การออกแบบและสร้างต้นแบบด้วยกลไก Canfield เพื่อประยุกต์ใช้กับแสงอาทิตย์

นางสาวมุกรวิณัณท์ ชัยสิทธิ์ปรุ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ปีการศึกษา 2560

DESIGN AND PROTOTYPING OF CANFIELD MECHANISM FOR SOLAR

Mookrawinan Chaiyasitpru

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Master of Engineering in Mechatronics Engineering

Suranaree University of Technology

Academic Year 2017

การออกแบบและสร้างต้นแบบด้วยกลไก Canfield
เพื่อประยุกต์ใช้กับแสงอาทิตย์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(อ. ดร.โศรฎา แข็งการ)
ประธานกรรมการ

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)
กรรมการ (อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์)

(อ. ดร.สุรเดช ตัญตรัยรัตน์)
กรรมการ

(อ. ดร.พิจิตรา เอื้องไพโรจน์)
กรรมการ

(อ. ดร.ชิตพงศ์ เวชไธสงค์)
กรรมการ

(ศ. ดร.สันติ แม้นศิริ)
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการและพัฒนาความเป็นสากล

(รศ. ร.อ. ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์)
คณบดีสำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

มุกรวิณัณท์ ชัยสิทธิ์ปรุ : การออกแบบและสร้างต้นแบบด้วยกลไก Canfield เพื่อประยุกต์ใช้กับแสงอาทิตย์ (DESIGN AND PROTOTYPING OF CANFIELD MECHANISM FOR SOLAR) อาจารย์ที่ปรึกษา : รองศาสตราจารย์ เรืออากาศเอก ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์ 142 หน้า.

งานวิจัยนี้นำเสนอเกี่ยวกับการออกแบบและสร้างต้นแบบด้วยกลไก Canfield ที่มีโครงสร้างเป็นหุ่นยนต์แบบขนาน เพื่อให้หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ไปปฏิบัติงานยังตำแหน่งเป้าหมายที่ต้องการได้ สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย เช่น ใช้เป็นตัวควบคุมแผงโซล่าเซลล์ เพื่อให้แผงโซล่าเซลล์หันรับแสงอาทิตย์ได้มากที่สุดตลอดทั้งวัน หรือสามารถใช้เป็นอุปกรณ์ที่ติดอยู่ตรงปลายแขนของหุ่นยนต์ (End Effector) เพื่อใช้ให้เกิดประโยชน์หลากหลายมากยิ่งขึ้นในงานด้านอุตสาหกรรมต่างๆ ซึ่งกลไกนี้มี 6 องศาอิสระ กลไกนี้จะถูกออกแบบและสร้างโดยมีลักษณะเป็นแขนหุ่นยนต์แบบสามก้าน มีโครงสร้างเป็นหุ่นยนต์แบบขนาน โดยแต่ละแขนจะประกอบไปด้วยสามข้อต่อแบบหมุน ขับเคลื่อนด้วยเซอร์โวมอเตอร์สามตัว โดยจะใช้หลักการทางจลนศาสตร์แบบไปข้างหน้า (Forward Kinematic) ในการหาพื้นที่การทำงานของหุ่นยนต์ หาตำแหน่งพิกัดที่หุ่นยนต์จะเคลื่อนที่ไปถึง และมุม Orientation บนระนาบของแผ่นปลาย พบว่าพื้นที่การทำงานของกลไก Canfield นี้ มีลักษณะเป็นครึ่งทรงกลม และค่าของพิกัด X,Y,Z และมุม Orientation ($\theta_x, \theta_y, \theta_z$) ที่ได้จากการคำนวณจะถูกเก็บไว้ในรูปแบบของตาราง เพื่อป้อนค่ากลับไปหามุมที่จุดหมุนบนแผ่นฐานของทั้งสามแขนหุ่นยนต์ ($\theta_1, \theta_2, \theta_3$) ได้ตามความต้องการ แทนการใช้สมการจลนศาสตร์แบบผกผัน (Inverse Kinematic) เมื่อทดสอบความแม่นยำของหุ่นยนต์ โดยการวัดค่าพิกัดที่เกิดขึ้นจริงเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณ พบว่า พิกัดในแกน X มีความคลาดเคลื่อน 10% พิกัดในแกน Y มีความคาดเคลื่อน 10% พิกัดในแกน Z มีความคาดเคลื่อน 11% เนื่องจากกลไก Canfield นี้ ถูกสร้างขึ้นด้วยความละเอียดที่ไม่สูงนัก จึงเกิดค่าความคาดเคลื่อนค่อนข้างมาก

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่อนักศึกษา _____

ปีการศึกษา 2560 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา _____

MOOKRAWINAN CHAIYASITPRU : DESIGN AND PROTOTYPING OF CANFIELD MECHANISM FOR SOLAR. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. FLT. LT. KONTORN CHAMNIPRASART, Ph.D., 142 PP.

CANFIELD MECHANISM/KINEMATIC ANALYZES/PARALLEL ROBOT

This research presents the design and construction of a canfield robot. The mechanism is based on a parallel robot which is called Canfield robot. The robot can move to the target location. It can be applied to a variety of applications such as control panel solar cells to get the most sun throughout the day. It can be used as a device attached to the end effector of the articulated arm to use more diverse in various industries. This mechanism has 6 degrees of freedom, is designed and built by a three-arm robot. It is the structured as a parallel robot. Each linkage has three revolts joints driven by three servo motors. The forward kinematic analyzes are used to find an optimum workspace, positions, orientation of the robot, the three angles of each arm of the robot. It found that Canfield's functional area was half spherical. You can find the coordinates x, y, z where the robot moves and can find the orientation $(\theta_x, \theta_y, \theta_z)$, which is stored in the form of a table. It can be return to the angle of the three arms $(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ as needed. It is used instead of inverse kinematic equations when testing the accuracy of a robot by measuring the actual coordinates relative to the calculated values, the coordinates in the X axis are 10%. The coordinates in the Y axis are 10%. The coordinates in the Z axis are 11%. Canfield was created with a low resolution. The result is quite high.

School of Mechanical Engineering Student's Signature Mookrawinan

Academic Year 2017 Advisor's Signature Kont Chm

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์ได้รับการอนุเคราะห์จากบุคคลหลายฝ่าย ที่ให้คำปรึกษา แนะนำ รวมทั้งเอกสารประกอบการศึกษาค้นคว้า และอ้างอิง จนทำให้เกิดแนวคิดและขอบเขตในการทำวิทยานิพนธ์ ดังนี้

รองศาสตราจารย์ เรืออากาศเอก ดร.กนต์ธร ชำนิประศาสน์ ท่านได้ให้โอกาสและประสิทธิ์ประสาทความรู้ในการทำวิทยานิพนธ์นี้ขึ้นมา อีกทั้งท่านยังเป็นที่ปรึกษา ทำให้ได้รับความรู้และประสบการณ์ในการทำงานหลาย ๆ อย่าง ในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เป็นเพราะความกรุณา ที่ได้รับการให้คำปรึกษา ให้คำแนะนำในการปฏิบัติงาน และ การแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในระหว่างการปฏิบัติงานอย่างสม่ำเสมอ

อาจารย์อภิลักษณ์ หล่อนกลาง ที่คอยให้ความช่วยเหลือสละเวลา แนะนำแนวทางแก้ปัญหา ให้ความรู้และคำปรึกษาต่างๆ อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการทำวิทยานิพนธ์ จนทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

นายศิวศิลป์ พรจำศิลป์ ที่คอยให้คำปรึกษาทางด้านโปรแกรม ช่วยให้ต้นแบบสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณบุคคลอื่น ๆ ที่ไม่ได้กล่าวนามทุกท่านที่ได้ให้ความร่วมมือ ให้คำแนะนำและช่วยเหลือในเรื่องต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ และสามารถทำให้การปฏิบัติงานในครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ทำให้ได้รับความรู้ ประสบการณ์ และทักษะต่างๆเพื่อประโยชน์ในการทำงานต่อไป

ขอกราบขอบพระคุณบิดา นายปรโชต และมารดา นางบุลากร ชัยสิทธิ์ปรุ ที่ให้การเลี้ยงดูอบรม สนับสนุนทางด้านการศึกษาเป็นอย่างดี จนทำให้ผู้ทำวิทยานิพนธ์ประสบความสำเร็จในชีวิตตลอดมา

ขออาราธนา สิ่งศักดิ์สิทธิ์ ทั้งหลายจงช่วยดลบันดาล ให้บุคคลทั้งหลายที่ได้กล่าวถึง จงมีแต่ความสุข และความเจริญตลอดไป

มุกรวิณัณท์ ชัยสิทธิ์ปรุ

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อ (ภาษาไทย) ..... ก

บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ) ..... ข

กิตติกรรมประกาศ ..... ค

สารบัญ ..... ง

สารบัญตาราง ..... ฉ

สารบัญรูป ..... ช

บทที่

1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 2

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย 2

1.4 วิธีดำเนินงานวิจัย 3

1.5 สถานที่ทำงานวิจัย 3

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3

2 ปริทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 4

2.1 ปริทัศน์วรรณกรรม 4

2.2 ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) 12

2.3 เซอร์โวมอเตอร์ (Servo Motor) 15

2.4 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับหุ่นยนต์ 18

2.5 โครงสร้างของหุ่นยนต์แบบ Canfield 31

3 **วิธีดำเนินงานวิจัย** 38

3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย 38

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำงานวิจัย 40

3.3 การวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากทางทฤษฎี 42

3.4 การออกแบบและสร้างกลไกแบบ Canfield 46

3.5 การออกแบบโปรแกรมเพื่อใช้ควบคุมหุ่นยนต์ Canfield 50

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.6 อัลกอลิธึมสำหรับประมวลผลเพื่อเชื่อมต่อข้อมูลระหว่างโปรแกรมกับหุ่นยนต์ 51

4 ผลการทดลอง 56

4.1 การออกแบบขนาดของหุ่นยนต์กลไกแบบ Canfield 56

4.2 การวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 58

4.3 การทดลองการเคลื่อนที่ของเซอร์โวมอเตอร์ทั้งสามชุด 62

4.4 การทดสอบหาพิกัด X,Y,Z บนแผ่นปลายของหุ่นยนต์ 71

4.5 การทดลองค้นหาค่าจากตารางเพื่อควบคุมหุ่นยนต์ 78

5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ 79

5.1 สรุปงานวิจัย 79

5.2 ข้อเสนอแนะ 79

รายการอ้างอิง 81

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก ตัวอย่างตารางบันทึกผลการทดลองที่ 4.5 84

ภาคผนวก ข รายละเอียดโปรแกรม 124

ภาคผนวก ค ภาพชิ้นงานในอดีตถึงปัจจุบัน 128

ภาคผนวก ง บทความทางด้านวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ 135

ประวัติผู้เขียน 142

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

4.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบ 57
4.2 ผลการทดลองของเซอร์โวมอเตอร์ตัวที่ 1 62
4.3 ผลการการทดลองของเซอร์โวมอเตอร์ตัวที่ 2 65
4.4 ผลการการทดลองของเซอร์โวมอเตอร์ตัวที่ 3 68
4.5 ผลการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนในพิกัด X 71
4.6 ผลการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนในพิกัด Y 73
4.7 ผลการเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนในพิกัด Z 76

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญรูป

รูปที่ **หน้า**

2.1 ลักษณะโครงสร้างของ Canfield Joint[1] 4
2.2 ภาพหุ่นยนต์ต้นแบบ Canfield joint ที่สร้างขึ้นโดยองค์การนาซ่า[1]..... 5
2.3 ลักษณะของ Steward Platform[4]..... 6
2.4 หุ่นยนต์เดลต้าที่สร้างขึ้นโดย Mauro Maya และคณะ[10] 8
2.5 ลักษณะของหุ่นยนต์เดลต้า[21]..... 11
2.6 ชนิดของเซอร์โวมอเตอร์[18] 17
2.7 แสดงลักษณะแขนกลแบบต่างๆ [11]..... 20
2.8 แสดงข้อต่อพื้นฐานทางจลนศาสตร์[11] 21
2.9 โครงสร้างหลักของแขนกลที่ประกอบด้วยตัวแปรต่างๆ[11] 22
2.10 แสดงตำแหน่งของจุด p ในรูปของเวกเตอร์[23] 23
2.11 ตำแหน่งและทิศทางของปลายแขนกล[23] 24
2.12 แสดงพารามิเตอร์ของ Denavit-Hartenberg กรณีข้อต่อแบบหมุน 27
2.13 แสดงพารามิเตอร์ของ Denavit-Hartenberg กรณีข้อต่อแบบเลื่อน[11] 28
2.14 แบบจำลองหุ่นยนต์แบบ Canfield [7].....32
2.15 แผนภาพจลศาสตร์ของหุ่นยนต์ Canfield ..... .32
2.16 ภาพของเฟรมอ้างอิงแบบข้อมือ (Canfield) 33
2.17 แบบจำลองของข้อต่อแบบ Spherical 36
3.1 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย 39
3.2 Servo motor เฟืองเหล็กแรงบิดสูง 12 Kg MG995 Tower Pro Hi-Speed Servo 40
3.3 Arduino Uno R3 42
3.4 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของผ่านปลาย 42
3.5 พิกัด X ,Y, Z บนระนาบของแผ่นปลาย 44
3.6 แผนผังแนวคิดในการสร้างกลไกแบบ Canfield..... 46
3.7 การออกแบบแผ่นฐาน โดยใช้โปรแกรมในการออกแบบ 47
3.8 การออกแบบแขนล่าง โดยโปรแกรมช่วยในการออกแบบ 48

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

3.9 การออกแบบแขนบน โดยโปรแกรมช่วยในการออกแบบ 48

3.10 การออกแบบแผ่นฐาน โดยใช้โปรแกรมในการออกแบบ 49

3.11 การสร้างต้นแบบหุ่นยนต์กลไกแบบ Canfield ด้วยวัสดุอะคริลิก 49

3.12 ภาพรวมการทำงานของระบบ 50

3.13 หน้าต่างสำหรับผู้ใช้งานสำหรับป้อนค่าจุดหมุนบนแผ่นฐาน $(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ 52

3.14 โปรแกรมที่ใช้เชื่อมระหว่างโปรแกรม MATLAB กับบอร์ด Controller 53

3.15 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ต่าง 54

3.16 หน้าต่างสำหรับผู้ใช้งานสำหรับป้อนค่ามุม Orientation $(\theta_x, \theta_y, \theta_z)$ เพื่อหาค่ามุมที่จุดหมุนบนแผ่นฐาน $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ ย้อนกลับ 55

4.1 พื้นที่การทำงานของหุ่นยนต์กลไกแบบ Canfield ในรูปทรง 3 มิติ 59

4.2 มุมมองพื้นที่การทำงานของหุ่นยนต์กลไกแบบ Canfield ในระนาบ xy 60

4.3 มุมมองพื้นที่การทำงานของหุ่นยนต์กลไกแบบ Canfield ในระนาบ zx 61

4.4 มุมมองพื้นที่การทำงานของหุ่นยนต์กลไกแบบ Canfield ในระนาบ zy 61

4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมที่กวาดไปกับมุมจากแขนหุ่นยนต์แขนที่ 1 64

4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมที่กวาดไปกับมุมจากแขนหุ่นยนต์แขนที่ 2 67

4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างมุมที่กวาดไปกับมุมจากแขนหุ่นยนต์แขนที่ 3 70

4.8 กราฟแสดงค่าความคลาดเคลื่อนในพิกัด X 72

4.9 กราฟแสดงค่าความคลาดเคลื่อนในพิกัด Y 74

4.10 กราฟแสดงค่าความคลาดเคลื่อนในพิกัด Z 77

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันหุ่นยนต์ได้เข้ามามีบทบาทและมีความสำคัญต่อชีวิตประจำวันของมนุษย์เป็นอย่างมาก อีกทั้งยังได้มีการนำหุ่นยนต์ดังกล่าวมาประยุกต์ใช้งานกันอย่างแพร่หลาย ทั้งในด้านอุตสาหกรรม การสำรวจ หรือด้านการแพทย์ และอื่นๆอีกมากมาย ไม่ว่าจะเป็นการนำไปใช้งานเพื่ออำนวยความสะดวกในการขนย้ายสิ่งของวัสดุหรือแม้กระทั่งใช้ในการปฏิบัติงานแทนมนุษย์ในพื้นที่ที่มีความเสี่ยงอันตราย ที่มนุษย์ไม่สามารถเข้าไปปฏิบัติงานได้ ซึ่งในหลายประเทศได้มีการออกแบบและพัฒนาหุ่นยนต์อย่างต่อเนื่อง โดยแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ หุ่นยนต์ที่สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระ โดยข้อดีของหุ่นยนต์เคลื่อนที่คือสามารถเคลื่อนที่ไปยังที่ต่างๆด้วยการใช้ล้อหรือขาได้ด้วยตัวเองตามที่กำหนดโดยมีผู้ควบคุม และหุ่นยนต์ชนิดที่ 2 คือ หุ่นยนต์แบบติดตั้งอยู่กับที่ โดยทั่วไปจะมีลักษณะเป็นแขนกล สามารถเคลื่อนไหวในพื้นที่การทำงานที่จำกัดเท่านั้น มีข้อจำกัดในเรื่องการทำงานซ้ำๆเดิมๆตามที่กำหนด ซึ่งหุ่นยนต์ประเภทนี้ปัจจุบันยังคงมีการทำงานวิจัยและศึกษาอยู่เพื่อพัฒนาออกมาในรูปแบบต่างๆ โดยปัญหาที่สำคัญสำหรับหุ่นยนต์อยู่กับที่ ก็คือการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ไปยังตำแหน่งต่างๆ และการควบคุมให้เคลื่อนที่ไปจุดต่างๆแบบอัตโนมัติ เพื่อให้หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ไปปฏิบัติงานยังตำแหน่งเป้าหมายที่ต้องการได้

ด้วยเหตุนี้ผู้วิจัยจึงจัดทำงานวิจัยนี้ขึ้นมา โดยจะนำเสนอการออกแบบและสร้างต้นแบบด้วยกลไกหุ่นยนต์แบบ Canfield เพื่อให้กลไกนี้ สามารถเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งเป้าหมายต่างๆได้ตามต้องการ กลไกแบบ Canfield หรือ Canfield joint เป็นกลไกที่สร้างขึ้นเพื่อช่วยในการเคลื่อนไหวได้ในรูปแบบครึ่งทรงกลม ถูกประดิษฐ์ขึ้นโดย ดร. สตีเฟน แคนฟิวด์ (Stephen Canfield) จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีเทนเนสซี ในปี 1997 ซึ่งสิ่งประดิษฐ์นี้ได้ถูกนำไปพัฒนาและนำไปใช้เพื่อเป็นประโยชน์ต่อองค์การบริหารการบินและอวกาศแห่งชาติหรือนาซ่า โดยกลไกนี้จะถูกนำไปติดไว้บนยานอวกาศเพื่อใช้เป็นตัวขับดัน ให้ยานอวกาศสามารถเคลื่อนที่ได้ในทิศทาง Roll, Pith และ Yaw อีกทั้งยังนำไปใช้ประโยชน์โดยเป็นตัวควบคุมแผงโซล่าเซลล์ที่ติดอยู่บนยานอวกาศให้หันไปรับพลังงานแสงอาทิตย์ให้ได้มากที่สุด เพื่อนำพลังงานนั้นมาใช้ต่อในยานอวกาศ ลักษณะที่สำคัญของกลไก Canfield สามารถอธิบายได้ว่าเป็นกลไกที่มีลักษณะเป็นหุ่นยนต์แบบ

ขนาน มีหกองศาอิสระ และโครงสร้างประกอบไปด้วยแผ่นฐานและแผ่นปลายเป็นรูปสามเหลี่ยมด้านเท่าวางขนานกันอยู่เชื่อมด้วยข้อต่อแบบหมุนและก้านจากแผ่นฐานไปยังแผ่นปลาย ลักษณะพิเศษที่แตกต่างจากหุ่นยนต์แบบขนานทั่วไปคือ มีข้อต่อแบบหมุนอยู่สามจุดในแต่ละแขนของหุ่นยนต์ ส่งผลให้หุ่นยนต์ดังกล่าวสามารถเคลื่อนที่ได้ในหลายทิศทางมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้แผ่นปลายของหุ่นสามารถยุบหรือยืดออกได้ และแนวแกนตั้งฉากกับแผ่นปลายจะเปลี่ยนทิศทางไปเรื่อยๆเมื่อมีการเคลื่อนที่ และแขนทั้งสามของหุ่นยนต์มีความแข็งแรงทนทาน หุ่นยนต์ชนิดนี้สามารถเคลื่อนที่ได้หลากหลายทิศทางมากกว่าหุ่นยนต์แบบขนานที่เคยมีมา เช่น หุ่นยนต์เดลต้า ซึ่งหุ่นยนต์แบบเดลต้านั้นมีข้อดีคือ มีพื้นที่การทำงานที่กว้าง เพราะข้อต่อ จะต่อกันออกไปเรื่อยๆ แต่ข้อเสียคือความแข็งแรงต่ำเพราะมีลักษณะเป็นโครงสร้างยื่นยาวออกไปจากฐาน และในการออกแบบกลไก Canfield นี้ จะใช้หลักการทางคณิตศาสตร์ของจลนศาสตร์แบบไปข้างหน้าเพื่อหาพื้นที่การทำงานของหุ่นยนต์ หาพิกัดที่หุ่นยนต์จะสามารถเคลื่อนที่ไปได้ และมุม Orientation บนระนาบของแผ่นปลาย

การออกแบบและสร้างต้นแบบด้วยกลไก Canfield นี้ สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย อาทิเช่น ใช้เป็นตัวควบคุมแผงโซล่าเซลล์ เพื่อให้แผงโซล่าเซลล์หันรับแสงอาทิตย์ได้มากที่สุดตลอดทั้งวัน หรือสามารถใช้เป็นอุปกรณ์ที่ติดอยู่ตรงปลายแขนของหุ่นยนต์ (End Effector) เพื่อใช้ให้เกิดประโยชน์หลากหลายมากยิ่งขึ้นในงานด้านอุตสาหกรรมต่างๆ และสาระสำคัญของงานวิจัยนี้คือได้ศึกษาวิธีการในการออกแบบและสร้างกลไกแบบ Canfield โดยวิธีการทางคณิตศาสตร์แบบจลนศาสตร์แบบไปข้างหน้า เพื่อคำนวณหาพื้นที่การทำงานของหุ่นยนต์ และเมื่อทราบพิกัดของหุ่นยนต์ที่จะเคลื่อนที่ไปถึงแล้ว ก็สามารถหามุมที่กระทำต่อก้านของหุ่นยนต์ทั้งสามก้านได้ อีกทั้งยังสามารถควบคุมหุ่นยนต์ชนิดนี้ ให้สามารถใช้งานได้ตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาสมการทางคณิตศาสตร์ของหุ่นยนต์ Canfield

1.2.2 เพื่อศึกษาการออกแบบและสามารถสร้างต้นแบบหุ่นยนต์ Canfield ออกมาได้จริง

1.2.3 เพื่อศึกษาและออกแบบโปรแกรมสำหรับควบคุมหุ่นยนต์ Canfield

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 คำนวณหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ด้วยสมการจลศาสตร์แบบไปข้างหน้า(Forward Kinematic) ตามทฤษฎีของ Canfield โดยคำนวณด้วยโปรแกรม MATLAB

1.3.2 ใช้เซอร์โวมอเตอร์ จำนวน 3 ตัว เป็นต้นกำลังขับเคลื่อนทั้ง 3 แขน ของหุ่นยนต์

1.3.3 สามารถหาพิกัดที่ปลายแขนของหุ่นยนต์และมุม Orientation $(\theta_x, \theta_y, \theta_z)$ ได้

1.3.4 สามารถส่งค่าจากสมการ Forward kinematic ไปเก็บไว้ในตารางและเรียกใช้ค่ามุม Orientation$(\theta_x, \theta_y, \theta_z)$ จากตาราง เพื่อป้อนกลับไปหาค่ามุมที่แขนหุ่นยนต์ $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ ได้

1.4 วิธีดำเนินงานวิจัย

1.4.1 ศึกษาค้นคว้าองค์ความรู้ ทฤษฎี เอกสารที่เกี่ยวข้อง และทำการออกแบบระบบ

1.4.2 จัดหาวัสดุและอุปกรณ์ในการจัดสร้าง

1.4.3 ออกแบบและสร้างเครื่องต้นแบบ

1.4.4 เขียนโปรแกรมควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์ Canfield

1.4.5 ทดสอบเครื่องต้นแบบและทำการปรับปรุงแก้ไข

1.4.6 ออกแบบการทดลอง

1.4.7 รวบรวมข้อมูล วิเคราะห์และสรุปผลการวิจัย

1.4.8 จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

1.5 สถานที่ทำงานวิจัย

1.5.1 อาคารเครื่องมือวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

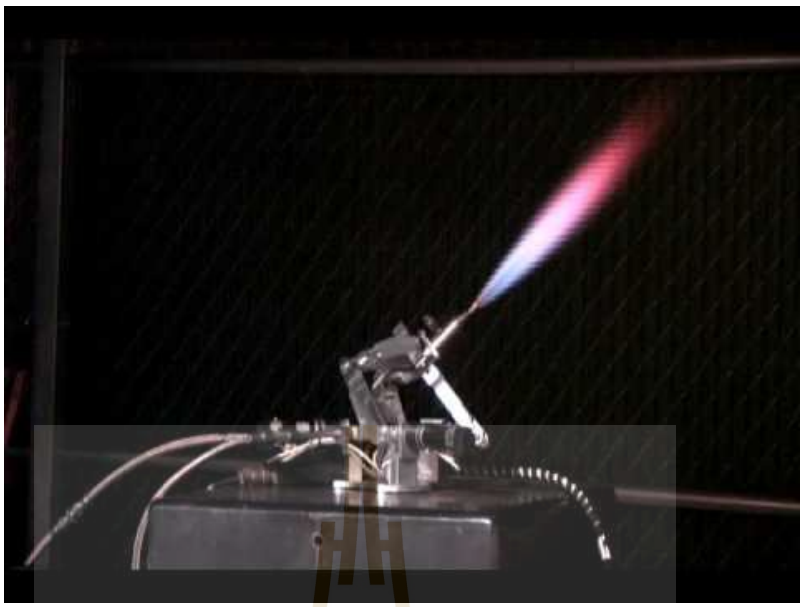
1.6.1 ได้เรียนรู้วิธีการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยสมการจลนศาสตร์

1.6.2 ได้เรียนรู้วิธีการควบคุมให้หุ่นยนต์กลไกแบบ Canfield ให้สามารถเคลื่อนที่ได้ตามวัตถุประสงค์

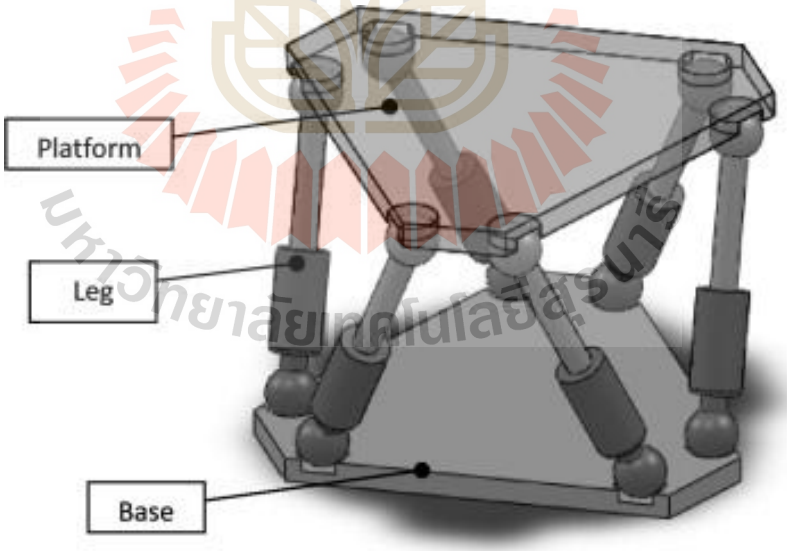
1.6.3 สามารถนำหุ่นยนต์กลไกแบบ Canfield นี้ ไปประยุกต์ใช้งานให้เกิดประโยชน์ในด้านอุตสาหกรรมต่อไปในอนาคตได้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี


Platform
Leg
Base

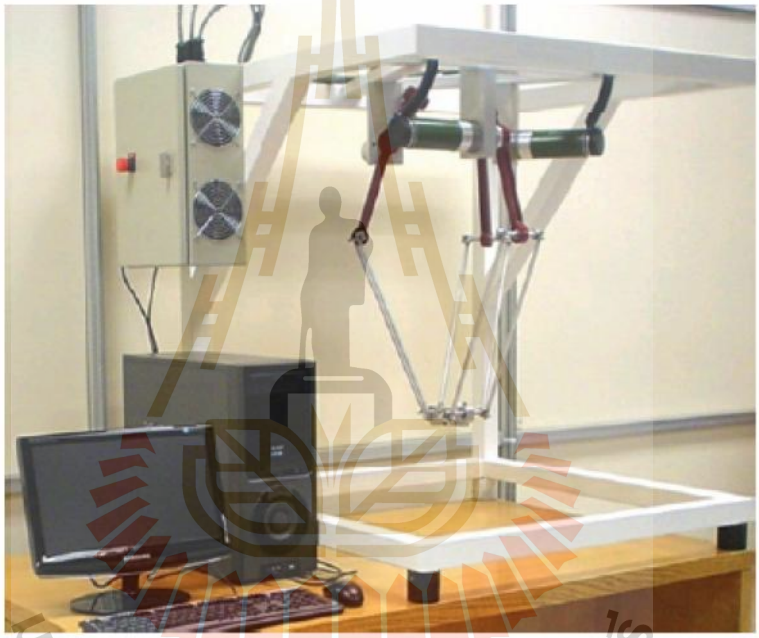
Chris Eskildsen , McKay Hansen , Brian Mahlstedt , Caleb Royer (2007)[5] ได้นำทฤษฎีการออกแบบของ Canfield Joint มาสร้างเครื่องผลักดันยานอวกาศโดยมี 3 ตัวกระตุ้นในการควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ของข้อต่อการหมุนส่งผลให้เครื่องผลักดันสามารถเคลื่อนที่ได้ในรูปแบบของครึ่งทรงกลม อุปกรณ์ที่สร้างขึ้นมานี้ถูกเรียกว่า Spacecraft Reaction Control System Thruster จะถูกนำไปติดตั้งบนยานอวกาศเพื่อใช้สำหรับการผลักดันยานอวกาศให้เป็นไปในทิศทาง pitch , yaw , roll อีกทั้งยังสามารถนำไปใช้ในการหันเหของแผงโซล่าที่ติดอยู่บนยานอวกาศเพื่อรับแสงอาทิตย์และนำพลังงานแสงอาทิตย์มาใช้ในยานอวกาศได้

David Raimundo Rivas-Lalaleo และคณะ (2009)[6] ได้ทำการออกแบบตัวหุ่นยนต์เดลต้าเป็นหุ่นยนต์ที่มีโครงสร้างเป็นแบบขนาน โดยมีโครงสร้างข้อต่อจากต้นกำลังแต่ละตัวไปยังปลายแขนเป็นโครงสร้างแบบปิดเป็นวงรอบ ข้อดีของแขนหุ่นยนต์เดลต้ามีความเร็วในการทำงานสูงเมื่อเปรียบเทียบกับแขนหุ่นยนต์แบบอื่นๆ และมีประสิทธิภาพในการทำงานและการเคลื่อนไหวอย่างอิสระได้ดีกว่าเพราะเป็นโครงสร้างแบบปิดมีความเที่ยงตรง (precision) สูง ข้อเสียของแขนหุ่นยนต์แบบเดลต้าคือปลายแขนโดยทั่วไปออกแบบให้มีมวลน้อยและชิ้นงานที่ใช้แขนหุ่นยนต์แบบเดลต้าก็ต้องมีมวลที่น้อยด้วยเพื่อป้องกันการสั่น เมื่อต้องการเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงและโดยทั่วไปจะมีพื้นที่การทำงานแคบ อีกทั้งยังมีความซับซ้อนในการคำนวณการควบคุม

Eli Bashevkin , Joseph konahan , Brian Mahlstedt , Andrew Kalman (2009)[7] ได้ศึกษาทฤษฎีของ Canfield Joint และนำมาประยุกต์ในการออกแบบและสร้างระบบติดตามดาวเทียมโดยฐานที่ยึดติดกับดาวเทียมเป็นรูปแบบของลูกบาศก์ ส่งผลให้มีประสิทธิภาพในการทำงานในการชี้ตำแหน่งได้แม่นยำมากยิ่งขึ้น

Olsson, (2009)[8] ได้อธิบายถึงการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหุ่นยนต์แบบเดลต้าที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์และไดรฟ์ซึ่งพัฒนาโดย ELAU GmbH โดยในแบบจำลองของหุ่นยนต์ Delta-3 นั้น ประกอบไปด้วย การคำนวณจลนศาสตร์ที่จะนำมาใช้ในการคำนวณหาเส้นทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์สามแขนและการเคลื่อนที่ของแผ่นปลายแขนที่สอดข้องกัน และศึกษาด้านพลวัตของหุ่นยนต์ที่มีอันตกริยากัน เมื่อมีการเคลื่อนที่ของสามแขน ที่สร้างขึ้นด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink และนำผลที่เปรียบเทียบกับผลที่ได้จากหุ่นยนต์ Delta-3 ที่ขับเคลื่อนด้วยอุปกรณ์และซอฟแวร์ของ ELAU GmbH

Naiyanut Jantepa (2010)[9] การพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เคลื่อนที่อิสระ 6 แกนสัมพันธ์กับโต๊ะหมุนชิ้นงาน 2 แกน เพื่อหาสมการและรูปแบบความสัมพันธ์ของการเคลื่อนที่และการหมุนสำหรับหุ่นยนต์เคลื่อนที่อิสระแบบ 6 แกนและโต๊ะ



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Dominique Deblasise (2012)[12] ได้ทำการออกแบบหุ่นยนต์แบบสามก้านโยง เพื่อทำการศึกษาการทำงานและการประยุกต์ใช้งานในการบรรจุผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม โดยใช้มอเตอร์แบบดีซี เป็นต้นกำลังและใช้โปรแกรม MATLAB ในการควบคุมการทำงาน ข้อดีของหุ่นยนต์แบบสามก้านโยง มีพื้นที่การทำงานกว้าง เพราะข้อต่อๆกับออกไปเรื่อยๆ และข้อเสียของหุ่นยนต์แบบสามก้านโยงความแข็งแรงต่ำ เพราะมีลักษณะเป็นโครงสร้างยื่นยาวออกไปจากฐาน

Somrerk Poodchakarn , Komkrich Thongsa-ard , Charoon Sae-eaw , Jirapomg Lim , Sai-yan Primee (2012)[13] นำเสนอการออกแบบและพัฒนาแขนหุ่นยนต์ 3 แนวแกน (3-axis Articulated Robot Arm) รวมทั้ง โปรแกรมควบคุมการเคลื่อนที่สำหรับการขนถ่ายวัสดุ โดยขั้นตอนการดำเนินงานประกอบด้วย ส่วนแรกเป็นการออกแบบโครงสร้างและระบบขับเคลื่อนของแขนหุ่นยนต์โดยใช้วัสดุอลูมิเนียม, สเต็ปมอเตอร์, ชุดเฟืองตรงและ ชุดเฟืองโซ่ เพื่อให้ได้ปริมาตรการทำงานในระบบพิกัดทรงกลมประมาณ 200,000 cm^3 โดยระบบควบคุมทาง ไฟฟ้าใช้การส่งสัญญาณแบบดิจิตอลจากอุปกรณ์เชื่อมต่อระหว่างคอมพิวเตอร์ไปยังชุดขับสเต็ปมอเตอร์ (Stepped Motor Driver) 5 ชุด

Supachock Tuntivivat (2012)[14] นำเสนอการออกแบบระบบควบคุมการยืดหยุ่น เพื่อใช้กับแขนกล CRS แบบ 3 แกน ให้มีการเคลื่อนที่จากตำแหน่งเริ่มต้นไปยังตำแหน่งที่ต้องการบนพื้นผิวระนาบเอียง 45 องศา ที่กำหนดโดยสามารถควบคุมแรงโดยทางอ้อมเมื่อทราบค่าความยืดหยุ่นของผิววัสดุและกำหนดความลึกที่ต้องการให้ปลายแขนกดลงบนวัสดุและทฤษฎีของจลนศาสตร์เป็นส่วนหนึ่งของงานวิจัยนี้

E. G. Merriam , J. E. Jones , S. P. Magleby , and L. L. Howell (2013)[15] ได้อธิบายเกี่ยวกับแนวคิดในการออกแบบและพัฒนากลไกที่เป็นเครื่องชี้ตำแหน่งในระบบ 2 DOF สำหรับการประยุกต์ใช้ในการผลักดันยานอวกาศ เสาอากาศ หรือระบบพลังงานแสงอาทิตย์ ใช้วิธีการวิเคราะห์เชิงตัวเลขในการพัฒนาและใช้ทฤษฎีการออกแบบของ Canfield Joint ในการสร้างเครื่องชี้ตำแหน่ง

Casas, C., al. (2014)[16] ได้นำเสนอไว้ว่าโดยปกติแล้วขอบเขตการทำงานของแผ่นเคลื่อนไหว จะสามารถหาคำตอบได้เมื่อทำการสร้างและทดสอบแล้วเท่านั้น โดยในงานวิจัยได้นำเสนอการสร้างแบบจำลองแผ่นเคลื่อนไหวเสมือนจริงไว้ เพื่อสามารถหาค่าขอบเขตการเคลื่อนไหวในแต่ละแนวแกนของแผ่นเคลื่อนไหวแทนการที่จะต้องสร้างอุปกรณ์จริงขึ้นมาก่อน จึงช่วยประหยัดทรัพยากรเป็นอย่างยิ่ง โดยสมัยก่อนจะทำการสร้างและทดสอบ เพื่อหาขอบเขตการทำงานและหากไม่ได้ตามต้องการก็จะต้องทำการออกแบบใหม่ หรือพัฒนาใหม่เพื่อให้ได้ตาม

