3. ภาพจำลองสถานการณ์ ของแขนกลโดย เปรียบเทียบระหว่างรุ่น BX100L และ UX150

4.1 ผลการทดลองโปรแกรม PG_0

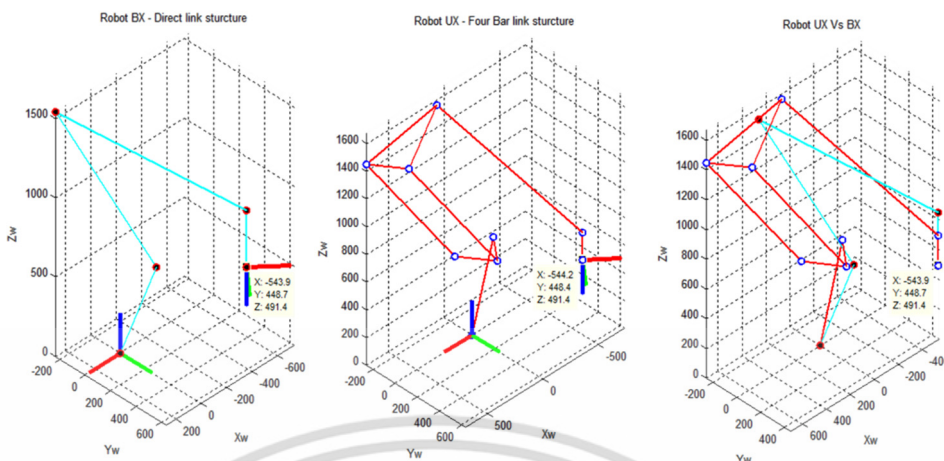
จากข้อมูลในตารางที่ 3.3 เราสามารถ แสดงผลการแปลงข้อมูลได้ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการแปลงข้อมูลองศาข้อต่อของแขนกลรุ่น BX100L โปรแกรม PG_0

Step No.	Converted BX100L Joint number (Degrees) - PG_0					
	1	2	3	4	5	6
1	50	-29.019	-72.326	1.2901	-46.636	-56.7579
2	7.0538	-4.2246	-62.149	2.5132	-31.737	12.4232
3	30.044	-18.754	-35.055	0.95294	-71.432	57.8569
4	27.247	-4.133	-46.101	0.41733	-46.71	60.6986
5	-2.2673	-10.141	-55.023	-0.694	-42.131	91.2362
6	15.932	-23.78	-70.579	1.5557	-49.258	-15541
7	7.4303	-30.106	-76.198	1.2768	-44.313	-22.2872

โดยสามารถแสดงผลแต่ละขั้นตอนการเคลื่อนไหวของแขนกลทั้งสองรุ่นได้ดังนี้

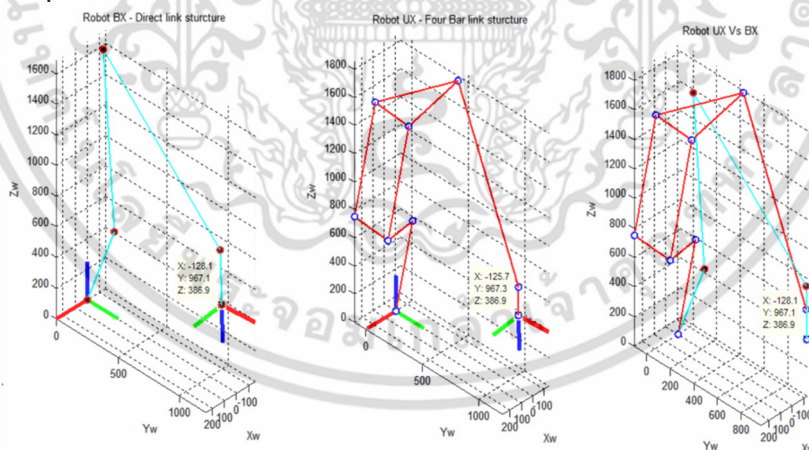
Step No.1



ตารางที่4.2 ตำแหน่ง TCP โปรแกรม PG 0 สเต็ปที่ 1 ระหว่างแขนกลรุ่น BX100L และ UX150

PG-0 Step no.1			
TCP	BX100L	UX150	Error
X (mm.)	-543.93	-544.18	0.25
Y (mm.)	448.66	448.37	0.29
Z (mm.)	491.41	491.42	-0.01
R (degree)	139.11	139.18	-0.07
Y (degree)	-0.049994	-0.051082	0.001088
P (degree)	-179.06	-179	-0.06

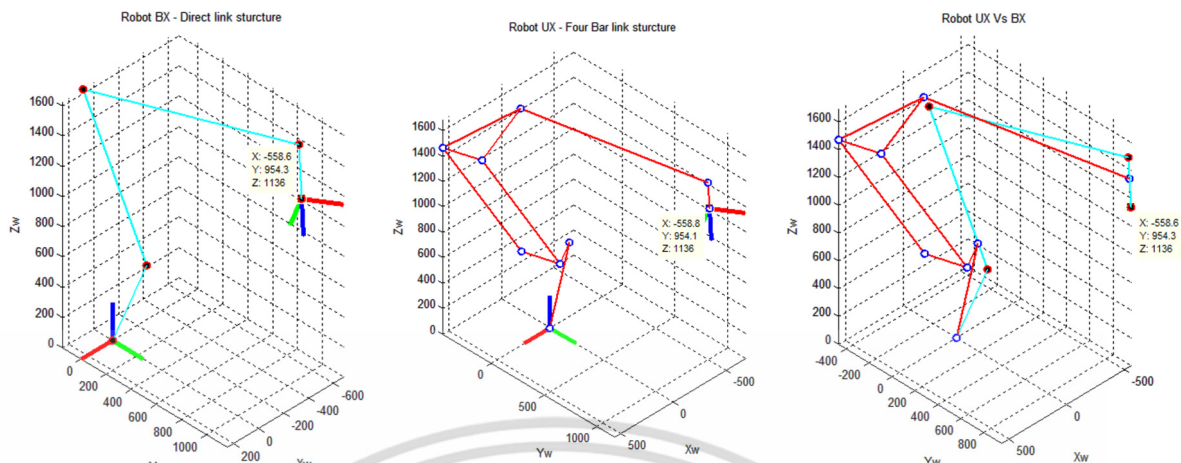
Step No.2



ตารางที่4.3 ตำแหน่ง TCP โปรแกรม PG 0 สเต็ปที่ 2 ระหว่างแขนกลรุ่น BX100L และ UX150

PG-0 Step no.2			
TCP	BX100L	UX150	Error
X (mm.)	-128.11	-125.67	-2.44
Y (mm.)	967.13	967.33	-0.2
Z (mm.)	386.91	386.86	0.05
R (degree)	94.917	94.678	0.239
Y (degree)	-0.31369	-0.30894	-0.00475
P (degree)	-178.067	-179.05	0.983

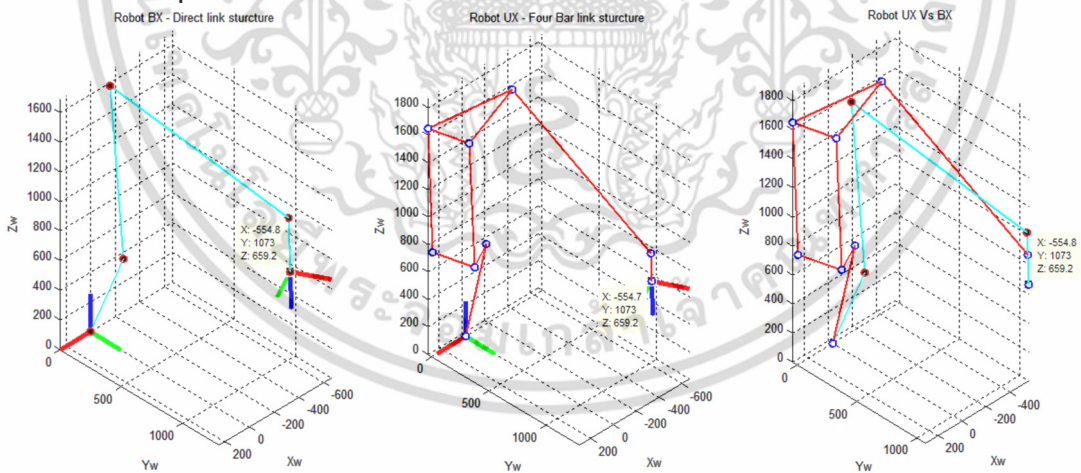
Step No.3



ตารางที่4.4 ตำแหน่ง TCP โปรแกรม PG 0 สเต็ปที่ 3 ระหว่างแขนกลรุ่น BX100L และ UX150

PG-0 Step no.3			
TCP	BX100L	UX150	Error
X (mm.)	-558.55	-558.83	0.28
Y (mm.)	954.3	954.15	0.15
Z (mm.)	1135.6	1135.6	0
R (degree)	119.74	119.89	-0.15
Y (degree)	-2.2638	-2.2662	0.0024
P (degree)	-179.08	-179.04	-0.04

Step No.4

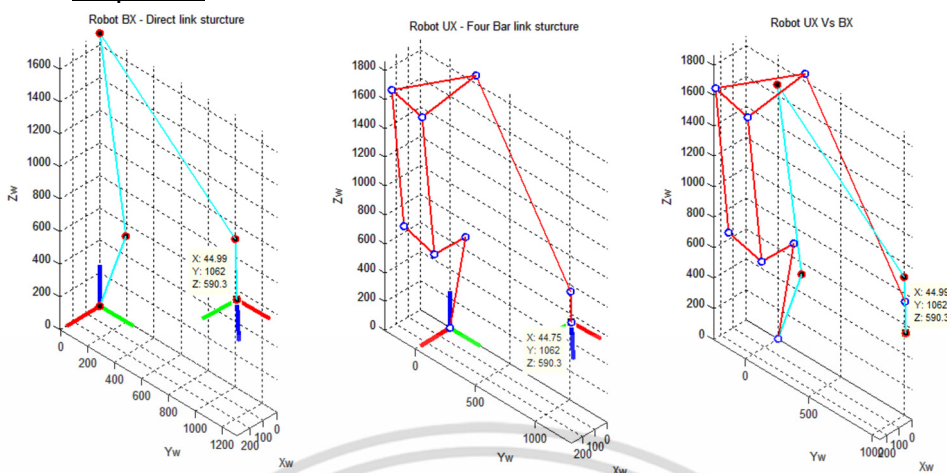


ตารางที่4.5 ตำแหน่ง TCP โปรแกรม PG 0 สเต็ปที่ 4 ระหว่างแขนกลรุ่น BX100L และ UX150

PG-0 Step no.4			
TCP	BX100L	UX150	Error
X (mm.)	-554.75	-554.68	-0.07
Y (mm.)	1073.1	1073.1	0
Z (mm.)	659.2	659.2	0
R (degree)	116.96	116.95	0.01
Y (degree)	-1.3217	-1.3216	-1E-04
P (degree)	-179.69	-179.7	0.01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าการณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

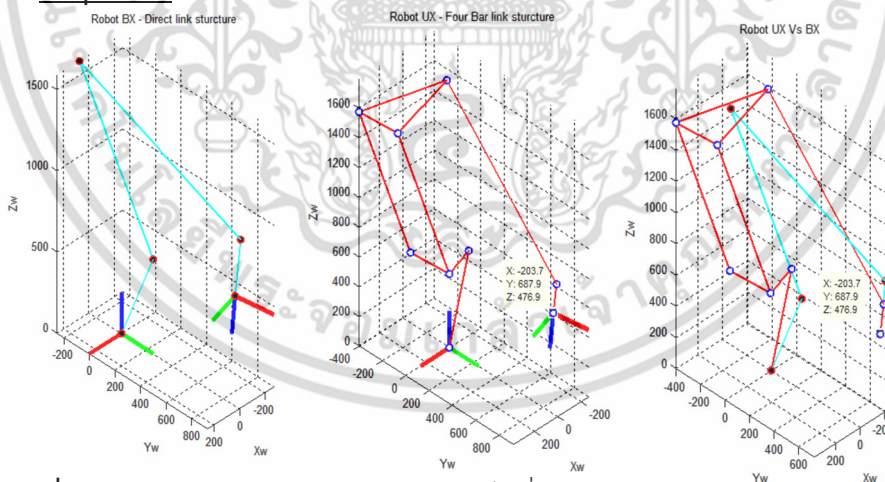
Step No.5



ตารางที่4.6 ตำแหน่ง TCP โปรแกรม PG 0 สเต็ปที่ 5 ระหว่างแขนกลรุ่น BX100L และ UX150

PG-0 Step no.5			
TCP	BX100L	UX150	Error
X (mm.)	44.988	44.749	0.239
Y (mm.)	1061.7	1061.8	-0.1
Z (mm.)	590.3	590.3	0
R (degree)	88.248	88.282	-0.034
Y (degree)	-2.9852	-2.985	-0.0002
P (degree)	179.51	179.54	-0.03

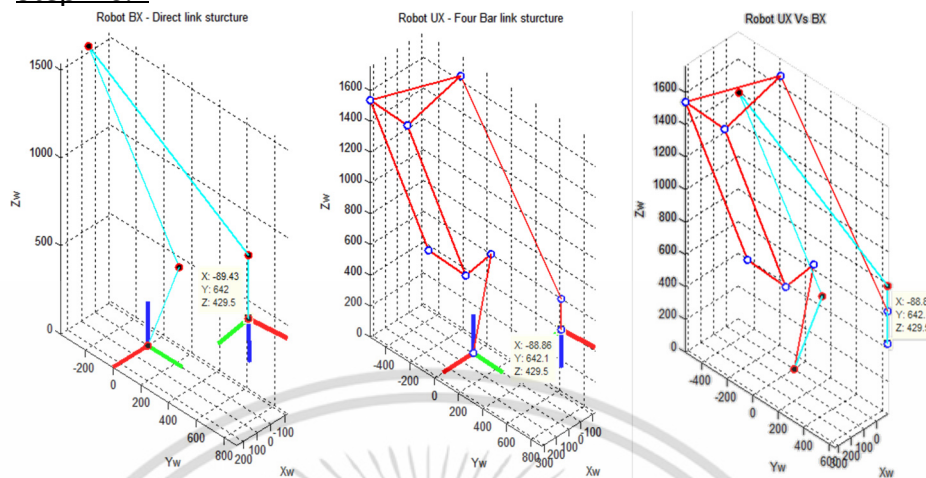
Step No.6



ตารางที่4.7 ตำแหน่ง TCP โปรแกรม PG 0 สเต็ปที่ 6 ระหว่างแขนกลรุ่น BX100L และ UX150

PG-0 Step no.6			
TCP	BX100L	UX150	Error
X (mm.)	-204.1	-203.65	-0.45
Y (mm.)	687.78	687.9	-0.12
Z (mm.)	476.86	476.85	0.01
R (degree)	104.91	104.83	0.08
Y (degree)	6.0671	6.0686	-0.0015
P (degree)	-178.93	-179.01	0.08

Step No.7



ตารางที่ 4.8 ตำแหน่ง TCP โปรแกรม PG 0 สเต็ปที่ 7 ระหว่างแขนกลรุ่น BX100L และ UX150

PG-0 Step no.7			
TCP	UX150	BX100L	Error
X (mm.)	-89.43	-88.858	-0.572
Y (mm.)	642.03	642.1	-0.07
Z (mm.)	429.51	429.5	0.01
R (degree)	96.517	96.428	0.089
Y (degree)	0.4122	0.4135	-0.0013
P (degree)	-179.11	-179.21	0.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากข้อมูลข้างบน สามารถสรุปตำแหน่ง TCP ของแขนกลทั้งสองรุ่นในระนาบสามมิติได้ ดังตารางที่ 4.9 และ 4.10

ตารางที่ 4.9 แสดงตำแหน่งพิกัด โปรแกรม PGO TCP ของ UX150 บนระนาบสามมิติ

Step No.	UX-150 TCP Location - PG_0					
	Location (mm.)			Orientation (Degrees)		
	X	Y	Z	R	P	Y
1	-544.18	448.37	491.42	139.18	-0.051082	-179
2	-125.67	967.33	386.86	94.678	-0.30894	-179.05
3	-558.83	954.15	1135.6	119.89	-2.2662	-179.04
4	-554.68	1073.1	659.2	116.95	-1.3216	-179.7
5	44.749	1061.8	590.3	88.282	-2.985	179.54
6	-203.65	687.9	476.85	104.83	6.0686	-179.01
7	-88.858	642.1	429.5	96.428	0.4135	-179.21

ตารางที่ 4.10 แสดงตำแหน่งพิกัด โปรแกรม PGO TCP ของ BX100L บนระนาบสามมิติ

Step No.	BX100L TCP Location - PG_0					
	Location (mm.)			Orientation (Degrees)		
	X	Y	Z	R	P	Y
1	-543.93	448.66	491.41	139.11	-0.049994	-179.06
2	-128.11	967.13	386.91	94.917	-0.31369	-178.067
3	-558.55	954.3	1135.6	119.74	-2.2638	-179.08
4	-554.75	1073.1	659.2	116.96	-1.3217	-179.69
5	44.988	1061.7	590.3	88.248	-2.9852	179.51
6	-204.1	687.78	476.86	104.91	6.0671	-178.93
7	-89.43	642.03	429.51	96.517	0.4122	-179.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลการทดลองโปรแกรม PG_3

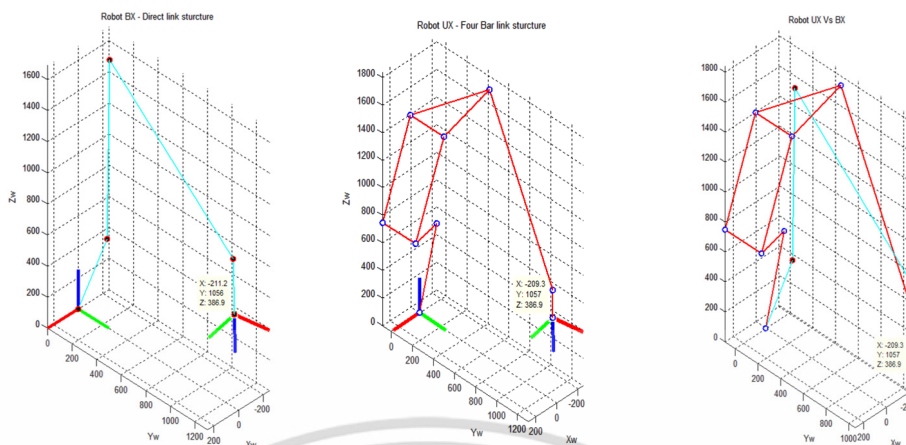
จากข้อมูลในตารางที่ 3.4 เราสามารถ แสดงผลการแปลงข้อมูลได้ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.11 แสดงผลการแปลงข้อมูลองศาข้อต่อของแขนกลรุ่น BX100L โปรแกรม PG_3

