การควบคุมตำแหน่งของหุ่นยนต์แบบเดลต้าด้วยสัญญาณป้อนกลับจากแขน

นายจารุบุตร คณะนัย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2556

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย
The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

POSITION CONTROL OF A DELTA ROBOT WITH END POINT FEEDBACK

Mr. Jaruboot Kananai

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

A Dissertation Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Doctor of Philosophy Program in Mechanical Engineering
Department of Mechanical Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2013
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การควบคุมตำแหน่งของหุ่นยนต์แบบเดลต้าด้วยสัญญาณป้อนกลับจากแขน
โดย	นายจารุบุตร คณะนัย
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.รัชทิน จันทร์เจริญ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาดุษฎีบัณฑิต

....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

....ประธานกรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ)

....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(รองศาสตราจารย์ ดร.รัชทิน จันทร์เจริญ)

....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิทยา วัณณสุโภประสิทธิ์)

....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สัณหพศ จันทรานุวัฒน์)

....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ดร.วินัย ชนปรมัตถ์)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จารุบุตร คณะนัย : การควบคุมตำแหน่งของหุ่นยนต์แบบเดลต้าด้วยสัญญาณป้อนกลับจากแขน. (POSITION CONTROL OF A DELTA ROBOT WITH END POINT FEEDBACK) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.รัชทิน จันทร์เจริญ, หน้า.

ปัจจุบันหุ่นยนต์โครงสร้างขนานแบบเดลต้ามีการใช้งานอย่างแพร่หลาย เช่น โรงงานบรรจุหีบห่อ โรงงานประกอบชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิคส์ เนื่องจากมีความเร็วในการหยิบจับสูงและมีค่าบำรุงรักษาต่ำเนื่องจากมีชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่น้อย การหาตำแหน่งปลายแขนของหุ่นยนต์โดยทั่วไปคำนวณตำแหน่งปลายแขนของหุ่นยนต์จะคำนวณผ่านจลศาสน์ไปข้างหน้า ซึ่งเป็นการคำนวณโดยการโอนย้ายความสัมพันธ์ของตำแหน่งแขนกลจากการอ้างอิงเชิงมุมของแต่ละข้อต่อในปริภูมิข้อต่อมาเป็นการอ้างอิงในปริภูมิเชิงเส้น 3 มิติ ในปริภูมิคาทีเซียน เพื่อบอกตำแหน่งปลายแขนกลเทียบกับฐานของหุ่นยนต์ แม้ว่าการสอบเทียบจะสามารถแก้ไขค่าความผิดพลาดของตัวแปรที่นำมาคำนวณจลศาสตร์ไปข้างหน้าได้ แต่ไม่สามารถแก้ไขได้ทั้งหมด เนื่องจากหุ่นยนต์โครงสร้างแบบขนานนั้น ถูกออกแบบมาด้วยสมมติฐานว่าโครงสร้างแขนในแต่ละวงสมมาตรกัน การแก้ไข การแก้ไขความคลาดเคลื่อนของเชิงเรขาคณิตจึงไม่สามารถทำได้ วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอวิธีการควบคุมตำแหน่งหุ่นยนต์เดลต้าด้วยสัญญาณป้อนกลับจากแขน โดยการนำกล้องไปติดตั้งไว้ที่ปลายแขนจากนั้นนำเสนอเทคนิควิธีการควบคุมป้อนกลับด้วยภาพแบบตำแหน่งเป็นหลัก ซึ่งจะใช้จาโคเบียนรูปภาพในการเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุมตำแหน่งและแสดงผลการทดสอบประสิทธิภาพการควบคุมตำแหน่งปลายแขนของหุ่นยนต์เดลต้า ซึ่งจะเห็นได้ว่าการควบคุมตำแหน่งปลายแขนของหุ่นยนต์นั้น มีความเที่ยงแต่ไม่มีความแม่น จากผลการทดสอบจะเห็นว่าผลการพิมพ์สามมิติแบบเอฟดีเอ็ม โดยการใช้ค่าตำแหน่งจากกล้องชดเชยการเคลื่อนที่ของปลายแขนหุ่นยนต์ ชิ้นงานที่พิมพ์ออกมาจากหัวพิมพ์มีความถูกต้องมากขึ้น เปรียบเทียบกับชิ้นงานที่พิมพ์ออกมาจากหัวพิมพ์ที่ไม่ได้ใช้ระบบควบคุมที่นำเสนอ ดังนั้นการเพิ่มค่าความแม่นของตำแหน่งปลายแขนของหุ่นยนต์โดยใช้กล้องนั้น เป็นผลให้ความถูกต้องในการพิมพ์ชิ้นงานดีขึ้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่อนิสิต ....

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ....

ปีการศึกษา 2556

5271870921 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING
KEYWORDS: PARALLEL ROBOT / DELTA ROBOT / VISUAL SERVO

JARUBOOT KANANAI: POSITION CONTROL OF A DELTA ROBOT WITH END POINT FEEDBACK. ADVISOR: ASSOC. PROF. RATCHATIN CHANCHAREON, Ph.D., pp.

A Delta robot is a symmetric parallel robot with excellent precision and speed for pick-place manipulation task. This robot draws much attention from both institutes and industries. However, the position of its end tip is inaccurately determined via the robot forward kinematics, developed based on the model with the assumption that the robot is symmetric. The calibration was used only to determine the actual lengths for all the links but not corrected the geometrical error of the robot, including axis misalignment, link’s unsymmetrical length and offset. These results in inaccurate position control even the robot is precise. This dissertation proposed a technique to enhance the accuracy of the Delta robot using the USB camera installed at the end tip. The robot position will be accurately controlled even its kinematics model is inaccurate. The position based visual servoing technique was used to correct the position which determined using robot’s kinematic. Image Jacobian was implemented in this regard to determine the correct position of the end tip in order to verify the performance of the proposed technique.

Several experiments are used to demonstrate the performance of the proposed technique. These include the FDM 3D printing case that uses the Delta robot to lay the plastic on a plane. The result shows that the accuracy is significantly improved with the position corrected from the feedback from the camera. In the conclusion, the proposed technique was shown to be more accuracy.

CHULALONGKORN UNIVERSITY

Department:	Mechanical Engineering	Student's Signature	....
Field of Study:	Mechanical Engineering	Advisor's Signature	....
Academic Year:	2013		

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ รศ.ดร.รัชทิน จันทร์เจริญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งได้ท่านกรุณาสละเวลาอันมีค่าของท่าน เพื่อให้คำแนะนำปรึกษาด้านการออกแบบ การควบคุม วิธีการเขียน และคำแนะนำต่างๆที่ใช้ในการทำวิทยานิพนธ์นี้ และวิทยานิพนธ์นี้คงไม่มีทางประสบผมสำเร็จลงได้ ถ้าหากขาดความช่วยเหลือจากบิดามารดา ในทุกๆด้านไม่ว่าด้านเงินทุน คำแนะนำ รวมทั้งกำลังใจ และความห่วงใยที่มีให้มา ในที่นี่ผู้วิจัยจึงใคร่ขอขอบคุณ ผศ.ดร.สัณหพศ จันทรานุวัฒน์ สำหรับการให้คำปรึกษาด้านต่างๆ และขอขอบคุณสำหรับทุกๆท่านที่อยู่แวดล้อมผู้วิจัย ไม่ว่าจะเป็นเพื่อนๆ นักศึกษา รุ่นพี่ รุ่นน้อง ทั้งในระดับปริญญาตรี ปริญญาโท ปริญญาเอก แม่บ้านและเจ้าหน้าที่ ที่ได้แนะนำและให้ความช่วยเหลือต่างๆแก่กันเสมอมา

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ
กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ
สารบัญ ..... ช
สารบัญภาพ 1
สารบัญตาราง 4
บทที่ 1. บทนำ 1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1
1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ 3
1.3 ขอบเขตวิทยานิพนธ์ 4
1.4 ประโยชน์จากวิทยานิพนธ์ 4
1.5 แผนดำเนินการ 4
1.6 สิ่งริเริ่มในวิทยานิพนธ์ 5
บทที่ 2. ปริทัศน์วรรณกรรม 6
2.1 บทนำ 6
2.2 หุ่นยนต์เดลต้า 13
2.2.1 หุ่นยนต์เดลต้าในท้องตลาด 14
2.2.2 หุ่นยนต์เดลต้าในห้องปฏิบัติการ 17
บทที่ 3. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 20
3.1 จลศาสตร์ไปข้างหน้า 20
3.2 จลศาสตร์แบบผกผัน 23
3.3 แบบจำลองคณิตศาสตร์ของหุ่นยนต์เดลต้า 25
3.3.1 สมการของลากรางจ์ 25
3.4 จาโคเบียน 31
3.5 กล้อง เลนส์และการประมวลผลรูป 34
3.5.1 แบบจำลองกล้อง 34
3.5.2 การบิดเบี้ยวของเลนส์ 37

หน้า

3.5.3 ปริภูมิสี 39

3.5.4 การแปลงระนาบของโฮโมกราฟฟี 41

บทที่ 4. ภาพรวมของระบบ 43

4.1 หุ่นยนต์เดลต้า 43

4.2 ระบบทางกล 45

4.3 ระบบสัญญาณควบคุม 48

4.4 การพัฒนาโปรแกรม 50

บทที่ 5. การควบคุมหุ่นยนต์เดลต้า 53

5.1 การทดสอบระบบควบคุม 53

5.1.1 การทดสอบหาผลตอบสนองของการควบคุมแขนท่อนบนด้วยสัญญาณแบบสเต็ป 54

5.1.2 การทดสอบหาผลตอบสนองของ มอเตอร์ด้วยสัญญาณแบบสเต็ป 56

5.2 การทดสอบการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์จุฬาเดลต้า 59

5.2.1 การทดสอบการเคลื่อนที่ของปลายแขนหุ่นยนต์จุฬาเดลต้า 59

5.2.2 การทดสอบการเคลื่อนที่ในระนาบของปลายแขนหุ่นยนต์จุฬาเดลต้า 62

5.2.3 การทดสอบการเคลื่อนที่ปลายแขนหุ่นยนต์จุฬาเดลต้าโดยการเคลื่อนที่เป็นวงกลม 64

บทที่ 6. การควบคุมหุ่นยนต์เดลต้าด้วยระบบกล้องดิจิตอล 66

6.1 การหลักการควบคุมแขนกลด้วยกล้องดิจิตอล 66

6.1.1 การควบคุมโดยใช้ตำแหน่งเป็นหลัก 66

6.1.2 การควบคุมโดยใช้พารามิเตอร์รูปภาพเป็นหลัก 67

6.2 จาโคเบียนรูปภาพ 67

6.3 การสอบเทียบกล้อง 69

6.4 การหาตำแหน่งวัตถุโดยใช้กล้องดิจิตอล 72

6.5 การควบคุมหุ่นยนต์เดลต้าด้วยกล้องดิจิตอล 75

6.5.1 การควบคุมหุ่นยนต์เดลต้าโดยการประมาณค่าจาโคเบียนรูปภาพ 76

6.5.2 การทดสอบหุ่นยนต์จุฬาเดลต้าติดตามสัญญาณกล้องแบบพัลส์ 78

6.5.3 การทดสอบหุ่นยนต์จุฬาเดลต้าติดตามสัญญาณกล้องแบบวงกลม 81

6.6 การประยุกต์ใช้การควบคุมกล้องร่วมกับหุ่นยนต์เดลต้า 83

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

หน้า

บทที่ 7. สรุปผลการวิจัย 88
7.1 สรุปผลการวิจัย 88
รายการอ้างอิง 90
ภาคผนวก 93
ภาคผนวก ก. อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย 94
ก.1 แผงควบคุม ADLINK รุ่น PCI-8133 95
ก.2 แผงควบคุม ADVANTECH PCL-726 96
ข.3 แผงควบคุม PCI-1784 97
ก.4 ชุดขับมอเตอร์ ยี่ห้อ Accelus รุ่น ASP-090-36 98
ก.5 มอเตอร์แบบไม่ใช้แปลงถ่าน รุ่น MBT-N2305 99
ก.6 กล้องจุลทรรศน์ดิจิตอล(Digital micro scope) 100
ก.7 ชุดสร้างสัญญาณพัลส์ด้วยมือ (Manual pulse generator) 101
ก.8 กล้องดิจิตอลแบบยูเอสบี ยี่ห้อ Logitech รุ่น HD Pro c920 102
ภาคผนวก ข. ผลการทดลอง 103
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 109

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 1.1 หุ่นยนต์ที่โดยทั่วไป 2
รูปที่ 2.1 หุ่นยนต์สกาล่าของบริษัท เอปสัน (Epson) [10] 7
รูปที่ 2.2 โต๊ะจำลองหลากหลาย (Multi-simulation table) [6] 9
รูปที่ 2.3 แท่นของสจ๊วต (Stewart platform) [6] 9
รูปที่ 2.4 แบบจำลองแขนกลของแคปเปิ้ล [6] 10
รูปที่ 2.5 แบบจำลองแขนกลของ Willard L.V. Pollard [9, 13] 10
รูปที่ 2.6 หุ่นยนต์ออโทไกด์ [14] 11
รูปที่ 2.7 หุ่นยนต์ไตรเซป [9] 11
รูปที่ 2.8 หุ่นยนต์คาปาแมน [9] 12
รูปที่ 2.9 กลไกการจำลองการบินของโคเอเวอแมนส์ [9] 12
รูปที่ 2.10 หุ่นยนต์เฮกซะ[9] 13
รูปที่ 2.11 หุ่นยนต์เดลต้าของบริษัท ดีมอแร๊ก [13] 14
รูปที่ 2.12 หุ่นยนต์เดลต้าของฮิตาชิ เซกิ [13] 14
รูปที่ 2.13 หุ่นยนต์เดลต้าของบริษัทเอบีบี [16] 15
รูปที่ 2.14 หุ่นยนต์เดลต้าของบริษัทอเดป [17] 15
รูปที่ 2.15 หุ่นยนต์เดลต้าของบริษัทฟานัก [18] 16
รูปที่ 2.16 หุ่นยนต์เดลต้าของบริษัทบ๊อช [19] 16
รูปที่ 2.17 หุ่นยนต์โรโบเทนนิส[20] 17
รูปที่ 2.18 หุ่นยนต์จุฬาเดลต้าแบบต่างๆ 18
รูปที่ 2.19 หุ่นยนต์จุฬาเดลต้า แบบที่ 9 19
รูปที่ 3.1 แผนภาพวิธีการหาจลศาสตร์ไปข้างหน้า 20
รูปที่ 3.2 การติดตั้งแกนของแขนกลแบบขนาน 3 องศา อิสระ 22
รูปที่ 3.3 แผนภาพด้านข้างของแขนกลแบบขนาน 22
รูปที่ 3.4 แผนภาพวิธีการหา จลศาสตร์ผกผัน 25
รูปที่ 3.5 แผนภาพหุ่นยนต์เดลต้าสำหรับการหาแบบจำลองคณิตศาสตร์ 26
รูปที่ 3.6 แผนภาพตัวหุ่นยนต์เดลต้าสำหรับการหาแบบจำลองคณิตศาสตร์ 27
รูปที่ 3.7 แผนภาพแรงที่กระทำบนหุ่นยนต์เดลต้าสำหรับการหาแบบจำลองคณิตศาสตร์ 27
รูปที่ 3.8 แผนภาพแบบจำลองกล้องรูเข็ม 36
รูปที่ 3.9 สามเหลี่ยมคล้าย แสดงความสัมพันธ์เชิงเรขาคณิตระหว่างพิกัดกล้อง 3 มิติ กับพิกัด 2 มิติ 36
รูปที่ 3.10 ภาพการบิดเบี้ยวของเลนส์ 38

CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 3.11 ปริภูมิสี RGB.. 40
รูปที่ 3.12 ปริภูมิสี HSV.. 40
รูปที่ 3.13 การฉายภาพมุมตีบไปยังระนาบโดยใช้วิธี โฮโมกราฟฟี... 42
รูปที่ 4.1 แบบจำลองของหุ่นยนต์เดลต้า 44
รูปที่ 4.2 แผนภาพชิ้นส่วนต่างๆของหุ่นยนต์เดลต้า 44
รูปที่ 4.3 แผนภาพตัวแปรของหุ่นยนต์เดลต้า 45
รูปที่ 4.4 หุ่นยนต์เดลต้า ที่จัดสร้างขึ้น 46
รูปที่ 4.5 พื้นที่ใช้งานของหุ่นยนต์จุฬาเดลต้าที่จัดสร้างขึ้น 46
รูปที่ 4.6 กล่องควบคุม Accelus รุ่น ASP-090-36พร้อมด้วยแหล่งจ่ายไฟ.. 47
รูปที่ 4.7 กล่องควบคุมและแผงอุปกรณ์ใช้งาน... 47
รูปที่ 4.8 แผนภาพระบบควบคุมการทำงานของหุ่ยนต์เดลต้าที่พัฒนาขึ้น 49
รูปที่ 4.9 แผนภาพการใช้งาน XPC.. 50
รูปที่ 4.10 โปรแกรมควบคุมที่เขียนโดยใช้ Simulink.. 51
รูปที่ 4.11 บล็อก Simulink ที่พัฒนาขึ้น 52
รูปที่ 5.1 แผนภาพการระบบควบคุมแขนท่อนบนของหุ่นยนต์เดลต้า.. 54
รูปที่ 5.2 ผลตอบสนองต่อสัญญาณมุมที่ต้องการเท่ากับ 10 องศา.. 54
รูปที่ 5.3 แผนภาพการระบบควบคุมตำแหน่งแขนท่อนบนของหุ่นยนต์เดลต้า... 56
รูปที่ 5.4 ผลตอบสนองต่อสัญญาณตำแหน่ง x= 20 มิลลิเมตร.. 58
รูปที่ 5.5 หุ่นยนต์จุฬาเดลต้าและติดตั้งกล้องจุลทรรศน์ดิจิตอล 60
รูปที่ 5.6 แผ่นสอบเทียบด้วยกล้อง 60
รูปที่ 5.7 การวัดความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งปลายแขน 61
รูปที่ 5.8 แผนภาพความแม่นของการเคลื่อนที่ในแนวแกน x... 61
รูปที่ 5.9 แผนภาพความแม่นของการเคลื่อนที่ในแนวแกน y... 62
รูปที่ 5.10 การติดตั้งเครื่องมือวัดละเอียดแบบเข็มที่ปลายแขนหุ่นยนต์จุฬาเดลต้า 63
รูปที่ 5.11 ตำแหน่งปลายแขนหุ่นยนต์จุฬาเดลต้าเทียบกับแกน X-Y.. 63
รูปที่ 5.12 การติดตั้งปากกาปลายแขนหุ่นยนต์จุฬาเดลต้าและแท็บแล็ต.. 65
รูปที่ 5.13 ผลการวาดสัญญาณวงกลมบนแท็บแล็ต 65
รูปที่ 6.1 แผนภาพการควบคุมโดยใช้ตำแหน่งเป็นหลัก 66
รูปที่ 6.2 การควบคุมโดยใช้พารามิเตอร์ภาพเป็นหลัก 67
รูปที่ 6.3 ภาพแสดงการทำสอบเทียบกล้องด้วยซอฟท์แวร์ 69
รูปที่ 6.4 ภาพก่อนและภาพหลังแก้ไขด้วยการแก้ไขด้วยเมตริกซ์สอบเทียบกล้อง 70
รูปที่ 6.5 ภาพก่อนและหลังการสอบเทียบระนาบ 71
รูปที่ 6.6 แผนภาพการหาตำแหน่งวัตถุด้วยกล้องดิจิตอล 72
รูปที่ 6.7 แผนภาพการแปลงรูปภาพ จากปริภูมิ RGB ไปยัง ปริภูมิ HSV 74

รูปที่ 6.8 การติดตั้งกล้องดิจิตอลแบบยูเอสบี ที่ปลายแขนหุ่นยนต์จุฬาเดลต้า.................................75
รูปที่ 6.9 แผนภาพการควบหุ่นยนต์ด้วยกล้อง 77
รูปที่ 6.10 ภาพการสลับไปมาของจุดสีน้ำเงิน 78
รูปที่ 6.11 ผลตอบสนองของหุ่นยนต์จุฬาเดลต้า...80
รูปที่ 6.12 ภาพการเคลื่อนที่ของจุดเป็นวงกลมจุดสีน้ำเงิน 81
รูปที่ 6.13 ผลตอบสนองของหุ่นยนต์จุฬาเดลต้าด้วยสัญญาณภาพวงกลม.......................................82
รูปที่ 6.14 การติดตั้งหัวพิมพ์สามมิติบนหุ่นยนต์จุฬาเดลต้า...84
รูปที่ 6.15 ซอฟแวร์สำหรับสำหรับสั่งงานด้วย G-Code 84
รูปที่ 6.16 แผนผังการควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ด้วยตำแหน่งจาก G-Code..........................85
รูปที่ 6.17 ผลการพิมพ์แบบด้วยหุ่นยนต์เดลต้าโดยใช้ G-Code 86
รูปที่ ก.1 แผงควบคุม ADLINK รุ่น PCI-8133 [41] 95
รูปที่ ก.2 แผงควบคุม ADVANTECH PCL-726 [41]...96
รูปที่ ก.3 แผงควบคุม PCI-1784 [41]..97
รูปที่ ก.4 ชุดขับมอเตอร์ ยี่ห้อ ACCELUS ACP-90-[42] 98
รูปที่ ก.5 มอเตอร์แบบไม่ใช้แปลงถ่าน รุ่น MBT-N2305 99
รูปที่ ก.6 กล้องจุลทรรศน์ดิจิตอล..100
รูปที่ ก.7 ชุดควบคุมด้วยมือ 101
รูปที่ ก.8 กล้องดิจิตอลแบบยูเอสบียี่ห้อ Logitech รุ่น HD Pro c920 [43]..................................102

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย 4
ตารางที่ 2.1 ตารางเปรียบเทียบค่าความแม่นกับค่าภาระต่อน้ำหนัก [6] 7
ตารางที่ 2.2 ตารางเปรียบเทียบระหว่างแขนกลแบบอนุกรมกับขนาน[9] 8
ตารางที่ ก.1 คุณสมบัติของแผงควบคุม ADLINK PCI-8133 [41] 95
ตารางที่ ก.2 คุณสมบัติของแผงควบคุม ADVANTECH PCL-726 [41] 96
ตารางที่ ก.3 คุณสมบัติของแผงควบคุม PCI-1784 [41] 97
ตารางที่ ก.4 คุณสมบัติของชุดขับมอเตอร์ ยี่ห้อ Accelus รุ่น ASP-090-36 [42] 98
ตารางที่ ก.5 คุณสมบัติของมอเตอร์แบบไม่ใช้แปลงถ่าน รุ่น MBT-N2305 99
ตารางที่ ก.6 คุณสมบัติของกล้องจุลทรรศน์ดิจิตอล 100
ตารางที่ ข.1 การทดสอบวัดความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งปลายแขนของหุ่นยนต์จุฬาเดลต้า โดยเคลื่อนที่ไปในแนวแกน x ระยะ 5 มิลลิเมตร 104
ตารางที่ ข.2 การทดสอบวัดความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งปลายแขนของหุ่นยนต์จุฬาเดลต้า โดยเคลื่อนที่ไปในแนวแกน y ระยะ 5 มิลลิเมตร 105
ตารางที่ ข.3 การทดสอบวัดความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งปลายแขนของหุ่นยนต์จุฬาเดลต้าในแนวแกน z 106
ตารางที่ ข.4 การทดสอบวัดความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งปลายแขนของหุ่นยนต์จุฬาเดลต้าในแนวแกน z (ต่อ) 107
ตารางที่ ข.5 การทดสอบหาจาโคเบียนรูปภาพของปลายแขนของหุ่นยนต์เทียบกับกล้อง 108

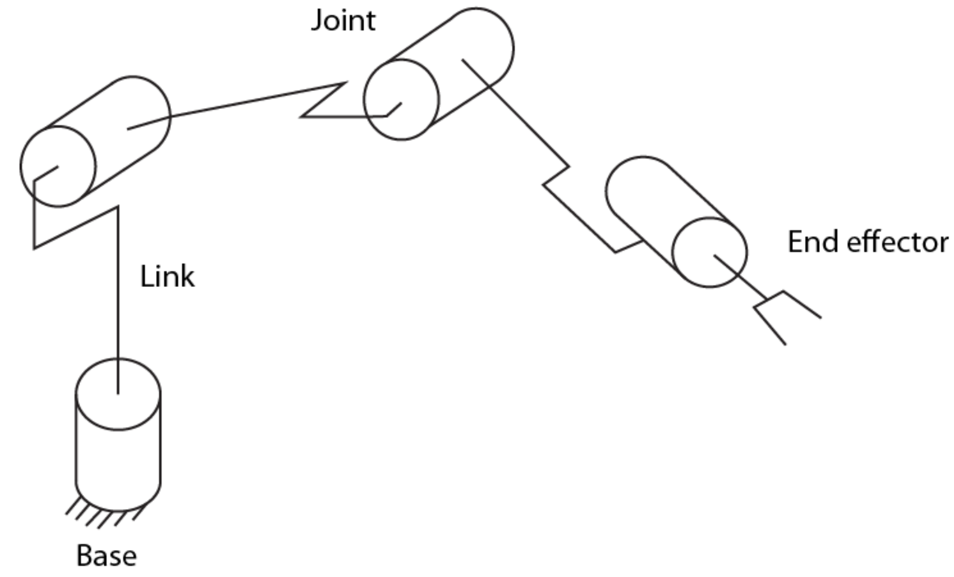
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 1.
บทนำ

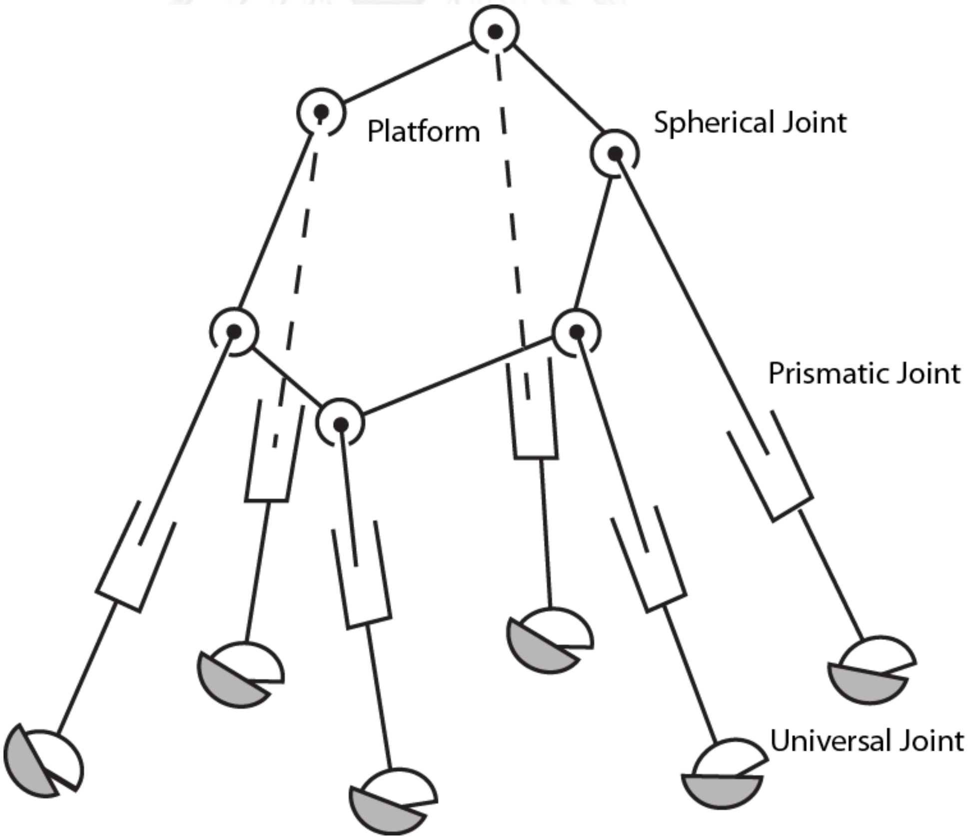
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันหุ่นยนต์ได้เข้ามามีบทบาทอย่างแพร่หลาย ในอุตสาหกรรมต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นอุตสาหกรรมการประกอบรถยนต์ การผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ การบรรจุหีบห่อผลิตภัณฑ์ และอื่นอีกมากมาย การที่หุ่นยนต์เป็นที่นิยมอย่างกว้างขวาง เนื่องจากสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต มีความแม่น (Accuracy) มีความสามารถในการทำซ้ำ (Repeatability) และสามารถทำงานที่อันตรายแทนมนุษย์ได้

หุ่นยนต์ที่มีใช้ในอุตสาหกรรม สามารถแบ่งออกได้เป็นสองประเภท คือ หุ่นยนต์ที่มีโครงสร้างแบบอนุกรม (Serial link robot) และ หุ่นยนต์ที่มีโครงสร้างแบบขนาน (Parallel link robot) [1] หุ่นยนต์ที่มีโครงสร้างแบบอนุกรมนั้น มีโครงสร้างแบบโซ่เปิด (Open chain) โดยโครงสร้างของหุ่นยนต์นั้นแขนแต่ละแขนจะต่อกันในลักษณะแบบอนุกรม จากฐานไปสู่ปลายแขน ดังรูปที่ 1.1 หุ่นยนต์แบบอนุกรมนั้นสร้างมาจากแนวความคิดของลักษณะแขนของมนุษย์ ทำให้หุ่นยนต์ประเภทนี้มีพื้นที่การทำงาน (Workspace) กว้าง แต่เนื่องจากลักษณะการต่อแขนในแบบอนุกรมทำให้ความเฉื่อยของระบบที่เคลื่อนที่ (Moving part) มีค่ามาก เพราะแต่ละแขนแต่ละแขนต้องรับน้ำหนักของแขนที่อยู่ถัดไป ทำให้ภาระของตัวขับเคลื่อนมีมาก ต้องใช้ตัวขับเคลื่อนขนาดใหญ่ และความแม่นของหุ่นยนต์ประเภทนี้ มีค่าความผิดพลาดมากเนื่องการมีความผิดพลาดสะสม (Accumulating error) ที่เกิดจากแต่ละแขนไปยังปลายแขน หุ่นยนต์อีกประเภทหนึ่งคือหุ่นยนต์ที่มีโครงสร้างแบบปิดนั้นโครงสร้างของแขนไปยังปลายแขนจะมีหลายเส้นทาง ดังรูปที่ 1.1 แต่ละแขนจะเคลื่อนที่ขนานกันไปเนื่องจากหุ่นยนต์มีโครงสร้างแบบขนาน ภาระการขับของตัวขับเคลื่อน (Actuator) กระจายออกเป็นส่วนย่อยๆ ทำให้ตัวขับเคลื่อนไม่ต้องมีขนาดใหญ่ ทั้งการที่ตัวขับเคลื่อนทั้งหมดจะถูกติดตั้งไว้ที่ฐานทำให้ความเฉื่อยของระบบที่เคลื่อนที่น้อยลงส่งผล หุ่นยนต์แบบขนานนั้นสามารถเคลื่อนที่ได้ด้วยอัตราเร่งสูงได้ จากที่กล่าวมานั้น การใช้งานของหุ่นยนต์โครงสร้างแบบอนุกรมมีการใช้งานอย่างแพร่หลาย ปัญหาอย่างหนึ่งของการใช้งานคือ โครงสร้างของหุ่นยนต์แบบอนุกรมนั้นมีภาระการใช้งานกับน้ำหนักหุ่นยนต์มาก (Pay load per weight ratio) [2] การใช้งานจึงอันตรายจำเป็นต้อง ทำสถานที่เฉพาะเพื่อใช้งานหุ่นยนต์ เพื่อป้องกันอันตรายต่างๆที่เกิดจากหุ่นยนต์ จากปัญหานี้การใช้งานหุ่นยนต์ประเภทนี้จึงมีการใช้งานแพร่หลายเฉพาะโรงงานอุตสาหกรรมเท่านั้น เพราะการใช้งานต้องเตรียมสภาวะแวดล้อมให้กับหุ่นยนต์ แนวทางการพัฒนาหุ่นยนต์ในอนาคตต่อไปนั้น จึงมีทิศทางที่หุ่นยนต์จะต้องมี ภาระขับเคลื่อนต่อน้ำหนัก (Payload per weight ratio) น้อย โดยทั่วไปจะเป็น 1 ต่อ 1และต้องสามารถทำงานร่วมกับมนุษย์ได้ (Human friendly) [3] ดังนั้นทิศทางการพัฒนาหุ่นยนต์จึงมีแนวทางไปสู่การพัฒนาหุ่นยนต์แบบขนาน ซึ่งมี ภาระขับเคลื่อนต่อน้ำหนักน้อย การพัฒนางานวิจัยหุ่นยนต์แบบขนานจึงแพร่หลายมากขึ้นตามลำดับ



ก. หุ่นยนต์ที่มีโครงสร้างแบบอนุกรม (Serial link robot)



ข.หุ่นยนต์ที่มีโครงสร้างแบบขนาน (Parallel link robot)

รูปที่ 1.1 หุ่นยนต์ที่โดยทั่วไป

หุ่นยนต์แบบขนานที่ได้รับความนิยมในปัจจุบัน แบบหนึ่งคือ หุ่นยนต์เดลต้า (Delta robot) นิยมใช้งานในโรงงานบรรจุหีบห่อ โรงงานประกอบชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิคส์ เนื่องจากหุ่นยนต์แบบนี้สามารถเคลื่อนที่ได้ ด้วยความเร่งสูงถึง 50 g ในห้องทดลอง [2]และมีค่าบำรุงรักษาต่ำเนื่องจากมีชิ้นส่วนที่เคลื่อนที่น้อย ปัญหาอย่างหนึ่งของหุ่นยนต์เดลต้าคือการใช้วัสดุโครงสร้างเบา มาจัดสร้าง ส่งผลให้ตำแหน่งปลายแขนของหุ่นยนต์ไม่ถูกต้อง แม้ว่าจะมีการควบคุมมอเตอร์ขับเคลื่อนที่แม่นยำแล้วก็ตาม โดยทั่วไปคำนวณตำแหน่งปลายแขนของหุ่นยนต์จะคำนวณผ่าน จลศาสน์ไปข้างหน้า (Forward kinematics) [4, 5]ซึ่งการคำนวณผ่าน จลศาสน์ไปข้างหน้าเป็นการโอนย้ายความสัมพันธ์ของตำแหน่งแขนกลจากการอ้างอิงเชิงมุมของแต่ละข้อต่อ (Joint) ในปริภูมิข้อต่อ (Joint space) มาเป็นการอ้างอิงในปริภูมิเชิงเส้น 3 มิติในปริภูมิคาทีเซียน (Cartesian space) เพื่อบอกตำแหน่งปลายแขนกลเทียบกับฐานของหุ่นยนต์ (Base frame) โดยค่าตัวแปรที่นำมาใช้ใน จลศาสน์ไปข้างหน้าได้มาจากการคำนวณมาจากอุปกรณ์ตรวจรับที่ได้ติดตั้งไว้ที่แกนหมุนของมอเตอร์แต่ละตัว แต่ค่าตำแหน่งที่ได้จากการคำนวณผ่านจลศาสน์ไปข้างหน้านั้น มีความไม่แน่นอนหลายประการ อาทิ เช่น การเยื้องของแกนหมุน (Axis misalignment), การเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก (Inertia change) การบิดเบี้ยวของลิงค์ที่เกิดความยาวและ transmission backlash เป็นต้น

จากความไม่แน่นอนที่กล่าวมานั้นการ วัดตำแหน่งปลายแขนของหุ่นยนต์เดลต้าไม่มีความแม่นจากการคำนวณผ่าน จลศาสน์ไปข้างหน้าการนำอุปกรณ์วัดไปติดตั้งที่ปลายแขนโดยตรงแล้วนำมาชดเชยตัวหุ่นยนต์จะทำให้เกิดความแม่นมากขึ้น งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาระบบควบคุมหุ่นยนต์เดลต้า โดยสามารถควบคุมตำแหน่งได้ทั้งแบบตำแหน่งที่สัมพัทธ์กับแกนฐานหุ่นยนต์ หรือเป็นตำแหน่งที่สัมพัทธ์กับวัตถุก็ได้ และสามารถควบคุมหุ่นยนต์โดยจะมุ่งเน้นพัฒนาเทคนิคการควบคุมสำหรับหุ่นยนต์แบบขนานที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงแบบไร้แปลงถ่าน เพื่อให้มีความแข็งในแกนขับเคลื่อนสูง มีความเร็วสูง มีความแม่นตรงสูง และมีความหน่วงเวลาต่ำ สำหรับใช้ในงานควบคุมจากระยะไกล ทั้งนี้ จะใช้สัญญาณจากเซนเซอร์ที่ติดตั้งที่ปลายแขนเพื่อส่งสัญญาณป้อนกลับมาควบคุมหุ่นยนต์โดยตรง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1.2 วัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์

1. เพื่อพัฒนาเทคนิคการควบคุมหุ่นยนต์เดลต้า โดยสามารถควบคุมตำแหน่งได้ทั้งแบบตำแหน่งที่สัมพัทธ์กับแกนฐานหุ่นยนต์ หรือเป็นตำแหน่งที่สัมพัทธ์กับวัตถุก็ได้
2. เพื่อจัดสร้างหุ่นยนต์เดลต้า แบบ 3 องศา อิสระ สำหรับใช้เป็นเครื่องมือในงานวิจัยด้านระบบหุ่นยนต์ มีสถาปัตยกรรมแบบเปิด สามารถสร้างรูปแบบการควบคุมได้ในระดับข้อต่อ (Joint level) และสามารถดัดแปลงระบบได้ง่าย สามารถพัฒนาโปรแกรมด้วยภาษาแบบกราฟิก และสามารถเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอกได้อย่างมีประสิทธิภาพ