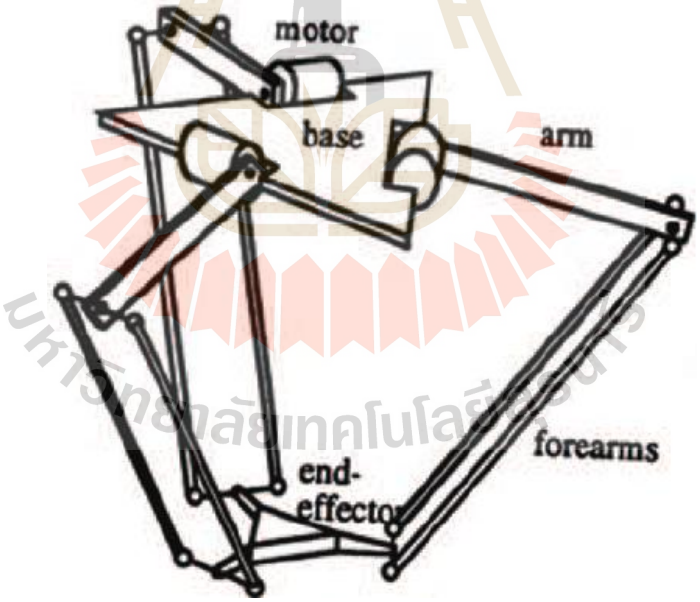
ต้องการ ดังนั้นการสร้างแบบจำลองเสมือนจริงนี้จึงสามารถตอบโจทย์ได้อย่างดีในการหาขอบเขตการทำงานของแผ่นเคลื่อนไหวจริง

Liu, N. and Wu, J.(2014)[17] ได้ออกแบบและสร้างแขนกลแบบไฮบริดที่ผสมระหว่างแขนกลแบบเดลต้าที่มี 3 องศาอิสระ และข้อมือแบบอนุกรมที่มีอีก 3 องศาอิสระ ที่เรียกว่า Delta-RST ซึ่งจะช่วยผสมผสานมีข้อดีของแขนกลทั้งสองแบบเข้าด้วยกัน คือสามารถเคลื่อนที่ได้เร็วพร้อมทั้งสามารถเข้าถึงพื้นที่การใช้งานในองศาต่างๆได้อย่างกว้างขวาง สำหรับหุ่นยนต์แบบเดลต้าการวิเคราะห์เมตริกซ์จาโคเบียนแบบผกผันและแบบตรงจะช่วยบ่งชี้รูปแบบการเกิดค่าเอกพจน์ในบางรูปแบบ

สุรัมภา จารัตน์, อนันต์ เกิดสิน (2014)[18] ได้นำเสนอการออกแบบและสร้างชุดสาธิตหุ่นยนต์เดลต้า 3 แกน ในการดำเนินการได้ออกแบบและสร้างชุดสาธิตโดยให้แขนของชุดสาธิตใช้ท่อคาร์บอนไฟเบอร์ (Fiber Carbon) ซึ่งมีน้ำหนักเบากว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอลูมิเนียม (Aluminum) ทำให้ในการเคลื่อนที่มีความคล่องตัวยิ่งขึ้น ระบบควบคุมใช้พีแอลซี(Programmable Logic Controller : PLC) เป็นตัวควบคุมการทำ งานของมอเตอร์ผ่านระบบการสื่อสารแบบ CANOpen ชุดสาธิต สามารถควบคุมผ่านหน้าจอแสดงผลที่สร้างขึ้นจากโปรแกรม Microsoft Visual Studio และส่งสัญญาณการควบคุมผ่านระบบ Modbus TCP/IP ไปประมวลผลยังพีแอลซีหน้าจอแสดงผล มีฟังก์ชันการทำงานหลายฟังก์ชัน เช่น Forward and Inverse, Jog X,Y,Z, Linear Motion เป็นต้น ในส่วนของการประเมินความเหมาะสมของชุดสาธิตนั้น

ธวัลรัตน์ ทองปัน (2014)[19] ได้นำเสนอการสร้างเครื่องต้นแบบเครื่องฝึกจำลองการบินโดยการเชื่อมต่ออุปกรณ์ควบคุมอากาศยานเข้ากับคอมพิวเตอร์ เพื่อให้การตอบสนองของภาพที่ปรากฏเหมือนกับการบินจริง ในด้านการเคลื่อนที่เครื่องต้นแบบนี้จะสร้างให้ห้องนักบินสามารถเคลื่อนที่ได้ใน 3 ทิศทาง คือ การควง(Roll) การเงย(Pitch) และการเคลื่อนที่ตอบสนองกับความเร่งหรือแรงกระแทก(Heave) โดยการทำงานจะใช้เครื่องกระตุ้นด้วยลมขนาดเล็กในการจำลองการเคลื่อนที่ ผลที่ได้จากงานวิจัยนี้จะทำให้วิศวกรด้านการบินและอากาศยานสามารถมีเครื่องจำลองการบินที่มีความสมจริง ราคาถูกกว่าสร้างจากต่างประเทศ และสามารถผลิตขึ้นเอง

อภิลักษณ์ หล่อนกลาง(2015)[20] ได้นำเสนอการสร้างเครื่องต้นแบบเครื่องฝึกจำลองการบิน การสร้างเครื่องฝึกบินจำลองนี้จะทำการสร้างห้องนักบิน(Cockpit) การจำลองภาพการบินจะใช้โปรแกรมสำเร็จรูปในการสร้างภาพ โดยจะทำการเชื่อมต่ออุปกรณ์ควบคุมอากาศยานเข้ากับคอมพิวเตอร์ เพื่อให้การตอบสนองของภาพที่ปรากฏเหมือนกับการบินจริง อีกทั้งเครื่องมือวัดมีความสมจริง ในด้านการเคลื่อนที่เครื่องต้นแบบนี้จะสร้างให้ห้องนักบินสามารถเคลื่อนที่ได้ใน 3


motor
base
arm
forearms
end-
effector

เพื่อช่วยออกแบบและเลือกความยาวของแต่ละก้านโยง เพื่อให้ได้พื้นที่การทำงานในระนาบแนวนอนที่เหมาะสมตามระดับความสูงที่ต้องการและทำการจำลองพื้นที่การทำงานของแขนหุ่นยนต์ก่อนที่จะดำเนินการสร้างจริง และทำการพัฒนาระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของปลายแขนหุ่นยนต์ตามจุดพิกัดและเส้นทางที่กำหนด ซึ่งใช้การคำนวณทางจลนศาสตร์ผกผัน โดยระบบควบคุมของแขนหุ่นยนต์ได้พัฒนาด้วยโปรแกรม MATLAB/GUI โดยเน้นให้มีฟังชันก์ที่ผู้ใช้งานควบคุมการเคลื่อนที่ของปลายแขนหุ่นยนต์ได้ง่ายตามเส้นทางที่กำหนดไว้ที่มีการประมาณค่าเส้นทางการเคลื่อนที่อย่างต่อเนื่องจากจุดพิกัดที่กำหนดโดยผู้ใช้งาน

2.2 ไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller)

ไมโครคอนโทรลเลอร์ คือ อุปกรณ์ที่สามารถสร้างระบบควบคุมได้ โดยอุปกรณ์นี้มีขนาดเล็ก และเป็นอุปกรณ์ประเภทสารกึ่งตัวนำที่มีการรวมเอาฟังก์ชันการทำงานต่าง ๆ ไว้ในตัวมันเอง ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับคอมพิวเตอร์ ซึ่งในที่นี้หมายถึงอุปกรณ์ภายในที่ประกอบด้วย หน่วยประมวลผลกลาง, พอร์ตในการเชื่อมต่อแบบต่าง ๆ

2.3.1 ส่วนประกอบทั่วไปของไมโครคอนโทรลเลอร์

2.3.1.1 หน่วยประมวลผลกลาง (Control Processing Unit)

2.3.1.2 หน่วยความจำซึ่งประกอบด้วย RAM (Random Access Memory) และ EPROM/ EPROM/PROM/ROM (Erasable Programmable Read Only Memory)

2.3.1.3 หน่วยรับและแสดงผลข้อมูล (Input/Output) ซึ่งมีพอร์ตขยายแบบขนาน (Parallel) และอนุกรม (Serial)

2.3.1.4 ตัวนับเวลา (Timer)

2.3.1.5 หน่วยควบคุมการอินเตอร์รับ (Interrupt Controller)

ส่วนประกอบเหล่านี้เป็นเพียงส่วนประกอบพื้นฐานของไมโครคอนโทรลเลอร์ ไมโครคอนโทรลเลอร์นั้นยังมีส่วนประกอบอย่างอื่นอีก เพื่อเพิ่มเติมความสารถขึ้นอยู่กับไมโครคอนโทรลเลอร์แต่ละเบอร์ด้วย เช่น

- ADC (Analog to Digital) ส่วนภาครับสัญญาณอนาล็อกแปลงไปเป็นสัญญาณดิจิตอล

- DAC (Digital to Analog) ส่วนภาคส่งสัญญาณดิจิตอลแปลงไปเป็นสัญญาณอนาล็อก

- I2C (Inter Integrate Circuit Bus) เป็นการสื่อสารอนุกรม แบบซิงโครนัส (Synchronous) เพื่อใช้ ติดต่อสื่อสารระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์ (MCU) กับอุปกรณ์ภายนอก ซึ่งถูกพัฒนาขึ้นโดยบริษัท Philips Semiconductors โดยใช้สายสัญญาณเพียง 2 เส้นเท่านั้น คือ Serial Data (SDA) และสาย Serial Clock (SCL) ซึ่งสามารถเชื่อมต่ออุปกรณ์จำนวนหลาย ๆ ตัวเข้าด้วยกันได้ ทำให้ MCU ใช้พอร์ตเพียง 2 พอร์ตเท่านั้น

- SPI (Serial Peripheral Interface) เป็นการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์เพื่อรับส่งข้อมูลแบบซิงโครนัส (Synchronize) มีสัญญาณนาฬิกาเข้ามาเกี่ยวข้องระหว่างไมโครคอนโทรลเลอร์ (Microcontroller) หรือจะเป็นอุปกรณ์ภายนอกที่มีการรับส่งข้อมูลแบบ SPI อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นมาสเตอร์ (Master) โดยปกติแล้วจะเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ หรืออาจกล่าวได้ว่าอุปกรณ์ Master จะต้องควบคุมอุปกรณ์ Slave ได้โดยปกติตัว Slave มักจะเป็นไอซี (IC) หน้าที่พิเศษต่าง ๆ เช่น ไอซีอุณหภูมิ, ไอซีฐานเวลานาฬิกาจริง (Real-Time Clock) หรืออาจเป็นไมโครคอนโทรลเลอร์ที่ทำหน้าที่ในโหมด Slave ก็ได้เช่นกัน

- PWM (Pulse Width Modulation) การสร้างสัญญาณพัลส์แบบสแควร์เวฟ ที่สามารถปรับเปลี่ยนความถี่และ Duty Cycle ได้เพื่อนำไปควบอุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น มอเตอร์ - UART (Universal Asynchronous Receiver Transmitter) ทำหน้าที่รับส่งข้อมูล แบบอะซิงโครนัสสำหรับมาตรฐานการรับส่งข้อมูลแบบ RS-232

2.3.2 ประเภทของไมโครคอนโทรลเลอร์

ไมโครคอนโทรลเลอร์ มีด้วยกันหลายประเภทแบ่งตามสถาปัตยกรรม (การผลิตและกระบวนการทำงานระบบการประมวลผล) ที่มีใช้ในปัจจุบันยกตัวอย่างดังนี้

2.3.2.1 ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PIC (บริษัทผู้ผลิต Microchip)

2.3.2.2 ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MCS51 (บริษัทผู้ผลิต Atmel, Philips)

2.3.2.3 ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR (บริษัทผู้ผลิต Atmel)

2.3.2.4 ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino (บริษัทผู้ผลิต Atmel) เป็นการนำ AVR มาเขียน Firmware Boot Loader คำสั่งใช้งานใหม่ ซึ่งข้อแตกต่างสำหรับบอร์ด Arduino กับบอร์ดทดลอง ทั่วไป คือ เป็น Open Source ซึ่งหมายถึง การเปิดเผยวิธีการสร้างทั้งในส่วนของ Hardware ไม่ว่า จะเป็นวงจรต่าง ๆ ภายในบอร์ด และตัว Tool Software ที่จะเป็นเครื่องมือที่จะใช้ในการเขียนคำสั่ง ต่าง ๆ ลงบอร์ด ล้วนเป็น Open Source ทั้งหมด ส่งผลให้นักวิจัยทุกคนมีสิทธิ์ที่จะดาวน์

โหลด โปรแกรมต่าง ๆ ที่เกี่ยวกับการพัฒนา Arduino ไปใช้ฟรี และสามารถสร้างวงจรเองจากต้นแบบ ใช้ฟรีได้เช่นกัน ซึ่งข้อดี คือ เป็นการสร้างมาตรฐานในการพัฒนาที่จะเป็นไปในทิศทางเดียวกัน เพราะนักพัฒนาทั่วโลกนิยมใช้งานบอร์ดชนิดนี้กันมากขึ้น ดังนั้นไม่ว่าจะเป็นในเรื่องของตัวอย่าง Source Code ตลอดจนการพูดคุยปัญหาเรื่องการใช้งาน และตัวอย่างการต่อวงจรเพื่อการใช้งานใน รูปแบบต่าง ๆ จะถูกพัฒนาภายใต้ Open Source ของบอร์ดนี้

2.3.2.5 ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล ARM7, ARM9 (บริษัทผู้ผลิต Atmel, Philips, Analog Device, Samsung, STMicroelectronics)

2.3.2.6 ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล Basic Stamp (บริษัทผู้ผลิต Parallax)

2.3.2.7 ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล PSOC (บริษัทผู้ผลิต CYPRESS)

2.3.2.8 ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล MSP (บริษัทผู้ผลิต Texas Instruments)

2.3.2.9 ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล 68HC (บริษัทผู้ผลิต MOTOROLA)

2.3.2.10 ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล H8 (บริษัทผู้ผลิต Renesas)

2.3.2.11 ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล RABBIT (บริษัทผู้ผลิต RABBIT SEMICONDUCTOR)

2.3.2.12 ไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล Z80 (บริษัทผู้ผลิต Zilog)

2.3.3 ภาษาที่ใช้เขียนโปรแกรมควบคุมไมโครคอนโทลเลอร์

2.3.3.1 ภาษา Assembly

2.3.3.2 ภาษา Basic

2.3.3.3 ภาษา C หรือ C++

2.3.3.4 ภาษา Pascal

ภาษาดังกล่าวที่กล่าวในเบื้องต้น ไมโครคอนโทรลเลอร์บางตระกูล จะใช้ได้ครบทุกภาษา แต่บางตระกูลจะใช้ได้บางภาษา ขึ้นอยู่กับบริษัทผู้ผลิต Software (โดยทั่วไปจะเรียกว่า Editor and Complier) ที่ใช้เขียนภาษาไมโครคอนโทรลเลอร์นั้นจะผลิตออกมาให้ Support หรือไม่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2.3 เซอร์โวมอเตอร์ (Servo Motor)

หลักการพื้นฐานของ Servo Motor และระบบควบคุมในปัจจุบันการนำเอาระบบ Automation System เข้ามาใช้ในระบบงานการผลิต การลำเลียงจัดส่ง การจัดเก็บในโรงงานอุตสาหกรรมมากขึ้น ตลอดจนมีการพัฒนาปรับปรุงระบบแบบเดิมที่ไม่มีใช้ มาใช้มากขึ้นด้วย หนึ่งในระบบ Automation System ที่มีการนำมาใช้ นอกเหนือไปจากพวกระบบ Pneumatic และ Hydraulic คือ Servo Motor & Control ซึ่งเป็นระบบที่นำมาใช้อย่างกว้างขวางมากในแทบทุกอุตสาหกรรมเช่น Packaging Machinery, Automate Manufacturing, Printing, Labeling, Textile Machinery, Food Processing, Plastic Machinery, Metal Forming รวมถึงงานที่มีการปรุยุกต์ใช้ เช่น Pick and Place, Flying Cutoffs, X-Y-Z Table, Synchronized Speed

การที่ Servo Motor มีการใช้อย่างกว้างขวางก็เพราะว่ามีความยืดหยุ่นในการใช้งานสูง สามารถควบได้คุมได้ทั้ง ความเร็ว (Speed), ตำแหน่ง (Position) และแรงบิด (Torque) ซึ่งให้ประสิทธิภาพสูงสุด ในกระบวนการควบคุมมอเตอร์ เมื่อเปรียบเทียบกับมอเตอร์ธรรมดา (AC MOTOR) หรือมอเตอร์ กระแสตรง (DC MOTOR) การใช้ Servo Motor & Control มีส่วนประกอบหลัก 2 ส่วน คือ

2.4.1 Servo Motor

ซึ่งมีขนาดตั้งแต่ 30 W ขึ้นไปจนถึง 370 kW โครงสร้างภายในจะแตกต่างจากมอเตอร์เหนี่ยวนำ โดยที่โรเตอร์ (Rotor) จะเป็นแม่เหล็กถาวร (Permanent Magnet) การออกแบบลดแรงเฉื่อยให้มากที่สุด ซึ่งจะเห็นจากรูปทรงเหลี่ยมและยาว ซึ่งมีผลทำให้การตอบสนองต่ออัตราเร่ง (Accelerate), ความเร็ว (Speed) และอัตราหน่วง (Decelerate) ทำได้ดีเมื่อเทียบกับมอเตอร์เหนี่ยวนำหรือมอเตอร์ทั่ว ๆ ไป การออกแบบจะมีสัญญาณป้อนกลับทั้งความเร็วและตำแหน่ง ที่ท้ายมอเตอร์ (ซึ่งอาจจะเป็น Encoder, Resolver หรือประเภทอื่น ๆ ก็ได้)

2.4.2 โครงสร้างภายในของ Servo Motor

AC Servo Motor, DC Brushless Motor จัดอยู่ในกลุ่มมอเตอร์ประเภท Synchronous Motor คือ ความเร็ว Rotor จะมีค่าเท่ากับความเร็วสนามแม่เหล็กในมอเตอร์ (Rotating Field)

2.4.3 Amplifier หรือ Driver

เป็นตัวขับ Servo Motor ใช้ Servo Motor โดยต่อไฟโดยตรงเหมือนกับมอเตอร์ธรรมดา ไม่ต้องต่อผ่าน Amplifier ซึ่งจะเป็นตัวจ่ายไฟและรับสัญญาณป้อนกลับจากตัวเซอร์โวมอเตอร์ (Encoder feedback) ถ้ามีเฉพาะ Servo Motor และ Amplifier เราควบคุมได้ แค่ความเร็ว (Speed) และแรงบิด (Torque) เท่านั้น คล้าย ๆ กับการใช้ Inverter แต่แตกต่างกันที่จะควบคุมรอบได้เที่ยงตรง แม่นยำกว่ามาก และมีแรงบิดคงที่ ตลอดช่วงความเร็วของมอเตอร์ หากต้องการควบคุมตำแหน่งด้วย (Position Control) จะต้องมี Standalone Controller หรือ Built-in Controller หรือ PLC with Module Controller หรือ PC with PCI Card Controller

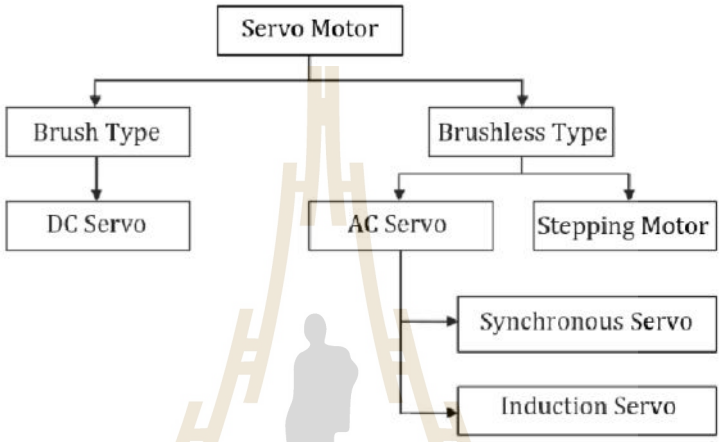
ดังนั้นในระบบ Servo Motor อย่างน้อยที่สุด จะต้องประกอบด้วย Servo Motor และ Servo Driver สำหรับงานที่ ต้องการควบคุมแค่ Speed หรือ Torque การเลือก Servo Driver ใช้กับ Servo Motor ก็เหมือนกับการเลือก Inverter ใช้กับมอเตอร์อินดักชั่น โดยเลือกให้ Servo กำลังขับมากกว่าหรือเท่ากับของ Servo Motor สิ่งที่แตกต่างและต้องระมัดระวังก็คือ โดยทั่วไปมักไม่มีปัญหาในการใช้ nverter ยี่ห้อหนึ่งกับมอเตอร์อีกยี่ห้อหนึ่ง แต่กับ Servo Motor ไม่ใช่ มักใช้ Driver และ Servo Motor ยี่ห้อเดียวกัน หรือที่จับคู่กันแล้วโดยผู้ผลิต ทั้งนี้เป็นเพราะปัจจัยหลักดังนี้

Feedback ที่ Servo Motor ติดอยู่ เป็นแบบชนิดเดียวกันหรือไม่: Incremental Encoder, Resolver, Serial Encoder ถ้าใช้Servo Drive ที่รับ Feedback จากมอเตอร์เป็น Resolver ไปใช้กับ Servo Motor ที่ติด Encoder ก็จะไม่สามารถใช้งานกันได้ ดังนั้นการจับคู่ Servo Motor และ Servo Driver จะต้องพิจารณาปัจจัยข้างต้นด้วย เมื่อต้องใช้ต่างยี่ห้อกันหรือใช้ทดแทนกัน

2.4.4 ชนิดของเซอร์โวมอเตอร์

การใช้งานเซอร์โวมอเตอร์ ในเครื่องจักรกลอัตโนมัติ ได้มีการใช้งานมาเป็นเวลานานแล้ว จากการพัฒนาโครงสร้างการทำงานของมอเตอร์ และระบบการควบคุมที่ต้องการการตอบสนองทางด้านจลนศาสตร์ ความเชื่อถือได้ในการทำงาน (Reliability) และสมรรถนะทางด้านการบำรุงรักษา (Maintenance Ability) จึงทำให้ปัจจุบันมีเซอร์โวมอเตอร์อยู่ด้วยกัน หลายลักษณะซึ่งสามารถจำแนกได้ตามลักษณะโครงสร้าง และการทำงานอาจแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่มีโครงสร้างการทำงานของมอเตอร์ประกอบด้วยแปรงถ่าน (Brush Type) และกลุ่มที่ ไม่ใช้แปรงถ่าน (Brushless Type)

ก) เซอร์โวมอเตอร์ชนิดมีแปรงถ่าน สเตเตอร์เป็นแม่เหล็กถาวร ส่วนโรเตอร์ยังใช้แปรงถ่านและคอมมิเตเตอร์ เรียงกระเข้าสู่ขดลวดอาร์เมเจอร์เหมือนกับมอเตอร์ กระแสตรง (DC Motor) ทั่วไป



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

2.4 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับหุ่นยนต์

2.4.1 การหาองศาอิสระ

การเคลื่อนที่ในระบบสามมิติสามารถบรรยายได้โดยพารามิเตอร์ค่าตำแหน่งและมุม การหมุนองศาเสรี (degree of freedom) คือ จำนวนของพารามิเตอร์เป็นอิสระต่อกันที่ใช้ในการบรรยายการเคลื่อนที่ของวัตถุ องศาเสรีจะมีค่าน้อยลงเมื่อวัตถุนั้น ถูกจำกัดโดยโครงสร้างกายภาพ ยกตัวอย่างเช่น ตำแหน่งของรถที่เคลื่อนที่บนรางเส้นตรงจะมีองศาเสรีเท่ากับ 1 คือ ตำแหน่งของรถบนราง รถยนต์ที่ขับบนพื้นที่ราบมีองศาเสรีเท่ากับสาม คือ ค่าพิกัดในระนาบ(x,y) เทียบกับแกนอ้างอิง และค่าของมุมที่กำหนดทิศทางการเคลื่อนที่ของรถ ในขณะที่เครื่องบินในอากาศ ณ เวลาใดๆ จะมีองศาเสรีเท่ากับหก คือ 3 ค่าตำแหน่งพิกัดในระบบสามมิติ (x,y,z) และค่ามุม 3 ค่าในการกำหนดทิศทางที่อาจบรรยายโดยมุมออยเลอร์ หรือโดยมุมการหมุนรอบแกนหลักของเฟรมพิกัดอ้างอิง การเคลื่อนที่ของตัวทำงานส่วนปลายหุ่นยนต์ในระบบสามมิติ สามารถเปรียบได้กับเครื่องบินในอากาศ ดังนั้นองศาเสรีที่จำเป็นเท่ากับ 6 หากหุ่นยนต์มีองศาเสรี

2.4.2 พื้นที่การทำงาน (workspace)

หุ่นยนต์หลายโมเดลมีการเรียกชื่อตามลักษณะรูปทรงของปริมาตรการเคลื่อนที่ของตัวเครื่องมือ เช่น รูปสี่เหลี่ยม ทรงกระบอกหรือทรงกลม พื้นที่การทำงาน (workspace) จึงนิยามได้ว่าเป็นพื้นที่ (ปริมาตร) ทั้งหมดที่ตัวทำงานส่วนปลายสามารถเข้าถึงได้ มีการให้คำจำกัดความเฉพาะลงไปเป็นพื้นที่การทำงานเข้าถึงได้ (reachable workspace) คือ เซตของตำแหน่งทั้งหมดที่ตัวทำงานส่วนปลายเข้าถึงได้และพื้นที่การทำงานได้อย่างคล่องแคล่ว (dexterous workspace) คือ ตำแหน่งที่ตัวทำงานส่วนปลายเข้าถึงได้ในทุกทิศทาง

2.4.3 ระบบพิกัดเฟรม

การทำงานของหุ่นยนต์ใน 3 มิติสามารถถูกบรรยายได้อย่างเหมาะสมโดย ระบบพิกัดคาร์ทีเซียน (Cartesian coordinate system) ที่มีแกนหลัก X,Y,Z ตั้งฉากกันตามกฎมือขวา ตามที่ใช้กันทั่วไปในทางวิศวกรรมอยู่แล้ว สำหรับเวกเตอร์หรือตำแหน่งในระนาบ 2 มิติอาจใช้การบรรยายโดย ระบบพิกัดเชิงขั้ว (polar coordinate system) ที่กำหนดโดยรัศมี r และมุมที่กระทำกับแกน X ระบบพิกัดคาร์ทีเซียนที่ติดให้กับส่วนต่างๆ ของหุ่นยนต์จะเรียกว่า เฟรม (frame) เฟรมที่ใช้อ้างอิง เรียกว่า เฟรมตรึง (fixed frame) หรือ เฟรมโลก (world frame) บนสมมุติฐานที่ว่าการ

เคลื่อนที่ของวัตถุใดๆ จะสัมพัทธ์กับพื้นโลกที่ใช้เป็นจุดอ้างอิงคงที่ เฟรมติดที่ฐานของหุ่นยนต์เรียกว่า เฟรมฐาน (base frame) และเฟรมที่ตัวทำงานส่วนปลายเรียกว่า เฟรมเครื่องมือ (tool frame)

ในการวิเคราะห์จลนศาสตร์ของหุ่นยนต์ต้องอาศัยเครื่องมือคณิตศาสตร์ที่มีความเหมาะสมทั้งการคำนวณบนแผ่นกระดาษและคอมพิวเตอร์ ในการที่จะหาความสัมพันธ์ของเฟรมที่ต่ออนุกรมกันบนโครงสร้างของแขน การแปลงเอกพันธุ์ (homogeneous transformation) คือ การบรรยายความสัมพันธ์ของเฟรมคู่หนึ่งในรูปของเมตริกซ์ การแปลงเอกพันธุ์รวมของหุ่นยนต์จะอยู่ในรูปผลคูณของการแปลงเอกพันธุ์ระหว่างก้านต่อจากฐานขึ้นไปยังเครื่องมือ

2.4.4 ชนิดแขนกล (ประเภทของหุ่นยนต์อุตสาหกรรม, 2005)

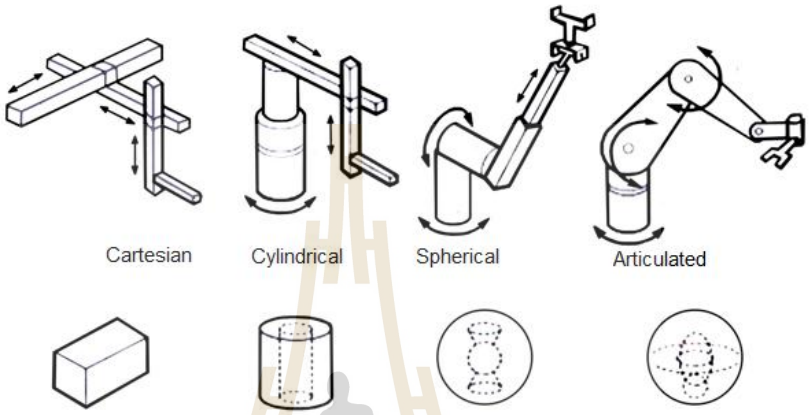
รูปแบบแขนกลที่ใช้ในปัจจุบันมีหลากหลายชนิด ซึ่งแล้วแต่ความเหมาะสมของงาน งานแต่ละแบบมีปัญหาที่ต้องอาศัยลักษณะของแขนกลไม่เหมือนกัน ดังนั้นจึงเกิดเป็นรูปแบบแขนกลที่หลากหลายโดยจะอธิบายเรียงตามลำดับจากซ้ายไปขวาดังรูปที่ 2.7 แสดงลักษณะแขนกลแบบต่างๆ

2.4.4.1 แบบพิกัดฉาก (Cartesian Coordinate) แกนทั้ง 3 ของหุ่นยนต์จะเคลื่อนที่เป็นแบบเชิงเส้น (Prismatic) โดยการทำงานจะต่างจากแขนมนุษย์ โดยจะมีฐานประกอบตัวเลื่อนทำหน้าที่เคลื่อนที่แขนกลไปด้านหน้าหรือด้านหลังและมีแขนที่ทำหน้าที่คล้ายลิฟต์ทำหน้าที่เคลื่อนแขนกลให้เคลื่อนที่แบบขึ้นลงได้

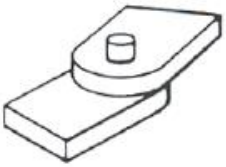
2.4.4.2 แบบพิกัดทรงกระบอก (Cylindrical Coordinate) หุ่นยนต์ประเภทนี้จะมีแกนที่ 2 (ไหล่) และแกนที่ 3 (ข้อศอก) เป็นแบบ prismatic ส่วน แกนที่ 1 (เอว) จะเป็นแบบหมุน (revolute) ทำให้การเคลื่อนที่ได้พื้นที่ในวงกว้างขึ้น โดยจะทำงานเป็นรูปทรงกระบอก คล้ายหุ่นยนต์ยกของ แขนกลจะเคลื่อนที่ขึ้นและลงพร้อมกับปรับ ความยาวของแขนกล เพื่อจับวัตถุในระดับความสูงที่แตกต่างกัน

2.4.4.3 แบบพิกัดเชิงขั้ว (Spherical Coordinate) มีสองแกนที่เคลื่อนในลักษณะการหมุน (Revolute Joint) คือแกนที่ 1 (เอว) และแกนที่ 2 (ไหล่) ส่วนแกนที่ 3 (ข้อศอก) จะเป็นลักษณะของการเคลื่อนที่แนวเส้นตรง ซึ่งทำให้สามารถหยิบจับวัตถุรอบๆแขนกลได้อย่างสะดวก แขนกลแบบนี้พบมากในโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งเหมาะกับงานที่ตั้ง อยู่กับที่แต่ก็สามารถนำมาติดตั้ง กับหุ่นยนต์ที่เคลื่อนที่ได้เช่นกัน

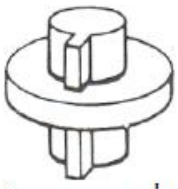
2.4.4.4 แบบแกนพิกัดแบบหมุนรอบ (Articulated Coordinate) ทุกแกนการเคลื่อนที่จะเป็นแบบหมุน (Revolute) รูปแบบการเคลื่อนที่จะคล้ายกับแขนมนุษย์ซึ่งจะ



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

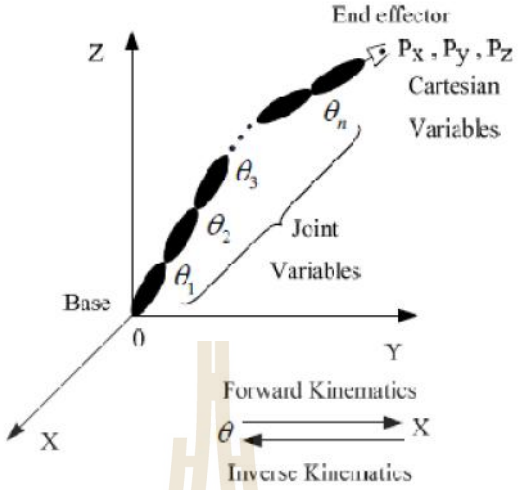


ก) ข้อต่อแบบหมุน



ข) ข้อต่อแบบเลื่อน

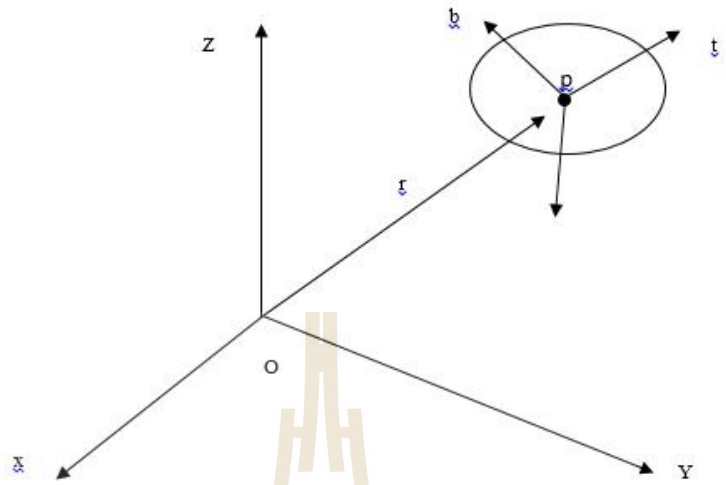
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



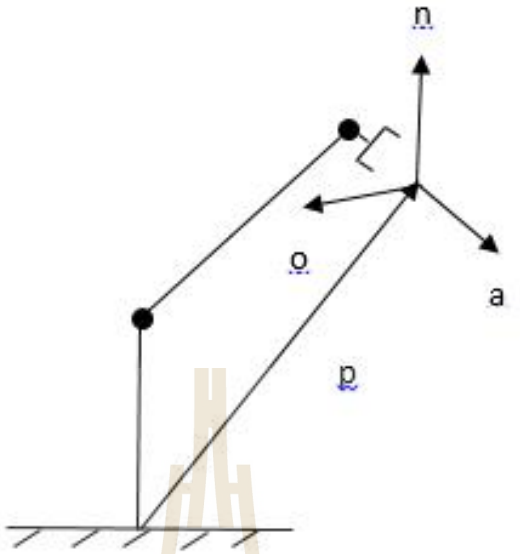
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ที่ 2.

$$r = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



$$n = o \times a$$

...เวกเตอร์หนึ่งห...ด่วย ดั...

$$R = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x \\ n_y & o_y & a_y \\ n_z & o_z & a_z \end{bmatrix}$$

2.4.5.5 สมการจลนศาสตร์

การบอกตำแหน่ง และการหมุนของปลายแขนกล (End Effectors) สามารถแสดงอยู่ในรูปของสมการบอกตำแหน่งด้วยเวกเตอร์ P และการหมุนด้วย (n , o , a) ดังรูปที่ 2.11

ส่วนประกอบของเวกเตอร์ทั้ง 3 กำหนดขึ้นในระบบพิกัดตามแกนคาร์ทีเซียนที่ยึดติดอยู่กับฐานของหุ่นยนต์โดยที่เวกเตอร์ a คือ เวกเตอร์ขนาดหนึ่งหน่วยมีทิศทางเคลื่อนที่พุ่งเข้าหาวัตถุส่วนเวกเตอร์ o มีทิศทางตามนิ้วจับชิ้นงานทั้ง 2 นิ้ว ในที่นี้คือมีทิศทางตามจุดปลายทั้ง 2 ของนิ้วและเวกเตอร์ n คือ เวกเตอร์ที่ตั้งฉาก โดยเวกเตอร์ทั้ง หมดเป็นไปตามกฎมือขวาคือ n=o × a การบอกตำแหน่งสามารถบอกโดยใช้ระบบพิกัดอื่นได้อีก เช่นระบบพิกัดทรงกระบอก (CylindricalCoordinates) และระบบพิกัดทรงกลม (Spherical Coordinates) ส่วนการหมุนสามารถใช้วิธีการแบบอื่นได้ เช่น การหมุนแบบมุมออยเลอร์ (Euler Angles) และการหมุนแบบ RPY (Roll-Pitch-Yaw)

2.4.5.6 มุมออยเลอร์ (Saeed B. Niku, 2001)

การหมุนแบบมุมออยเลอร์สามารถอธิบายได้ด้วยการหมุนรอบแกน 3 แกนโดยเริ่มจากแกน Z ด้วยมุมφ และหมุนรอบแกน Y ด้วยมุมθ และหมุนรอบแกน Z ด้วยมุมψ หรือเรียกการหมุนนี้ว่า 2-3-2 ดังสมการที่ 2.4

$$Euler(\emptyset,\theta,\varphi) = R_z(\emptyset)R_y(\theta)R_z(\varphi)$$

$$Euler(\emptyset,\theta,\varphi) = \begin{bmatrix} C\emptyset & -S\emptyset & 0 \\ S\emptyset & C\emptyset & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & C\theta & -S\theta \\ 0 & S\theta & C\theta \end{bmatrix}\begin{bmatrix} C\varphi & -S\varphi & 0 \\ S\varphi & C\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$Euler(\emptyset,\theta,\varphi) = \begin{bmatrix} C\emptyset C\theta C\varphi - S\emptyset S\varphi & -C\emptyset C\theta S\varphi - S\emptyset C\varphi & C\emptyset S\theta \\ S\emptyset C\theta C\varphi + C\emptyset S\varphi & -S\emptyset C\theta S\varphi + C\emptyset C\varphi & S\emptyset S\theta \\ -S\theta C\varphi & S\emptyset S\varphi & C\theta \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

ดังนั้นการหมุนของเวกเตอร์ n,o,a ณ.จุดปลายของแขนกลเขียนอยู่ในรูปของ Euler Coordinates $\emptyset,\theta,\varphi$ ได้ดังสมการที่ 2.5

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

$$\begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x \\ n_y & o_y & a_y \\ n_z & o_z & a_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C\emptyset C\theta C\varphi - S\emptyset S\varphi & -C\emptyset C\theta S\varphi - S\emptyset C\varphi & C\emptyset S\theta \\ S\emptyset C\theta C\varphi + C\emptyset S\varphi & -S\emptyset C\theta S\varphi + C\emptyset C\varphi & S\emptyset S\theta \\ -S\theta C\varphi & S\emptyset S\varphi & C\theta \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

2.4.5.7 การหมุนแบบ RPY (Saeed B. Niku, 2001)