Step No.	UX-150 Joint number (Degrees) - PG_3					
	1	2	3	4	5	6
1	11.0257	14.681	-67.6713	2.5453	-22.052	8.7698
2	11.7866	44.9276	-48.7749	1.5155	-41.2628	-10.8033
3	-8.7679	47.3626	-45.9831	3.5302	-43.5034	7.6121
4	-8.913	32.9963	-34.6024	1.1576	-55.0903	9.6441
5	-8.8457	25.8652	-27.5321	2.427	-61.2828	8.5316
6	12.955	22.2647	-28.6679	2.9683	-61.0594	-12.2206
7	13.0171	15.8738	-19.0998	2.3754	-69.8398	-11.6866
8	17.9966	-54.607	-1.8834	3.2809	-88.4238	-15.9764
9	19.5328	-44.1822	-5.7148	-0.1927	-81.4183	50.4837
10	20.6378	-14.1678	-10.7767	-0.2433	-76.4441	68.1109
11	22.2745	-14.0606	-21.2348	0.7712	-66.2029	65.7334
12	30.1811	-37.0033	-14.9512	0.9917	-72.7801	57.8569
13	30.0813	-28.4866	-27.6776	1.4462	-59.5773	57.517
14	30.0516	-18.5242	-38.766	0.9411	-49.3355	57.647
15	29.9806	-9.4531	-47.2327	0.8902	-41.0802	57.6725
16	27.2849	-2.0911	-48.1277	0.4454	-40.5498	60.6986
17	-2.3315	-6.9016	-52.3219	-0.7456	-34.6907	91.2362
18	16.1683	-23.2566	-55.7728	1.7495	-40.2843	-1.5541
19	50.2236	-38.7696	-46.2574	1.4462	-43.6821	-56.7589
20	50.2236	-38.7696	-46.2574	1.4462	-43.6821	-56.7589
21	50.2236	-38.7696	-46.2574	1.4462	-43.6821	-56.7589

โดยสามารถแสดงผลแต่ละขั้นตอนการเคลื่อนไหวของแขนกลทั้งสองรุ่นได้ดังนี้

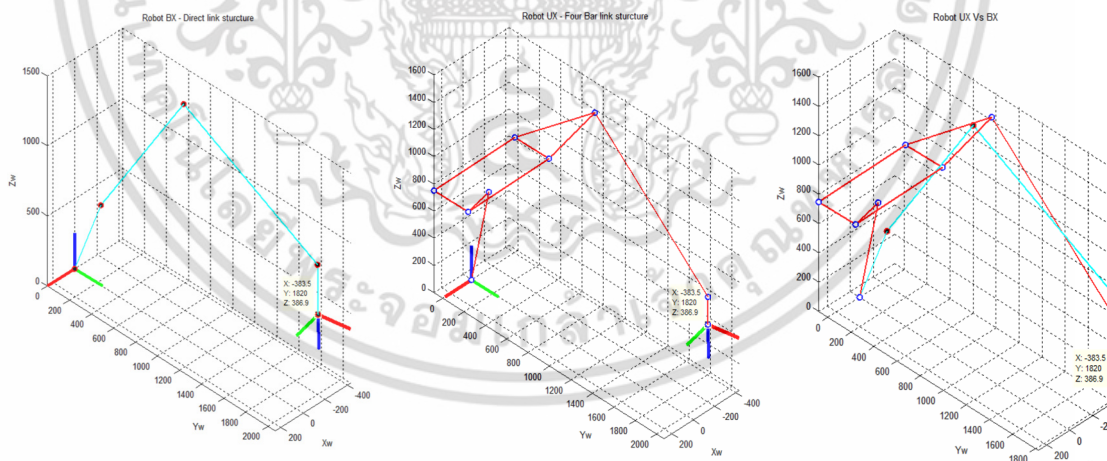
Step No.1



ตารางที่ 4.12 ตำแหน่ง TCP โปรแกรม PG 3 สเต็ปที่ 1 ระหว่างแขนกลรุ่น BX100L และ UX150

PG-3 Step no.1			
TCP	BX100L	UX150	Error
X (mm.)	-211.19	-209.34	-1.85
Y (mm.)	1056.2	1056.5	-0.3
Z (mm.)	386.91	386.87	0.04
R (degree)	98.849	98.667	0.182
Y (degree)	-0.26034	-0.2568	-0.00354
P (degree)	-178.74	-179.03	0.29

Step No.2

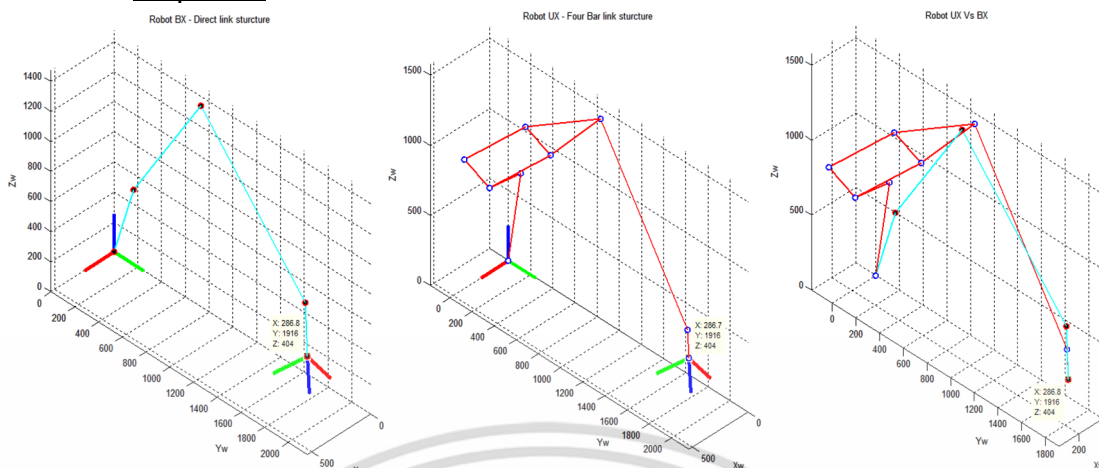


ตารางที่ 4.13 ตำแหน่ง TCP โปรแกรม PG 3 สเต็ปที่ 2 ระหว่างแขนกลรุ่น BX100L และ UX150

PG-3 Step no.2			
TCP	BX100L	UX150	Error
X (mm.)	-383.46	-383.47	0.01
Y (mm.)	1820.2	1820.2	0
Z (mm.)	386.86	386.86	0
R (degree)	100.65	100.65	0
Y (degree)	0.047651	0.047628	2.3E-05
P (degree)	-179	-179	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ... ไม่ว่าการณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

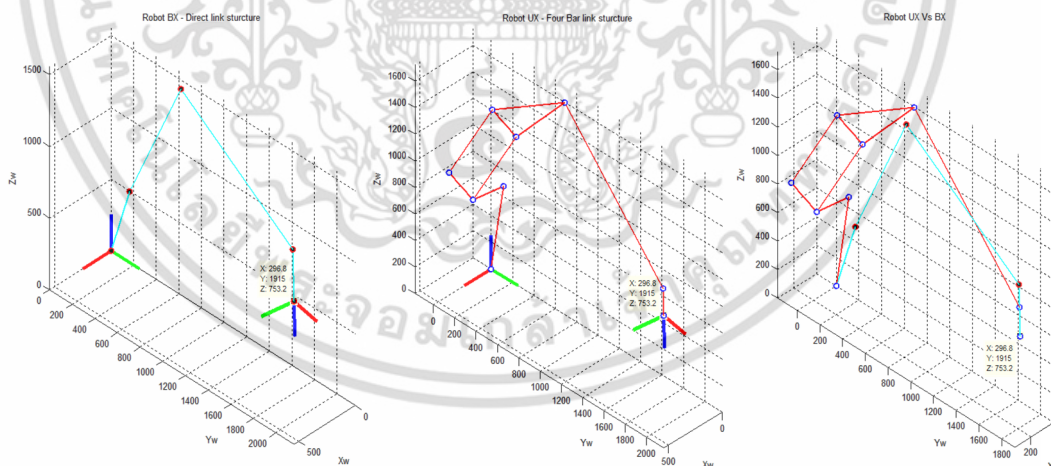
Step No.3



ตารางที่ 4.14 ตำแหน่ง TCP โปรแกรม PG 3 สเต็ปที่ 3 ระหว่างแขนกลรุ่น BX100L และ UX150

PG-3 Step no.3			
TCP	BX100L	UX150	Error
X (mm.)	286.83	286.7	0.13
Y (mm.)	1915.9	1915.9	0
Z (mm.)	403.98	403.98	0
R (degree)	78.651	78.672	-0.021
Y (degree)	-0.45781	-0.4587	0.00089
P (degree)	-177.57	-177.55	-0.02

Step No.4

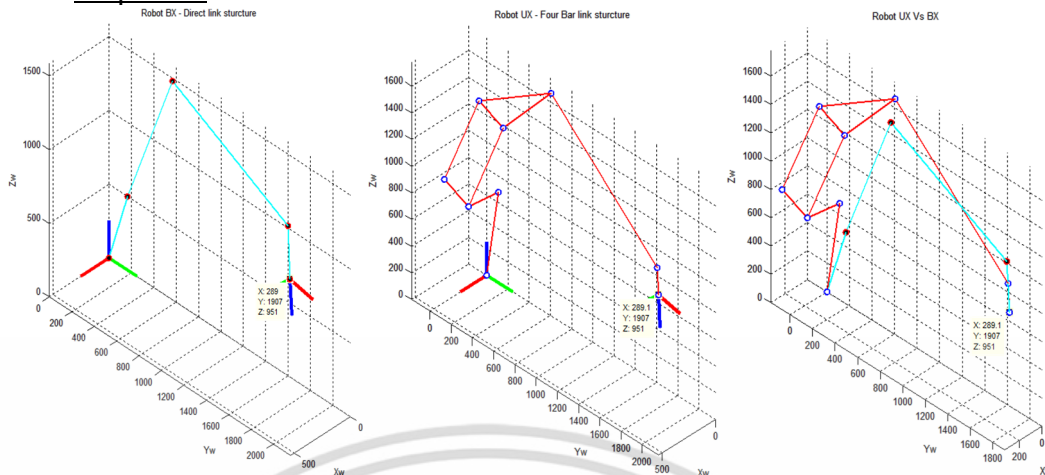


ตารางที่ 4.15 ตำแหน่ง TCP โปรแกรม PG 3 สเต็ปที่ 4 ระหว่างแขนกลรุ่น BX100L และ UX150

PG-3 Step no.4			
TCP	BX100L	UX150	Error
X (mm.)	296.78	296.82	-0.04
Y (mm.)	1914.6	1914.6	0
Z (mm.)	753.23	753.23	0
R (degree)	80.436	80.425	0.011
Y (degree)	-0.30198	-0.30179	-0.00019
P (degree)	-179.04	-179.05	0.01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ... ระเบียบข้อบังคับ... ระเบียบข้อดำเนินการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

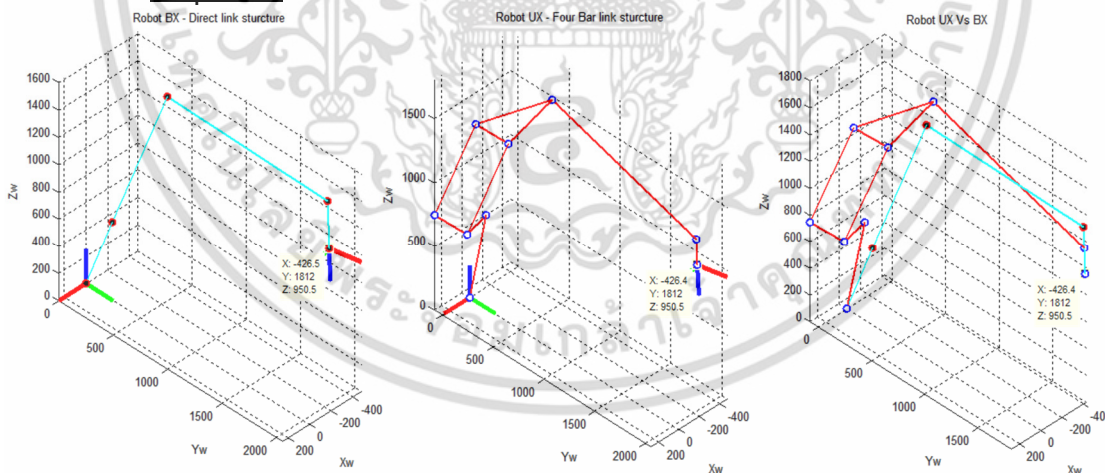
Step No.5



ตารางที่ 4.16 ตำแหน่ง TCP โปรแกรม PG 3 สเต็ปที่ 5 ระหว่างแขนกลรุ่น BX100L และ UX150

PG-3 Step no.5			
TCP	BX100L	UX150	Error
X (mm.)	289.02	289.12	-0.1
Y (mm.)	1907.3	1907.3	0
Z (mm.)	951	951	0
R (degree)	80.024	79.988	0.036
Y (degree)	-1.1645	-1.1632	-0.0013
P (degree)	-177.83	-177.85	0.02

Step No.6

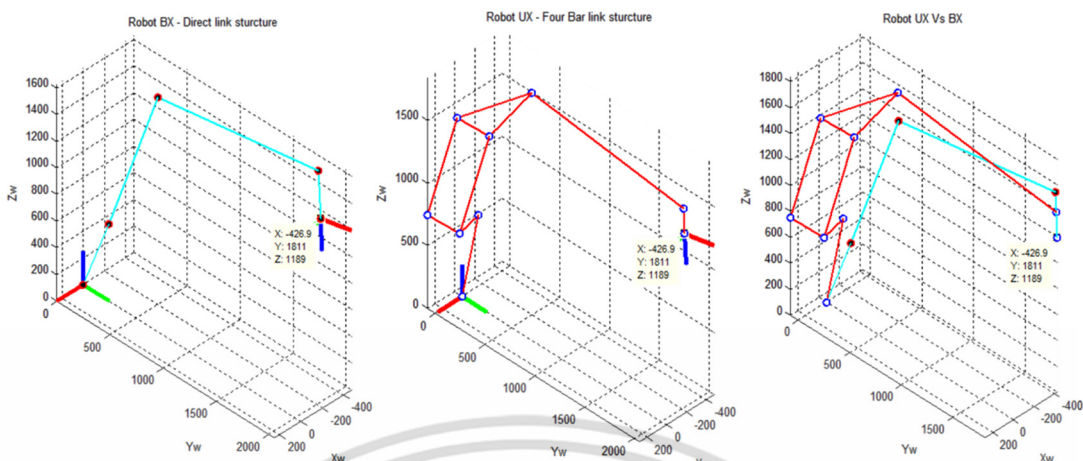


ตารางที่ 4.17 ตำแหน่ง TCP โปรแกรม PG 3 สเต็ปที่ 6 ระหว่างแขนกลรุ่น BX100L และ UX150

PG-3 Step no.6			
TCP	BX100L	UX150	Error
X (mm.)	-426.51	13	-439.51
Y (mm.)	1812.1	-560.43	2372.53
Z (mm.)	950.48	959.42	-8.94
R (degree)	101.56	929.24	-827.68
Y (degree)	-0.24189	119.23	-119.4719
P (degree)	-177.38	-2.7344	-174.6456

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ... ระเบียบงานด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

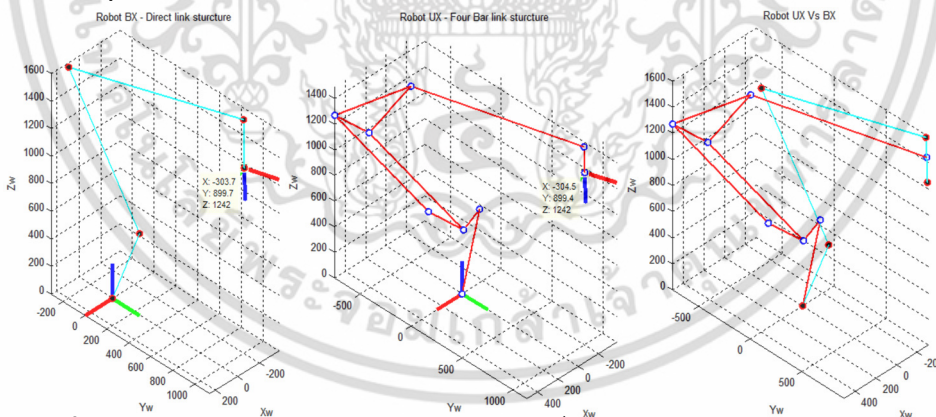
Step No.7



ตารางที่ 4.18 ตำแหน่ง TCP โปรแกรม PG 3 สเต็ปที่ 7 ระหว่างแขนกลรุ่น BX100L และ UX150

PG-3 Step no.7			
TCP	BX100L	UX150	Error
X (mm.)	-426.94	21	-447.94
Y (mm.)	1811.1	-543.93	2355.03
Z (mm.)	1189.1	448.66	740.44
R (degree)	102.24	491.42	-389.18
Y (degree)	-1.0459	139.11	-140.1559
P (degree)	-177.75	-0.050286	-177.6997