1.3 ขอบเขตวิทยานิพนธ์

1. ออกแบบและจัดสร้างหุ่นยนต์เดลต้า แบบ 3 องศา อิสระ รวมทั้งระบบควบคุม และโปรแกรมควบคุมในเบื้องต้น สามารถควบคุมตำแหน่งของหุ่นยนต์ให้ไปยังตำแหน่งที่ต้องการใดๆ ในพื้นที่การใช้งานของหุ่นยนต์ได้
2. ประเมินสมรรถนะของหุ่นยนต์ ในเชิงเปรียบเทียบระหว่างการควบคุมตำแหน่งหุ่นยนต์เดลต้าแบบทั่วไป กับการควบคุมที่มีการป้อนกลับด้วยสัญญาณปลายแขน

1.4 ประโยชน์จากวิทยานิพนธ์

1. องค์ความรู้สำหรับการควบคุมหุ่นยนต์เดลต้า ที่ปลายแขนโดยใช้การป้อนกลับโดยตรงจากปลายแขน เพื่อเพิ่มความแม่นและความถูกต้องในการควบคุม ชุดอุปกรณ์หุ่นยนต์เดลต้า 3 องศา อิสระ
2. องค์ความรู้สำหรับการออกแบบและสร้างหุ่นยนต์เดลต้า 3 องศา อิสระ ทั้งในเรื่องของระบบทางกล อิเลคทรอนิกส์ที่เกี่ยวข้อง การควบคุม การพัฒนาโปรแกรม

1.5 แผนดำเนินการ

การดำเนินงานวิจัยแบ่งออกเป็น 6 ขั้นตอนหลักโดยแสดงอยู่ในตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงาน	ระยะเวลา (เดือน)					
	1-3	4-6	7-9	10-12	13-15	16-18
1. ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง						
2. กำหนดแนวทางในการแก้ปัญหา						
3. ออกแบบและพัฒนาชุดควบคุมที่ใช้ในการทดลอง						
4. พัฒนาแนวคิดและวิธีการในการแก้ปัญหา						
5. ทดสอบ วิเคราะห์ และรวบรวมผล						
6. จัดทำวิทยานิพนธ์						

1.6 สิ่งริเริ่มในวิทยานิพนธ์

1. การพัฒนาระบบควบคุมหุ่นยนต์แบบขนานเดลต้า โดยใช้กล้องดิจิตอลแบบยูเอสบีคม ชดเชยความผิดพลาด เพื่อเพิ่มความแม่นในการใช้งาน
2. การเขียนโปรแกรมควบคุมแบบเวลาจริงและไดร์เวอร์ติดต่อกับอุปกรณ์ในระดับล่าง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 2.
ปริทัศน์วรรณกรรม

บทนี้จะกล่าวถึงประวัติความเป็นมา ความต้องการที่จะใช้หุ่นยนต์มาเพื่อแบ่งเบาภาระของงานต่างๆของมนุษย์ และข้อดีของการใช้หุ่นยนต์ในการทำงานแทนมนุษย์ จากนั้นจะกล่าวถึงประวัติของหุ่นยนต์แบบขนานในแบบต่างๆ ทั้งการใช้งานของหุ่นยนต์ ประวัติการคิดค้น ที่มาที่ไปของการออกแบบ และหุ่นยนต์ที่มีใช้งานใน

2.1 บทนำ

จากความคิดเริ่มที่มนุษย์อยากได้ผู้ช่วยที่สามารถแบกเบาภาระต่างๆจากการทำงานในชีวิตประจำวัน อีกทั้งยิ่งมนุษย์มีความก้าวหน้าไปแค่ไหน งานในชีวิตประจำวันเริ่มที่จะซับซ้อน และมีความยากลำบากมากยิ่งขึ้นจึงทำให้มนุษย์ได้พยายามคิดและพัฒนาผู้ช่วย จนกระทั่งในปี 1960 หุ่นยนต์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมตัวแรกก็ถือกำเนิดขึ้นเพื่อที่ให้ทำงานแทนมนุษย์

หุ่นยนต์ในยุคแรกมีลักษณะการทำงานที่เลียนแบบมาจากมนุษย์ที่นิยามมากที่สุด คือการเลียนแบบลักษณะการเคลื่อนไหวของแขนของมนุษย์ โดยลักษณะการทำงานแบบนี้ถูกเรียกว่า แขนกลแบบอนุกรม [3, 6-9] โดยแขนกลแบบนี้จะประกอบไปด้วย ส่วนที่หนึ่งที่ยึดติดกับพื้นดินหรือฐานที่มั่นคง ซึ่งจะถูกเรียกว่า ฐาน (Base) กับส่วนอีกด้านหนึ่งที่จะใช้สัมผัสหรือทำงานตามที่หุ่นยนต์ได้ถูกออกแบบไว้ ซึ่งจะเรียกว่าปลายแขน (End tips) และนอกจากนั้นจะเป็นการเชื่อมต่อกันของแขนและข้อต่อต่างๆ ในลักษณะอนุกรมกัน จากฐานไปสู่ปลาย แขนกลนี้จึงถูกเรียกกว่า แขนกลแบบห่วงโซ่เปิด[8, 9] ซึ่งแขนกลลักษณะนี้มักเป็นลักษณะการทำงานพื้นฐานทั่วไปของหุ่นยนต์ ตัวอย่างเช่น ในวงการอุตสาหกรรมที่ใช้หุ่นยนต์ จะนิยมใช้แขนกลที่มีองศาอิสระเป็น 4 ที่มีชื่อเรียกว่า แขนกลสกาล่า (Scara) [10]

อนึ่งความที่แขนกลอนุกรมนั้น ถูกออกแบบจากมาลักษณะของแขนของมนุษย์ จึงส่งผลให้แขนกลลักษณะนี้ มีความซับซ้อนค่อนข้างน้อย อีกทั้งยังทำให้มีพื้นที่ในการทำงานที่กว้าง แต่อย่างไรก็ตาม พื้นที่การทำงานของแขนกลมีมากเท่าใดยิ่งส่งผลในทางกลับกัน ทำให้ความสามารถในการยกภาระ (Pay load) ของแขนกลนั้นลดลง [11] นอกจากนี้ด้วยการที่แขนทั้งหมดเชื่อมต่อกันแบบอนุกรม จึงส่งผลให้มอเตอร์และข้อต่อข้อก่อนๆนั้น เป็นภาระต่อข้อต่อหลังๆ ด้วยเหตุนี้แขนกลลักษณะนี้มักจะมีขนาดใหญ่ ส่งผลทำให้ความสามารถในการยกสิ่งของของแขนกลนั้นจึงค่อนข้างจำกัดและด้วยขนาดของแขนกลมีขนาดใหญ่ ส่งผลให้ความเฉื่อยของแขนกลมีมากทำให้แขนกลชนิดนี้มีความเร็วและความเร่งในการเคลื่อนไหวค่อนข้างต่ำ

รูปที่ 2.1 หุ่นยนต์สกาล่าของบริษัท เอปสัน (Epson) [10]

ตารางที่ 2.1 ตารางเปรียบเทียบค่าความแม่นกับค่าภาระต่อน้ำหนัก [6]

หุ่นยนต์	องศาอิสระ	น้ำหนัก (กิโลกรัม)	ภาระการยก (กิโลกรัม)	ความสามารถในการทำซ้ำ	ภาระการยกต่อน้ำหนัก
Adept I800	4	34	5.5	± 0.02	0.1617
Adept 1XL	4	265	12	± 0.025	0.0452
Adept 3XL	4	266	25	± 0.038	0.0939
Epson E2C251	4	14	3	± 0.01	0.2442
Epson E2S45X	4	20	5	± 0.015	0.25
Epson E2H853	4	37	2	± 0.025	0.054
Seiko EC250	4	14	3	± 0.01	0.21438
Seiko EH850	4	43	10	± 0.025	0.2325
Toshiba SR-504HSP	4	38	2	± 0.02	0.0526

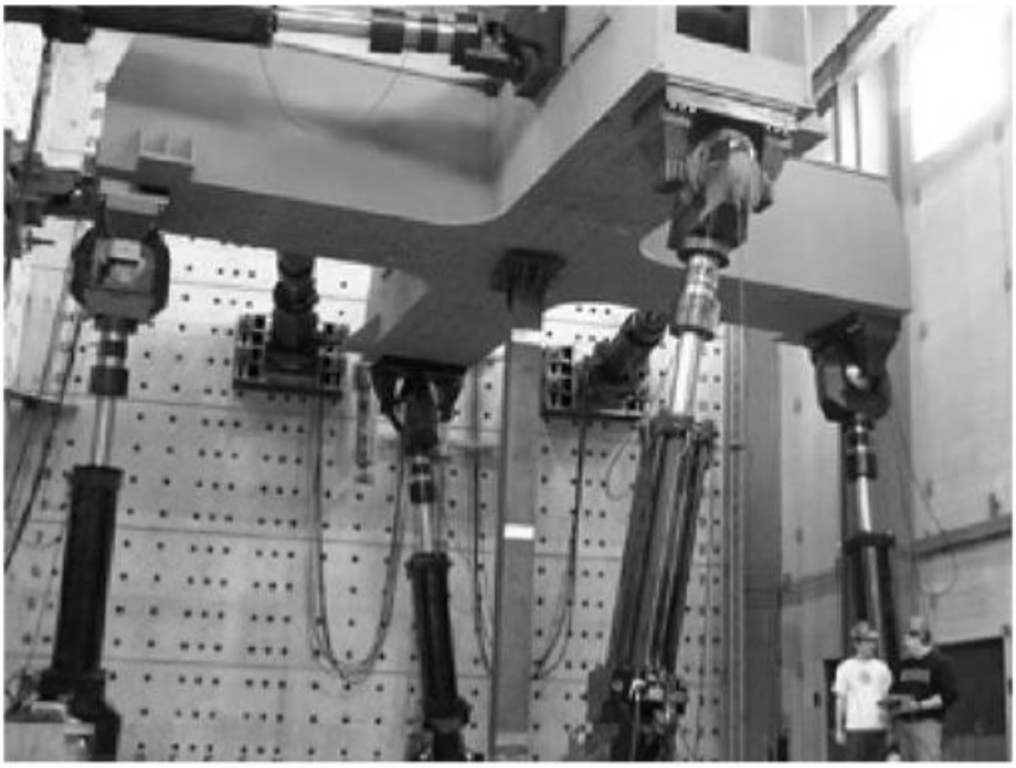
จากตารางที่ 2.1 แสดงให้เห็นถึง ความสามารถของแขนกลอนุกรมที่ใช้ในอุตสาหกรรม ซึ่งจะเห็นได้ว่า อัตราส่วนของภาระที่ยกได้เมื่อเทียบกับน้ำหนักของแขนกล จะมีค่าค่อนข้าง ในทางตรงกันข้ามกัน หากแขนที่เชื่อมต่อจากฐานไปยังปลายแขน มีมากกว่าหนึ่งเส้นทาง จะทำให้แขนกลลักษณะนี้มีชื่อเรียกว่า แขนกลแบบขนานหรือแขนกลห่วงโซ่ปิด ซึ่งความที่ลิงค์ทั้งหมดเชื่อมต่อกับแบบขนานจึงส่งผลให้ภาระได้รับการกระจายแบ่งลงสู่ตัวขับเคลื่อน แต่ละตัวเท่าๆกัน ส่งผลให้แขนกลสามารถที่จะรับภาระได้มากยิ่งขึ้น ละด้วยเหตุนี้ ทำให้ค่าความผิดพลาดนั้น ลดลงโดยเฉลี่ยไปตามแขนแต่ละเส้น นอกจากนี้ด้วยความที่เป็นระบบห่วงโซ่ปิดจึงทำให้แขนกลอยู่ห่างจากฐานไม่มาก ส่งผลให้ความเฉื่อยลดลง [12] ทำให้แขนกลมีความเร็วและความเร่งมากขึ้น จากข้อดีหลายประการที่มากกว่า แขนกลแบบอนุกรม จึงส่งผลให้มีคนสนใจตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบัน

ต้นแบบแขนกลแบบขนานที่ถูกคิดค้นขึ้นมาเป็นแบบแรกคือ ต้นแบบของกัฟ เรียกได้ว่าเป็น แต่ในความเป็นจริงก่อนหน้านั้นกลับพบว่า มีระบบชนิดหนึ่งที่มีโครงสร้างและลักษณะคล้ายกัน ระบบนี้ มีชื่อเรียก ว่า โต๊ะจำลองอเนกประสงค์ (Multi-simulation table) ดังรูปที่ 2.2 ต่อจากนั้น ในปี 1965 สจ๊วต (Stewart) เสนอตัวจำลองที่ใช้ลักษณะของแขนกลแบบขนาน ที่มีชื่อเรียกว่า โครงสร้างแบบสจ๊วต (Stewart platform) ดังในรูปที่ 2.3

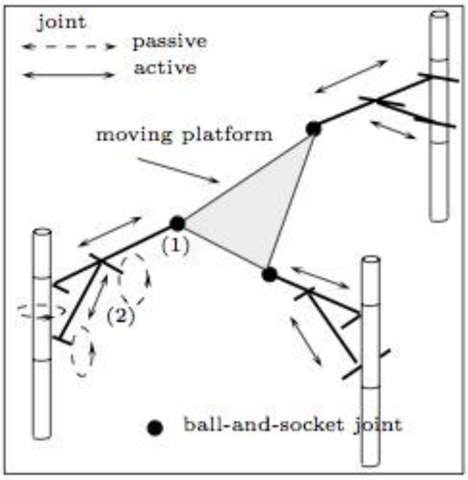
ตารางที่ 2.2 ตารางเปรียบเทียบระหว่างแขนกลแบบอนุกรมกับขนาน[9]

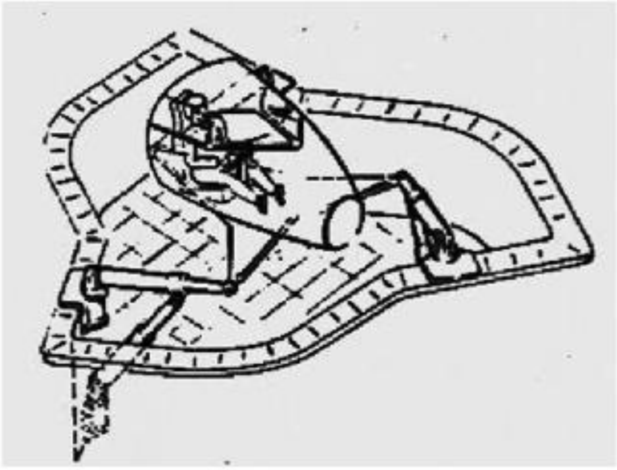
คุณสมบัติ	หุ่นยนต์โครงสร้างแบบอนุกรม	หุ่นยนต์โครงสร้างแบบขนาน
พื้นที่ใช้งาน	ใหญ่	เล็ก
ความแข็งเกร็ง	ต่ำ	สูง
ภาระการยก	ต่ำ	มาก
ความเฉื่อย	มาก	น้อย
โครงสร้าง	ง่าย	ซับซ้อน
ความแม่น	มีความผิดพลาดสะสม	มีความผิดพลาดเฉลี่ย
ความเร็ว	ต่ำ	สูงกว่า
ความเร่ง	ต่ำ	สูงกว่า
การหาจลศาสน์ไปข้างหน้า	ง่าย	ยาก
การหาจลศาสน์ย้อนกลับ	ยาก	ง่าย
การควบคุม	ซับซ้อน	ซับซ้อนมาก
ความยากง่ายในการออกแบบ	ง่าย	ยาก
ราคา	สูง	ต่ำ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 2.2 โต๊ะจำลองหลากหลาย (Multi-simulation table) [6]

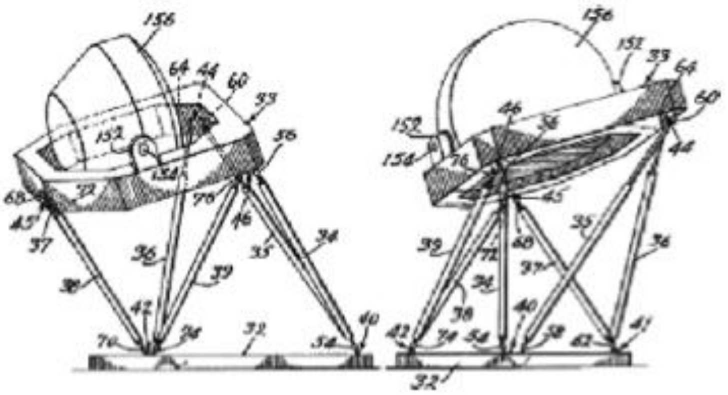




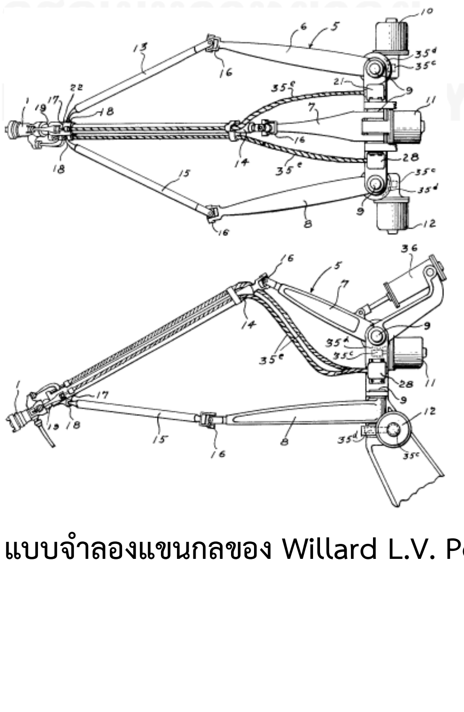
รูปที่ 2.3 แท่นของสจ๊วต (Stewart platform) [6]

นอกจากสองคนที่กล่าวมานั้นยังมี วิศวกรอีกหลายคนที่สนใจในระบบแขนกลแบบนี้ เช่น เคล้าส์ แคปเปิ้ล (Klaus cappel) ดังรูปที่ 2.4 ซึ่งในช่วงยุคแรกของแขนกลแบบขนาน แขนกลมักถูกนำไปใช้ในรูปแบบของระบบจำลองต่างๆ จนกระทั่ง วิลเลี่ยม โปแลนด์ ได้นำแขนกลลักษณะนี้ไปประยุกต์ใช้ เป็นหุ่นยนต์พ่นสีอัตโนมัติ ซึ่งภายหลังได้รับสิทธิบัตร โดยลูกชาย วิลเลี่ยม โปแลนด์ จูเนียร์ เป็นคนขอให้ในวันที่ 29 ตุลาคม 1934

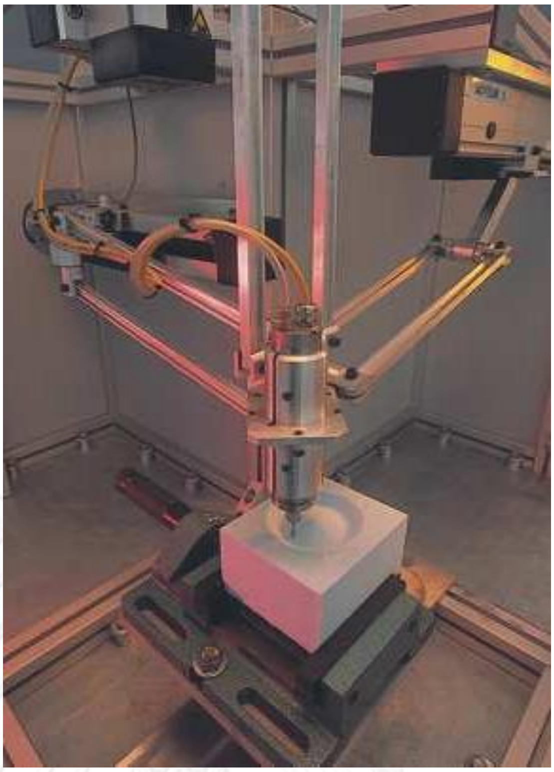
เมื่อเวลาผ่านไป หุ่นยนต์มีแนวโน้มที่จะต้องการการทำงานที่มีความแม่นย้ำมากขึ้น และรวดเร็วขึ้น ส่งผลให้ แขนกลแบบขนาน ได้รับการพัฒนามากยิ่งขึ้น ทำให้เกิดแขนกลแบบต่างๆ มากมาย เช่น หุ่นยนต์ออโทไกด์ (Orthoglide robot) ดังรูปที่ 2.6 ที่ถูกเสนอ โดยเวนเกอร์ (Wenger) หุ่นยนต์ไตรเซป (Triceps) ดังรูปที่ 2.7 ซึ่งถูกเสนอและจดสิทธิบัตรโดย นอร์แมน (Neumann) หุ่นยนต์คาปาแมน (Capaman robot) ดังรูปที่ 2.8 โดยหุ่นยนต์ทั้งสาม ล้วนมีองศาอิสระเท่ากับ 3 นอกจากนี้ ยังมีหุ่นยนต์ที่มีองศาอิสระมากกว่า 3 อีก เช่น กลไกการจำลองการบิน ที่ถูกเสนอโดย โคเอเวอแมนส์ (Koevermans) ดังรูปที่ 2.9 ซึ่งมีองศาอิสระเท่ากับ 4 หรือหุ่นยนต์เฮกซะ (Hexa robot) ดังรูปที่ 2.10 ที่เสนอโดย ปิแอรอท (Pierrot) ซึ่งมีองศาอิสระเท่ากับ 6



รูปที่ 2.4 แบบจำลองแขนกลของแคปเปิ้ล [6]



รูปที่ 2.5 แบบจำลองแขนกลของ Willard L.V. Pollard [9, 13]

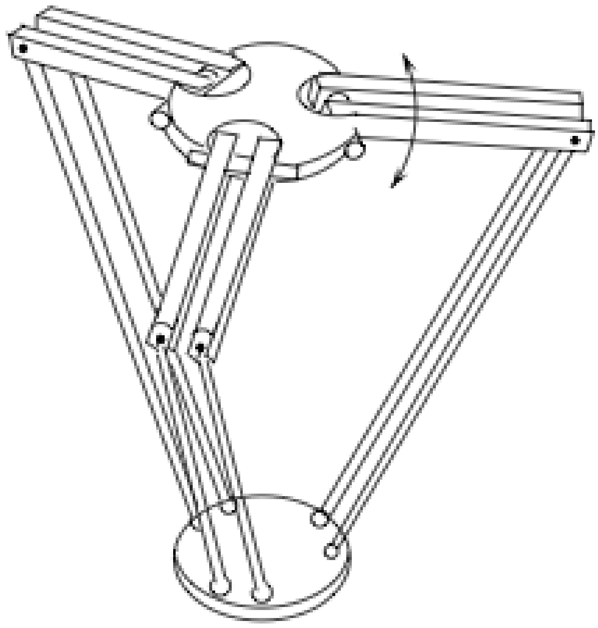


รูปที่ 2.6 หุ่นยนต์ออโทไกด์ [14]

รูปที่ 2.7 หุ่นยนต์ไตรเซป [9]

รูปที่ 2.8 หุ่นยนต์คาปาแมน [9]

รูปที่ 2.9 กลไกการจำลองการบินของโคเอเวอแมนส์ [9]



รูปที่ 2.10 หุ่นยนต์เฮกซะ[9]

2.2 หุ่นยนต์เดลต้า

หุ่นยนต์เดลต้า (Delta robot) ถูกนำมาพัฒนาโดยเรมอน คลาเวล (Raymond clavel) ได้ศึกษาและทำต้นแบบออกมาในปี 1980 เป็นหุ่นยนต์แบบขนานดังรูปที่ 2.11 โดยแขนกลเรมอน คลาเวล ได้พัฒนาคือหุ่นยนต์ที่มี สี่องศาอิสระ (Degree of freedoms) โดยมีสามองศาในแนวเลื่อน (Translation) และ หนึ่งองศาอิสระในการหมุน (Rotation) งานพัฒนานี้ เรมอน คลาเวลได้รับรางวัล Golden Robot ในปี 1990 ต่อจากนั้นหุ่นยนต์ได้ถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมบรรจุกล่อง [15] เป็นที่แรกที่เนื่องจากคุณสมบัติ ของแขนกลแบบขนาน ที่มีความแม่น และความเร็วที่สูง นอกจากนี้ บวกกับความเดลต้าเป็นที่หุ่นที่มีความสมมาตรระหว่างแขนทั้งสาม จึงส่งผลให้หุ่นยนต์มีความสะดวกที่จะใช้งาน

ในปี 1987 บริษัท ดีมอแร็ก (Demaurex) ได้จำหน่ายหุ่นยนต์เดลต้า ในลักษณะของการจัดสิ่งของแล้ววางลงตามตำแหน่งที่ต้องการ หรือที่เรียกว่า จับ-วาง (Pick-place) [13]ต่อจากนั้น ได้มีการขยายตลาดไปยังวงการผ่าตัด โดยนำเดลต้าไปติดตั้งกล้องที่ปลายแขนเพื่อช่วยใจงานผ่าตัด จากนั้น หุ่นยนต์เดลต้าก็มีการพัฒนาเรื่อยมา จากหลากหลายบริษัท เช่น กลุ่มมิครอน เทคโนโลยี (Mikorn Technology Group) กลุ่มคายูส แอนด์ เมาเซอร์ (Krause & Mauser Group) ฮิตาชิ เซกิ (Hitachi Seiki) เอบีบี (ABB) โดยส่วนใหญ่ เดลต้าจะถูกนำไปใช้ในการบรรจุสินค้าลงบรรจุภัณฑ์ เช่น สินค้าประเภทอาหาร ยา และอิเล็กทรอนิคส์

หุ่นยนต์โครงสร้างแบบขนานแบบเดลต้าจึงเป็นที่นิยมในท้องตลาดอย่างกว้างขวางสำหรับงาน หยิบจับ ชิ้นส่วนอุปกรณ์ แต่ตัวเป็นหุ่นยนต์ที่มี ความแข็งเกร็ง สูง และความเร็วสูง หุ่นยนต์เดลต้าจึงเป็นที่นิยมสำหรับงานหยิบจับที่ต้องการความเร็วในการหยิบ

รูปที่ 2.11 หุ่นยนต์เดลต้าของบริษัท ดีมอแร๊ก [13]

2.2.1 หุ่นยนต์เดลต้าในท้องตลาด

หุ่นยนต์โครงสร้างแบบขนานแบบเดลต้าเป็นที่นิยมในท้องตลาดอย่างกว้างขวางสำหรับงานหยิบจับ ชิ้นส่วนอุปกรณ์ แต่ละตัวมีจุดขายในงานคนละแบบกัน แต่ส่วนที่เป็นจุดเด่นหลักของหุ่นยนต์คือมีความแข็งเกร็งสูง ความเร็วและความเร่งสูง หุ่นยนต์เดลต้าจึงเป็นที่นิยมสำหรับงานหยิบจับที่ต้องการความเร็วในการหยิบ หุ่นยนต์ที่มีขายในท้องตลาดยกตัวอย่างเช่น บริษัทฮิตาชิเซกิ ผลิตหุ่นยนต์เดลต้าขนาดเล็กสำหรับการหยิบจับขนาดเล็กและรุ่นสำหรับงานเจาะ ดังรูปที่ 2.12 , บริษัทเอบีบี ผลิตหุ่นยนต์เดลต้าออกมาขายรุ่น IRB340 มีภาระการยกเท่ากับ 1 กิโลกรัม และติดตั้งอุปกรณ์ถ่ายภาพไว้ที่ปลายแขน กลุ่มลูกค้าเป้าหมายของหุ่นยนต์รุ่นนี้คือ อุตสาหกรรมอาหาร อิเล็กทรอนิคส์และยา ดังรูปรูปที่ 2.13,หุ่นยนต์เดลต้าของบริษัทอเดปมีลักษณะพิเศษคือมีแขนสี่แขน ถูกออกแบบมาเพื่อสำหรับงานที่ต้องใช้การควบคุมที่ซับซ้อน และความเร็วสูงดังรูปที่ 2.14,หุ่นยนต์เดลต้าของบริษัทนักเป็นหุ่นยนต์เดลต้าที่ได้รับความนิยมสูงที่สุดเนื่องจากความทนทานในการใช้งานรุ่นที่ได้รับความนิยมคือรุ่น M-1iA และM-3iA โดยแต่ละรุ่นมีองศาอิสระเท่ากับ 6และ 4 ตามลำดับดังรูปที่ 2.15,หุ่นยนต์เดลต้าของบริษัทบ๊อช เป็นที่รู้จักกันในรุ่น Sigpack สำหรับใช้งานกับอุตสาหกรรมอาหารที่ต้องการความสะอาดดังรูปที่ 2.16

รูปที่ 2.12 หุ่นยนต์เดลต้าของฮิตาชิ เซกิ [13]

รูปที่ 2.13 หุ่นยนต์เดลต้าของบริษัทเอบีบี [16]

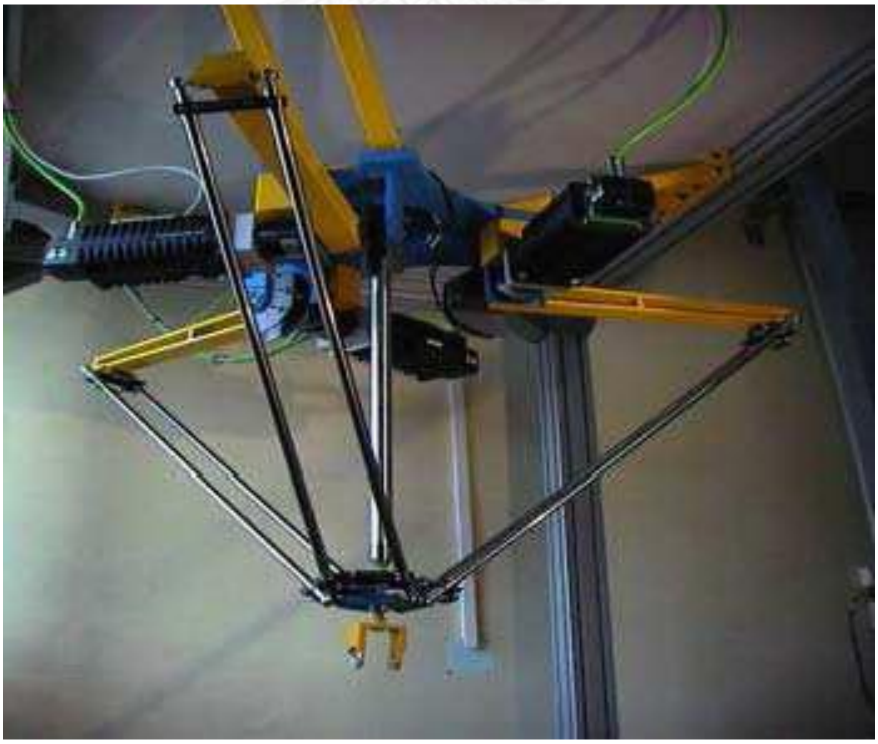
รูปที่ 2.14 หุ่นยนต์เดลต้าของบริษัทอเดป [17]

รูปที่ 2.15 หุ่นยนต์เดลต้าของบริษัทฟานัก [18]

รูปที่ 2.16 หุ่นยนต์เดลต้าของบริษัทบ๊อช [19]

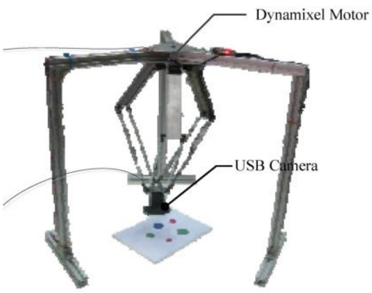
2.2.2 หุ่นยนต์เดลต้าในห้องปฏิบัติการ

การพัฒนาหุ่นยนต์เดลต้าในห้องปฏิบัติการ มีการพัฒนาไปหลากหลายรูปแบบ โดยแต่ห้องปฏิบัติการมีความโดดเด่นไม่เหมือนกัน เช่น หุ่นยนต์โรโบเทนนิส (Robo tennis) [20] เป็นหุ่นยนต์เดลต้าที่ออกแบบมาสำหรับทดลองตีเทนนิสเป้าหมายสำหรับการศึกษาการควบคุมและการใช้ภาพในการประมวลผล ส่วนด้านห้องปฏิบัติ แมคคาทรอนิกส์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ก็ได้ออกแบบต้นแบบหุ่นยนต์เดลต้าออกมา จำนวน 8 รุ่น ดังรูปที่ 2.18 โดยแต่ละรุ่นถูกออกแบบมาเพื่อทดสอบปัญหาคนและรูปแบบดังนี้ หุ่นยนต์จุฬาเดลต้า แบบที่ 1 ใช้ทดสอบการทำงานของระบบ การออกแบบเบื้องต้นและการศึกษาการควบคุมแรง ที่ใช้ในงานวิจัยฉบับ หุ่นยนต์จุฬาเดลต้าแบบที่ 2 เป็นหุ่นยนต์ที่ออกแบบโดยเน้นการควบคุมผ่านทาง USB โครงสร้างเบาแต่พบปัญหาที่ระบบมีเวลาประวิงสูงทำให้การควบคุมที่ความเร็วสูงไม่ได้ หุ่นยนต์จุฬาเดลต้าแบบที่ 3 ออกแบบมาเพื่อทดสอบการควบคุมตำแหน่งปลายแขนของหุ่นยนต์ด้วยกล้องดิจิตอล ซึ่งถูกออกแบบให้ชิ้นส่วนมีน้ำหนักเบา หุ่นยนต์จุฬาเดลต้าแบบที่ 4 ถูกออกแบบโครงสร้างให้มีขนาดเล็กน้ำหนักเบาและถูกติดตั้งด้วยมอเตอร์ที่มีอัตราทำสูง ทำให้สามารถควบคุมปลายแขนแบบละเอียดได้ หุ่นยนต์จุฬาเดลต้าแบบที่ 5 เป็นแบบเพิ่มเติมมาจากแบบก่อนหน้านี้ แต่ปรับเปลี่ยนขนาดอัตราทดของมอเตอร์ให้มากขึ้น หุ่นยนต์จุฬาเดลต้าแบบที่ 7 ถูกออกแบบมาให้มี โครงการพลาสติก และผลิตด้วยการตัวด้วยเลเซอร์เพียงอย่างเดียว หุ่นยนต์ตัวนี้ มีความเฉื่อยค่อยข้างต่ำเนื่อง และใช้มอเตอร์ควบคุมขนาดเล็ก หุ่นยนต์จุฬาเดลต้าแบบที่ 8 เป็นหุ่นยนต์เดลต้าแบบแกนเลื่อน หุ่นยนต์ในรูปแบบนี้ มีข้อดีคือ ความแม่นในพื้นที่การทำงานจะคงที่เนื่องจากจะใช้การควบคุมความสูงทั้งสามด้านในการควบตำแหน่งปลายแขน

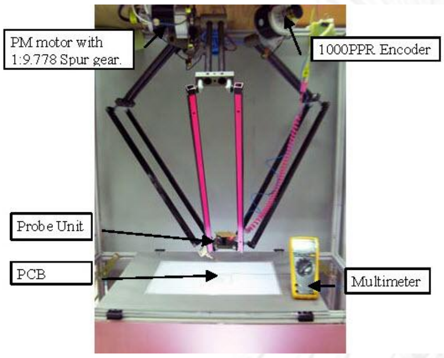


รูปที่ 2.17 หุ่นยนต์โรโบเทนนิส[20]

ก.หุ่นยนต์จุฬาเดลต้าแบบที่ 1 [21]



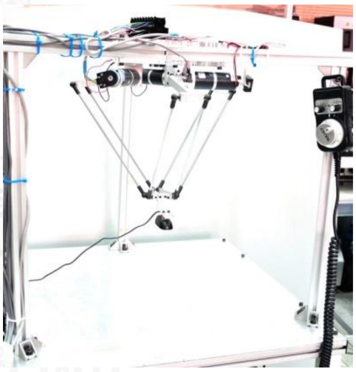
ข.หุ่นยนต์จุฬาเดลต้าแบบที่ 2 [22]



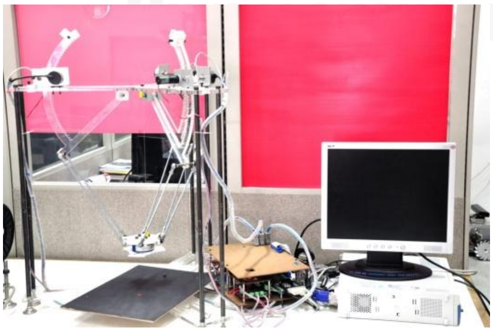
ค.หุ่นยนต์จุฬาเดลต้าแบบที่ 3 [23]