การหมุนแบบ RPY การหมุนนี้เป็นการหมุน 3 แบบ คือ หมุนรอบแกน *a,o,n* ตามลำดับโดยมีข้อจำกัดว่าแกนปัจจุบันจะขนานไปกับแกนอ้างอิง ดังนั้นการหมุนจึงเหมือนกับการหมุนแกนอ้างอิงก่อนการหมุน RPY ถ้ากรณีแกนปัจจุบันไม่ขนานกับแกนอ้างอิง การหมุนขั้นสุดท้ายจะเป็น การรวมกันกับการหมุนก่อนหน้าและ Post Multiply ด้วย RPY ลำดับของการหมุน

ประกอบไปด้วย

Roll เป็นการหมุนรอบแกน Z ที่เคลื่อนที่ หรือแกน *a*

Pitch เป็นการหมุนรอบแกน Y ที่เคลื่อนที่ หรือแกน *o*

Yaw เป็นการหมุนรอบแกน X ที่เคลื่อนที่ หรือแกน *n*

เมตริกซ์การหมุนแบบ Roll-Pitch-Yaw สามารถพิจารณาจากสมการที่ 2.6

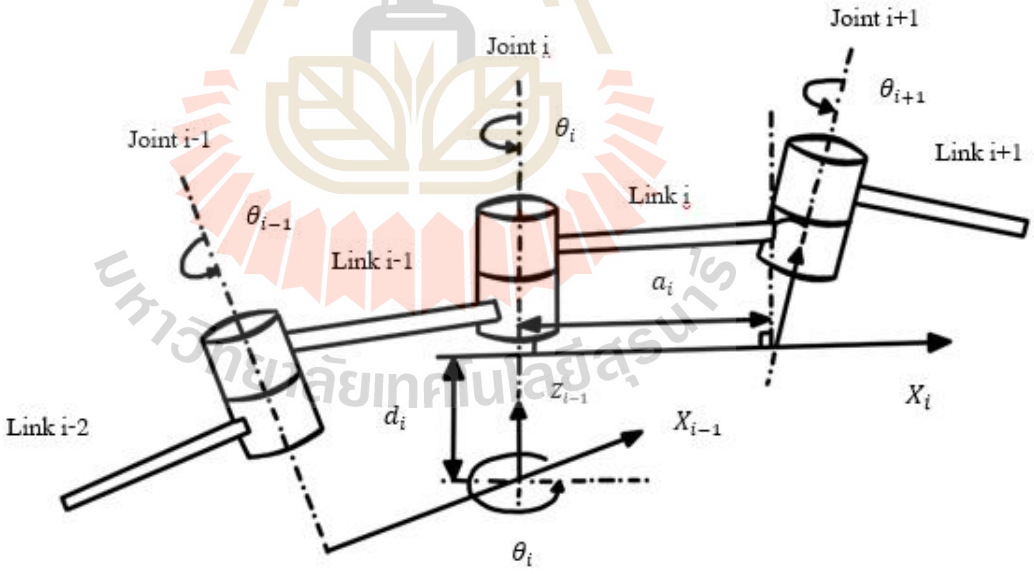
$$RPY(\gamma,\beta,\alpha) = R_z(\gamma)R_y(\beta)R_z(\alpha)$$

$$RPY(\gamma,\beta,\alpha) = \begin{bmatrix} C\gamma & -S\gamma & 0 \\ S\gamma & C\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} C\beta & 0 & S\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -S\beta & 0 & C\beta \end{bmatrix}\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & C\alpha & -S\alpha \\ 0 & S\alpha & C\alpha \end{bmatrix}$$

$$RPY(\gamma,\beta,\alpha) = \begin{bmatrix} C\beta C\gamma & S\alpha S\beta C\gamma . C\alpha S\gamma & C\alpha S\beta C\gamma + S\alpha S\gamma \\ C\beta S\gamma & S\alpha S\beta S\gamma + C\alpha C\gamma & C\alpha S\beta S\gamma . S\alpha C\gamma \\ -S\beta & S\alpha C\beta & C\alpha C\beta \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

คำตอบของการหมุนของเวกเตอร์ *a,o,n* สามารถหาได้ดังสมการที่ 2.7

$$\begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x \\ n_y & o_y & a_y \\ n_z & o_z & a_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C\beta C\gamma & S\alpha S\beta C\gamma . C\alpha S\gamma & C\alpha S\beta C\gamma + S\alpha S\gamma \\ C\beta S\gamma & S\alpha S\beta S\gamma + C\alpha C\gamma & C\alpha S\beta S\gamma . S\alpha C\gamma \\ -S\beta & S\alpha C\beta & C\alpha C\beta \end{bmatrix} \quad (2.7)$$



นิยาม นี้

a_i เป็ Z_{i-1} Z_i วัด X_i

d_i เป็

น X_{i-1}

เกน X_i วัด

งแนวเกน Z_{i-1}

α_i เป็

เง Z_{i-1}

Z_i รอ

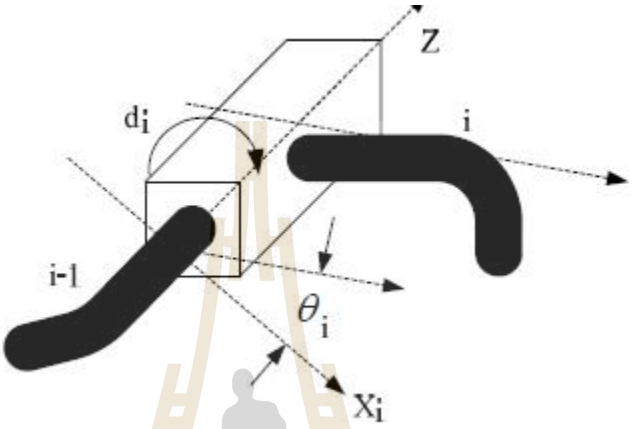
X_i

θ_i มุ

X_{i-1} ี่

X_i ห

Z_{i-1}



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ไปอีก 1 หลัก จะได้เมตริกซ์ใหม่นี้เรียกว่า เมตริกซ์การแปลง (Transformation Matrix) โดยมีขนาด 4×4 มีลักษณะ ดังนี้

$$T_{NA} = \begin{bmatrix} Rotation_{(3x3)} & Translation_{(3x1)} \\ 0 \quad 0 \quad 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} & R & & P \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2.8}$$

โดย N คือ แกนอ้างอิงเริ่มต้น และ A คือ แกนอ้างอิงสุดท้ายเช่น วัตถุมีการหมุนรอบแกน X เป็นมุม θ และเลื่อนไปยังตำแหน่ง (1,1,0) ที่ตำแหน่งของแกนอ้างอิงที่ 1 สามารถเขียนได้ ดังสมการที่ 2.9

$$T_{01} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & cos\theta & -sin\theta & 1 \\ 0 & sin\theta & cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2.9}$$

เมตริกซ์การแปลงนั้นมีคุณสมบัติเช่นเดียวกับเมตริกซ์การหมุนคือ สามารถนำมาต่อกัน สำหรับ กรณีที่มีการเคลื่อนย้ายวัตถุในหลายๆ แกนอ้างอิง

$$T_{03} = T_{01}T_{12}T_{23} \tag{2.10}$$

จากสมการที่ 2.10 แสดงถึง T_{03} สามารถอ้างอิงจากแกนอ้างอิงที่ 1 ไปยังแกนอ้างอิงที่ 2 และแกนอ้างอิงที่ 3 อย่างไรก็ตามการหาอินเวอร์สของ T นั้นไม่เหมือนกับเมตริกซ์การหมุน เพราะเมตริกซ์การแปลงไม่มีคุณสมบัติออทอร์นอมัลการหาอินเวิร์สเมตริกซ์ T

$$T^{-1} = \begin{bmatrix} & R^T & & (-R^T P) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2.11}$$

จากเมตริกซ์การแปลงเราสามารถเขียนอยู่ในรูปเมตริกซ์การเคลื่อนย้าย (Translation Matrix) เพียงอย่างเดียวดังสมการที่ 2.11

$$Trans_{(p_x,p_y,p_z)} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & p_x \\ 0 & 1 & 0 & p_y \\ 0 & 0 & 1 & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

ในทำนองเดียวกันยังสามารถเขียนเป็นเมตริกซ์การหมุนในแนวแกน X, Y และ Z ดังสมการที่ 2.13

$$RotX = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\theta x) & -\sin(\theta x) & 0 \\ 0 & \sin(\theta x) & \cos(\theta x) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$RotY = \begin{bmatrix} \cos(\theta y) & 0 & \sin(\theta y) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\theta y) & 0 & \cos(\theta y) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$RotZ = \begin{bmatrix} \cos(\theta z) & -\sin(\theta z) & 0 & 0 \\ \sin(\theta z) & \cos(\theta z) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

หากนำพารามิเตอร์ของ Denavit-Hartenberg มาเขียนเป็นเมตริกซ์การแปลงสามารถเขียนในรูปของการเรียงต่อกันของเมตริกซ์การเคลื่อนย้ายและเมตริกซ์การหมุนดังสมการที่ 2.14

$$T_{NA} = Trans(0,0,d_i)Rot_z(\theta_i)Rot_x(\alpha_i)Trans(a_i,0,0)$$

$$T_{NA} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C\theta_i & -S\theta_i & 0 & 0 \\ S\theta_i & C\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C\alpha_i & -S\alpha_i & 0 \\ 0 & S\alpha_i & C\alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

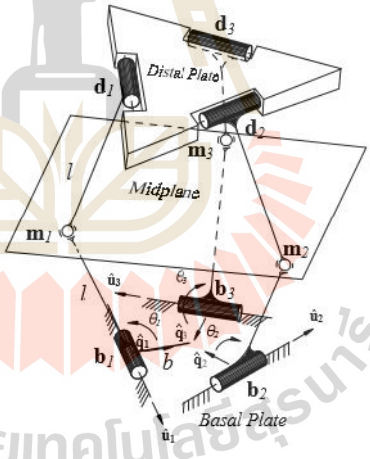
$$T_{NA} = \begin{bmatrix} C\theta_i & -C\alpha_i S\theta_i & S\alpha_i S\theta_i & a_i C\theta_i \\ S\theta_i & C\alpha_i C\theta_i & -S\alpha_i C\theta_i & a_i S\theta_i \\ 0 & S\alpha_i & C\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

จากเมตริกซ์การแปลงซึ่งได้จาก D-H parameters เมื่อนำมาเทียบกับสมการที่ 2.15 พบว่าหากแบ่งเมตริกซ์ ออกเป็นส่วนแล้วพบว่าเมตริกซ์ย่อยที่มุมบนด้านซ้ายที่มีขนาด 3×3 เป็นเมตริกซ์การหมุนของก้านโยงที่ *i* ส่วนเมตริกซ์ย่อยที่มุมบนด้านขวาที่มีขนาด 3×1 เป็นเมตริกซ์ตำแหน่งของก้านโยง

2.5 โครงสร้างของหุ่นยนต์แบบ Canfield

จากการศึกษาบทความเรื่อง Development of the Carpal Wrist; a Symmetric, Parallel-Architecture Robotic Wrist โดยผู้วิจัยคือ Stephen Lee Canfield ซึ่งเป็นหุ่นยนต์แบบขนานอีก 1 แบบที่ได้ถูกสร้างขึ้นมาเพื่อพัฒนาให้นำไปใช้งานได้หลากหลาย และทางองค์การบริหารการบินและอวกาศแห่งชาติ (NASA) ได้มีการนำหุ่นยนต์แบบขนานนี้ไปประยุกต์ใช้ในการขับดันยานอวกาศให้ไปในทิศทาง (pitch-yaw-plunge) ที่ต้องการ เพื่อเป็นเกียรติแก่ผู้สร้างจึงได้ตั้งชื่อหุ่นยนต์ชนิดนี้ว่า “Canfield joint” ซึ่ง Canfield มาจากชื่อของผู้สร้างนั้นเอง นอกจากนี้หุ่นยนต์แบบขนานยังเป็นอีกหนึ่งวิธีในการแก้ปัญหาที่ได้รับการรับรองในการจดสิทธิบัตร canfield joint ได้ถูกนำไปใช้ในการควบคุมแขน 3 แขน อย่างอิสระ ลักษณะของ Canfield joint จะประกอบไปด้วยแผ่นรูปสามเหลี่ยมสองแผ่น จะวางตัวตั้งฉากในแนวขนานกันบนทิศทางในแนวแกน *Z* โดยแต่ละแขนจะประกอบไปด้วยข้อต่อแบบหมุน *(*revolt joint) 2 ตัว สามารถหมุนได้แบบบานพับ ข้อต่อนี้จะติดอยู่ที่ฐานบนและฐานล่างเพื่อเชื่อมต่อ ก้าน(link) นั้น

ส่วนความพิเศษของ Canfield joint คือการนำข้อต่อแบบหมุน (Spherical) มาเชื่อมตรงกลางระหว่าง ก้าน 2 ก้าน ส่งผลให้หุ่นยนต์สามารถควบคุมแขนได้อย่างเป็นอิสระและหลากหลายทิศทาง ทิศทางในการเคลื่อนที่จะเป็นในรูปแบบของครึ่งทรงกลม นอกจากนี้การชี้ตำแหน่งแบบครึ่งทรงกลมสามารถควบคุมได้อย่างอิสระ มันจะสามารถเคลื่อนที่ได้ต้องมีมอเตอร์ในการ กระตุ้นทั้งหมด 3 ตัว แบบจำลองของ Canfield Joint [7]สามารถดูได้จาก รูปที่ 2.14

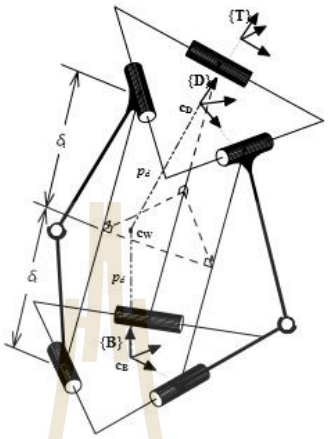


มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

$\hat{u}$ $\hat{u}$ $\hat{u}$

$\hat{q}$ $\hat{q}$ $\hat{q}$

$\hat{u}$ $\hat{u}$ $\hat{u}$



¢

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

$\hat{u}_i, \theta_i] l\hat{q}_i +$ i

ที่ $R_{[\hat{u}_i,\theta_i]}$ แทนด้วยการหมุนรอบแกนเวกเตอร์หนึ่งหน่วย $\hat{u}_i$ เป็นมุม θ_i และ $\hat{q}_i$คือเวกเตอร์ที่ตั้งฉากกับเวกเตอร์หนึ่งหน่วย $\hat{u}_i$ที่อยู่บนแผ่นฐาน ดังที่แสดงในรูปที่ 1 จากนั้นทำการหาสัมประสิทธิ์บนระนาบ A_m, B_m, C_m ของ mid-plane

$$[A_m, B_m, C_m]^T = (m_2 - m_1) \times (m_3 - m_2) \tag{2.33}$$

หาเวกเตอร์ตั้งฉากบน mid-plane ด้วยสมการ

$$\hat{N}_m = \frac{[A_m, B_m, C_m]^T}{\sqrt{A_m^2 + B_m^2 + C_m^2}} \tag{2.34}$$

หลังจากนั้นจะสามารถหาระยะที่ตั้งฉากจากตำแหน่ง b_1, b_2, b_3 ไปยัง mid-plane ได้

$$\delta_i = \hat{N}_m \cdot m_i - b_i \qquad i = 1 \ldots 3 \tag{2.35}$$

ดังนั้นระยะทางที่ตั้งฉากจากตำแหน่ง b_1, b_2, b_3 ไปยังตำแหน่ง d_1, d_2, d_3 จะมีค่าเท่ากับ $2(\delta_i)$ เพราะฉะนั้นที่ตำแหน่ง d_1, d_2, d_3 สามารถหาได้จากสมการ

$$d_i = b_i + 2\delta_i \hat{N}_m \qquad i = 1 \ldots 3 \tag{2.36}$$

หาพิกัดที่อยู่บนจุดกึ่งกลางของเฟรมแผ่นปลายและเฟรมเครื่องมือได้จาก

$$c_D = c_T = (d_1 + d_2 + d_3)/3 \tag{2.37}$$

ที่แกน x , y , z สามารถหาเวกเตอร์ในแต่ละแกนได้ดังนี้

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

$$\hat{x}_D = \frac{d_1 - c_T}{|d_1 - c_T|} \tag{2.38}$$

$$\hat{y}_D = -\hat{x}_D - \hat{z}_D \tag{2.39}$$

$$\hat{z}_D = \frac{(d_2 - d_1) \times (d_3 - d_2)}{|(d_2 - d_1) \times (d_3 - d_2)|} \tag{2.40}$$

ดังนั้น เมตริกซ์ของการหมุนที่มุม $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ จากเฟรมแผ่นฐาน {B} ไปยังเฟรมแผ่นปลาย {D}

จะได้ว่า

$$^{B}_{D}R = \begin{bmatrix} \hat{x}_{D_x} & \hat{y}_{D_x} & \hat{z}_{D_x} \\ \hat{x}_{D_y} & \hat{y}_{D_y} & \hat{z}_{D_y} \\ \hat{x}_{D_z} & \hat{y}_{D_z} & \hat{z}_{D_z} \end{bmatrix} \tag{2.41}$$

2.5.2 จลนศาสตร์แบบผกผัน (Inverse Kinematic)

ปัญหาจลนศาสตร์แบบผกผันเราจะทราบถึงพิกัดที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปถึง และระยะที่ยืดหรือยุบของแผ่นปลาย ดังนั้นสิ่งที่ต้องการหาคือ $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ ของข้อต่อการหมุนบนแผ่นฐาน

พิจารณาจุด midpoint (m_i) ในรูปที่ 2.28 จะเป็นตำแหน่งของข้อต่อแบบ spherical ซึ่งข้อต่อแบบนี้จะสามารถเคลื่อนที่ได้ 2 องศาอิสระ ณ ตำแหน่งของข้อต่อนี้จะกำหนดให้เป็นเวกเตอร์ $\hat{u}_{bend}$ และกำหนดให้มุม $\emptyset$ คือมุมของการดัด ดังที่แสดงในรูปที่ 2.29 ดังนั้นต้องเริ่มจากการหาค่า $\hat{u}_{bend}$ และ $\emptyset$

จะได้ว่า

$$\hat{u}_{bend} = \frac{\hat{z}_T \times \hat{z}_B}{|\hat{z}_T \times \hat{z}_B|} \tag{2.43}$$

$$\emptyset = cos^{-1}(\hat{z}_T \cdot \hat{z}_B) \tag{2.45}$$

ที่ $\hat{z}_B$ และ $\hat{z}_T$ คือเวกเตอร์ของแกน z บนเฟรมแผ่นฐาน {B} และเฟรมเครื่องมือ {T} ตามลำดับ

ูบบ เฐา หา

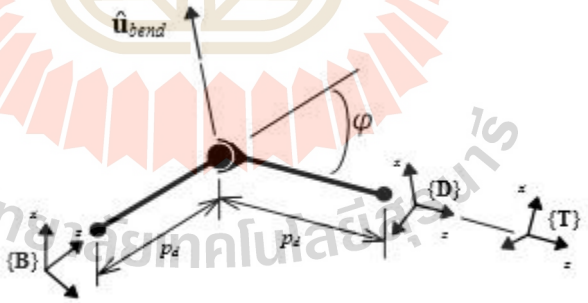
i = $\hat{\mathbf{u}}_{bend},\emptyset_i)$ i

$$\mathbf{R}_{(\hat{\mathbf{u}}_{bend},\emptyset_i)} = \begin{bmatrix} k_x k_x V\emptyset + cos\emptyset & k_x k_y V\emptyset - k_z sin\emptyset & k_x k_z V\emptyset + k_y sin\emptyset \\ k_x k_y V\emptyset + k_z sin\emptyset & k_y k_y V\emptyset + cos\emptyset & k_y k_z V\emptyset - k_x sin\emptyset \\ k_x k_z V\emptyset - k_y sin\emptyset & k_y k_z V\emptyset + k_x sin\emptyset & k_z k_z V\emptyset + cos\emptyset \end{bmatrix}$$

(2.47)

$$\begin{bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_z \end{bmatrix} = \hat{\mathbf{u}}_{bend}$$ และ $V\emptyset$ = ๑ $cos\emptyset$

i = $\left[b_{i_x}, b_{i_y}, b_{i_z}\right]^T$, c_W $p_d]^T$



แบบ ลองของข้อ

$$\mathbf{p}_i = \mathbf{d}_i + \mathbf{b}_i),$$

ากนั้น งกเตอร์ที่ตั้งฉากกับ ะนาบ ชมมา ได้จาก

$\mathbf{N}_m$ $A_m, B_m, C_m]^T$ = $\mathbf{p_2} - \mathbf{p_1})$ $\mathbf{p_3} - \mathbf{p_1})$, D_m = $\mathbf{N}_m$ $\mathbf{p}_1$

ต่อจากนั้นเราต้องการหาจุด $\mathbf{m}_1, \mathbf{m}_2, \mathbf{m}_3$ ซึ่งในขั้นตอนนี้จะมีความซับซ้อนต้องหาจากสมการดังต่อไปนี้

$$|\mathbf{m}_i - \mathbf{b}_i| = l,$$

$$A_c m_{i_x} + E_c m_{i_y} + C_c m_{i_z} + D_c = 0 \qquad \text{i = 1...3} \qquad (2.52)$$

$$A_m m_{i_x} + B_m m_{i_y} + C_m m_{i_z} + D_m = 0$$

เมื่อได้ $\mathbf{m}_1, \mathbf{m}_2, \mathbf{m}_3$ จะสามารถหาค่ามุม ของแขนที่แผ่นฐานกระทำกับเวกเตอร์หนึ่งหน่วย $\hat{\mathbf{q}}_i$

$$\theta_i = cos^{-1}\left[\frac{(\mathbf{m}_i - \mathbf{b}_i)\cdot\hat{\mathbf{q}}_i}{|(\mathbf{m}_i - \mathbf{b}_i)|}\right] \qquad \text{i = 1...3} \qquad (2.53)$$

ปัญหาสำคัญของหุ่นยนต์แบบขนานชนิดนี้คือการหามุม θ_r ซึ่ง สามารถหาได้จากมุมที่เกิดขึ้นระหว่างเวกเตอร์ของแกน $\hat{\mathbf{x}}_D$ และเวกเตอร์ของแกน $\hat{\mathbf{x}}_T$ กระทำต่อกัน ดังสมการ

$$\theta_r = cos^{-1}(\hat{\mathbf{x}}_D \cdot \hat{\mathbf{x}}_T) \qquad (2.54)$$

สรุป การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหุ่นยนต์แบบขนานชนิดข้อมือ, *Stephen Lee Canfield (1997)* ต้องใช้ทั้งสมการจลนศาสตร์แบบไปข้างหน้าและแบบผกผันควบคู่กันไป เพื่อนำไปสู่การหาพื้นที่การทำงานของหุ่นยนต์รวมไปถึงการออกแบบเพื่อสร้างแบบจำลองเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ได้จริงต่อไป

บทที่ 3

วิธีดำเนินงานวิจัย

3.1 แผนการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบและสร้างต้นแบบด้วยกลไก Canfield เพื่อประยุกต์ใช้กับแสงอาทิตย์ โดยทำการศึกษาและหาข้อมูลการทำงานของ Servo motor และไมโครคอนโทรลเลอร์ ศึกษาด้านจลน์ศาสตร์วิศวกรรมและการออกแบบด้านกลศาสตร์ของแขนหุ่นยนต์ ออกแบบและคำนวณหาขนาดมอเตอร์และขนาดของแขนต่างๆเพื่อกำหนดข้อจำกัดต่างๆ ของอุปกรณ์เพื่อความเหมาะสมในการสร้างกลไกแบบ Canfield

3.1.1 ขั้นตอนในการทำวิจัย

การออกแบบและสร้างกลไกแบบ Canfield เพื่อประยุกต์ใช้กับแสงอาทิตย์ เริ่มจากการค้นคว้าข้อมูล งานที่ได้ปฏิบัติต่างๆ ดังแสดงในแผนผังรูปภาพที่ 3.1 ตามแผนดำเนินงานของงานวิจัยเป็นการทำงานตามขั้นตอนที่วางไว้

3.1.1.1 ศึกษาค้นคว้าองค์ความรู้ ทฤษฎี เอกสารที่เกี่ยวข้อง

3.1.1.2 รวบรวมข้อมูลที่จะใช้งาน

3.1.1.3 ออกแบบชิ้นส่วนหลักของหุ่นยนต์

3.1.1.4 ออกแบบระบบควบคุม

3.1.1.5 จัดหาวัสดุอุปกรณ์ตามที่ได้ออกแบบ

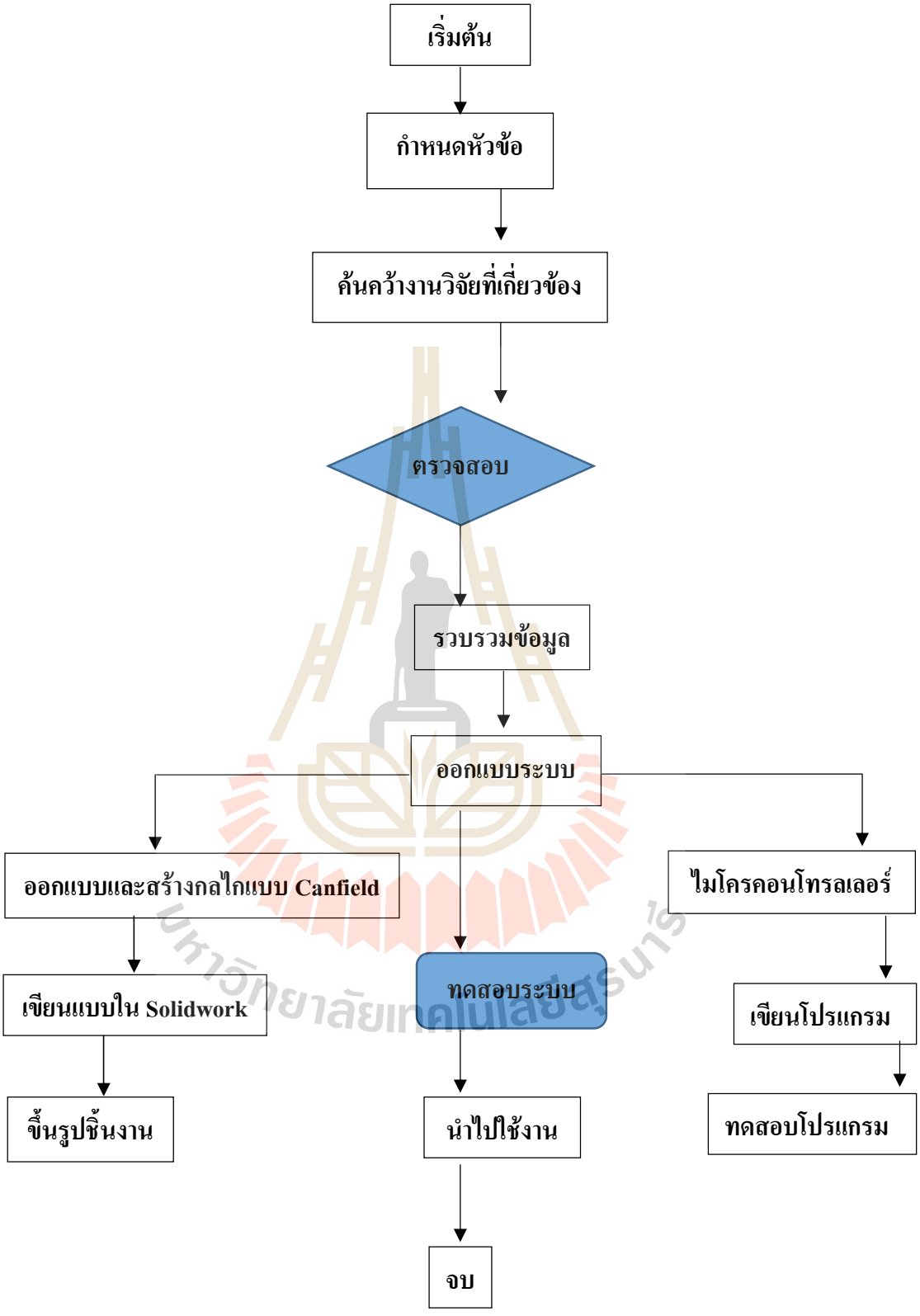
3.1.1.6 เขียนโปรแกรมในการควบคุมหุ่นยนต์แบบ Canfield

3.1.1.7 ทดสอบการทำงานและเก็บข้อมูล

3.1.1.8 รวบรวมข้อมูล วิเคราะห์และสรุปผลการวิจัย

3.1.1.9 จัดทำรูปเล่มวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



รูปที่ 3.1 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ขนาด : สูง 42.9 mm, กว้าง 19.8 mm และ ยาว 40.6 mm

น้ำหนัก : 55 กรัม

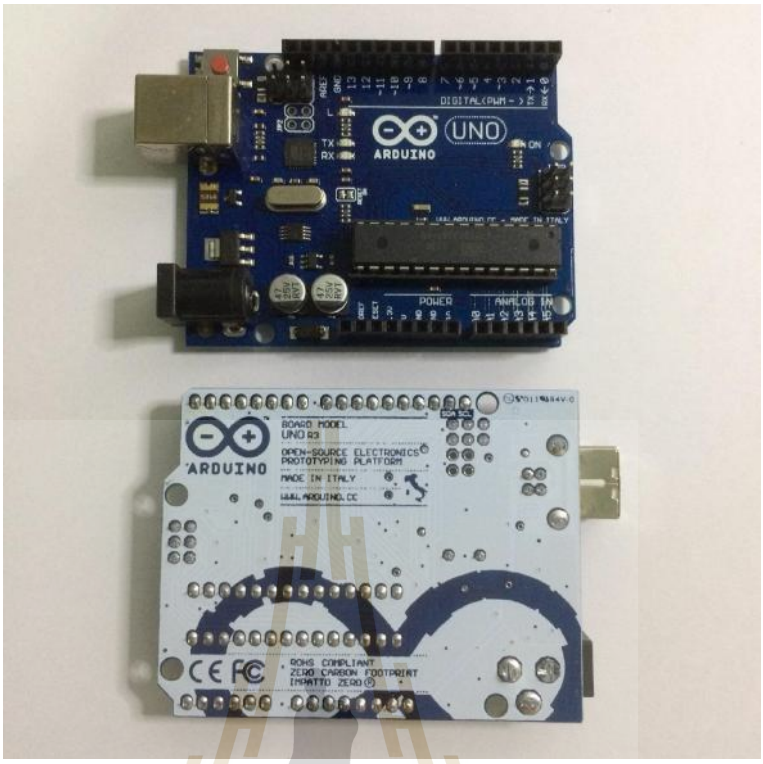
ชนิดของเฟือง : เหล็ก

มอเตอร์ไฟฟ้า (electric motor) เป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่แปลงพลังงานฟ้าเป็นพลังงานกล การทำงานปกติของมอเตอร์ไฟฟ้าส่วนใหญ่เกิดจาการทำงานร่วมกันระหว่างสนามแม่เหล็กของแม่เหล็กในตัวมอเตอร์ และสนามแม่เหล็กที่เกิดจากกระแสในขดลวดทำให้เกิดแรงดันและแรงผลักของสนามแม่เหล็กทั้งสอง ในการใช้งานตัวอย่างเช่น อุตสาหกรรมการขนส่งที่ใช้มอเตอร์ฉุดลากเป็นต้น นอกจากนั้นแล้ว มอเตอร์ไฟฟ้ายังสามารถทำงานได้ถึงสองแบบ ได้แก่ การสร้างพลังงานกล และการผลิตพลังงานไฟฟ้า มอเตอร์ไฟฟ้าถูกนำไปใช้งานที่หลากหลายเช่น พัดลมอุตสาหกรรม เครื่องเป่า ปั๊ม เครื่องมือเครื่องใช้ในครัวเรือน และดิสก์ไดร์ฟ มอเตอร์ไฟฟ้าสามารถขับเคลื่อนโดยแหล่งจ่ายกระแสไฟกระแสตรง (DC) เช่น จากไฟบ้าน อินเวอร์เตอร์ หรือ เครื่องปั่นไฟ มอเตอร์ขนาดเล็กอาจจะพบในนาฬิกาไฟฟ้า มอเตอร์ทั่วไปที่มีขนาดและคุณลักษณะมาตรฐานสูงจะให้พลังงานกลที่สะดวกสำหรับใช้ในอุตสาหกรรม

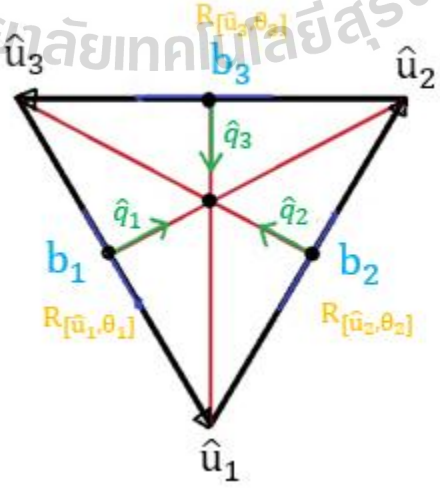
3.2.2 ไมโครคอนโทรลเลอร์

ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino Uno ในงานวิจัยนี้จะทำหน้าที่ในการประมวลผลและควบคุมการทำงานด้วยการเขียนโปรแกรมภาษาซีเพื่อสร้างอัลกอลิทึมในการควบคุมอุปกรณ์ต่างๆ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



<u>ตัวอย่างการคำนวณ</u> : กำหนดให้สามเหลี่ยมด้านเท่ามีความยาวแต่ละด้านเท่ากัน ด้านละ 17 ซม.

: กำหนดให้มุมทุกมุมเท่ากับ 60 องศา ความยาวของด้านเท่ากับ 17 ซม.

จะได้ว่า $b_1 = \{-5.5, -2.25, 0\}^T, b_2 = \{5.5, -2.25, 0\}^T, b_3 = \{0, 4.8, 0\}^T$

$\hat{u}_1 = \{0.4993, -0.8664, 0\}^T, \hat{u}_2 = \{0.4993, 0.8664, 0\}^T, \hat{u}_3 = \{-1, 0, 0\}^T$

$\hat{q}_1 = \{0.8664, 0.4993, 0\}^T, \hat{q}_2 = \{-0.8664, -0.4993, 0\}^T, \hat{q}_3 = \{0, -1, 0\}^T$

หาจุด midpoint จากสมการที่ 3.1

$$m_i = R_{[\hat{u}_i, \theta_i]} l\hat{q}_i + b_i \tag{3.1}$$

เมื่อ $$R_{[\hat{u}_i, \theta_i]} = \begin{bmatrix} \hat{u}_{i_x}^2 V\theta_i + C\theta_i & \hat{u}_{i_x}\hat{u}_{i_y} V\theta - \hat{u}_{i_z} S\theta & \hat{u}_{i_x}\hat{u}_{i_y} V\theta + S\theta \\ \hat{u}_x\hat{u}_y V\theta + \hat{u}_z S\theta & \hat{u}_{i_y}^2 V\theta_i + C\theta_i & \hat{u}_{i_y}\hat{u}_{i_z} V\theta - \hat{u}_{i_x} S\theta \\ \hat{u}_{i_y}\hat{u}_{i_z} V\theta - \hat{u}_{i_x} S\theta & \hat{u}_{i_y}\hat{u}_{i_z} V\theta + \hat{u}_{i_x} S\theta & \hat{u}_{i_z}^2 V\theta_i + C\theta_i \end{bmatrix}$$ (3.2)

**$v\theta = (1 - cos\theta)$

เมื่อแทนค่าในสมการดังกล่าวแล้วจะได้ค่า m_1, m_2, m_3 ออกมา ซึ่งเป็นค่าของจุด midpoint ทั้ง 3 จุดที่อยู่บนระนาบกึ่งกลางระหว่างแผ่นฐานและแผ่นปลาย

$\boldsymbol{m_1} = \{0.1521, 0.0313, 5.3042\}^T$

$\boldsymbol{m_2} = \{-0.1521, 0.0313, 5.3042\}^T$

$\boldsymbol{m_3} = \{0, -0.0625, 5.3044\}^T$

จากนั้นทำการหาค่าสัมประสิทธิ์ของระนาบที่อยู่กึ่งกลางระหว่างแผ่นฐานและแผ่นปลาย โดยใช้สมการ 3.3 พบว่า

$$[A_m, B_m, C_m]^T = (\boldsymbol{m_2} - \boldsymbol{m_1}) \times (\boldsymbol{m_3} - \boldsymbol{m_2}) = \{0, 0.0001, 0.0285\}^T \tag{3.3}$$

หาเวกเตอร์ตั้งฉากกับระนาบกึ่งกลาง

$$\hat{\boldsymbol{N}}_m = \frac{[A_m, B_m, C_m]^T}{\sqrt{A_m^2 + B_m^2 + C_m^2}} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{Bmatrix} \tag{3.4}$$

ผ่นบ ายไ เงระ บกึ่ง

$$\delta_i = \hat{\mathbf{N}}_m \ \ \boldsymbol{m_i} - \boldsymbol{b_i}$$

δ_1 : δ_2 : δ_3 :

เงจากตำแห b_1, b_2, b_3 d_1, d_2, d_3 $2\delta_i$

d_1, d_2, d_3 ส มารถ าจา สมการ 3

$$\mathbf{d_i} = \mathbf{b_i} + 2\boldsymbol{\delta_i}\hat{\mathbf{N}}_m$$

$\mathbf{d_1} =$ $^{T}, \boldsymbol{d_2}$: $^{T}, \boldsymbol{d_3}$: ^{T}

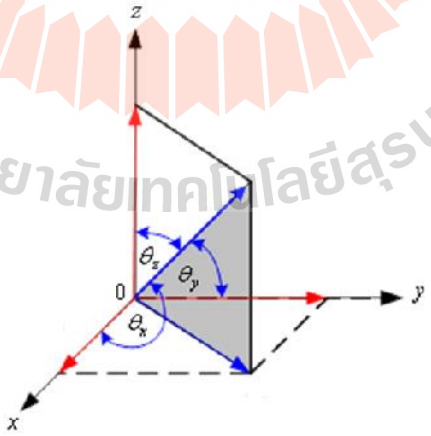
.

ลางจ งเฟร ผ่นบ ายแ เฟรม

$\boldsymbol{c_D}$ $\boldsymbol{c_T}$: $\boldsymbol{d_1}$ - $\boldsymbol{d_2}$ - $\boldsymbol{d_3}$)

$\boldsymbol{c_D}$ $\boldsymbol{c_T}$: ^{T}

.