Step No.8

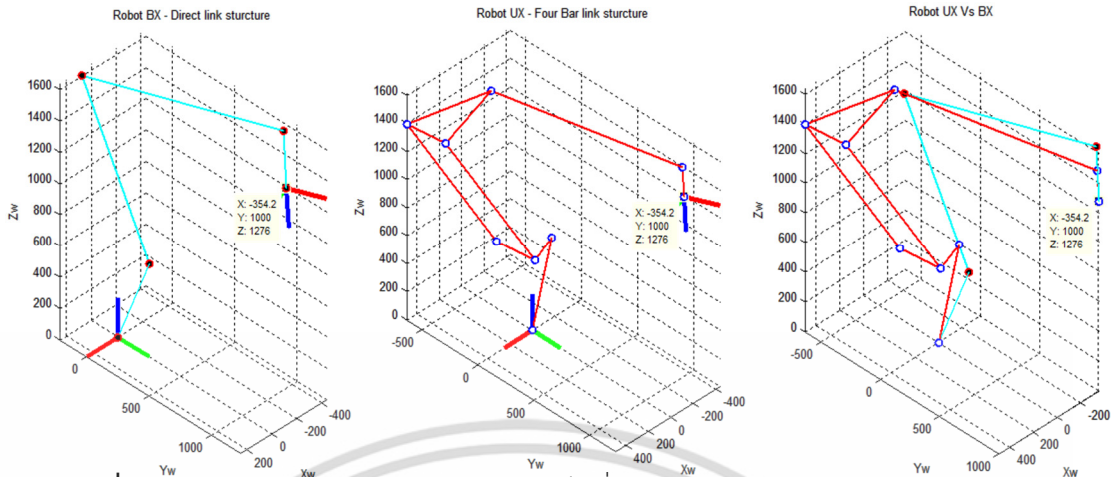


ตารางที่ 4.19 ตำแหน่ง TCP โปรแกรม PG 3 สเต็ปที่ 8 ระหว่างแขนกลรุ่น BX100L และ UX150

PG-3 Step no.8			
TCP	BX100L	UX151	Error
X (mm.)	-303.69	-304.51	0.82
Y (mm.)	899.68	899.43	0.25
Z (mm.)	1242.2	1242.2	0
R (degree)	106.99	107.91	-0.92
Y (degree)	0.36123	0.30978	0.05145
P (degree)	-176.86	-176.72	-0.14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

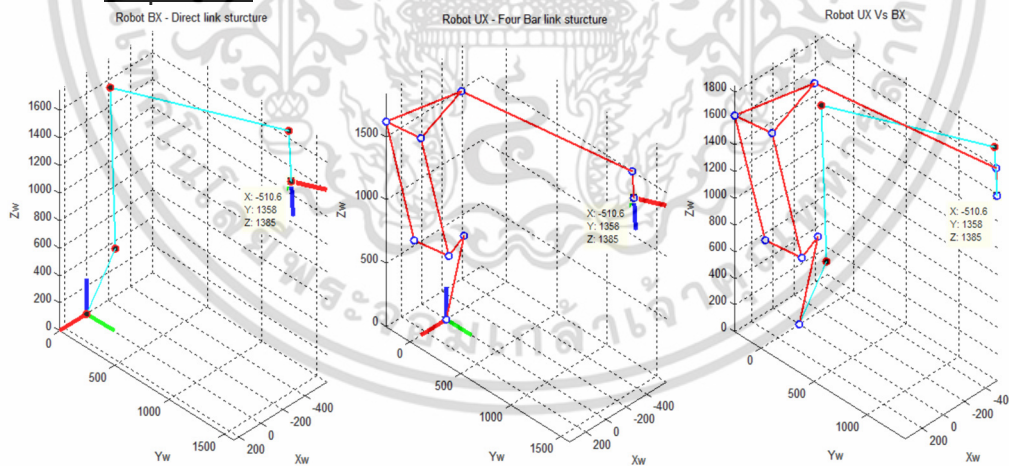
Step No.9



ตารางที่ 4.20 ตำแหน่ง TCP โปรแกรม PG 3 สเต็ปที่ 9 ระหว่างแขนกลรุ่น BX100L และ UX150

PG-3 Step no.9			
TCP	BX100L	UX152	Error
X (mm.)	-354.25	-354.2	-0.05
Y (mm.)	1000.4	1000.4	0
Z (mm.)	1276.2	1276.2	0
R (degree)	109.6	109.56	0.04
Y (degree)	-2.8667	-2.8669	0.0002
P (degree)	179.81	179.81	0

Step No.10

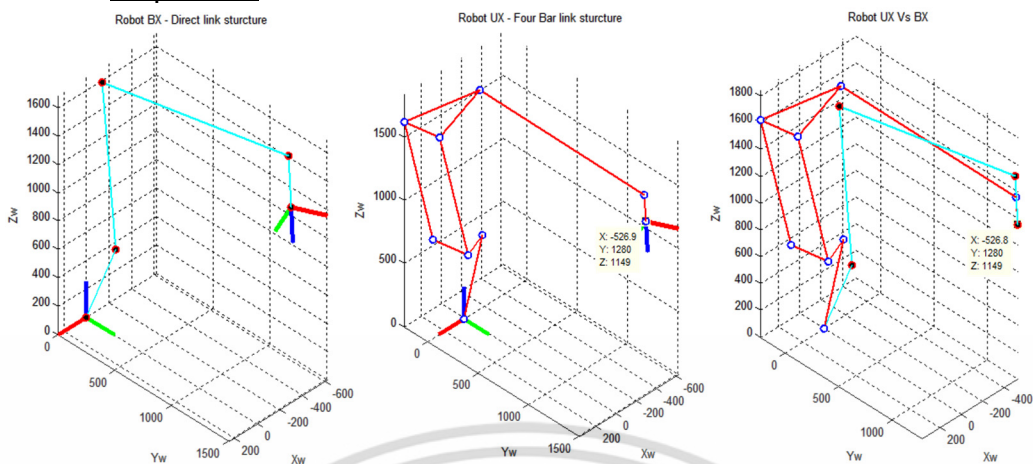


ตารางที่ 4.21 ตำแหน่ง TCP โปรแกรม PG 3 สเต็ปที่ 10 ระหว่างแขนกลรุ่น BX100L และ UX150

PG-3 Step no.10			
TCP	BX100L	UX153	Error
X (mm.)	-510.59	-510.57	-0.02
Y (mm.)	1358	1358	0
Z (mm.)	1385.4	1385.4	0
R (degree)	110.71	110.69	0.02
Y (degree)	-2.779	-2.7791	0.0001
P (degree)	179.76	179.76	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ... ระเบียบงานด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

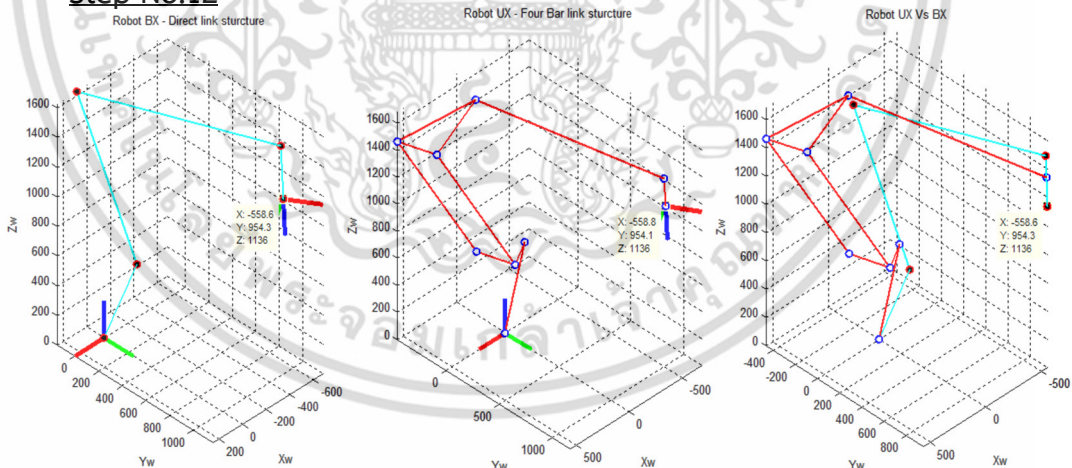
Step No.11



ตารางที่ 4.22 ตำแหน่ง TCP โปรแกรม PG 3 สเต็ปที่ 11 ระหว่างแขนกลรุ่น BX100L และ UX150

PG-3 Step no.11			
TCP	BX100L	UX154	Error
X (mm.)	-526.8	-526.88	0.08
Y (mm.)	1279.7	1279.6	0.1
Z (mm.)	1149.3	1149.3	0
R (degree)	111.93	111.96	-0.03
Y (degree)	-2.5599	-2.5603	0.0004
P (degree)	-179.29	-179.28	-0.01

Step No.12

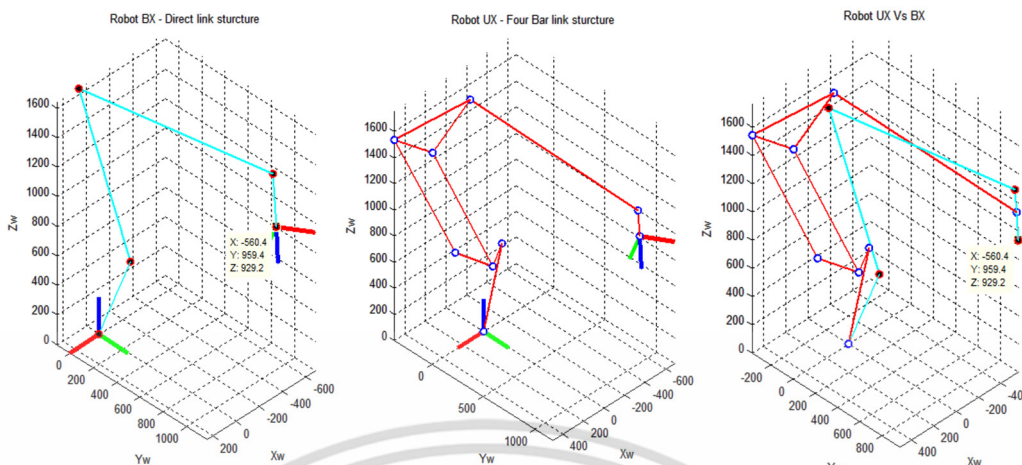


ตารางที่ 4.23 ตำแหน่ง TCP โปรแกรม PG 3 สเต็ปที่ 12 ระหว่างแขนกลรุ่น BX100L และ UX150

PG-3 Step no.12			
TCP	BX100L	UX155	Error
X (mm.)	-558.55	-558.83	1135.6
Y (mm.)	954.3	954.15	0.15
Z (mm.)	1135.6	1135.6	0
R (degree)	119.74	119.89	-0.15
Y (degree)	-2.2638	-2.2662	0.0024
P (degree)	-179.08	-179.04	-0.04

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ... ระเบียบงานด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

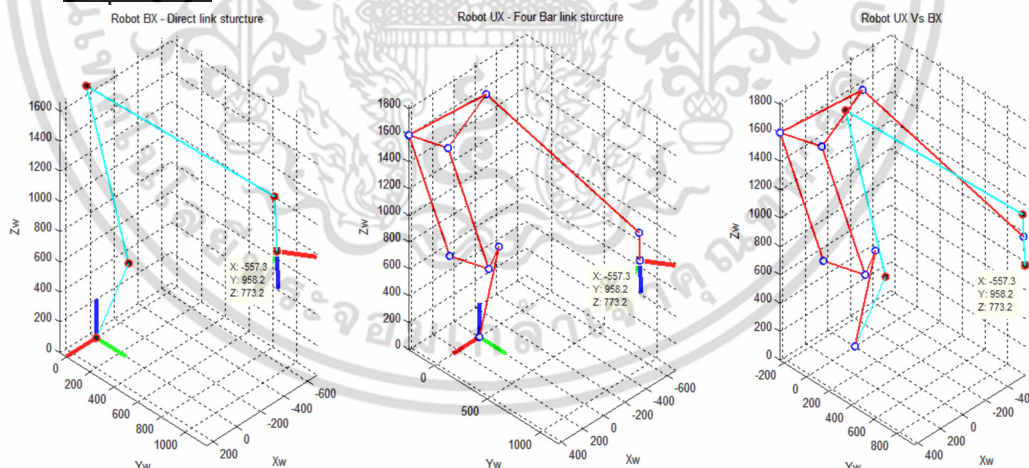
Step No.13



ตารางที่ 4.24 ตำแหน่ง TCP โปรแกรม PG 3 สเต็ปที่ 13 ระหว่างแขนกลรุ่น BX100L และ UX150

PG-3 Step no.13			
TCP	BX100L	UX156	Error
X (mm.)	-560.43	-560.78	0.35
Y (mm.)	959.42	959.23	0.19
Z (mm.)	929.24	929.25	-0.01
R (degree)	119.23	119.35	-0.12
Y (degree)	-2.7344	-2.7369	0.0025
P (degree)	-178.78	-178.72	-0.06

Step No.14

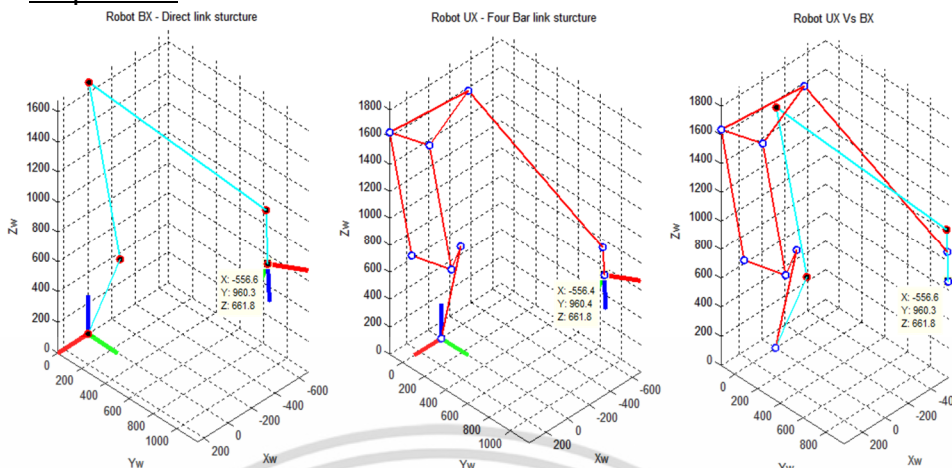


ตารางที่ 4.25 ตำแหน่ง TCP โปรแกรม PG 3 สเต็ปที่ 14 ระหว่างแขนกลรุ่น BX100L และ UX150

PG-3 Step no.14			
TCP	BX100L	UX157	Error
X (mm.)	-557.25	-557.31	0.06
Y (mm.)	958.23	958.19	0.04
Z (mm.)	773.21	773.21	0
R (degree)	119.42	119.44	-0.02
Y (degree)	-1.8944	-1.8946	0.0002
P (degree)	-179.28	-179.27	-0.01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ... ระเบียบข้อบังคับในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

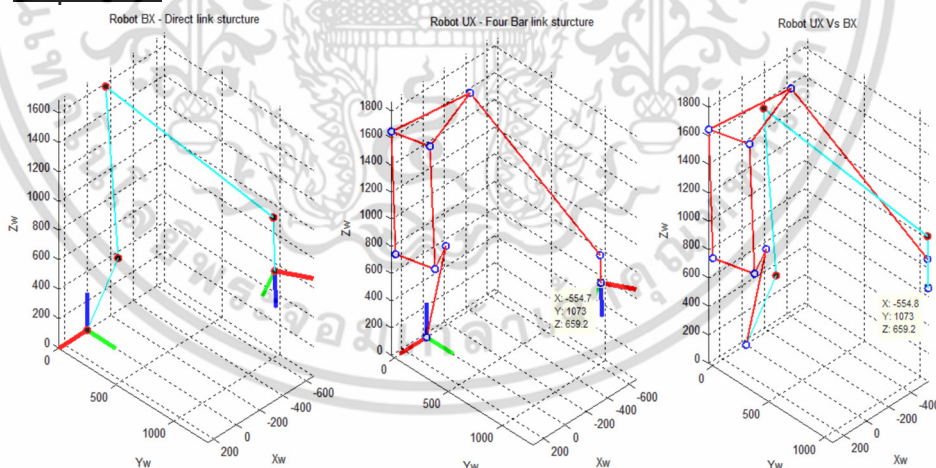
Step No.15



ตารางที่ 4.26 ตำแหน่ง TCP โปรแกรม PG 3 สเต็ปที่ 15 ระหว่างแขนกลรุ่น BX100L และ UX150

PG-3 Step no.15			
TCP	BX100L	UX158	Error
X (mm.)	-556.56	-556.44	-0.12
Y (mm.)	960.29	960.35	-0.06
Z (mm.)	661.82	661.82	0
R (degree)	119.33	119.31	0.02
Y (degree)	-1.6838	-1.6836	-0.0002
P (degree)	-179.37	-179.4	0.03

Step No.16

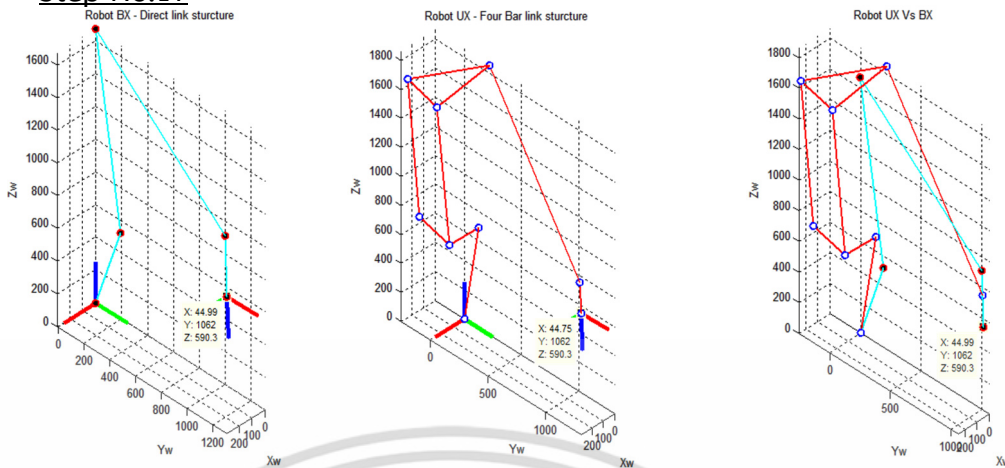


ตารางที่ 4.27 ตำแหน่ง TCP โปรแกรม PG 3 สเต็ปที่ 16 ระหว่างแขนกลรุ่น BX100L และ UX150

PG-3 Step no.16			
TCP	BX100L	UX159	Error
X (mm.)	-554.75	-554.68	-0.07
Y (mm.)	1073.1	1073.1	0
Z (mm.)	659.2	659.2	0
R (degree)	116.96	116.95	0.01
Y (degree)	-1.3217	-1.3216	-1E-04
P (degree)	-179.69	-179.7	0.01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ... ระเบียบข้อบังคับในการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