ง.หุ่นยนต์จุฬาเดลต้าแบบที่ 4

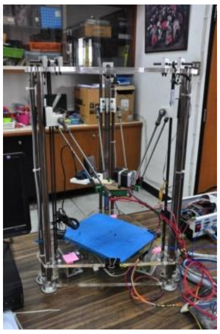
จ.หุ่นยนต์จุฬาเดลต้าแบบที่ 5



ช.หุ่นยนต์จุฬาเดลต้าแบบที่ 6

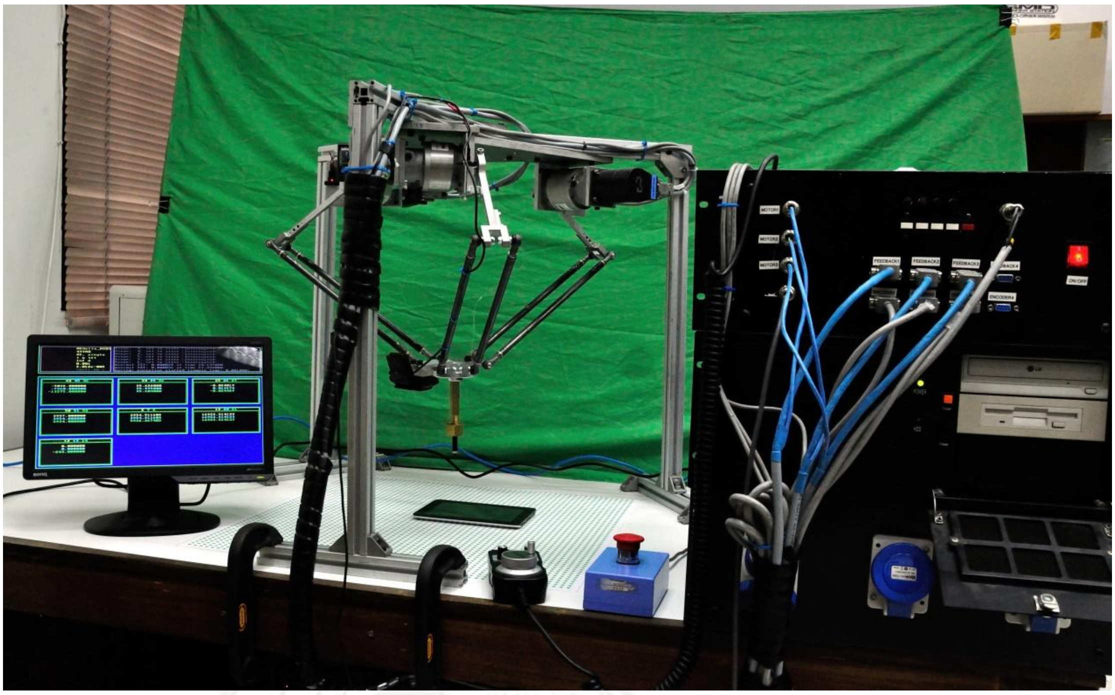


ฉ.หุ่นยนต์จุฬาเดลต้าแบบที่ 7 [24]



ซ.หุ่นยนต์จุฬาเดลต้าแบบที่ 8 [25]

รูปที่ 2.18 หุ่นยนต์จุฬาเดลต้าแบบต่างๆ



รูปที่ 2.19 หุ่นยนต์จุฬาเดลต้า แบบที่ 9

สำหรับหุ่นยนต์จุฬาเดลต้าแบบที่ 9 ซึ่งเป็นหุ่นยนต์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ ถูกออกแบบมาให้มีประสิทธิภาพสูงมีจุดเด่นคือจะมีพื้นที่ใช้งาน กว้างและมีสัดส่วนสมมาตรในแต่ละด้าน มอเตอร์ที่ขับแกนหมุนทั้งสามแกนเป็นมอเตอร์ไม่ใช้แปลงถ่าน แต่ละตัวมีแรงขับสูงสุด 0.334 นิวตัน-เมตร ขับผ่านเฟืองทดแบบโคจร ด้วยอัตราทด 1ต่อ 15 ซึ่งจะมีผลดีคือไม่มีแรงเสียดทานที่เกิดจากแปรงถ่าน การควบคุมมอเตอร์นี้ใช้ตัวขับมอเตอร์แบบควบคุมแรงบิด ซึ่งสามารถสั่งให้มอเตอร์หมุนด้วยแรงบิดที่ต้องการได้ แขนท่อนแต่ละแขนออกแบบให้สามารถขึ้นรูปได้ง่ายโดยใช้วิธีการตัดจากแนวตั้ง ส่วนแขนท่อนล่างใช้วัสดุคาร์บอนไฟเบอร์ เน้นให้มีน้ำหนักเบา การทำงานของหุ่นยนต์ออกแบบมาให้ใช้งานร่วมกับระบบควบคุมด้วยภาพ ที่ติดตั้งอยู่บนปลายแขน โดยจะรับสัญญาณภาพมาประมวลผลและส่งไปให้ตัวควบคุมต่อไป การเขียนโปรแกรมควบคุมใช้วิธีการเขียนแบบกราฟิกซึ่งจะสะดวกต่อการพัฒนาเทคนิคในการควบคุม การคำนวณ ซึ่งทำให้งานวิจัยนี้สามารถพัฒนาได้อย่างรวดเร็ว

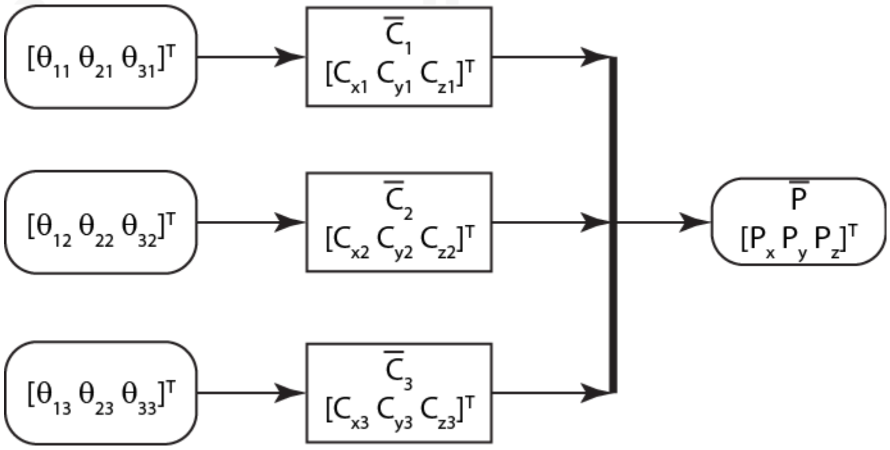
บทที่ 3.
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีต่างๆที่ใช้ในวิทยานิพนธ์ ซึ่งจะประกอบด้วย สามส่วนคือ จลศาสตร์ของหุ่นยนต์เดลต้า ทฤษฎีของระบบกล้อง และวิธีการควบคุม โดยจลศาสตร์ของหุ่นยนต์เดลต้าจะประกอบด้วย แบบจำลองของหุ่นยนต์เดลต้า จลศาสตร์แบบผกผัน (Inverse kinematics) จลศาสตร์แบบไปข้างหน้า (Forward kinematics) และจาโคเบียน (Jacobians) ส่วนทฤษฎีของกล้องนั้นจะประกอบด้วย แบบจำลองของกล้อง (Camera model) ปริภูมิของสี (Color space) และการสอบเทียบ ซึ่งรายละเอียดจะกล่าวในส่วนต่อไป

3.1 จลศาสตร์ไปข้างหน้า

จลศาสตร์ไปข้างหน้า (Forward kinematic) ของหุ่นยนต์เดลต้า มีวิธีการหลากหลายรูปแบบที่ใช้ในการคำนวณโดยทั่วไปแบ่งออกเป็นสองวิธีในการหา [26] คือ วิธีการใช้เรขาคณิตในการคำนวณ และ วิธีการใช้เวคเตอร์ในการคำนวณ การใช้เรขาคณิตในการคำนวณจะใช้ความสัมพันธ์ของความยาว มุมและตำแหน่งของปลายแขนในการคำนวณ ส่วนวิธีการใช้เวคเตอร์ในการคำนวณนั้นจะคิดรูปแบบตำแหน่งของแต่ละจุดในเทอมของเวคเตอร์ ในส่วนนี้จะใช้วิธีการทางเวคเตอร์ในการคำนวณหาจลศาสตร์ไปข้างหน้า

จลศาสตร์ไปข้างหน้า (Forward Kinematic) การคำนวณสมการการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าเป็นการคำนวณหาตำแหน่งจุดปลายของแขนกล เมื่อเราทราบตำแหน่งของตัวขับทั้งหมดของแขนกลจะสามารถหาได้ด้วยการหาจุดตัดของเวคเตอร์ของปลายแขนทั้งสามด้านโดยลำดับการหาค่าตัวแปรดังรูปที่ 3.1 โดยมีวิธีหาดังนี้



รูปที่ 3.1 แผนภาพวิธีการหาจลศาสตร์ไปข้างหน้า

กำหนดให้

a คือความยาวของลิงค์ $\overline{A_iB_i}$ มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร

b คือความยาวของลิงค์ $\overline{B_iC_i}$ มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร

h คือความยาวของลิงค์ $\overline{P_iC_i}$ มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร

r คือความยาวของลิงค์ $\overline{O_iA_i}$ มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร

$\bar{P}$ คือเวคเตอร์ตำแหน่งของจุดกึ่งกลางของปลายแขน

$\bar{C}$ คือเวคเตอร์ตำแหน่งของจุดมุมของปลายแขน

$A_i - xyz_i$ คือแกนอ้างอิงของแต่ละแขน

O_{xyz} คือแกนอ้างอิงของฐานที่ไม่เคลื่อนที่

จากรูปที่ 3.3 วงปิดของความยามลิงค์จะได้สมการดังนี้

$$\overrightarrow{A_iB_i} + \overrightarrow{B_iC_i} = \overrightarrow{OP} + \overrightarrow{PC_i} - \overrightarrow{OA_i} \quad (3.1)$$

จากสมการที่ 3.1 และ แทนค่า C_{xi}, C_{yi} และ C_{zi} ลงในสมการจะได้

$$\begin{bmatrix} a\cos\theta_{1i} + b\sin\theta_{3i} \\ b\cos\theta_{3i} \\ a\sin\theta_{1i} + b\sin\theta_{3i}\sin(\theta_{1i}+\theta_{2i}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\psi_i & \sin\psi_i & 0 \\ -\sin\psi_i & \cos\psi_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -a\cos\theta_{1i} + h - r \\ 0 \\ -a\sin\theta_{1i} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

จากสมการที่ 3.2 หาขนาดกำลังสองของสมการจะได้

$$b^2 = p_x^2 + p_y^2 + p_z^2 - 2(p_x\cos\psi_i + p_y\cos\psi_i)(a\cos\theta_{1i} + r - h) - 2p_z a\sin\theta_i$$
$$+(a\cos\theta_i + r - h)^2 + a^2\sin^2\theta_i \quad (3.3)$$

ที่ i =1,2,3

$$e_{1i}p_x + e_{2i}p_y + e_{3i}p_z + e_{j4} = 0 \quad (3.4)$$

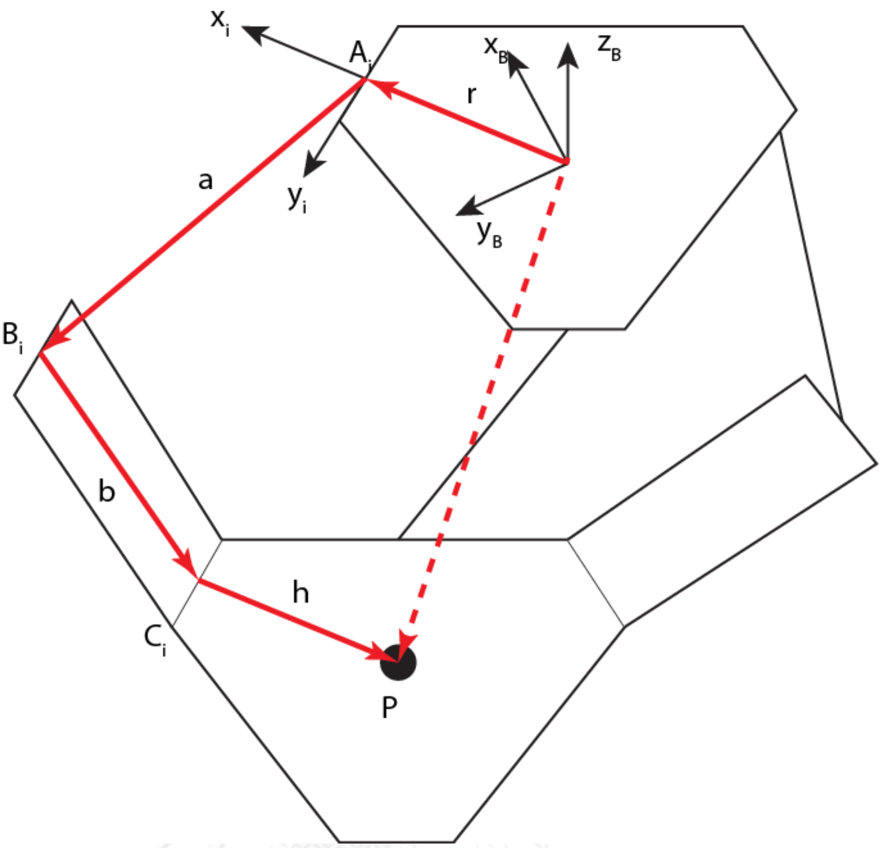
โดยที่

$$e_{1j} = 2\cos\psi_j(a\cos\theta_{1j} + r - h) - 2\cos\psi_j(a\cos\theta_{1j} + r - h)$$

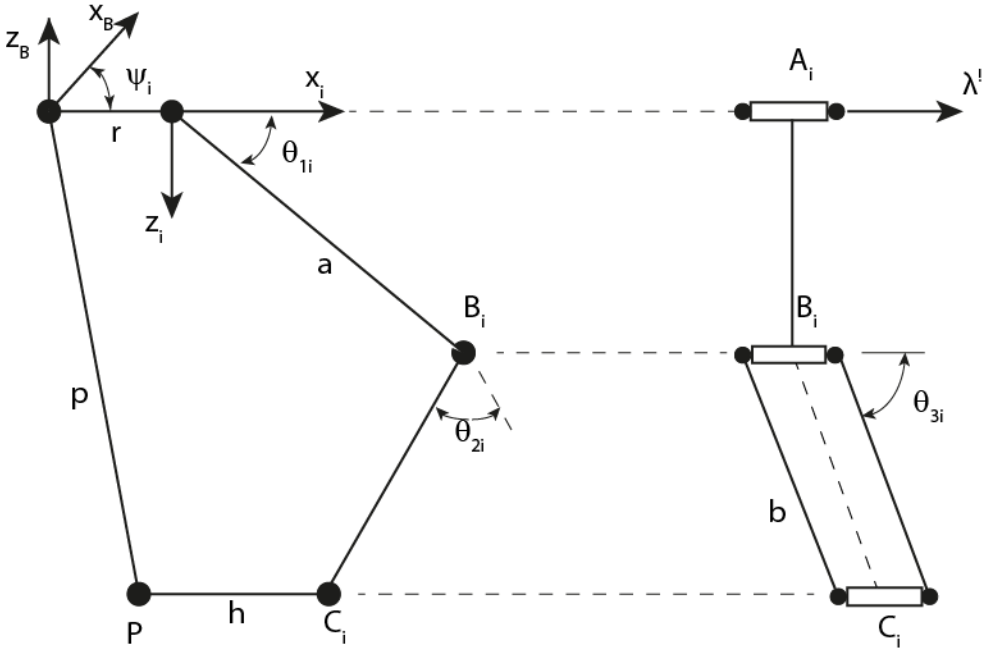
$$e_{2j} = 2\sin\psi_j(a\cos\theta_{1j} + r - h) - 2\sin\psi_j(a\cos\theta_{1j} + r - h)$$

$$e_{3j} = 2a\sin\theta_{1j} - 2a\sin\theta_{1i}$$

$$e_{4j} = (a\cos\theta_{1j} + r - h)^2 - a^2\sin^2\theta_{1j} - (a\cos\theta_{1j} + r - h)^2 - a^2\sin^2\theta_{1i}$$



รูปที่ 3.2 การติดตั้งแกนของแขนกลแบบขนาน 3 องศา อิสระ



รูปที่ 3.3 แผนภาพด้านข้างของแขนกลแบบขนาน

แก้สมการที่3.3 โดยจัดรูป ของ p_x และ p_z ในรูปของ p_y แล้วแทนลงในสมการที่ 3.2 ที่ i= 1 จะได้

$$k_0 p_x^2 + k_1 p_x + k_2 = 0 \qquad (3.5)$$

โดยที่สัมประสิทธิ์ของสมการ คือ

$$k_0 = 1 + \frac{l_1^2}{l_2^2} + \frac{l_4^2}{l_2^2}$$

$$k_1 = \frac{2l_0 l_1}{l_2^2} + \frac{2l_3 l_4}{l_2^2} - 2l_5 \cos\psi_1 - \frac{2l_5 l_1}{l_2}\sin\psi_i - \frac{2al_4}{l_2}\sin\theta_{11}$$

$$k_2 = l_5^2 - b^2 + \frac{l_0^2}{l_2^2} + \frac{l_3^2}{l_2^2} + a^2\sin\theta_1 - \frac{2l_5 l_1 \sin\psi_1}{l_2} - \frac{2al_3}{l_2}\sin\theta_{11}$$

โดยที่

$$l_0 = e_{32}e_{43} - e_{33}e_{42}$$

$$l_1 = e_{13}e_{32} - e_{12}e_{33}$$

$$l_2 = e_{22}e_{33} - e_{23}e_{32}$$

$$l_3 = e_{23}e_{42} - e_{22}e_{43}$$

$$l_4 = e_{12}e_{23} - e_{13}e_{22}$$

$$l_5 = a\cos\theta_{11} + r - h$$

ดังนั้น p_x สามารถหาค่าได้ การหา p_y และ p_z สามารถหาได้ โดยการแทนสมการที่3.2 และ สมการที่ 3.3 ตามลำดับ

3.2 จลศาสตร์แบบผกผัน

จลศาสตร์ผกผัน (Inverse kinematic) ของหุ่นยนต์เดลต้า มีวิธีการหลากหลายวิธีที่ใช้ในการแก้ปัญหาโดยสามารถแบ่งได้สองวิธี คือ วิธีการใช้เรขาคณิตในการคำนวณ และ วิธีการใช้เวคเตอร์ในการคำนวณ [26] การใช้เรขาคณิตในการคำนวณจะใช้ความสัมพันธ์ของความยาว มุมและตำแหน่งของปลายแขนในการคำนวณ ส่วนวิธีการใช้เวคเตอร์ในการคำนวณนั้นจะใช้ตำแหน่งของแต่ละจุดในเทอมของเวคเตอร์ ในส่วนนี้จะใช้วิธีการทางเวคเตอร์ในการคำนวณหาจลศาสตร์ผกผันจลศาสตร์ผกผัน เป็นการคำนวณสมการการเคลื่อนที่แบบผกผัน ซึ่งเป็นการคำนวณหาตำแหน่งของระยะที่ตัวขับแต่ละตัว เมื่อเราทราบตำแหน่งของปลายแขนกล สามารถหาได้ ดังรูปที่ 3.4 จากรูปจะเห็นว่าลำดับการหาจลศาสตร์ผกผันจะเริ่มจากการทราบตำแหน่งปลายแขน $\begin{bmatrix} P_x & P_y & P_z \end{bmatrix}^T$ นำมาคำนวณย้อนกลับหาค่า C_1, C_2, C_3 จะได้จุดสามจุดที่ปลายแขนจากนั้นก็คำนวณหาค่า θ_{3i} , θ_{2i} และ θ_{1i} ได้ตามลำดับ

จากรูปที่ 3.2 และรูปที่ 3.3 แกน O_{xyz} ติดอยู่ที่จุด o โดยที่ แกน x และ y อยู่บนระนาบ ส่วนแกน z มีทิศชี้ขึ้นด้านบนแกน A_i แกน $x_i y_i z_i$ ติดอยู่ที่จุด A_i แกน P_{uvw} ติดอยู่ที่จุด P ซึ่งเป็นตำแหน่งปลายแขนของหุ่นยนต์

จากรูปที่ 3.2 โครงสร้างแบบปิดสามารถเขียน เป็น สมการได้ ดังนี้

$$\overrightarrow{A_iB_i} + \overrightarrow{B_iC_i} = \overrightarrow{OP} + \overrightarrow{PC_i} - \overrightarrow{OA_i} \tag{3.6}$$

จากสมการสามารถแสดงได้เป็นรูปดังนี้

$$\begin{bmatrix} a\cos\theta_{1i} + b\sin\theta_{3i}\cos(\theta_{1i}+\theta_{2i}) \\ b\cos\theta_{3i} \\ a\sin\theta_{1i} + b\sin\theta_{3i}\sin(\theta_{1i}+\theta_{2i} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{xi} \\ c_{yi} \\ c_{zi} \end{bmatrix} \tag{3.7}$$

โดยที่

$$\begin{bmatrix} c_{xi} \\ c_{yi} \\ c_{zi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\psi_i & \sin\psi_i & 0 \\ -\sin\psi_i & \cos\psi_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} h-r \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{3.8}$$

จากสมการที่ 3.7 c_i มีความสัมพัทธ์กับความยาวของลิงค์ $\overline{A_iB_i}$ และ $\overline{B_iC_i}$ ซึ่งมีความยาวเท่ากับ a และ b ให้ $P = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \end{bmatrix}$ เป็นตำแหน่งของจุด P เทียบกับ แกน O_{xyz}

จากสมการที่ 3.8 แถวที่สอง จะสามารถหา θ_{3i} ได้ ดังนี้

$$\theta_{3i} = \cos^{-1}\left(\frac{c_{yi}}{b}\right) \tag{3.9}$$

จาก θ_{3i} ที่หาค่าได้ นำกลับลงไปแทนในสมการที่3.7 แล้วหาขนาดกำลังสองของสมการจะได้

$$2ab\sin\theta_{3i}\cos\theta_{2i} + a^2 + b^2 = c_{xi}^2 + c_{yi}^2 + c_{zi}^2 \tag{3.10}$$

จะได้

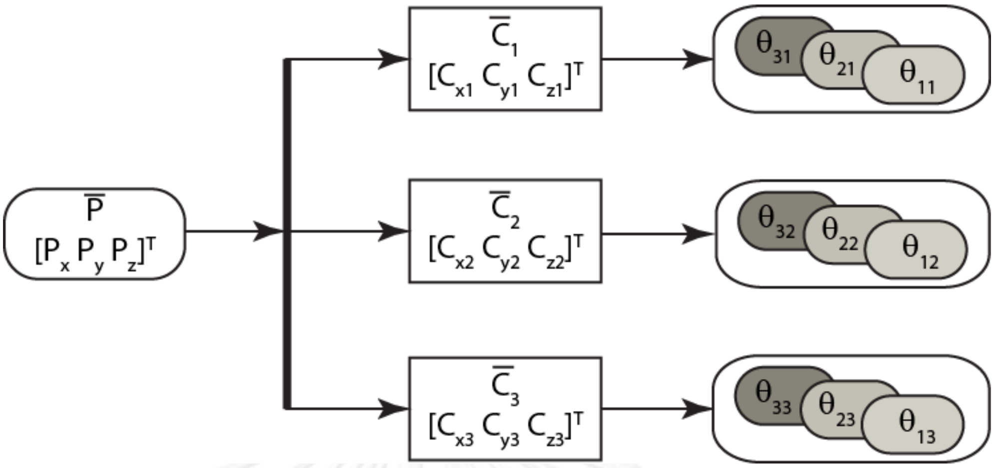
$$\theta_{2i} = \cos^{-1}(\gamma) \tag{3.11}$$

โดยที่

$$\gamma = \frac{c_{xi}^2 + c_{yi}^2 + c_{zi}^2 - a^2 - b^2}{2b\sin\theta_{3i}} \tag{3.12}$$

จากค่า θ_{3i} และ θ_{2i} ที่หาค่าได้ จะสามารถค่า θ_{1i} โดยการนำกลับไปแทนยังสมการที่ 3.8 และสมการที่ 3.7 จากนั้นทำซ้ำโดยเปลี่ยนค่า i=1,2,3 ก็จะได้ค่ามุม θ_{1i}, θ_{2i}, θ_{3i} ตามที่ต้องการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY



รูปที่ 3.4 แผนภาพวิธีการหา จลศาสตร์ผกผัน

3.3 แบบจำลองคณิตศาสตร์ของหุ่นยนต์เดลต้า

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหุ่นยนต์เดลต้านั้นเป็นสมการที่อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดของตัวขับแต่ละตัวกับการเคลื่อนที่ของโครงสร้างของหุ่นยนต์เดลต้า แบบจำลองคณิตศาสตร์นี้มีประโยชน์สำหรับการคำนวณการเคลื่อนที่ และการออกแบบระบบควบคุม ในการหาแบบจำลองคณิตศาสตร์ของหุ่นยนต์เดลต้านี้ ใช้วิธีของลากรางจ์ (Lagrange Method) ซึ่งเป็นวิธีการหาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์วิธีหนึ่งที่ได้รับความนิยมในการหาแบบจำลองของแขนกล

3.3.1 สมการของลากรางจ์

สมการของลากรางจ์ (Lagrange Equations) เป็นสมการสำหรับการหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงกับการเคลื่อนที่ของวัตถุ การหาสมการของลากรางจ์นั้น ใช้วิธีหาสมการของพลังงานจลน์ และพลังงานศักย์ มาสร้างเป็นฟังก์ชันลากรางจ์ดังสมการที่ 3.13 การหาสมการของพลังงานจลน์ ต้องหาความสัมพันธ์ของความเร็วในแต่ละวัตถุมาสร้างเป็นฟังก์ชัน ส่วนการหาสมการของพลังงานศักย์ใช้ความสัมพันธ์ของจุดศูนย์กลางมวลในการหา

$$L = K - V \tag{3.13}$$

เมื่อ K และ V คือพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ของระบบตามลำดับ และเมื่อได้สมการของพลังงานจลน์และสมการของพลังงานศักย์ทั้งสองมา ก็จะสามารถคำนวณหาพลศาสตร์ของระบบทางกลนี้ได้จากสมการของลากรางจ์คือ

$$\frac{d}{dt}\frac{\partial L}{\partial \lambda_i} - \frac{\partial L}{\partial \lambda_i} = F_i \tag{3.14}$$

เมื่อ F_i และ λ_i คือ แรงในระบบพิกัดที่สนใจ (Generalized force) ที่กระทำในระบบดังรูปที่ 3.6และรูปที่ 3.7

$$g_i = \overline{B_i P_i} - l_1^2 = 0 \tag{3.15}$$

$$g_i = (P_{xi} - B_{xi})^2 + (P_{yi} - B_{yi})^2 + (P_{zi} - B_{zi})^2 - l_1^2 = 0 \tag{3.16}$$

โดยที่

$$P_{xi} = C_x + h.\cos\psi_i$$

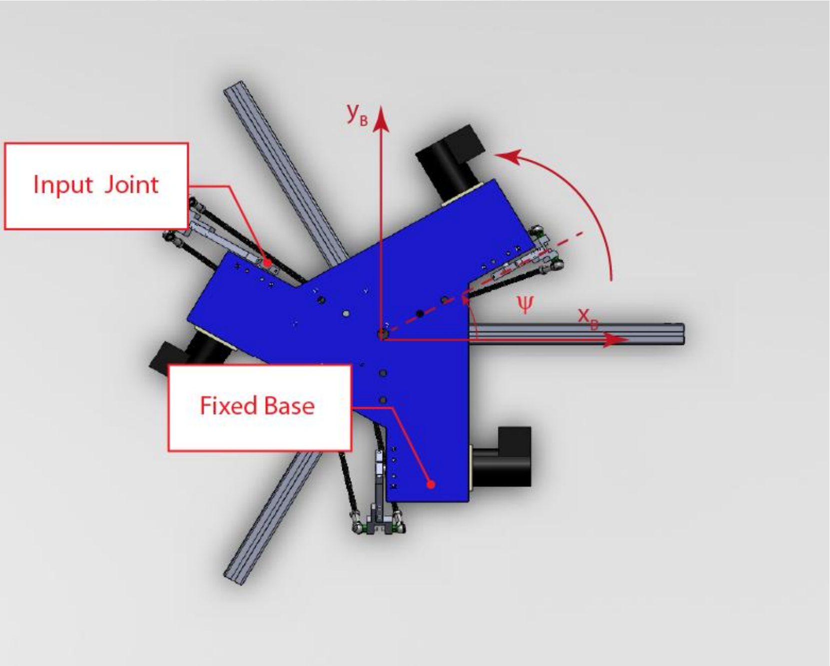
$$B_{xi} = (r + a.\cos\theta_{1i})\cos\psi_i$$

$$P_{yi} = C_y + h.\sin\psi_i$$

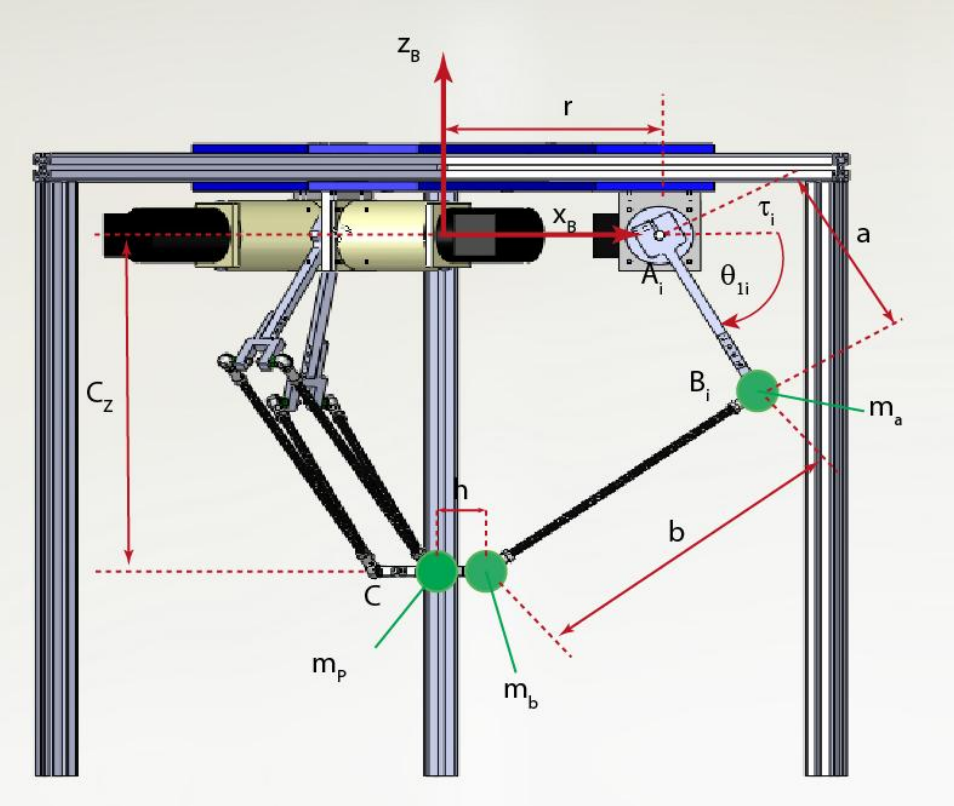
$$B_{yi} = (r + a.\cos\theta_{1i})\sin\psi_i$$

$$P_{zi} = C_z$$

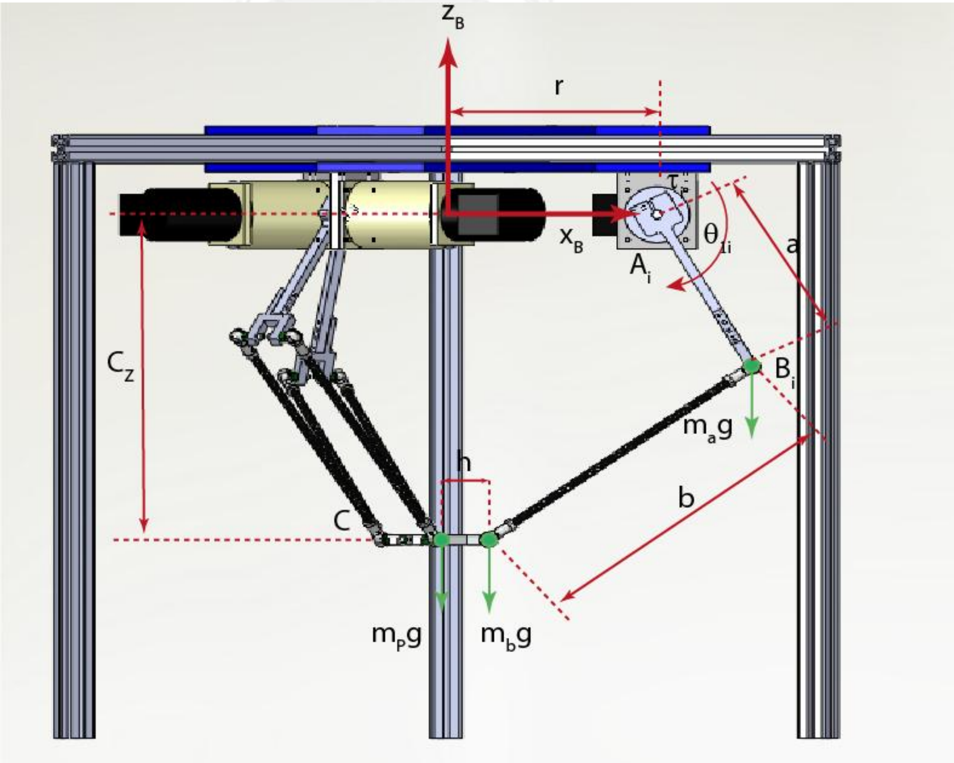
$$B_{zi} = a.\sin\theta_{1i}$$



รูปที่ 3.5 แผนภาพหุ่นยนต์เดลต้าสำหรับการหาแบบจำลองคณิตศาสตร์



รูปที่ 3.6 แผนภาพตัวหุ่นยนต์เดลต้าสำหรับการหาแบบจำลองคณิตศาสตร์



รูปที่ 3.7 แผนภาพแรงที่กระทำบนหุ่นยนต์เดลต้าสำหรับการหาแบบจำลองคณิตศาสตร์

จากรูปที่ 3.7 การคำนวณหาพลังงานจลน์ของแขนกล สามารถหาได้ดังนี้

$$T = T_c + \sum_{i=1}^{3} (T_{ai} + T_{bi}) \tag{3.17}$$

$$T_c = \frac{1}{2} m(\dot{c}_x^2 + \dot{c}_y^2 + \dot{c}_z^2) \tag{3.18}$$

$$T_{ai} = \frac{1}{2}(m_{ai}.a^2 + \frac{1}{3} m_{ai}.a^2)\dot{\theta}_{1i}^2 \tag{3.19}$$

$$T_{bi} = \frac{1}{2} m_{bi}(\dot{c}_x^2 + \dot{c}_y^2 + \dot{c}_z^2) + \frac{1}{2} m_{bi}.a^2\dot{\theta}_{1i}^2 \tag{3.20}$$

โดยที่

m_c คือมวลของปลายแขน (กิโลกรัม)

m_{ai} คือมวลของแขนท่อนบน (กิโลกรัม)

m_{bi} คือมวลของแขนท่อนล่าง (กิโลกรัม)

a คือความยาวของแขนท่อนบน (เมตร)

b คือความยาวของแขนท่อนล่าง (เมตร)

θ_{1i} คือมุมบิดของแกนหัวไหล่ (เรเดียน)

T_c คือพลังงานจลน์ที่ปลายแขนของแขนกล (นิวตัน-เมตร)

T_{ai} คือพลังงานจลน์ของข้อต่อพาราเรลโลแกรมในแต่ละวง (นิวตัน-เมตร)

T_{bi} คือพลังงานจลน์ของข้อต่อขับในแต่ละวง (นิวตัน-เมตร)

การคำนวณหาพลังงานศักย์ของแขนกลสามารถหาโดยการคำนวณเทียบกับตำแหน่งฐาน ซึ่งสามารถหาได้ดังนี้

$$V = V_c + \sum_{i=1}^{3} (V_{ai} + V_{bi}) \tag{3.21}$$

$$V_c = m_c g(H - \frac{1}{2} l_{2i} \sin\theta_i) \tag{3.22}$$

$$V_{ai} = m_{ai} gH - \frac{1}{2} m_{ai} g.a \sin\theta_{1i} \tag{3.23}$$

$$V_{bi} = 2m_{bi} gH - m_{bi} gC_z - m_{bi} g.b \sin\theta_{1i} \tag{3.24}$$

โดยที่

V_c คือพลังงานศักย์ที่ตำแหน่งปลายแขน (นิวตัน-เมตร)

V_{ai} คือพลังงานศักย์ของข้อต่อพาราเรลโลแกรมในแต่ละวง (นิวตัน-เมตร)

V_{bi} คือพลังงานศักย์ของข้อต่อขับในแต่ละวง (นิวตัน-เมตร)

เมื่อได้สมการพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ของแขนกลแล้ว จะสามารถคำนวณหาลากรางจ์ฟังก์ชันได้ โดยฟังก์ชันนี้เป็นผลต่างระหว่างพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ดังสมการที่ 3.13

$$L = T - V$$

โดยที่

$$T = \frac{1}{2}(m_c + 3m_a)(\dot{c}_x^2 + \dot{c}_y^2 + \dot{c}_z^2) + \frac{1}{2}(m_a.a^2 + \frac{1}{3}m_a.a^2 + m_b.a^2)(\dot{\theta}_{11}^2 + \dot{\theta}_{12}^2 + \dot{\theta}_{13}^2)$$

$$V = m_c gH + 6m_b gH + 3m_b gH - (m_c g + m_b g)C_z$$
$$-(\frac{1}{2}m_a g.a + m_b g.a)(\sin\theta_{11} + \sin\theta_{12} + \sin\theta_{13})$$

จากสมการที่3.13ได้ จะสามารถหาตัวคูณ Lagrange โดยให้เทอม Q_k มีค่าเท่ากับศูนย์เนื่องจากไม่มีแรงภายนอกมากระทำ ได้ดังนี้

$$\frac{d}{dt}(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_k}) - \frac{\partial L}{\partial \theta_k} = \sum_{i=1}^{k} \lambda_i \frac{\partial g_i}{\partial \theta_k} \quad (3.25)$$

$$\begin{pmatrix} \frac{d}{dt}(\frac{\partial L}{\partial \dot{C}_x}) - \frac{\partial L}{\partial C_x} \\ \frac{d}{dt}(\frac{\partial L}{\partial \dot{C}_y}) - \frac{\partial L}{\partial C_y} \\ \frac{d}{dt}(\frac{\partial L}{\partial \dot{C}_z}) - \frac{\partial L}{\partial C_z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial C_x} & \frac{\partial g_2}{\partial C_x} & \frac{\partial g_3}{\partial C_x} \\ \frac{\partial g_1}{\partial C_y} & \frac{\partial g_2}{\partial C_y} & \frac{\partial g_3}{\partial C_y} \\ \frac{\partial g_1}{\partial C_z} & \frac{\partial g_2}{\partial C_z} & \frac{\partial g_3}{\partial C_z} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \end{pmatrix} \quad (3.26)$$