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

$\bar{A}(x, y, z)$

จากรูปที่ 3.5 ถ้า ถ้า $\vec{A}$ อยู่บน ระบบพิกัดฉาก $x; y; z$ โดยที่ $\vec{A}$ ทำมุม $\theta_x; \theta_y; \theta_z$ กับแกน z ตามลำดับ ส่วนประกอบ $\vec{A}$ บนระนาบ xy และ z คือ

$$\begin{aligned}
\vec{A} &= \vec{A}_{xy} + \vec{A}_z \\
&= \vec{A}_x + \vec{A}_y + \vec{A}_z \\
\vec{A}_{xy} &= \vec{A}_x + \vec{A}_y \\
A_x &= A\cos\theta_x \\
A_y &= A\cos\theta_y \\
A_z &= A\cos\theta_z
\end{aligned}$$

ทิศทางของเวกเตอร์ $\vec{A}$ หาได้โดยใช้โคไซน์บอกทิศ (direction cosine) โดยที่

$$\cos\theta_x = \frac{A_x}{A}\ ;\ \cos\theta_y = \frac{A_y}{A}\ ;\ \cos\theta_z = \frac{A_z}{A}$$

ดังนั้น เมื่อแทนคำตอบที่ได้จากการหาสมการที่ 3.7 จะได้ว่า

$$\theta_x = \cos^{-1}\frac{x}{\sqrt{x^2+y^2+z^2}} = 90°$$

$$\theta_y = \cos^{-1}\frac{y}{\sqrt{x^2+y^2+z^2}} = 90°$$

$$\theta_z = \cos^{-1}\frac{z}{\sqrt{x^2+y^2+z^2}} = 0°$$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

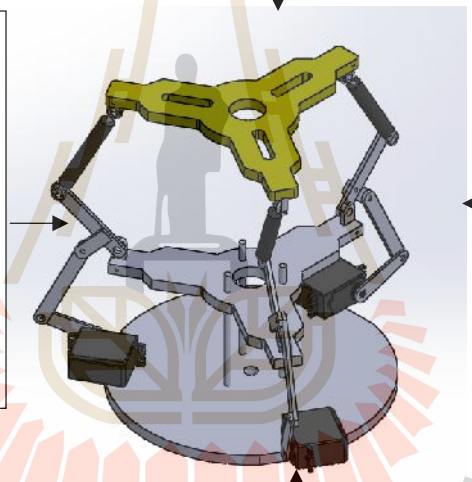
แนวคิดในการสร้างกลไกแบบ Canfield พิจารณาจาก

1.น้ำหนักของแขน เปรียบเทียบกับขนาดของเซอร์โวมอเตอร์ (Servo Motor)

2.ความแข็งแรงทนทาน

3.ราคาและงบประมาณในการสร้าง

โครงสร้างกลไกแบบ Canfield ควรเลือกใช้วัสดุที่มีน้ำหนักเบา ราคาไม่สูงมากสำหรับทำชิ้นส่วนของกลไก เช่น อะคริลิก (Acrylic)



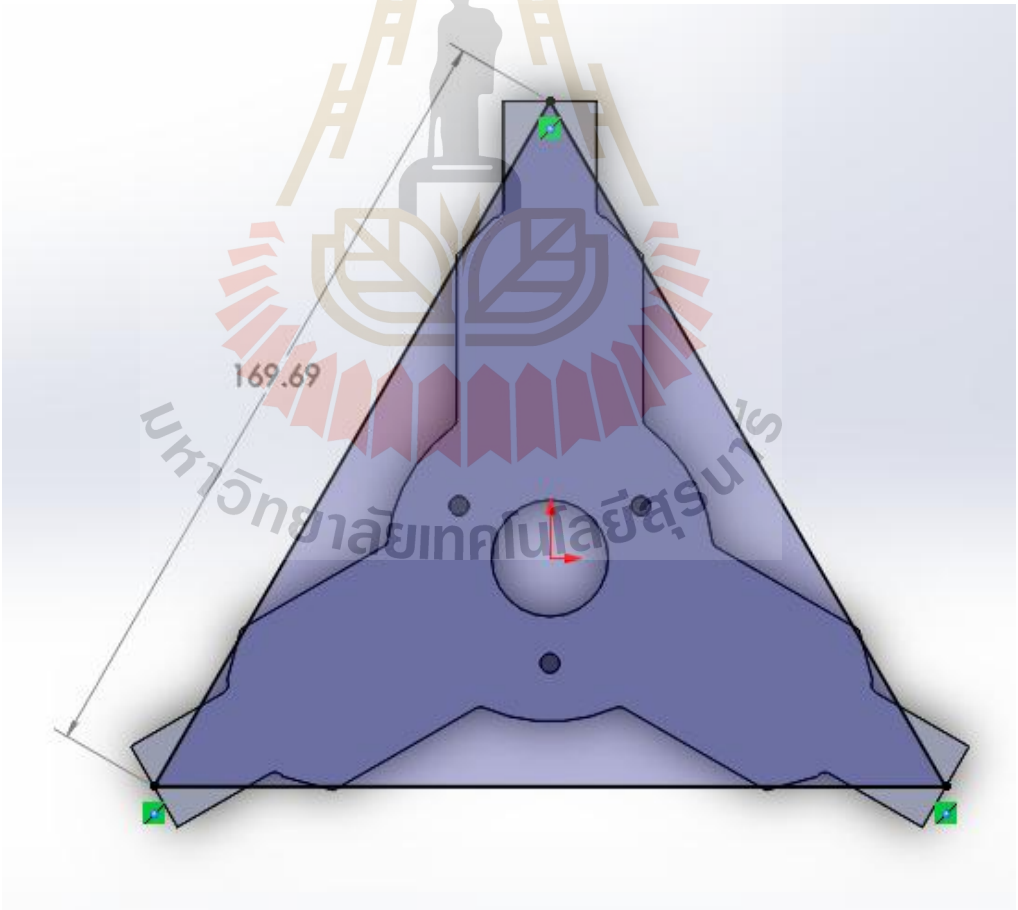
การเลือกชุดต้นกำลัง

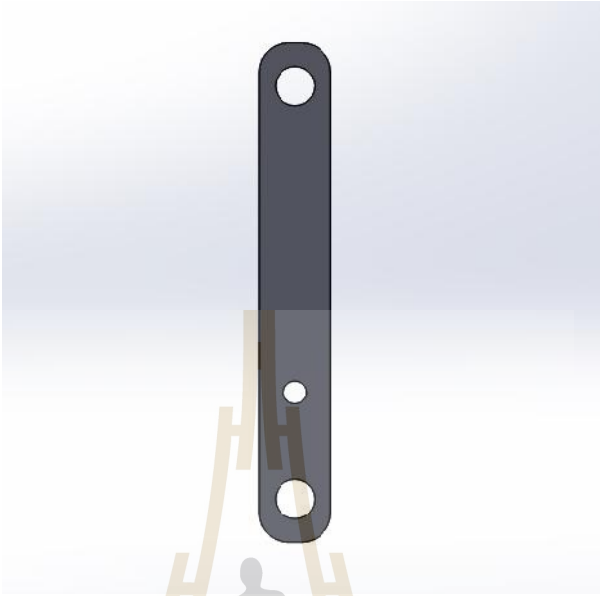
การเลือกใช้มอเตอร์ให้เหมาะสมกับงานนั้น ควรเลือกมอเตอร์ที่มีแรงบิดสูงซึ่งไม่จำเป็นต้องมีความเร็วรอบสูง

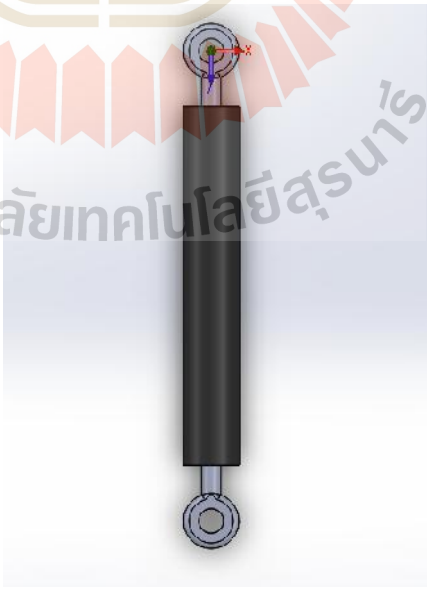
พื้นที่การทำงาน

พื้นที่การทำงานสามารถคำนวณได้จากสมการจลนศาสตร์(Kinematics) ของหุ่นยนต์รูปทรงแบบขนาน (Parallel Robot)

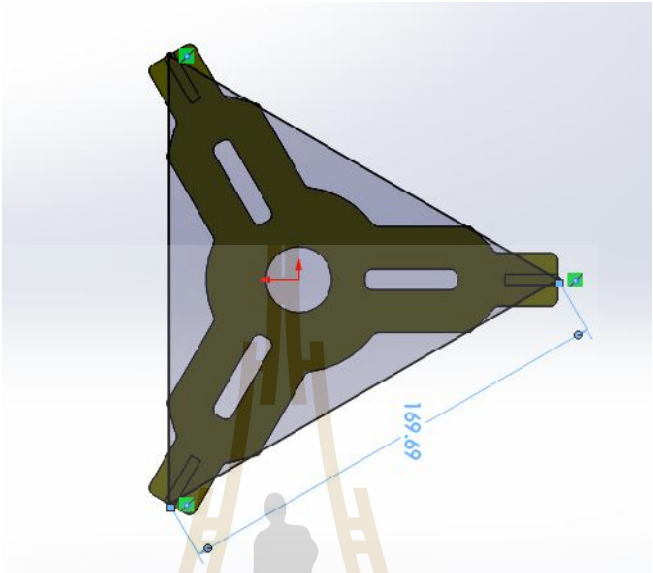
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี


169.69





มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี


169.69

3.5 การออกแบบโปรแกรมเพื่อใช้ควบคุมหุ่นยนต์ Canfield

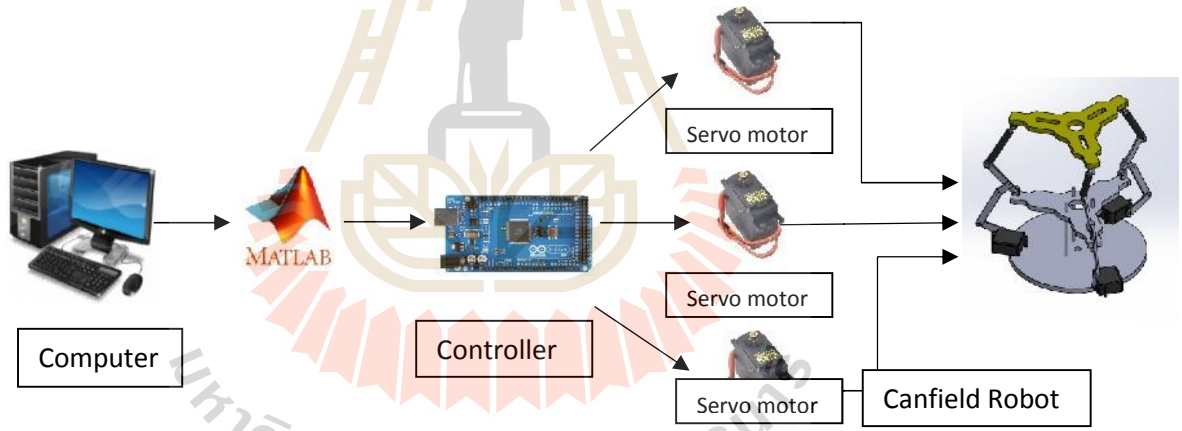
ขั้นตอนก่อนที่จะออกแบบระบบควบคุมนั้นต้องมีการติดตั้งและประกอบอุปกรณ์ต่างๆ เข้าด้วยกันเพื่อที่จะให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่สามารถทำงานได้ตามที่กำหนด โดยมีการเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่างๆดังนี้

3.5.1 ติดตั้งมอเตอร์ Servo motor จำนวน 3 ตัว เพื่อใช้ในการบังคับการเคลื่อนที่ขึ้นลงของแขนหุ่นยนต์กลไกแบบ Canfield

3.5.2 ติดตั้งไดร์ฟขับมอเตอร์ทั้ง 3 ตัว ไว้แต่ละก้าน เพื่อใช้ในการขับดันให้แขนของหุ่นยนต์เคลื่อนที่ สำหรับมอเตอร์แต่ละตัวรวมทั้งระบบแหล่งจ่ายไฟ 24 VDC เพื่อใช้เป็นอินพุตให้กับไดร์ฟมอเตอร์

3.5.3 ติดตั้งหน่วยประมวลกลางหรือคอมพิวเตอร์

3.5.4 ติดตั้งระบบคอนโทรลเลอร์เข้ากับคอมพิวเตอร์



.รูปที่ 3.12 ภาพรวมการทำงานของระบบ

โครงสร้างหุ่นยนต์แบบ Canfield ฐานยึดมอเตอร์รูปสามเหลี่ยมส่วนล่างและฐานรูปสามเหลี่ยมยึดก้านโยงส่วนบน จะมีความสมมาตรคล้ายกันและก้านโยงแต่ละด้านที่เท่ากัน ซึ่งปลายแขนด้านล่างจะถูกยึดติดกับเพลามอเตอร์ และอีกด้านของปลายแขนจะถูกยึดกับแขนด้านบนด้วยข้อต่อแบบ revolt ดังนั้นการเคลื่อนที่ไปพร้อมกันของสามก้านโยงด้านบนคู่ขนาน จะสามารถ

สร้างการเคลื่อนที่ตามจุดหรือตำแหน่งที่กำหนดโดยจะทดสอบให้เป็นการเคลื่อนที่ในแนวเชิงเส้นของแผ่นปลายแขนรูปสามเหลี่ยมที่เคลื่อนที่

3.5.6 การออกแบบโปรแกรมควบคุมแขนหุ่นยนต์แบบ Canfield

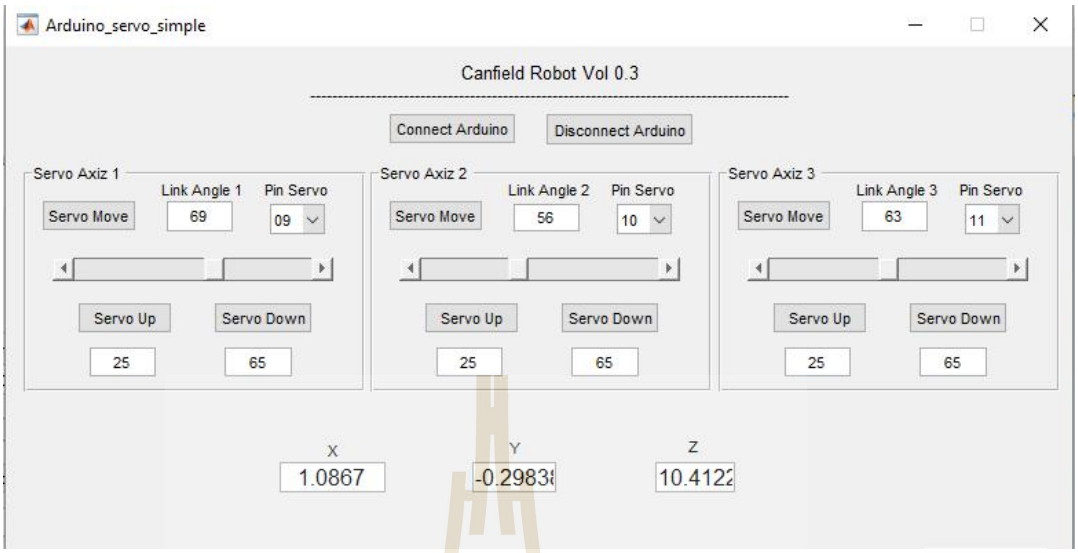
ในขั้นตอนสุดท้ายที่จะต้องออกแบบระบบควบคุมเข้าด้วยกัน เพื่อที่จะให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่และสามารถทำงานได้ตามที่กำหนดได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยได้ใช้โปรแกรม MATLAB เป็นหน้า GUI สำหรับผู้ใช้งาน สั่งการผ่านบอร์ด Arduino ในการควบคุมหุ่นยนต์

3.6 อัลกอลิทึมสำหรับประมวลผลเพื่อเชื่อมต่อข้อมูลระหว่างโปรแกรมกับหุ่นยนต์

งานวิจัยนี้ต้องการสร้างต้นแบบกลไกแบบ Canfield ที่สามารถเคลื่อนไหวได้ตามการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น โดยสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานต่อได้อย่างหลากหลาย จากการศึกษาข้อมูลผู้วิจัยเลือกออกแบบแผ่นเคลื่อนไหวได้ นั่นคือแผ่นปลายที่สามารถเคลื่อนที่ได้ 6 องศาอิสระ โดยใช้ซอฟแวร์ MATLAB ร่วมกับบอร์ด Microcontroller ยี่ห้อ Arduino รุ่น UNO R3 เป็นส่วนต่อประสาน (Interface) ให้แผ่นเคลื่อนไหวทำงานได้อย่างต่อเนื่อง

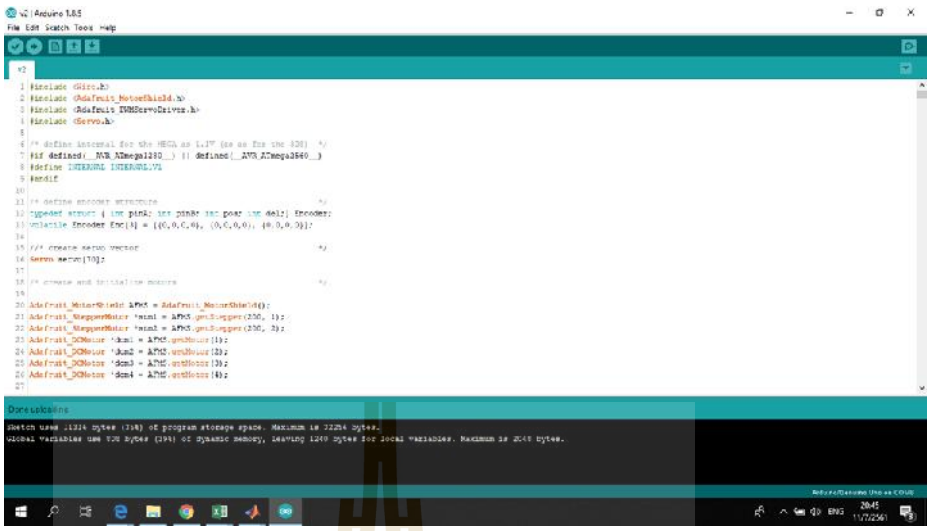
3.6.1 โปรแกรม MATLAB

จากการที่ได้วิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม MATLAB ตามหลักการทางจลนศาสตร์ (Kinematic) แบบไปข้างหน้า (Forward Kinematic) นั่นคือเมื่อป้อนองศา($\theta_1, \theta_2, \theta_3$) ที่จุดหมุนบนแผ่นฐานลงไป จะส่งผลให้ได้ค่าพิกัด X ,Y , Z และมุม Orientation($\theta_x, \theta_y, \theta_z$) บนระนาบของแผ่นปลายที่มีการเปลี่ยนแปลงค่ามุมไปเรื่อยๆ และเพื่อง่ายต่อการใช้งาน ผู้วิจัยจึงได้เขียนโปรแกรมสำหรับผู้ใช้งาน(GUI) เพื่อเป็นส่วนเชื่อมประสานกับแผ่นเคลื่อนไหวให้สามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง



$\theta_1, \theta_2, \theta_3)$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

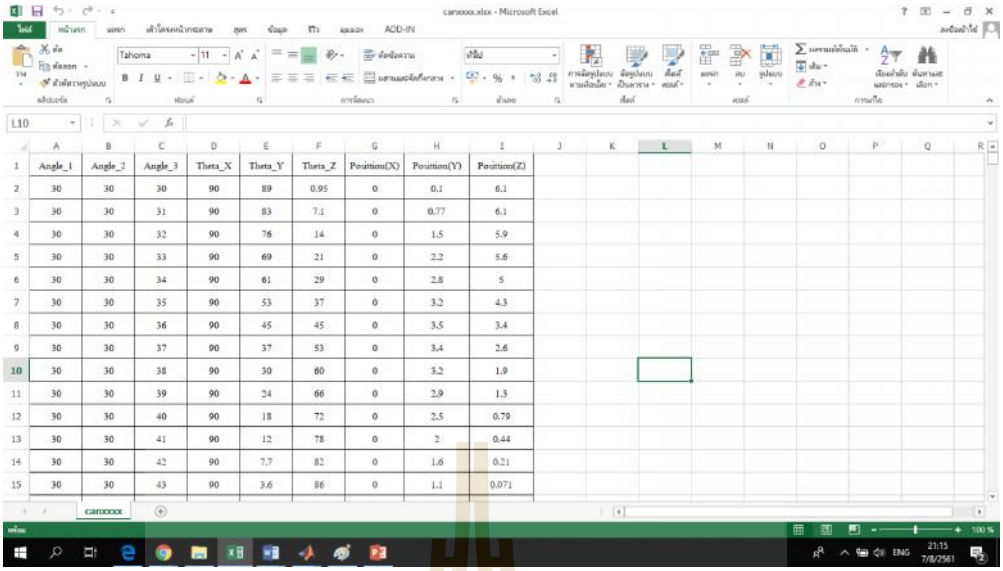


รูปที่ 3.14 โปรแกรมที่ใช้เชื่อมต่อระหว่างโปรแกรม MATLAB กับ บอร์ด Controller

3.6.2.2 ทำการบันทึกค่าผลการทดลอง ในการป้อนค่ามุมของแขนหุ่นยนต์ทั้ง 3 แขน เพื่อคำนวณหาค่าพิกัด X ,Y,Z และมุม Orientation $(\theta_x, \theta_y, \theta_z)$ ในสมการจลนศาสตร์แบบไปข้างหน้า(Forward Kinematic) ด้วยโปรแกรม MATLAB นั้น จะได้ข้อมูลขนาดใหญ่ออกมา ผู้วิจัยจึงได้ทำการเขียนโค๊ดเพื่อส่งค่าของอินพุตนั่นก็คือ มุมที่ป้อนเข้าไป $(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ และเอาต์พุตนั่นก็คือค่าพิกัด X,Y,Z และมุม Orientation $(\theta_x, \theta_y, \theta_z)$ที่คำนวณได้ ไปยังตาราง ดังนั้นค่าทั้งหมดจะ

3.6.2.3 สามารถค้นหาได้ในค่าตารางดังกล่าว (ดูตัวอย่างค่าตารางได้จากภาคผนวก ข)

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Angle_1	Angle_2	Angle_3	Theta_X	Theta_Y	Theta_Z	Position(X)	Position(Y)	Position(Z)
2	30	30	30	90	89	0.95	0	0.1	6.1
3	30	30	31	90	83	7.1	0	0.77	6.1
4	30	30	32	90	76	14	0	1.5	5.9
5	30	30	33	90	69	21	0	2.2	5.6
6	30	30	34	90	61	29	0	2.8	5
7	30	30	35	90	53	37	0	3.2	4.3
8	30	30	36	90	45	45	0	3.5	3.4
9	30	30	37	90	37	53	0	3.4	2.6
10	30	30	38	90	30	60	0	3.2	1.9
11	30	30	39	90	24	66	0	2.9	1.3
12	30	30	40	90	18	72	0	2.5	0.79
13	30	30	41	90	12	78	0	2	0.44
14	30	30	42	90	7.7	82	0	1.6	0.21
15	30	30	43	90	3.6	86	0	1.1	0.071

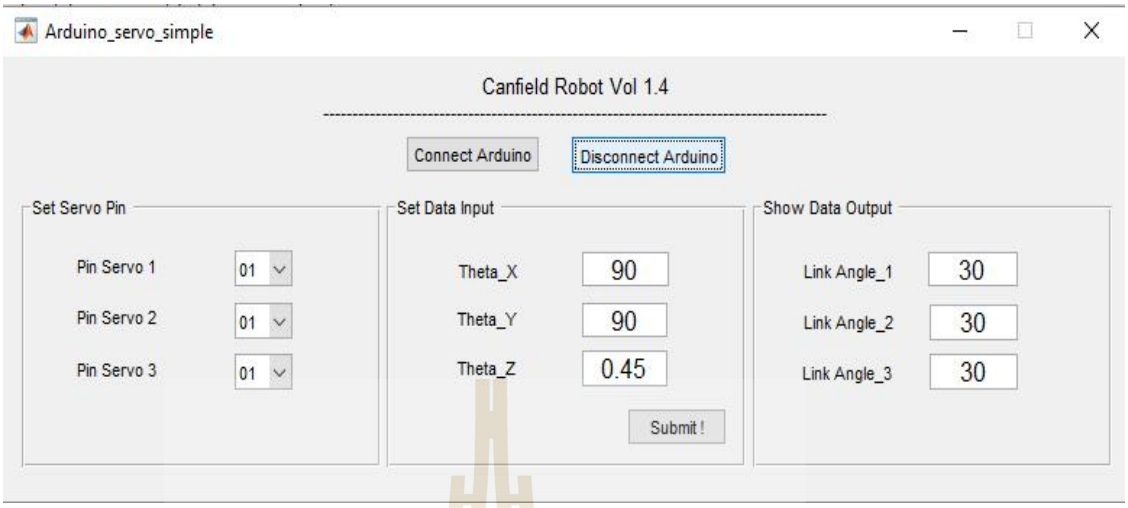
น ซึ่งจะถูกส่

$\theta_x, \theta_y, \theta_z)$ ที่

ะส่งค่าไปเข็

$\theta_1, \theta_2, \theta_3)$

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



เป็นค่ามุม $\theta_x, \theta_y, \theta_z$) เ

$\theta_1, \theta_2, \theta_3$ ซึ่

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทที่ 4

ผลการทดลอง

จากที่ได้ทดลองการทำงานของหุ่นยนต์กลไกแบบ Canfield และตรวจสอบความถูกต้องของการทำงานของหุ่นยนต์กลไกแบบ Canfield ที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ ในบทนี้จะเป็นการแสดงผลการทดสอบ ดังต่อไปนี้ 1) การออกแบบขนาดของหุ่นยนต์กลไกแบบ Canfield

2) การวิเคราะห์แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหุ่นยนต์กลไกแบบ Canfield โดยศึกษาจาก ทฤษฎีจลศาสตร์แบบไปข้างหน้าด้วยโปรแกรม MATLAB

3) การทดลองการเคลื่อนที่ของเซอร์โวมอเตอร์ทั้งสามชุด

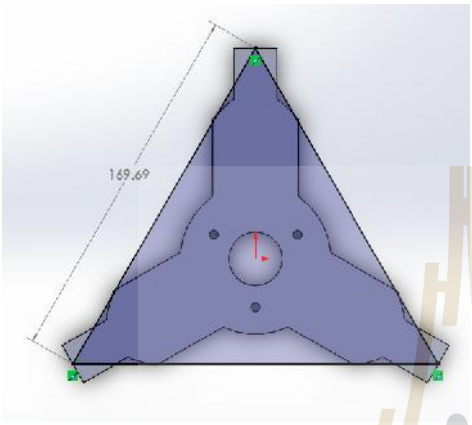
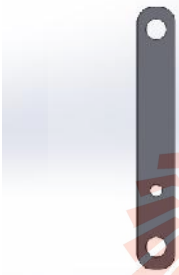
4) การทดสอบหาพิกัด X , Y, Z บนแผ่นปลายของหุ่นยนต์

5) การทดลองค้นหาค่าจากตารางเพื่อควบคุมหุ่นยนต์

4.1 การออกแบบขนาดของหุ่นยนต์กลไกแบบ Canfield

จากข้อกำหนดต่างๆของหุ่นยนต์ ในบทที่ 3 ซึ่งนำมาออกแบบโดยมีพารามิเตอร์ ดังตารางที่

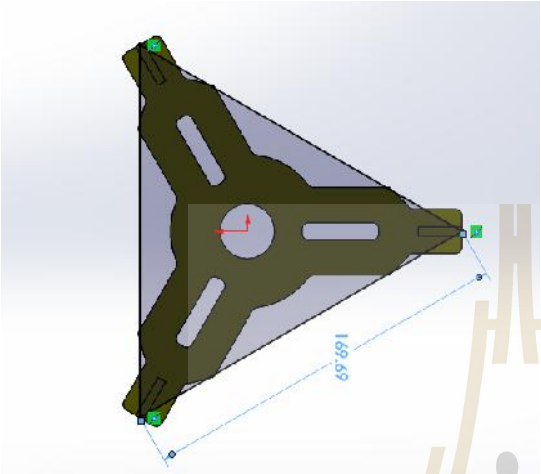
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

พารามิเตอร์	ตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณ	ขนาด(มิลลิเมตร)
 ความยาวด้านข้างของฐานล่าง	a	170
 ความยาวของแขนล่าง	l_1	61.25

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

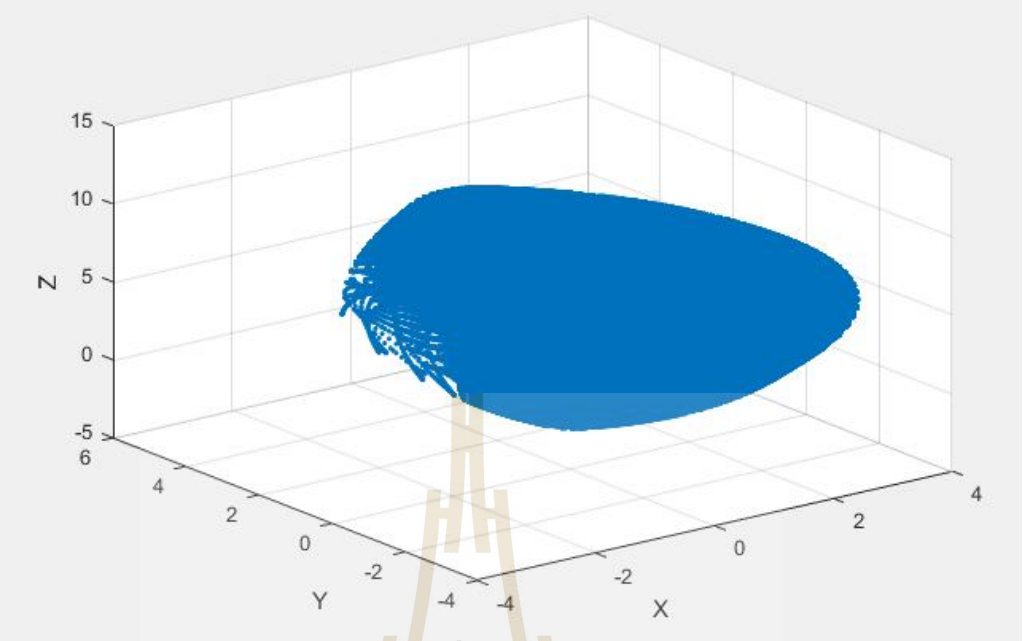
พารามิเตอร์	ตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณ	ขนาด(มิลลิเมตร)
ความยาวของแขนบน	l_2	61.25

ตารางที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบ (ต่อ)

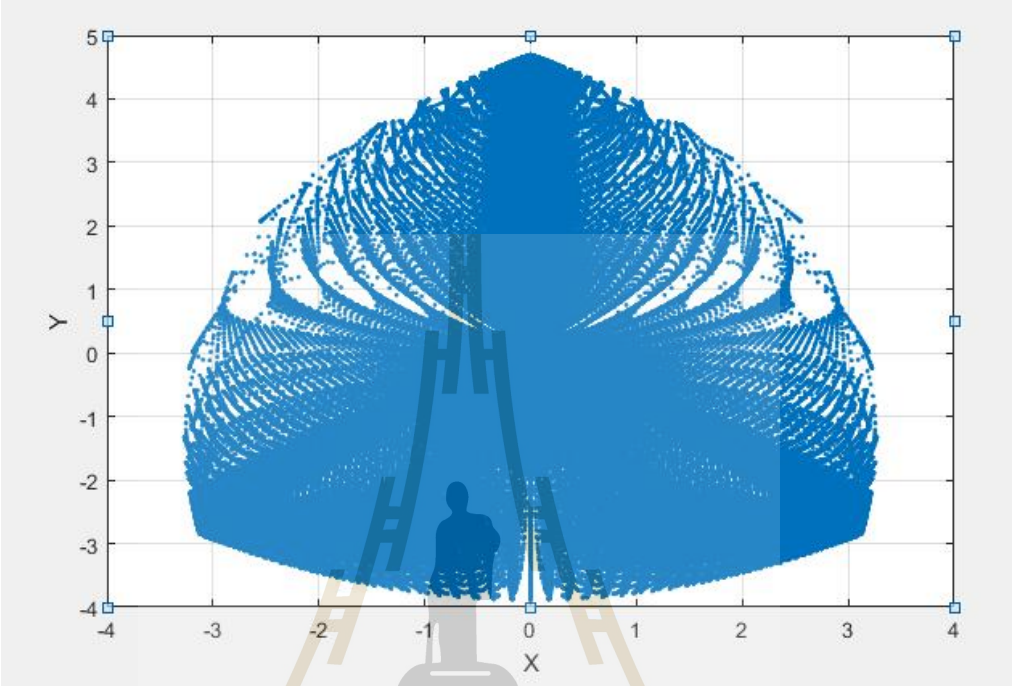
พารามิเตอร์	ตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณ	ขนาด(มิลลิเมตร)
 ความยาวด้านข้างของฐานบน	b	170

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

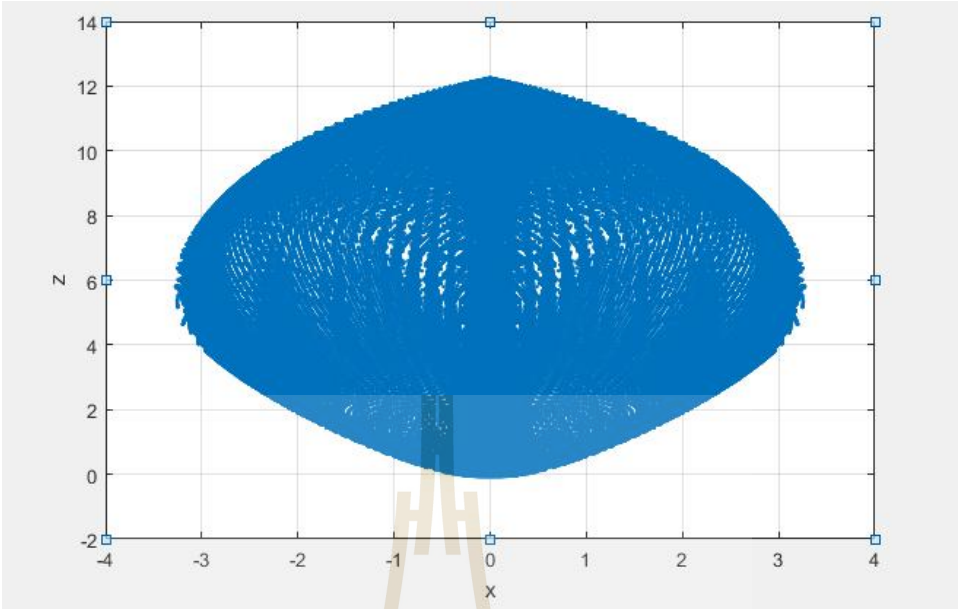
เศาสตร์แบบไ
ที่หุ่นยนต์สามา
$\theta_1, \theta_2, \theta_3$
ากผลการคำนวณ

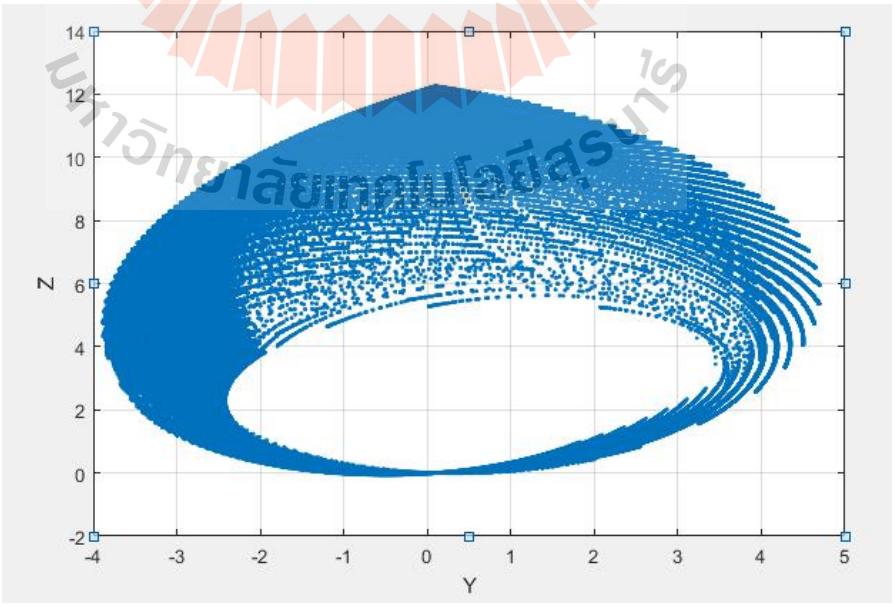


มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี


14
12
10
8
6
4
2
0
-2
Z
-4
-3
-2
-1
0
1
2
3
4
X


14
12
10
8
6
4
2
0
-2
Z
-4
-3
-2
-1
0
1
2
3
4
5
Y

- พิกัดในแกน y มีค่าตั้งแต่ -3.9 เซนติเมตร ถึง 4.7 เซนติเมตร
- พิกัดในแกน z มีค่าตั้งแต่ -0.057 เซนติเมตร ถึง 12 เซนติเมตร

4.3 การทดลองการเคลื่อนที่ของเซอร์โวมอเตอร์ทั้งสามชุด

เนื่องจากการควบคุมตำแหน่งมุมในการหมุนของเซอร์โวมอเตอร์นั้น ทำได้โดยกำหนดมุมที่ต้องการลงในฟังก์ชัน แล้วพบว่ามุมที่เซอร์โวมอเตอร์กวาดไปหรือเคลื่อนที่ไปนั้นไม่สัมพันธ์กับมุมของแขนหุ่นยนต์ ดังนั้นจึงต้องทำการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบการวัดมุมของเซอร์โวเมอเตอร์กับมุมของแขนหุ่นยนต์ว่ามีความสัมพันธ์กันอย่างไร เพื่อให้ได้มุมที่ถูกต้องตามความต้องการ โดยการทดลองจะแบ่งออกตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

- ทดลองหามุมที่เซอร์โวมอเตอร์กวาดไปโดยให้คำสั่งตามปกติ
- วัดค่ามุมของแขนหุ่นยนต์ที่เปลี่ยนแปลงไปตามการหมุนของเซอร์โวมอเตอร์
- หาความสัมพันธ์สร้างสมการเชิงเส้นเพื่อหาค่ามุมที่ต้องการป้อนให้เซอร์โวมอเตอร์ เพื่อให้ได้มุมการเคลื่อนที่ที่ต้องการ

ผลการทดลองเซอร์โวมอเตอร์แต่ละตัว แสดงตามตารางดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองของเซอร์โวมอเตอร์ตัวที่ 1