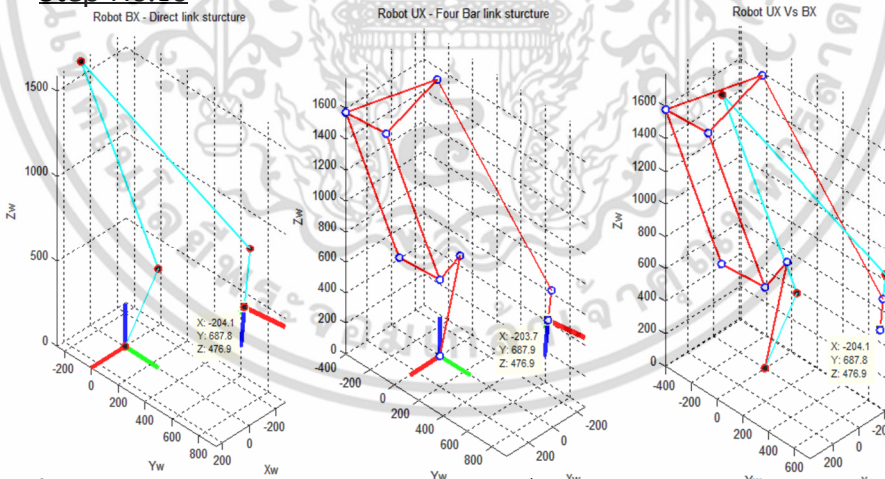
Step No.17



ตารางที่ 4.28 ตำแหน่ง TCP โปรแกรม PG 3 สเต็ปที่ 17 ระหว่างแขนกลรุ่น BX100L และ UX150

PG-3 Step no.17			
TCP	BX100L	UX160	Error
X (mm.)	44.988	44.749	0.239
Y (mm.)	1061.7	1061.8	-0.1
Z (mm.)	590.3	590.3	0
R (degree)	88.248	88.282	-0.034
Y (degree)	-2.9852	-2.985	-0.0002
P (degree)	179.51	179.54	-0.03

Step No.18

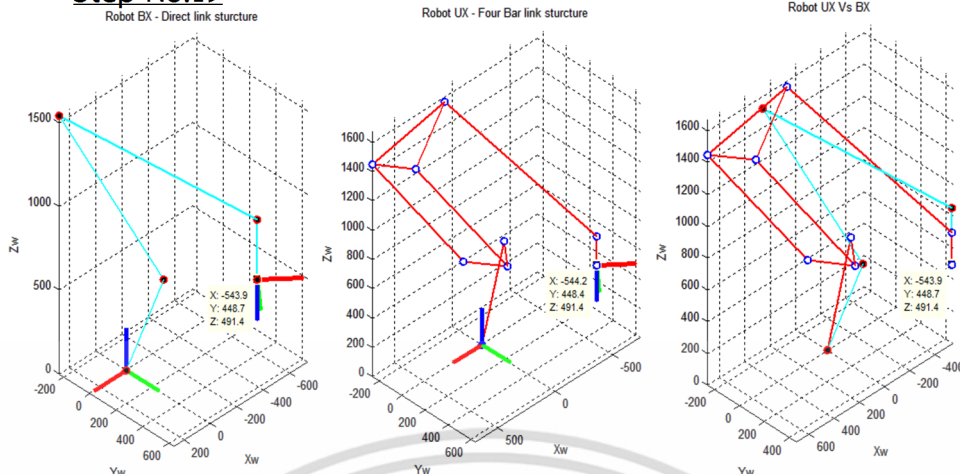


ตารางที่ 4.29 ตำแหน่ง TCP โปรแกรม PG 3 สเต็ปที่ 18 ระหว่างแขนกลรุ่น BX100L และ UX150

PG-3 Step no.18			
TCP	BX100L	UX161	Error
X (mm.)	-204.1	-203.65	-0.45
Y (mm.)	687.78	687.9	-0.12
Z (mm.)	476.86	476.85	0.01
R (degree)	104.91	104.83	0.08
Y (degree)	6.0671	6.0686	-0.0015
P (degree)	-178.93	-179.01	0.08

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ... ระเบียบงานด้านการค้า
 ไม่ว่าการณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

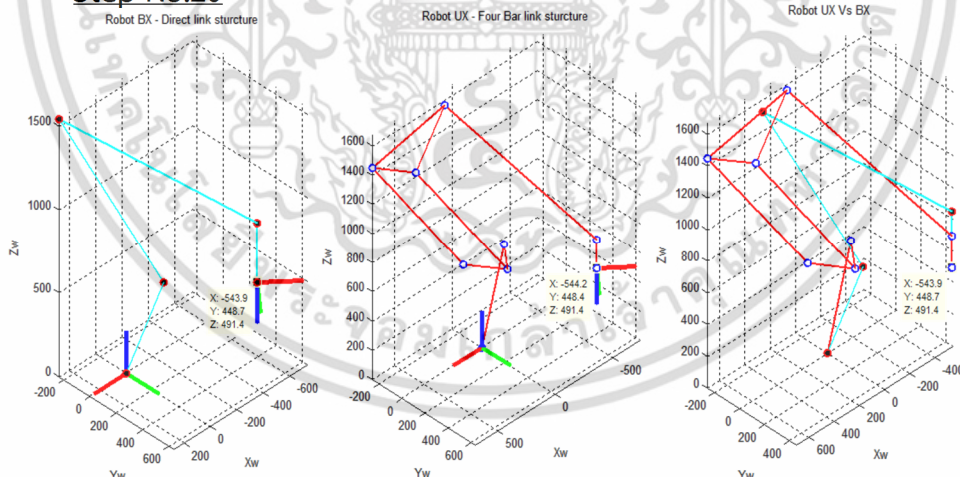
Step No.19



ตารางที่ 4.30 ตำแหน่ง TCP โปรแกรม PG 3 สเต็ปที่ 19 ระหว่างแขนกลรุ่น BX100L และ UX150

PG-3 Step no.19			
TCP	BX100L	UX162	Error
X (mm.)	-543.93	-544.18	0.25
Y (mm.)	448.66	448.37	0.29
Z (mm.)	491.42	491.42	0
R (degree)	139.11	139.18	-0.07
Y (degree)	-0.050286	-0.051374	0.001088
P (degree)	-179.06	-179	-0.06

Step No.20

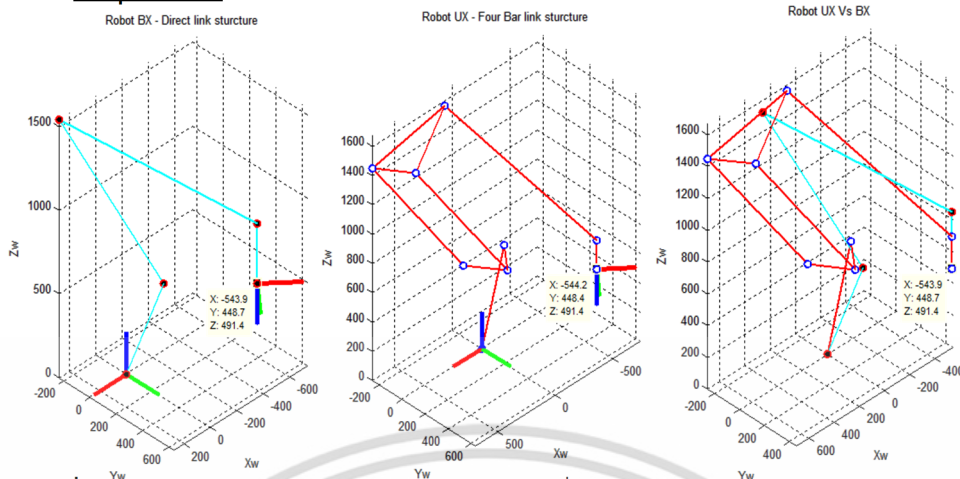


ตารางที่ 4.31 ตำแหน่ง TCP โปรแกรม PG 3 สเต็ปที่ 20 ระหว่างแขนกลรุ่น BX100L และ UX150

PG-3 Step no.20			
TCP	BX100L	UX151	Error
X (mm.)	-543.93	-544.18	0.25
Y (mm.)	448.66	448.37	0.29
Z (mm.)	491.42	491.42	0
R (degree)	139.11	139.18	-0.07
Y (degree)	-0.050286	-0.051374	0.001088
P (degree)	-179.06	-179	-0.06

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Step No.21



ตารางที่ 4.32 ตำแหน่ง TCP โปรแกรม PG 3 สเต็ปที่ 21 ระหว่างแขนกลุ่ม BX100L และ UX150

PG-3 Step no.21			
TCP	BX100L	UX152	Error
X (mm.)	-543.93	-544.18	0.25
Y (mm.)	448.66	448.37	0.29
Z (mm.)	491.42	491.42	0
R (degree)	139.11	139.18	-0.07
Y (degree)	-0.050286	-0.051374	0.001088
P (degree)	-179.06	-179	-0.06

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากข้อมูลข้างบน สามารถสรุปตำแหน่ง TCP ของแขนกลทั้งสองรุ่นในระนาบสามมิติได้ ดังตารางที่ 4.33 และ 4.34

ตารางที่ 4.33 แสดงตำแหน่งพิกัด TCP โปรแกรม PG3 ของ UX150 บนระนาบสามมิติ

Step No.	UX-150 TCP Location - PG_3					
	Location (mm.)			Orientation (Degrees)		
	X	Y	Z	R	P	Y
1	-209.34	1056.5	386.87	98.667	-0.2568	-179.03
2	-383.47	1820.2	386.86	100.65	0.047628	-179
3	286.7	1915.9	403.98	78.672	-0.4587	-177.55
4	296.82	1914.6	753.23	80.425	-0.30179	-179.05
5	289.12	1907.3	951	79.988	-1.1632	-177.85
6	-426.4	1812.1	950.47	101.52	-0.24006	-177.4
7	-426.88	1811.1	1189.1	102.2	-1.0444	-177.76
8	-304.51	899.43	1242.2	107.91	0.30978	-176.72
9	-354.2	1000.4	1276.2	109.56	-2.8669	179.81
10	-510.57	1358	1385.4	110.69	-2.7791	179.76
11	-526.88	1279.6	1149.3	111.96	-2.5603	-179.28
12	-558.83	954.15	1135.6	119.89	-2.2662	-179.04
13	-560.78	959.23	929.25	119.35	-2.7369	-178.72
14	-557.31	958.19	773.21	119.44	-1.8946	-179.27
15	-556.44	960.35	661.82	119.31	-1.6836	-179.4
16	-554.68	1073.1	659.2	116.95	-1.3216	-179.7
17	44.749	1061.8	590.3	88.282	-2.985	179.54
18	-203.65	687.9	476.85	104.83	6.0686	-179.01
19	-544.18	448.37	491.42	139.18	-0.051374	-179
20	-544.18	448.37	491.42	139.18	-0.051374	-179
21	-544.18	448.37	491.42	139.18	-0.051374	-179

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.34 แสดงตำแหน่งพิกัด TCP โปรแกรม PG3 ของ BX100L บนระนาบสามมิติ

Step No.	BX100L TCP Location - PG_3					
	Location (mm.)			Orientation (Degrees)		
	X	Y	Z	R	P	Y
1	-211.19	1056.2	386.91	98.849	-0.26034	-178.74
2	-383.46	1820.2	386.86	100.65	0.047651	-179
3	286.83	1915.9	403.98	78.651	-0.45781	-177.57
4	296.78	1914.6	753.23	80.436	-0.30198	-179.04
5	289.02	1907.3	951	80.024	-1.1645	-177.83
6	-426.51	1812.1	950.48	101.56	-0.24189	-177.38
7	-426.94	1811.1	1189.1	102.24	-1.0459	-177.75
8	-303.69	899.68	1242.2	106.99	0.36123	-176.86
9	-354.25	1000.4	1276.2	109.6	-2.8667	179.81
10	-510.59	1358	1385.4	110.71	-2.779	179.76
11	-526.8	1279.7	1149.3	111.93	-2.5599	-179.29
12	-558.55	954.3	1135.6	119.74	-2.2638	-179.08
13	-560.43	959.42	929.24	119.23	-2.7344	-178.78
14	-557.25	958.23	773.21	119.42	-1.8944	-179.28
15	-556.56	960.29	661.82	119.33	-1.6838	-179.37
16	-554.75	1073.1	659.2	116.96	-1.3217	-179.69
17	44.988	1061.7	590.3	88.248	-2.9852	179.51
18	-204.1	687.78	476.86	104.91	6.0671	-178.93
19	-543.93	448.66	491.42	139.11	-0.050286	-179.06
20	-543.93	448.66	491.42	139.11	-0.050286	-179.06
21	-543.93	448.66	491.42	139.11	-0.050286	-179.06

จากข้อมูลทั้งหมดดังที่ แสดงให้เห็นว่าตำแหน่ง TCP ของ BX100L มีค่าใกล้เคียงกันกับของ UX150 ดังนั้น ค่าองศาข้อต่อของ BX100L ที่ได้จากการคำนวณนี้สามารถนำไปทดลองใช้งานได้จริง

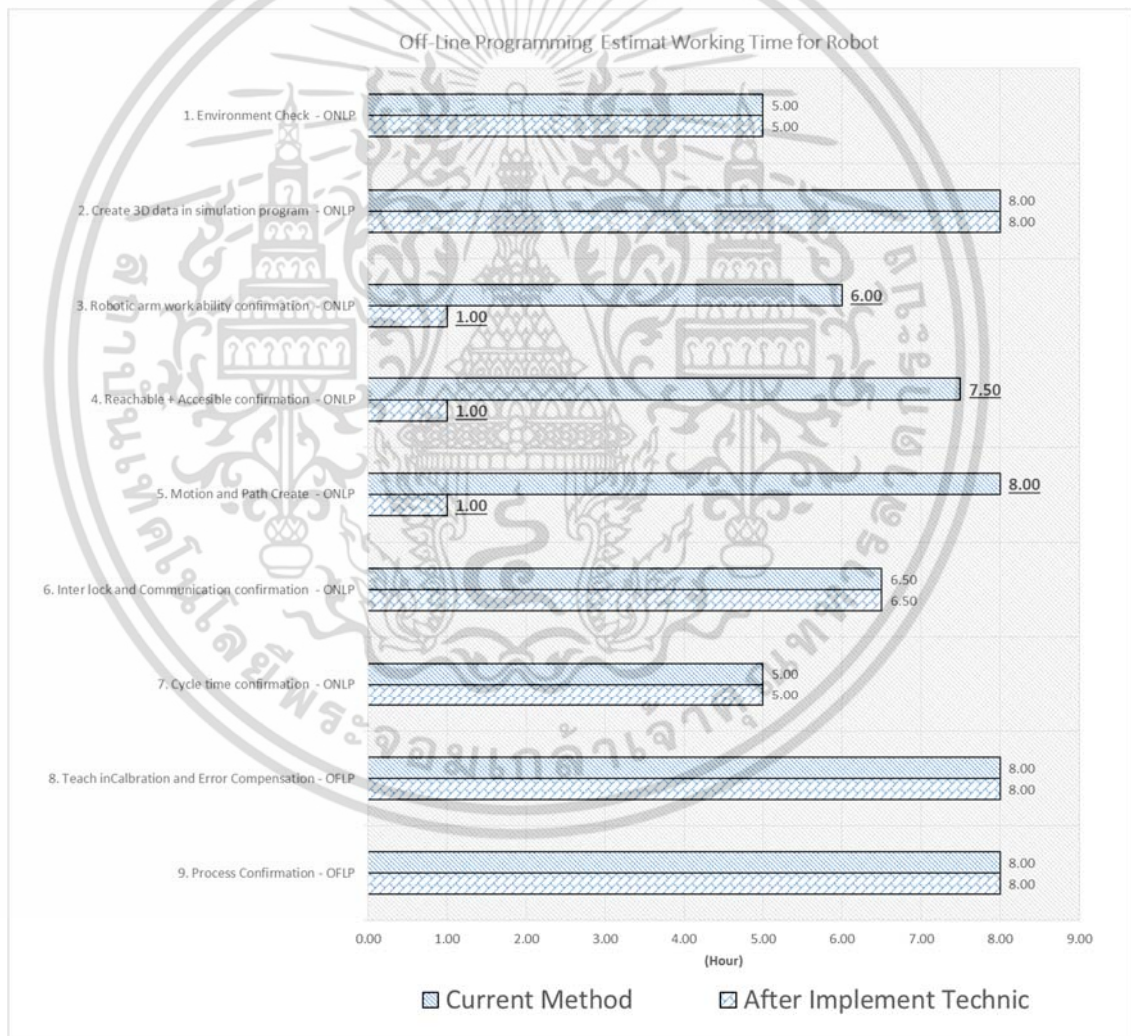
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และ ข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

ค่าองศาข้อต่อของแขนกลรุ่น BX100L ที่คำนวณได้ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้ถูกนำไปประยุกต์ทดลองใช้งานกับแขนกลที่ถูกติดตั้งหน้างาน ซึ่งจากการทดลองใช้งาน และ ปฏิบัติตามเทคนิคนี้ ส่งผลให้ ทางผู้ปฏิบัติงานสามารถ ลดชั่วโมงการทำงานลงในส่วนของ OFLP ลงได้อย่างมาก ซึ่งสามารถประเมินเวลาที่ใช้งานได้โดย ตามรูปที่ 5.1 ดังต่อไปนี้



รูปที่ 5.1 ผลเปรียบเทียบ เวลาที่ต้องใช้ในการทำ OFLP ก่อน และ หลัง จากประยุกต์ใช้งานเทคนิคในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟที่แสดงในรูปที่ 5.1 เปรียบเทียบให้เห็นถึงชั่วโมงการทำงานที่ต้องใช้ในการทำโปรแกรมหุ่นยนต์แขนกลหนึ่งตัว ก่อน และ หลัง ทดลองใช้เทคนิคที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะเห็นได้ว่า ในขั้นตอนที่ 3,4 และ 5 ที่เป็นขั้นตอนกระบวนการเช็ค และ ทำโปรแกรมสำหรับ การเคลื่อนที่ของแขนกลรุ่นใหม่ ลดลงอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจาก ผู้ปฏิบัติงานสามารถเช็คได้โดยการใช้ค่าองศาข้อต่อของแขนกลรุ่นใหม่ที่ได้จากการคำนวณในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทันที

ถึงแม้ว่าตำแหน่ง TCP ของแขนกล BX100L ที่ได้จากการคำนวณตามเทคนิค จะมีค่าเบี่ยงเบนจากตำแหน่งดั้งเดิมของ UX150 เล็กน้อย แต่สามารถแก้ไขได้ด้วยกระบวนการ ONLP ซึ่งเป็นกระบวนการสุดท้ายหลังการติดตั้งแขนกล ที่ต้องทำการชดเชยค่าผิดพลาดจากการติดตั้ง และ ผลิตตัวหุ่นยนต์แขนกลทุกครั้ง เพื่อยืนยันคุณภาพการผลิต

ดังนั้นด้วยเทคนิคที่ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอ จึงสามารถลด ค่าใช้จ่าย และ ชั่วโมงการทำงานที่เกิดขึ้นจากการทำ OFLP ลงได้ตามวัตถุประสงค์ที่วางไว้

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากแขนกลที่ใช้งานอยู่ในอุตสาหกรรมนี้ มีขนาด และ โครงสร้างที่แตกต่างกัน ตามผู้ผลิต เราสามารถนำเทคนิคที่นำเสนอในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ไปประยุกต์ใช้ และ เผยแพร่แก่ผู้ใช้งานภาคอุตสาหกรรมรายย่อย ที่มีการมีใช้งานแขนกลอยู่ เพื่อลดภาระ และ ค่าใช้จ่ายที่จะเกิดขึ้นจากการทำ OFLP ได้
2. โปรแกรมในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ถูกเขียนขึ้นมาเพื่อรับค่าองศาข้อต่อของแขนกลรุ่นเก่า เพียงทีละ หนึ่งตำแหน่ง ซึ่งสามารถพัฒนาต่อยอดให้สามารถอ่าน ข้อมูลจากโปรแกรมของแขนกลได้โดยตรงเพื่อให้ใช้งาน และ ทำงานได้เร็วขึ้น

บรรณานุกรม

- [1] The IFR Statistical Department
http://www.worldrobotics.org/uploads/media/Executive_Summary__WR_2015.pdf
- [2] Saeed B. Niku, "Introduction to Robotics Analysis, Systems, Application" ISBN: 0-13-061309-6
- [3] John J. Craig "Introduction to Robotics Mechanics and Control" ISBN: 0-13-123629-6
- [4] S.G. Lee, M. Ziegler "A geometric approach in solving the inverse kinematic of puma robots" Department of Electrical and Computer Engineering The University of Michigan Ann Arbor, Michigan 48109-1109
- [5] Amos Gilat "Matlab An introduction with applications" Department of Mechanical Engineering The Ohio State University
 ISBN: 0-471-43997-5
- [6] Serdar Kucuk, Zafer Bingul "Robot Kinematics : Forward and Inverse Kinematics"
- [7] Mahidzal Dahari1, Jian-Ding Tan2
 "Forward and Inverse Kinematics Model for Robotic Welding Process Using KR-16KS KUKA Robot" 1,2Centre of Product Design and Manufacture (CPDM), Faculty of Engineering, University of Malaya, 978-1-4577-0005-7 ©2011 IEEE
- [8] J.W. Jeong, I.S. Kim*, R.R. Chand, J.H. Lee
 "A study on simulation model and kinematic model of welding robot"
 Department of Mechanical Engineering, Mokpo National University,
- [9] Rohit Sharma1, Parveen Kalra2and Ajay Gupta
 "Simulation of Robotized Mig Welding Using Robotstudio"
 31, 3 Department of Industrial and Production Engineering, Dr B R Ambedkar National Institute of Technology, Jalandhar– 144011, India
- [10] K. Kishore Kumar, Dr. A. Srinath, G. Jugalanvesh, R.Premasai, M.suresh
 "Kinematic Analysis andSimulation of 6Dof KukaKr5 Robot For Welding Application."
 International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)
 ISSN: 2248-9622 www.ijera.com Vol. 3, Issue 2, March -April 2013, pp.820-827
- [11] <http://www.purplemath.com/modules/idents.htm>
- [12] http://en.wikipedia.org/wiki/Matrix_multiplication

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [13] http://www.kuka-robotics.com/NR/rdonlyres/FC50D7A6-FD04-460D-8DCD-347C9EE0F979/0/Ideenkatalog_en.pdf
- [14] <https://en.wikipedia.org/wiki/File:Classic-DHparameters.png>
- [15] Jettiya Sripitak, Teerawat Thepmanee, Sawai Pongswatd, and Prapart Ukakimapurn
 “A Simple Technique to Modeling and Simulation Four-Axe Robot-Arm Control”
 Control, Automation and Systems, 2007. ICCAS '07.
 International Conference on 17-20 Oct. 2007
 ISSN : 978-89-950038-6-2 Page(s) : 2180-2185



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรม Matlab

1.1 โปรแกรม Simulation_UX_vs_BX_Joint_Input.m

```

clear all;

TCP = [0,0,0,0,0,0];

startdata = input('Do you want to continue[Y/N] = ','s');
if startdata == 'y'
    while startdata == 'y'
        indata = input('Loading 5 Joint Value of Four bar link
Robot = ','s');
        MV_J_UX = str2num(indata);
        [tu1,tu2,tu3,tu4,tu5,TCP,f1,f2,f3,f4] =
fforkine_fourbarlink(MV_J_UX);
        [JMV1,JMV2] = finvkine_Directlink(TCP)
        [tb1,tb2,tb3,tb4,tb5,BX_J] = fforkine_Directlink(JMV1);
        [position_bx] = fposition(tb1,tb2,tb3,tb4,tb5)
        [position_ux] = fposition(tu1,tu2,tu3,tu4,tu5)
        format short g;
        diff(1,1:6) = position_bx(1:6,5)-position_ux(1:6,5)
        MV_J_UX
        BX_J
        UX_P_V(1,1:6) = position_ux(1:6,5)
        BX_P_V(1,1:6) = position_bx(1:6,5)
        clf;figure(1);

fplotjoint_fbl(tb1,tb2,tb3,tb4,tb5,tu1,tu2,tu3,tu4,tu5,f1,f2,f3,f4)
    end
else
end;
disp('Good By END Of Program ');

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 โปรแกรม fforkine_fourbarlink.m

```

%% Program forward kinematics
function [tu1,tu2,tu3,tu4,tu5,TCP,F1,F2,F3,F4] =
fforkine_fourbarlink(MV_JC)

X1 = 0;
X2 = 0;
DH_Pa_FBL = [
    90,          700,          135,          -90;          % - 1A
    0,           -250,          0,           0;           % - 2A-Trans Mat
    0,           250,          X1,           0;           % - 3A-Trans Mat
    -90,         0,           X2,          180;          % - 3B
    90,          0,           0,           90;           % - 4A
    0,          1350,          0,          -90;          % - 5A
    -90,         0,           205,          0;           % - 6A
    90,          0,           0,           90           ]; % - 6B-

Rotation Mat
%   Seta-Rot Z,   D-Trans Z,   A-Trans X,   Alpha-Rot X

MV_J(1:5,1)=MV_JC(1,1:5);

% Seta
SE1 = degtorad(DH_Pa_FBL(1,1));
SE2 = degtorad(DH_Pa_FBL(2,1));
SE3A = degtorad(DH_Pa_FBL(3,1));
SE3B = degtorad(DH_Pa_FBL(4,1));
SE4 = degtorad(DH_Pa_FBL(5,1));
SE5A = degtorad(DH_Pa_FBL(6,1));
SE6A = degtorad(DH_Pa_FBL(7,1));
SE6B = degtorad(DH_Pa_FBL(8,1));

% Joint Moving Value
J1 = degtorad(DH_Pa_FBL(1,1)+MV_J(1,1));
J2 = degtorad(DH_Pa_FBL(2,1)+0);
J3A = degtorad(DH_Pa_FBL(3,1)+MV_J(2,1));
J3B = degtorad(DH_Pa_FBL(4,1)+MV_J(2,1));
J4 = degtorad(DH_Pa_FBL(5,1)+MV_J(3,1)); % Need to addition
MV_J(2,1) to Equation Due to Four Bar line Machinism.
J5A = degtorad(DH_Pa_FBL(6,1)+MV_J(4,1));
J6A = degtorad(DH_Pa_FBL(7,1)+MV_J(5,1));
J6B = degtorad(DH_Pa_FBL(8,1));
J3A2 = degtorad(DH_Pa_FBL(3,1)+MV_J(2,1)-90);
% Joint Alpha Value
AL1 = degtorad(DH_Pa_FBL(1,4));
AL2 = degtorad(DH_Pa_FBL(2,4));
AL3A = degtorad(DH_Pa_FBL(3,4));
AL3B = degtorad(DH_Pa_FBL(4,4));
AL4 = degtorad(DH_Pa_FBL(5,4));
AL5A = degtorad(DH_Pa_FBL(6,4));
AL6A = degtorad(DH_Pa_FBL(7,4));
AL6B = degtorad(DH_Pa_FBL(8,4));

% Pre-Calculation for Robot Length Trans-X
X1 =900*sin(J3A)+200;
X2 =900*cos(J3A)+270;

```

เอกสารนี้ใช้ Robot Length Trans-X ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

A1 = DH_Pa_FBL(1,3);
A2 = DH_Pa_FBL(2,3);
A3A = X1;
A3B = X2;
A4 = DH_Pa_FBL(5,3);
A5A = DH_Pa_FBL(6,3);
A6A = DH_Pa_FBL(7,3);
A6B = DH_Pa_FBL(8,3);

% Robot Length Trans-Z
D1 = DH_Pa_FBL(1,2);
D2 = DH_Pa_FBL(2,2);
D3A = DH_Pa_FBL(3,2);
D3B = DH_Pa_FBL(4,2);
D4 = DH_Pa_FBL(5,2);
D5A = DH_Pa_FBL(6,2);
D6A = DH_Pa_FBL(7,2);
D6B = DH_Pa_FBL(8,2);

T1 = [
cos(J1)   -sin(J1)*cos(AL1)  sin(J1)*sin(AL1)  A1*cos(J1)
sin(J1)   cos(J1)*cos(AL1)  -cos(J1)*sin(AL1) A1*sin(J1)
0         sin(AL1)           cos(AL1)          D1
0         0                 0                1];

T2 = [
cos(SE2)  -sin(SE2)*cos(AL2)  sin(SE2)*sin(AL2)  A2*cos(SE2);
sin(SE2)  cos(SE2)*cos(AL2)  -cos(SE2)*sin(AL2) A2*sin(SE2);
0         sin(SE2)           cos(AL2)           D2;
0         0                 0                1];

T3A = [
cos(SE3A)  -sin(SE3A)*cos(AL3A)  sin(SE3A)*sin(AL3A)
A3A*cos(SE3A);
sin(SE3A)  cos(SE3A)*cos(AL3A)  -cos(SE3A)*sin(AL3A)
A3A*sin(SE3A);
0         sin(AL3A)           cos(AL3A)           D3A;
0         0                 0                1];

% FOUR BAR LINK CO-ORDINATE FINDING
T12 = [
cos(J1)   -sin(J1)*cos(AL1)  sin(J1)*sin(AL1)  -A1*cos(J1)
sin(J1)   cos(J1)*cos(AL1)  -cos(J1)*sin(AL1) -A1*sin(J1)
0         sin(AL1)           cos(AL1)          750
0         0                 0                1];

T31 = [
cos(J3B)  -sin(J3B)*cos(AL3B)  sin(J3B)*sin(AL3B)
900*cos(J3A2);
sin(J3B)  cos(J3B)*cos(AL3B)  -cos(J3B)*sin(AL3B)
900*sin(J3A2);
0         sin(AL3B)           cos(AL3B)          0;
0         0                 0                1];

F1=T1*T2;
F2=T12*T2;
F3=T1*T2*T31;
F4=T12*T2*T31;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

T3B = [
    cos(J3B)   -sin(J3B)*cos(AL3B)   sin(J3B)*sin(AL3B)
A3B*cos(SE3B);
    sin(J3B)   cos(J3B)*cos(AL3B)   -cos(J3B)*sin(AL3B)
A3B*sin(SE3B);
    0           sin(AL3B)             cos(AL3B)             D3B;
    0           0                     0                     1];

T4 = [
    cos(J4)   -sin(J4)*cos(AL4)   sin(J4)*sin(AL4)   A4*cos(J4);
    sin(J4)   cos(J4)*cos(AL4)   -cos(J4)*sin(AL4)  A4*sin(J4);
    0         sin(AL4)            cos(AL4)            D4;
    0         0                   0                   1];

T5A = [
    cos(J5A)   -sin(J5A)*cos(AL5A)   sin(J5A)*sin(AL5A)
A5A*cos(J5A);
    sin(J5A)   cos(J5A)*cos(AL5A)   -cos(J5A)*sin(AL5A)
A5A*sin(J5A);
    0         sin(AL5A)             cos(AL5A)             D5A;
    0         0                     0                     1];

T6A = [
    cos(J6A)   -sin(J6A)*cos(AL6A)   sin(J6A)*sin(AL6A)
A6A*cos(J6A);
    sin(J6A)   cos(J6A)*cos(AL6A)   -cos(J6A)*sin(AL6A)
A6A*sin(J6A);
    0         sin(AL6A)             cos(AL6A)             D6A;
    0         0                     0                     1];

T6B = [
    cos(J6B)   -sin(J6B)*cos(AL6B)   sin(J6B)*sin(AL6B)
A6B*cos(J6B);
    sin(J6B)   cos(J6B)*cos(AL6B)   -cos(J6B)*sin(AL6B)
A6B*sin(J6B);
    0         sin(AL6B)             cos(AL6B)             D6B;
    0         0                     0                     1];

TRx = degtorad(180);
TRz = degtorad(0);
T2A1_Temp = [
    cos(TRz)   -sin(TRz)*cos(TRx)   sin(TRz)*sin(TRx)
A6B*cos(TRx);
    sin(TRz)   cos(TRz)*cos(TRx)   -cos(TRz)*sin(TRx)
A6B*sin(TRx);
    0         sin(TRz)             cos(TRx)             D6B;
    0         0                     0                     1];

tu1=T1;
tu2=T1*T2;
tu3(1:4,1:4)=0;
position_temp = T1*T2*T3A*T3B;
rotation_temp = tu2*T2A1_Temp;
tu3(1:4,4) = position_temp(1:4,4);
tu3(1:3,1:3) = rotation_temp(1:3,1:3);
tu4=tu3*T4*T5A;
tu5=tu4*T6A*T6B;

```

```
[position] = fposition(tu1,tu2,tu3,tu4,tu5);
```

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินทางปัญญาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 โปรแกรม finvkin_Directlink.m

```

%% Program forward kinematics
function [JMV1,JMV2] = finvkin_Directlink(TCP)

DH_Pa = [
    90,    530,    200,    -90;    % - 1
    -90,    0,    1160,    180;    % - 2
    0,    0,    230,    90;    % - 3A
    0,    1250,    0,    0;    % - 3B
    0,    0,    0,    -90;    % - 4
    -90,    0,    363,    0;    % - 5A
    90,    0,    0,    90; ];    % - 5B
%   Seta-Rot Z,   D-Trans Z,   A-Trans X,   Alpha-Rot X

% Joint Seta Value
SE1 = degtorad(DH_Pa(1,1));
SE2 = degtorad(DH_Pa(2,1));
SE3A = degtorad(DH_Pa(3,1));
SE3B = degtorad(DH_Pa(4,1));
SE4 = degtorad(DH_Pa(5,1));
SE5A = degtorad(DH_Pa(6,1));
SE5B = degtorad(DH_Pa(7,1));

% Joint Alpha Value
AL1 = degtorad(DH_Pa(1,4));
AL2 = degtorad(DH_Pa(2,4));
AL3A = degtorad(DH_Pa(3,4));
AL3B = degtorad(DH_Pa(4,4));
AL4 = degtorad(DH_Pa(5,4));
AL5A = degtorad(DH_Pa(6,4));
AL5B = degtorad(DH_Pa(7,4));

% Robot Length Trans-X
A1 = DH_Pa(1,3);
A2 = DH_Pa(2,3);
A3A = DH_Pa(3,3);
A3B = DH_Pa(4,3);
A4 = DH_Pa(5,3);
A5A = DH_Pa(6,3);
A5B = DH_Pa(7,3);

% Robot Length Trans-Z
D1 = DH_Pa(1,2);
D2 = DH_Pa(2,2);
D3A = DH_Pa(3,2);
D3B = DH_Pa(4,2);
D4 = DH_Pa(5,2);
D5A = DH_Pa(6,2);
D5B = DH_Pa(7,2);

px=TCP(1,1);
py=TCP(1,2);
pz=TCP(1,3);
R=degtorad(TCP(1,4));
P=degtorad(TCP(1,5));
Y=degtorad(TCP(1,6));

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

MTCP = [
    cos(R)*cos(P)    cos(R)*sin(P)*sin(Y)-sin(R)*cos(Y)
    cos(R)*sin(P)*cos(Y)+sin(R)*sin(Y)    px
    sin(R)*cos(P)    sin(R)*sin(P)*sin(Y)+cos(R)*cos(Y)
    sin(R)*sin(P)*cos(Y)-cos(R)*sin(Y)    py
    -sin(P)          cos(P)*sin(Y)
    cos(P)*cos(Y)          pz
    0                  0                  0
1 ];

```

```

MTCP2 = [
    1  0  0  0
    0  1  0  0
    0  0  1  -A5A
    0  0  0  1 ];

```

```
M_B = MTCP*MTCP2;
```

```

px2 = M_B(1,4);
py2 = M_B(2,4);
pz2 = M_B(3,4);
nx = MTCP(1,1);
ny = MTCP(2,1);
nz = MTCP(3,1);
ox = MTCP(1,2);
oy = MTCP(2,2);
oz = MTCP(3,2);
ax = MTCP(1,3);
ay = MTCP(2,3);
az = MTCP(3,3);

```

```

% Inverse Kinematic Calculation for Joint 1
j1 = radtodeg(atan2(-(A5A*ay-py),(px-A5A*ax)));
s1 = sin(degtorad(j1));
c1 = cos(degtorad(j1));

```

```

% Inverse Kinematic Calculation for Joint 2
z=-pz2+D1;
k=c1*px2+s1*py2-A1;
y=((D3B^2)+(A3A^2)-(k^2)-(z^2)-(A2^2))/(-2*A2);
j2r1 = -sqrt((k^2)+(z^2)-(y^2));
j2r2 = +sqrt((k^2)+(z^2)-(y^2));
radtodeg(atan2(k,-z));
radtodeg(atan2(y,j2r1));
radtodeg(atan2(y,j2r2));