จากตัวคูณLagrange ที่คำนวณได้ ค่าแรงบิดสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.25 โดยที่ Q_k คือค่าแรงบิดที่ตัวขับแต่ละตัว ดังนี้

$$Q = \frac{d}{dt}(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_{1k}}) - \frac{\partial L}{\partial \theta_{1x}} - \sum_{i=1}^{k} \lambda_i \frac{\partial g_i}{\partial \theta_{1k}}$$

$$\tau_1 = \frac{d}{dt}(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_{11}}) - \frac{\partial L}{\partial \theta_{11}} - (\lambda_1 \frac{\partial g_1}{\partial \theta_{11}} + \lambda_1 \frac{\partial g_2}{\partial \theta_{11}} + \lambda_1 \frac{\partial g_3}{\partial \theta_{11}})$$

$$\tau_2 = \frac{d}{dt}(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_{12}}) - \frac{\partial L}{\partial \theta_{12}} - (\lambda_1 \frac{\partial g_1}{\partial \theta_{12}} + \lambda_2 \frac{\partial g_2}{\partial \theta_{12}} + \lambda_3 \frac{\partial g_3}{\partial \theta_{12}})$$

$$\tau_3 = \frac{d}{dt}(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_{13}}) - \frac{\partial L}{\partial \theta_{13}} - (\lambda_1 \frac{\partial g_1}{\partial \theta_{13}} + \lambda_2 \frac{\partial g_2}{\partial \theta_{13}} + \lambda_3 \frac{\partial g_3}{\partial \theta_{13}})$$

โดยที่

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_{11}}\right)=\frac{\ddot{\theta}_{11}\cdot a^{2}(3\mathrm{m}.b+4\mathrm{m}.a)}{3}$$

$$\frac{\partial L}{\partial \theta_{11}}=\frac{g\cdot b\cos\theta_{11}(2\mathrm{m}.b+m.a)}{2}$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_{12}}\right)=\frac{\ddot{\theta}_{12}\cdot b^{2}(3\mathrm{m}.b+4\mathrm{m}.a)}{3}$$

$$\frac{\partial L}{\partial \theta_{12}}=\frac{g\cdot a\cos\theta_{12}(2\mathrm{m}.b+m.a)}{2}$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_{13}}\right)=\frac{\ddot{\theta}_{13}\cdot b^{2}(3\mathrm{m.b}+4\mathrm{m.a})}{3}$$

$$\frac{\partial L}{\partial \theta_{13}}=\frac{g\cdot b\cos\theta_{13}(2\mathrm{m}.b+m.a)}{2}$$

$$g_{1}=(\mathrm{C_x}-\cos\psi_{1}(r+b\cos\theta_{11})+h\cos\psi_{1})^{2}+(C_{y}-\sin\psi_{1}(r+a\cos\theta_{11})+h\sin\psi_{1})^{2}$$
$$+(\mathrm{C_z}-a\sin\theta_{11})^{2}$$

$$g_{2}=(\mathrm{C_x}-\cos\psi_{2}(r+a\cos\theta_{12})+h\cos\psi_{2})^{2}+(C_{y}-\sin\psi_{2}(r+a\cos\theta_{2})+h\sin\psi_{2})^{2}$$
$$+(\mathrm{C_z}-a\sin\theta_{12})^{2}$$

$$g_{3}=(\mathrm{C_x}-\cos\psi_{1}(r+a\cos\theta_{13})+h\cos\psi_{3})^{2}+(C_{y}-\sin\psi_{3}(r+a\cos\theta_{3})+h\sin\psi_{3})^{2}$$
$$+(\mathrm{C_z}-a\sin\theta_{13})^{2}$$

$$\frac{\partial g_{1}}{\partial \theta_{11}}=2a(h\sin\theta_{11}-r\sin\theta_{11}-C_{z}\cos\theta_{11}+\mathrm{C_x}\cos\psi_{1}\sin\theta_{11}+\mathrm{C_y}\sin\psi_{1}\sin\theta_{11})$$

$$\frac{\partial g_{2}}{\partial \theta_{12}}=2a(h\sin\theta_{12}-r\sin\theta_{12}-C_{z}\cos\theta_{12}+\mathrm{C_x}\cos\psi_{2}\sin\theta_{12}+\mathrm{C_y}\sin\psi_{2}\sin\theta_{12})$$

$$\frac{\partial g_{3}}{\partial \theta_{13}}=2a(\mathrm{h}\sin\theta_{13}-r\sin\theta_{13}-C_{z}\cos\theta_{13}+\mathrm{C_x}\cos\psi_{3}\sin\theta_{13}+\mathrm{C_y}\sin\psi_{3}\sin\theta_{13})$$

$$\frac{\partial g_{1}}{\partial \theta_{12}}=\frac{\partial g_{1}}{\partial \theta_{13}}=\frac{\partial g_{2}}{\partial \theta_{11}}=\frac{\partial g_{2}}{\partial \theta_{13}}=\frac{\partial g_{3}}{\partial \theta_{11}}=\frac{\partial g_{3}}{\partial \theta_{12}}=0$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

$$\frac{\partial g_1}{\partial C_x} = 2C_x - 2\cos\psi_1(\mathrm{r} + a\cos\theta_1) + 2h\cos\psi_1$$

$$\frac{\partial g_2}{\partial C_x} = 2C_x - 2\cos\psi_2(\mathrm{r} + a\cos\theta_{12}) + 2h\cos\psi_2$$

$$\frac{\partial g_3}{\partial C_x} = 2C_x - 2\cos\psi_3(\mathrm{r} + \mathrm{l}_2\cos\theta_{13}) + 2h\cos\psi_3$$

$$\frac{\partial g_1}{\partial C_y} = 2C_x - 2\cos\psi_1(\mathrm{r} + a\cos\theta_{11}) + 2h\cos\psi_1$$

$$\frac{\partial g_1}{\partial C_y} = 2C_x - 2\cos\psi_1(\mathrm{r} + a\cos\theta_{11}) + 2h\cos\psi_1$$

$$\frac{\partial g_1}{\partial C_y} = 2C_x - 2\cos\psi_1(r + a\cos\theta_1) + 2h\cos\psi_1$$

$$\frac{\partial g_1}{\partial C_z} = 2C_z - 2a\sin\theta_{11}$$

$$\frac{\partial g_2}{\partial C_z} = 2C_z - 2a\sin\theta_{12}$$

$$\frac{\partial g_3}{\partial C_z} = 2C_z - 2l_2\sin\theta_3$$

จากการหาแบบจำลองคณิตศาสตร์ของหุ่นยนต์เดลต้า โดยใช้วิธีของลากรางจ์ จะเห็นว่าสมการความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดกับความเร็วและความเร่งในแต่ละข้อต่อมีความสลับซับซ้อน ทำให้การควบคุมหุ่นยนต์เดลต้ามีความยุ่งยากในการควบคุมเนื่องจากการเพิ่มแรงบิดในแต่ละแกนจะไปรบกวนการเคลื่อนที่ของแกนอื่นๆ

3.4 จาโคเบียน

จาโคเบียน (Jacobians) [26] เป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วของตำแหน่งปลายแขน (End tip) กับความเร็วของข้อต่อที่มีอุปกรณ์ขับติดอยู่ (Active joint) ซึ่งจะเขียนในรูปสมการทั่วไปได้ดังนี้

$$\dot{X} = [J]\dot{\theta} \tag{3.27}$$

การคำนวณหา จาโคเบียนสามารถทำได้หลายแบบ มีวิธีการหลากหลายรูปแบบ การคำนวณโดยทั่วไปแบ่งออกเป็นสองวิธีในการหาคือ วิธีการใช้เรขาคณิตในการคำนวณ และ วิธีการใช้เวคเตอร์ในการคำนวณ [26] การใช้เรขาคณิตในการคำนวณจะใช้ความสัมพันธ์ของความยาว มุมและ

ตำแหน่งของปลายแขนในการคำนวณ ส่วนวิธีการใช้เวคเตอร์ในการคำนวณนั้นจะคิดรูปแบบตำแหน่งของแต่ละจุดในเทอมของเวคเตอร์

จากรูปที่ 3.2 จากการจัดวางตัวของลิงค์แบบปิดสามารถเขียนเป็นสมการได้คือ

$$\overline{OP} + \overline{PC_i} = \overline{OA_i} + \overline{AB_i} + \overline{BC_i} \tag{3.28}$$

จากสมการที่3.16 สามารถหาอนุพันธ์เทียบกับเวลาได้คือ

$$v_p = \omega_{1i} \times a_i + \omega_{2i} \times b_i \tag{3.29}$$

โดยที่ $v_p = \begin{bmatrix} v_{px} & v_{py} & v_{pz} \end{bmatrix}^T$ เป็นความเร็วเชิงเส้นของปลายแขน ดังนั้นจะได้

$$b_i \cdot v_p = \omega_{1i}(a_i \times b_i) \tag{3.30}$$

จัดรูปสมการที่ 3.30 จะได้

$$a_i = a\begin{bmatrix} \cos\theta_i \\ 0 \\ \sin\theta_i \end{bmatrix}$$

$$b_i = b\begin{bmatrix} \sin\theta_{3i}\cos(\theta_{1i}+\theta_{2i}) \\ \cos\theta_{3i} \\ \sin\theta_{3i}\sin(\theta_{1i}+\theta_{2i}) \end{bmatrix}$$

$$\omega_i = \begin{bmatrix} 0 \\ -\theta_{1i} \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$v_p = \begin{bmatrix} v_{px}\cos\psi_i + v_{py}\sin\psi_i \\ -v_{px}\sin\psi_i + v_{py}\cos\psi_i \\ v_{pz_i} \end{bmatrix}$$

แทนค่าลงในสมการที่ 3.29 จะได้

$$j_{ix}v_{px} + j_{iy}v_{px} + j_{iz}v_{pz} = a\sin\theta_{2i}\sin\theta_{3i}\theta_{1i} \tag{3.31}$$

โดยที่

$$j_{ix} = \cos(\theta_{1i}+\theta_{2i})\sin\theta_{3i}\cos\psi_i - \cos\theta_{3i}\sin\psi_i$$

$$j_{iy} = \cos(\theta_{1i}+\theta_{2i})\sin\theta_{3i}\sin\psi_i + \cos\theta_{3i}\cos\psi_i$$

$$j_{iz} = \sin(\theta_{1i} + \theta_{2i}) \sin\theta_{3i}$$

ทำซ้ำสมการที่ 3.29 เมื่อ i=1,2 และ 3 จากนั้นจะสามารถสร้างเมตริกซ์ได้ดังนี้

$$J_x v_p = J_q \dot{q} \tag{3.32}$$

โดยที่

$$J_x = \begin{bmatrix} j_{1x} & j_{1y} & j_{1z} \\ j_{2x} & j_{2y} & j_{2z} \\ j_{3x} & j_{3y} & j_{3z} \end{bmatrix}$$

$$Jq = \begin{bmatrix} \sin\theta_{21}\sin\theta_{31} & 0 & 0 \\ 0 & \sin\theta_{22}\sin\theta_{32} & 0 \\ 0 & 0 & \sin\theta_{23}\sin\theta_{33} \end{bmatrix}$$

$$\dot{q} = \begin{bmatrix} \dot{\theta}_{11} & \dot{\theta}_{21} & \dot{\theta}_{31} \end{bmatrix}^T$$

ดังนั้นเราสามารถเขียนได้ เป็น

$$v_p = J\dot{q} \tag{3.33}$$

โดยที่

$$J = J_x^{-1} J_q = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial \theta_1} & \frac{\partial x}{\partial \theta_2} & \frac{\partial x}{\partial \theta_3} \\ \frac{\partial y}{\partial \theta_1} & \frac{\partial y}{\partial \theta_2} & \frac{\partial y}{\partial \theta_3} \\ \frac{\partial z}{\partial \theta_1} & \frac{\partial z}{\partial \theta_2} & \frac{\partial z}{\partial \theta_3} \end{bmatrix}$$

จากความสัมพันธ์ของจาโคเบียนหุ่นยนต์ที่ได้แสดง จะเห็นกว่าการเคลื่อนที่ของความเร็วของปลายแขนของหุ่นยนต์มีความสัมพันธ์กับความเร็วของแกนหมุนในแต่ละแกน การที่จะบังคับให้ปลายแขนของหุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง แกนหมุนของมอเตอร์หัวไหล่จะต้องถูกควบคุมให้ทำงานพร้อมกัน ดังนั้นการควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์แบบขนานจึงมีความยุ่งยากมากกว่าการควบคุมหุ่นยนต์แบบอนุกรมดังที่เคยกล่าวไว้ในข้างต้นแล้ว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

3.5 กล้อง เลนส์และการประมวลผลรูป

ในส่วนนี้จะอธิบายถึงแบบจำลองคณิตศาสตร์สำหรับกล้อง โดยเป็นการหาความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของวัตถุมีแกนอ้างอิงจริงกับตำแหน่งของวัตถุที่ฉายไปตกบนระนาบกล้อง โดยการฉายนี้เรียกว่าภาพฉายแบบมุมตีบ (Perspective projection) ซึ่งเป็นที่นิยมสำหรับการประมวลผลภาพ (Image processing) [27-30]

3.5.1 แบบจำลองกล้อง

แบบจำลองกล้องแบบภาพฉายมุมตีบ ใช้หลักการฉายภาพผ่านกล้องรูเข็ม ซึ่งภาพที่ได้จะเป็นภาพจริงหัวกลับ โดยภาพจริงและภาพที่ฉายลงบนฉากรับภาพนี้แสดงดังรูปที่ 3.8 จากรูปจะสามารถสร้างความสัมพันธ์ของภาพจริงและภาพที่ฉายลงบนฉากรับภาพโดยใช้สามเหลี่ยมคล้ายในการหาดังนี้

ให้จุด ${}^{c}P = \begin{bmatrix} x & y & z \end{bmatrix}^{T}$ ซึ่งเป็นตำแหน่งเทียบกับแกนมุขสำคัญ (Principal axis) โดยระยะจากจุดตัดแกนมุขสำคัญที่ $z_c = f$

เมื่อพิจารณาสามเหลี่ยมคล้ายในรูปที่ 3.9 จุด $P(x_c, y_c, z_c)$ ถูกฉายกลับไปยังระนาบภาพ จากจุดของภาพทั้งสอง สามารถพิจารณารูปสามเหลี่ยมคล้ายจะได้จะได้ดัง

$$\frac{f}{Z} = \frac{u}{X} = \frac{v}{Y} \tag{3.34}$$

จัดรูปสมการที่3.34จะได้

$$u = \frac{fX}{Z}$$

$$v = \frac{fY}{Z}$$

ใช้ระบบพิกัดเอกพันธ์ (Homogeneous coordinate) สำหรับจุด ${}^{c}P$ สามารถเขียนได้เป็น

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ W \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$$

ส่วนต่อมาถ้าจุดกำเนิดของระนาบภาพไม่ตัดกับจุดตัดกับแกนมุขสำคัญ ดังนั้นจุดกำเนิดของภาพเลื่อนออกไปที่ระยะ t_u และ t_v ดังนั้นสมการของกล้องที่เปลี่ยนไปสามารถแสดงได้ ดังสมการที่ 3.35

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

$$u = \frac{fX}{Z} + t_u$$

$$v = \frac{fY}{Z} + t_v$$

โดยสามารถจัดอยู่ในรูปสมการเอกพันธ์ได้ ดังนี้

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ W \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & t_u \\ 0 & f & t_v \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \tag{3.35}$$

จากสมการที่3.35 สามารถจัดเป็นรูปย่อได้ ดังนี้

$$x = [K] X_c$$

โดยที่

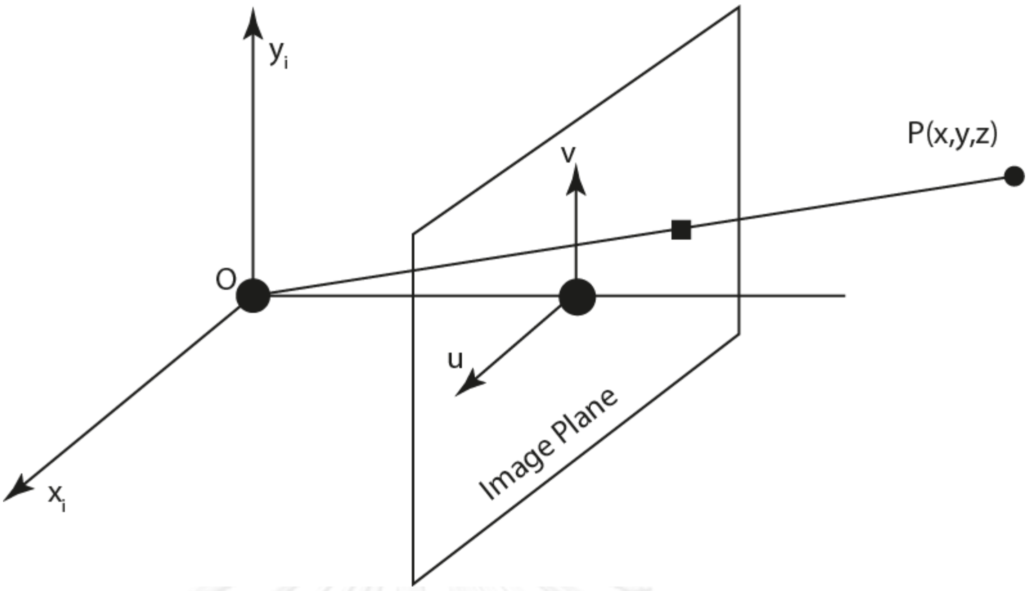
$$K = \begin{bmatrix} f & 0 & t_u \\ 0 & f & t_v \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

เมทริกซ์ K คือเมทริกซ์สอบเทียบกล้อง (Camera calibration matrix) จากแบบจำลองกล้องนั้น ระยะทั้งสองด้านของเซนเซอร์รับภาพมีสัดส่วนเท่ากัน แต่ในความเป็นจริงพิกเซลของภาพมีเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าซึ่งจะเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสตามสมมติฐาน ซึ่งถ้าวัดในพิกัดภาพ พิกเซลจะต้องมีค่าตัวคูณสัดส่วนเพื่อชดเชยความไม่เท่ากันของขนาดในแต่ละทิศทาง โดยกำหนดให้ค่าจำนวนพิกเซลต่อหนึ่งหน่อยระยะทางในพิกัดภาพเป็น m_x และ m_y ในทิศทาง x และ y ตามลำดับ ดังนั้นเมทริกซ์การสอบเทียบกล้องสามารถเขียนได้ดังนี้

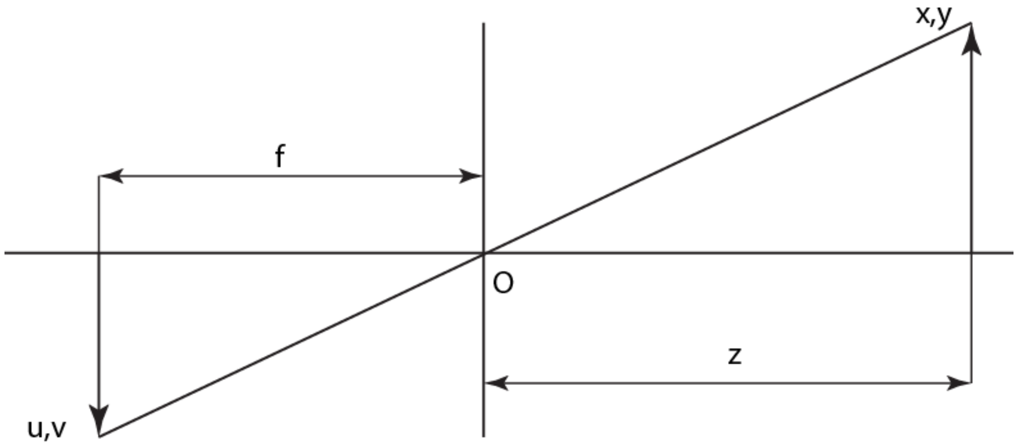
$$K = \begin{bmatrix} m_x f & s & t_u \\ 0 & m_y f & t_v \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

โดยที่

s คือค่าตัวแปรความเบ้ของกล้อง (Skew parameter) ซึ่งกล้องที่มีขายอยู่ทั่วไป จะมีค่าตัวแปรความเบ้มีค่าเท่ากับศูนย์ ในกรณีที่ค่าตัวแปรมีไม่เท่ากับศูนย์ แสดงว่า เลนส์และเซนเซอร์รับภาพไม่ตั้งฉากซึ่งกันและกัน โดยปกติจะเกิดจากความผิดพลาดในการผลิต



รูปที่ 3.8 แผนภาพแบบจำลองกล้องรูเข็ม



รูปที่ 3.9 สามเหลี่ยมคล้าย แสดงความสัมพันธ์เชิงเรขาคณิตระหว่างพิกัดกล้อง 3 มิติ กับ
พิกัด 2 มิติ

3.5.2 การบิดเบี้ยวของเลนส์

การใช้งานกล้องทั่วไป ภาพที่เกิดจากกล้องจะมีการบิดเบี้ยวซึ่งเกิดจากตัวเลนส์มีความโค้ง โดยทั่วไปแล้วค่าการบิดเบี้ยวของเลนส์จะมีค่ามากเมื่อตัวเลนส์มีความยาวโฟกัสน้อย และมีการบิดเบี้ยวน้อยเมื่อตัวเลนส์มีความยาวโฟกัสมาก ดังรูปที่ 3.10 แสดงถึงการบิดเบี้ยวของเลนส์

โดยทั่วไปแล้วเลนส์ สามารถมีการบิดเบี้ยวแบ่งออกเป็นสองประเภทได้แก่ การบิดเบี้ยวเชิงเส้นสัมผัสและการบิดเบี้ยวเชิงแนวรัศมี จากงานวิจัย [30, 31] ได้พบว่าสามารถใช้เฉพาะการบิดเบี้ยวเชิงแนวรัศมีเพื่อแก้ไขภาพเพียงอย่างเดียวได้ เนื่องจากการบิดเบี้ยวเชิงเส้นสัมผัสมีผลน้อยมากจึงไม่ต้องนำมาคำนวณได้

การแก้ความบิดเบี้ยวของเลนส์สามารถทำได้ดังนี้ กำหนดให้ $\begin{bmatrix} x_u & y_u & 1 \end{bmatrix}^T$ เป็นเวกเตอร์ของจุดซึ่งมีพิกัด x_c เมื่อวัดในระบบพิกัดกล้องจะได้ ตำแหน่งภาพจริงหลังจากการเกิดการบิดเบี้ยวเชิงรัศมีเป็น $\begin{bmatrix} x_d & y_d & 1 \end{bmatrix}^T$ สัมพันธ์กับตำแหน่งภาพอุดมคติโดยระยะกระจัดเชิงรัศมีเป็นดังสมการ

$$x_u = F(r_d)x_d$$

$$x_d = F(r_u)x_u$$

โดยที่

$$r_d = \sqrt{x_d^2 + y_d^2}$$

$$r_u = \sqrt{x_u^2 + y_u^2}$$

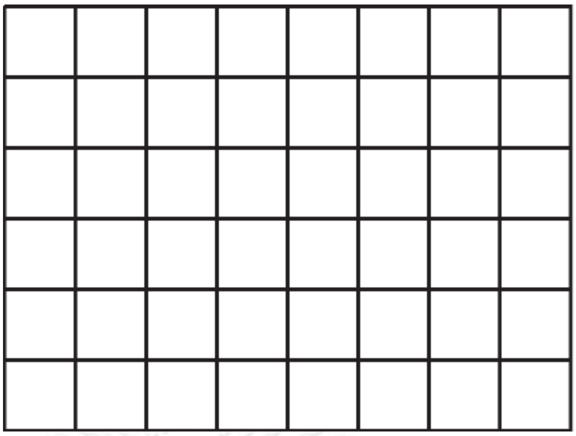
$F(r_d)$ เป็นค่าฟังก์ชันการบิดเบี้ยวเชิงรัศมี ซึ่งสัมพันธ์กับ r_d

$G(r_u)$ เป็นค่าฟังก์ชันการบิดเบี้ยวเชิงรัศมี ซึ่งสัมพันธ์กับ r_u

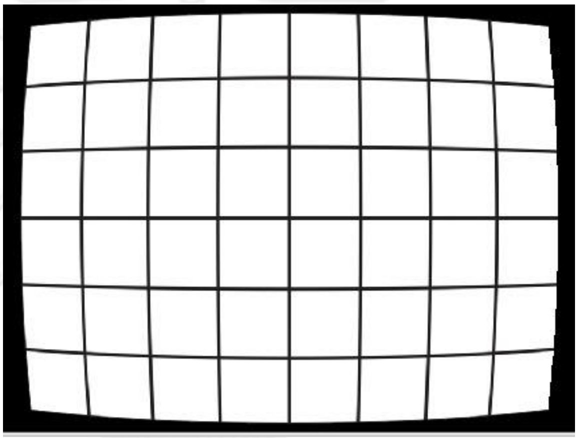
การประมาณค่าของฟังก์ชัน $F(r_d)$ สามารถทำได้ โดยการใช้การกระจายเทย์เลอร์ (Taylor expansion) ดังนี้

$$F(r_d) = 1 + k_1 r_d + k_2 r_d^2 + k_3 r_d^3 + ...$$

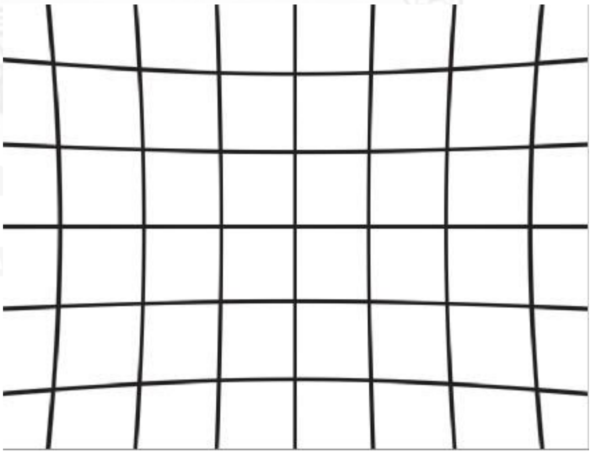
โดยฟังก์ชัน $F(r_d)$ เมื่อ r_d มีค่าเป็นบวกและ $F(0) = 1$ สำหรับสัมประสิทธิ์ k_1, k_2, k_3 ใช้ในการแก้การบิดเบี้ยวเชิงรัศมีนั้นถูกรวมไว้ในตัวแปรภายในของกล้อง ซึ่งสามารถหาได้ โดยจากการสอบเทียบกล้อง



ก. ภาพปกติ (Normal Image)



ข. ภาพโป่งกลาง (Barrel Distortion)



ค. ภาพตีบกลาง (Cushion Distortion)

รูปที่ 3.10 ภาพการบิดเบี้ยวของเลนส์

3.5.3 ปริภูมิสี

ปริภูมิสี RGB เป็นปริภูมิสีที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในระบบภาพดิจิตอล [32-34] โดยแทนค่าของสีในแต่ละจุด เป็นสีในปฐมภูมิ คือ สีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน ดังรูปที่ 3.11 จากภาพแกนแต่ละแกนคือค่าของสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน โดยมีช่วงของความเข้มของค่าสีระหว่าง 0 ถึง 1 โดยค่าสีเท่ากับ 0 จะมีความเข้มน้อยที่สุด ส่วนค่าสีมีค่าเท่ากับ1 จะมีความเข้มมากที่สุด ซึ่งปริภูมิสี RGB จะมีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมลูกบาศก์

ปริภูมิสี HSV ใช้หลักการแยกความสว่าง (Luma) และเนื้อสี (Chroma) ออกจากภาพออกจากจุดภาพ โดยปริภูมิสี HSV จะประกออบด้วย H แทนค่าเนื้อสี (Hue), S แทนค่าความอิ่มตัวของสี (Saturation) และ V แทนค่าความสว่างของแสง (Value) โดยค่าของเนื้อสีจะมีค่าเป็นมุม ระหว่าง 0ถึง 360 องศา ส่วนค่าความอิ่มตัวของสีจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 โดยที่ค่าความอิ่มของสีเมื่อมีค่าเท่ากับศูนย์จะมีสีความอิ่มของสีต่ำที่สุด และถ้าค่าความอิ่มของสีเมื่อมีค่าเท่ากับหนึ่งจะมีสีความอิ่มของสีสูงที่สุด ส่วนค่าความสว่างของแสงจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 โดยที่ความสว่างของแสงเมื่อมีค่าเท่ากับศูนย์จะมีสีความสว่างของแสงต่ำที่สุด และถ้าค่าความสว่างของแสงเมื่อมีค่าเท่ากับหนึ่งจะมีความสว่างของแสงสูงที่สุด ซึ่งปริภูมิสี HSV จะมีลักษณะเป็นรูปกรวย ดังรูปที่ 3.12

การแปลงปริภูมิสี RGB มาเป็นปริภูมิสี HSV ทำได้ดังนี้

$$H' = \begin{cases} notdefined, if \quad C = 0 \\ 60\left[\dfrac{G-B}{\delta} \bmod 6\right], if \quad M = R \\ 60\left[\dfrac{B-R}{\delta} + 2\right], if \quad M = G \\ 60\left[\dfrac{R-G}{\delta} + 4\right], if \quad M = B \end{cases}$$

$$H = 60^{\circ} \times H'$$

$$s = \begin{cases} 0, if \quad c = 0 \\ \dfrac{C}{V}, otherwise \end{cases}$$

$$V = M$$

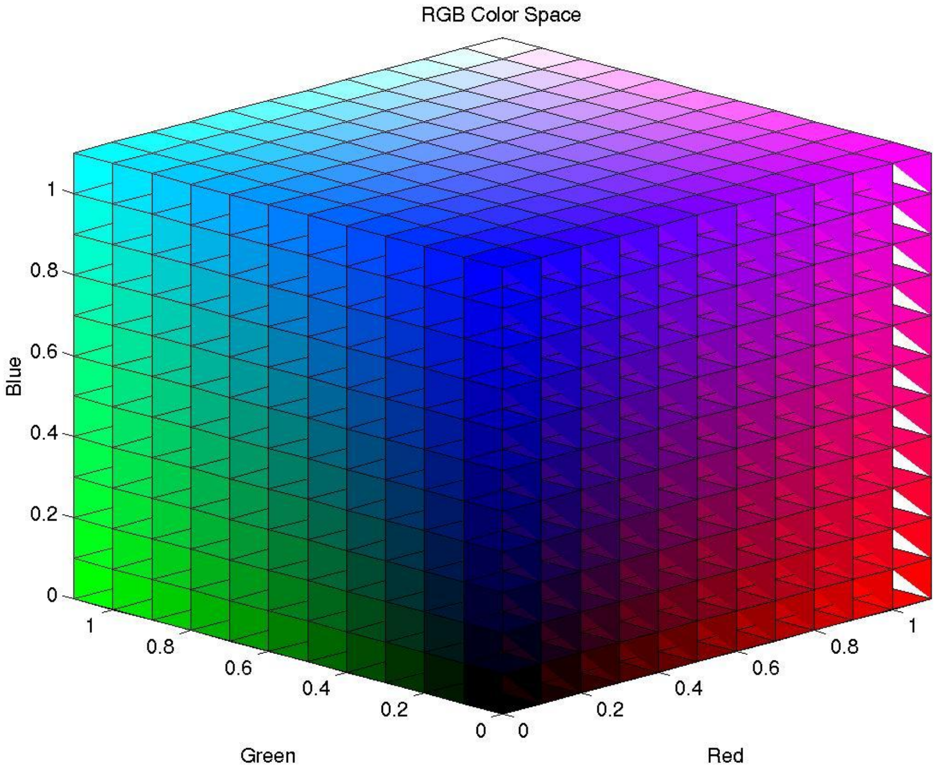
โดยที่

$$M = \max(R, G, B)$$

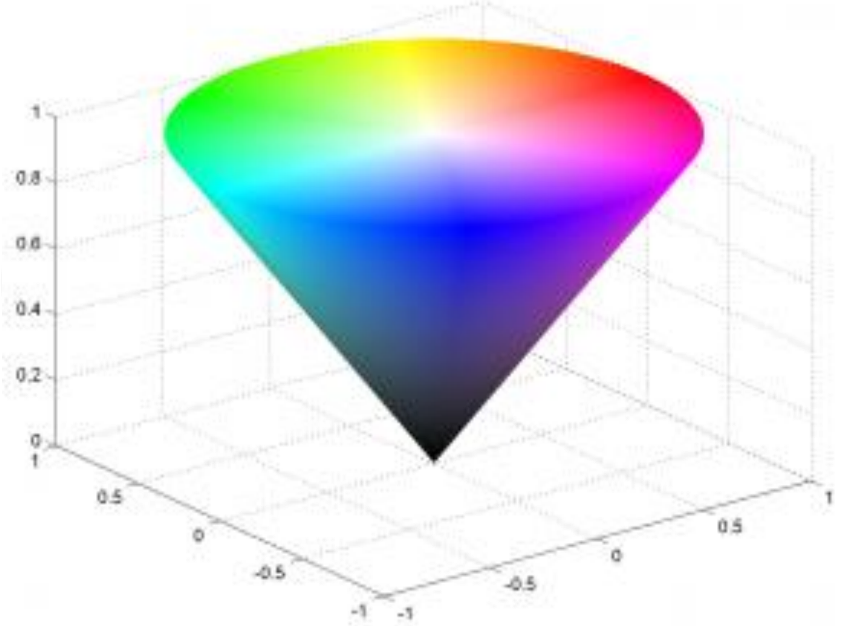
$$m = \min(R, G, B)$$

$$C = M - m$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 3.11 ปริภูมิสี RGB



รูปที่ 3.12 ปริภูมิสี HSV

3.5.4 การแปลงระนาบของโฮโมกราฟฟี

การแปลงระนาบของโฮโมกราฟฟี (Homography transformation) เป็นวิธีที่ได้รับความนิยม ในการนำมาใช้แปลงพิกัดบนภาพในระนาบหนึ่งไปยังอีกระนาบหนึ่ง [35, 36] โฮโมกราฟฟีเมตริกซ์ เป็นตัวแปลงระหว่างจุดบนระนาบใดๆ และระบบพิกัดที่ต้องการ จากความสัมพันธ์ระหว่างภาพบนระนาบทั้งสองสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$p' = H \cdot p$$

โดยที่

p คือ จุดบนระนาบจริง

p' 'คือ จุดบนระนาบภาพ

H คือ โฮโมกราฟฟีเมตริกซ์

โดยสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

จากรูปที่ 3.13 จุดใดๆที่อยู่บนระนาบหนึ่ง สามารถฉายไปยังอีกระนาบหนึ่งได้ โดยทั่วไปแล้ว จุดสี่จุดบนระนาบสามารถจะหาความสัมพันธ์เพื่อที่จะฉายไปยังอีกระนาบได้ โดยใช้ความสัมพันธ์ของเส้นตรงบนระนาบดังสมการ

$$X = \frac{ax + by + c}{gx + hy + 1} \tag{3.36}$$

$$Y = \frac{dx + ey + f}{gx + hy + 1} \tag{3.37}$$

จากสมการที่ 3.36และ 3.37มีตัวแปรไม่ทราบค่าอยู่ 8 ตัวคือ a, b, c, d, f, g, h ดังนั้นต้องใช้จุดอย่างน้อย 4 จุดในการหาตัวแปรที่ไม่ทราบค่า จากสมการขั้นต้น สามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & x_1X_1 & y_1X_1 \\ x_2 & y_2 & 1 & 0 & 0 & 0 & x_2X_2 & y_2X_2 \\ x_3 & y_3 & 1 & 0 & 0 & 0 & x_2X_2 & y_2X_2 \\ x_4 & y_4 & 1 & 0 & 0 & 0 & x_2X_2 & y_2X_2 \\ 0 & 0 & 0 & x_1 & y_1 & 1 & x_1Y_1 & y_1Y_1 \\ 0 & 0 & 0 & x_2 & y_2 & 1 & x_2Y_2 & y_2Y_2 \\ 0 & 0 & 0 & x_3 & y_3 & 1 & x_3Y_3 & y_3Y_3 \\ 0 & 0 & 0 & x_4 & y_4 & 1 & x_4Y_4 & y_4Y_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \\ f \\ g \\ h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \\ Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \\ Y_4 \end{bmatrix}$$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