มุมที่ต้องการป้อน (องศา)	มุมที่กวาดไป (องศา)			ค่าเฉลี่ย (องศา)
	1	2	3	
30	16	16	16	16
30	17	17	17	17
32	18	18	18	18
33	19	19	19	19
35	20	20	20	20
35	21	21	21	21
40	22	22	22	22
40	23	23	23	23
42	24	24	24	24

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

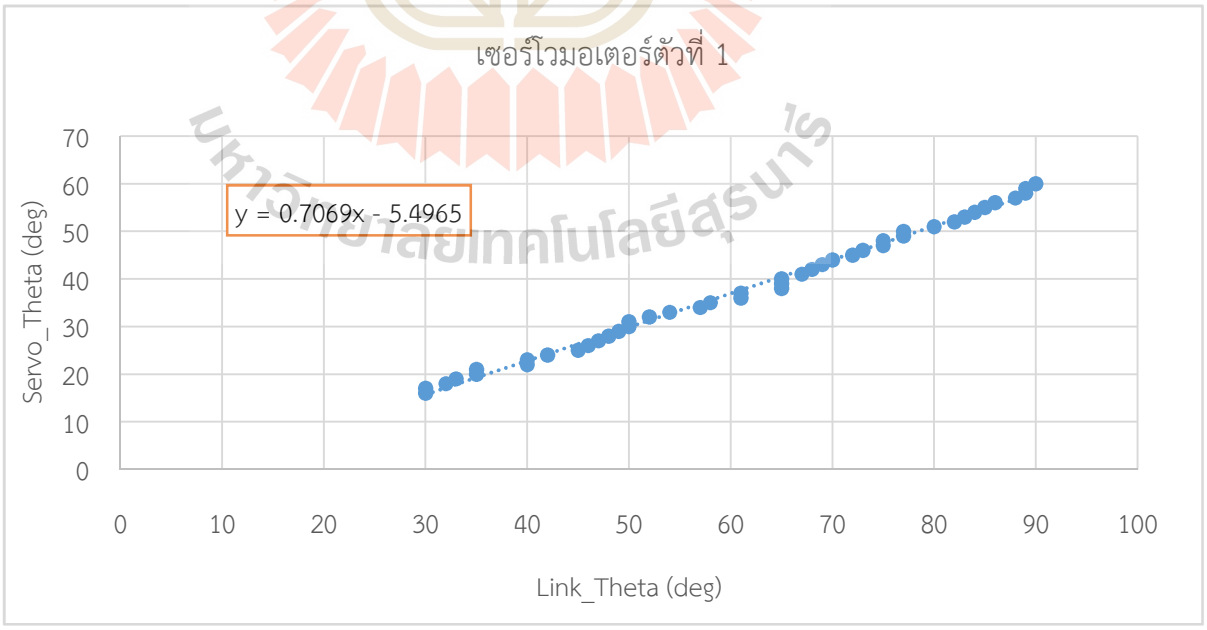
ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองของเซอร์โวมอเตอร์ตัวที่ 1 (ต่อ)

มุมที่ต้องการป้อน (องศา)	มุมที่กวาดไป (องศา)			ค่าเฉลี่ย (องศา)
	1	2	3	
45	25	25	25	25
46	26	26	26	26
47	27	27	27	27
48	28	28	28	28
49	29	29	29	29
50	30	30	30	30
50	31	31	31	31
52	32	32	32	32
54	33	33	33	33
57	34	34	34	34
58	35	35	35	35
61	36	36	36	36
61	37	37	37	37
65	38	38	38	38
65	39	39	39	39
65	40	40	40	40
67	41	41	41	41
68	42	42	42	42
69	43	43	43	43
70	44	44	44	44
72	45	45	45	45
73	46	46	46	46
75	47	47	47	47
75	48	48	48	48

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองของเซอร์โวมอเตอร์ตัวที่ 1 (ต่อ)

มุมที่ต้องการป้อน (องศา)	มุมที่กวาดไป (องศา)			ค่าเฉลี่ย (องศา)
	1	2	3	
77	49	49	49	49
77	50	50	50	50
80	51	51	51	51
82	52	52	52	52
83	53	53	53	53
84	54	54	54	54
85	55	55	55	55
86	56	56	56	56
88	57	57	57	57
89	58	58	58	58
89	59	59	59	59
90	60	60	60	60



เทียบกับมุมจากแขนหุ่นยนต์แขนที่ 1

จากกราฟ จะเห็นได้ว่าข้อมูลที่เกิดขึ้นแสดงความสัมพันธ์เป็นกราฟเส้นตรง ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์เป็น $y = 0.7069x + 5.4965$

เมื่อ x คือมุมที่วัดได้จากแขนของหุ่นยนต์ และ y คือมุมที่ต้องการทราบค่าจากเซอร์โวมอเตอร์

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองของเซอร์โวมอเตอร์ตัวที่ 2

มุมที่ต้องการป้อน (องศา)	มุมที่กวาดไป (องศา)			ค่าเฉลี่ย (องศา)
	1	2	3	
30	16	16	16	16
31	17	17	17	17
32	18	18	18	18
34	19	19	19	19
35	20	20	20	20
35	21	21	21	21
35	22	22	22	22
38	23	23	23	23
38	24	24	24	24
40	25	25	25	25
42	26	26	26	26
44	27	27	27	27
45	28	28	28	28
48	29	29	29	29
48	30	30	30	30
53	31	31	31	31
55	32	32	32	32
56	33	33	33	33
58	34	34	34	34

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

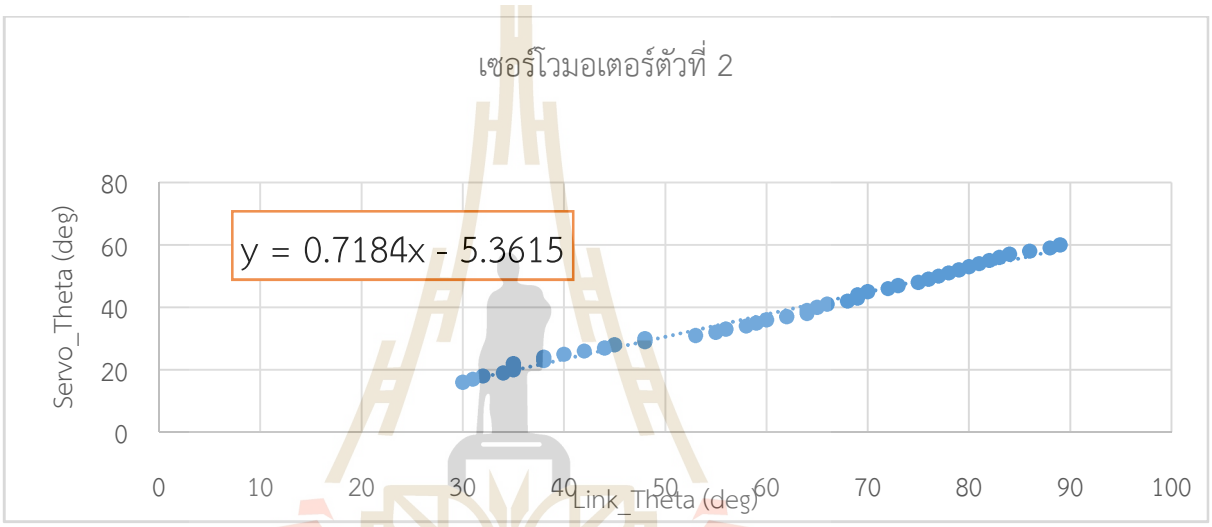
ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองของเซอร์โวมอเตอร์ตัวที่ 2 (ต่อ)

มุมที่ต้องการป้อน (องศา)	มุมที่กวาดไป (องศา)			ค่าเฉลี่ย (องศา)
	1	2	3	
59	35	35	35	35
60	36	36	36	36
62	37	37	37	37
64	38	38	38	38
64	39	39	39	39
65	40	40	40	40
66	41	41	41	41
68	42	42	42	42
69	43	43	43	43
69	44	44	44	44
70	45	45	45	45
72	46	46	46	46
73	47	47	47	47
75	48	48	48	48
76	49	49	49	49
77	50	50	50	50
78	51	51	51	51
79	52	52	52	52
80	53	53	53	53
81	54	54	54	54
82	55	55	55	55
83	56	56	56	56
84	57	57	57	57
86	58	58	58	58

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองของเซอร์โวมอเตอร์ตัวที่ 2 (ต่อ)

มุมที่ต้องการป้อน (องศา)	มุมที่กวาดไป (องศา)			ค่าเฉลี่ย (องศา)
	1	2	3	
88	59	59	59	59
89	60	60	60	60



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองของเซอร์โวมอเตอร์ตัวที่ 3

มุมที่ต้องการป้อน (องศา)	มุมที่กวาดไป (องศา)			ค่าเฉลี่ย (องศา)
	1	2	3	
30	15	15	15	15
33	16	16	16	16
35	17	17	17	17
36	18	18	18	18
36	19	19	19	19
37	20	20	20	20
40	21	21	21	21
40	22	22	22	22
43	23	23	23	23
43	24	24	24	24
46	25	25	25	25
46	26	26	26	26
47	27	27	27	27
49	28	28	28	28
49	29	29	29	29
50	30	30	30	30
52	31	31	31	31
53	32	32	32	32
56	33	33	33	33
57	34	34	34	34
60	35	35	35	35
61	36	36	36	36
61	37	37	37	37
62	38	38	38	38

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

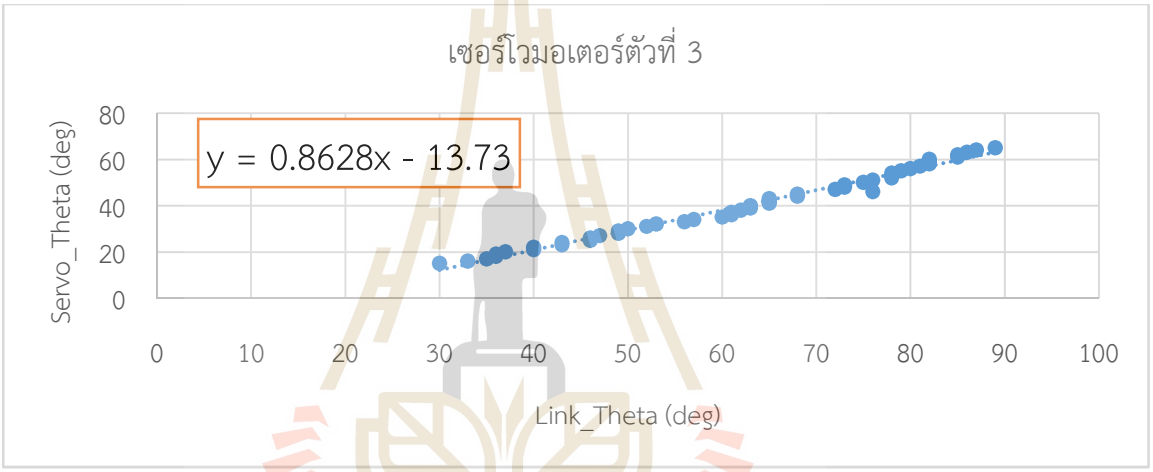
ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองของเซอร์โวมอเตอร์ตัวที่ 3 (ต่อ)

มุมที่ต้องการป้อน (องศา)	มุมที่กวาดไป (องศา)			ค่าเฉลี่ย (องศา)
	1	2	3	
63	39	39	39	39
63	40	40	40	40
65	41	41	41	41
65	42	42	42	42
65	43	43	43	43
68	44	44	44	44
68	45	45	45	45
76	46	46	46	46
72	47	47	47	47
73	48	48	48	48
73	49	49	49	49
75	50	50	50	50
76	51	51	51	51
78	52	52	52	52
78	53	53	53	53
78	54	54	54	54
79	55	55	55	55
80	56	56	56	56
81	57	57	57	57
82	58	58	58	58
82	59	59	59	59
82	60	60	60	60
85	61	61	61	61
85	62	62	62	62

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.4 ผลการทดลองของเซอร์โวมอเตอร์ตัวที่ 3 (ต่อ)

มุมที่ต้องการป้อน (องศา)	มุมที่กวาดไป (องศา)			ค่าเฉลี่ย (องศา)
	1	2	3	
86	63	63	63	63
87	64	64	64	64
89	65	65	65	65



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

4.4 การทดสอบหาพิกัด X , Y, Z บนแผ่นปลายของหุ่นยนต์

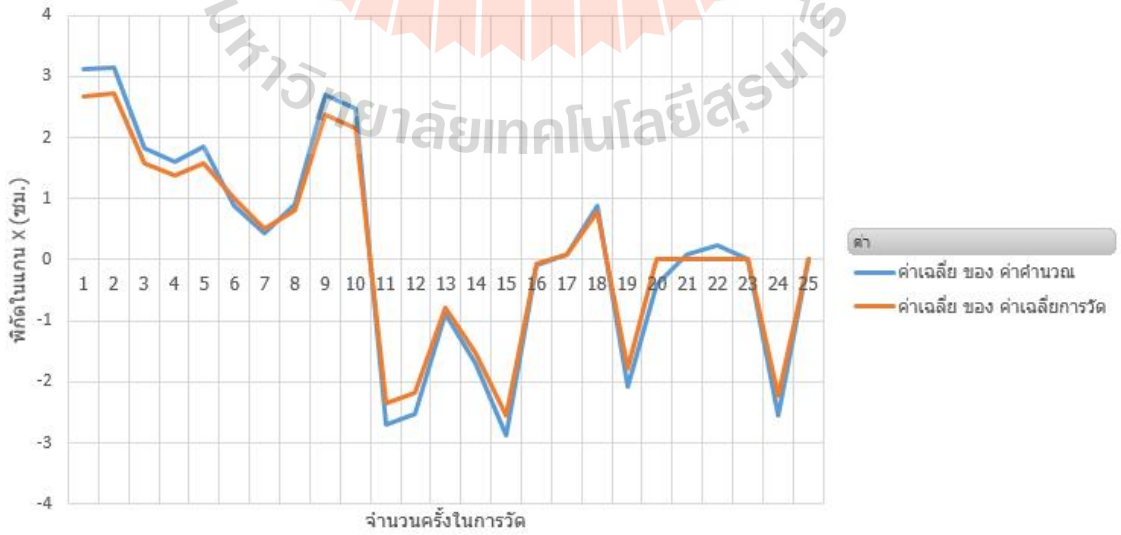
เนื่องจากงานวิจัยนี้ ได้ทำการออกแบบระบบการควบคุมเป็นระบบแบบเปิด(Open Loop Control) ส่งผลให้ค่าเอาต์พุตไม่มีผลต่อการควบคุมขบวนการของระบบ ผู้วิจัยจึงได้ทำการทดลองตรวจสอบการตอบสนองว่าเกิดค่าความคลาดเคลื่อนไปมากน้อยเพียงใด โดยทดสอบเปรียบวัดค่าระหว่างค่าที่ได้จากการคำนวณในโปรแกรม MATLAB และค่าที่ได้จากการวัดค่าจริง บนพิกัด X,Y,Z

ตารางที่ 4.5 ผลการทดลองเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนในพิกัด X

จำนวน	มุมที่ต้องการป้อน			ค่าจากการคำนวณ (ซม.)	ค่าจากการวัด(ซม.)			ค่าเฉลี่ยการวัด (ซม.)	FSO Error (%)
	1	2	3		1	2	3		
1	75	40	65	3.11	2.68	2.68	2.68	2.68	7
2	77	40	58	3.14	2.5	2.5	2.5	2.50	10
3	57	45	73	1.83	1.57	1.57	1.57	1.57	4
4	65	50	60	1.6	1.39	1.39	1.39	1.39	3
5	57	45	60	1.84	1.5	1.5	1.5	1.50	5
6	83	64	77	0.89	1.02	1	1.02	1.01	2
7	70	64	77	0.43	0.5	0.52	0.52	0.51	1
8	50	64	77	0.91	0.8	0.8	0.8	0.80	2
9	70	45	78	2.69	2.38	2.38	2.38	2.38	5
10	65	45	65	2.47	2.16	2.15	2.15	2.15	5
11	45	85	85	-2.69	-2.3	-2.4	-2.35	-2.35	5
12	45	66	66	-2.52	-2.2	-2.2	-2.18	-2.18	5
13	60	72	66	-0.88	-0.8	-0.8	-0.79	-0.79	1
14	53	72	70	-1.7	-1.5	-1.5	-1.53	-1.53	3

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

จำนวน	มุมที่ต้องการป้อน			ค่าจากการคำนวณ (ซม.)	ค่าจากการวัด(ซม.)			ค่าเฉลี่ยการวัด (ซม.)	FSO Error (%)
	1	2	3		1	2	3		
15	45	80	75	-2.86	-2.5	-2.5	-2.54	-2.54	5
16	65	85	50	-0.08	-0.1	-0.1	-0.07	-0.07	0
17	90	52	45	0.09	0.08	0.08	0.08	0.08	0
18	90	52	50	0.88	0.78	0.78	0.78	0.78	2
19	45	70	50	-2.08	-1.7	-1.7	-1.7	-1.68	6
20	58	70	50	-0.42	0	0	0	0.00	7
21	77	83	37	0.08	0	0	0	0.00	1
22	75	90	40	0.24	0	0	0	0.00	4
23	40	40	90	0	0	0	0	0.00	0
24	45	70	83	-2.54	-2.2	-2.2	-2.2	-2.20	5
25	55	55	90	0	0	0	0	0.00	0



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

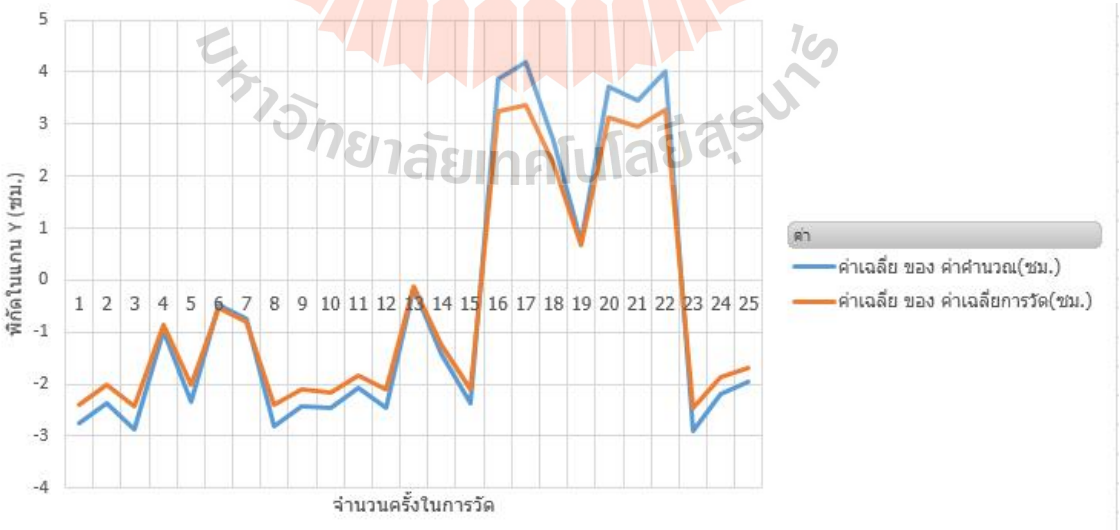
จากตารางที่ 4.5 แสดงถึงผลการทดลองเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าที่ได้จากการคำนวณและค่าที่วัดได้จริงในพิกัด X พบว่า มีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดอยู่ที่ 10 % โดยมุมที่ป้อนค่านั้นคือ ค่ามุมจากแขนของหุ่นยนต์ทั้งสามแขนโดยที่ มุมที่ 1 เท่ากับ 77 องศา มุมที่ 2 เท่ากับ 40 องศา มุมที่ 3 เท่ากับ 58 องศา ซึ่งค่าที่คำนวณได้นั้นเท่ากับ 3.14 ซม. แต่ค่าที่วัดได้เท่ากับ 2.5 ซม. มีผลต่างเป็น 0.64 ซม. และเมื่อนำค่าทั้งหมดที่ได้ทดสอบจำนวน 25 ครั้ง มาพล็อตกราฟดังรูปที่ 4.7 จะเห็นค่าความคลาดเคลื่อนได้ชัดเจนมากยิ่งขึ้น ในครั้งที่มีการป้อนจำนวนค่ามุมที่มากขึ้นจะพบความคลาดเคลื่อนได้น้อยกว่าจำนวนค่ามุมที่น้อย ซึ่งนั่นหมายความว่าค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นอาจจะเกิดจากความยาวของก้านแขนหุ่นยนต์ที่มีความไม่เหมาะสมรวมไปถึงการต่อก้านจากแขนของเซอร์โวเตอร์เชื่อมไปยังก้านแขนของหุ่นยนต์ส่งผลให้ความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นเกิดความคลาดเคลื่อนขึ้นได้

ตารางที่ 4.6 ผลการทดลองเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนในพิกัด Y

จำนวน	มุมที่ต้องการป้อน			ค่าจากการคำนวณ(ซม.)	ค่าจากการวัด(ซม.)			ค่าเฉลี่ยการวัด(ซม.)	FSO Error (%)
	1	2	3		1	2	3		
1	75	40	65	-2.75	-2.30	-2.3	-2.3	-2.30	5
2	77	40	58	-2.38	-2	-2	-2	-2.00	4
3	57	45	73	-2.86	-2.41	-2.42	-2.4	-2.42	5
4	65	50	60	-0.98	-0.85	-0.85	-0.9	-0.85	2
5	57	45	60	-2.34	-2	-2	-2	-2.00	4
6	83	64	77	-0.48	-0.52	-0.52	-0.5	-0.52	0
7	70	64	77	-0.74	-0.8	-0.8	-0.8	-0.80	1
8	50	64	77	-2.81	-2.41	-2.4	-2.4	-2.40	5
9	70	45	78	-2.41	-2.2	-2.21	-2.2	-2.10	4
10	65	45	65	-2.44	-2.18	-2.17	-2.2	-2.17	3
11	45	85	85	-2.07	-1.82	-1.82	-1.8	-1.82	3
12	45	66	66	-2.44	-2.1	-2.1	-2.1	-2.10	4
13	60	72	66	-0.14	-0.13	-0.13	-0.1	-0.13	0
14	53	72	70	-1.42	-1.24	-1.24	-1.2	-1.24	2
15	45	80	75	-2.36	-2.1	-2.1	-2.1	-2.10	3

ตารางที่ 4.6 ผลการทดลองเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนในพิกัด Y (ต่อ)

จำนวน	มุมที่ต้องการป้อน			ค่าจากการ	ค่าจากการวัด(ซม.)			ค่าเฉลี่ยการ	FSO
	1	2	3	คำนวณ(ซม.)	1	2	3	วัด(ซม.)	Error (%)
16	65	85	50	3.85	3.25	3.25	3.25	3.25	7
17	90	52	45	4.2	3.52	3.52	3.52	3.52	8
18	90	52	50	2.68	2.25	2.25	2.25	2.25	5
19	45	70	50	0.74	0.69	0.69	0.69	0.69	1
20	58	70	50	3.71	3	3	3	3.00	8
21	77	83	37	3.46	2.82	2.82	2.82	2.82	7
22	75	90	40	4.02	3.2	3.2	3.2	3.20	10
23	40	40	90	-2.9	-2.45	-2.45	-2.5	-2.45	5
24	45	70	83	-2.19	-1.85	-1.85	-1.9	-1.85	4
25	55	55	90	-1.96	-1.68	-1.68	-1.7	-1.68	3



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

จากตารางที่ 4.6 แสดงถึงผลการทดลองเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าที่ได้จากการคำนวณและค่าที่วัดได้จริงในพิกัด Y พบว่า มีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดอยู่ที่ 10 % โดยมุมที่ป้อนค่านั้นคือ ค่ามุมจากแขนของหุ่นยนต์ทั้งสามแขนโดยที่ มุมที่ 1 เท่ากับ 75 องศา มุมที่ 2 เท่ากับ 90 องศา มุมที่ 3 เท่ากับ 40 องศา ซึ่งค่าที่คำนวณได้นั้นเท่ากับ 4.02 ซม. แต่ค่าที่วัดได้เท่ากับ 3.2 ซม. มีผลต่างเป็น 0.82 ซม. และเมื่อนำค่าทั้งหมดที่ได้ทดสอบจำนวน 25 ครั้ง จะเห็นค่าความคลาดเคลื่อนได้ชัดเจนมากยิ่งขึ้น ในครั้งที่มีการป้อนจำนวนค่ามุมที่มากขึ้นจะพบความคลาดเคลื่อนได้น้อยกว่าจำนวนค่ามุมที่น้อย ซึ่งนั่นหมายความว่าค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นอาจจะเกิดจากความยาวของก้านแขนหุ่นยนต์ที่มีความไม่เหมาะสมรวมไปถึงการต่อก้านจากแขนของเซอร์โวเตอร์เชื่อมไปยังก้านแขนของหุ่นยนต์ส่งผลให้ความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นเกิดความคลาดเคลื่อนขึ้นได้

ตารางที่ 4.7 ผลการทดลองเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนในพิกัด Z

จำนวน	มุมที่ต้องการป้อน			ค่าจากการคำนวณ(ซม.)	ค่าจากการวัด(ซม.)			ค่าเฉลี่ยการวัด (ซม.)	FSO Error (%)
	1	2	3		1	2	3		
1	45	45	45	8.66	7.96	7.95	7.96	7.96	9
2	46	46	46	8.81	8.11	8.11	8.12	8.11	9
3	47	47	47	8.96	8.28	8.27	8.28	8.28	8
4	48	48	48	9.1	8.45	8.44	8.43	8.44	8
5	49	49	49	9.24	8.61	8.6	8.6	8.60	7
6	50	50	50	9.38	8.76	8.76	8.76	8.76	7
7	51	51	51	9.52	8.9	8.92	8.92	8.91	7
8	52	52	52	9.65	9.05	9.05	9.04	9.05	7
9	53	53	53	9.78	9.2	9.1	9.1	9.13	7
10	54	54	54	9.91	9.36	9.36	9.35	9.36	6
11	55	55	55	10.03	9.51	9.52	9.51	9.51	5
12	56	56	56	10.16	9.66	9.65	9.65	9.65	5
13	57	57	57	10.27	9.8	9.81	9.82	9.81	5
14	58	58	58	10.39	9.96	9.96	9.95	9.96	4
15	59	59	59	10.49	10.09	10.08	10.08	10.08	4

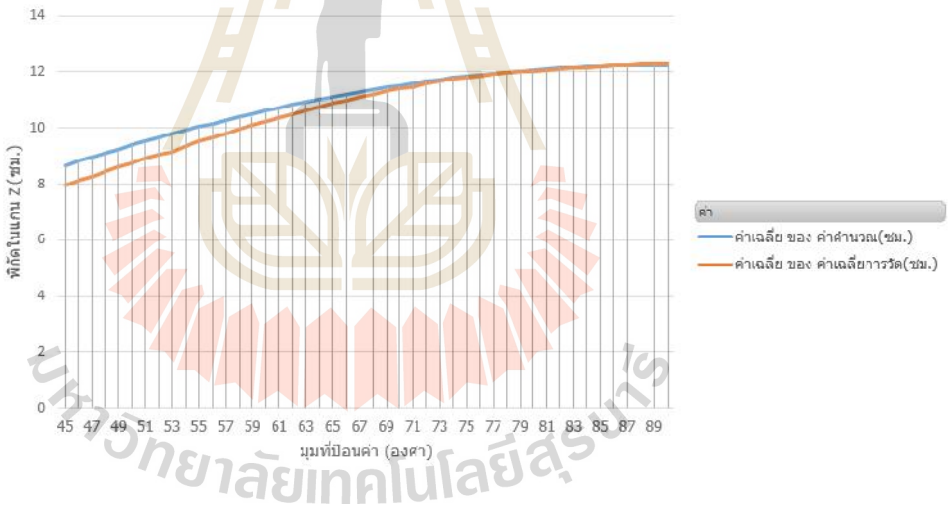
ตารางที่ 4.7 ผลการทดลองเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนในพิกัด Z m\ (ต่อ)

จำนวน	มุมที่ต้องการป้อน			ค่าจากการคำนวณ(ซม.)	ค่าจากการวัด(ซม.)			ค่าเฉลี่ยการวัด (ซม.)	FSO Error (%)
	1	2	3		1	2	3		
16	60	60	60	10.61	10.23	10.23	10.23	10.23	4
17	61	61	61	10.71	10.36	10.36	10.35	10.36	3
18	62	62	62	10.82	10.49	10.5	10.5	10.50	3
19	63	63	63	10.91	10.63	10.63	10.64	10.63	3
20	64	64	64	11.01	10.76	10.76	10.75	10.76	2
21	65	65	65	11.1	10.87	10.87	10.88	10.87	2
22	66	66	66	11.19	10.99	10.98	10.98	10.98	2
23	67	67	67	11.28	11.11	11.12	11.12	11.12	1
24	68	68	68	11.36	11.21	11.2	11.2	11.20	1
25	69	69	69	11.45	11.32	11.3	11.3	11.31	1
26	70	70	70	11.51	11.39	11.39	11.38	11.39	1
27	71	71	71	11.58	11.48	11.46	11.46	11.47	1
28	72	72	72	11.65	11.57	11.57	11.58	11.57	1
29	73	73	73	11.71	11.66	11.65	11.65	11.65	0
30	74	74	74	11.78	11.75	11.75	11.75	11.75	0
31	75	75	75	11.83	11.79	11.8	11.8	11.80	0
32	76	76	76	11.89	11.86	11.86	11.86	11.86	0
33	77	77	77	11.94	11.92	11.91	11.91	11.91	0
34	78	78	78	11.98	11.96	11.96	11.96	11.96	0
35	79	79	79	12.02	12	12	12	12.00	0
36	80	80	80	12.06	12.04	12.02	12.02	12.03	0
37	81	81	81	12.1	12.08	12.08	12.08	12.08	0
38	82	82	82	12.13	12.11	12.1	12.1	12.10	0
39	83	83	83	12.16	12.14	12.14	12.13	12.14	0
40	84	84	84	12.18	12.17	12.15	12.15	12.16	0

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตารางที่ 4.7 ผลการทดลองเปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนในพิกัด Z m\ (ต่อ)

จำนวน	มุมที่ต้องการป้อน			ค่าจากการคำนวณ(ซม.)	ค่าจากการวัด(ซม.)			ค่าเฉลี่ยการวัด (ซม.)	FSO Error (%)
	1	2	3		1	2	3		
41	85	85	85	12.2	12.19	12.19	12.19	12.19	0
42	86	86	86	12.22	12.22	12.22	12.23	12.22	0
43	87	87	87	12.23	12.25	12.25	12.24	12.25	0
44	88	88	88	12.24	12.27	12.26	12.26	12.26	0
45	89	89	89	12.25	12.28	12.27	12.27	12.27	0
46	90	90	90	12.25	12.28	12.28	12.28	12.28	0



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ความคลาดเคลื่อนได้น้อยกว่าจำนวนค่ามุมที่น้อย ซึ่งนั่นหมายความว่าค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นอาจจะเกิดจากความยาวของก้านแขนหุ่นยนต์ที่มีความไม่เหมาะสมรวมไปถึงการต่อก้านจากแขนของเซอร์โวเตอร์เชื่อมไปยังก้านแขนของหุ่นยนต์ ส่งผลให้ความสัมพันธ์ที่เกิดขึ้นเกิดความคลาดเคลื่อนขึ้นได้

ดังนั้น จึงสรุปได้ว่าค่าความคาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นของทั้ง 3 แกนนั้น มีค่าที่ค่อนข้างสูง อันเนื่องมาจากการสร้างหุ่นยนต์ตัวนี้ ถูกสร้างขึ้นด้วยความละเอียดที่ไม่สูงนัก อาจเป็นผลมาจากความยาวของก้านแขนหุ่นยนต์ที่มีความยาวไม่เหมาะสมหรือที่ข้อต่อ(revolt joint)ต่างๆเกิดช่องว่าง(gap)ขึ้น หรืออาจจะเกิดจากการสร้างความสัมพันธ์ระหว่างมุมของเซอร์โวมอเตอร์และมุมที่จุดหมุนบนแผ่นฐาน มีสมการควบคุมที่มีจุดทศนิยมถึง 4 ตำแหน่ง แต่เซอร์โวมอเตอร์นั้นสามารถขยับได้ทีละ 1 องศา อาจจะมีความละเอียดพอที่ไม่มากพอที่จะหมุนแขนของเซอร์โวมอเตอร์ไปยังมุมตามสมการควบคุมที่ต้องการ ดังนั้นแนวทางในการลดความคาดเคลื่อน อาจจะทำโดยการปรับชุดของก้านแขนหุ่นยนต์(Link) และข้อต่อ(Joint) ให้มีความเหมาะสมมากยิ่งขึ้นเพื่อให้เกิดช่องว่าง(gap)น้อยที่สุด และอาจจะทำการปรับเปลี่ยนชุดมอเตอร์ที่สามารถอ่านค่าความละเอียดได้มากยิ่งขึ้น เช่น สเต็ปมอเตอร์ ซึ่งจะมีความละเอียดและแม่นยำมากยิ่งขึ้น

4.5 การทดลองค้นหาค่าจากตารางเพื่อควบคุมหุ่นยนต์

ในการทดลองนี้ ได้ทำการหาค่าของพิกัด X , Y , Z ที่อยู่บนระนาบของแผ่นปลาย(End Effector) และมุม Orientation $(\theta_x, \theta_y, \theta_z)$ ที่เกิดขึ้น จากสมการจลนศาสตร์แบบไปข้างหน้า (Forward Kinematic) และโปรแกรมจะทำการส่งค่าทั้งหมดไปเก็บไว้ในตาราง โดยหน้าต่างของผู้ใช้งานจะถูกสร้างขึ้นมา เพื่อใช้ในการป้อนค่ามุม Orientation $(\theta_x, \theta_y, \theta_z)$ หลังจากนั้นโปรแกรมจะทำการส่งค่าดังกล่าว ไปเทียบตารางดูว่าควรปรับการควบคุมเซอร์โวมอเตอร์ให้ไปยังมุมองศาที่ต้องการเป็นมุมใด เป็นการแก้ไขปัญหาที่ซับซ้อนในการหาสมการจลนศาสตร์แบบผกผัน(Inverse Kinematic) พบว่าผลที่ได้จากการคำนวณสมการจลนศาสตร์แบบไปข้างหน้า(Forward Kinematic) มีค่าทั้งหมด 226,981 ค่า โดยที่กำหนดมุมองศาของจุดหมุนบนแผ่นฐานตั้งแต่ 30-90 องศา เนื่องจากจุดเริ่มต้นของหุ่นยนต์นี้ มุมของแขนหุ่นยนต์จะทำมุมกับระนาบที่แผ่นฐานอยู่ 30 องศา โดยเพิ่มค่าของแต่ละมุมไปทีละ 1 องศา หากผู้ใช้งานต้องการทดสอบโปรแกรมนี้ ต้องเปิดค่าจากตารางแล้วป้อนค่าอินพุตเข้าไปเพื่อให้ได้ค่าเอาต์พุตที่ต้องการออกมา และข้อมูลดังกล่าวนี้ สามารถดูตัวอย่างได้จากภาคผนวก ข

4.5.1 ขอบเขตของมุม Orientation $(\theta_x, \theta_y, \theta_z)$ มีดังต่อไปนี้

θ_x = 8.1 องศา ถึง 170 องศา

θ_y = 0.051 องศา ถึง 180 องศา

θ_z = 0.0003 องศา ถึง 170 องศา

บทที่ 5

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบและสร้างต้นแบบด้วยกลไก Canfield ซึ่งการวิจัยนี้พยายามที่จะสร้างต้นแบบด้วยกลไก Canfield เพื่อศึกษาเกี่ยวกับจลนศาสตร์ของหุ่นยนต์แบบขนาน ที่สามารถเคลื่อนที่ได้ 6 องศาอิสระ โดยโครงสร้างของหุ่นยนต์จะมีลักษณะเป็นหุ่นยนต์สามก้านแบบขนาน โดยแต่ละแขนจะประกอบไปด้วยสามข้อต่อแบบหมุน (revolt joint) ถูกขับเคลื่อนด้วยเซอร์โวมอเตอร์ทั้งหมดสามตัว โดยจะใช้หลักการทางจลศาสตร์แบบไปข้างหน้า(Forward Kinematic) เพื่อหาตำแหน่งหรือพิกัด(Position) บนปลายแขนของหุ่นยนต์ และมุมที่พิกัดบนปลายแขนของหุ่นยนต์ทำกับแกน X แกน Y และแกน Z หรือมุม Orientation บนระนาบของแผ่นปลาย ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองนี้ทำโดยการป้อนค่าองศาจากมุมที่ 30-90 องศา เนื่องจากมุมที่จุดหมุนบนแผ่นฐานค่าเริ่มต้นอยู่ที่ 30 องศา และเพิ่มค่ามุมของจุดหมุนในแต่ละแขนของทั้งสามแขนไปทีละ 1 องศา ดังนั้นค่าที่ได้ออกมาทั้งหมดจะเท่ากับ 226,981 ค่า ซึ่งเป็นข้อมูลขนาดใหญ่ และเพื่อแก้ไขปัญหาความยุ่งยากในการหาสมการจลศาสตร์แบบผกผัน(Inverse Kinematic) จึงทำการส่งข้อมูลขนาดใหญ่นี้ไปเก็บไว้ในรูปแบบของตาราง และสร้างหน้าต่างผู้ใช้งานขึ้นมาเพื่อป้อนค่ามุม Orientation เพื่อส่งค่าดังกล่าวไปยังข้อมูลที่อยู่ในตาราง เพื่อเทียบค่าดูว่าควรปรับองศาของจุดหมุนบนแผ่นฐานไปที่มุมใด ($\theta_1, \theta_2, \theta_3$) แทนการใช้สมการจลนศาสตร์แบบผกผัน(Inverse Kinematic) ต่อจากนั้นได้ทำการทดสอบความแม่นยำของหุ่นยนต์โดยการวัดค่าความคลาดเคลื่อนของพิกัดในแต่ละแกน พบว่า แกน X มีค่าความเคลื่อนเคลื่อนเท่ากับ 10% แกน Y มีค่าความคาดเคลื่อนเท่ากับ 10% และแกน Z มีค่าความคาดเคลื่อนเท่ากับ 11%

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยที่ใช้ระบบควบคุมแบบเปิด ดังนั้นจึงอาจมีค่าความคลาดเคลื่อนเกิดขึ้น หากต้องการให้มีความถูกต้องเพิ่มขึ้น สามารถใช้ระบบควบคุมแบบปิด โดยทำ

การติดตั้งเซนเซอร์วัดมุมเพิ่มเข้าไปในระบบ เพื่อป้อนสัญญาณการตรวจสอบมุม Orientation ที่เกิดขึ้นหรือติด Potentiometer Encoder ไว้ที่เซอร์โวมอเตอร์สำหรับวัดตำแหน่งมุมองศาการหมุนและทำการแก้ไขให้เซอร์โวมอเตอร์หมุนไปยังองศาที่ถูกต้องมากยิ่งขึ้น

5.2.2 การออกแบบและสร้างกลไกแบบ Canfield นี้ มีความยุ่งยากซับซ้อนค่อนข้างมาก การเลือกใช้วัสดุควรมีน้ำหนักเบาและทุกๆข้อต่อควรออกแบบให้มีความแข็งแรง เพราะในขณะดำเนินการวิจัยพบว่า ถ้าเลือกใช้วัสดุที่ไม่แข็งแรงพอจะทำให้โครงสร้างเกิดความเสียหายได้ ซึ่งผู้จัดทำได้มีการออกแบบและสร้างกลไกแบบ Canfield หลายครั้งด้วยกัน เนื่องจากพบปัญหาที่แตกต่างกันไปจึงได้ทำการแก้ไขและปรับปรุงให้ดีขึ้นตามลำดับ

5.2.3 เครื่องจำลองต้นแบบกลไก Canfield นี้ สามารถนำไปพัฒนาและประยุกต์ใช้เป็น Actuator ในการควบคุมแผงโซล่าเซลล์เพื่อใช้ในการติดตามแสงอาทิตย์ได้ โดยมีแนวทางคืออาจจะนำเซนเซอร์ที่สามารถวัดความเข้มแสงมาติดไว้บนแผงโซล่าเซลล์จำนวน 3 ตัว วางตามแนวจุดหมุนของกลไก Canfield จากนั้นนำความเข้มแสงทั้ง 3 จุด มาหาค่าเฉลี่ยที่มีค่าความเข้มของแสงตกกระทบมากที่สุด บนตำแหน่งของแผงโซล่าเซลล์ ซึ่งอาจจะเป็นจุดของแนวโน้มที่เป็นจุดศูนย์กลางของทั้ง 3 จุด หรือจุดเซนทรอยด์ และประมวลผลโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ เพื่อสั่งงานควบคุมทิศทางการหมุนของมอเตอร์ที่ควบคุมกลไก Canfield ให้ขับเคลื่อนแผงโซล่าเซลล์ไปยังตำแหน่งที่มีความเข้มสูงที่สุดโดยอัตโนมัติ ตลอดแนวการเคลื่อนที่ตั้งแต่ทิศตะวันออกไปยังทิศตะวันตก ซึ่งข้อดีของกลไก Canfield นั้น บนระนาบของแผ่นปลายสามารถที่จะเคลื่อนที่ได้ในหลากหลายทิศทาง อาจจะส่งผลให้สามารถควบคุมแผงโซล่าเซลล์ให้ติดตามแสงอาทิตย์ในแนวตั้งฉากได้ดีกว่าระบบ 2 แกนที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน นอกจากนี้ กลไก Canfield ยังสามารถที่จะนำไปประยุกต์ใช้เป็น Platforms ที่นำไปติดตั้งเป็น End effector ไว้ที่ปลายแขนกลหรือหุ่นยนต์ Articulate Arm เพื่อใช้เป็นหุ่นยนต์เชื่อมที่สามารถเข้าถึงได้ในหลากหลายมุมมากยิ่งขึ้นกว่าเดิม และยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในอุตสาหกรรมอื่นๆเพื่อก่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดต่อไปได้อีกด้วย

รายการอ้างอิง

ชาญณรงค์ ชูสุย, ต้นแบบหุ่นยนต์แบบสามก้านโยงในอุตสาหกรรม. ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2559

สุรัมภา จารัตน์, อนันท์ เกิดสิน, การออกแบบและสร้างชุดสาธิตหุ่นยนต์เดลต้า 3 แกน. ปริญญานิพนธ์ครุศาสตร์อุตสาหกรรมบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์ ภาควิชาครุศาสตร์เครื่องกล คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ, 2557

ศุภโชค มานิกพันธุ์, การจำลองการทำงานแขนกลอุตสาหกรรมแบบ 6 ข้อต่อ โดยใช้วิธีโครงข่ายประสามเทียม. ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ และสนเทศศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย, 2553

ธวัลรัตน์ ทองปัน, การสร้างเครื่องฝึกบินจำลองต้นแบบ. ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2557

อภิลักษณ์ หล่อนกลาง, การพัฒนาเครื่องฝึกบินจำลองชนิดสามองศาอิสระ. ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, 2558

Stephen Lee Canfield, Development of the Carpal Wrist; a Symmetric, Parallel-Architecture Robotic Wrist, Virginia, pp.16-25, 1997.