```

```

%Joint 2 - ANS1
j2a1 = radtodeg(atan2(k,-z)-atan2(y,j2r1));
s2a1 = sin(degtorad(j2a1));
c2a1 = cos(degtorad(j2a1));

```

```

%Joint 2 - ANS2
j2a2 = radtodeg(atan2(k,-z)-atan2(y,j2r2));
s2a2 = sin(degtorad(j2a2));
c2a2 = cos(degtorad(j2a2));

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

% Inverse Kinematic Calculation forJoint 3

%Joint 3 - ANS1
a1=(c1*c2a1*px2)+(s1*c2a1*py2)-(c2a1*A1)-(s2a1*pz2)+(s2a1*D1)-A2;
b1=(c1*s2a1*px2)+(s1*s2a1*py2)-(s2a1*A1)+(c2a1*pz2)-(c2a1*D1);
j3a1 = radtodeg(atan2((a1*D3B+b1*A3A),(a1*A3A-b1*D3B)));
s3a1 = sin(degtorad(j3a1));
c3a1 = cos(degtorad(j3a1));

% Joint 3 - ANS2
a2=(c1*c2a2*px2)+(s1*c2a2*py2)-(c2a2*A1)-(s2a2*pz2)+(s2a2*D1)-A2;
b2=(c1*s2a2*px2)+(s1*s2a2*py2)-(s2a2*A1)+(c2a2*pz2)-(c2a2*D1);
j3a2 = radtodeg(atan2((a2*D3B+b2*A3A),(a2*A3A-b2*D3B)));
s3a2 = sin(degtorad(j3a2));
c3a2 = cos(degtorad(j3a2));

% Inverse Kinematic Calculation for Joint 4

%Joint 4 - ANS1
s4a1 = (c3a1*(c1*c2a1*ox+s1*c2a1*oy-
s2a1*oz))+(s3a1*(c1*s2a1*ox+s1*s2a1*oy+c2a1*oz));
c4 = s1*ox-c1*oy;
j4a1 = radtodeg(atan2(-s4a1,c4));

%Joint 4 - ANS2
s4a2 = (c3a2*(c1*c2a2*ox+s1*c2a2*oy-
s2a2*oz))+(s3a2*(c1*s2a2*ox+s1*s2a2*oy+c2a2*oz));
j4a2 = radtodeg(atan2(-s4a2,c4));

% Inverse Kinematic Calculation for Joint 5
%Joint 5 - ANS1
s5a1 = s3a1*(c1*c2a1*ax+s1*c2a1*ay-s2a1*az)-
c3a1*(c1*s2a1*ax+s1*s2a1*ay+c2a1*az);
c5a1 = s3a1*(c1*c2a1*nx+s1*c2a1*ny-s2a1*nz)-
c3a1*(c1*s2a1*nx+s1*s2a1*ny+c2a1*nz);
j5a1 = radtodeg(atan2(-s5a1,-c5a1));

%Joint 5 - ANS2
s5a2 = s3a2*(c1*c2a2*ax+s1*c2a2*ay-s2a2*az)-
c3a2*(c1*s2a2*ax+s1*s2a2*ay+c2a2*az);
c5a2 = s3a2*(c1*c2a2*nx+s1*c2a2*ny-s2a2*nz)-
c3a2*(c1*s2a2*nx+s1*s2a2*ny+c2a2*nz);
j5a2 = radtodeg(atan2(-s5a2,-c5a2));

%Joint Result
JMV1 (1,1) = j1;
JMV1 (2,1) = j2a1;
JMV1 (3,1) = j3a1;
JMV1 (4,1) = j4a1;
JMV1 (5,1) = j5a1;
JMV2 = JMV1;
JMV2 (2,1) = j2a2;
JMV2 (3,1) = j3a2;
JMV2 (4,1) = j4a2;
JMV2 (5,1) = j5a2;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 โปรแกรม fforkine_Directlink.m

```

%% Program forward kinematics
function [t1,t2,t3,t4,t5,PMV] = fforkine_Directlink(MV_J)

DH_Pa = [
    90,    530,    200,    -90;    % - 1
   -90,     0,   1160,    180;    % - 2
    0,     0,    230,     90;    % - 3A
    0,   1250,     0,     0;    % - 3B
    0,     0,     0,   -90;    % - 4
   -90,     0,    363,     0;    % - 5A
    90,     0,     0,     90; ]; % - 5B
% Seta-Rot Z, D-Trans Z, A-Trans X, Alpha-Rot X
%MV_J = [0,0,0,0,0];

% Joint Moving Value
J1 = degtorad(MV_J(1,1));
J2 = degtorad(MV_J(2,1));
J3A = degtorad(MV_J(3,1));
J3B = degtorad(DH_Pa(4,1));
J4 = degtorad(MV_J(4,1));
J5A = degtorad(MV_J(5,1));
J5B = degtorad(DH_Pa(7,1));

% Programe Joint Moving Value
PMV(1,1) = MV_J(1,1)-DH_Pa(1,1);
PMV(1,2) = MV_J(2,1)-DH_Pa(2,1);
PMV(1,3) = MV_J(3,1)-DH_Pa(3,1);
PMV(1,4) = MV_J(4,1)-DH_Pa(5,1);
PMV(1,5) = MV_J(5,1)-DH_Pa(6,1);

% Joint Alpha Value
AL1 = degtorad(DH_Pa(1,4));
AL2 = degtorad(DH_Pa(2,4));
AL3A = degtorad(DH_Pa(3,4));
AL3B = degtorad(DH_Pa(4,4));
AL4 = degtorad(DH_Pa(5,4));
AL5A = degtorad(DH_Pa(6,4));
AL5B = degtorad(DH_Pa(7,4));

% Robot Length Trans-X
A1 = DH_Pa(1,3);
A2 = DH_Pa(2,3);
A3A = DH_Pa(3,3);
A3B = DH_Pa(4,3);
A4 = DH_Pa(5,3);
A5A = DH_Pa(6,3);
A5B = DH_Pa(7,3);

% Robot Length Trans-Z
D1 = DH_Pa(1,2);
D2 = DH_Pa(2,2);
D3A = DH_Pa(3,2);
D3B = DH_Pa(4,2);
D4 = DH_Pa(5,2);
D5A = DH_Pa(6,2);
D5B = DH_Pa(7,2);

```

เอกสารนี้ได้รับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

T1 = [
    cos(J1)   -sin(J1)*cos(AL1)   sin(J1)*sin(AL1)   A1*cos(J1)
    sin(J1)   cos(J1)*cos(AL1)   -cos(J1)*sin(AL1)  A1*sin(J1)
    0         sin(AL1)            cos(AL1)           D1
    0         0                  0                 1];

T2 = [
    cos(J2)   -sin(J2)*cos(AL2)   sin(J2)*sin(AL2)   A2*cos(J2);
    sin(J2)   cos(J2)*cos(AL2)   -cos(J2)*sin(AL2)  A2*sin(J2);
    0         sin(AL2)            cos(AL2)           D2;
    0         0                  0                 1];

T3A = [
    cos(J3A)   -sin(J3A)*cos(AL3A)   sin(J3A)*sin(AL3A)
A3A*cos(J3A);
    sin(J3A)   cos(J3A)*cos(AL3A)   -cos(J3A)*sin(AL3A)
A3A*sin(J3A);
    0         sin(AL3A)            cos(AL3A)           D3A;
    0         0                  0                 1];

T3B = [
    cos(J3B)   -sin(J3B)*cos(AL3B)   sin(J3B)*sin(AL3B)
A3B*cos(J3B);
    sin(J3B)   cos(J3B)*cos(AL3B)   -cos(J3B)*sin(AL3B)
A3B*sin(J3B);
    0         sin(AL3B)            cos(AL3B)           D3B;
    0         0                  0                 1];

T4 = [
    cos(J4)   -sin(J4)*cos(AL4)   sin(J4)*sin(AL4)   A4*cos(J4);
    sin(J4)   cos(J4)*cos(AL4)   -cos(J4)*sin(AL4)  A4*sin(J4);
    0         sin(AL4)            cos(AL4)           D4;
    0         0                  0                 1];

T5A = [
    cos(J5A)   -sin(J5A)*cos(AL5A)   sin(J5A)*sin(AL5A)
A5A*cos(J5A);
    sin(J5A)   cos(J5A)*cos(AL5A)   -cos(J5A)*sin(AL5A)
A5A*sin(J5A);
    0         sin(AL5A)            cos(AL5A)           D5A;
    0         0                  0                 1];

T5B = [
    cos(J5B)   -sin(J5B)*cos(AL5B)   sin(J5B)*sin(AL5B)
A5B*cos(J5B);
    sin(J5B)   cos(J5B)*cos(AL5B)   -cos(J5B)*sin(AL5B)
A5B*sin(J5B);
    0         sin(AL5B)            cos(AL5B)           D5B;
    0         0                  0                 1];

t5=T1*T2*T3A*T3B*T4*T5A*T5B;
t4=T1*T2*T3A*T3B*T4;
t3=T1*T2*T3A*T3B;
t2=T1*T2;
t1=T1;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 โปรแกรม fplotjoint_fbl.m

```

%% function fjoins is plot each joint of arm
function fplotjoint(j1,j2,j3,j4,j5,j6,j7,j8,j9,j10,f1,f2,f3,f4)
% function fplotjoint_fbl(j1,j2,j3,j4,j5)
L1=250;
VX = [1,0,0,L1;0,1,0,0 ;0,0,1,0 ;0,0,0,1];
VY = [1,0,0,0 ;0,1,0,L1;0,0,1,0 ;0,0,0,1];
VZ = [1,0,0,0 ;0,1,0,0 ;0,0,1,L1;0,0,0,1];

%----- Plot Grapn - BX 200L -----%
subplot(2,2,1);
view([45 45 45]);
hold on
title('Robot BX - Direct link sturcture')
% plot join 5
% join 5
c5(1:4,4) = j5(1:4,4);
c5(1:4,1:3) = j5(1:4,1:3);
V1 = c5*VX;
V2 = c5*VY;
V3 = c5*VZ;
plot3([c5(1,4),V1(1,4)],[c5(2,4),V1(2,4)],[c5(3,4),V1(3,4)], '-r','LineWidth', 4)
plot3([c5(1,4),V2(1,4)],[c5(2,4),V2(2,4)],[c5(3,4),V2(3,4)], '-g','LineWidth', 4)
plot3([c5(1,4),V3(1,4)],[c5(2,4),V3(2,4)],[c5(3,4),V3(3,4)], '-b','LineWidth', 4)

%plot join 4
% join 4
c4(1:4,4) = j4(1:4,4);
c4(1:4,1:3) = j4(1:4,1:3);
V1 = c4*VX;
V2 = c4*VY;
V3 = c4*VZ;

%plot join 3
% join 3
c3(1:4,4) = j3(1:4,4);
c3(1:4,1:3) = j3(1:4,1:3);
V1 = c3*VX;
V2 = c3*VY;
V3 = c3*VZ;

%plot join 2
% join 2
c2(1:4,4) = j2(1:4,4);
c2(1:4,1:3) = j2(1:4,1:3);
V1 = c2*VX;
V2 = c2*VY;
V3 = c2*VZ;

% plot join 1
% join 1
c1(1:4,4) = j1(1:4,4);

```

เอกสารนี้ c1(1:4,4) = j1(1:4,4); ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

c1(1:4,1:3) = j1(1:4,1:3);
V1 = c1*VX;
V2 = c1*VY;
V3 = c1*VZ;

% plot Base
% join 0
c0(1:4,4) = 0;
c0(1:4,1:3) = [1,0,0;0,1,0;0,0,1;0,0,0];
V1 = c0*VX;
V2 = c0*VY;
V3 = c0*VZ;
plot3([c0(1,4),V1(1,4)], [c0(2,4),V1(2,4)], [c0(3,4),V1(3,4)], '-r', 'LineWidth', 4)
plot3([c0(1,4),V2(1,4)], [c0(2,4),V2(2,4)], [c0(3,4),V2(3,4)], '-g', 'LineWidth', 4)
plot3([c0(1,4),V3(1,4)], [c0(2,4),V3(2,4)], [c0(3,4),V3(3,4)], '-b', 'LineWidth', 4)

% %plot arm link
plot3([0,c1(1,4)], [0,c1(2,4)], [0,c1(3,4)], 'MarkerFaceColor', [0 0 0], 'MarkerEdgeColor', [1 0 0], ...
      'Marker', 'o', ...
      'LineWidth', 2, ...
      'Color', [0 1 1]);
plot3([c1(1,4),c2(1,4)], [c1(2,4),c2(2,4)], [c1(3,4),c2(3,4)], 'MarkerFaceColor', [0 0 0], 'MarkerEdgeColor', [1 0 0], ...
      'Marker', 'o', ...
      'LineWidth', 2, ...
      'Color', [0 1 1]);
plot3([c2(1,4),c3(1,4)], [c2(2,4),c3(2,4)], [c2(3,4),c3(3,4)], 'MarkerFaceColor', [0 0 0], 'MarkerEdgeColor', [1 0 0], ...
      'Marker', 'o', ...
      'LineWidth', 2, ...
      'Color', [0 1 1]);
plot3([c3(1,4),c4(1,4)], [c3(2,4),c4(2,4)], [c3(3,4),c4(3,4)], 'MarkerFaceColor', [0 0 0], 'MarkerEdgeColor', [1 0 0], ...
      'Marker', 'o', ...
      'LineWidth', 2, ...
      'Color', [0 1 1]);
plot3([c4(1,4),c5(1,4)], [c4(2,4),c5(2,4)], [c4(3,4),c5(3,4)], 'MarkerFaceColor', [0 0 0], 'MarkerEdgeColor', [1 0 0], ...
      'Marker', 'o', ...
      'LineWidth', 2, ...
      'Color', [0 1 1]);

hold off
grid
% axis([-3000 3000 -3000 3000 0 3000]);
axis equal;
xlabel('Xw');ylabel('Yw');zlabel('Zw');
figure(1);

%----- Plot Graph 2 - UX 150 -----
subplot(2,2,2);
view([45 45 45]);
hold on
grid
title('Robot UX - Four Bar link sturcture')
% axis([-3000 3000 -3000 3000 0 3000]);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

% %plot arm link
% plot join 5
% join 5
b5(1:4,4) = j10(1:4,4);
b5(1:4,1:3) = j10(1:4,1:3);
V1 = b5*VX;
V2 = b5*VY;
V3 = b5*VZ;
plot3([b5(1,4),V1(1,4)], [b5(2,4),V1(2,4)], [b5(3,4),V1(3,4)], '-
r', 'LineWidth', 4)
plot3([b5(1,4),V2(1,4)], [b5(2,4),V2(2,4)], [b5(3,4),V2(3,4)], '-
g', 'LineWidth', 4)
plot3([b5(1,4),V3(1,4)], [b5(2,4),V3(2,4)], [b5(3,4),V3(3,4)], '-
b', 'LineWidth', 4)

%plot join 4
% join 4
b4(1:4,4) = j9(1:4,4);
b4(1:4,1:3) = j9(1:4,1:3);
V1 = b4*VX;
V2 = b4*VY;
V3 = b4*VZ;

%plot join 3
% join 3
b3(1:4,4) = j8(1:4,4);
b3(1:4,1:3) = j8(1:4,1:3);
V1 = b3*VX;
V2 = b3*VY;
V3 = b3*VZ;

%Plot Four bar link co-ordinate

%-----%

%plot join 2
% join 2
b2(1:4,4) = j7(1:4,4);
b2(1:4,1:3) = j7(1:4,1:3);
V1 = b2*VX;
V2 = b2*VY;
V3 = b2*VZ;

% plot join 1
% join 1
b1(1:4,4) = j6(1:4,4);
b1(1:4,1:3) = j6(1:4,1:3);
V1 = b1*VX;
V2 = b1*VY;
V3 = b1*VZ;

% plot Base
% join 0
b0(1:4,4) = 0;
b0(1:4,1:3) = [1,0,0;0,1,0;0,0,1;0,0,0];

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เฉพาะในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

V1 = b0*VX;
V2 = b0*VY;
V3 = b0*VZ;
plot3([b0(1,4),V1(1,4)],[b0(2,4),V1(2,4)],[b0(3,4),V1(3,4)], '-
r','LineWidth', 4)
plot3([b0(1,4),V2(1,4)],[b0(2,4),V2(2,4)],[b0(3,4),V2(3,4)], '-
g','LineWidth', 4)
plot3([b0(1,4),V3(1,4)],[b0(2,4),V3(2,4)],[b0(3,4),V3(3,4)], '-
b','LineWidth', 4)

% %plot arm link
plot3([0,b1(1,4)],[0,b1(2,4)],[0,b1(3,4)], 'MarkerFaceColor',[1 1
1],'MarkerEdgeColor',[0 0 1],...
'Marker','o',...
'LineWidth',2,...
'Color',[1 0 0]);
plot3([b1(1,4),b2(1,4)],[b1(2,4),b2(2,4)],[b1(3,4),b2(3,4)], 'MarkerFa
ceColor',[1 1 1],'MarkerEdgeColor',[0 0 1],...
'Marker','o',...
'LineWidth',2,...
'Color',[1 0 0]);
plot3([b3(1,4),b4(1,4)],[b3(2,4),b4(2,4)],[b3(3,4),b4(3,4)], 'MarkerFa
ceColor',[1 1 1],'MarkerEdgeColor',[0 0 1],...
'Marker','o',...
'LineWidth',2,...
'Color',[1 0 0]);
plot3([b4(1,4),b5(1,4)],[b4(2,4),b5(2,4)],[b4(3,4),b5(3,4)], 'MarkerFa
ceColor',[1 1 1],'MarkerEdgeColor',[0 0 1],...
'Marker','o',...
'LineWidth',2,...
'Color',[1 0 0]);

%Plot Four bar link co-ordinate
plot3([b2(1,4),f2(1,4)],[b2(2,4),f2(2,4)],[b2(3,4),f2(3,4)], 'MarkerFa
ceColor',[1 1 1],'MarkerEdgeColor',[0 0 1],...
'Marker','o',...
'LineWidth',2,...
'Color',[1 0 0]);
plot3([b2(1,4),f3(1,4)],[b2(2,4),f3(2,4)],[b2(3,4),f3(3,4)], 'MarkerFa
ceColor',[1 1 1],'MarkerEdgeColor',[0 0 1],...
'Marker','o',...
'LineWidth',2,...
'Color',[1 0 0]);
plot3([f2(1,4),f4(1,4)],[f2(2,4),f4(2,4)],[f2(3,4),f4(3,4)], 'MarkerFa
ceColor',[1 1 1],'MarkerEdgeColor',[0 0 1],...
'Marker','o',...
'LineWidth',2,...
'Color',[1 0 0]);
plot3([f3(1,4),f4(1,4)],[f3(2,4),f4(2,4)],[f3(3,4),f4(3,4)], 'MarkerFa
ceColor',[1 1 1],'MarkerEdgeColor',[0 0 1],...
'Marker','o',...
'LineWidth',2,...
'Color',[1 0 0]);
plot3([f3(1,4),b3(1,4)],[f3(2,4),b3(2,4)],[f3(3,4),b3(3,4)], 'MarkerFa
ceColor',[1 1 1],'MarkerEdgeColor',[0 0 1],...
'Marker','o',...
'LineWidth',2,...
'Color',[1 0 0]);
plot3([f4(1,4),b3(1,4)],[f4(2,4),b3(2,4)],[f4(3,4),b3(3,4)], 'MarkerFa
ceColor',[1 1 1],'MarkerEdgeColor',[0 0 1],...
'Marker','o',...

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการเรียนการสอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

'LineWidth',2,...
'Color',[1 0 0]);

%-----%
axis equal;
xlabel('Xw');ylabel('Yw');zlabel('Zw');
figure(1);
hold on

%----- Plot Graph 3 - UX vx BX -----
subplot(2,2,3);
view([45 45 45]);
hold on
grid
title('Robot UX Vs BX')
%plot arm link - BX

plot3([0,c1(1,4)],[0,c1(2,4)],[0,c1(3,4)],'MarkerFaceColor',[0 0
0],'MarkerEdgeColor',[1 0 0],...
'Marker','o',...
'LineWidth',2,...
'Color',[0 1 1]);
plot3([c1(1,4),c2(1,4)],[c1(2,4),c2(2,4)],[c1(3,4),c2(3,4)],'MarkerFa
ceColor',[0 0 0],'MarkerEdgeColor',[1 0 0],...
'Marker','o',...
'LineWidth',2,...
'Color',[0 1 1]);
plot3([c2(1,4),c3(1,4)],[c2(2,4),c3(2,4)],[c2(3,4),c3(3,4)],'MarkerFa
ceColor',[0 0 0],'MarkerEdgeColor',[1 0 0],...
'Marker','o',...
'LineWidth',2,...
'Color',[0 1 1]);
plot3([c3(1,4),c4(1,4)],[c3(2,4),c4(2,4)],[c3(3,4),c4(3,4)],'MarkerFa
ceColor',[0 0 0],'MarkerEdgeColor',[1 0 0],...
'Marker','o',...
'LineWidth',2,...
'Color',[0 1 1]);
plot3([c4(1,4),c5(1,4)],[c4(2,4),c5(2,4)],[c4(3,4),c5(3,4)],'MarkerFa
ceColor',[0 0 0],'MarkerEdgeColor',[1 0 0],...
'Marker','o',...
'LineWidth',2,...
'Color',[0 1 1]);

%plot arm link - UX
plot3([0,b1(1,4)],[0,b1(2,4)],[0,b1(3,4)],'MarkerFaceColor',[1 1
1],'MarkerEdgeColor',[0 0 1],...
'Marker','o',...
'LineWidth',2,...
'Color',[1 0 0]);
plot3([b1(1,4),b2(1,4)],[b1(2,4),b2(2,4)],[b1(3,4),b2(3,4)],'MarkerFa
ceColor',[1 1 1],'MarkerEdgeColor',[0 0 1],...
'Marker','o',...
'LineWidth',2,...
'Color',[1 0 0]);

%Plot Four bar link co-ordinate
plot3([b2(1,4),f2(1,4)],[b2(2,4),f2(2,4)],[b2(3,4),f2(3,4)],'MarkerFa
ceColor',[1 1 1],'MarkerEdgeColor',[0 0 1],...
'Marker','o',...
'LineWidth',2,...

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารทรัพย์สินทางปัญญาที่ให้บริการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

    'Color',[1 0 0]);
plot3([b2(1,4),f3(1,4)],[b2(2,4),f3(2,4)],[b2(3,4),f3(3,4)'],'MarkerFaceColor',[1 1 1],'MarkerEdgeColor',[0 0 1],...
    'Marker','o',...
    'LineWidth',2,...
    'Color',[1 0 0]);
plot3([f2(1,4),f4(1,4)],[f2(2,4),f4(2,4)],[f2(3,4),f4(3,4)'],'MarkerFaceColor',[1 1 1],'MarkerEdgeColor',[0 0 1],...
    'Marker','o',...
    'LineWidth',2,...
    'Color',[1 0 0]);
plot3([f3(1,4),f4(1,4)],[f3(2,4),f4(2,4)],[f3(3,4),f4(3,4)'],'MarkerFaceColor',[1 1 1],'MarkerEdgeColor',[0 0 1],...
    'Marker','o',...
    'LineWidth',2,...
    'Color',[1 0 0]);
plot3([f3(1,4),b3(1,4)],[f3(2,4),b3(2,4)],[f3(3,4),b3(3,4)'],'MarkerFaceColor',[1 1 1],'MarkerEdgeColor',[0 0 1],...
    'Marker','o',...
    'LineWidth',2,...
    'Color',[1 0 0]);
plot3([f4(1,4),b3(1,4)],[f4(2,4),b3(2,4)],[f4(3,4),b3(3,4)'],'MarkerFaceColor',[1 1 1],'MarkerEdgeColor',[0 0 1],...
    'Marker','o',...
    'LineWidth',2,...
    'Color',[1 0 0]);

%-----%

plot3([b3(1,4),b4(1,4)],[b3(2,4),b4(2,4)],[b3(3,4),b4(3,4)'],'MarkerFaceColor',[1 1 1],'MarkerEdgeColor',[0 0 1],...
    'Marker','o',...
    'LineWidth',2,...
    'Color',[1 0 0]);
plot3([b4(1,4),b5(1,4)],[b4(2,4),b5(2,4)],[b4(3,4),b5(3,4)'],'MarkerFaceColor',[1 1 1],'MarkerEdgeColor',[0 0 1],...
    'Marker','o',...
    'LineWidth',2,...
    'Color',[1 0 0]);

hold off
grid on
% axis([-3000 3000 -3000 3000 0 3000]);
axis equal;
xlabel('Xw');ylabel('Yw');zlabel('Zw');
figure(1);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6 โปรแกรมย่อย fposition.m