โดยที่

a คือตัวคูณสัดส่วนคงที่ในแนวแกน X โดยที่ สัดส่วนในแกน Y ไม่เปลี่ยนแปลง

b คือตัวคูณสัดส่วนในทิศทาง X โดยเป็นสัดส่วนกับระยะจากจุดกำเนิดในทิศทางY

c คือระยะห่างจากจุดกำเนิด ในทิศทาง X

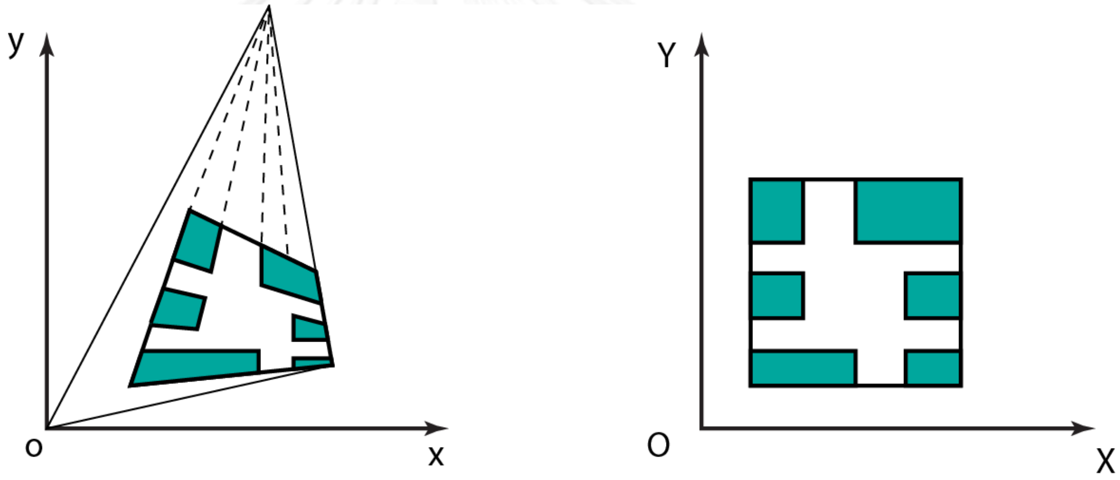
d คือคูณสัดส่วนในทิศทาง Y โดยเป็นสัดส่วนกับระยะจากจุดกำเนิดในทิศทาง X

e คือตัวคูณสัดส่วนคงที่ในแนวแกน Y โดยที่ สัดส่วนในแกน X ไม่เปลี่ยนแปลง

f คือคือระยะห่างจากจุดกำเนิด ในทิศทาง Y

g คือตัวคูณสัดส่วน X และ Y โดยเป็นฟังก์ชันของX

h คือตัวคูณสัดส่วน X และ Y โดยเป็นฟังก์ชันของY



รูปที่ 3.13 การฉายภาพมุมตีบไปยังระนาบโดยใช้วิธี โฮโมกราฟฟี

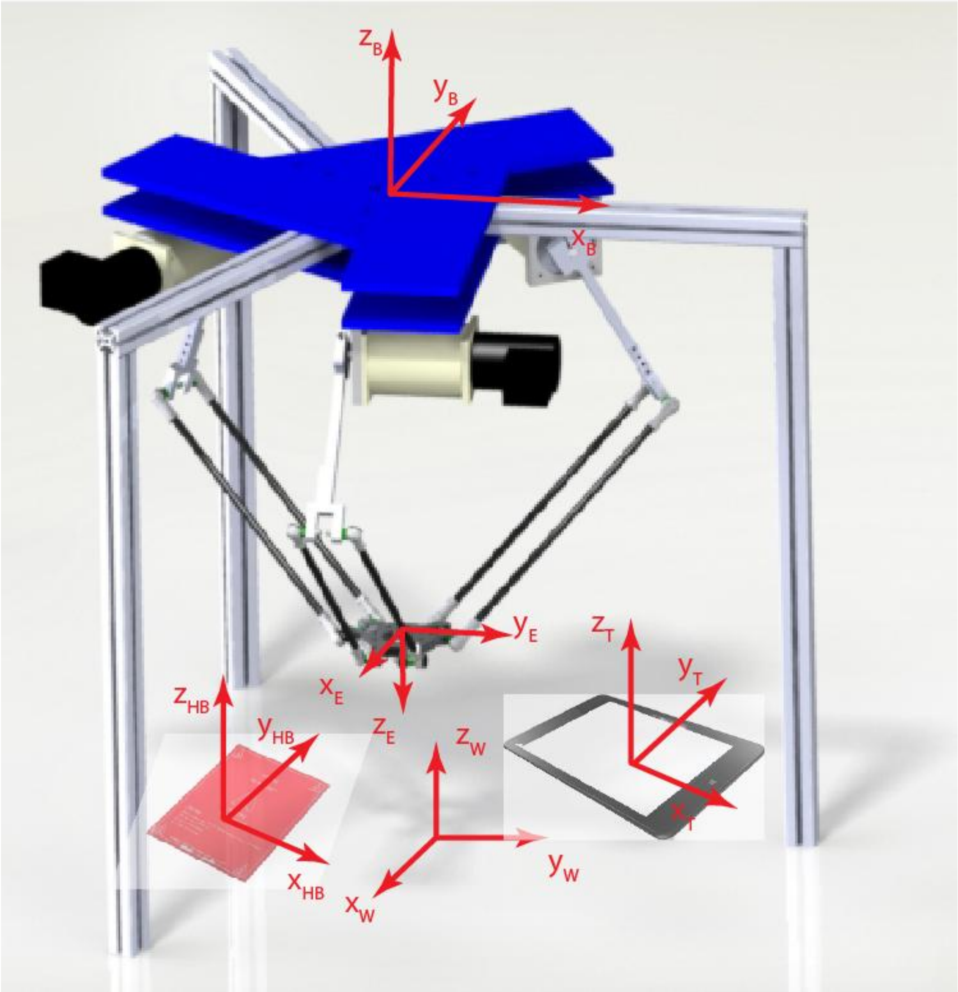
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทที่ 4.
ภาพรวมของระบบ

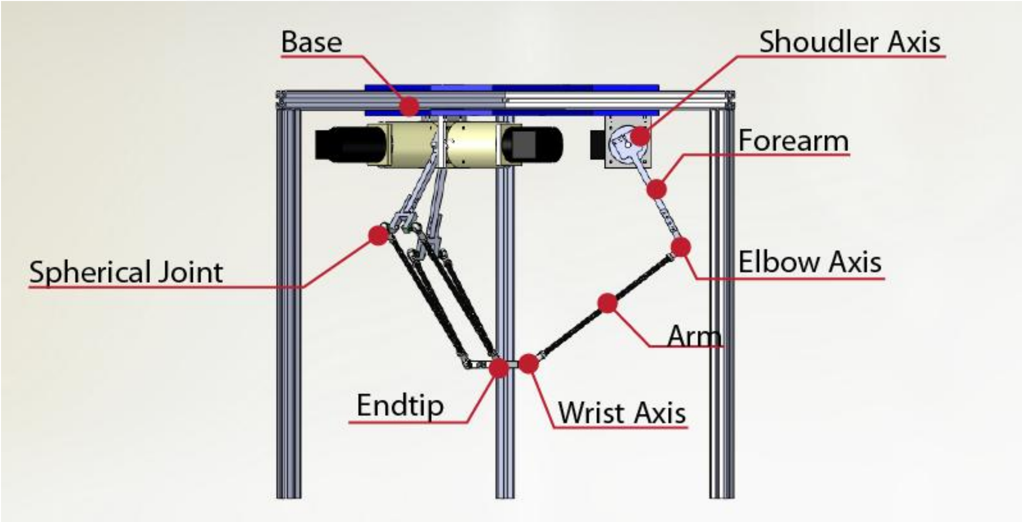
บทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบหุ่นยนต์เดลต้า การทำงานของระบบทางกล วิธีการควบคุม ระบบสัญญาณควบคุม และการพัฒนาโปรแกรม ในส่วนของระบบทางกลนั้นจะกล่าวถึงการออกแบบจัดสร้างหุ่นยนต์เดลต้า และอุปกรณ์ที่ติดตั้งในหุ่นยนต์ มอเตอร์ ชุดเกียร์ ต่อจากนั้นจะเป็นส่วนของวิธีการควบคุม ซึ่งจะกล่าวถึงโปรแกรมที่ใช้ในการควบคุม การทำงานของโปรแกรมเบื้องต้น หลักการทำงานของระบบ ระบบสัญญาณควบคุม และการพัฒนาโปรแกรม ในลำดับถัดไป

4.1 หุ่นยนต์เดลต้า

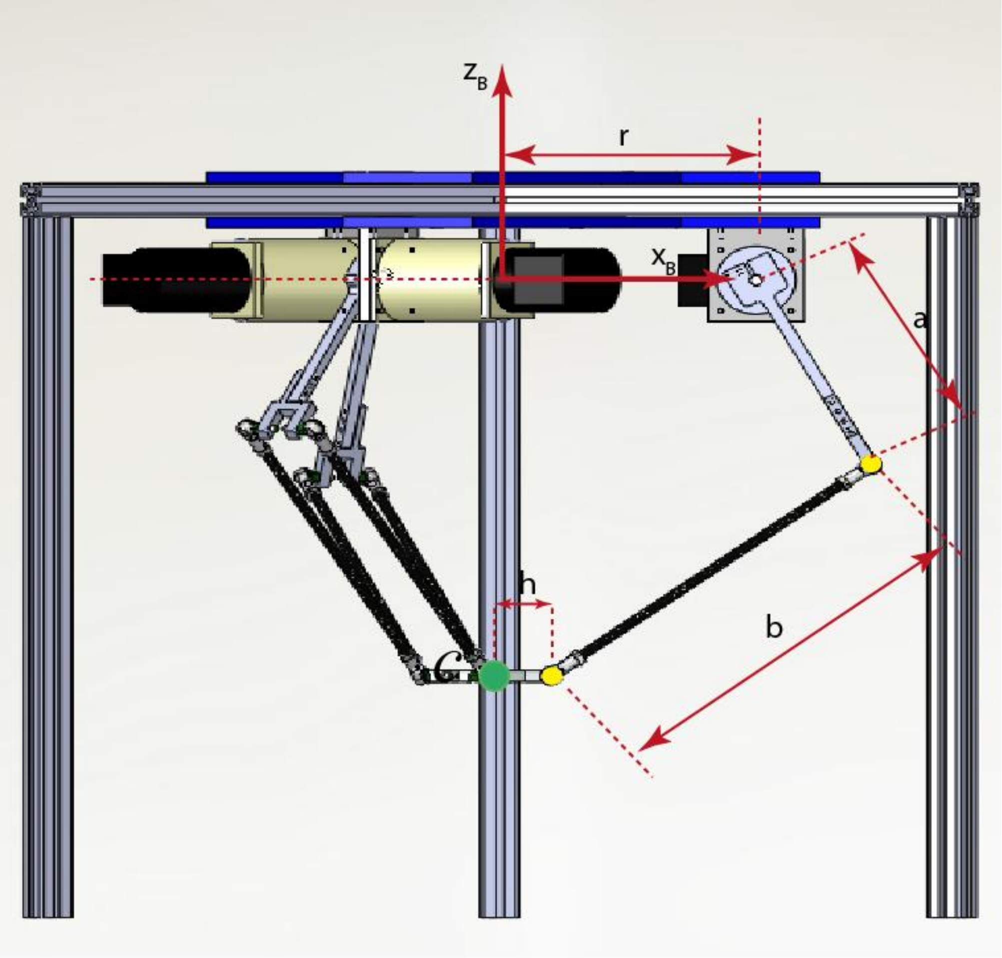
หุ่นยนต์เดลต้านั้น มีรูปแบบการวางตัวหลากหลายรูปแบบ ลักษณะการวางตัวแบบต่างๆ ทำให้ มีจุดเด่นในการใช้งานไม่เหมือนกัน [37] หุ่นยนต์ที่จัดสร้างขึ้นมานี้ เป็นหุ่นยนต์เดลต้าแบบของคลาเวล (Ramond clavel) [15, 38] ซึ่งเป็นที่นิยมมากในวงการอุตสาหกรรมเนื่องจาก มีชิ้นส่วนน้อย มีความแข็งเกร็งสูง และยังสามารถเคลื่อนที่ได้ที่ความเร็วและความเร่งสูงการติดตั้งแกนบอกพิกัดของหุ่นยนต์มีดังรูปที่ 4.1 จากรูปคือการติดตั้งแกนอ้างอิงของหุ่นยนต์โดย x_B, y_B, z_B คือแกนอ้างอิงฐานของหุ่นยนต์ x_E, y_E, z_E คือแกนอ้างอิงปลายแขนของหุ่นยนต์ x_T, y_T, z_T คือแกนอ้างอิงของปากกา x_{HB}, y_{HB}, z_{HB} คือแกนอ้างอิงแผ่นความร้อนและ x_W, y_W, z_W คือแกนอ้างอิงของชิ้นงาน หุ่นยนต์เดลต้า ประกอบด้วยกลไกลแบบขนานจำนวน 3 ชุด โดยการทำงานจะอาศัยหลักการพาราเรลโลแกรม (Parallelogram) ซึ่งจะทำให้โครงสร้างของฐาน (Base)และปลายแขน (End tip) ทำมุมขนานกันตลอดเวลา การควบคุมตำแหน่งปลายแขนสามารถทำได้โดย ปรับองศาของตัวขับเคลื่อนทั้งสามตัว ให้ไปอยู่ในมุมที่ต้องการเพื่อทำให้ปลายแขนของหุ่นยนต์ อยู่ที่ตำแหน่งที่ต้องการได้ ส่วนประกอบของหุ่นยนต์เดลต้าประกอบข้อต่อและแขนทั้งหมดจำนวน สามชุด โดยสามารถแบ่งออกเป็นสี่ส่วนมีดังนี้ ฐาน (Base) ที่ติดตั้งอยู่ด้านบนสุดจะยึดอยู่กับที่และติดตั้งมอเตอร์สามตัว โดยแกนของมอเตอร์นี้จะเรียกว่าแกนหัวไหล่ (Shoulder) ซึ่งจะต่อกับแขนท่อนบน (Arm) โดยมอเตอร์จะขับให้แขนท่อนบนเคลื่อนทีไปยังมุมต่างๆ เพื่อที่จะขยับให้ปลายของแขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปในตำแหน่งที่ต้องการ ที่ส่วนปลายของแขนท่อนบนจะมี ข้อต่อทรงกลม (Spherical joint) สองตัวติดตั้งอยู่ที่ปลายเรียกว่าแกนข้อศอก (Elbow) เพื่อที่จะให้ แขนด้านล่างสามารถขยับในแนวอิสระได้ ถัดมาคือแขนท่อนล่าง (Forearm) จะต่ออยู่กับแขนท่อนบนด้วยข้อต่อทรงกลมจำนวน สองตัว เพื่อที่แขนท่อนล่างสามารถขยับไปในแนวระนาบอื่นได้ ส่วนปลายแขนท่อนล่างจะติดข้อต่อทรงกลมอีก สองตัว แนวแกนนี้เรียกว่า แกนข้อมือ (Wrist) ติดเข้าไปกับส่วนปลายแขนด้านล่าง ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 แบบจำลองของหุ่นยนต์เดลต้า



รูปที่ 4.2 แผนภาพชิ้นส่วนต่างๆของหุ่นยนต์เดลต้า

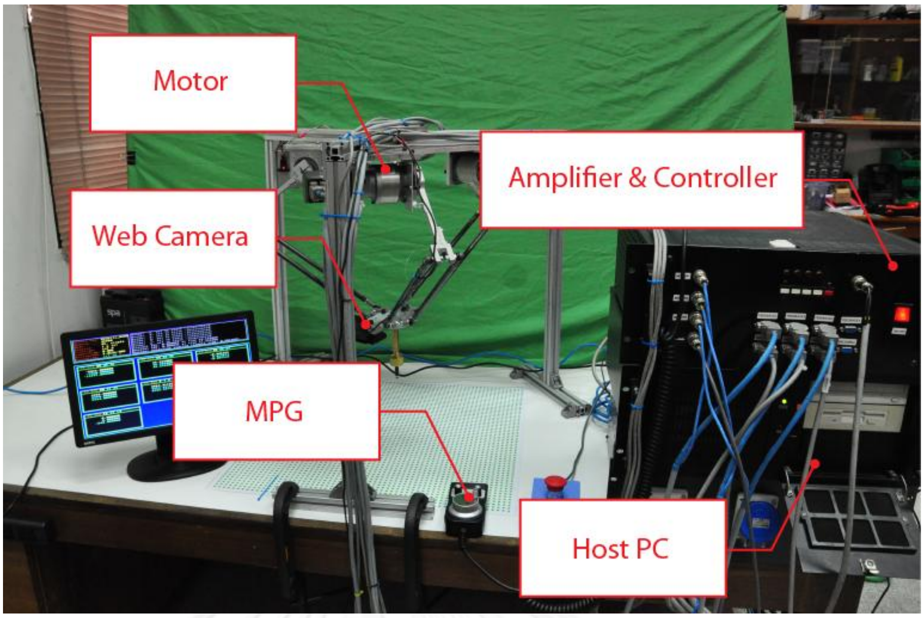


รูปที่ 4.3 แผนภาพตัวแปรของหุ่นยนต์เดลต้า

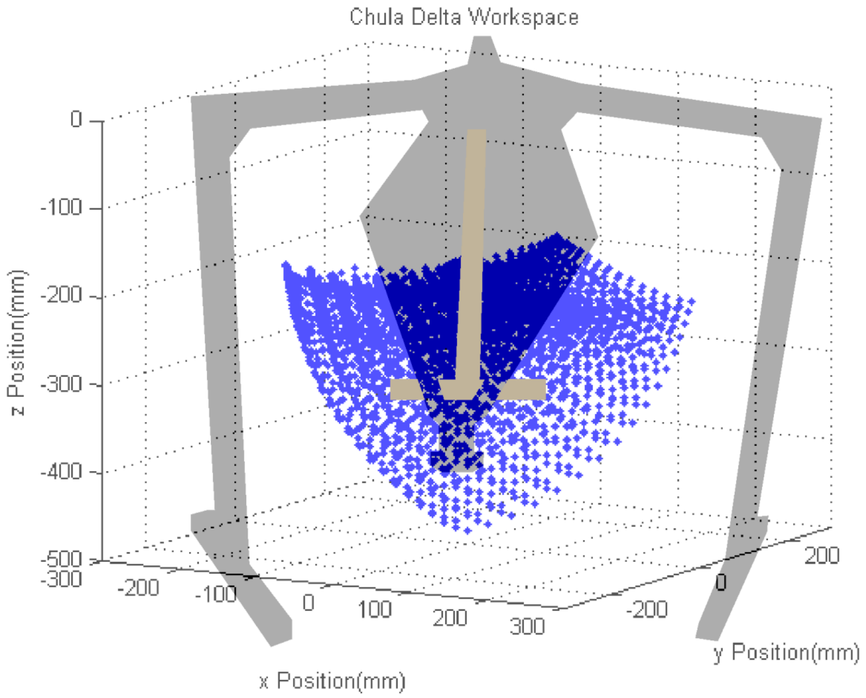
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4.2 ระบบทางกล

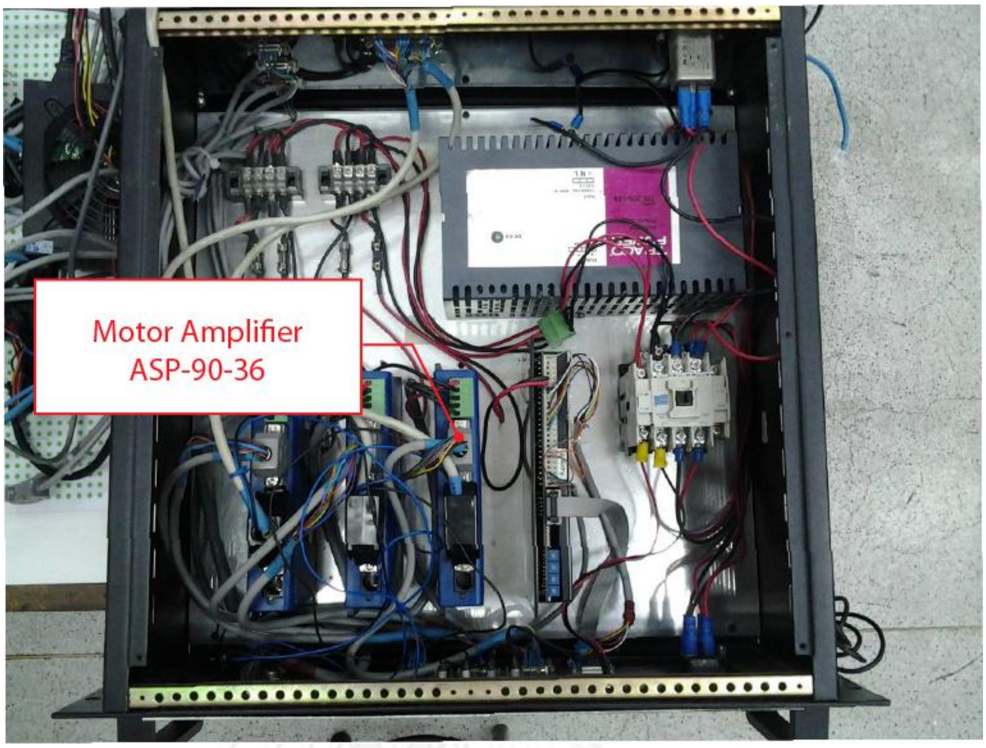
ระบบทางกลของหุ่นยนต์เดลต้าที่ได้จัดสร้างขึ้น มี 3 องศาอิสระ โดยมีสัดส่วนดังนี้ r เท่ากับ 200 มิลลิเมตร h เท่ากับ 50 มิลลิเมตร a เท่ากับ 150 มิลลิเมตร และ b เท่ากับ380 มิลลิเมตรดังรูปที่ 4.3 มีจุดเด่นคือจะมีพื้นที่ใช้งาน กว้างและมีสัดส่วนสมมาตรในแต่ละด้านดังรูปที่ 4.5 จะเห็นว่าพื้นที่ ใช้งานของหุ่นยนต์เป็นรูปครึ่งวงกลมซึ่งทำให้สามารถใช้งานได้หลายลักษณะ และเนื่องจากเป็นโครงสร้างแบบขนานนั้นทำให้ อัตราส่วนระหว่างโหลดภาระกับขนาดมอเตอร์มีค่ามาก[9] ทำให้ไม่ต้องใช้มอเตอร์ขนาดใหญ่ที่มีแรงบิดสูงในการออกแบบ วัสดุที่ใช้ในการออกแบบใช้ อลูมิเนียมเบอร์ AL-7075 ซึ่งมีแข็งแรงใกล้เคียงกับเหล็ก และชิ้นส่วนที่ออกแบบจะเน้นใช้การตัดในแนวตั้ง เป็นหลัก ซึ่งทำให้ค่าใช้จ่ายในการจัดสร้างไม่มาก และง่ายต่อการประกอบ



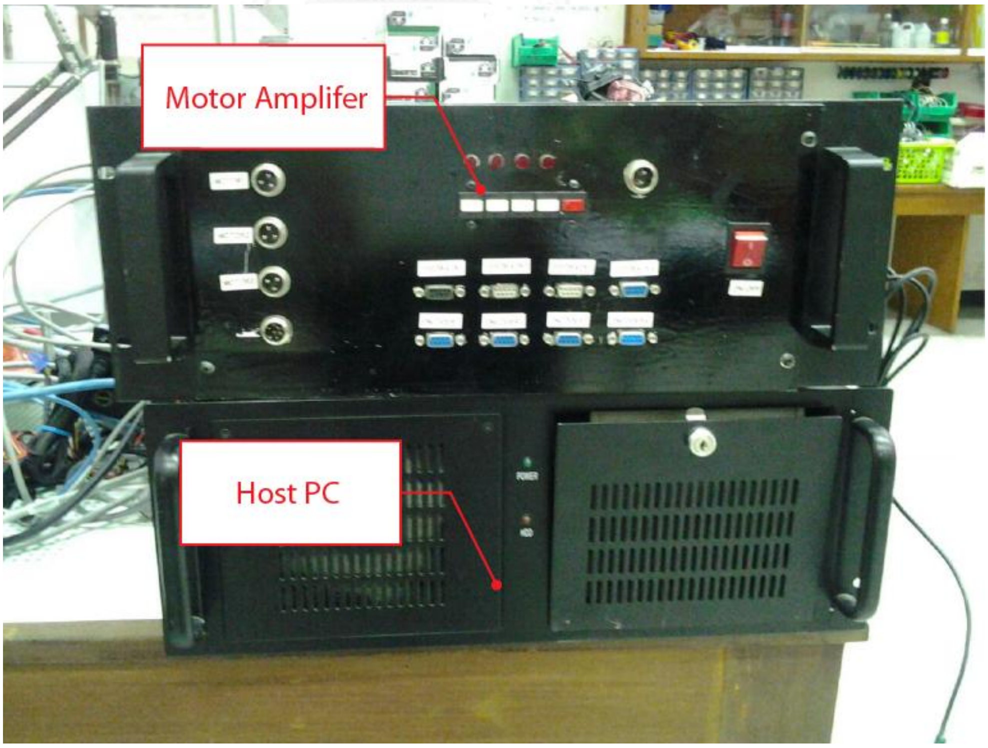
รูปที่ 4.4 หุ่นยนต์เดลต้า ที่จัดสร้างขึ้น



รูปที่ 4.5 พื้นที่ใช้งานของหุ่นยนต์จุฬาเดลต้าที่จัดสร้างขึ้น



รูปที่ 4.6 กล่องควบคุม Accelus รุ่น ASP-090-36พร้อมด้วยแหล่งจ่ายไฟ



รูปที่ 4.7 กล่องควบคุมและแผงอุปกรณ์ใช้งาน

ส่วนประกอบของหุ่นเดลต้า ประกอบด้วยมอเตอร์แบบไร้แปลงถ่ายรุ่น MBT-N2305 ดังรูปที่ 4.4 จำนวน 3 ตัวติดตั้งลงบนฐานด้านบน มอเตอร์แต่ละตัวมีแรงขับสูงสุด 0.334 นิวตัน-เมตร ขับผ่านเฟืองทดแบบโคจร ด้วยอัตราทด 1ต่อ 15 โดยที่มอเตอร์ติดตั้งอุปกรณ์วัดมุม (Encoder) ที่มีความละเอียด 1,000 PPR ทำให้สามารถวัดความละเอียดการหมุนที่ข้อต่อได้ถึง 60,000 PPR การเลือกใช้มอเตอร์กระแสตรงแบบไม่มีแปรงถ่าน (Brushless dc motor) จะทำให้การควบคุมมอเตอร์ได้มีประสิทธิภาพมากกว่ามอเตอร์ที่มีแปรงถ่าน (Brush motor) เนื่องจากไม่มีแรงเสียดทานที่เกิดจาการที่แปรงถ่านและสามารถศึกษาพัฒนาเทคนิคการควบคุมในระดับที่สามารถควบคุมกำลังสนามแม่เหล็กของมอเตอร์ได้ มอเตอร์แต่ละตัวควบคุมด้วยวงจรขับมอเตอร์ (Amplifier) ยี่ห้อ Accelus รุ่น ASP-090-36 ดังรูปที่ 4.6 ซึ่งสามารถควบคุมกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านขดลวดของมอเตอร์ได้ด้วยอัตรา 20 kHz โดยวงจรขับมอเตอร์แต่ละตัวสามารถขับกระแสต่อเนื่องได้สูงสุด 12 แอมแปร์ โดยอุปกรณ์ทั้งหมดจะบรรจุอยู่ในกล่องควบคุมเพื่อให้สะดวกต่อการใช้งานรูปที่ 4.7

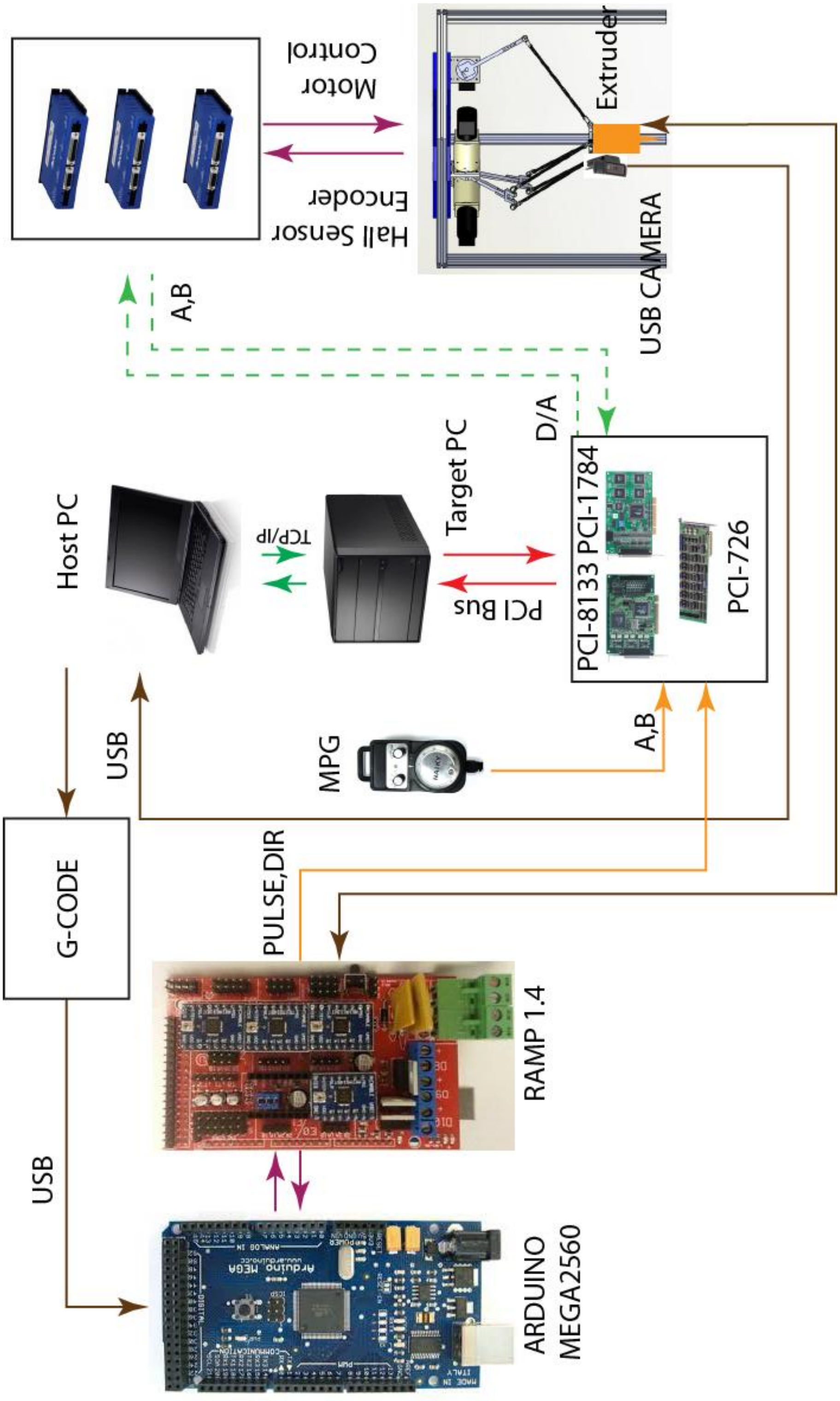
4.3 ระบบสัญญาณควบคุม

การทำงานของหุ่นยนต์จุฬาเดลต้ามีหลักการทำงานซับซ้อน มีระบบการควบคุมด้วยภาพ ระบบการควบคุมมอเตอร์ที่ข้อต่อและระบบควบคุมหัวพิมพ์สามมิติดังรูปที่ 4.8 โดยจะกล่าวถึงบล๊อคที่สำคัญในรูปต่อไป ระบบหุ่นยนต์จุฬาเดลต้าสามารถแบ่งออกเป็นส่วนย่อยๆได้ โดยจะประกอบด้วยสี่ส่วนคือ

1. ชุดควบคุมมอเตอร์
2. ชุดตรวจรับสัญญาณภาพ (Camera input)
3. ชุดคุมการพิมพ์สามมิติ
4. ชุดควบคุมด้วยมือ

ในชุดควบคุมมอเตอร์นั้น ประกอบด้วยสัญญาณควบคุมมอเตอร์ผ่าน แผงควบคุมยี่ห้อ ADVANTECH รุ่น PCL-726 ซึ่งจะส่งสัญญาณความต่างศักย์ไปยัง มอเตอร์วงจรขับมอเตอร์(Motor Amplifier) ยี่ห้อ Accelus รุ่น ASP-090-36 ส่วนสัญญาณจากอุปกรณ์วัดมุมจะถูกส่งต่อไปยังแผงควบคุมวงจรนับ ยี่ห้อ ADLINK รุ่น PCI-8133 โดยสัญญาณจะผ่านตัวขยายสัญญาณ (line driver) เพื่อเพิ่มความแรงของสัญญาณก่อนเข้าการ์ด

ส่วนที่สองคือชุดตรวจรับส่งภาพ จะติดตั้งกล้องดิจิตอลแบบยูเอสบี (USB camera) ยี่ห้อ Logitech รุ่นHD Pro c920 ดังรูปที่ 4.4 สามารถส่งสัญญาณวิดีโอ ในระดับ HD 1080 P ไปยังคอมพิวเตอร์ควบคุม โดยจะส่งค่าผ่านระบบ USBไปยังเครื่องโฮส (Host PC) แล้วทำการอ่านข้อมูลผ่านแล้วประมวลผมค่าตัวแปรต่างๆ แล้วส่งข้อมูลให้โปรแกรมควบคุมผ่านทาง โปรโตคอล TCP/UDP แล้วทำการประมวลผลส่งไปควบคุมต่อไป



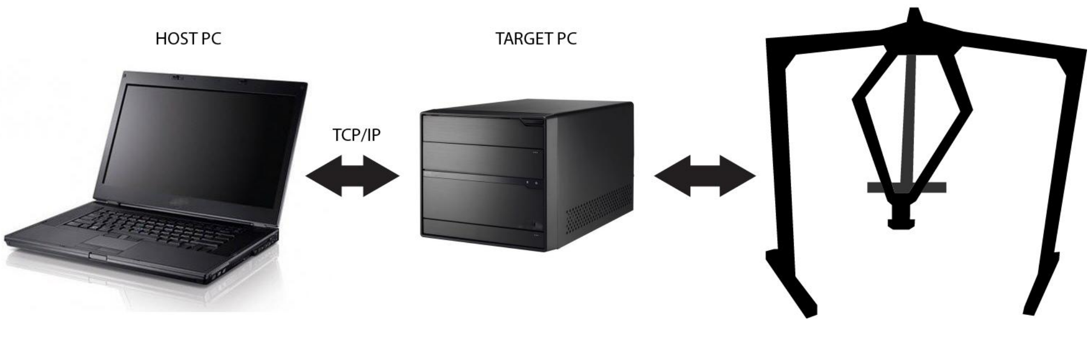
รูปที่ 4.8 แผนภาพระบบควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์เดลต้าที่พัฒนาขึ้น

ส่วนที่สามคือชุดควบคุมหัวพิมพ์สามมิติประกอบด้วยชุดหัวฉีดสามมิติ ชุดควบคุมการไหลของเส้นพลาสติก ชุดควบคุมอุณหภูมิของหัวฉีด การควบคุมหัวฉีดทำได้โดยการรับสัญญาณคำสั่งผ่านทางรหัสแบบ G-Code จากนั้นโปรแกรมควบคุมการพิมพ์จะทำการประมวลผล แล้วส่งสัญญาณควบคุมผ่านทางโปรโตคอล USB ไปยังบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ที่ติดตั้งวงจรควบคุมกระแส และชุดอ่านค่าอุณหภูมิของหัวฉีด อ่านกลับมายังไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อประมวลผล และส่งสัญญาณควบคุมให้อุณหภูมิได้ค่าตามที่ต้องการ

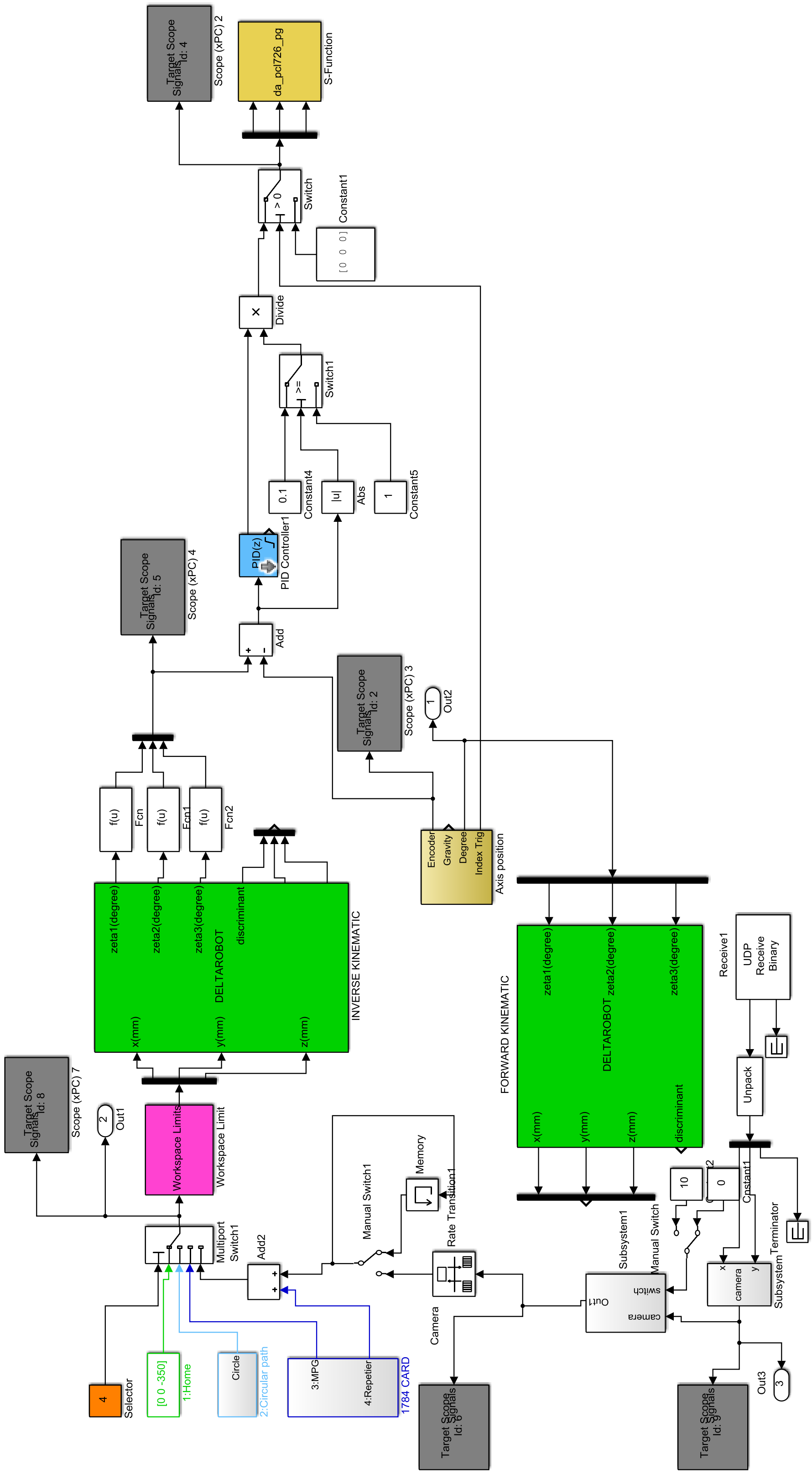
ส่วนที่สี่คือชุดควบคุมด้วยมือ การทำงานของหุ่นยนต์จุฬาเดลต้าจะทำงานได้สะดวกยิ่งขึ้นถ้าสามารถควบคุมด้วยมือได้ การทำงานของระบบนี้จะรับสัญญาณจะอุปกรณ์ควบคุมด้วยมือ (Manual Pulse Generator) หรือ MPG โดยอุปกรณ์ตัวนี้จะทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณการควบคุมด้วยมือเป็นสัญญาณพัลส์แล้วส่งกลับเข้ามาที่เครื่องลูก (Target PC) ผ่านทางแผงวงจรควบคุมยี่ห้อ ADLINK รุ่น PCI-1784 จะนั้นจะทำการประมวลผลโดยการคำนวณกลับมาเป็นตำแหน่งเพื่อส่งไปยังส่วนควบคุมมอเตอร์