Ouafae HAMDOUN, Fatima Zahra BAGHLI, Larbi EL BAKKALI, Inverse kinematic Modeling of 3RRR Parallel Robot, Morocco, 2015.

Abdul Jalil, M.K., (n.d.). Design and Development of 6-DOF Motion Platform for Vehicle Driving Simulator. Design Department, Faculty of Mechanical Engineering, Universiti Teknologi Malaysia.

Casas, S., and Alcaraz, J.M., Olanda, R., Coma, I., and Fernandez, M. (2014). Towards an Extensible Simulator of Real Motion Platform. Simulation Modelling Practice and Theory, vol.45; June, pp.50-61.

Chiew, Y.S., Abdul Jali, M.K., and Hussein, M. (2008). Kinematic Modeling of Driving Simulator Motion Platform. Proceedings of the Conference on Innovative Technologies in Intelligent Systems and Industrial Applications, Malaysia; July 12-13, pp.30-34.

Dasgupta, B., and Mruthyunjaya, T.S. (1998). A Newton-Euler formulation for the inverse dynamics of the Stewart platform manipulator, Mechanism and Machine Theory, vol.33 (8); November, pp.1135-1152.

Kim, H.S., Cho, Y.M., and Lee, K.I. (2002). Robust nonlinear task space control for a 6 DOF parallel manipulator, Automatica, vol.41 (9); September, pp.1591-1600.

Kroger, T., and Wahl, F.M. (2009). Advances in Robotics Research: Theory, Implementation, Application, Springer; 358 pp.

Rekdalsbakken, W. (2005). Design and Application of a Motion Platform in Three Degrees of Freedom. Proceedings of the 46th Conference of Simulation and Modelling, pp.269-279.

Spong, M.W., and Vidyasagar, M. (1989). Robot Dynamics and Control, Wiley & Son: New York; 352 pp.

Wu, D.S., and Gu, H.B. (2007). Adaptive Sliding Control of Six-DOF Flight Simulator Motion Platform, Chinese Journal of Aeronautics, vol.20 (5); October, pp.425-433.

Maya, M., Castillo, E., Lomeli, A., Gonzalez-Galvan, E., and Cardenas, A. (2013), Workspace and Payload-Capacity of a New Reconfigurable Delta Parallel Robot, International Journal of Advanced Robotic Systems, Vol. 10, No. 56, 1-11.

Rainundo, D., Eddie, R, L., Zambrano, E., “Delta robot controlled by robotic operating system Robot delta controlled con Sistema operative robotic (R.O.S),” International Journal, Vol, 12.1-6, June 2015.

Olsson, A. (2009) Modeling and control of a Delta-3 robot. Master Thesis, Lund University, Department of Automatic Control, Sweden.

Deblasise, D. and Maurine, P. (2005), Effective Geometrical Calibration of a Delta Parallel Robot Used In Neurosurgery, IEEE-RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2005 (IROS 2005), 1313-1381.

Ezekiel G. Merriam, Jonathan E. Jones, and Larry L. Howell, " Design of 3D-Printed Titanium Compliant Mechanisms " Proceedings of the 42nd Aerospace Mechanisms Symposium, NASA Goddard Space Flight Center, May 14-16, 2014.

Liu, N., Wu, J., (2014). Kinematics and Application of a Hybrid Industrial Robot-Delta-RST, Sensors & Transducers, Vol. 169, Issue 4, April 2014, pp. 186-192.

Robert L. Williams., The Delta Parallel Robot: Kinematics Solution, Mechanical Engineering, Ohio University, October 2016.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก ก

ตัวอย่างตารางบันทึกค่าผลการทดลองที่ 4.5

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ตัวอย่างตารางบันทึกผลการทดลองที่ 4.5 (1,000 ค่า)

Angle_1	Angle_2	Angle_3	Theta_X	Theta_Y	Theta_Z	Posittion (X)	Posittion (Y)	Posittion (Z)
30	30	30	90	90	0.45	0	0	6.1
30	30	31	90	83	7.1	0	0.77	6.1
30	30	32	90	76	14	0	1.5	5.9
30	30	33	90	69	21	0	2.2	5.6
30	30	34	90	61	29	0	2.8	5
30	30	35	90	53	37	0	3.2	4.3
30	30	36	90	45	45	0	3.5	3.4
30	30	37	90	37	53	0	3.4	2.6
30	30	38	90	30	60	0	3.2	1.9
30	30	39	90	24	66	0	2.9	1.3
30	30	40	90	18	72	0	2.5	0.79
30	30	41	90	12	78	0	2	0.44
30	30	42	90	7.7	82	0	1.6	0.21
30	30	43	90	3.6	86	0	1.1	0.071
30	30	44	90	0.18	90	0	0.72	0.0023
30	30	45	90	2.3	92	0	0.36	-0.014
30	30	46	90	15	75	0	0.029	0.0078
30	30	47	90	170	78	0	-0.26	0.057
30	30	48	90	170	76	0	-0.52	0.13
30	30	49	90	160	74	0	-0.76	0.21
30	30	50	90	160	73	0	-0.96	0.3
30	30	51	90	160	71	0	-1.1	0.4
30	30	52	90	160	69	0	-1.3	0.5
30	30	53	90	160	67	0	-1.5	0.61

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Angle_1	Angle_2	Angle_3	Theta_X	Theta_Y	Theta_Z	Posittion (X)	Posittion (Y)	Posittion (Z)
30	30	54	90	160	66	0	-1.6	0.72
30	30	55	90	150	64	0	-1.7	0.82
30	30	56	90	150	63	0	-1.8	0.93
30	30	57	90	150	62	0	-1.9	1
30	30	58	90	150	60	0	-2	1.1
30	30	59	90	150	59	0	-2.1	1.2
30	30	60	90	150	58	0	-2.2	1.3
30	30	61	90	150	57	0	-2.2	1.4
30	30	62	90	150	56	0	-2.3	1.5
30	30	63	90	140	55	0	-2.3	1.6
30	30	64	90	140	54	0	-2.4	1.7
30	30	65	90	140	53	0	-2.4	1.8
30	30	66	90	140	52	0	-2.5	1.9
30	30	67	90	140	51	0	-2.5	2
30	30	68	90	140	50	0	-2.5	2.1
30	30	69	90	140	49	0	-2.6	2.2
30	30	70	90	140	48	0	-2.6	2.3
30	30	71	90	140	48	0	-2.6	2.4
30	30	72	90	140	47	0	-2.6	2.5
30	30	73	90	140	46	0	-2.6	2.6
30	30	74	90	140	45	0	-2.6	2.6
30	30	75	90	130	44	0	-2.7	2.7
30	30	76	90	130	44	0	-2.7	2.8
30	30	77	90	130	43	0	-2.7	2.9
30	30	78	90	130	42	0	-2.7	3
30	30	79	90	130	41	0	-2.7	3

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Angle_1	Angle_2	Angle_3	Theta_X	Theta_Y	Theta_Z	Posittion (X)	Posittion (Y)	Posittion (Z)
30	30	80	90	130	41	0	-2.7	3.1
30	30	81	90	130	40	0	-2.7	3.2
30	30	82	90	130	39	0	-2.7	3.3
30	30	83	90	130	39	0	-2.7	3.3
30	30	84	90	130	38	0	-2.7	3.4
30	30	85	90	130	37	0	-2.6	3.5
30	30	86	90	130	36	0	-2.6	3.6
30	30	87	90	130	36	0	-2.6	3.6
30	30	88	90	130	35	0	-2.6	3.7
30	30	89	90	120	34	0	-2.6	3.8
30	30	90	90	120	34	0	-2.6	3.8
30	31	30	93	92	3.5	-0.31	-0.21	6.2
30	31	31	93	86	5	-0.3	0.45	6.2
30	31	32	93	79	11	-0.29	1.2	6.1
30	31	33	92	72	19	-0.26	1.9	5.8
30	31	34	92	64	27	-0.22	2.6	5.3
30	31	35	92	55	35	-0.18	3.2	4.5
30	31	36	92	47	43	-0.13	3.5	3.7
30	31	37	91	39	51	-0.089	3.5	2.8
30	31	38	91	31	59	-0.052	3.3	2
30	31	39	90	24	66	-0.024	2.9	1.3
30	31	40	90	18	72	-0.0047	2.5	0.8
30	31	41	90	12	78	0.0062	2	0.43
30	31	42	90	7.4	83	0.011	1.5	0.19
30	31	43	89	3.2	87	0.011	1	0.057
30	31	44	89	0.81	90	0.0078	0.62	-0.004

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Angle_1	Angle_2	Angle_3	Theta_X	Theta_Y	Theta_Z	Posittion (X)	Posittion (Y)	Posittion (Z)
30	31	45	89	2.4	92	0.0026	0.24	-0.0099
30	31	46	92	170	76	-0.004	-0.092	0.024
30	31	47	92	170	78	-0.011	-0.39	0.085
30	31	48	92	170	76	-0.019	-0.65	0.16
30	31	49	92	160	74	-0.027	-0.89	0.26
30	31	50	92	160	72	-0.035	-1.1	0.36
30	31	51	92	160	70	-0.043	-1.3	0.47
30	31	52	92	160	68	-0.051	-1.4	0.58
30	31	53	92	160	67	-0.059	-1.6	0.69
30	31	54	92	150	65	-0.066	-1.7	0.8
30	31	55	92	150	64	-0.073	-1.8	0.91
30	31	56	92	150	62	-0.08	-1.9	1
30	31	57	92	150	61	-0.087	-2	1.1
30	31	58	92	150	60	-0.094	-2.1	1.2
30	31	59	92	150	58	-0.1	-2.2	1.3
30	31	60	92	150	57	-0.11	-2.3	1.5
30	31	61	92	150	56	-0.11	-2.3	1.6
30	31	62	92	150	55	-0.12	-2.4	1.7
30	31	63	92	140	54	-0.12	-2.4	1.8
30	31	64	92	140	53	-0.13	-2.5	1.9
30	31	65	92	140	52	-0.13	-2.5	1.9
30	31	66	92	140	51	-0.14	-2.5	2
30	31	67	92	140	50	-0.15	-2.6	2.1
30	31	68	93	140	49	-0.15	-2.6	2.2
30	31	69	93	140	49	-0.16	-2.6	2.3
30	31	70	93	140	48	-0.16	-2.7	2.4

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Angle_1	Angle_2	Angle_3	Theta_X	Theta_Y	Theta_Z	Posittion (X)	Posittion (Y)	Posittion (Z)
30	31	71	93	140	47	-0.16	-2.7	2.5
30	31	72	93	140	46	-0.17	-2.7	2.6
30	31	73	93	140	45	-0.17	-2.7	2.7
30	31	74	93	130	45	-0.18	-2.7	2.8
30	31	75	93	130	44	-0.18	-2.7	2.8
30	31	76	93	130	43	-0.19	-2.7	2.9
30	31	77	93	130	42	-0.19	-2.7	3
30	31	78	93	130	42	-0.19	-2.7	3.1
30	31	79	93	130	41	-0.2	-2.7	3.2
30	31	80	93	130	40	-0.2	-2.7	3.2
30	31	81	93	130	39	-0.21	-2.7	3.3
30	31	82	93	130	39	-0.21	-2.7	3.4
30	31	83	93	130	38	-0.21	-2.7	3.5
30	31	84	93	130	37	-0.22	-2.7	3.5
30	31	85	93	130	37	-0.22	-2.7	3.6
30	31	86	93	130	36	-0.22	-2.7	3.7
30	31	87	93	130	35	-0.23	-2.7	3.8
30	31	88	93	120	35	-0.23	-2.6	3.8
30	31	89	93	120	34	-0.23	-2.6	3.9
30	31	90	93	120	33	-0.24	-2.6	4
30	32	30	96	95	7.4	-0.61	-0.51	6.1
30	32	31	95	89	5.6	-0.6	0.14	6.2
30	32	32	95	82	9.6	-0.58	0.88	6.2
30	32	33	95	74	16	-0.53	1.7	6
30	32	34	94	66	24	-0.46	2.4	5.5
30	32	35	94	58	33	-0.38	3.1	4.8

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Angle_1	Angle_2	Angle_3	Theta_X	Theta_Y	Theta_Z	Posittion (X)	Posittion (Y)	Posittion (Z)
30	32	36	93	49	41	-0.28	3.4	3.9
30	32	37	92	40	50	-0.19	3.5	3
30	32	38	92	32	58	-0.11	3.3	2.1
30	32	39	91	25	66	-0.047	3	1.4
30	32	40	90	18	72	-0.0082	2.5	0.8
30	32	41	90	12	78	0.014	2	0.42
30	32	42	89	7	83	0.022	1.4	0.18
30	32	43	89	2.9	87	0.021	0.96	0.043
30	32	44	89	1.7	91	0.013	0.52	-0.0082
30	32	45	90	1.2	91	0.0011	0.13	-0.0024
30	32	46	93	170	79	-0.013	-0.22	0.043
30	32	47	93	170	77	-0.029	-0.52	0.12
30	32	48	93	160	75	-0.045	-0.78	0.21
30	32	49	93	160	73	-0.062	-1	0.31
30	32	50	93	160	71	-0.079	-1.2	0.42
30	32	51	94	160	69	-0.095	-1.4	0.53
30	32	52	94	160	67	-0.11	-1.6	0.65
30	32	53	94	160	66	-0.13	-1.7	0.77
30	32	54	94	150	64	-0.14	-1.8	0.88
30	32	55	94	150	63	-0.15	-1.9	1
30	32	56	94	150	61	-0.17	-2	1.1
30	32	57	94	150	60	-0.18	-2.1	1.2
30	32	58	94	150	59	-0.2	-2.2	1.3
30	32	59	94	150	58	-0.21	-2.3	1.4
30	32	60	94	150	57	-0.22	-2.3	1.5
30	32	61	95	150	56	-0.23	-2.4	1.7

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Angle_1	Angle_2	Angle_3	Theta_X	Theta_Y	Theta_Z	Posittion (X)	Posittion (Y)	Posittion (Z)
30	32	62	95	140	55	-0.24	-2.5	1.8
30	32	63	95	140	54	-0.25	-2.5	1.9
30	32	64	95	140	53	-0.26	-2.5	2
30	32	65	95	140	52	-0.27	-2.6	2.1
30	32	66	95	140	51	-0.28	-2.6	2.1
30	32	67	95	140	50	-0.29	-2.6	2.2
30	32	68	95	140	49	-0.3	-2.7	2.3
30	32	69	95	140	48	-0.31	-2.7	2.4
30	32	70	95	140	47	-0.32	-2.7	2.5
30	32	71	95	140	47	-0.33	-2.7	2.6
30	32	72	95	140	46	-0.34	-2.7	2.7
30	32	73	95	130	45	-0.35	-2.7	2.8
30	32	74	95	130	44	-0.36	-2.8	2.9
30	32	75	95	130	43	-0.37	-2.8	2.9
30	32	76	95	130	43	-0.37	-2.8	3
30	32	77	95	130	42	-0.38	-2.8	3.1
30	32	78	95	130	41	-0.39	-2.8	3.2
30	32	79	95	130	41	-0.4	-2.8	3.3
30	32	80	95	130	40	-0.4	-2.8	3.3
30	32	81	95	130	39	-0.41	-2.8	3.4
30	32	82	95	130	39	-0.42	-2.7	3.5
30	32	83	95	130	38	-0.42	-2.7	3.6
30	32	84	95	130	37	-0.43	-2.7	3.6
30	32	85	95	130	37	-0.44	-2.7	3.7
30	32	86	95	130	36	-0.44	-2.7	3.8
30	32	87	95	120	35	-0.45	-2.7	3.8

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Angle_1	Angle_2	Angle_3	Theta_X	Theta_Y	Theta_Z	Posittion (X)	Posittion (Y)	Posittion (Z)
30	32	88	96	120	35	-0.46	-2.7	3.9
30	32	89	96	120	34	-0.46	-2.6	4
30	32	90	96	120	33	-0.47	-2.6	4
30	33	30	98	97	11	-0.88	-0.78	6
30	33	31	98	91	8.2	-0.88	-0.16	6.2
30	33	32	98	85	9.3	-0.86	0.57	6.3
30	33	33	97	77	15	-0.8	1.4	6.1
30	33	34	97	69	22	-0.71	2.2	5.7
30	33	35	96	60	31	-0.58	2.9	5
30	33	36	95	51	40	-0.44	3.4	4.1
30	33	37	94	42	49	-0.29	3.5	3.1
30	33	38	92	33	57	-0.16	3.4	2.2
30	33	39	91	25	65	-0.071	3	1.4
30	33	40	90	18	72	-0.01	2.5	0.81
30	33	41	89	12	78	0.022	1.9	0.4
30	33	42	89	6.6	84	0.033	1.4	0.16
30	33	43	88	2.8	88	0.029	0.87	0.031
30	33	44	88	2.5	91	0.015	0.41	-0.01
30	33	45	110	42	54	-0.005	0.011	0.0085
30	33	46	95	170	79	-0.028	-0.34	0.067
30	33	47	95	170	77	-0.053	-0.65	0.15
30	33	48	95	160	75	-0.079	-0.91	0.25
30	33	49	95	160	72	-0.1	-1.1	0.37
30	33	50	95	160	70	-0.13	-1.3	0.48
30	33	51	95	160	68	-0.15	-1.5	0.6
30	33	52	96	160	67	-0.18	-1.7	0.72

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Angle_1	Angle_2	Angle_3	Theta_X	Theta_Y	Theta_Z	Posittion (X)	Posittion (Y)	Posittion (Z)
30	33	53	96	150	65	-0.2	-1.8	0.85
30	33	54	96	150	64	-0.22	-1.9	0.97
30	33	55	96	150	62	-0.24	-2	1.1
30	33	56	96	150	61	-0.26	-2.1	1.2
30	33	57	96	150	60	-0.28	-2.2	1.3
30	33	58	96	150	58	-0.3	-2.3	1.4
30	33	59	96	150	57	-0.32	-2.4	1.5
30	33	60	97	150	56	-0.34	-2.4	1.6
30	33	61	97	140	55	-0.35	-2.5	1.7
30	33	62	97	140	54	-0.37	-2.5	1.8
30	33	63	97	140	53	-0.39	-2.6	1.9
30	33	64	97	140	52	-0.4	-2.6	2
30	33	65	97	140	51	-0.42	-2.6	2.1
30	33	66	97	140	50	-0.43	-2.7	2.2
30	33	67	97	140	49	-0.45	-2.7	2.3
30	33	68	97	140	49	-0.46	-2.7	2.4
30	33	69	97	140	48	-0.47	-2.7	2.5
30	33	70	97	140	47	-0.49	-2.7	2.6
30	33	71	97	140	46	-0.5	-2.8	2.7
30	33	72	97	130	45	-0.51	-2.8	2.8
30	33	73	97	130	45	-0.52	-2.8	2.9
30	33	74	98	130	44	-0.54	-2.8	2.9
30	33	75	98	130	43	-0.55	-2.8	3
30	33	76	98	130	43	-0.56	-2.8	3.1
30	33	77	98	130	42	-0.57	-2.8	3.2
30	33	78	98	130	41	-0.58	-2.8	3.3

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Angle_1	Angle_2	Angle_3	Theta_X	Theta_Y	Theta_Z	Posittion (X)	Posittion (Y)	Posittion (Z)
30	33	79	98	130	40	-0.59	-2.8	3.3
30	33	80	98	130	40	-0.6	-2.8	3.4
30	33	81	98	130	39	-0.61	-2.8	3.5
30	33	82	98	130	38	-0.62	-2.8	3.6
30	33	83	98	130	38	-0.63	-2.7	3.6
30	33	84	98	130	37	-0.64	-2.7	3.7
30	33	85	98	130	36	-0.65	-2.7	3.8
30	33	86	98	120	36	-0.66	-2.7	3.8
30	33	87	98	120	35	-0.67	-2.7	3.9
30	33	88	98	120	35	-0.68	-2.7	4
30	33	89	98	120	34	-0.68	-2.6	4.1
30	33	90	98	120	33	-0.69	-2.6	4.1
30	34	30	100	100	15	-1.1	-1	5.9
30	34	31	100	94	11	-1.1	-0.45	6.1
30	34	32	100	88	10	-1.1	0.27	6.3
30	34	33	100	80	14	-1.1	1.1	6.2
30	34	34	99	72	20	-0.95	2	5.9
30	34	35	98	62	29	-0.8	2.8	5.2
30	34	36	96	53	38	-0.6	3.3	4.3
30	34	37	95	43	47	-0.4	3.6	3.3
30	34	38	93	34	56	-0.23	3.4	2.3
30	34	39	92	25	65	-0.094	3	1.4
30	34	40	90	18	72	-0.011	2.5	0.81
30	34	41	89	12	79	0.032	1.9	0.39
30	34	42	88	6.3	84	0.043	1.3	0.14
30	34	43	87	2.9	89	0.035	0.78	0.019

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Angle_1	Angle_2	Angle_3	Theta_X	Theta_Y	Theta_Z	Posittion (X)	Posittion (Y)	Posittion (Z)
30	34	44	88	3	92	0.013	0.3	-0.0091
30	34	45	98	170	78	-0.016	-0.11	0.023
30	34	46	96	170	79	-0.049	-0.47	0.095
30	34	47	96	160	76	-0.084	-0.77	0.19
30	34	48	96	160	74	-0.12	-1	0.3
30	34	49	97	160	72	-0.15	-1.3	0.42
30	34	50	97	160	70	-0.19	-1.5	0.55
30	34	51	97	160	68	-0.22	-1.6	0.67
30	34	52	97	150	66	-0.25	-1.8	0.8
30	34	53	98	150	64	-0.28	-1.9	0.92
30	34	54	98	150	63	-0.31	-2	1
30	34	55	98	150	62	-0.34	-2.1	1.2
30	34	56	98	150	60	-0.36	-2.2	1.3
30	34	57	98	150	59	-0.39	-2.3	1.4
30	34	58	98	150	58	-0.41	-2.4	1.5
30	34	59	98	150	57	-0.44	-2.4	1.6
30	34	60	99	140	56	-0.46	-2.5	1.7
30	34	61	99	140	55	-0.48	-2.5	1.8
30	34	62	99	140	54	-0.5	-2.6	1.9
30	34	63	99	140	53	-0.52	-2.6	2
30	34	64	99	140	52	-0.54	-2.6	2.1
30	34	65	99	140	51	-0.56	-2.7	2.2
30	34	66	99	140	50	-0.58	-2.7	2.3
30	34	67	99	140	49	-0.6	-2.7	2.4
30	34	68	99	140	48	-0.61	-2.7	2.5
30	34	69	99	140	48	-0.63	-2.8	2.6

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Angle_1	Angle_2	Angle_3	Theta_X	Theta_Y	Theta_Z	Posittion (X)	Posittion (Y)	Posittion (Z)
30	34	70	100	140	47	-0.65	-2.8	2.7
30	34	71	100	130	46	-0.66	-2.8	2.8
30	34	72	100	130	45	-0.68	-2.8	2.8
30	34	73	100	130	45	-0.69	-2.8	2.9
30	34	74	100	130	44	-0.71	-2.8	3
30	34	75	100	130	43	-0.72	-2.8	3.1
30	34	76	100	130	42	-0.74	-2.8	3.2
30	34	77	100	130	42	-0.75	-2.8	3.3
30	34	78	100	130	41	-0.77	-2.8	3.3
30	34	79	100	130	40	-0.78	-2.8	3.4
30	34	80	100	130	40	-0.79	-2.8	3.5
30	34	81	100	130	39	-0.8	-2.8	3.6
30	34	82	100	130	38	-0.82	-2.8	3.6
30	34	83	100	130	38	-0.83	-2.7	3.7
30	34	84	100	130	37	-0.84	-2.7	3.8
30	34	85	100	120	37	-0.85	-2.7	3.8
30	34	86	100	120	36	-0.86	-2.7	3.9
30	34	87	100	120	35	-0.87	-2.7	4
30	34	88	100	120	35	-0.89	-2.7	4
30	34	89	100	120	34	-0.9	-2.6	4.1
30	34	90	100	120	34	-0.91	-2.6	4.2
30	35	30	100	100	18	-1.4	-1.3	5.8
30	35	31	100	97	14	-1.4	-0.71	6
30	35	32	100	90	12	-1.4	-0.025	6.2
30	35	33	100	83	14	-1.3	0.8	6.2
30	35	34	100	74	19	-1.2	1.7	6

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Angle_1	Angle_2	Angle_3	Theta_X	Theta_Y	Theta_Z	Posittion (X)	Posittion (Y)	Posittion (Z)
30	35	35	100	65	27	-1	2.6	5.4
30	35	36	98	55	36	-0.78	3.2	4.5
30	35	37	96	45	46	-0.52	3.6	3.5
30	35	38	94	35	56	-0.29	3.5	2.4
30	35	39	92	26	64	-0.12	3.1	1.5
30	35	40	90	18	72	-0.0095	2.5	0.8
30	35	41	89	11	79	0.042	1.9	0.37
30	35	42	88	6	85	0.053	1.2	0.12
30	35	43	87	3.3	89	0.038	0.68	0.0094
30	35	44	88	2.7	92	0.0071	0.19	-0.0051
30	35	45	98	170	80	-0.032	-0.23	0.042
30	35	46	97	170	78	-0.076	-0.59	0.13
30	35	47	97	160	75	-0.12	-0.9	0.23
30	35	48	98	160	73	-0.17	-1.2	0.36
30	35	49	98	160	71	-0.21	-1.4	0.48
30	35	50	98	160	69	-0.25	-1.6	0.61
30	35	51	99	160	67	-0.29	-1.7	0.75
30	35	52	99	150	65	-0.33	-1.9	0.87
30	35	53	99	150	64	-0.37	-2	1
30	35	54	100	150	62	-0.4	-2.1	1.1
30	35	55	100	150	61	-0.43	-2.2	1.2
30	35	56	100	150	60	-0.47	-2.3	1.4
30	35	57	100	150	58	-0.5	-2.4	1.5
30	35	58	100	150	57	-0.52	-2.4	1.6
30	35	59	100	140	56	-0.55	-2.5	1.7
30	35	60	100	140	55	-0.58	-2.5	1.8

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Angle_1	Angle_2	Angle_3	Theta_X	Theta_Y	Theta_Z	Posittion (X)	Posittion (Y)	Posittion (Z)
30	35	61	100	140	54	-0.61	-2.6	1.9
30	35	62	100	140	53	-0.63	-2.6	2
30	35	63	100	140	52	-0.65	-2.7	2.1
30	35	64	100	140	51	-0.68	-2.7	2.2
30	35	65	100	140	51	-0.7	-2.7	2.3
30	35	66	100	140	50	-0.72	-2.7	2.4
30	35	67	100	140	49	-0.74	-2.8	2.5
30	35	68	100	140	48	-0.76	-2.8	2.6
30	35	69	100	140	47	-0.78	-2.8	2.7
30	35	70	100	130	47	-0.8	-2.8	2.7
30	35	71	100	130	46	-0.82	-2.8	2.8
30	35	72	100	130	45	-0.84	-2.8	2.9
30	35	73	100	130	44	-0.86	-2.8	3
30	35	74	100	130	44	-0.88	-2.8	3.1
30	35	75	100	130	43	-0.89	-2.8	3.2
30	35	76	100	130	42	-0.91	-2.8	3.2
30	35	77	100	130	42	-0.93	-2.8	3.3
30	35	78	100	130	41	-0.94	-2.8	3.4
30	35	79	100	130	40	-0.96	-2.8	3.5
30	35	80	100	130	40	-0.97	-2.8	3.5
30	35	81	100	130	39	-0.99	-2.8	3.6
30	35	82	100	130	39	-1	-2.7	3.7
30	35	83	100	130	38	-1	-2.7	3.7
30	35	84	100	120	37	-1	-2.7	3.8
30	35	85	100	120	37	-1	-2.7	3.9
30	35	86	100	120	36	-1.1	-2.7	3.9

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Angle_1	Angle_2	Angle_3	Theta_X	Theta_Y	Theta_Z	Posittion (X)	Posittion (Y)	Posittion (Z)
30	35	87	100	120	36	-1.1	-2.7	4
30	35	88	100	120	35	-1.1	-2.6	4.1
30	35	89	100	120	34	-1.1	-2.6	4.1
30	35	90	100	120	34	-1.1	-2.6	4.2
30	36	30	110	100	21	-1.6	-1.5	5.6
30	36	31	100	99	17	-1.6	-0.95	5.9
30	36	32	100	93	15	-1.6	-0.3	6.1
30	36	33	100	85	15	-1.5	0.51	6.2
30	36	34	100	77	18	-1.4	1.4	6.1
30	36	35	100	67	26	-1.2	2.4	5.6
30	36	36	100	57	35	-0.95	3.1	4.7
30	36	37	97	46	45	-0.64	3.5	3.6
30	36	38	95	36	55	-0.35	3.5	2.5
30	36	39	92	26	64	-0.14	3.1	1.5
30	36	40	90	18	72	-0.0065	2.5	0.8
30	36	41	88	11	79	0.053	1.8	0.34
30	36	42	87	5.8	85	0.062	1.2	0.099
30	36	43	86	3.9	90	0.038	0.57	0.0018
30	36	44	93	3.5	88	-0.0033	0.067	0.0024
30	36	45	98	170	80	-0.054	-0.36	0.064
30	36	46	98	160	77	-0.11	-0.72	0.16
30	36	47	99	160	75	-0.16	-1	0.28
30	36	48	99	160	72	-0.22	-1.3	0.41
30	36	49	100	160	70	-0.27	-1.5	0.55
30	36	50	100	160	68	-0.32	-1.7	0.68
30	36	51	100	150	66	-0.37	-1.8	0.82

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Angle_1	Angle_2	Angle_3	Theta_X	Theta_Y	Theta_Z	Posittion (X)	Posittion (Y)	Posittion (Z)
30	36	52	100	150	65	-0.41	-2	0.95
30	36	53	100	150	63	-0.45	-2.1	1.1
30	36	54	100	150	62	-0.49	-2.2	1.2
30	36	55	100	150	60	-0.53	-2.3	1.3
30	36	56	100	150	59	-0.57	-2.3	1.4
30	36	57	100	150	58	-0.6	-2.4	1.6
30	36	58	100	140	57	-0.64	-2.5	1.7
30	36	59	100	140	56	-0.67	-2.5	1.8
30	36	60	100	140	55	-0.7	-2.6	1.9
30	36	61	100	140	54	-0.73	-2.6	2
30	36	62	100	140	53	-0.76	-2.7	2.1
30	36	63	100	140	52	-0.78	-2.7	2.2
30	36	64	100	140	51	-0.81	-2.7	2.3
30	36	65	100	140	50	-0.84	-2.7	2.4
30	36	66	100	140	50	-0.86	-2.8	2.5
30	36	67	100	140	49	-0.89	-2.8	2.5
30	36	68	100	130	48	-0.91	-2.8	2.6
30	36	69	100	130	47	-0.93	-2.8	2.7
30	36	70	100	130	47	-0.95	-2.8	2.8
30	36	71	100	130	46	-0.97	-2.8	2.9
30	36	72	100	130	45	-0.99	-2.8	3
30	36	73	100	130	44	-1	-2.8	3
30	36	74	100	130	44	-1	-2.8	3.1
30	36	75	100	130	43	-1.1	-2.8	3.2
30	36	76	100	130	42	-1.1	-2.8	3.3
30	36	77	100	130	42	-1.1	-2.8	3.3

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Angle_1	Angle_2	Angle_3	Theta_X	Theta_Y	Theta_Z	Posittion (X)	Posittion (Y)	Posittion (Z)
30	36	78	100	130	41	-1.1	-2.8	3.4
30	36	79	100	130	41	-1.1	-2.8	3.5
30	36	80	100	130	40	-1.1	-2.8	3.6
30	36	81	100	130	39	-1.2	-2.7	3.6
30	36	82	100	130	39	-1.2	-2.7	3.7
30	36	83	100	120	38	-1.2	-2.7	3.8
30	36	84	100	120	38	-1.2	-2.7	3.8
30	36	85	100	120	37	-1.2	-2.7	3.9
30	36	86	100	120	36	-1.2	-2.7	4
30	36	87	100	120	36	-1.3	-2.6	4
30	36	88	100	120	35	-1.3	-2.6	4.1
30	36	89	100	120	35	-1.3	-2.6	4.2
30	36	90	100	120	34	-1.3	-2.6	4.2
30	37	30	110	110	24	-1.7	-1.6	5.4
30	37	31	110	100	20	-1.8	-1.2	5.7
30	37	32	110	95	17	-1.8	-0.55	6
30	37	33	110	88	16	-1.8	0.23	6.1
30	37	34	100	80	18	-1.7	1.2	6.1
30	37	35	100	70	24	-1.4	2.1	5.7
30	37	36	100	59	33	-1.1	3	4.9
30	37	37	98	48	43	-0.77	3.5	3.8
30	37	38	95	37	54	-0.42	3.5	2.6
30	37	39	93	26	64	-0.16	3.1	1.6
30	37	40	90	18	72	-0.0016	2.5	0.79
30	37	41	88	11	80	0.065	1.8	0.32
30	37	42	86	5.7	86	0.069	1.1	0.08

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Angle_1	Angle_2	Angle_3	Theta_X	Theta_Y	Theta_Z	Posittion (X)	Posittion (Y)	Posittion (Z)
30	37	43	86	4.4	90	0.035	0.46	-0.0034
30	37	44	110	160	77	-0.018	-0.053	0.013
30	37	45	99	170	80	-0.081	-0.48	0.09
30	37	46	100	160	77	-0.15	-0.84	0.2
30	37	47	100	160	74	-0.21	-1.1	0.33
30	37	48	100	160	72	-0.28	-1.4	0.47
30	37	49	100	160	69	-0.34	-1.6	0.61
30	37	50	100	150	67	-0.39	-1.8	0.75
30	37	51	100	150	66	-0.45	-1.9	0.89
30	37	52	100	150	64	-0.5	-2	1
30	37	53	100	150	63	-0.55	-2.2	1.1
30	37	54	100	150	61	-0.59	-2.2	1.3
30	37	55	100	150	60	-0.63	-2.3	1.4
30	37	56	100	150	59	-0.67	-2.4	1.5
30	37	57	100	140	58	-0.71	-2.5	1.6
30	37	58	100	140	57	-0.75	-2.5	1.7
30	37	59	100	140	56	-0.78	-2.6	1.8
30	37	60	100	140	55	-0.82	-2.6	1.9
30	37	61	100	140	54	-0.85	-2.6	2
30	37	62	100	140	53	-0.88	-2.7	2.1
30	37	63	100	140	52	-0.91	-2.7	2.2
30	37	64	100	140	51	-0.94	-2.7	2.3
30	37	65	100	140	50	-0.97	-2.7	2.4
30	37	66	100	140	49	-1	-2.8	2.5
30	37	67	110	130	49	-1	-2.8	2.6
30	37	68	110	130	48	-1	-2.8	2.7