```

%% Program Convert to [Px,Py,Pz] and [Rx,Ry,Rz]
function position = fposition(t1,t2,t3,t4,t5)
position = zeros(6,5);
x = t1;
[position(1:6,1)] = convert( x );
x = t2;
[position(1:6,2)] = convert( x );
x = t3;
[position(1:6,3)] = convert( x );
x = t4;
[position(1:6,4)] = convert( x );
x = t5;
[position(1:6,5)] = convert( x );

```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.7 โปรแกรมย่อย convert.m

```
function [p] = convert(x)

p=zeros(6,1);
p(1,1) = x(1,4);
p(2,1) = x(2,4);
p(3,1) = x(3,4);
% Roll
roll = atan2(x(2,1),x(1,1));
% Pitch
r41 = x(1,1)*cos(roll);
s41 = x(2,1)*sin(roll);
pitch = atan2(-x(3,1),r41+s41);
% Yaw
t46 = x(2,2)*cos(roll);
u46 = x(1,2)*sin(roll);
s48 = t46-u46;
r46 = x(2,3)*cos(roll);
s46 = x(1,3)*sin(roll);
u48 = -r46+s46;
yaw = atan2(u48,s48);

p(4,1) = radtodeg(roll);
p(5,1) = radtodeg(pitch);
p(6,1) = radtodeg(yaw);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



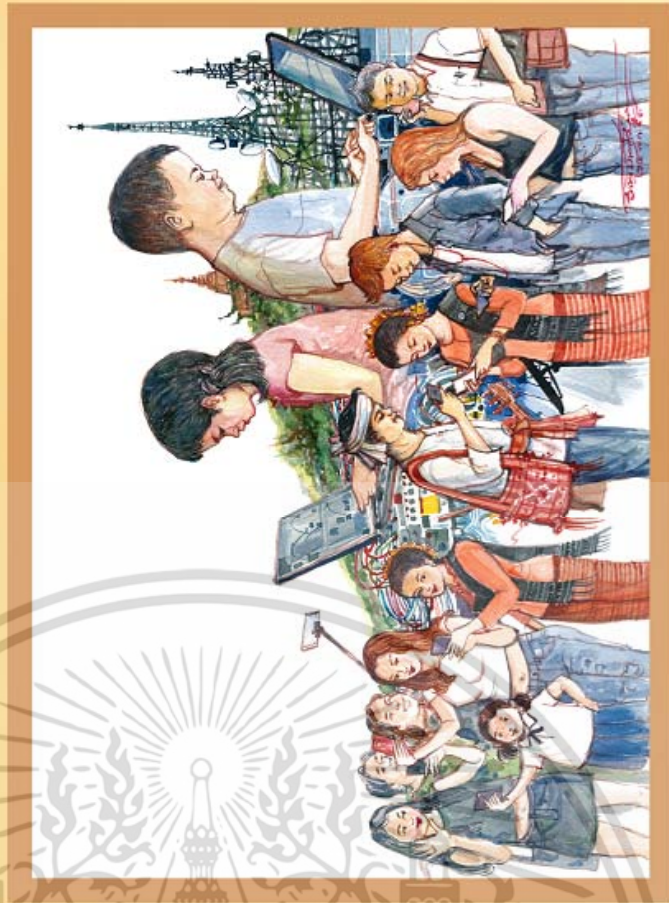
Final Program

ECTI-CON 2016

ChiangMai Thailand, June 28 - 1 July , 2016

13th International Conference on Electrical Engineering/Electronics
Computer, Telecommunications and Information Technology

ECTI-CON 2016 ChiangMai, Thailand



Illustrated by Assoc.Prof. Wichit Chomtaeveewiroot

Rajamangala University of Technology Lanna
ChiangMai, Thailand

Organized By



Technical Sponsors



Platinum Sponsors



Gold Sponsors



Silver Sponsors



Converting TCP to Joints Value of 6-DOF Robot based on Forward and Inverse Kinematic Analysis

Nuttaprop Vacharakornrawut, Teerawat Thepmanee, Apinai Rerkratn, and Sawai Pongswatd

Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
Ladkrabang, Bangkok, 10520, Thailand
Nuttaprop@gmail.com, {teerawat.th; apinai.re; sawai.po}@kmitl.ac.th

Abstract—This paper presents the technique to convert TCP (Tool Center Point) position of joints value from 6-DOF four bars link structure (FBLS) robot into 6-DOF direct link structure (DLS) robot. The technique proposed to achieve the robot replacement and introduce of new effective robot model for working in same task. The collected data in set of joint value from FBLS that are joint angle, joint length, end effect position, rotation and moving or working path are analyzed based on forward and inverse kinematic with DH (Denavit and Hartenberg) Parameters. Then, convert and configure to new model of robot parameters that is DLS to work in the same task. This technique has been studied and simulated by using Matlab software. Effectiveness of the proposed technique is verified by simulation and experimental result.

Keywords— 6-DOF; four bar link structure; direct link structure; Tool Center Point; forward kinematic; inverse Kinematic

I. INTRODUCTION

Nowadays, demand of market had been increasing which is effect to Industry level improved for supply market demand via integration of both hardware and software [1]. The robotic technology had been first introduced in US industry since the 1960s. The implement of robots in welding did not take off until the 1980s, when the automotive industry began robots extensively for spot welding. Since then, the number of robots used in industry and the number of their applications has grown greatly. In 2005, more than 120,000 robots have been used in North American industry, about half of them for welding and transferred material. In addition, most of operated robot have come the round of obsolete spare part and run out of model [2]. So with replacement and introduce of new effective robot model for working in same task are proposed. In this paper proposed technique perform with the different in structure and physical appearance between currently use robot UX-150 Kawasaki model and replacement robot that is BX-100 Kawasaki robot. The Matlab software[3-7] is applied to analyse the mathematic model of FBLS and DLS based on forward and inverse kinematic. In addition, the converting of TCP between FBLS and DLS are solved for operating in the same task. Effectiveness of the proposed technique is verified by simulation and experimental results that compare between UX-150 and BX-100 structure. Moreover, the technique can reduce man power to teach and calibrate the TCP for some posture.

II. DENAVIT HARTENBERG (DH) PARAMETERS.

The Denavit Hartenberg (DH) parameter are the four parameters associated with a particular convention for attaching reference frames to the links of a spatial kinematic chain, or robot manipulator that consists of

- Joint offset (d_i): length of intersections of common normal on joint axis
- Joint angle (θ): Angle between the orthogonal projections of the common normal and the plane normal to the joint axes.
- Link length (a_i): measured as the distance between the common normal to axis.
- Twist angle (α): The angle between the orthogonal projections of the joint axis into a plane normal and the common normal

So the given type of joint i.e. revolute or prismatic one of the DH parameters is variable which is called the joint variable, whereas the other three remaining parameters are constant and are called link parameters. For DH parameter of UX-150 will be shown on table I and BX100 on table II, respectively.

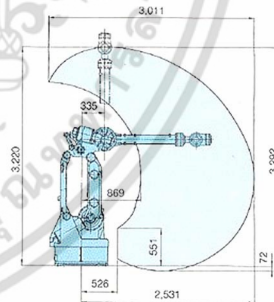


Fig.1. Four bar link structure of UX-150 Kawasaki Robot

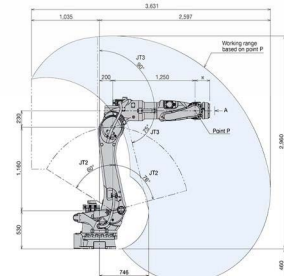


Fig.2. Direct link structure of BX-100L Kawasaki Robot

978-1-4673-9749-0/16/\$31.00 ©2016 IEEE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TABLE I. DH-PARAMETER ROBOT UX-150 KAWASAKI (FBL STRUCTURE)

D-H Parameter Table (UX-150)					
JT	θ	d_i	a_i	α	
1	θ_1	90	700	135	-90
1TRANS	θ_1	0	-250	0	0
2A	θ_{2A}	0	250	x_1	0
2B	θ_{2B}	-90	0	x_2	180
3	θ_3	0	0	0	90
4	θ_4	0	1350	0	-90
5A	θ_{5A}	-90	0	205	0
5B	θ_{5B}	90	0	0	90
6	θ_6	90	0	0	0

Where $X_1 = 900 \times \sin(\sum \theta_2) + 200$

$X_2 = 900 \times \sin(\sum \theta_2) + 270$

TABLE II. DH-PARAMETER ROBOT BX-100L KAWASAKI (DIRECT LINK STRUCTURE)

D-H Parameter Table (BX-100L)					
JT	θ	d_i	a_i	α	
1	θ_1	90	530	200	-90
2	θ_2	-90	0	1160	180
3A	θ_{3A}	0	0	230	90
3B	θ_{3B}	0	1250	0	0
4	θ_4	0	0	0	-90
5A	θ_{5A}	-90	0	363	0
5B	θ_{5B}	90	0	0	90
6	θ_6	90	0	0	0

As shown in table I and table II the major different occurred between the two types robot is the physical structure from link 2 to link 3B. That effect to the position of UX-150 joint 3 in the space depend on the equation of four bar link structure not depended on JT2 as BX-100L.

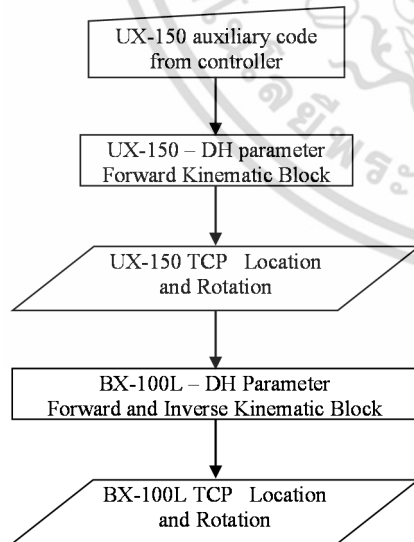


Fig.3. Flowchart for converting TCP

This paper presents the method to convert the current program of UX-150 into BX-100L for same task, that can describe by the Fig. 3. In this paper, each homogeneous transformation A_{n+1} is represented as a product of four basic transformations that can be shown by Eq.(1) and (2).

$${}^nT_{n+1} = A_{n+1} = Rot(z, \theta_{n+1}) \times Trans(0,0, d_{n+1}) \times Trans(a_{n+1}, 0, 0) \times Rot(x, \alpha_{n+1}) \quad (1)$$

$$A_{n+1} = \begin{bmatrix} C\theta_{n+1} & -S\theta_{n+1}C\alpha_{n+1} & S\theta_{n+1}S\alpha_{n+1} & a_{n+1}C\theta_{n+1} \\ S\theta_{n+1} & C\theta_{n+1}C\alpha_{n+1} & -C\theta_{n+1}S\alpha_{n+1} & a_{n+1}S\theta_{n+1} \\ 0 & S\alpha_{n+1} & C\alpha_{n+1} & d_{n+1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

III. FORWARD KINEMATIC ANALYSIS.

Forward kinematic is the mathematics behind the process of taking joint angles and specified link lengths, then calculates the position of their end effector in the universe frame. To calculate the position of the end effector in the universe frame a series of matrix calculations must be performed that find the position of the end effector relative to each robotic joint[8].