4.4 การพัฒนาโปรแกรม

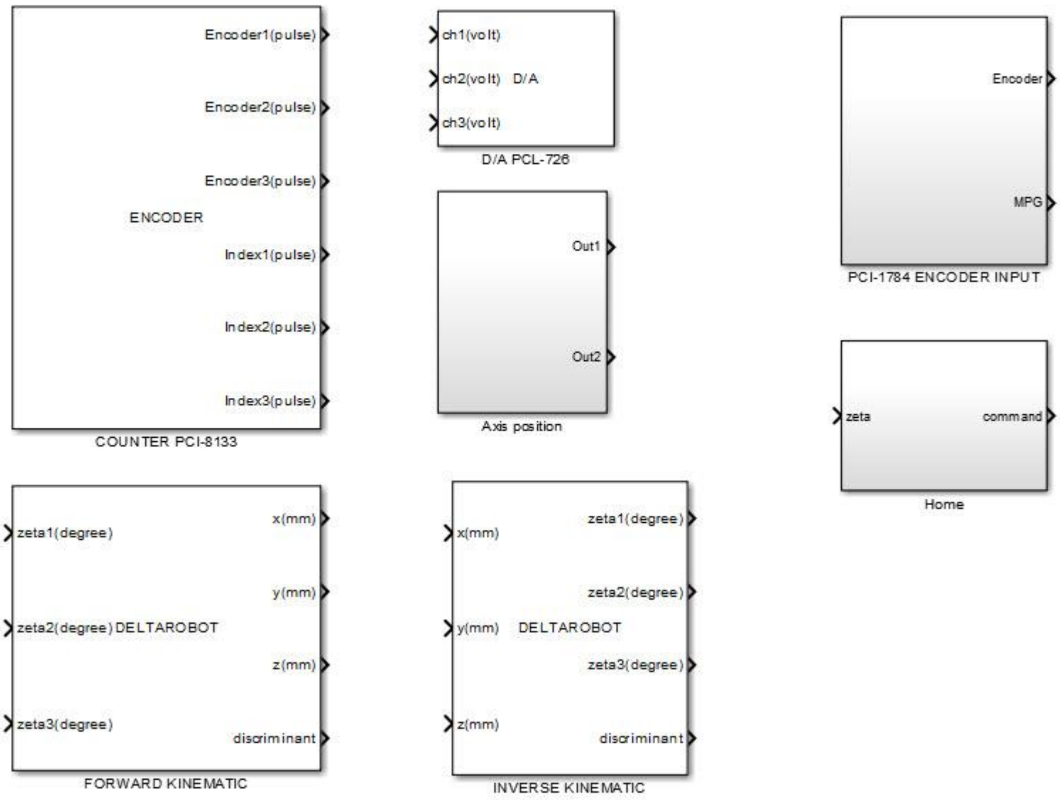
การพัฒนาโปรแกรมสำหรับควบคุมหุ่นยนต์จุฬาเดลต้า จะพัฒนาบนโปรแกรม MATLAB Simulink โดยใช้งานผ่านโมดูล XPC ซึ่งเป็นการโปรแกรมผ่าน Simulink ดังรูปที่ 4.10 การทำงานของ XPC จะใช้เครื่องคอมพิวเตอร์สองตัวในการทำงาน โดยเครื่องคอมพิวเตอร์เครื่อง หนึ่งจะทำหน้าที่เป็นเครื่องแม่ (Host Computer) และอีกเครื่องหนึ่งจะทำหน้าที่เป็นเครื่องลูก (Target Computer) ดังรูปที่ 4.9 การใช้งานทำได้โดยการเขียนโปรแกรมด้วยรูปแบบภาษาแบบกราฟิกบน Simulink ที่เครื่องแม่แล้วทำการคอมไพล์ (Compile) ซึ่งตัวโปรแกรมจะสร้างโปรแกรมภาษาเครื่องแล้วโหลดไปที่เครื่องลูกเพื่อประมวลผลในเวลาจริง [39] โดยเครื่องลูกติดตั้งแผงวงจรทั้งหมดสำหรับควบคุมหุ่นยนต์จุฬาเดลต้าไว้ การพัฒนาโปรแกรมด้วยวิธีนี้ทำให้สามารถจัดการในเรื่องของการคำนวณสมการอนุพันธ์สามัญ (ODE) การจัดการความเร็วของแต่ละวงจร (Multi rate) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ช่วยลดระยะเวลาในการโปรแกรมลงได้เป็นอย่างมาก เป็นผลให้สามารถพัฒนาชุดคำสั่งในการควบคุมแบบซับซ้อนได้ง่ายมากขึ้น



รูปที่ 4.9 แผนภาพการใช้งาน XPC



รูปที่ 4.10 โปรแกรมควบคุมที่เขียนโดยใช้ Simulink



รูปที่ 4.11 บล็อก Simulink ที่พัฒนาขึ้น

การพัฒนาโปรแกรม Simulink บนโมดูล XPC ด้วยวิธีนี้มีจุดเด่นคือสามารถจัดการสัญญาณได้อย่างมีประสิทธิภาพ แก้ไขหรือดัดแปลงโปรแกรมได้ง่าย แต่ก็จะมีจุดอ่อนตรงที่การจัดการในเรื่องของลำดับการประมวลผล หรือการโปรแกรมค่อนข้างยุ่งยากและโปรแกรมติดต่อกับแผงควบคุมต่างๆ ต้องการพัฒนาขึ้นมาเองซึ่งต้องใช้เวลาในเบื้องต้นค่อนข้างมาก การพัฒนาโปรแกรมนั้นต้องอาศัยความเข้าใจเรื่องระบบการทำงานของวงจรสัญญาณของแผงวงจรแต่ละชนิด ผนวกกับความเข้าใจในเรื่องการเขียนโปรแกรมบนแผนที่หน่วยความจำ (Memory maps) ติดต่อกับระบบบัสแบบ PCIและ ISA ให้สั่งการแผงวงจรต่างๆ ให้ทำงานได้ตามที่ต้องการ โปรแกรมติดต่อกับแผงวงจรที่ผู้วิจัยได้พัฒนาขึ้นนั้นประกอบด้วย โปรแกรมอ่านข้อมูลจากวงจรนับสำหรับอ่านสัญญาณข้อมูลเซนเซอร์วัดมุม, โปรแกรมสั่งงานโมดูลดิจิตอลเป็นอนาล็อก สำหรับส่งสัญญาณเอาท์พุทให้กับตัวขับมอเตอร์ และโปรแกรมอ่านค่าอินพุทแบบดิจิตอลสำหรับรับข้อมูลจากตัวควบคุมด้วยมือดังรูปที่ 4.11 นอกจากนี้ยังได้พัฒนาโปรแกรมคำนวณจลศาสตร์ไปข้างและจลศาสตร์ย้อนกลับ อีกด้วย ทำให้ใช้งานการเขียนโปรแกรมบน Simulink โมดูลมีความสะดวกในการทำงาน ทำให้การพัฒนาโปรแกรมควบคุมไปอย่างรวดเร็ว

บทที่ 5.
การควบคุมหุ่นยนต์เดลต้า

ในบทนี้จะกล่าวถึงควบคุมหุ่นยนต์จุฬาเดลต้า โดยจะแบ่งการทดสอบออกเป็นสามประเภท คือ การทดสอบควบคุมหุ่นยนต์เดลต้าเป็นการทดสอบประสิทธิภาพในการควบคุมตำแหน่งของแขนท่อนบนของหุ่นยนต์ ,การทดสอบความแม่นของตัวหุ่นยนต์เดลต้าและการทดสอบความสามารถในการติดตามสัญญาณควบคุม

5.1 การทดสอบระบบควบคุม

จากที่กล่าวมาแล้วการทำของหุ่นยนต์จุฬาเดลต้าจะทำงานด้วยการควบคุมตำแหน่งแขนท่อนบนหุ่นยนต์ โดยการคำนวณผ่านองศาการบิดของแขนท่อนบนหาได้จากการคำนวณผ่าน จลศาสน์ไปข้างหน้าซึ่งจะใช้ค่าตำแหน่งปลายของปลายแขนที่ต้องการไปคำนวณ การควบคุมตำแหน่งของปลายแขนหุ่นยนต์ทำได้โดยควบคุมตำแหน่งมุมบิดของมอเตอร์แต่ละตัวที่ต่อไปยังแกนแขนท่อนบน จากโครงสร้างของหุ่นยนต์เดลต้าที่ถูกออกแบบมาให้ข้อต่อแขนท่อนล่างมีน้ำหนักแบบมาก จนสามารถละทิ้งแรงที่เกิดจากชิ้นส่วนนี้ได้ การควบคุมหุ่นยนต์เดลต้าคือการควบคุมแขนท่อนบนเป็นหลัก โดยตัวควบคุมที่ใช้คือการควบคุมแบบสัดส่วนบวกกับแบบอนุพันธ์ (PD Control) การเลือกใช้ตัวควบคุมนี้เนื่องจากระบบขับเคลื่อนมอเตอร์เป็นการควบคุมแรงบิดโดยตรง ทำให้ system typeของระบบ มีค่าเท่ากับ 1 ซึ่งทำให้การใช้ตัวควบคุมแบบสัดส่วนบวกกับแบบอนุพันธ์ก็เพียงพอที่จะใช้งาน เนื่องจากทำให้ ช่วงผ่อนผันที่ยอมรับได้ (Steady state error) มีค่าใกล้เคียงศูนย์ โดยการควบคุมนั้นจะเป็นการนำเอาค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งมุมบิดของมอเตอร์ คำนวณผ่านตัวควบคุม ดังสมการที่ 5.1

ระบบควบคุมแบบสัดส่วนบวกกับแบบอนุพันธ์แสดงอยู่ในรูปสมการ

$$\Gamma = K_p \cdot (\Theta_d - \Theta) + K_d \cdot \frac{d(\Theta_d - \Theta)}{dt} \qquad (5.1)$$

โดยที่

T คือสัญญาณเอาท์พุทแรงบิดที่ออกจากตัวควบคุม

K_p คือค่าตัวคูณสัดส่วน

K_d คือค่าตัวคูณอนุพันธุ์

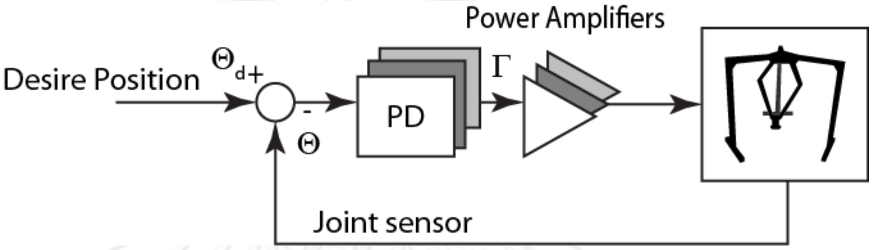
$\Theta_d = [\theta_{d11} \quad \theta_{d12} \quad \theta_{d13}]^T$ คือค่ามุมที่ต้องการ

$\Theta_d = [\theta_{11} \quad \theta_{12} \quad \theta_{13}]^T$ คือค่ามุมที่วัดได้

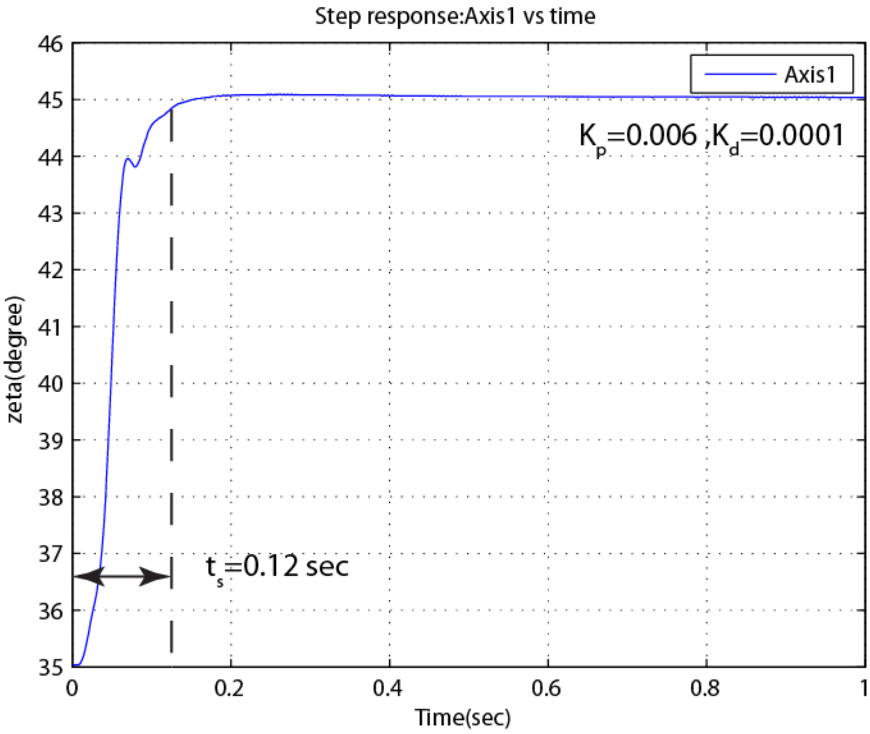
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

5.1.1 การทดสอบหาผลตอบสนองของการควบคุมแขนท่อนบนด้วยสัญญาณแบบสเต็ป

การทดสอบนี้เป็นการทดสอบให้แขนท่อนบนของหุ่นยนต์จุฬาเดลต้าเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการเพื่อหาผลตอบสนองต่อสัญญาณป้อนเข้า โดยสัญญาณที่ป้อนเข้ามีลักษณะเป็นรูปสเต็ป (Step input) ซึ่งมีขนาดเท่ากับ 10 องศา โดยใช้ตัวควบคุมแบบสัดส่วนบวกกับแบบอนุพันธ์ คำนวณหาค่าแรงบิด เพื่อส่งค่าสัญญาณไปยังอุปกรณ์ควบคุมมอเตอร์ต่อไป (Motor controller and power amplifier) ดังรูปที่ 5.1 ในการทดสอบได้ทดลองปรับค่า K_p และ K_d จนได้ค่าผลตอบสนองต่อสัญญาณแบบสเต็ปมีค่าที่ต้องการ โดยตอบสนองต่อค่าสัญญาณแบบสเต็ป 10องศา แสดงในรูปที่ 5.2 ซึ่งค่าที่วัดได้นี้ วัดที่ความถี่ 1000 เฮิรตซ์

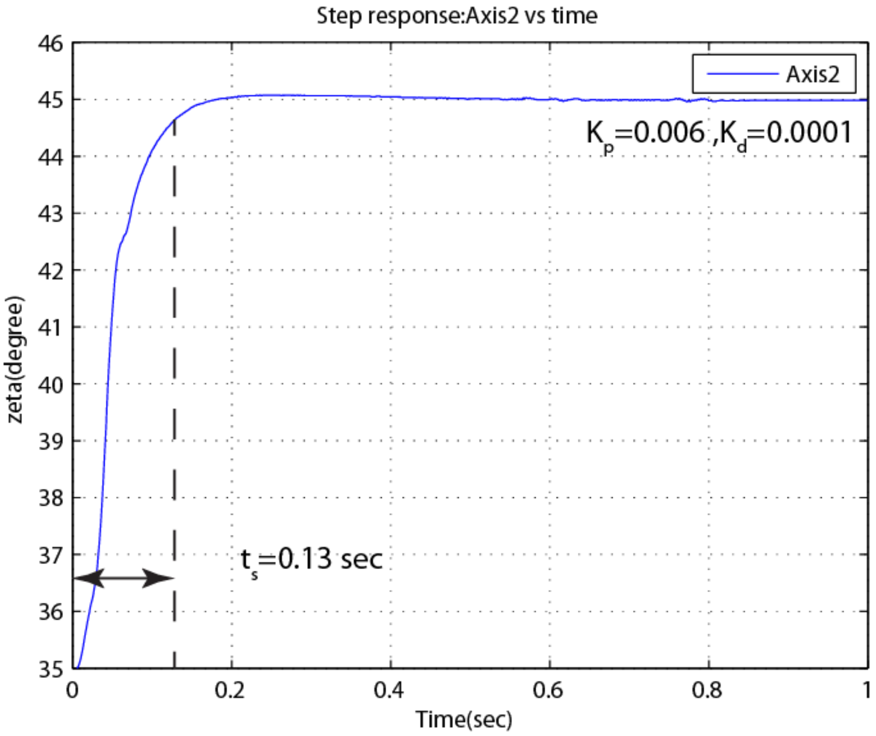


รูปที่ 5.1 แผนภาพการระบบควบคุมแขนท่อนบนของหุ่นยนต์เดลต้า

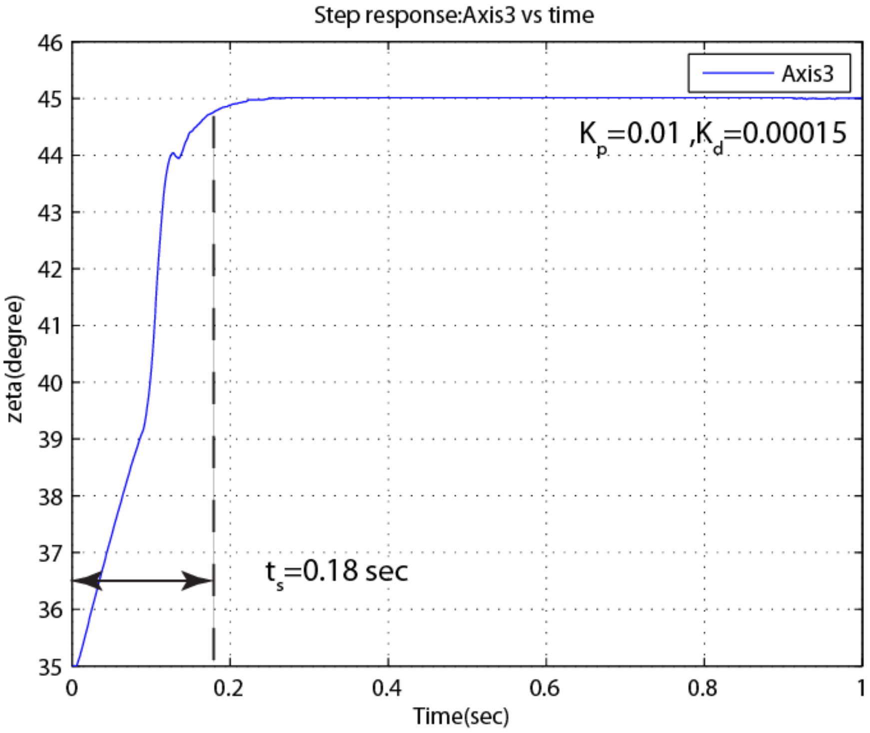


ก.ผลตอบสนองต่อสัญญาณมุมที่ต้องการเท่ากับ 10 องศา ของแกนที่ 1

รูปที่ 5.2 ผลตอบสนองต่อสัญญาณมุมที่ต้องการเท่ากับ 10 องศา



ข.ผลตอบสนองต่อสัญญาณมุมที่ต้องการเท่ากับ 10 องศา ของแกนที่ 2



ค.ผลตอบสนองต่อสัญญาณมุมที่ต้องการเท่ากับ 10 องศา ของแกนที่ 3

รูปที่ 5.2 ผลตอบสนองต่อสัญญาณมุมที่ต้องการเท่ากับ 10 องศา (ต่อ)

จากรูปที่ 5.4 ลักษณะของการตอบสนองของระบบได้คือ

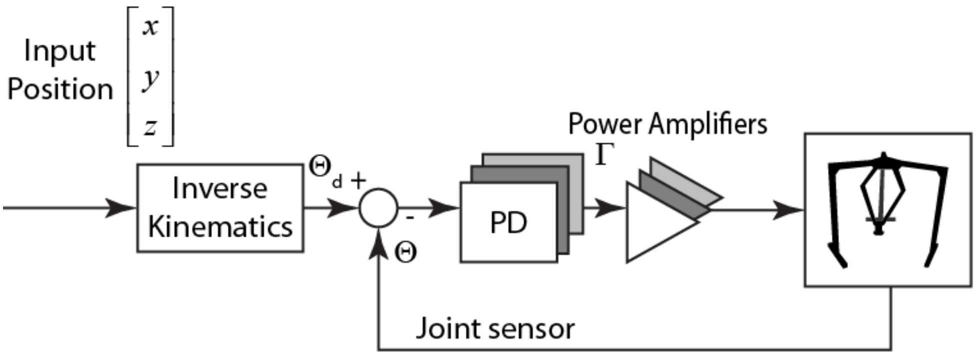
ในแนวแกนที่1 ใช้ $K_p = 0.006$ และ $K_d = 0.001$มีลักษณะของผลตอบสนองดังนี้ เวลาเข้าที่ t_s (Setting time) เท่ากับ 0.12 วินาที และช่วงผ่อนผันที่ยอมให้ได้ (steady state error) < 0.08องศา

ในแนวแกนที่2 ใช้ $K_p = 0.006$ และ $K_d = 0.001$มีลักษณะของผลตอบสนองดังนี้ เวลาเข้าที่ t_s (Setting time) เท่ากับ 0.12 วินาที และช่วงผ่อนผันที่ยอมให้ได้ (steady state error) < 0.08องศา

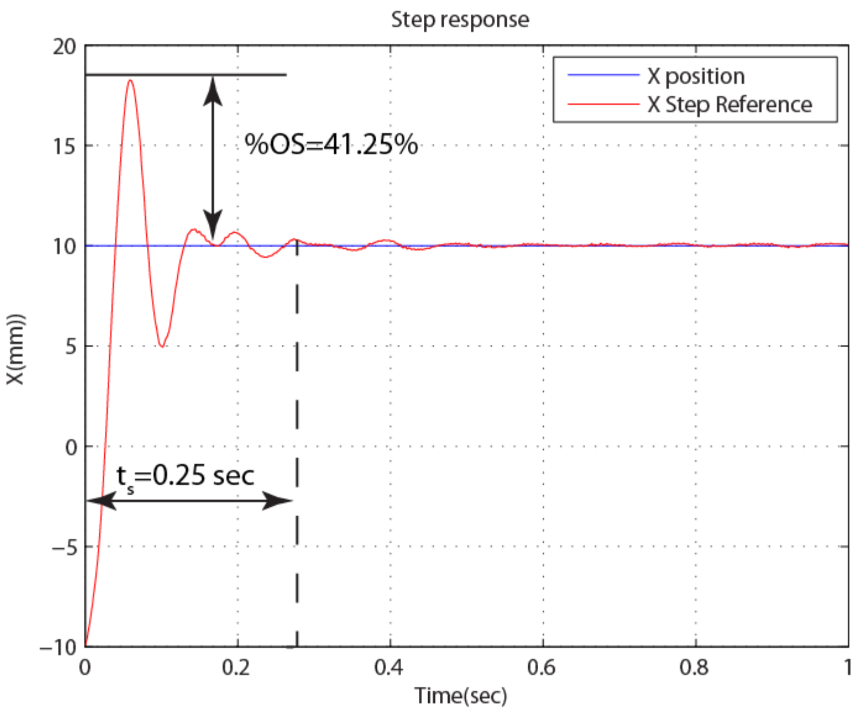
ในแนวแกนที่3 ใช้ $K_p = 0.01$ และ $K_d = 0.0015$มีลักษณะของผลตอบสนองดังนี้ เวลาเข้าที่ t_s (Setting time) เท่ากับ 0.18 และช่วงผ่อนผันที่ยอมให้ได้ (steady state error) < 0.08องศา

5.1.2 การทดสอบหาผลตอบสนองของ มอเตอร์ด้วยสัญญาณแบบสเต็ป

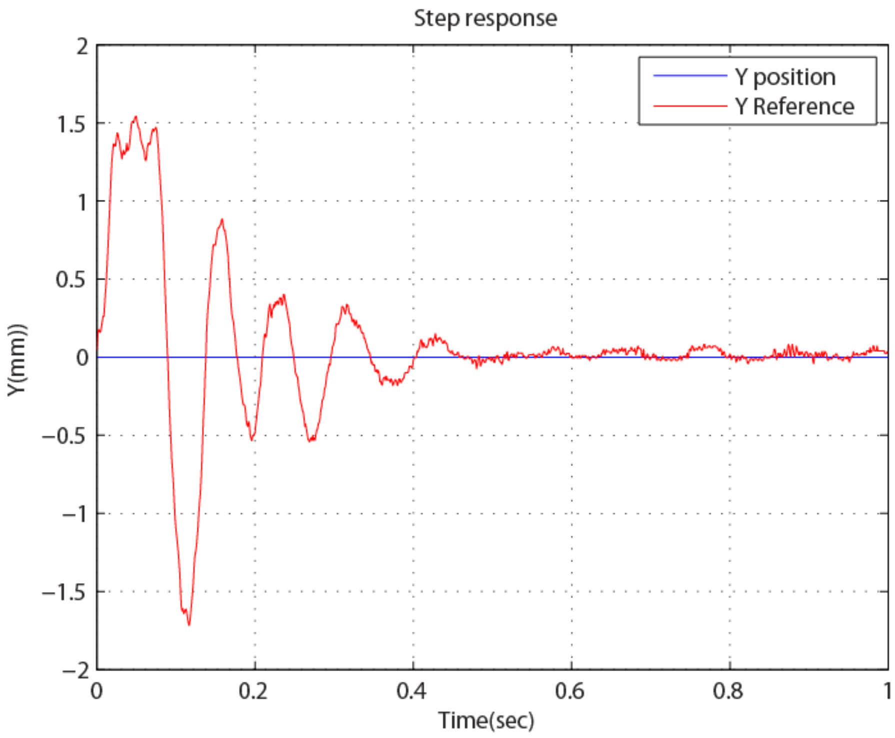
การทดสอบนี้เป็นการทดสอบให้ปลายแขนของหุ่นยนต์จุฬาเดลต้าเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการเพื่อหาผลตอบสนองต่อสัญญาณป้อนเข้า โดยสัญญาณที่ป้อนเข้ามีลักษณะเป็นรูป สเต็ป (Step input) ซึ่งมีขนาดเท่ากับ 20 มิลลิเมตรดังรูปที่ 5.3 โดยการควบคุมทำงานรับค่าสัญญาณตำแหน่งที่ต้องการในที่นี้คือสัญญาณการเคลื่อนที่ แล้วนำไปคำนวณผ่านจลศาสตร์ย้อนกลับเพื่อให้ได้ค่ามุมที่ต้องการในแต่ละแกนจากนั้นใช้ตัวควบคุมแบบสัดส่วนบวกกับแบบอนุพันธ์ (PD Control) คำนวณหาค่าแรงบิดที่ต้องการและส่งค่าสัญญาณไปยังอุปกรณ์ขยายสัญญาณ (Motor Controller and power amplifier) เพื่อควบคุมมอเตอร์ให้ได้แรงบิดตามที่ต้องการการควบคุมอาศัยการป้อนกลับของมุมองศาการเคลื่อนที่ของแกนหมุนมาชดเชย โดยผลตอบสนองต่อค่าสัญญาณแบบสเต็ป ขนาด 20 มิลลิเมตร แสดงในรูปที่ 5.4 โดยค่าที่วัดได้นี้ วัดที่ความถี่ 1000 เฮิรตซ์



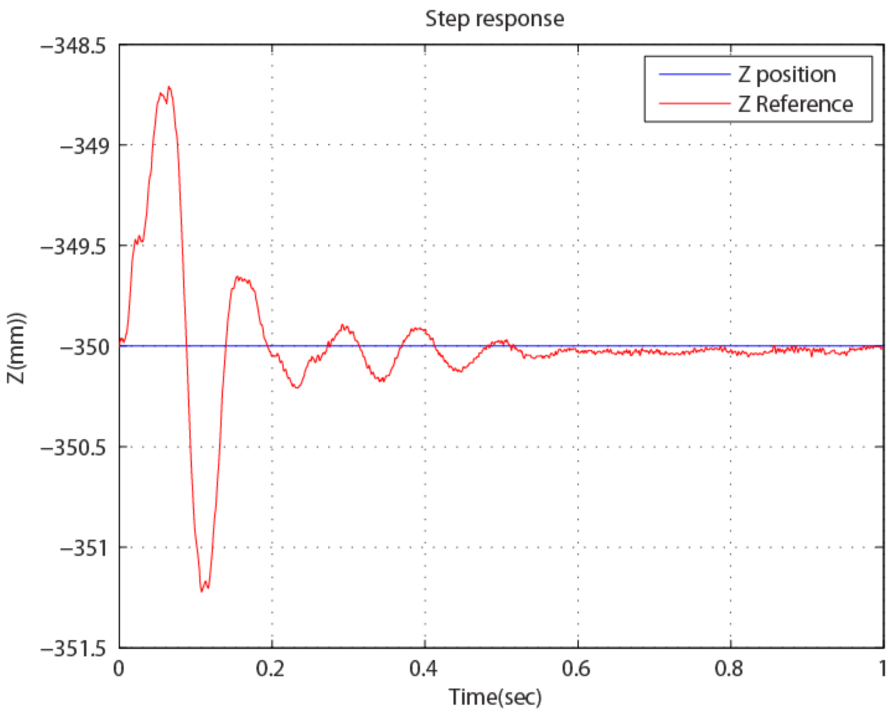
รูปที่ 5.3 แผนภาพการระบบควบคุมตำแหน่งแขนท่อนบนของหุ่นยนต์เดลต้า



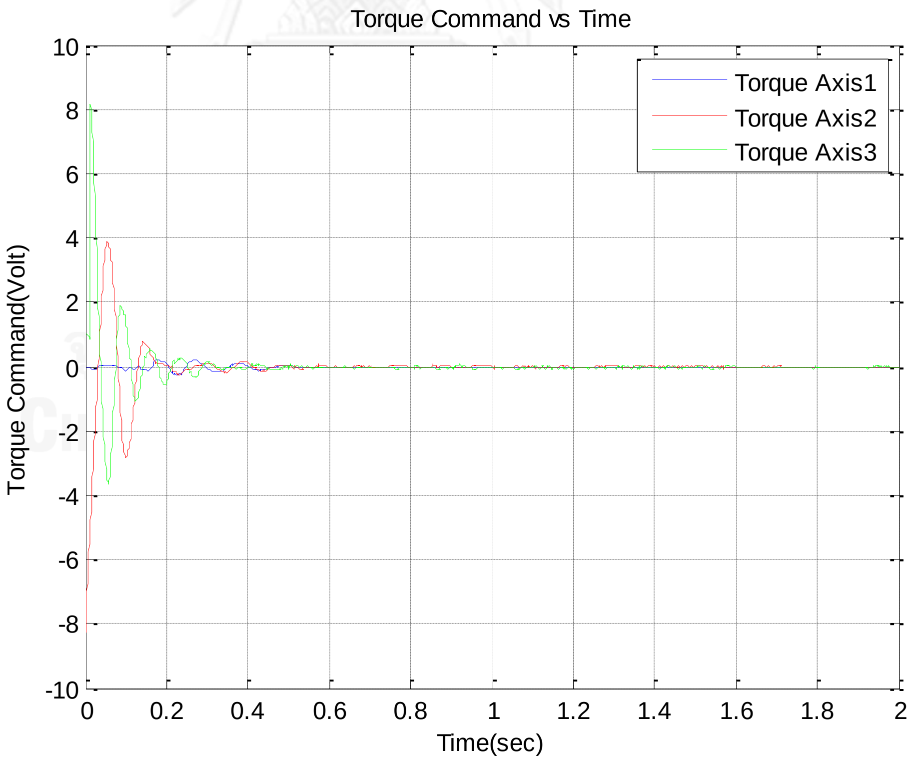
ก.ตำแหน่งของปลายแขนต่อเวลาในแนวแกน x



ข. ตำแหน่งของปลายแขนต่อเวลาในแนวแกน y



ค. ตำแหน่งของปลายแขนต่อเวลาในแนวแกน z



ง..ค่าแรงบิดต่อเวลา

รูปที่ 5.4 ผลตอบสนองต่อสัญญาณตำแหน่ง x= 20 มิลลิเมตร

จากรูปที่ 5.4 ลักษณะของการตอบสนองของระบบได้คือ

ในแนวแกน x มีลักษณะของผลตอบสนองดังนี้ เวลาเข้าที่ t_s (Setting time) เท่ากับ 0.25 วินาที , โอเวอร์ชูตสูงสุด M_p (percent overshoot) เท่ากับ 41.25% และช่วงผ่อนผันที่ยอมให้ได้ (steady state error) < 0.05มิลลิเมตร

จะผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าการเคลื่อนปลายแขนหุ่นยนต์จุฬาเดลต้า ในทิศทางแกน x จะเห็นว่าตัวขับข้อต่อหัวไหล่ทั้งสามแกน จะต้องเคลื่อนที่ไปในตำแหน่งมุมที่ต้องการ แต่การเคลื่อนที่ไปส่งผลให้ มุมบิดข้อต่ออีกสองตัวที่เหลือ คลาดเคลื่อนไปด้วย ดังนั้นการควบคุมตำแหน่งของหุ่นยนต์โครงสร้างแบบขนาน จึงซับซ้อนกว่าหุ่นโครงสร้างอนุกรม

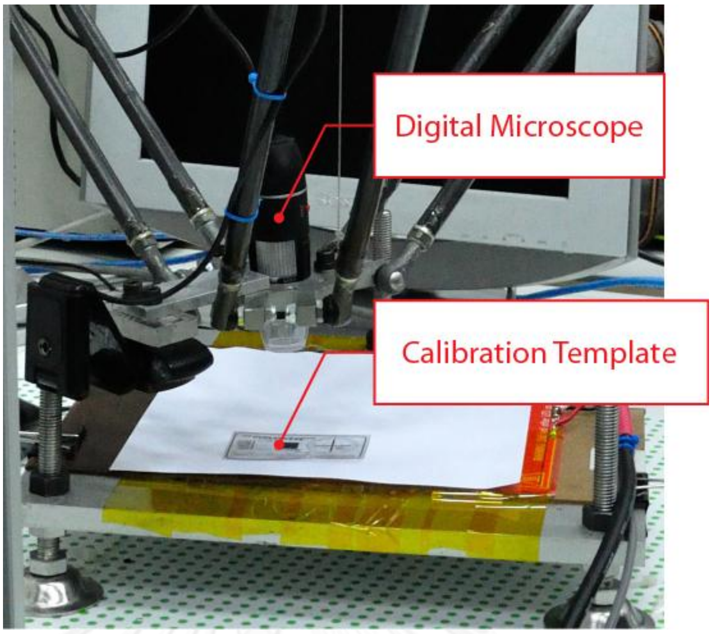
5.2 การทดสอบการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์จุฬาเดลต้า

ในหัวข้อนี้เป็นการทดสอบการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์จุฬาเดลต้า โดยแบ่งการทดสอบออกเป็นสองหัวข้อ คือการทดสอบการเคลื่อนที่ปลายแขนของหุ่นยนต์จุฬาเดลต้าซึ่งเป็นการทดสอบหาความแม่นในการควบคุมปลายแขนหุ่นยนต์ว่ามีความแม่นเพียงใด และการทดสอบการเคลื่อนที่ในระนาบของปลายแขนหุ่นยนต์จุฬาเดลต้า เป็นการทดสอบเพื่อตรวจสอบดูว่าปลายแขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่อยู่ในระนาบ

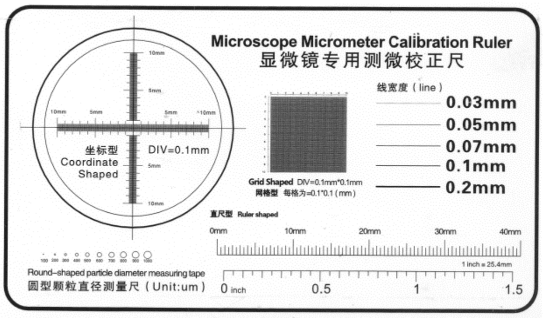
5.2.1 การทดสอบการเคลื่อนที่ของปลายแขนหุ่นยนต์จุฬาเดลต้า

การทดสอบการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์จุฬาเดลต้าเป็นการทดสอบเพื่อหาความแม่นในการควบคุมปลายแขนของหุ่นยนต์จุฬาเดลต้า โดยการทดสอบจำนำกล้องจุลทรรศน์ดิจิตอลดังรูปที่ ก.6 ไปติดไว้ตำแหน่งปลายแขนหุ่นยนต์ดังรูปที่ 5.5 จากนั้นทำการทดสอบโดยเคลื่อนตำแหน่งปลายแขนของหุ่นยนต์ออกไปในระหว่างสองตำแหน่งแล้วเก็บค่าที่อ่านได้จากแผ่นทดสอบดังรูปที่ 5.6 โดยการถ่ายภาพกล้องจุลทรรศน์ดิจิตอลออกมาขณะก่อนเคลื่อนที่และหลังเคลื่อนที่มาวิเคราะห์หาตำแหน่งที่เคลื่อนไป จะได้ค่าของความแม่นในการเคลื่อนที่ของตำแหน่งปลายแขนดังรูปที่ 5.7