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Angle_1	Angle_2	Angle_3	Theta_X	Theta_Y	Theta_Z	Posittion (X)	Posittion (Y)	Posittion (Z)
30	37	69	110	130	47	-1.1	-2.8	2.8
30	37	70	110	130	47	-1.1	-2.8	2.8
30	37	71	110	130	46	-1.1	-2.8	2.9
30	37	72	110	130	45	-1.1	-2.8	3
30	37	73	110	130	45	-1.2	-2.8	3.1
30	37	74	110	130	44	-1.2	-2.8	3.2
30	37	75	110	130	43	-1.2	-2.8	3.2
30	37	76	110	130	43	-1.2	-2.8	3.3
30	37	77	110	130	42	-1.2	-2.8	3.4
30	37	78	110	130	41	-1.3	-2.8	3.5
30	37	79	110	130	41	-1.3	-2.8	3.5
30	37	80	110	130	40	-1.3	-2.7	3.6
30	37	81	110	130	40	-1.3	-2.7	3.7
30	37	82	110	120	39	-1.3	-2.7	3.7
30	37	83	110	120	39	-1.4	-2.7	3.8
30	37	84	110	120	38	-1.4	-2.7	3.9
30	37	85	110	120	37	-1.4	-2.7	3.9
30	37	86	110	120	37	-1.4	-2.6	4
30	37	87	110	120	36	-1.4	-2.6	4
30	37	88	110	120	36	-1.4	-2.6	4.1
30	37	89	110	120	35	-1.5	-2.6	4.2
30	37	90	110	120	35	-1.5	-2.5	4.2
30	38	30	110	110	26	-1.9	-1.8	5.2
30	38	31	110	100	23	-1.9	-1.3	5.6
30	38	32	110	97	20	-2	-0.78	5.9
30	38	33	110	90	18	-1.9	-0.039	6.1

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Angle_1	Angle_2	Angle_3	Theta_X	Theta_Y	Theta_Z	Posittion (X)	Posittion (Y)	Posittion (Z)
30	38	34	110	82	19	-1.9	0.88	6.1
30	38	35	110	72	24	-1.7	1.9	5.8
30	38	36	100	61	32	-1.3	2.9	5.1
30	38	37	100	49	42	-0.9	3.5	4
30	38	38	96	38	53	-0.49	3.6	2.7
30	38	39	93	27	63	-0.18	3.1	1.6
30	38	40	90	18	72	0.0052	2.5	0.78
30	38	41	87	10	80	0.077	1.7	0.3
30	38	42	86	5.7	86	0.074	0.97	0.062
30	38	43	85	4.7	91	0.028	0.35	-0.0056
30	38	44	100	160	81	-0.039	-0.18	0.028
30	38	45	100	160	79	-0.11	-0.6	0.12
30	38	46	100	160	76	-0.19	-0.95	0.24
30	38	47	100	160	73	-0.27	-1.2	0.38
30	38	48	100	160	71	-0.34	-1.5	0.53
30	38	49	100	150	69	-0.41	-1.7	0.67
30	38	50	100	150	67	-0.47	-1.8	0.82
30	38	51	100	150	65	-0.53	-2	0.95
30	38	52	100	150	64	-0.58	-2.1	1.1
30	38	53	100	150	62	-0.64	-2.2	1.2
30	38	54	100	150	61	-0.69	-2.3	1.3
30	38	55	100	150	60	-0.73	-2.4	1.5
30	38	56	100	140	58	-0.78	-2.4	1.6
30	38	57	110	140	57	-0.82	-2.5	1.7
30	38	58	110	140	56	-0.86	-2.5	1.8
30	38	59	110	140	55	-0.9	-2.6	1.9

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Angle_1	Angle_2	Angle_3	Theta_X	Theta_Y	Theta_Z	Posittion (X)	Posittion (Y)	Posittion (Z)
30	38	60	110	140	54	-0.93	-2.6	2
30	38	61	110	140	53	-0.97	-2.7	2.1
30	38	62	110	140	53	-1	-2.7	2.2
30	38	63	110	140	52	-1	-2.7	2.3
30	38	64	110	140	51	-1.1	-2.7	2.4
30	38	65	110	140	50	-1.1	-2.7	2.5
30	38	66	110	130	49	-1.1	-2.8	2.6
30	38	67	110	130	49	-1.2	-2.8	2.6
30	38	68	110	130	48	-1.2	-2.8	2.7
30	38	69	110	130	47	-1.2	-2.8	2.8
30	38	70	110	130	47	-1.2	-2.8	2.9
30	38	71	110	130	46	-1.3	-2.8	3
30	38	72	110	130	45	-1.3	-2.8	3
30	38	73	110	130	45	-1.3	-2.8	3.1
30	38	74	110	130	44	-1.3	-2.8	3.2
30	38	75	110	130	43	-1.3	-2.8	3.3
30	38	76	110	130	43	-1.4	-2.8	3.3
30	38	77	110	130	42	-1.4	-2.8	3.4
30	38	78	110	130	42	-1.4	-2.7	3.5
30	38	79	110	130	41	-1.4	-2.7	3.5
30	38	80	110	120	40	-1.5	-2.7	3.6
30	38	81	110	120	40	-1.5	-2.7	3.7
30	38	82	110	120	39	-1.5	-2.7	3.7
30	38	83	110	120	39	-1.5	-2.7	3.8
30	38	84	110	120	38	-1.5	-2.6	3.9
30	38	85	110	120	38	-1.5	-2.6	3.9

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Angle_1	Angle_2	Angle_3	Theta_X	Theta_Y	Theta_Z	Posittion (X)	Posittion (Y)	Posittion (Z)
30	38	86	110	120	37	-1.6	-2.6	4
30	38	87	110	120	37	-1.6	-2.6	4
30	38	88	110	120	36	-1.6	-2.6	4.1
30	38	89	110	120	36	-1.6	-2.5	4.2
30	38	90	110	120	35	-1.6	-2.5	4.2
30	39	30	110	110	29	-2	-1.9	5
30	39	31	110	100	25	-2.1	-1.5	5.4
30	39	32	110	99	22	-2.1	-0.99	5.7
30	39	33	110	93	20	-2.1	-0.28	6
30	39	34	110	84	19	-2	0.62	6.1
30	39	35	110	75	23	-1.8	1.7	5.9
30	39	36	100	63	31	-1.5	2.7	5.2
30	39	37	100	51	41	-1	3.4	4.1
30	39	38	97	39	52	-0.56	3.6	2.8
30	39	39	93	27	63	-0.19	3.2	1.6
30	39	40	90	17	73	0.014	2.4	0.76
30	39	41	87	9.9	81	0.088	1.6	0.27
30	39	42	85	5.8	87	0.076	0.87	0.045
30	39	43	86	4.4	91	0.017	0.23	-0.0048
30	39	44	100	170	81	-0.064	-0.3	0.047
30	39	45	100	160	78	-0.15	-0.72	0.15
30	39	46	100	160	75	-0.24	-1.1	0.29
30	39	47	100	160	73	-0.32	-1.3	0.44
30	39	48	100	160	70	-0.4	-1.6	0.59
30	39	49	100	150	68	-0.48	-1.8	0.74
30	39	50	100	150	66	-0.55	-1.9	0.88

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Angle_1	Angle_2	Angle_3	Theta_X	Theta_Y	Theta_Z	Posittion (X)	Posittion (Y)	Posittion (Z)
30	39	51	100	150	65	-0.61	-2.1	1
30	39	52	110	150	63	-0.67	-2.2	1.2
30	39	53	110	150	62	-0.73	-2.3	1.3
30	39	54	110	150	60	-0.78	-2.3	1.4
30	39	55	110	140	59	-0.83	-2.4	1.5
30	39	56	110	140	58	-0.88	-2.5	1.6
30	39	57	110	140	57	-0.92	-2.5	1.8
30	39	58	110	140	56	-0.96	-2.6	1.9
30	39	59	110	140	55	-1	-2.6	2
30	39	60	110	140	54	-1	-2.6	2.1
30	39	61	110	140	53	-1.1	-2.7	2.2
30	39	62	110	140	52	-1.1	-2.7	2.2
30	39	63	110	140	52	-1.1	-2.7	2.3
30	39	64	110	140	51	-1.2	-2.7	2.4
30	39	65	110	130	50	-1.2	-2.7	2.5
30	39	66	110	130	49	-1.2	-2.8	2.6
30	39	67	110	130	49	-1.3	-2.8	2.7
30	39	68	110	130	48	-1.3	-2.8	2.8
30	39	69	110	130	47	-1.3	-2.8	2.8
30	39	70	110	130	47	-1.4	-2.8	2.9
30	39	71	110	130	46	-1.4	-2.8	3
30	39	72	110	130	45	-1.4	-2.8	3.1
30	39	73	110	130	45	-1.4	-2.8	3.1
30	39	74	110	130	44	-1.5	-2.8	3.2
30	39	75	110	130	44	-1.5	-2.7	3.3
30	39	76	110	130	43	-1.5	-2.7	3.3

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Angle_1	Angle_2	Angle_3	Theta_X	Theta_Y	Theta_Z	Posittion (X)	Posittion (Y)	Posittion (Z)
30	39	77	110	130	42	-1.5	-2.7	3.4
30	39	78	110	130	42	-1.5	-2.7	3.5
30	39	79	110	120	41	-1.6	-2.7	3.5
30	39	80	110	120	41	-1.6	-2.7	3.6
30	39	81	110	120	40	-1.6	-2.7	3.7
30	39	82	110	120	40	-1.6	-2.7	3.7
30	39	83	110	120	39	-1.6	-2.6	3.8
30	39	84	110	120	39	-1.7	-2.6	3.9
30	39	85	110	120	38	-1.7	-2.6	3.9
30	39	86	110	120	38	-1.7	-2.6	4
30	39	87	110	120	37	-1.7	-2.5	4
30	39	88	110	120	37	-1.7	-2.5	4.1
30	39	89	110	120	36	-1.8	-2.5	4.2
30	39	90	110	120	36	-1.8	-2.5	4.2
30	40	30	110	110	31	-2.1	-2	4.8
30	40	31	110	110	28	-2.2	-1.6	5.2
30	40	32	110	100	25	-2.2	-1.2	5.5
30	40	33	110	95	22	-2.3	-0.51	5.8
30	40	34	110	87	20	-2.2	0.36	6
30	40	35	110	77	23	-2	1.4	5.9
30	40	36	110	66	30	-1.7	2.5	5.3
30	40	37	100	53	40	-1.2	3.4	4.3
30	40	38	98	39	52	-0.62	3.6	2.9
30	40	39	93	27	63	-0.21	3.2	1.6
30	40	40	89	17	73	0.025	2.4	0.74
30	40	41	86	9.6	81	0.099	1.5	0.24

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Angle_1	Angle_2	Angle_3	Theta_X	Theta_Y	Theta_Z	Posittion (X)	Posittion (Y)	Posittion (Z)
30	40	42	84	6.1	88	0.075	0.76	0.03
30	40	43	89	0.72	90	0.0013	0.11	-0.00045
30	40	44	100	160	81	-0.094	-0.42	0.069
30	40	45	100	160	78	-0.19	-0.84	0.19
30	40	46	100	160	74	-0.29	-1.2	0.34
30	40	47	100	160	72	-0.39	-1.4	0.49
30	40	48	100	150	70	-0.47	-1.7	0.65
30	40	49	110	150	67	-0.55	-1.8	0.8
30	40	50	110	150	66	-0.63	-2	0.94
30	40	51	110	150	64	-0.7	-2.1	1.1
30	40	52	110	150	63	-0.76	-2.2	1.2
30	40	53	110	150	61	-0.82	-2.3	1.3
30	40	54	110	140	60	-0.87	-2.4	1.5
30	40	55	110	140	59	-0.93	-2.4	1.6
30	40	56	110	140	58	-0.98	-2.5	1.7
30	40	57	110	140	57	-1	-2.6	1.8
30	40	58	110	140	56	-1.1	-2.6	1.9
30	40	59	110	140	55	-1.1	-2.6	2
30	40	60	110	140	54	-1.1	-2.7	2.1
30	40	61	110	140	53	-1.2	-2.7	2.2
30	40	62	110	140	52	-1.2	-2.7	2.3
30	40	63	110	140	52	-1.3	-2.7	2.4
30	40	64	110	130	51	-1.3	-2.7	2.5
30	40	65	110	130	50	-1.3	-2.7	2.5
30	40	66	110	130	49	-1.4	-2.7	2.6
30	40	67	110	130	49	-1.4	-2.8	2.7

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Angle_1	Angle_2	Angle_3	Theta_X	Theta_Y	Theta_Z	Posittion (X)	Posittion (Y)	Posittion (Z)
30	40	68	110	130	48	-1.4	-2.8	2.8
30	40	69	110	130	47	-1.4	-2.8	2.9
30	40	70	110	130	47	-1.5	-2.8	2.9
30	40	71	110	130	46	-1.5	-2.8	3
30	40	72	110	130	46	-1.5	-2.7	3.1
30	40	73	110	130	45	-1.6	-2.7	3.2
30	40	74	110	130	44	-1.6	-2.7	3.2
30	40	75	110	130	44	-1.6	-2.7	3.3
30	40	76	110	130	43	-1.6	-2.7	3.4
30	40	77	110	130	43	-1.6	-2.7	3.4
30	40	78	110	120	42	-1.7	-2.7	3.5
30	40	79	110	120	42	-1.7	-2.7	3.6
30	40	80	110	120	41	-1.7	-2.7	3.6
30	40	81	110	120	41	-1.7	-2.6	3.7
30	40	82	110	120	40	-1.8	-2.6	3.7
30	40	83	110	120	40	-1.8	-2.6	3.8
30	40	84	110	120	39	-1.8	-2.6	3.9
30	40	85	110	120	39	-1.8	-2.6	3.9
30	40	86	110	120	38	-1.8	-2.5	4
30	40	87	110	120	38	-1.8	-2.5	4
30	40	88	110	120	37	-1.9	-2.5	4.1
30	40	89	110	120	37	-1.9	-2.5	4.1
30	40	90	110	120	36	-1.9	-2.4	4.2
30	41	30	110	110	33	-2.2	-2.1	4.7
30	41	31	110	110	30	-2.3	-1.8	5
30	41	32	110	100	27	-2.3	-1.3	5.4

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Angle_1	Angle_2	Angle_3	Theta_X	Theta_Y	Theta_Z	Posittion (X)	Posittion (Y)	Posittion (Z)
30	41	33	110	97	24	-2.4	-0.71	5.7
30	41	34	110	89	22	-2.4	0.13	5.9
30	41	35	110	79	23	-2.2	1.2	5.9
30	41	36	110	68	29	-1.8	2.4	5.4
30	41	37	100	54	39	-1.3	3.3	4.4
30	41	38	98	40	51	-0.69	3.6	3
30	41	39	93	28	63	-0.22	3.2	1.6
30	41	40	89	17	73	0.037	2.4	0.72
30	41	41	86	9.3	82	0.11	1.5	0.21
30	41	42	84	6.4	88	0.071	0.65	0.018
30	41	43	140	120	72	-0.019	-0.012	0.0075
30	41	44	100	160	80	-0.13	-0.54	0.095
30	41	45	100	160	77	-0.24	-0.95	0.23
30	41	46	100	160	74	-0.35	-1.3	0.39
30	41	47	110	160	71	-0.45	-1.5	0.55
30	41	48	110	150	69	-0.54	-1.7	0.71
30	41	49	110	150	67	-0.63	-1.9	0.86
30	41	50	110	150	65	-0.71	-2.1	1
30	41	51	110	150	64	-0.78	-2.2	1.1
30	41	52	110	150	62	-0.85	-2.3	1.3
30	41	53	110	140	61	-0.91	-2.3	1.4
30	41	54	110	140	60	-0.96	-2.4	1.5
30	41	55	110	140	58	-1	-2.5	1.6
30	41	56	110	140	57	-1.1	-2.5	1.8
30	41	57	110	140	56	-1.1	-2.6	1.9
30	41	58	110	140	56	-1.2	-2.6	2

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Angle_1	Angle_2	Angle_3	Theta_X	Theta_Y	Theta_Z	Posittion (X)	Posittion (Y)	Posittion (Z)
30	41	59	110	140	55	-1.2	-2.6	2.1
30	41	60	110	140	54	-1.2	-2.7	2.1
30	41	61	110	140	53	-1.3	-2.7	2.2
30	41	62	110	140	52	-1.3	-2.7	2.3
30	41	63	110	130	51	-1.4	-2.7	2.4
30	41	64	110	130	51	-1.4	-2.7	2.5
30	41	65	110	130	50	-1.4	-2.7	2.6
30	41	66	110	130	49	-1.5	-2.7	2.7
30	41	67	110	130	49	-1.5	-2.7	2.7
30	41	68	110	130	48	-1.5	-2.7	2.8
30	41	69	110	130	47	-1.6	-2.7	2.9
30	41	70	110	130	47	-1.6	-2.7	3
30	41	71	110	130	46	-1.6	-2.7	3
30	41	72	110	130	46	-1.6	-2.7	3.1
30	41	73	110	130	45	-1.7	-2.7	3.2
30	41	74	110	130	45	-1.7	-2.7	3.2
30	41	75	110	130	44	-1.7	-2.7	3.3
30	41	76	110	130	44	-1.7	-2.7	3.4
30	41	77	110	120	43	-1.8	-2.7	3.4
30	41	78	110	120	42	-1.8	-2.7	3.5
30	41	79	110	120	42	-1.8	-2.6	3.6
30	41	80	110	120	41	-1.8	-2.6	3.6
30	41	81	110	120	41	-1.8	-2.6	3.7
30	41	82	110	120	40	-1.9	-2.6	3.7
30	41	83	110	120	40	-1.9	-2.6	3.8
30	41	84	110	120	40	-1.9	-2.5	3.9

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Angle_1	Angle_2	Angle_3	Theta_X	Theta_Y	Theta_Z	Posittion (X)	Posittion (Y)	Posittion (Z)
30	41	85	110	120	39	-1.9	-2.5	3.9
30	41	86	110	120	39	-1.9	-2.5	4
30	41	87	110	120	38	-2	-2.5	4
30	41	88	110	120	38	-2	-2.4	4.1
30	41	89	110	120	37	-2	-2.4	4.1
30	41	90	110	120	37	-2	-2.4	4.2
30	42	30	110	110	35	-2.2	-2.1	4.5
30	42	31	110	110	32	-2.3	-1.9	4.8
30	42	32	110	100	29	-2.4	-1.5	5.2
30	42	33	110	98	25	-2.5	-0.89	5.5
30	42	34	110	91	23	-2.5	-0.094	5.8
30	42	35	110	81	23	-2.3	0.96	5.9
30	42	36	110	70	28	-2	2.2	5.5
30	42	37	100	56	38	-1.4	3.2	4.5
30	42	38	99	41	50	-0.76	3.6	3.1
30	42	39	94	28	63	-0.23	3.2	1.7
30	42	40	89	16	74	0.051	2.3	0.69
30	42	41	85	9	82	0.12	1.4	0.18
30	42	42	83	6.8	89	0.064	0.54	0.0081
30	42	43	110	160	82	-0.044	-0.13	0.019
30	42	44	100	160	80	-0.17	-0.66	0.12
30	42	45	100	160	76	-0.29	-1.1	0.27
30	42	46	110	160	73	-0.41	-1.4	0.44
30	42	47	110	150	71	-0.52	-1.6	0.6
30	42	48	110	150	68	-0.61	-1.8	0.76
30	42	49	110	150	66	-0.7	-2	0.92

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Angle_1	Angle_2	Angle_3	Theta_X	Theta_Y	Theta_Z	Posittion (X)	Posittion (Y)	Posittion (Z)
30	42	50	110	150	65	-0.79	-2.1	1.1
30	42	51	110	150	63	-0.86	-2.2	1.2
30	42	52	110	140	62	-0.93	-2.3	1.3
30	42	53	110	140	60	-0.99	-2.4	1.5
30	42	54	110	140	59	-1.1	-2.4	1.6
30	42	55	110	140	58	-1.1	-2.5	1.7
30	42	56	110	140	57	-1.2	-2.5	1.8
30	42	57	110	140	56	-1.2	-2.6	1.9
30	42	58	110	140	55	-1.3	-2.6	2
30	42	59	110	140	54	-1.3	-2.6	2.1
30	42	60	110	140	54	-1.3	-2.7	2.2
30	42	61	110	140	53	-1.4	-2.7	2.3
30	42	62	110	130	52	-1.4	-2.7	2.4
30	42	63	110	130	51	-1.5	-2.7	2.4
30	42	64	110	130	51	-1.5	-2.7	2.5
30	42	65	110	130	50	-1.5	-2.7	2.6
30	42	66	110	130	49	-1.6	-2.7	2.7
30	42	67	110	130	49	-1.6	-2.7	2.8
30	42	68	110	130	48	-1.6	-2.7	2.8
30	42	69	110	130	48	-1.7	-2.7	2.9
30	42	70	110	130	47	-1.7	-2.7	3
30	42	71	110	130	46	-1.7	-2.7	3
30	42	72	110	130	46	-1.7	-2.7	3.1
30	42	73	110	130	45	-1.8	-2.7	3.2
30	42	74	110	130	45	-1.8	-2.7	3.2
30	42	75	110	130	44	-1.8	-2.7	3.3

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Angle_1	Angle_2	Angle_3	Theta_X	Theta_Y	Theta_Z	Posittion (X)	Posittion (Y)	Posittion (Z)
30	42	76	110	120	44	-1.8	-2.7	3.4
30	42	77	110	120	43	-1.9	-2.6	3.4
30	42	78	110	120	43	-1.9	-2.6	3.5
30	42	79	110	120	42	-1.9	-2.6	3.6
30	42	80	110	120	42	-1.9	-2.6	3.6
30	42	81	110	120	41	-2	-2.6	3.7
30	42	82	110	120	41	-2	-2.6	3.7
30	42	83	110	120	40	-2	-2.5	3.8
30	42	84	110	120	40	-2	-2.5	3.8
30	42	85	110	120	40	-2	-2.5	3.9
30	42	86	110	120	39	-2.1	-2.5	3.9
30	42	87	110	120	39	-2.1	-2.4	4
30	42	88	110	120	38	-2.1	-2.4	4.1
30	42	89	110	120	38	-2.1	-2.4	4.1
30	42	90	110	120	37	-2.1	-2.4	4.2
30	43	30	120	110	36	-2.3	-2.2	4.3
30	43	31	120	110	33	-2.4	-1.9	4.7
30	43	32	120	110	30	-2.5	-1.6	5
30	43	33	120	100	27	-2.6	-1.1	5.4
30	43	34	110	93	25	-2.6	-0.3	5.7
30	43	35	110	83	24	-2.5	0.74	5.8
30	43	36	110	71	28	-2.1	2	5.6
30	43	37	110	57	37	-1.5	3.1	4.6
30	43	38	100	42	50	-0.82	3.6	3.1
30	43	39	94	28	63	-0.23	3.2	1.7
30	43	40	88	16	74	0.066	2.3	0.66

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Angle_1	Angle_2	Angle_3	Theta_X	Theta_Y	Theta_Z	Posittion (X)	Posittion (Y)	Posittion (Z)
30	43	41	85	8.8	83	0.12	1.3	0.16
30	43	42	83	7	90	0.052	0.42	0.0013
30	43	43	110	160	83	-0.073	-0.25	0.034
30	43	44	110	160	79	-0.21	-0.77	0.16
30	43	45	110	160	75	-0.35	-1.2	0.32
30	43	46	110	160	72	-0.47	-1.5	0.49
30	43	47	110	150	70	-0.58	-1.7	0.66
30	43	48	110	150	68	-0.69	-1.9	0.82
30	43	49	110	150	66	-0.78	-2	0.98
30	43	50	110	150	64	-0.86	-2.2	1.1
30	43	51	110	150	63	-0.94	-2.3	1.3
30	43	52	110	140	61	-1	-2.3	1.4
30	43	53	110	140	60	-1.1	-2.4	1.5
30	43	54	110	140	59	-1.1	-2.5	1.6
30	43	55	110	140	58	-1.2	-2.5	1.7
30	43	56	110	140	57	-1.2	-2.5	1.8
30	43	57	110	140	56	-1.3	-2.6	1.9
30	43	58	110	140	55	-1.3	-2.6	2
30	43	59	110	140	54	-1.4	-2.6	2.1
30	43	60	110	140	54	-1.4	-2.7	2.2
30	43	61	110	130	53	-1.5	-2.7	2.3
30	43	62	110	130	52	-1.5	-2.7	2.4
30	43	63	110	130	51	-1.5	-2.7	2.5
30	43	64	110	130	51	-1.6	-2.7	2.5
30	43	65	110	130	50	-1.6	-2.7	2.6
30	43	66	110	130	50	-1.6	-2.7	2.7

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Angle_1	Angle_2	Angle_3	Theta_X	Theta_Y	Theta_Z	Posittion (X)	Posittion (Y)	Posittion (Z)
30	43	67	110	130	49	-1.7	-2.7	2.8
30	43	68	110	130	48	-1.7	-2.7	2.8
30	43	69	110	130	48	-1.7	-2.7	2.9
30	43	70	110	130	47	-1.8	-2.7	3
30	43	71	110	130	47	-1.8	-2.7	3
30	43	72	110	130	46	-1.8	-2.7	3.1
30	43	73	110	130	46	-1.9	-2.7	3.2
30	43	74	110	130	45	-1.9	-2.7	3.2
30	43	75	110	120	45	-1.9	-2.6	3.3
30	43	76	110	120	44	-1.9	-2.6	3.4
30	43	77	110	120	44	-2	-2.6	3.4
30	43	78	110	120	43	-2	-2.6	3.5
30	43	79	110	120	43	-2	-2.6	3.5
30	43	80	110	120	42	-2	-2.6	3.6
30	43	81	110	120	42	-2	-2.5	3.7
30	43	82	110	120	41	-2.1	-2.5	3.7
30	43	83	110	120	41	-2.1	-2.5	3.8
30	43	84	110	120	40	-2.1	-2.5	3.8
30	43	85	110	120	40	-2.1	-2.5	3.9
30	43	86	110	120	40	-2.1	-2.4	3.9
30	43	87	110	120	39	-2.2	-2.4	4
30	43	88	120	120	39	-2.2	-2.4	4
30	43	89	120	120	38	-2.2	-2.3	4.1
30	43	90	120	120	38	-2.2	-2.3	4.1
30	44	30	120	120	38	-2.3	-2.2	4.2
30	44	31	120	110	35	-2.4	-2	4.5

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Angle_1	Angle_2	Angle_3	Theta_X	Theta_Y	Theta_Z	Posittion (X)	Posittion (Y)	Posittion (Z)
30	44	32	120	110	32	-2.6	-1.7	4.9
30	44	33	120	100	29	-2.6	-1.2	5.2
30	44	34	120	94	26	-2.7	-0.48	5.6
30	44	35	110	85	25	-2.6	0.53	5.8
30	44	36	110	73	27	-2.3	1.8	5.6
30	44	37	110	59	36	-1.7	3	4.7
30	44	38	100	43	49	-0.88	3.6	3.2
30	44	39	94	28	63	-0.23	3.2	1.7
30	44	40	88	16	74	0.083	2.2	0.62
30	44	41	84	8.7	84	0.13	1.2	0.13
30	44	42	83	6.8	90	0.036	0.3	-0.0022
30	44	43	110	160	82	-0.11	-0.37	0.053
30	44	44	110	160	78	-0.26	-0.88	0.19
30	44	45	110	160	75	-0.4	-1.3	0.36
30	44	46	110	150	72	-0.53	-1.5	0.54
30	44	47	110	150	69	-0.65	-1.8	0.71
30	44	48	110	150	67	-0.76	-1.9	0.88
30	44	49	110	150	65	-0.85	-2.1	1
30	44	50	110	150	64	-0.94	-2.2	1.2
30	44	51	110	140	62	-1	-2.3	1.3
30	44	52	110	140	61	-1.1	-2.4	1.4
30	44	53	110	140	60	-1.2	-2.4	1.6
30	44	54	110	140	59	-1.2	-2.5	1.7
30	44	55	110	140	58	-1.3	-2.5	1.8
30	44	56	110	140	57	-1.3	-2.6	1.9
30	44	57	110	140	56	-1.4	-2.6	2

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Angle_1	Angle_2	Angle_3	Theta_X	Theta_Y	Theta_Z	Posittion (X)	Posittion (Y)	Posittion (Z)
30	44	58	110	140	55	-1.4	-2.6	2.1
30	44	59	110	140	54	-1.5	-2.6	2.2
30	44	60	110	130	54	-1.5	-2.6	2.2
30	44	61	110	130	53	-1.6	-2.7	2.3
30	44	62	110	130	52	-1.6	-2.7	2.4
30	44	63	110	130	51	-1.6	-2.7	2.5
30	44	64	110	130	51	-1.7	-2.7	2.6
30	44	65	110	130	50	-1.7	-2.7	2.6
30	44	66	110	130	50	-1.7	-2.7	2.7
30	44	67	110	130	49	-1.8	-2.7	2.8
30	44	68	110	130	48	-1.8	-2.7	2.9
30	44	69	110	130	48	-1.8	-2.7	2.9
30	44	70	110	130	47	-1.9	-2.7	3
30	44	71	110	130	47	-1.9	-2.7	3.1
30	44	72	120	130	46	-1.9	-2.6	3.1
30	44	73	120	130	46	-1.9	-2.6	3.2
30	44	74	120	120	45	-2	-2.6	3.2
30	44	75	120	120	45	-2	-2.6	3.3
30	44	76	120	120	44	-2	-2.6	3.4
30	44	77	120	120	44	-2	-2.6	3.4
30	44	78	120	120	43	-2.1	-2.6	3.5
30	44	79	120	120	43	-2.1	-2.5	3.5
30	44	80	120	120	42	-2.1	-2.5	3.6
30	44	81	120	120	42	-2.1	-2.5	3.6
30	44	82	120	120	42	-2.2	-2.5	3.7
30	44	83	120	120	41	-2.2	-2.5	3.8

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Angle_1	Angle_2	Angle_3	Theta_X	Theta_Y	Theta_Z	Posittion (X)	Posittion (Y)	Posittion (Z)
30	44	84	120	120	41	-2.2	-2.4	3.8
30	44	85	120	120	40	-2.2	-2.4	3.9
30	44	86	120	120	40	-2.2	-2.4	3.9
30	44	87	120	120	40	-2.3	-2.4	4
30	44	88	120	120	39	-2.3	-2.3	4
30	44	89	120	120	39	-2.3	-2.3	4.1
30	44	90	120	120	38	-2.3	-2.3	4.1
30	45	30	120	120	39	-2.4	-2.3	4.1
30	45	31	120	110	37	-2.5	-2.1	4.4
30	45	32	120	110	34	-2.6	-1.8	4.7
30	45	33	120	100	31	-2.7	-1.3	5.1
30	45	34	120	96	27	-2.8	-0.65	5.5
30	45	35	120	87	25	-2.7	0.33	5.7
30	45	36	110	75	27	-2.4	1.6	5.6
30	45	37	110	60	36	-1.8	2.9	4.8
30	45	38	100	44	49	-0.93	3.6	3.3
30	45	39	94	28	63	-0.23	3.2	1.7
30	45	40	87	15	75	0.1	2.2	0.58
30	45	41	83	8.7	85	0.13	1.1	0.1
30	45	42	85	5.1	91	0.016	0.18	-0.0021
30	45	43	110	160	82	-0.14	-0.49	0.076
30	45	44	110	160	77	-0.31	-0.98	0.23
30	45	45	110	160	74	-0.46	-1.3	0.41
30	45	46	110	150	71	-0.6	-1.6	0.59
30	45	47	110	150	69	-0.72	-1.8	0.77
30	45	48	110	150	67	-0.83	-2	0.93

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Angle_1	Angle_2	Angle_3	Theta_X	Theta_Y	Theta_Z	Posittion (X)	Posittion (Y)	Posittion (Z)
30	45	49	110	150	65	-0.93	-2.1	1.1
30	45	50	110	140	63	-1	-2.2	1.2
30	45	51	110	140	62	-1.1	-2.3	1.4
30	45	52	110	140	61	-1.2	-2.4	1.5
30	45	53	110	140	60	-1.2	-2.4	1.6
30	45	54	110	140	59	-1.3	-2.5	1.7
30	45	55	110	140	58	-1.3	-2.5	1.8
30	45	56	110	140	57	-1.4	-2.6	1.9
30	45	57	110	140	56	-1.5	-2.6	2
30	45	58	110	140	55	-1.5	-2.6	2.1
30	45	59	110	130	54	-1.5	-2.6	2.2
30	45	60	110	130	54	-1.6	-2.6	2.3
30	45	61	110	130	53	-1.6	-2.6	2.4
30	45	62	110	130	52	-1.7	-2.7	2.4
30	45	63	120	130	52	-1.7	-2.7	2.5
30	45	64	120	130	51	-1.7	-2.7	2.6
30	45	65	120	130	50	-1.8	-2.7	2.7
30	45	66	120	130	50	-1.8	-2.7	2.7
30	45	67	120	130	49	-1.8	-2.7	2.8
30	45	68	120	130	49	-1.9	-2.7	2.9
30	45	69	120	130	48	-1.9	-2.6	2.9
30	45	70	120	130	48	-1.9	-2.6	3
30	45	71	120	130	47	-2	-2.6	3.1
30	45	72	120	130	47	-2	-2.6	3.1
30	45	73	120	120	46	-2	-2.6	3.2
30	45	74	120	120	46	-2	-2.6	3.2

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Angle_1	Angle_2	Angle_3	Theta_X	Theta_Y	Theta_Z	Posittion (X)	Posittion (Y)	Posittion (Z)
30	45	75	120	120	45	-2.1	-2.6	3.3
30	45	76	120	120	45	-2.1	-2.6	3.4
30	45	77	120	120	44	-2.1	-2.5	3.4
30	45	78	120	120	44	-2.1	-2.5	3.5
30	45	79	120	120	43	-2.2	-2.5	3.5
30	45	80	120	120	43	-2.2	-2.5	3.6
30	45	81	120	120	42	-2.2	-2.5	3.6
30	45	82	120	120	42	-2.2	-2.5	3.7
30	45	83	120	120	42	-2.3	-2.4	3.7
30	45	84	120	120	41	-2.3	-2.4	3.8
30	45	85	120	120	41	-2.3	-2.4	3.8
30	45	86	120	120	40	-2.3	-2.4	3.9
30	45	87	120	120	40	-2.3	-2.3	3.9
30	45	88	120	120	40	-2.4	-2.3	4
30	45	89	120	120	39	-2.4	-2.3	4
30	45	90	120	120	39	-2.4	-2.3	4.1
30	46	30	120	120	40	-2.4	-2.3	3.9
30	46	31	120	110	38	-2.5	-2.1	4.2
30	46	32	120	110	35	-2.6	-1.8	4.6
30	46	33	120	100	32	-2.7	-1.4	5
30	46	34	120	98	29	-2.8	-0.8	5.3
30	46	35	120	89	26	-2.8	0.15	5.6
30	46	36	110	77	27	-2.5	1.4	5.6
30	46	37	110	62	35	-1.9	2.8	4.9
30	46	38	100	44	48	-0.98	3.6	3.3
30	46	39	93	28	63	-0.22	3.2	1.7

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

Angle_1	Angle_2	Angle_3	Theta_X	Theta_Y	Theta_Z	Posittion (X)	Posittion (Y)	Posittion (Z)
30	46	40	87	15	76	0.12	2.1	0.54
30	46	41	82	8.9	85	0.13	0.97	0.08
30	46	42	97	7.3	89	-0.0079	0.063	0.0015
30	46	43	110	160	81	-0.19	-0.6	0.1
30	46	44	110	160	77	-0.36	-1.1	0.27
30	46	45	110	150	73	-0.52	-1.4	0.46
30	46	46	110	150	71	-0.66	-1.7	0.64
30	46	47	110	150	68	-0.79	-1.9	0.82
30	46	48	110	150	66	-0.9	-2	0.98
30	46	49	110	150	65	-1	-2.2	1.1
30	46	50	110	140	63	-1.1	-2.3	1.3
30	46	51	110	140	62	-1.2	-2.3	1.4
30	46	52	110	140	60	-1.2	-2.4	1.5