A. Position Analysis by using forward kinematics

The forward kinematics is the mathematic method to find the end effectors pose i.e. its position and orientation by using matrix A. Consider the FBL UX-150 the transformation can be shown by Eq. (3).

$${}^0T_1{}_6 = {}^0T_5{}_B {}^5B T_6 = [A_{FBL} A_4 A_{5A} A_{5B}] [A_6] \quad (3)$$

Where,

$$A_{FBL} = \begin{bmatrix} C_1 C_3 & -S_1 & C_1 S_3 & a_1 C_1 + S_1 d_{1TRANS} + C_1 X_1 + S_1 d_{2A} \\ S_1 C_3 & C_1 & S_1 S_3 & a_1 S_1 - C_1 d_{1TRANS} + S_1 X_1 - C_1 d_{2A} \\ S_3 & 0 & -C_3 & -X_2 + d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$A_4 = \begin{bmatrix} C_4 & 0 & -S_4 & 0 \\ S_4 & 0 & C_4 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$A_{5A} = \begin{bmatrix} C_{5A} & -S_{5A} & 0 & a_{5A} C_{5A} \\ S_{5A} & C_{5A} & 0 & a_{5A} S_{5A} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$A_{5B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\text{and } A_6 = \begin{bmatrix} C_6 & -S_6 & 0 & 0 \\ S_6 & C_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

For the DLS BX-100L the transformation can be shown by Eq. (4).

$${}^0T_{2_6} = [A_1 A_2 A_{3A} A_{3B} A_4 A_{5A} A_{5B}] [A_6] \quad (4)$$

Where,

$$A_1 = \begin{bmatrix} C_1 & 0 & -S_1 & a_1 C_1 \\ S_1 & 0 & C_1 & a_1 S_1 \\ 0 & -1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} C_2 & S_2 & 0 & a_2 C_2 \\ S_2 & -C_2 & 0 & a_2 S_2 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$A_{3A} = \begin{bmatrix} C_{3A} & 0 & S_{3A} & a_3 C_{3A} \\ S_{3A} & 0 & -C_{3A} & a_3 S_{3A} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$A_{3B} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_{3B} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$A_4 = \begin{bmatrix} C_4 & 0 & -S_4 & 0 \\ S_4 & 0 & C_4 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$A_{5A} = \begin{bmatrix} C_{5A} & -S_{5A} & 0 & a_{5A} C_{5A} \\ S_{5A} & C_{5A} & 0 & a_{5A} S_{5A} \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$A_{5B} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\text{and } A_6 = \begin{bmatrix} C_6 & -S_6 & 0 & 0 \\ S_6 & C_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

In this paper we want to convert from TCP Location and orientation of UX-150 into Joint value BX-100L for same TCP location and orientation. So Eq. (1) and (2) can be taken equally.

$${}^0T_{1_6} = {}^0T_{2_6} \quad (5)$$

$$[A_{FBLS} A_4 A_{5A} A_{5B}] [A_6] = [A_1 A_2 A_{3A} A_{3B} A_4 A_{5A} A_{5B}] [A_6]$$

Multiply each side of equation with $[A_6^{-1}]$

$$[A_{FBLS} A_4 A_{5A} A_{5B}] = [A_1 A_2 A_{3A} A_{3B} A_4 A_{5A} A_{5B}]$$

$${}^0T_{1_{5B}} = {}^0T_{2_{5B}} \quad (6)$$

This method considers the JT6 value of BX-100L and UX-150 is configured as same value.

IV. INVERSE KINEMATIC ANALYSIS

Inverse kinematics is a reverse process that computes the joint parameters to achieve a specified position of the end effector. By inverse kinematics solutions, we will be able to determine the value of each joint in order to place the arm at a desired position and orientation. In this paper we will find the joint value of BX-100L to approach same TCP location and orientation of UX-150.

A. Position Analysis by using inverse kinematic

We will denote the proceeding matrix as [RHS] (Right hand side) which express the desired location and orientation of the BX-100L robot. The matrix can be obtained by Eq. (7).

$$[RHS] = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

To solve for the angles, we will successively multiply the BX-100L forward kinematic equation and [RHS] with $[A_n^{-1}]$ starting with $[A_1^{-1}]$

$$[A_1^{-1}] [RHS] = {}^1T_{2_{5B}} = [A_2 A_{3A} A_{3B} A_4 A_{5A} A_{5B}] \quad (8)$$

Where,

$$[A_1^{-1}] [RHS] = \begin{bmatrix} C_1 n_x + S_1 n_y & C_1 o_x + S_1 o_y & C_1 a_x + S_1 a_y & C_1 p_x + S_1 p_y - a_1 \\ -n_z & -o_z & -a_z & -p_z + d_1 \\ -S_1 n_x + C_1 n_y & -S_1 o_x + C_1 o_y & -S_1 a_x + C_1 a_y & -S_1 p_x + C_1 p_y \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

and

$${}^1T_{2_{5B}} = [A_2 A_{3A} A_{3B} A_4 A_{5A} A_{5B}] \quad (10)$$

$${}^1T_{2_{5B}} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

Where,

$$\begin{aligned} a_{11} &= -C_2C_3C_4S_5 - C_2S_3C_5 - S_2S_3C_4S_5 + S_2C_3C_5 \\ a_{21} &= -S_2C_3C_4S_5 - S_2S_3C_5 + C_2S_3C_4S_5 - C_2C_3C_5 \\ a_{31} &= S_4S_5 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a_{12} &= -C_2C_3S_4 - S_2S_3S_4 \\ a_{22} &= -S_2C_3S_4 + C_2S_3S_4 \\ a_{32} &= -C_4 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a_{13} &= C_2C_3C_4C_5 - C_2S_3S_5 + S_2S_3C_4C_5 + S_2C_3S_5 \\ a_{23} &= C_4C_5 - S_2S_3S_5 + C_2S_3C_4C_5 - C_2C_3S_5 \\ a_{33} &= -S_4C_5 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a_{14} &= a_5C_2C_3C_4C_5 - a_5C_2S_3S_5 + d_3C_2S_3 \\ &+ a_3C_2C_3 + a_5S_2S_3C_4C_5 + a_5S_2C_3S_5 \\ &- d_3S_2C_3 + a_3S_2S_3 + a_2C_2 \\ a_{24} &= a_5S_2C_3C_4C_5 - a_5S_2S_3S_5 + d_3S_2S_3 \\ &+ a_3S_2C_3 - a_5C_2S_3C_4C_5 - a_5C_2C_3S_5 \\ &+ d_3C_2C_3 - a_3C_2S_3 + a_2C_2 \\ a_{34} &= -a_5S_4C_5 \end{aligned}$$

From Eq.(7)-(11) that Joint value of θ_1 , θ_2 and θ_3 can be obtain Eq.(12)-(14), respectively.

$$\theta_1 = \text{atan2}\left(\frac{a_5a_y - p_y}{p_x - a_5a_x}\right) \quad (12)$$

$$\theta_2 = \text{atan2}(K, -Z) - \text{atan2}(Y, \pm\sqrt{K^2 + Z^2 - Y^2}) \quad (13)$$

Where,

$$K = C_1p_x + S_1p_y - a_1, \quad Z = -p_z + d_1$$

and

$$Y = \frac{d_3^2 + a_3^2 - K^2 - Z^2 - a_2^2}{-2a_2}$$

$$\theta_3 = \text{atan2}\left(\frac{Ad_3 + Ba_3}{Aa_3 - Bd_3}\right) \quad (14)$$

Where,

$$\begin{aligned} A &= C_1C_2p_x + S_1C_2p_y - C_2a_1 - S_2p_z + S_2d_1 - a_2, \\ B &= C_1S_2p_x + S_1S_2p_y - S_2a_1 + C_2p_z - C_2d_1 \end{aligned}$$

Multiply the Eq.(11) with $[A_2^{-1}]$ to $[A_4^{-1}]$ the Joint value of 4 and 5 can be obtained as Eq.(15) and (16), respectively.

$$\theta_4 = \text{atan2}(S_4, C_4) \quad (15)$$

Where,

$$S_4 = -\left(\begin{array}{l} \left(C_3(C_1C_2o_x + S_1C_2o_y - S_2o_z) \right) \\ + \left(S_3(C_1S_2o_x + S_1S_2o_y - C_2o_z) \right) \end{array} \right),$$

$$C_4 = S_1o_x - C_1o_y$$

$$\theta_5 = \text{atan2}(S_5, C_5) \quad (16)$$

Where,

$$S_5 = -\left(\begin{array}{l} \left(S_3(C_1C_2a_x + S_1C_2a_y - S_2a_z) \right) \\ - \left(C_3(C_1S_2a_x + S_1S_2a_y + C_2a_z) \right) \end{array} \right),$$

$$C_5 = -\left(\begin{array}{l} \left(S_3(C_1C_2n_x + S_1C_2n_y - S_2n_z) \right) \\ - \left(C_3(C_1S_2n_x + S_1S_2n_y + C_2n_z) \right) \end{array} \right)$$

D-H parameters are represented and analyzed the link parameter of FBLS and DLS by forward and inverse kinematic. In addition, the simulation and experimental will be performed with UX-150 and BX-100L robot model.

V. SIMULATION AND EXPERIMENTAL RESULTS.

A. Simulation results.

In this paper the simulation and experiment performed on Matlab software which coding separated in three main function block

- Forward kinematic UX-150 block. This block will receive joint value input of UX-150 from user and covert these joint value into TCP location and orientation of desired location.
- Forward and Inverse kinematic BX-100L block. This block will receive the TCP value from UX-150 Forward kinematic block and calculated there value into joint value of BX-100L
- Graphic Simulation block will receive the position and orientation each joint of robot both UX-150 and BX-100L to position and simulate each joint location and orientation on X-Y-Z plane to show with each step.

B. Experimental results.

We have used the actual auxiliary value that have been programed to be material loaded in automotive industry. This paper will chose one program from auxiliary to experiment which have total seven steps inside. Joint value of each step in the program will show on table III and TCP Location and orientation will show on table IV.

TABLE III. AUXILIARY JOINT VALUE OF EACH STEP ROBOT UX-150

Step No.	UX-150 Joint number (Degrees)					
	1	2	3	4	5	6
1	50.2236	-38.7698	-46.2574	1.4456	-43.6824	-56.7579
2	7.2057	10.4418	-69.35	2.6953	-20.3201	12.4232
3	30.1811	-37.0033	-14.9512	0.9917	-72.7801	57.8569
4	27.2849	-2.0911	-48.1277	0.4454	-40.5498	60.6986
5	-2.3315	-6.9016	-52.3219	-0.7456	-34.6907	91.2362
6	16.1683	-23.2566	-55.7728	1.7495	-40.2843	-15541
7	7.6252	-28.4834	-56.5647	1.4412	-33.8405	-22.2872

TABLE IV. TCP LOCATION AND ORIENTATION OF EACH STEP ROBOT UX-150

Step No.	UX-150 TCP Location					
	Location (mm.)			Orientation (Degrees)		
	X	Y	Z	R	P	Y
1	-544.18	448.37	491.42	139.18	-0.051082	-179
2	-125.67	967.33	386.86	94.678	-0.30894	-179.05
3	-558.83	954.15	1135.6	119.89	-2.2662	-179.04
4	-554.68	1073.1	659.2	116.95	-1.3216	-179.7
5	44.749	1061.8	590.3	88.282	-2.985	179.54
6	-203.65	687.9	476.85	104.83	6.0686	-179.01
7	-88.858	642.1	429.5	96.428	0.4135	-179.21

The result of BX-100L converted joint value of each step in the program will show on table 5 and TCP Location and orientation will show on table VI

TABLE V. AUXILIARY CONVERTED JOINT VALUE OF EACH STEP ROBOT BX-100L

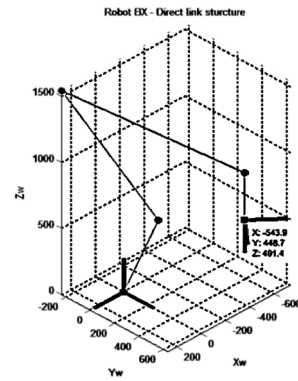
Step No.	Converted BX100L Joint number (Degrees)					
	1	2	3	4	5	6
1	50	-29.019	-72.326	1.2901	-46.636	-56.7579
2	7.0538	-4.2246	-62.149	2.5132	-31.737	12.4232
3	30.044	-18.754	-35.055	0.95294	-71.432	57.8569
4	27.247	-4.133	-46.101	0.41733	-46.71	60.6986
5	-2.2673	-10.141	-55.023	-0.694	-42.131	91.2362
6	15.932	-23.78	-70.579	1.5557	-49.258	-15541
7	7.4303	-30.106	-76.198	1.2768	-44.313	-22.2872

TABLE VI. TCP LOCATION AND ORIENTATION OF EACH STEP ROBOT BX-100L

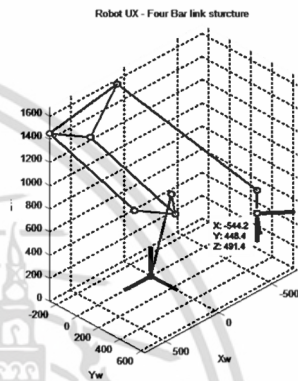
Step No.	BX100L TCP Location					
	Location (mm.)			Orientation (Degrees)		
	X	Y	Z	R	P	Y
1	-543.93	448.66	491.41	139.11	-0.049994	-179.06
2	-128.11	967.13	386.91	94.917	-0.31369	-178.067
3	-558.55	954.3	1135.6	119.74	-2.2638	-179.08
4	-554.75	1073.1	659.2	116.96	-1.3217	-179.69
5	44.988	1061.7	590.3	88.248	-2.9852	179.51
6	-204.1	687.78	476.86	104.91	6.0671	-178.93
7	-89.43	642.03	429.51	96.517	0.4122	-179.11

This section shows structure graphic of UX-150 and BX-100L robot that thin solid line represent the BX-100L model and tick solid line represent UX-150 model from step 1 to step 7.

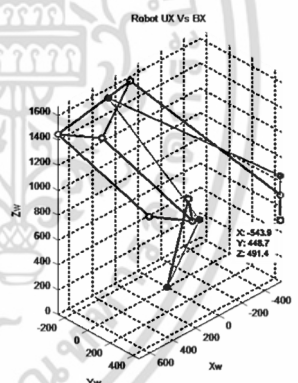
Step No.1 - Robot BX-100L – Direct link Structure



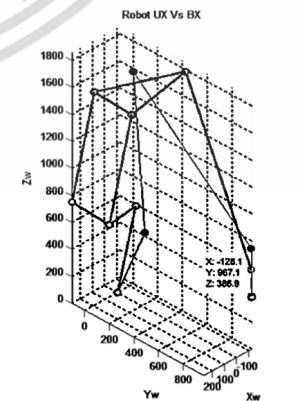
Step No.1 - Robot UX-150 – Four Bar link Structure



Step No.1 - Robot UX-150 VS. Robot BX100

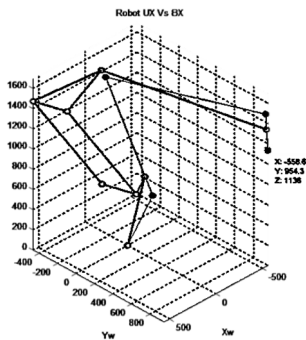


Step No.2 - Robot UX-150 VS. Robot BX100

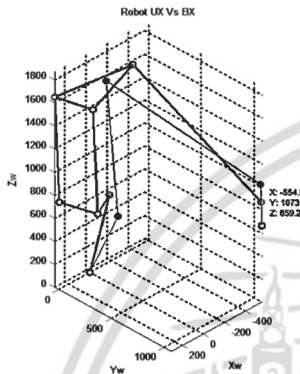


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

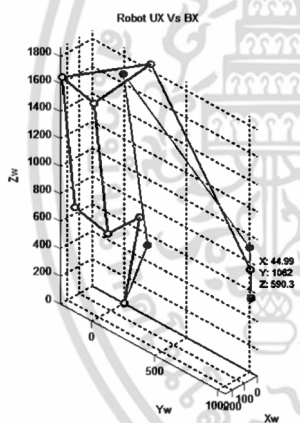
Step No.3 - Robot UX-150 VS. Robot BX100



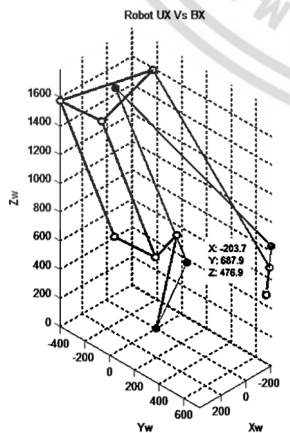
Step No.4 - Robot UX-150 VS. Robot BX100



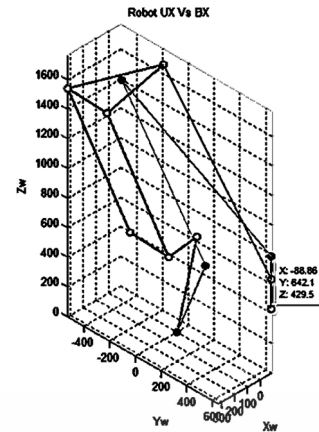
Step No.5 - Robot UX-150 VS. Robot BX100



Step No.6 - Robot UX-150 VS. Robot BX100



Step No.7 - Robot UX-150 VS. Robot BX100



VI. CONCLUSION.

The joint value of BX-100L that obtain in this paper have been trial and utilize at actual field. The result satisfy the actual online teaching team. Following these technique we have been proved and experimented in this paper. Previously we use man power at least a week in offline teaching simulation. But now we can reduced man power in this process. Left only touch up process or calibration process for some posture.

ACKNOWLEDGMENT

We would like to thank the Kawasaki (Thailand) Limited, that strong support the drawing and detail of robots.

REFERENCES

- [1] Saeed B. Niku, "Introduction to Robotics Analysis, Systems, Application" ISBN: 0-13-061309-6
- [2] John J. Craig "Introduction to Robotics Mechanics and Control" ISBN: 0-13-123629-6
- [3] C.S.G. Lee, M. Ziegler "A geometric approach in solving the inverse kinematic of puma robots" Department of Electrical and Computer Engineering The University of Michigan Ann Arbor, Michigan 48109-1109
- [4] Amos Gilat "Matlab An introduction with applications" Department of Mechanical Engineering The Ohio State University ISBN: 0-471-43997-5
- [5] Serdar Kucuk, Zafer Bingul "Robot Kinematics : Forward and Inverse Kinematics"
- [6] Mahidzal Dahari1, Jian-Ding Tan2 "Forward and Inverse Kinematics Model for Robotic Welding Process Using KR-16KS KUKA Robot"1,2Centre of Product Design and Manufacture (CPDM), Faculty of Engineering, University of Malaya, 978-1-4577-0005-7 ©2011 IEEE
- [7] K. Kishore Kumar, Dr. A. Srinath, G. Jugalanvesh, R.Premasai, M.suresh "Kinematic Analysis and Simulation of 6Dof KukaKr5 Robot For Welding Application." International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)
- [8] Jettiya Sripituk, Teerawat Thepmanee, and Prapart Ukakimapurn "A Simple Technique to Modeling and Simulation Four-Axe Robot-Arm Control" International Conference on Control, Automation and Systems 2007 Oct. 17-20, 2007 in COEX, Seoul, Korea