การทดสอบจะทำการเคลื่อนที่ไปมาระหว่างสองจุด จำนวน 15 รอบ ซึ่งทำในทิศทางแกน x และ y โดยผลการทดลองมีค่าดัง ตารางที่ ข.1 และ ตารางที่ ข.2 จากตารางจะสามรถหาค่าความแม่นได้ดังนี้ จากจุดเริ่มต้น (x_1, y_1) และจุดสุดท้าย (x_2, y_2) จะสามารถหาระยะกระจัดของจุดทั้งสองจุดได้จากสมการ $d = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (\mathrm{y}_1 - \mathrm{y}_2)^2}$



รูปที่ 5.5 หุ่นยนต์จุฬาเดลต้าและติดตั้งกล้องจุลทรรศน์ดิจิตอล

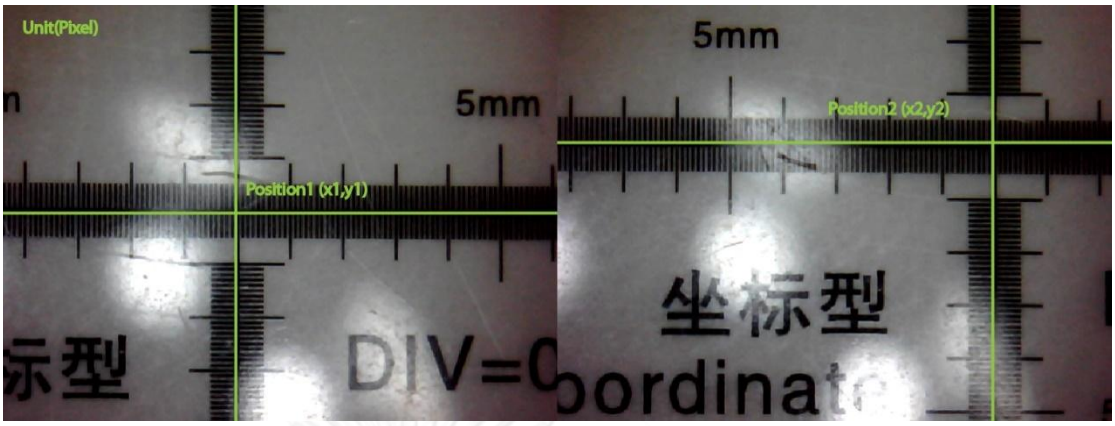


รูปที่ 5.6 แผ่นสอบเทียบด้วยกล้อง

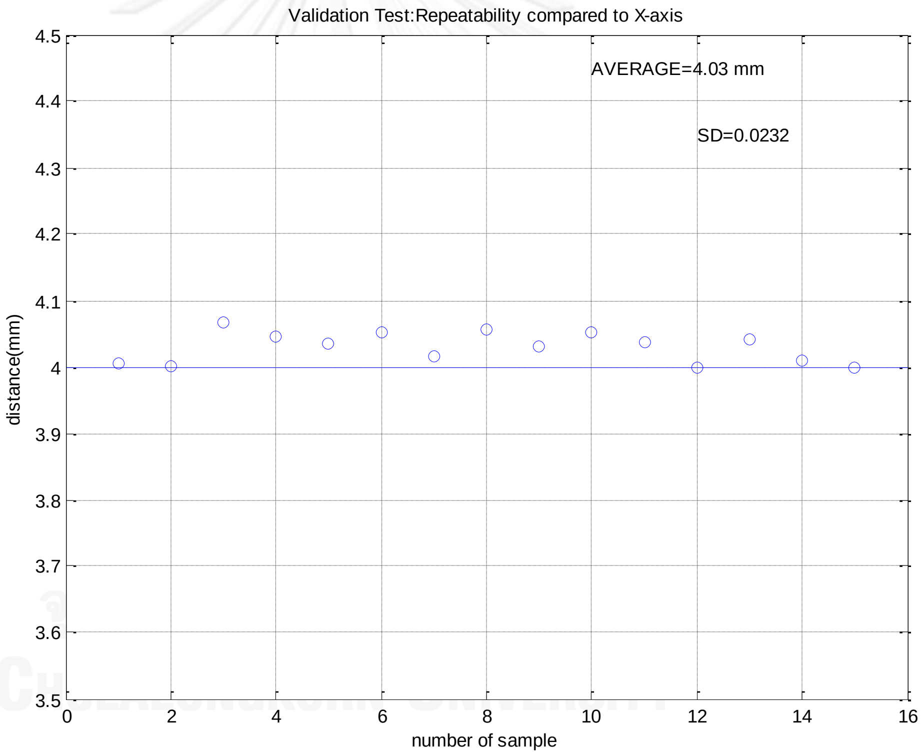
จากนั้นมาแปลงค่าเป็นระยะทางจริง โดยในแนวแกน x มีค่าสัดส่วนเท่ากับ 1 มิลลิเมตร ต่อ 61.20 พิกเซล จะได้ค่าระยะกระจัดของการเคลื่อนที่มา ซึ่งค่าเฉลี่ยของการเคลื่อนที่ในแนวแกน x เท่ากับ 4.03 มิลลิเมตร และมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.023 ดังรูปที่ 5.8 และมีความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 19.40 เปอร์เซ็นต์

ต่อจากนั้นทำการหาค่าความแม่นของแกน y มีค่าผลการทดลองดังรูปที่ 5.9 ค่าเฉลี่ยของการเคลื่อนที่ในแนวแกนy เท่ากับ 4.11 มิลลิเมตร และมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.021 และมีความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 17.87 เปอร์เซ็นต์

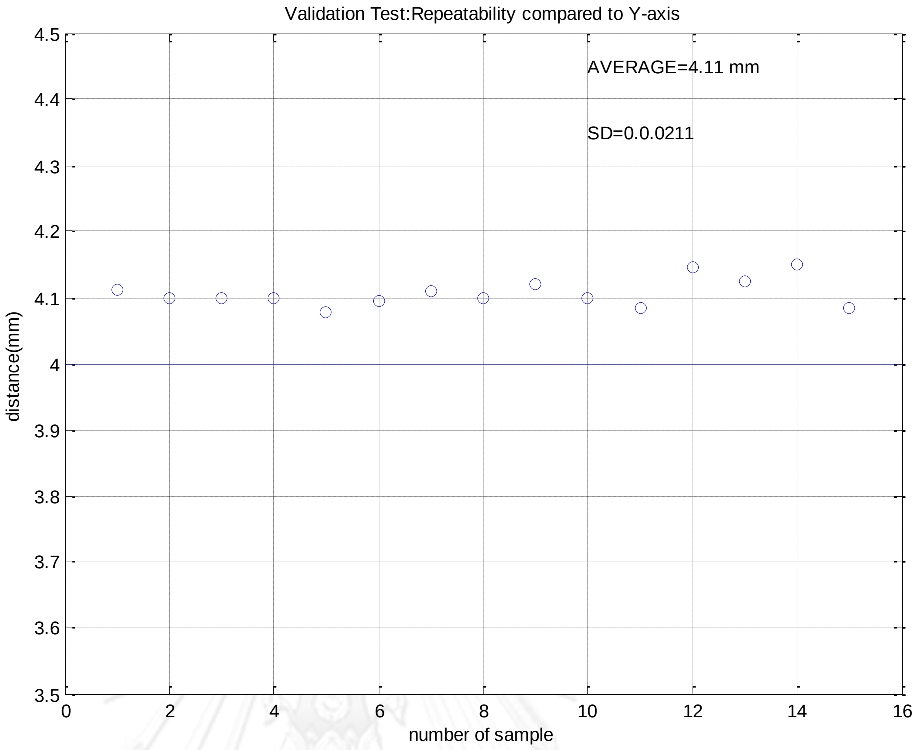
จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า ความสามารถในการควบคุมของหุ่นยนต์จุฬาเดลต้ามีความเที่ยง แต่ไม่มีความแม่น มีความคลาดเคลื่อน 19.40 เปอร์เซ็นต์ในแนวแกน x และมีค่าความคลาดเคลื่อนในแนวแกนy เท่ากับ 17.87เปอร์เซ็นต์ ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นนี้อาจเกิดจากค่าการสอบเทียบที่ไม่ถูกต้อง และความผิดพลาดในการขึ้นรูปตัวหุ่นยนต์จุฬาเดลต้า



รูปที่ 5.7 การวัดความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งปลายแขน



รูปที่ 5.8 แผนภาพความแม่นของการเคลื่อนที่ในแนวแกน x

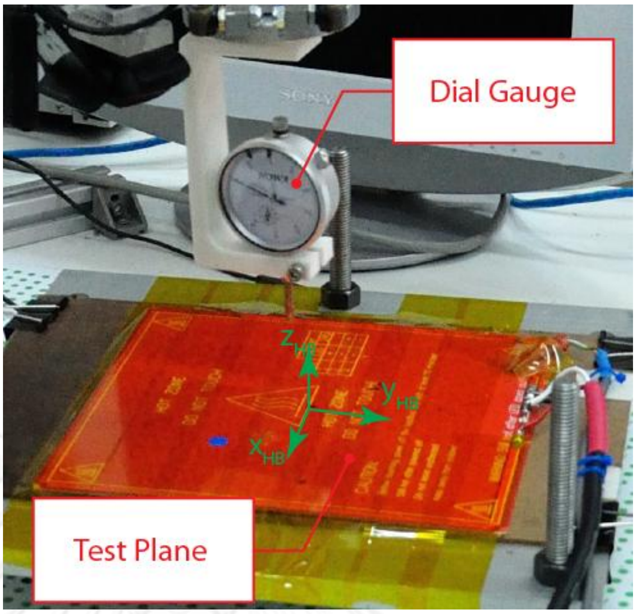


รูปที่ 5.9 แผนภาพความแม่นของการเคลื่อนที่ในแนวแกน y

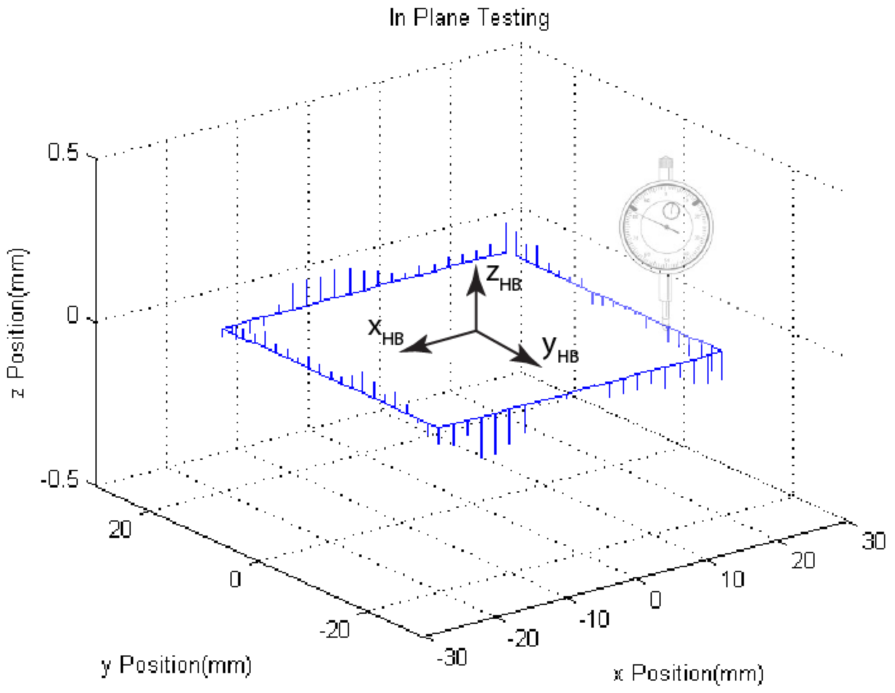
5.2.2 การทดสอบการเคลื่อนที่ในระนาบของปลายแขนหุ่นยนต์จุฬาเดลต้า

การทดสอบการเคลื่อนที่ในระนาบของหุ่นยนต์จุฬาเดลต้า เป็นการทดสอบเพื่อดูว่าหุ่นยนต์สามารถเคลื่อนอยู่ในระนาบมากน้อยเพียงใด การทดสอบจะนำเครื่องมือวัดละเอียดแบบเข็ม (Dial gauge) ไปติดตั้งไว้ที่ปลายแขนของหุ่นยนต์ดัง รูปที่ 5.10 จากนั้นทำการเคลื่อนที่ตำแหน่งปลายแขนของหุ่นยนต์ไปยังตำแหน่งเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยการเคลื่อนที่จะทำการเคลื่อนตำแหน่งปลายแขนออกไป 2 มิลลิเมตร จำนวน 80 จุดทดลอง ดังตารางที่ ข.3และตารางที่ ข.4 จากตารางจะเห็นว่ามีความคลาดเคลื่อนในแกน z นั้นมีค่าความแตกต่างมากที่สุดเท่ากับ 0.021 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 5.11

จากรูปจะเห็นว่าการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์จุฬาเดลต้า มีการเคลื่อนที่อยู่ในระนาบ โดยความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยในแนวแกน z มีค่าเท่ากับ 0.037 มิลลิเมตร มีค่าความผิดพลาดสูงสุดเท่ากับ 0.087 มิลลิเมตร และมีความผิดพลาดต่ำสุดเท่ากับ -0.12 มิลลิเมตร จะเห็นได้ว่าการเคลื่อนที่ในแนวระนาบ X-Y มีความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าการเคลื่อนที่แนวแกน Y-Z และ X-Z ซึ่งน่าจะเกิดจากการรับโหลดภาระเพียงด้านเดียวแขนท่อนบน ส่งผล transmission backlash ของมอเตอร์มีค่าน้อยเนื่องจากมีแรงในแนวแกน z เพียงทิศทางเดียว ซึ่งทำให้ความเคลื่อนในการเคลื่อนที่มีความผิดพลาดน้อยกว่า

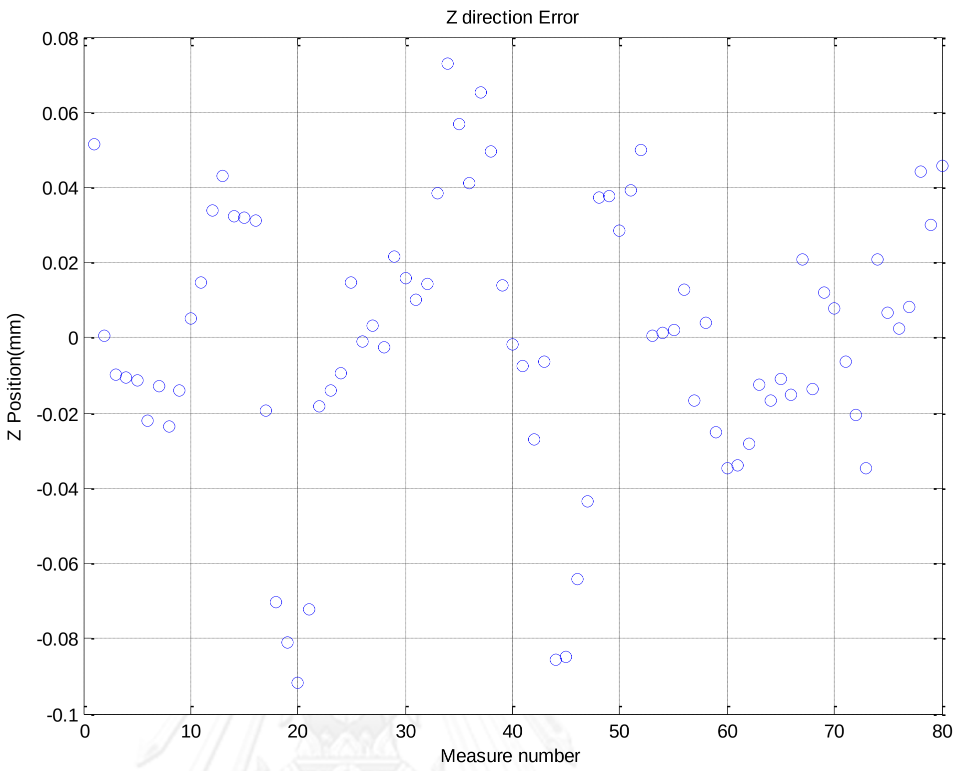


รูปที่ 5.10 การติดตั้งเครื่องมือวัดละเอียดแบบเข็มที่ปลายแขนหุ่นยนต์จุฬาเดลต้า



ก.กราฟตำแหน่งคลาดเคลื่อนในแนวแกน z

รูปที่ 5.11 ตำแหน่งปลายแขนหุ่นยนต์จุฬาเดลต้าเทียบกับแกน X-Y



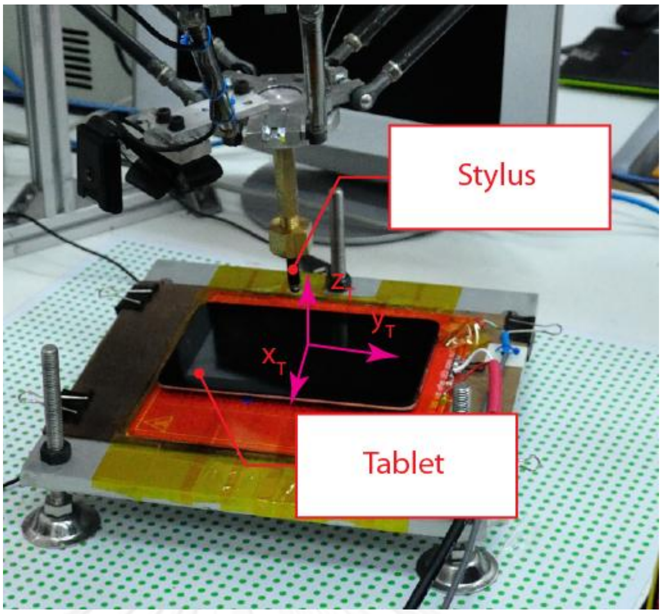
ข. แผนภาพตำแหน่งคลาดเคลื่อนในแต่ละจุด

รูปที่ 5.11 ตำแหน่งปลายแขนหุ่นยนต์จุฬาเดลต้าเทียบกับแกน X-Y (ต่อ)

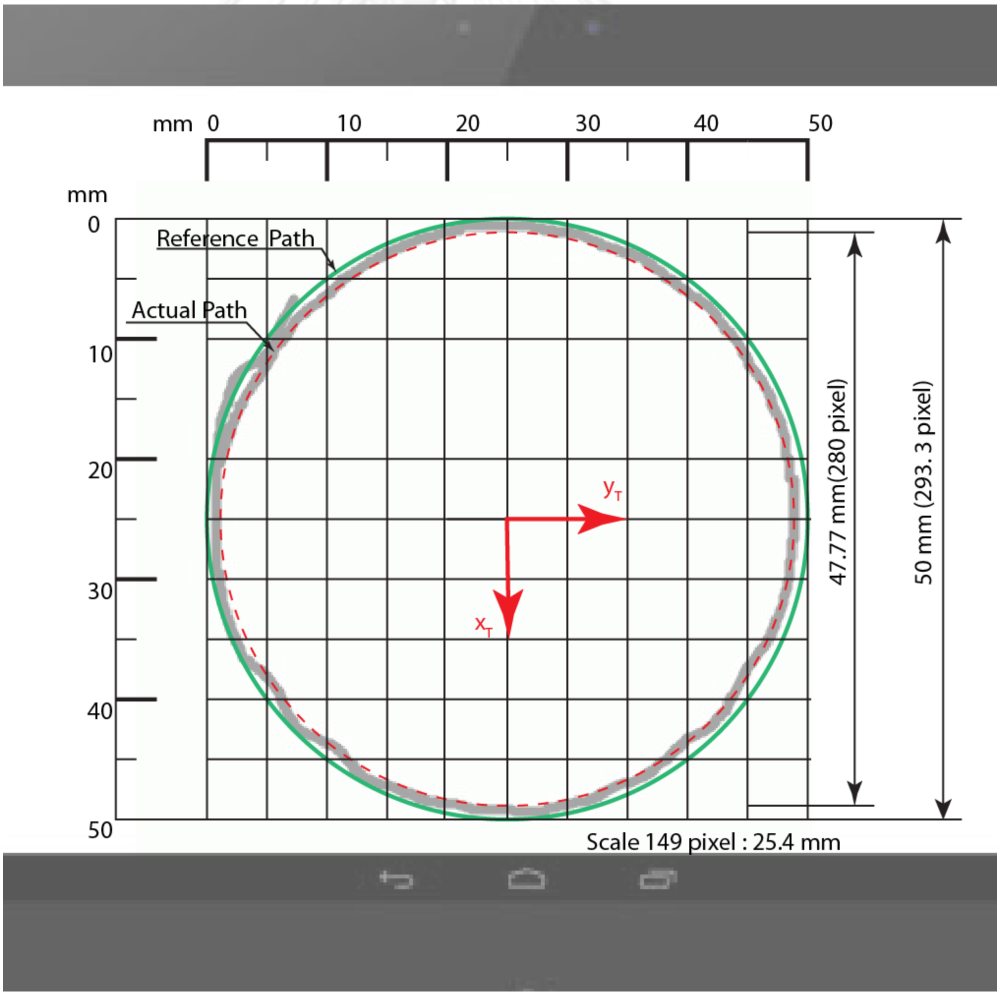
5.2.3 การทดสอบการเคลื่อนที่ปลายแขนหุ่นยนต์จุฬาเดลต้าโดยการเคลื่อนที่เป็นวงกลม

การทดสอบการเคลื่อนที่ปลายแขนหุ่นยนต์จุฬาเดลต้าโดยสัญญาณการเคลื่อนที่เป็นวงกลม ทำเพื่อทดสอบว่าการเคลื่อนที่ของปลายแขนถูกต้องเพียงใด การทดสอบนี้จะสร้างแนวการวิ่งของปลายแขนหุ่นยนต์เป็นรูปวงกลม ขนาด 50 มิลลิเมตร บนระนาบ x-y โดยการควบคุมที่แสดงไว้ในรูปที่ 5.3 โดยตัวควบคุมจะสร้างเส้นทางเดินวงกลม แล้วนำไปคำนวณผ่านจลศาสตร์ย้อนกลับแล้วส่งค่ามุมที่ต้องการไปยังตัวควบคุมองศาการหมุนดัง การทดสอบจะนำปลายแขนของหุ่นยนต์จะติดตัวปากกา (Stylus Pen) ดังรูปที่ 5.12 หลังจากนั้นหุ่นยนต์จะทำการเขียนรูป ลงไปบนแท็บแล็ต จนได้ภาพจากการเขียนดังรูปที่ 5.13

จากรูปที่ 5.13 จะสามารถคำนวณหาระยะการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ได้ โดยแท็บแล็ต ที่ใช้มีความละเอียดที่ 149 พิกเซล ต่อ 25.4.มิลลิเมตร จากค่าความละเอียดที่ได้จะสามารถหาระยะที่หุ่นยนต์ไป ซึ่งมีขนาดเท่ากับ 47.7 มิลลิเมตร จะเห็นว่ามีความคลาดเคลื่อนในการเคลื่อนเท่ากับ 2.23 มิลลิเมตร ซึ่งเกิดการ การคำนวณจลศาสน์ย้อนกลับที่ผิดพลาด เนื่องจากตัวแปรที่ใช้ในการคำนวณมีค่าไม่ถูกต้องและ ความผิดพลาดที่เกิดจากการขึ้นรูป จนทำให้มีความผิดพลาดดังกล่าวเกิดขึ้น



รูปที่ 5.12 การติดตั้งปากกาปลายแขนหุ่นยนต์จุฬาเดลต้าและแท็บแล็ต



รูปที่ 5.13 ผลการวาดสัญญาณวงกลมบนแท็บแล็ต

บทที่ 6.
การควบคุมหุ่นยนต์เดลต้าด้วยระบบกล้องดิจิตอล

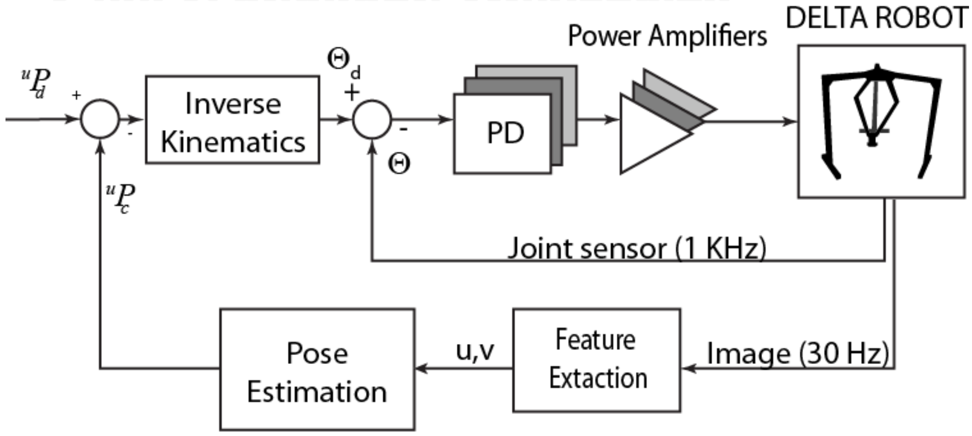
ในบทนี้จะเป็นการควบคุมหุ่นยนต์จุฬาเดลต้าด้วยกล้องดิจิตอลซึ่งจะใช้กล้องดิจิตอลแบบยูเอสบีที่ติดไว้ที่ตำแหน่งปลายแขน ตรวจเพื่อหาตำแหน่งของวัตถุ แล้วนำข้อมูลตำแหน่งไปใช้ชดเชยการควบคุมหุ่นยนต์เพื่อเพิ่มความแม่นการควบคุมขนของหุ่นยนต์ การทดสอบประสิทธิภาพการใช้งานระหว่างกล้องกับหุ่นยนต์เดลต้า และการประยุกต์ใช้ซอฟแวร์พิมพ์สามมิติใช้งานร่วมกับหุ่นยนต์เดลต้าที่ติดตั้งหัวพิมพ์สามมิติโดยใช้กล้องเข้ามาเพิ่มความแม่นในการเคลื่อนที่ของตำแหน่งปลายแขนของหุ่นยนต์ ซึ่งจะกล่าวในลำดับถัดไป

6.1 การหลักการควบคุมแขนกลด้วยกล้องดิจิตอล

การควบคุมแขนกลด้วยกล้องดิจิตอล แบ่งออกเป็นสองประเภทซึ่งแยกตามลักษณะการใช้ข้อมูลจากรูปภาพในการควบคุม คือการควบคุมโดยใช้ตำแหน่งเป็นหลัก(Position based visual servo) และการควบคุมโดยใช้พารามิเตอร์ภาพเป็นหลัก (Image based visual servo) [31, 40]โดยมีรายละเอียดดังนี้

6.1.1 การควบคุมโดยใช้ตำแหน่งเป็นหลัก

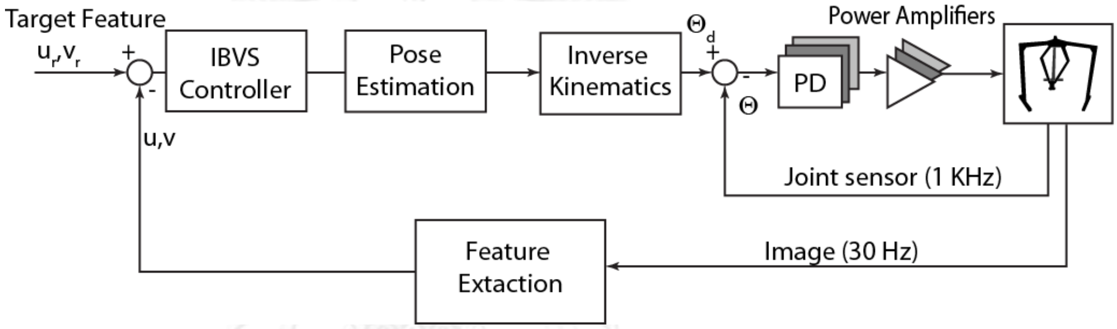
การควบคุมโดยใช้ตำแหน่งเป็นหลัก(Position based visual servo) จะนำภาพที่บันทึกได้มาคำนวณหาตำแหน่งเทียบกับแกนอ้างอิงกล้อง จากนั้น นำไปคำนวณหาตำแหน่งของวัตถุเทียบกับแกนอ้างอิงหุ่นยนต์ เมื่อทราบตำแหน่งที่ต้องการ ก็นำข้อมูลนั้นไปใช้ในการควบคุมหุ่นยนต์ให้ ได้ตำแหน่งที่ต้องการโดยสามารถแสดงเป็นแผนภาพบล็อกดังแสดงในรูปที่ 6.1



รูปที่ 6.1 แผนภาพการควบคุมโดยใช้ตำแหน่งเป็นหลัก

6.1.2 การควบคุมโดยใช้พารามิเตอร์รูปภาพเป็นหลัก

การควบคุมโดยใช้พารามิเตอร์รูปภาพ (Image Based Visual Servo) นั้น จะนำภาพที่บันทึกได้มาคำนวณหาตำแหน่งเทียบกับแกนอ้างอิงกล้องจากนั้นนำข้อมูลนี้ไปใช้ควบคุมหุ่นยนต์โดยตรง โดยที่ระบบควบคุมของหุ่นยนต์ ต้องใช้ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ในการแปลงพารามิเตอร์รูปภาพไปเป็นตำแหน่งของหุ่นยนต์รูปที่ 6.2 จากนั้นจึงใช้ความสัมพันธ์ไปใช้ในการควบคุมแขนกลให้เคลื่อนที่เข้าสู่จุดหมาย เมตริกซ์ที่เก็บความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของตำแหน่งของแขนกลกับการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์รูปภาพ เรียกว่าจาโคเบียนรูปภาพ (Image Jacobians) และค่าพารามิเตอร์รูปภาพอาจเป็นค่าพารามิเตอร์ในการวัดใดๆ ก็ได้ในรูปภาพ เช่นตำแหน่ง หรือระยะทางในรูปภาพ



รูปที่ 6.2 การควบคุมโดยใช้พารามิเตอร์ภาพเป็นหลัก

6.2 จาโคเบียนรูปภาพ

สมมติว่าแขนกลมี n ข้อต่อ และมีความอิสระของระบบ (DOF) เท่ากับ n และสมมติว่าตัวกล้องยึดติดอยู่ที่ปลายแขนกล เป้าหมายของการควบคุมนิยามในเทอมของพารามิเตอร์รูปภาพ m ตัว ให้ $\bar{q}$ เป็นเวคเตอร์ขนาด n ซึ่งแสดงตำแหน่งของข้อต่อแขนกล และ $\dot{r}$ แสดงตำแหน่งของปลายแขนกลเทียบกับแกนอ้างอิงคาทีเซียน และให้ $\bar{f}$ เป็นเวคเตอร์ขนาด m ซึ่งแสดงค่าพารามิเตอร์รูปภาพ ความสัมพันธ์ระหว่างเวคเตอร์ของความเร็วข้อต่อแขนกล $\dot{q}$ เวคเตอร์ของความเร็วของปลายแขน $\dot{r}$ จะอยู่ในเทอมของจาโคเบียนของแขนกล J (Robot Jacobians) และจะเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\dot{r} = J.\dot{q} \qquad (6.1)$$

โดยที่

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

$$\dot{q} = \begin{bmatrix} \dot{\theta}_{11} \\ \dot{\theta}_{12} \\ \dot{\theta}_{13} \end{bmatrix}$$

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial r_1}{\partial q_1} & \frac{\partial r_1}{\partial q_2} & .. & \frac{\partial r_1}{\partial q_n} \\ \frac{\partial r_2}{\partial q_1} & \frac{\partial r_2}{\partial q_2} & .. & \frac{\partial r_2}{\partial q_n} \\ .. & .. & .. & .. \\ \frac{\partial r_m}{\partial q_1} & \frac{\partial r_m}{\partial q_2} & .. & \frac{\partial r_m}{\partial q_n} \end{bmatrix}$$

การเปลี่ยนตำแหน่งของปลายแขนกล จะเป็นผลทำให้ค่าพารามิเตอร์รูปภาพเปลี่ยนไปและจะสามารถใช้การคำนวณโปรเจคชันแบบมุมตีบ เพื่อหาความสัมพันธ์นี้ และดังนั้นค่าอนุพันธ์ของค่าพารามิเตอร์เทียบกับเวลา $\dot{f}$ จะสัมพันธ์กับความเร็วของปลายแขน $\dot{r}$ ดังนี้

$$\dot{f} = J_r.\dot{r} \qquad (6.2)$$

โดยที่ ขนาด m x p ที่ตำแหน่งของแขนกล $\bar{q}$ และ

$$J_r = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial r_1} & \frac{\partial f_1}{\partial r_2} & .. & \frac{\partial f_1}{\partial r_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial r_1} & \frac{\partial f_2}{\partial r_2} & .. & \frac{\partial f_2}{\partial r_n} \\ .. & .. & .. & .. \\ \frac{\partial f_m}{\partial r_1} & \frac{\partial f_m}{\partial r_2} & .. & \frac{\partial f_m}{\partial r_n} \end{bmatrix}$$

ดังนั้นจะสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วของพารามิเตอร์รูปภาพ $\dot{f}$ กับความเร็วของข้อต่อแขนกล $\dot{q}$ ในเทอมของจาโคเบียนผสม และเรียกจาโคเบียนนี้ว่า จาโคเบียนรูปภาพ (Image Jacobians)

$$\dot{f} = J_q.\dot{q} \qquad (6.3)$$

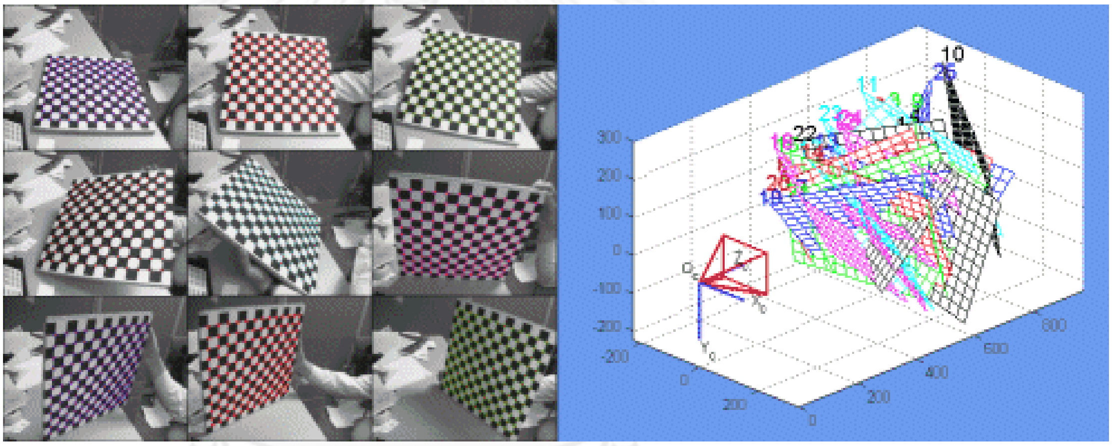
โดยที่ $J_q = J_r.J$ ดังนั้น

$$J_q = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial q_1} & \frac{\partial f_1}{\partial q_2} & .. & \frac{\partial f_1}{\partial q_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial q_1} & \frac{\partial f_2}{\partial q_2} & .. & \frac{\partial f_2}{\partial q_n} \\ .. & .. & .. & .. \\ \frac{\partial f_m}{\partial q_1} & \frac{\partial f_m}{\partial q_2} & .. & \frac{\partial f_m}{\partial q_n} \end{bmatrix}$$

6.3 การสอบเทียบกล้อง

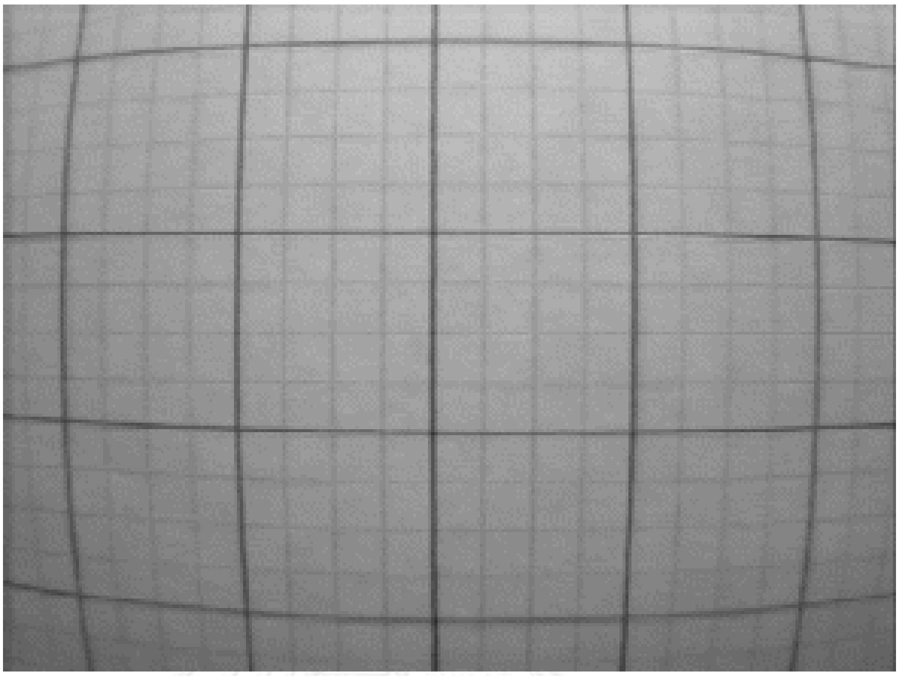
การสอบเทียบกล้องเป็นเป็นการหาคุณสมบัติของระบบกล้องภายในของกล้อง (Intrinsic parameters) คือความยาวโฟกัส (Focal lengths), จุดกำเนิดของภาพ (Center of image) , เมตริกซ์การบิเบี้ยวของภาพ (Distortion matrix) สำหรับปรับแก้ความบิดเบี้ยวของภาพ