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ภาคผนวก ข

โปรแกรมการควบคุมหุ่นยนต์กลไกแบบ Canfield

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

โปรแกรม MATLAB คำนวณสมการจลนศาสตร์แบบไปข้างหน้า

```
%forward kinematic
clear all
clc
% Constant Parameter

% vector u for 3 points
kx1=0.4993; ky1=-0.8664; kz1=0;
kx2=0.4993; ky2=0.8664; kz2=0;
kx3=-1; ky3=0; kz3=0;

% vector q for 3 points
q1=[0.8664;0.4993;0];
q2=[-0.8664;0.4993;0];
q3=[0;-1;0];

% Link Length
L=6.125;

% Points
b1=[-5.5;-2.25;0];
b2=[5.5;-2.25;0];
b3=[0;4.8;0];

% Counter
i=1;

for theta1=30*pi/180:1*pi/180:90*pi/180
    for theta2=30*pi/180:1*pi/180:90*pi/180
        for theta3=30*pi/180:1*pi/180:90*pi/180
            %Transformation Matrixs
            %actuator1
            a11=kx1^2*(1-cos(theta1))+cos(theta1);
            a12=kx1*ky1*(1-cos(theta1))+kz1*sin(theta1);
            a13=kx1*kz1*(1-cos(theta1))-ky1*sin(theta1);
            a21=kx1*ky1*(1-cos(theta1))-kz1*sin(theta1);
            a22=ky1^2*(1-cos(theta1))+cos(theta1);
            a23=ky1*kz1*(1-cos(theta1))+kx1*sin(theta1);
            a31=kx1*kz1*(1-cos(theta1))-ky1*sin(theta1);
            a32=ky1*kz1*(1-cos(theta1))+kx1*sin(theta1);
            a33=kz1^2*(1-cos(theta1))+cos(theta1);
            %actuator2
            b11=kx2^2*(1-cos(theta2))+cos(theta2);
            b12=kx2*ky2*(1-cos(theta2))+kz2*sin(theta2);
            b13=kx2*kz2*(1-cos(theta2))-ky2*sin(theta2);
            b21=kx2*ky2*(1-cos(theta2))-kz2*sin(theta2);
            b22=ky2^2*(1-cos(theta2))+cos(theta2);
            b23=ky2*kz2*(1-cos(theta2))+kx2*sin(theta2);
            b31=kx2*kz2*(1-cos(theta2))-ky2*sin(theta2);
            b32=ky2*kz2*(1-cos(theta2))+kx2*sin(theta2);
            b33=kz2^2*(1-cos(theta2))+cos(theta2);
            %actuator3
            c11=kx3^2*(1-cos(theta3))+cos(theta3);
            c12=kx3*ky3*(1-cos(theta3))+kz3*sin(theta3);
            c13=kx3*kz3*(1-cos(theta3))-ky3*sin(theta3);
```

```
            c21=kx3*ky3*(1-cos(theta3))-kz3*sin(theta3);
            c22=ky3^2*(1-cos(theta3))+cos(theta3);
            c23=ky3*kz3*(1-cos(theta3))+kx3*sin(theta3);
            c31=kx3*kz3*(1-cos(theta3))-ky3*sin(theta3);
            c32=ky3*kz3*(1-cos(theta3))+kx3*sin(theta3);
            c33=kz3^2*(1-cos(theta3))+cos(theta3);

            r1=[a11,a12,a13;a21,a22,a23;a31,a32,a33];
            r2=[b11,b12,b13;b21,b22,b23;b31,b32,b33];
            r3=[c11,c12,c13;c21,c22,c23;c31,c32,c33];
            % Midplane Normal Vector
            m1=r1*q1*L+b1;
            m2=r2*q2*L+b2;
            m3=r3*q3*L+b3;
            M=cross(m2-m1,m3-m2);
            Nm=M/norm(M);
            % Delta (Distance)
            y1=dot(Nm,m1-b1);
            y2=dot(Nm,m2-b2);
            y3=dot(Nm,m3-b3);
            % D and Center of Plane
            d1=b1+2*y1*Nm;
            d2=b2+2*y2*Nm;
            d3=b3+2*y3*Nm;
            c=(d1+d2+d3)/3;

            c(1);
            c(2);
            c(3);
            A=sqrt(c(1)^2+c(2)^2+c(3)^2);
            theta_x=acos(c(1)/A)*180/pi;
            theta_y=acos(c(2)/A)*180/pi;
            theta_z=acos(c(3)/A)*180/pi;

            work(i,1)=c(1);
            work(i,2)=c(2);
            work(i,3)=c(3);
            theta_rec(i,1)=theta1;
            theta_rec(i,2)=theta2;
            theta_rec(i,3)=theta3;
            theta_xyz(i,1)=theta_x;
            theta_xyz(i,2)=theta_y;
            theta_xyz(i,3)=theta_z;
            i=i+1;
        end
    end
end
plot3(work(:,1),work(:,2),work(:,3),'.');
xlabel('X');
ylabel('Y');
zlabel('Z');
[c(1),c(2),c(3)] = meshgrid(c(1),c(2),c(3))
figure(2)
plot(work(:,1),work(:,3),'.')
grid on
figure(3)
plot(work(:,2),work(:,3),'.')
```

```
grid on
figure(4)
plot(work(:,1),work(:,2),'.')
grid on
final_rec=[theta_xyz work theta_rec*180/pi];
dlmwrite('canxxxx.txt', final_rec, 'delimiter', '\t','precision',2)
```

โปรแกรมที่ใช้เรียกค่าจากตาราง

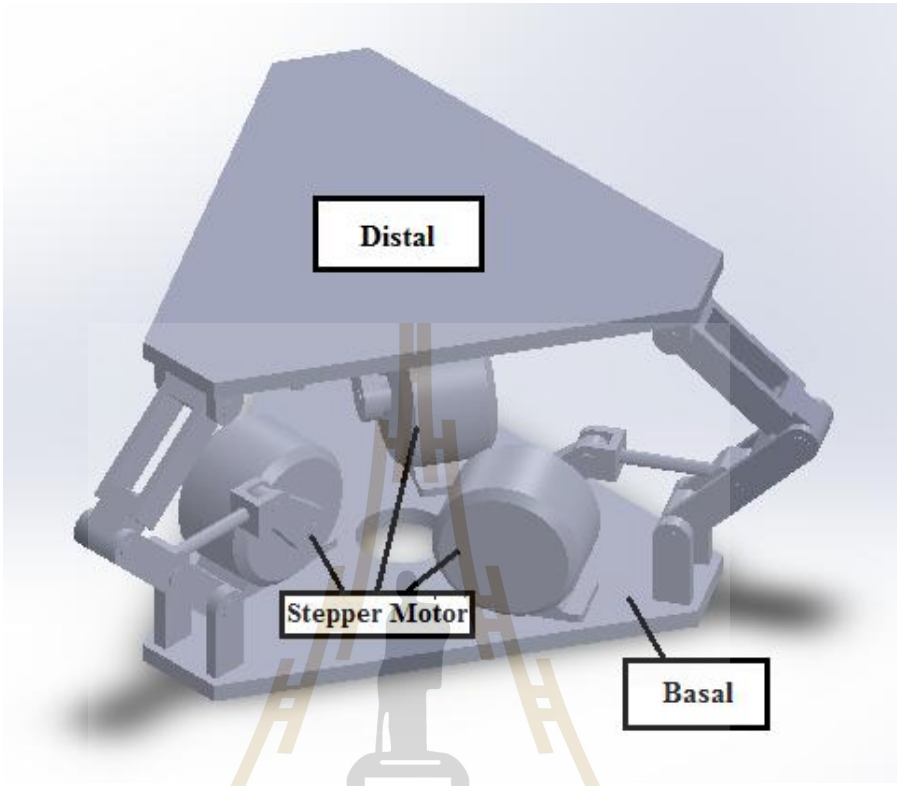
```
M = dlmread('canxxxx.txt');
xd=101;
yd=64;
zd=26;
x=[xd yd zd]

min=10000;

for i=1:1331
    delta = M(i,1:3)-x;
    error=delta(1)^2+delta(2)^2+delta(3)^2
    if error<min
        min=error;
        angle=i;
    end
end
angle
M(angle,7:9)
```

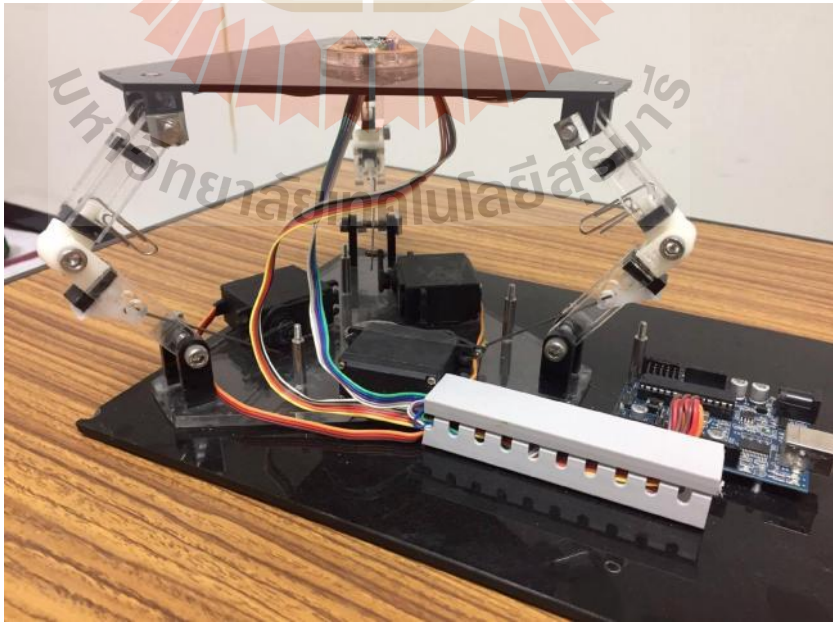
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

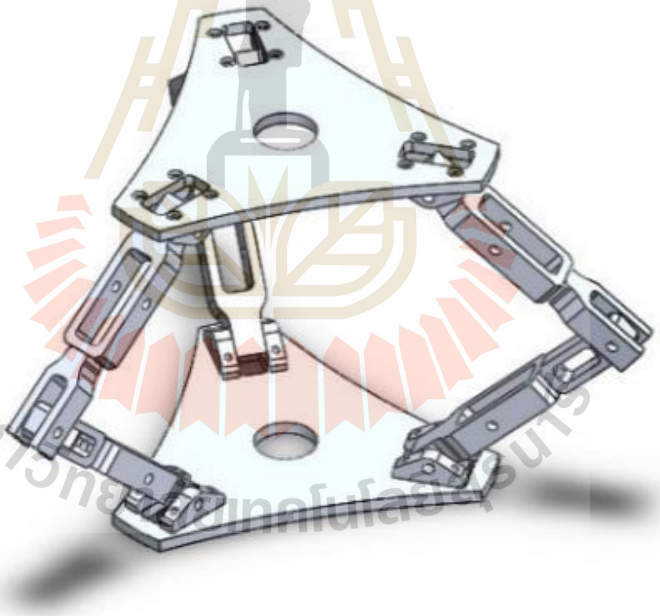
ภาคผนวก ค

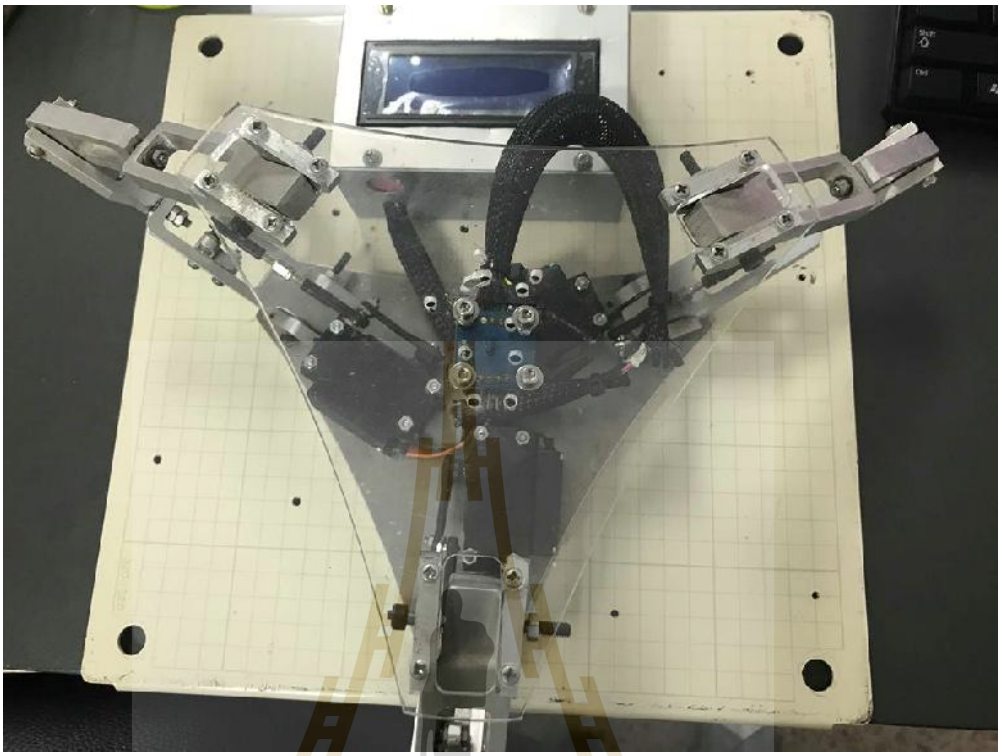
ภาพชิ้นงานในอดีตถึงปัจจุบัน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

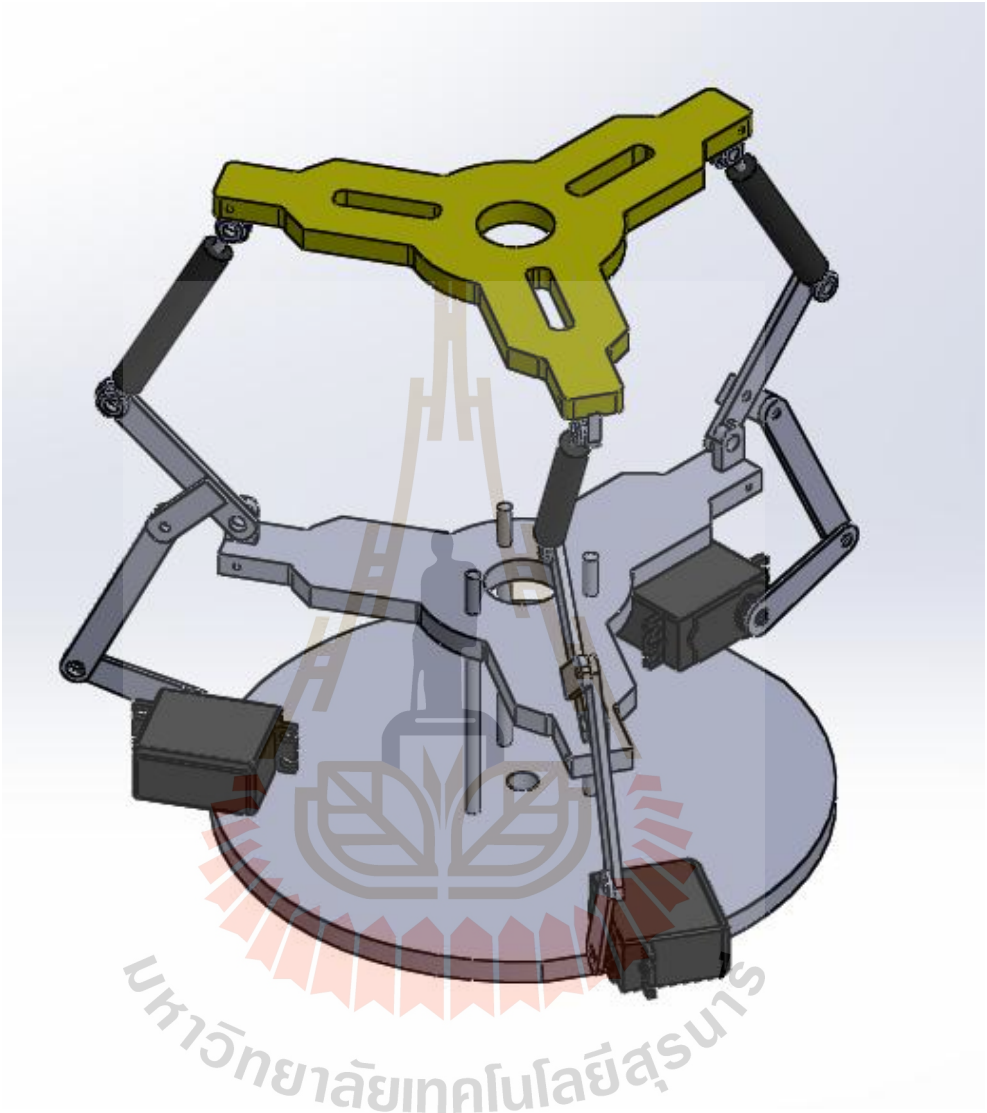

Distal
Stepper Motor
Basal



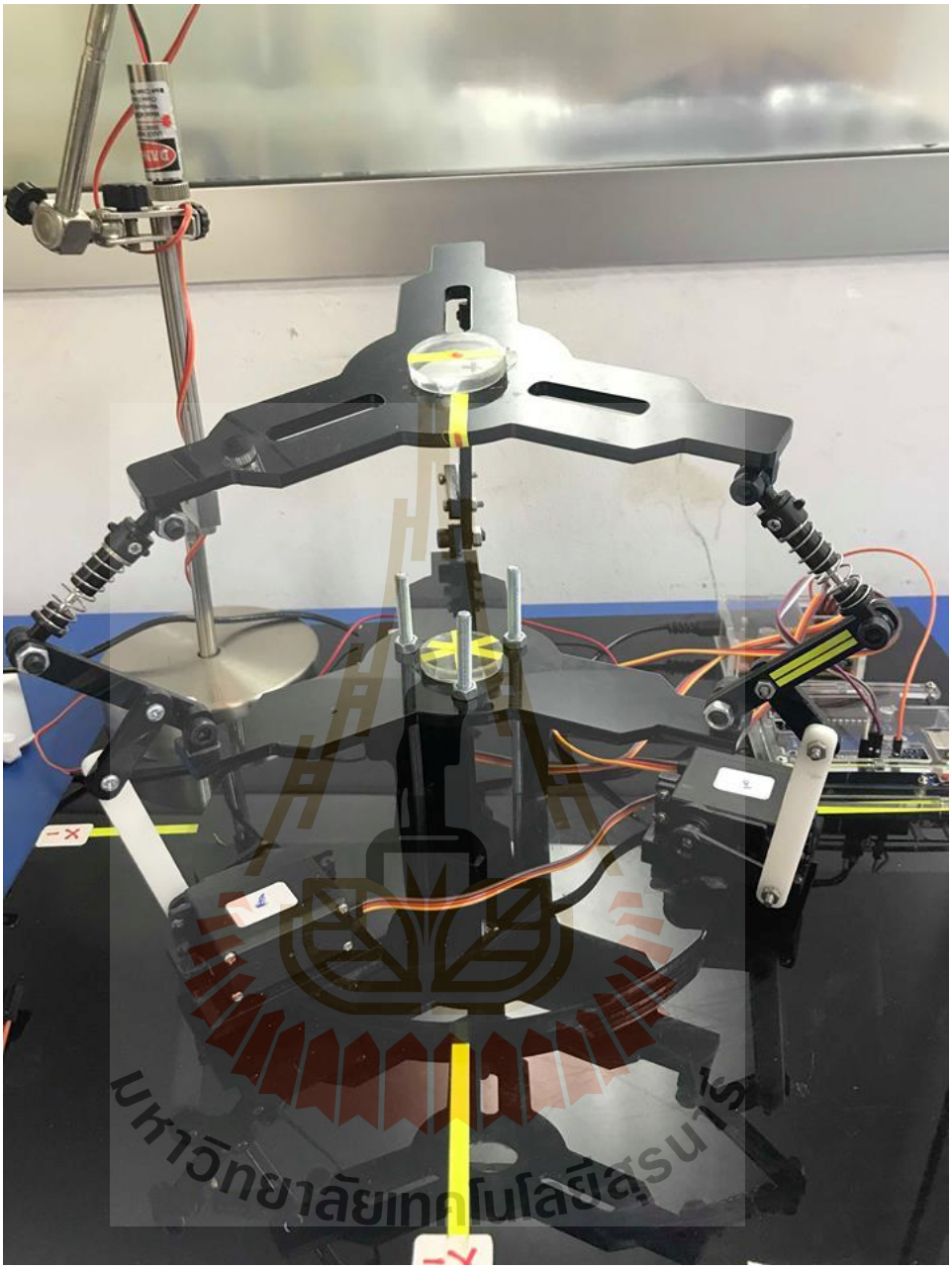




มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี


-X
-Y

ออกแบบให้มีสปริงเพื่อความยืดหยุ่นในการรับน้ำหนักจากแผ่นบน ส่งผลให้ค่าความคลาดเคลื่อนของหุ่นยนต์มีไม่มากเท่ากับสองแบบแรก จึงใช้การออกแบบสร้างหุ่นยนต์นี้เพื่อใช้ในการทดลอง

ภาคผนวก ง

บทความทางด้านวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายชื่อบทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในระหว่างศึกษา

Pornpassanan Chaiyasitpru, Kontorn Chamniprasart (2017) **Design and Prototyping of Canfield Mechanism for Photovoltaic Application** The 11th South East Asian Technical University Consortium Symposium 13-14 March 2017 Ho Chi Minh City, Vietnam.

DESIGN AND PROTOTYPING OF CANFIELD MECHANISM FOR PHOTOVOLTAIC APPLICATION

Pornpassanan Chaiyasitpru [1], Kontorn Chamniprasart [1]
[1] Suranaree University of Technology, Thailand
Email: kontorn@sut.ac.th

ABSTRACT

Solar energy is now a very good choice for alternatives energy. A Photovoltaic (PV) panels can be installed on ground in solar farms. They can also be installed on the top of roofs. However, the PV cells best produce the electrical energy when they perpendicularly expose to the sun light. This study attempts to prototype the solar tracking mechanism for PV panels. This paper presents the design and prototyping of three degree of freedom Canfield Mechanism for the PV panels. The mechanism is based on a parallel robot which is called Canfield robot. The system consists of three-linkage robot arms. Each linkage has three revolts and two twist joints driven by three stepper motors. Both forward and inverse kinematic analyses are used to find an optimum workspace, positions, orientation of the robot, and optimum three angles of the robot arm. The phototransistors are mounted on the solar panels as light sensors that adjust the exposed position to the sun. This study provides a precise solar tracking system with the error range of 2 degree. As the results of this study the workspace of Canfield Mechanism is a hemispherical. The coordinates x, y, z, and the three angles of robot arm can also be identified.

KEYWORDS: *Canfield Mechanism, kinematic analysis, parallel robot, Photovoltaic*

1. INTRODUCTION

Currently, Energy is vital to human life, it is used to facilitate human life. It also affects economy and society all over the world. Solar energy is an alternative, energy which has been used widely. This energy is clean and safe for operation. A PV panel consists of a flat surface on which numerous p-n junctions are placed, connected together through electrically conducting strips Kit solar cells convert solar energy into electrical energy. We can use this kind of energy immediately or store it in battery for using later. The conversion principle of solar light into electricity, called Photovoltaic or PV. Solar panels will provide high electricity when the sun is perpendicular to the solar cells.[1]

The Canfield Joint is an innovative joint that offers hemispherical pointing control. Invented by Dr. Stephen Canfield of the Tennessee Tech University, it has three independently driven arms arranged in a triangle to connect the platform of the joint with its base. Each arm includes three hinges and two twist joints, and by controlling each of the arms independently it is possible to orient the platform within a hemisphere. It is an inherently 3-DOF joint. It requires three motors to operate.[2]

A stepper motor is an electrical device which converts electrical pulses into mechanical movements. The shaft of a stepper motor rotates in step increments when electrical command pulses are applied to it in the suitable sequence. The rotation speed of the motor shaft is directly related to the frequency of the input pulse and the length of rotation is directly related to the number of pulses input used. [3]

Microcontrollers are used in a product control and automatic devices, such as control systems, automotive, medical devices, remote controls, office equipment, appliances, power tools, toys and other embedded by reducing the size and costs compared to designs that use a separate microprocessor, memory and input / output devices, microcontrollers make it economical to digitally control even more devices and processes.[4]

The purpose of this research is intended to solve such problems by designing and creating Canfield mechanism. This paper presents the design and prototyping of three degree of freedom Canfield Mechanism for the PV panels.

2. EXPERIMENT

Canfield Mechanism is parallel-architecture robotic wrist, is mechanism that can explain the mechanism is a parallel robot. There are three degrees of freedom. A base plate and end plate is an equilateral triangle. The system consists of three linkage robot arms. Each linkage has three revolts and two twist joints driven by three stepper motors. Both forward and inverse kinematic analyzes are used to find an optimum workspace, positions, orientation of the robot, and optimum three angles of the robot arm. The MATLAB software is used to solve for the workspace of robot what is the distal coordinates frame that robot can move. The motion of the robot can do a variety similar to the delta robot. The advantage is width for workspace but canfield robot strength than delta robot. The phototransistors are mounted on the solar panels as light sensors that adjust the exposed position to the sun. This study provides a precise solar tracking system. This research is another technique to create a system to track the sun automatically.

2.1 Experiment apparatus

2.1.2 Stepper motor

This research choose the stepper motor for driven because it still running accuracy and higher torque than other motor.

2.1.3 Microcontroller

This research choose Arduino Mega 2560 use as a mechanism to control the stepper motor. The advantage is low cost, input/output that much, east and simply

2.1.5 Photovoltaic

This research choose model TPS105-30W-MONO because it is reused for maximum benefit.

2.2 Technique

2.2.1 Design for Canfield

The robot under study is the 3-RUR parallel robot with three degrees of freedom and has been studied by many researchers. It is the assembly of two equilateral triangles (the base, moving platform) by three identical RUR legs where R is a revolute passive joint and U a passive universal joint.

Canfield prototype is designed with Solidwork software. It is equipped with Geometry triangle and two plates are connected by a three-links. Two plates are Basal and Distal as shown in Fig 2. Each link has universal joint of intermediate to animate more diverse direction. The revolutes of the basal and distal plate are located by three motors that are used to drive a three-links to move.

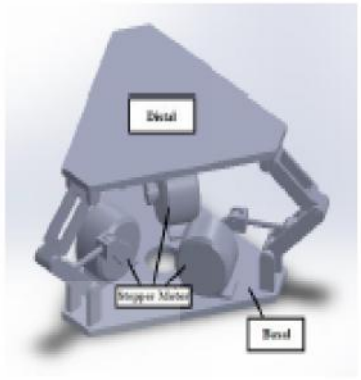


Fig 2. Model of Canfield

2.2.2 Governing Equations:

2.2.2.1 Kinematics of Parallel Robotic Wrist

From the kinematic diagram as shown in Fig 2, the geometry of the basal and distal plates are equilateral triangle consists of the revolutes of the basal and distal plates which are located by vectors $\mathbf{b}_i$ and $\mathbf{d}_i$ (i=1..3), respectively. The orientation of each basal revolute are denoted by unit vector $\hat{\mathbf{u}}_i$ (i=1..3). The midpoint of each branch are points $\mathbf{m}_i$ (i=1..3). Shows Fig 2 a mid-plane of the wrist which is defined using midpoints of the three branches. This mid-plane forms symmetric plane for the particular wrist geometry. Fig 3 illustrates the centroid of the basal plate, c_B is the system origin. The geometric center of the wrist is cw. This position is unique in that the distance from cw to either c_D or c_B which is equal to the plunge distance, p_d.

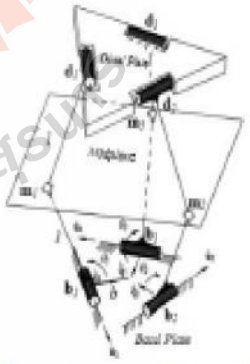


Fig 3 Kinematic Diagram of Proposed Wrist

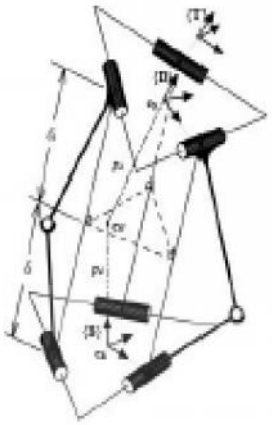


Fig 4 Wrist Reference Frames

2.2.2.2 **Forward kinematic**

The forward kinematic problem for this manipulator can be defined using the basal revolute angles $(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ and a roll angle (θ_r). The forward kinematic is used to find the position and orientation of the tool coordinate frame. The mid-point of each branch are found as follows:

$$\mathbf{m}_i = R_{\hat{u}_i, \alpha_i} l\hat{q}_i + \mathbf{b}_i \qquad i=1\ldots3 \tag{1}$$

Where $\mathbf{R}_{[\hat{u}_i, \alpha_i]}$ is a rotation about axis $\hat{u}_i$ and $\hat{q}_i$ is unit vector perpendicular to $\hat{u}_i$. The plane coefficients, A_m, B_m, C_m of mid-plane can be derived

$$[A_m, B_m, C_m]^T = (\mathbf{m}_2 - \mathbf{m}_1) \times (\mathbf{m}_3 - \mathbf{m}_2) \tag{2}$$

Where the mid-plane normal is defined as:

$$\hat{\mathbf{N}}_m = \frac{[A_m, B_m, C_m]^T}{\sqrt{A_m^2 + B_m^2 + C_m^2}} \tag{3}$$

The perpendicular distance from each point $\mathbf{b}_1, \mathbf{b}_2, \mathbf{b}_3$ are given by

$$\delta_i = \hat{\mathbf{N}}_m \cdot \mathbf{m}_i - \mathbf{b}_i \qquad i=1\ldots3 \tag{4}$$

The distal revolute can be found as follows:

$$\mathbf{d}_i = \mathbf{b}_i + 2\delta_i \hat{\mathbf{N}}_m \qquad i=1\ldots3 \tag{5}$$

The position of the origin of the distal and tool coordinate frames is

$$\mathbf{c}_D = \mathbf{c}_T = (\mathbf{d}_1 + \mathbf{d}_2 + \mathbf{d}_3)/3 \tag{6}$$

The z-axis of the distal frame is identified from the vector cross-product as follows:

$$\hat{\mathbf{z}}_D = \frac{(\mathbf{d}_2 - \mathbf{d}_1) \times (\mathbf{d}_3 - \mathbf{d}_2)}{|(\mathbf{d}_2 - \mathbf{d}_1) \times (\mathbf{d}_3 - \mathbf{d}_2)|} \tag{7}$$

The x-axis and y-axis of the distal revolute positions are expressed as

$$\hat{\mathbf{x}}_D = \frac{\mathbf{d}_1 - \mathbf{c}_T}{|\mathbf{d}_1 - \mathbf{c}_T|} \tag{8}$$

$$\hat{\mathbf{y}}_D = -\hat{\mathbf{x}}_D \times \hat{\mathbf{z}}_D \tag{9}$$

A rotation matrix characterizing the relative rotation between {B} and {D} is expressed as

$${}^B_D R = [\hat{\mathbf{x}}_D, \hat{\mathbf{y}}_D, \hat{\mathbf{z}}_D] \tag{10}$$

In case of including the last roll axis, the rotation matrix is

$${}^B_T R = {}^B_D R R_z(\theta_r) \tag{11}$$

3. ANALYSIS

3.1 Mathematical model:

The Canfield robot under study is the 3-RUR parallel robot with three degrees of freedom and has been studied by many researchers. It is the assembly of two equilateral triangles (the base, moving platform) by three identical RUR legs where R is a revolute passive joint and u a passive universal joint.

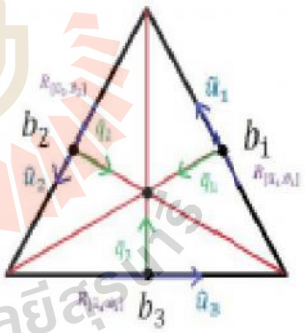


Fig. 5 Canfield Robot Fixed Base Details

The sample of Canfield robot motion formulated by using the forward kinematic equation as shown in Fig.5 The revolutes of the basal and distal plates are denoted by vectors $\mathbf{b}_1 = \{-2.5, -1.5, 0\}^T, \mathbf{b}_2 = \{2.5, -1.5, 0\}^T, \mathbf{b}_3 = \{0, 3, 0\}^T$. The orientation of each basal revolute are denoted by unit vector $\hat{u}_1 = \{0.5, -0.86, 0\}^T, \hat{u}_2 = \{0.5, 0.86, 0\}^T, \hat{u}_3 = \{-1, 0, 0\}^T$. Unit vector perpendicular to $\hat{u}_i$ is $\hat{q}_1 = \{0.86, 0.5, 0\}^T, \hat{q}_2 = \{-0.86, -0.5, 0\}^T, \hat{q}_3 = \{1, 0, 0\}^T$. The $\mathbf{R}_{[\hat{u}_i, \alpha_i]}$ is a rotation about axis $\hat{u}_i$ which is given by

$$R_{0,4,4} = \begin{bmatrix} q_x^2 V\theta_i + C\theta_i & q_x q_y V\theta - q_z S\theta & q_x q_y V\theta + S\theta \\ q_x q_y V\theta + q_z S\theta & q_y^2 V\theta_i + C\theta_i & q_y q_z V\theta - q_x S\theta \\ q_x q_z V\theta - q_y S\theta & q_y q_z V\theta + q_x S\theta & q_z^2 V\theta_i + C\theta_i \end{bmatrix} \quad (15)$$

The result of the calculation found that the position of the origin of the distal and tool coordinate frame is equal to $\{0,0.516,17.185\}^T$ when the input set of basal revolute angles $(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ equal 60° degree.

3.2 Workspace of Canfield Mechanism

Using MATLAB to solve the forward kinematic equation, the 3-D workspace of Canfield Mechanism can be obtained by varying revolute angle $(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ from 0-90 degree as shown in Fig.6.

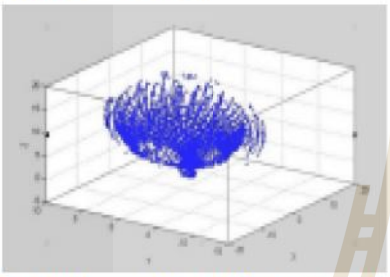


Fig.6 Workspace of Canfield Mechanism in 3-D

The revolute angles $(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ are prescribed form 0-90 degree, we found that the x,y,z coordinates of distal and tool frame can move in workspace which is a hemispherical in 3-D as shown Fig.6 There is also workspace in 2-D are presented in Fig.7, Fig.8, and Fig.9 respectively.

Fig.7 Workspace of Canfield Mechanism in 2-D (x,y)

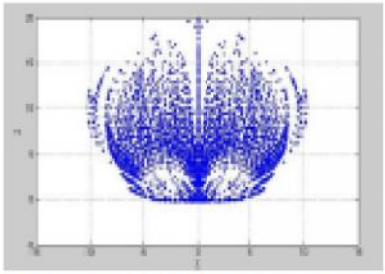


Fig.8 Workspace of Canfield Mechanism in 2-D (z,x)

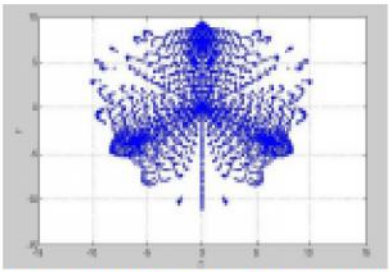


Fig.9 Workspace of Canfield Mechanism in 2-D (z,y)

The article about Inverse kinematic Modeling of 3RRR Parallel Robot presents a kinematic study of 3 RRR parallel robot which is fundamentally a closed-loop kinematic chain mechanism in which the end-effector is connected to the base by several independent kinematic chains. The workspace analysis is the characteristics for a class of 3-DOF. Using numerical simulations to solve the kinematic equation.[5] The result shown in Fig.10

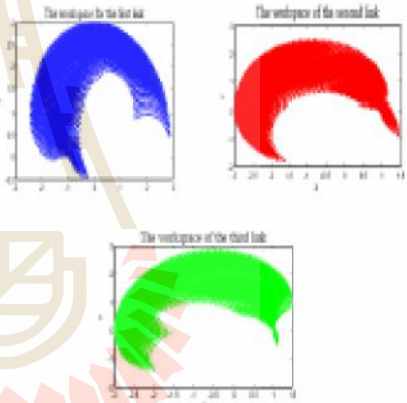


Fig.10 the workspace of each link of the manipulator

We found that Canfield robot (3RUR parallel robot) has a wide range of motion than the 3RRR parallel robot because it can move in 3-D at the x,y,z coordinates, while 3RRR can move only 2-D at the x,y coordinates. The boundary of the workspace of Canfield robot diverse than the 3RRR parallel robot.

4. CONCLUSION

This paper have presented the design and prototyping of Canfield Mechanism for Photovoltaic using SolidWorks software that will produce this desired and robot can be drive by three stepper motors.

Mathematical model is formulated from forward kinematics equations using MATLAB software. This research found that MATLAB software is able to found the final coordinate of robot. The robot can moves along with the workspace of Canfield Mechanism in 3-D. It can

move in a variety of directions suitable for many applications. In second part is the prototyping of the Canfield robot for tracking solar will be conducted as the future work.

5. REFERENCES

[1]. Tiberiu Tudorache, Liviu Kreindler, Design of a Solar Tracker System for PV Power Plants, University Politehnica of Bucharest, Romania Vol. 7, No. 1, pp. 266-268, 2010.

[2]. Stephen Lee Canfield, Development of the Carpal Wrist; a Symmetric, Parallel-Architecture Robotic Wrist, Virginia, pp.16-25, 1997.

[3]. Kausik Chakraborty, Nisarga Chand, Bappaditya Roy, Design and Development Stepper Motor Position Control System Using Atmel 85c51 Microcontroller, International Journal of Emerging Research in Management &Technology, India, Vol. 2, pp.44-48, 2013.

[4]. Mahmoud Gouasmi, Mohamme Ouali, Brahim Fernini, M'hamed Meghatria, Kinematic Modelling and Simulation of a 2-R Robot Using Solidworks and Verification by MATLAB/Simmlink, International Journal of Advanced Robotic Systems, Vol. 9: pp. 245, 2012

[5]. Ouafae HAMDOUN, Fatima Zahra BAGHLI, Larbi EL BAKKALI, Inverse kinematic Modeling of 3RRR Parallel Robot, Morocco, 2015

6. NOMENCLATURE

C_i : $\mathrm{Cos}(\theta_i)$

S_i : $\mathrm{Sin}(\theta_i)$

$V\theta_i$: $(1-\theta_i)$

l : length of each link [cm]

PHOTOS AND INFORMATION

Porupassanan Chaiyasitpru received the Received the B.E. (2012) degree in Aeronautical Engineering from Suranaree University of Technology

Kontorn Chamniprasart Received the B.S. (1980) degree in Mechanical Engineering from (First Class Honor) from Royal Thai Air Force Academy, Thailand, M.Sc. (1987) degree in Mechanical Engineering from University of Pittsburgh, and Ph.D. (1992) degree in Mechanical Engineering from University of Pittsburgh, USA.

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

ประวัติผู้เขียน

นางสาวมุกรวิณัณท์ ชัยสิทธิ์ปรุ เกิดเมื่อวันที่ 8 พฤษภาคม 2532 ที่ อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา เริ่มการศึกษาระดับประถมศึกษาปีที่ 1 – 6 ที่โรงเรียนเมืองนครราชสีมา อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา ระดับมัธยมศึกษาปีที่ 1 –6 ที่โรงเรียนสุรนารีวิทยา อำเภอเมือง จ.นครราชสีมา และสำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอากาศยาน สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา เมื่อ พ.ศ. 2556 และในปี พ.ศ. 2558 ได้ศึกษาต่อระดับวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ ขณะศึกษาได้เป็นผู้สอนรายวิชาปฏิบัติการของสาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและสาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต และสาขาวิชาวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ จำนวน 12 รายวิชา ได้แก่

1. ปฏิบัติการวิศวกรรมเครื่องกล1
2. ปฏิบัติการวิศวกรรมอากาศยาน 1-3
3. ปฏิบัติการระบบควบคุมและอัตโนมัติ
4. ปฏิบัติการวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ 1
5. ปฏิบัติการวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ 2
6. ปฏิบัติการวิศวกรรมเมคคาทรอนิกส์ 3
7. ปฏิบัติการฟิสิกส์สำหรับวิศวกร 1-2
8. ปฏิบัติการระบบอัตโนมัติอุตสาหกรรม

ระหว่างศึกษาระดับปริญญาโท ได้นำเสนอผลงานวิชาการ เรื่อง Design and Prototyping of Canfield Mechanism for Photovoltaic Application ในการประชุมนานาชาติ South East Asian Technical University Consortium (SEATUC) Symposium 2017 ณ เมืองโฮจิมิน ประเทศเวียดนาม