การสอบเทียบใช้วิธีการของ [4, 28, 30, 31] ซึ่งเป็น Camera calibration toolbox บน MATLAB เป็น toolbox ที่สามารถปรับหาค่าที่ต้องการ รู้ค่าคลาดเคลื่อนและมีผู้ใช้กันอย่างแพร่หลาย การใช้งานคือการใช้ตารางสี่เหลี่ยม ขาวสลับดำ ทำการสอบเทียบโดยจะทราบขนาดของสี่เหลี่ยมว่ามีขนาดความกว้างและยาวเท่าใด จำนวนสี่เหลี่ยมที่มีแน่นอนเป็นตัวอ้างอิง จากนั้นถ่ายภาพในหลายๆ มุมมอง แล้วนำไปหาจุดตัดของสี่เหลี่ยมที่อยู่บนรูปภาพ จากจุดตัดที่ได้จากการหาจากภาพสี่เหลี่ยมดังรูปที่ 6.3 จุดเหล่านั้นจะถูกนำไปคำนวณหาเมตริกซ์สอบเทียบกล้อง ซึ่งจะได้ตัวแปรคุณสมบัติของกล้อง ได้ตามที่ต้องการ

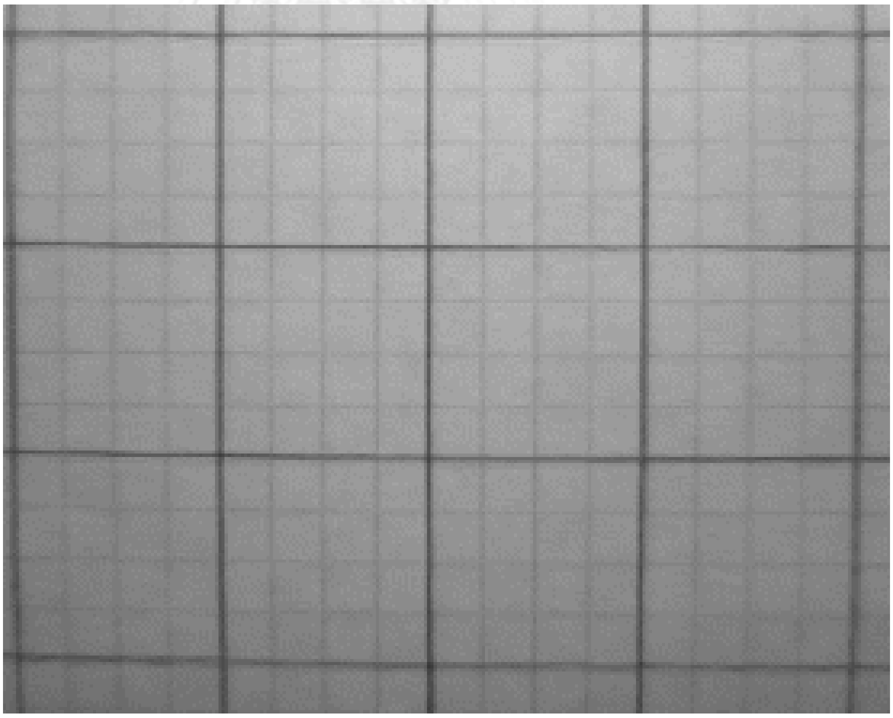


รูปที่ 6.3 ภาพแสดงการทำสอบเทียบกล้องด้วยซอฟท์แวร์

การสอบเทียบกล้องจะนำเมตริกซ์สอบเทียบกล้อง ที่จะได้นำไปคำนวณปรับแก้ความผิดพลาดของภาพที่ได้ดังรูปที่ 6.4 จะเห็นว่าตารางหมากรุกสี่เหลี่ยม ภาพมีความโค้งเนื่องจากการบิดเบี้ยวของเลนส์กล้องเนื่องจากกล้องที่ใช้ทำการถ่ายเป็นกล้องดิจิตอลแบบยูเอสบี ซึ่งโดยทั่วไปแล้วเลนส์ของกล้องดิจิตอลแบบยูเอสบีจะมีความความโฟกัสค่อนข้างน้อย ซึ่งเป็นผลทำให้ภาพมีความบิดเบี้ยวแบบโป่งกลาง การแก้ไขภาพสามารถทำได้โดยการชดเชยด้วยเมตริกซ์สอบเทียบกล้อง หลังจากทำการชดเชยแล้ว ภาพที่ได้จากการชดเชยดังรูปที่ 6.4 รูปทีได้ออกมาจะเห็นมีสี่เหลี่ยมที่บิดโค้งกลายเป็นเส้นตรง



ก.ภาพก่อนการแก้ไขด้วยการสอบเทียบกล้อง

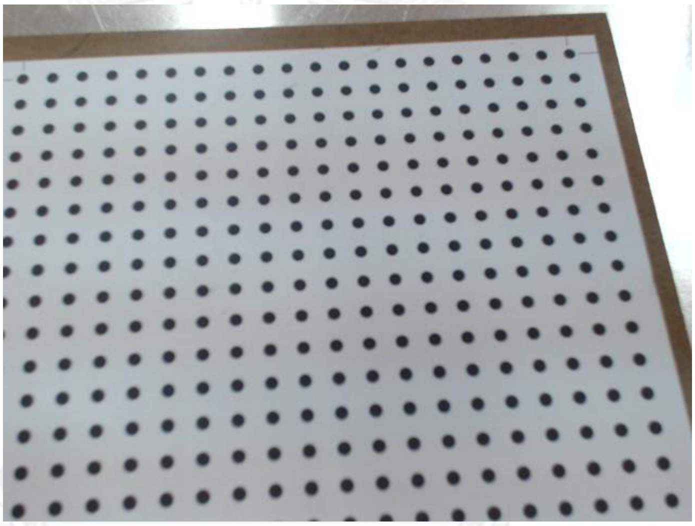


ข.ภาพก่อนการแก้ไขด้วยการสอบเทียบกล้อง

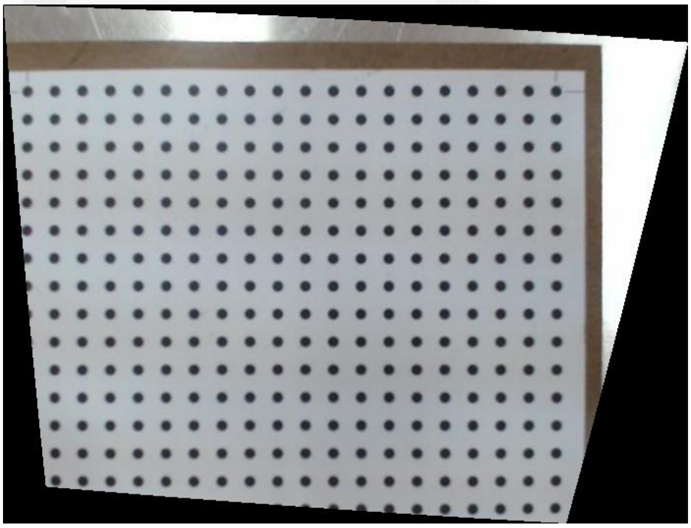
รูปที่ 6.4 ภาพก่อนและภาพหลังแก้ไขด้วยการแก้ไขด้วยเมตริกซ์สอบเทียบกล้อง

ก่อนทำการใช้งานกล้องเนื่องจากหุ่นยนต์เดลต้ามีการติดกล้องไว้ที่ตำแหน่งปลายแขนของหุ่นยนต์เพื่อที่จะให้ภาพที่ถ่ายออกมาเป็นค่าระยะจริง กล้องและปลายแขนของหุ่นยนต์ต้องอยู่บนระนาบที่ขนานกัน ดังนั้นจึงต้องทำการสอบเทียบระนาบก่อนการใช้งาน

การสอบเทียบระนาบทำได้โดยการถ่ายภาพจุดวงกลมสีดำที่เรียงต่อกันเป็นตารางดังรูปที่ 6.5 จากนั้นนำภาพที่ได้นำมาหาตำแหน่งจุดที่ปรากฏบนภาพ เนื่องจากจุดที่เรียงต่อกัน มีค่าระยะห่างระหว่างจุดที่แน่นนอน ดังนั้นจึงสามารถนำมาหามุมที่กล้องกับระนาบแขนของหุ่นยนต์ทำมุมกันได้ โดยวิธีการหาใช้วิธีการโฮโมกราฟฟี ดังสมการที่ 3.36 และสมการที่ 3.37 จากนั้นการแก้สมการจะได้ค่าของสมการระนาบออกมา จากสมการระนาบที่หาออกมานั้น จะสามารถนำไปแก้ไขภาพได้ดังรูปที่ 6.5 จะเห็นว่าภาพของจุด เรียงทำมุมตั้งฉากทำให้ ระยะระหว่างจุดมีระยะเท่ากัน



ก.ภาพก่อนทำการสอบเทียบการระนาบ

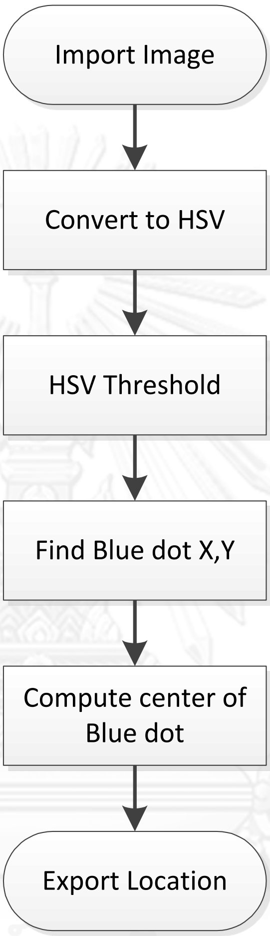


ข.ภาพหลังทำการสอบเทียบการระนาบ

รูปที่ 6.5 ภาพก่อนและหลังการสอบเทียบระนาบ

6.4 การหาตำแหน่งวัตถุโดยใช้กล้องดิจิตอล

การหาตำแหน่งวัตถุโดยใช้กล้องดิจิตอล สามารถทำได้ด้วยวิธีการหาด้วยตรวจหาสีในปริภูมิ HSV และค้นหาตำแหน่งวัตถุที่ต้องการ ด้วยการใช้วิธีของฮัฟท์[34] โดยวิธีการหาตำแหน่งของจุด โดยสามารถทำได้เป็นขั้นตอนดังรูปที่ 6.6 โดยมีขั้นตอนการทำงานดังนี้



รูปที่ 6.6 แผนภาพการหาตำแหน่งวัตถุด้วยกล้องดิจิตอล

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย CHULALONGKORN UNIVERSITY

1. ขั้นตอนการเตรียมภาพ

เริ่มต้นด้วยการนำภาพเคลื่อนไหวจากกล้องดิจิตอลแบบยูเอสบี เข้ามาโดยภาพที่เข้ามาประมวลผลนั้นมีความละเอียด ที่ 640x480 pixel และมีอัตราการเคลื่อนไหวของภาพต่อวินาที (Frame rate) อยู่ที่ 30 fps (frame per second) โดยภาพที่นำเข้ามาอยู่ในปริภูมิ RGB

2. ค้นหาสีที่ต้องการ

การค้นหาสีจะใช้ ปริภูมิ HSV ในการค้นหา โดยจะต้องทำการ แปลงค่าสี จากปริภูมิ RGB ไปสู่ปริภูมิ HSV ดังสมการต่อไปนี้

$$H' = \begin{cases} notdefined, if \quad C = 0 \\ 60\left[\dfrac{G-B}{\delta} \bmod 6\right], if \quad M = R \\ 60\left[\dfrac{B-R}{\delta} + 2\right], if \quad M = G \\ 60\left[\dfrac{R-G}{\delta} + 4\right], if \quad M = B \end{cases}$$

$$H = 60^{\circ} \times H'$$

$$s = \begin{cases} 0, if \quad c = 0 \\ \dfrac{C}{V}, otherwise \end{cases}$$

$$V = M$$

โดยที่

$$M = \max(R, G, B)$$

$$m = \min(R, G, B)$$

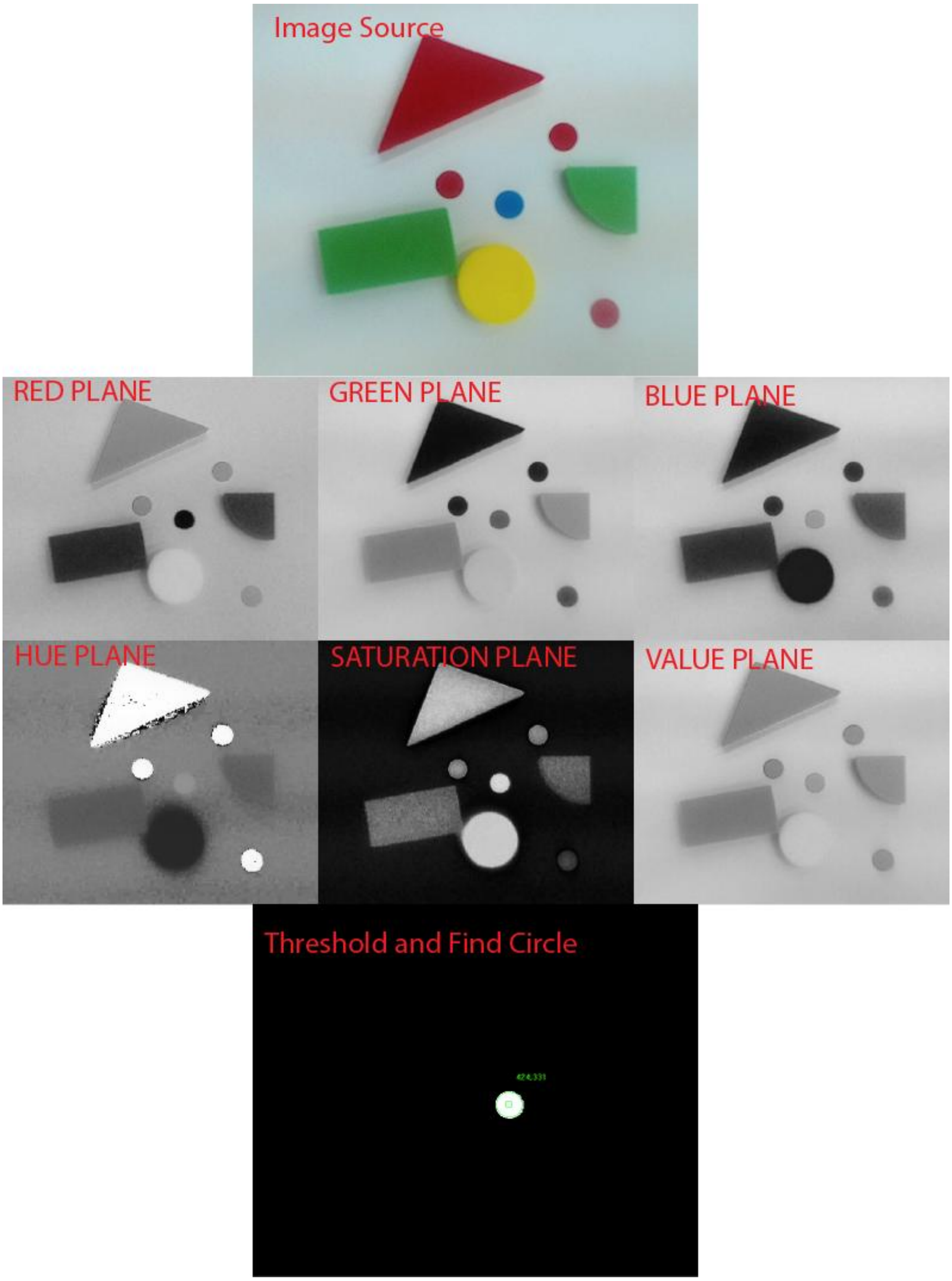
$$C = M - m$$

จากนั้นทำการเลือกสีที่ต้องการ ในที่นี้เป็นการหาสีน้ำเงิน ซึ่งในปริภูมิ RGB จะมีค่าสี คือ R=0 ,G=0 และ B=255 สีน้ำเงินที่อยู่ปริภูมิ HSV คือ H=240 องศา , S=100% และ V=100 % การหาสีน้ำเงินสามารถทำได้โดย การกำหนดเงื่อนไขที่ $220^{\circ} \leq H \leq 260^{\circ}$, $S \geq 80\%$และ$V \geq 80\%$ จะภาพที่ผ่านการตัดสี เพื่อหาสีน้ำเงินได้ดังรูปที่ 6.7

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

3. ค้นจุดศูนย์กลางของวงกลม

จากขั้นตอนที่ผ่านมา จะได้ภาพที่มีจุดของสีน้ำเงินอยู่ดังรูปที่ 6.7 การหาจุดศูนย์กลางของวงกลมสามารถทำได้ โดยการใช้วิธีการเปลี่ยนแปลง ของ ฮัฟท์ ซึ่งเป็นวิธีที่ได้ รับความนิยมในการนำเอาไปใช้หา เส้นตรง สี่เหลี่ยม หรือ วงกลม การหาจุดศูนย์กลางวงกลมทำโดยกำหนดช่วงของค่าของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวง การกำหนดขนาดนั้นทำให้การหาด้วยวิธีของฮัฟท์มีความรวดเร็วมากขึ้น ผลของการหาจุดศูนย์กลางดังรูปที่ 6.7 เมื่อได้ค่าจุดศูนย์กลางมาก็นำค่าที่ได้ไปใช้ต่อไป

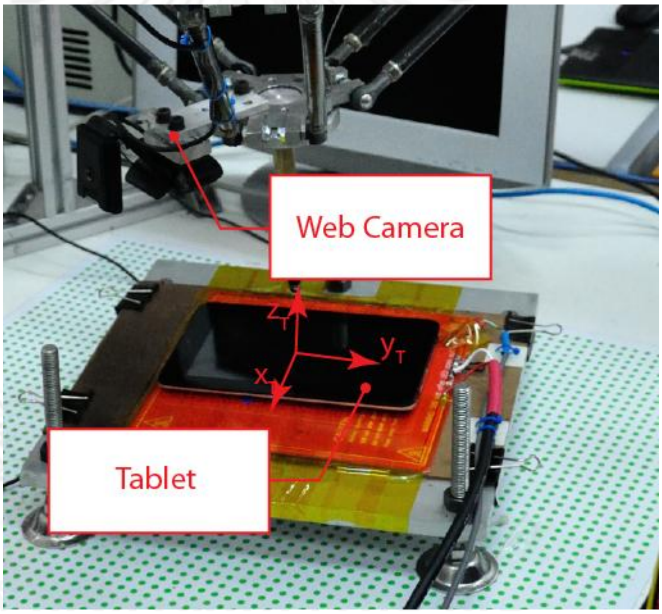


รูปที่ 6.7 แผนภาพการแปลงรูปภาพ จากปริภูมิ RGB ไปยัง ปริภูมิ HSV

6.5 การควบคุมหุ่นยนต์เดลต้าด้วยกล้องดิจิตอล

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงการควบคุมหุ่นยนต์เดลต้าด้วยกล้องดิจิตอล ระบบควบคุมการทำงานหุ่นยนต์ร่วมกับกล้องดิจิตอล การติดตั้งกล้อง และการประมาณค่าจาโคเบียนสำหรับการใช้งานร่วมกับกล้อง โดยรายละเอียดจะกล่าวต่อไป

การติดตั้งกล้องบนหุ่นยนต์จุฬาเดลต้าเนื่องจากหุ่นยนต์เดลต้ามีสามองศาอิสระในการเคลื่อนที่และการเคลื่อนที่ของปลายแขนหุ่นยนต์นั้น จะเคลื่อนที่ไปในแนวขนานกับฐานของหุ่นยนต์เท่านั้น จากประเด็นที่กล่าวมานี้ จะเห็นการติดตั้งกล้องดิจิตอลแบบยูเอสบีบนหุ่นยนต์เดลต้าใช้การติดตั้งที่ปลายแขนเพียงอย่างเดียวก็เพียงพอให้สามารถใช้งานได้ เนื่องจากภาพที่ได้กล้องที่ติดตั้งที่ปลายแขนนั้น ค่าระยะที่วัดได้ออกมาจะภาพจะเป็นค่าที่ตั้งฉากกับวัตถุที่ต้องการวัด ทำให้ ค่าที่วัดออกมามีความแม่นในการใช้งาน



รูปที่ 6.8 การติดตั้งกล้องดิจิตอลแบบยูเอสบี ที่ปลายแขนหุ่นยนต์จุฬาเดลต้า

การควบคุมหุ่นยนต์ด้วยสัญญาณจากภาพนั้นจำเป็นต้องหาจาโคเบียนรูปภาพมาคำนวณหาตำแหน่งแขนกลโดยความสัมพันธ์ของจาโคเบียนรูปภาพมีดังนี้

$$\dot{f} = [J][\dot{X}]$$

โดยที่

$\dot{X}$ เป็นความเร็วปลายแขนของหุ่นยนต์ มีความสัมพันธ์เชิงเส้นกับข้อมูลตำแหน่งของภาพ

J คือจาโคเบียนรูปภาพ

$\dot{f}$ คือความเร็วของข้อมูลตำแหน่งบนภาพ

ดังนั้นจะสามารถหาความสัมพันธ์ของตำแหน่งปลายแขนกับตำแหน่งภาพเพื่อที่จะหาทิศทางของการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ได้ดังนี้

$$\Delta X = J^{-1}\Delta f$$

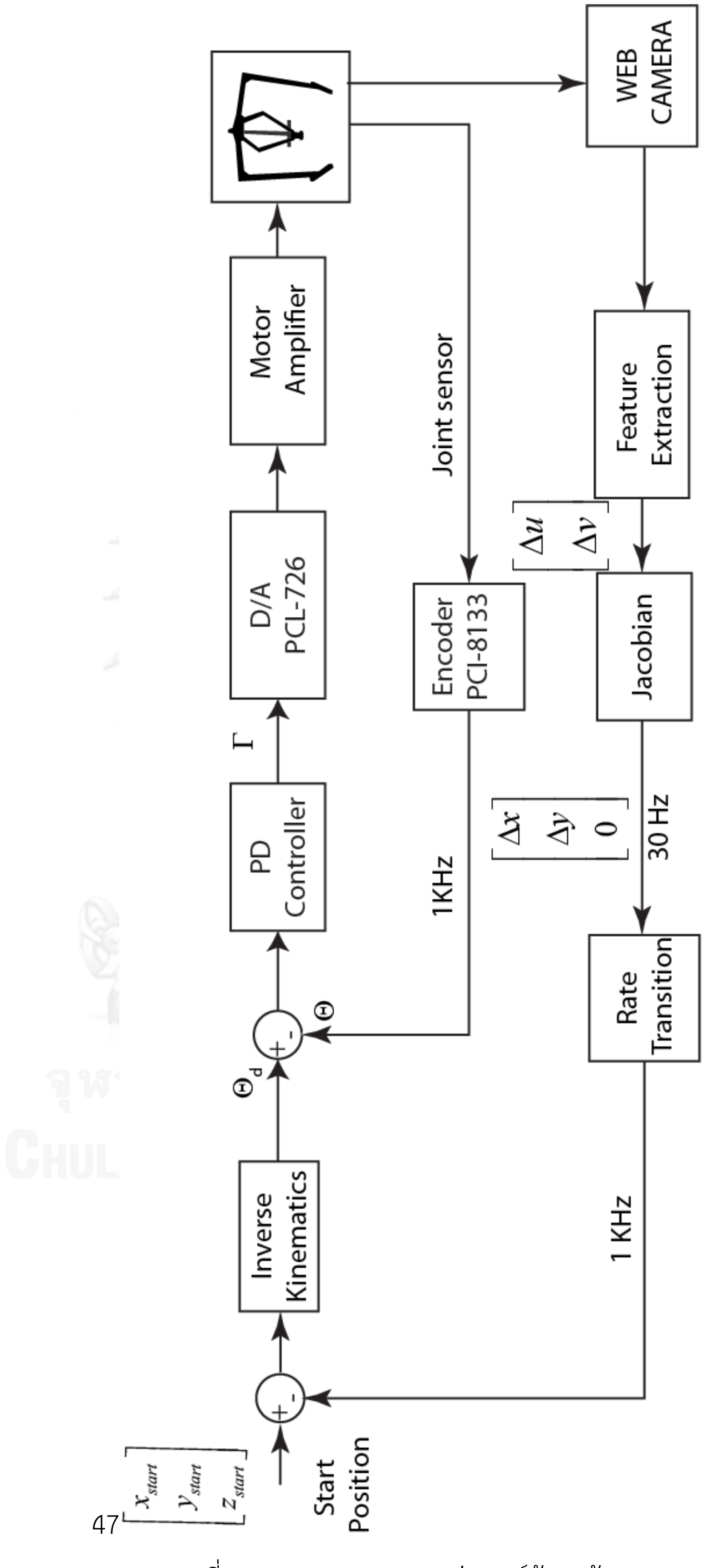
การประมาณหาจาโคเบียนรูปภาพทำได้โดยการทดลอง โดยการเลื่อนตำแหน่งของปลายแขนหุ่นยนต์ออกไป จะได้ค่าของภาพที่มีการเลื่อนของตำแหน่งภาพออกไป นำค่าดังกล่าวไปแทนในสมการ จะได้ค่าประมาณของจาโคเบียนรูปภาพ การทดลองจะทำโดยการเคลื่อนที่ตำแหน่งปลายแขนของหุ่นยนต์ออกไปที่ตำแหน่ง Δx_d และ Δy_d แล้วเก็บค่าตำแหน่งของกล้องที่เปลี่ยนไป Δx_c และ Δy_c ทำซ้ำทั้งหมด 18 ครั้ง ดังตารางที่ ข.5 แล้วทำการเฉลี่ยค่าที่เปลี่ยนแปลงของตำแหน่งปลายแขนและตำแหน่งกล้องออกมาจะได้ ค่าดังนี้

$$J = \begin{bmatrix} 0.5861 & -0.8133 \\ 0.8103 & 0.5861 \end{bmatrix}$$

ค่าจาโคเบียนรูปภาพที่ทดลองออกมาจะเห็นเมตริกซ์จาโคเบียนภาพนั้นมีมิติ เพียง 2x2 แต่ปลายแขนของหุ่นยนต์เดลต้านั้น มีองศาอิสระเท่ากับสาม แต่เนื่องจากกำหนดให้หุ่นยนต์เดลต้านั้นเคลื่อนที่ในแนวขนานเท่านั้น จึงไม่มีความจำเป็นที่ต้องใช้จาโคเบียนรูปภาพที่มี มิติเท่ากับ 3x3

6.5.1 การควบคุมหุ่นยนต์เดลต้าโดยการประมาณค่าจาโคเบียนรูปภาพ

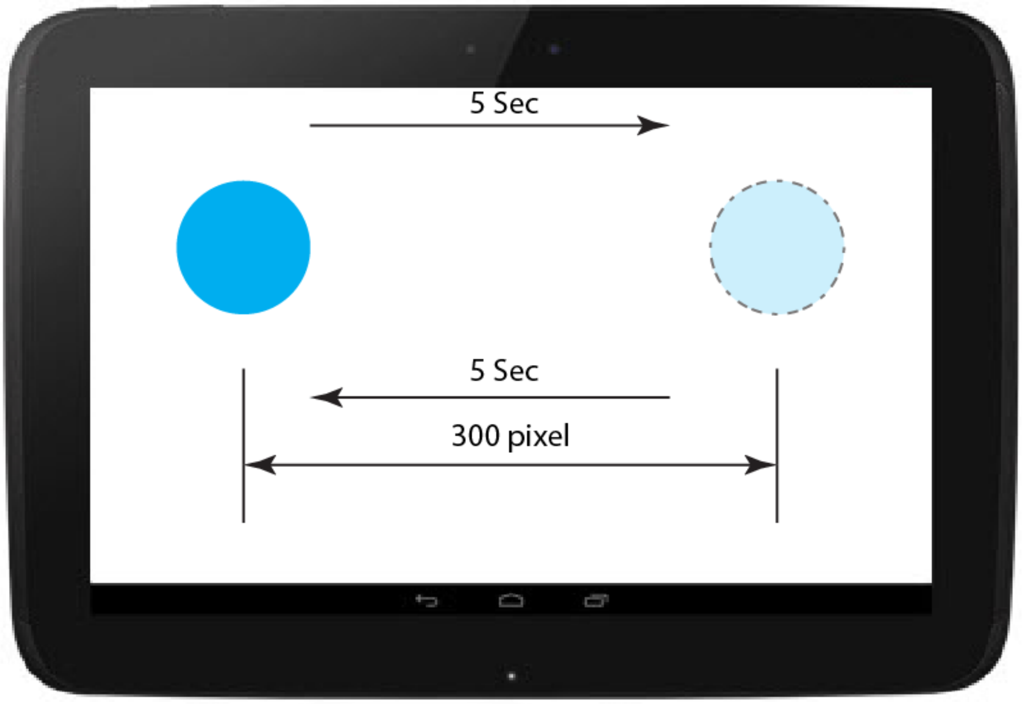
การทดสอบนี้ใช้หุ่นยนต์จุฬาเดลต้า โดยติดระบบกล้องดิจิตอลไปที่ปลายแขนหุ่นยนต์ ข้อมูลของกล้องดิจิตอลจะส่งเข้าเครื่องคอมพิวเตอร์ ผ่านทางช่อง USB การเชื่อมต่ออุปกรณ์จะมีลักษณะดังรูปที่ 6.8 โดยโปรแกรมการควบคุมการหาตำแหน่งภาพเขียนด้วย Labview โดยโปรแกรมจะทำกรคำนวณหาตำแหน่งของวัตถุที่ได้จากกล้องดิจิตอล แปลงไปเป็นตำแหน่งเทียบกับแกนอ้างอิงกล้อง และส่งพารามิเตอร์ที่คำนวณได้นี้ หุ่นยนต์ด้วยโปรโตคอล UDP การควบคุมหุ่นยนต์จะใช้วิธีการประมาณจาโคเบียนรูปภาพโดยการเคลื่อนที่ของตำแหน่งปลายแขนของหุ่นยนต์ ดังรูปที่ 6.9 การทำงานของระบบควบคุมจะประกอบด้วยวงการคำนวณทั้งหมดสองวง โดยวงใน (Inner loop) เป็นวงควบคุมการทำงานของข้อต่อแต่ละข้อต่อ การทำงานคือรับค่าตำแหน่งของปลายแขนที่ต้องการมาคำนวณผ่านจลศาสตร์ย้อนกลับ จะได้มุมองศาที่ต้องการมาแล้วเปรียบเทียบกับมุมของข้อต่อในขณะนั้น จากนั้นใช้ตัวควบคุมแบบสัดส่วนบวกกับแบบอนุพันธ์ คำนวณหาค่าแรงบิดที่ต้องการออกมาแล้วส่งค่าไปยังแผงควบคุมเพื่อที่จะสัญญาณไปควบคุมมอเตอร์ต่อไป โดยการทำงานของวงในนี้จะทำงานที่ความถี่ 1000 เฮิรตซ์ โดยที่วงนอก (Outer loop) เป็นวงควบคุมด้วยกล้องการทำงานคือกล้องจะถ่ายภาพที่ความละเอียด 640x480 พิกเซลที่ความถี่เท่ากับ 30 เฮิรตซ์ มาทำการหาตำแหน่งของวัตถุที่ติดตามดังหัวข้อที่ 6.4 จากนั้นจะได้ตำแหน่งของวัตถุบนระนาบกล้องออกมา จากนั้นนำไปคำนวณผ่านจาโคเบียนรูปภาพจะตำแหน่งที่ต้องการชดเชย แล้วนำไปชดเชยต่อไป



รูปที่ 6.9 แผนภาพการควบหุ่นยนต์ด้วยกล้อง

6.5.2 การทดสอบหุ่นยนต์จุฬาเดลต้าติดตามสัญญาณกล้องแบบพัลส์

การทดสอบหุ่นยนต์จุฬาเดลต้าติดตามสัญญาณแบบพัลส์ทำเพื่อทดสอบประสิทธิภาพในการติดตาม โดยการทดสอบจะนำแท๊ปเลตวางที่ด้านล่างดังรูปที่ 6.8 โดยหุ่นยนต์จะติดตามวิดีโอที่มีจุดสีน้ำเงินเคลื่อนที่สลับไปด้วยความคาบเท่ากับ 5 วินาที โดยจุดสี่น้ำเงินมีค่าบนปริภูมิ HSV เท่ากับ H=240 องศา , S=100% และ V=100 % มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 50 พิกเซลและมีระยะเคลื่อนที่สลับไปมาเท่ากับ 300 พิกเซลดังรูปที่ 6.10 การทดสอบนี้จะให้หุ่นยนต์จุฬาเดลต้าติดตามจุดที่เคลื่อนที่ไปมา โดยใช้วิธีการควบคุมดังหัวข้อที่ 6.5.1 ที่กล่าวมาแล้ว



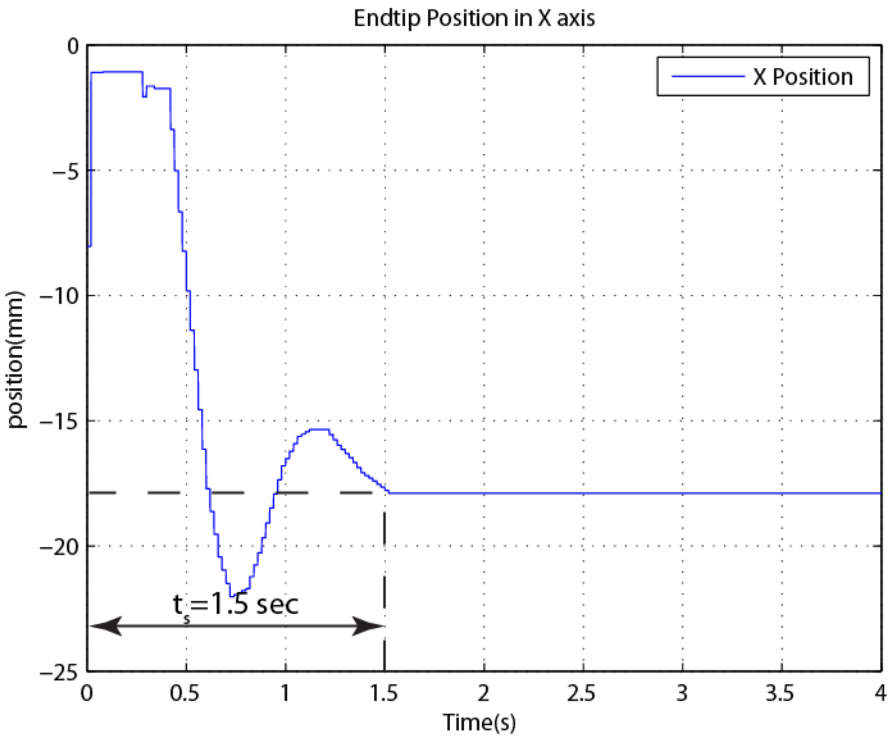
รูปที่ 6.10 ภาพการสลับไปมาของจุดสีน้ำเงิน

จากรูปที่ 6.11 ลักษณะของการตอบสนองของระบบได้คือ

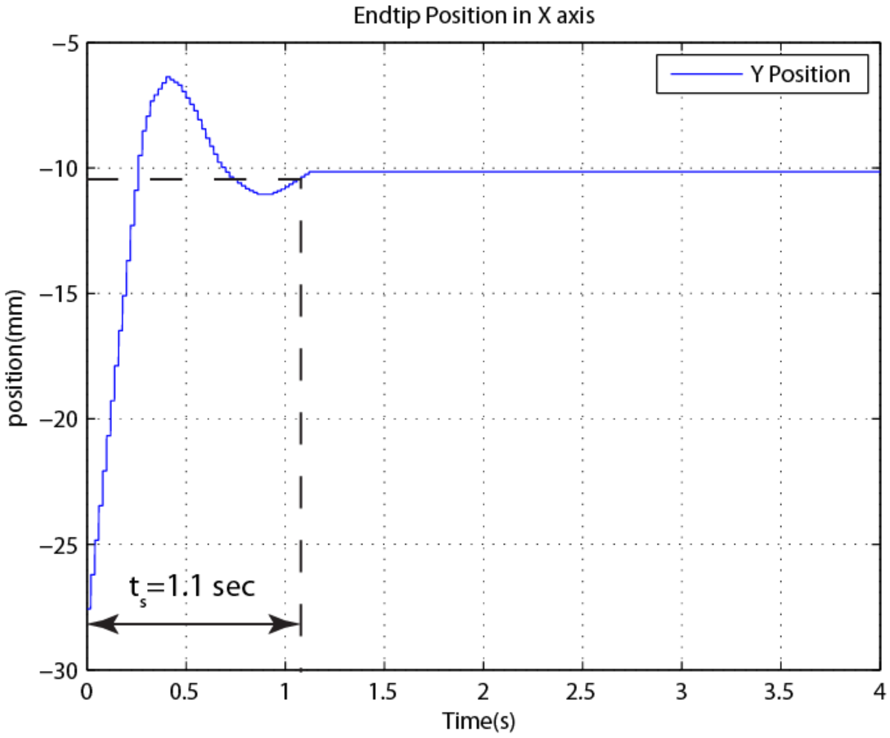
ในแนวแกน x มีลักษณะของผลตอบสนองดังนี้ เวลาเข้าที่ t_s (Setting time) เท่ากับ 1.5 วินาที และช่วงผ่อนผันที่ยอมให้ได้ (Steady state error) < 0.05 มิลลิเมตร

ในแนวแกน y มีลักษณะของผลตอบสนองดังนี้ เวลาเข้าที่ t_s (Setting time) เท่ากับ 1.1 วินาที และช่วงผ่อนผันที่ยอมให้ได้ (Steady state error) < 0.05 มิลลิเมตร

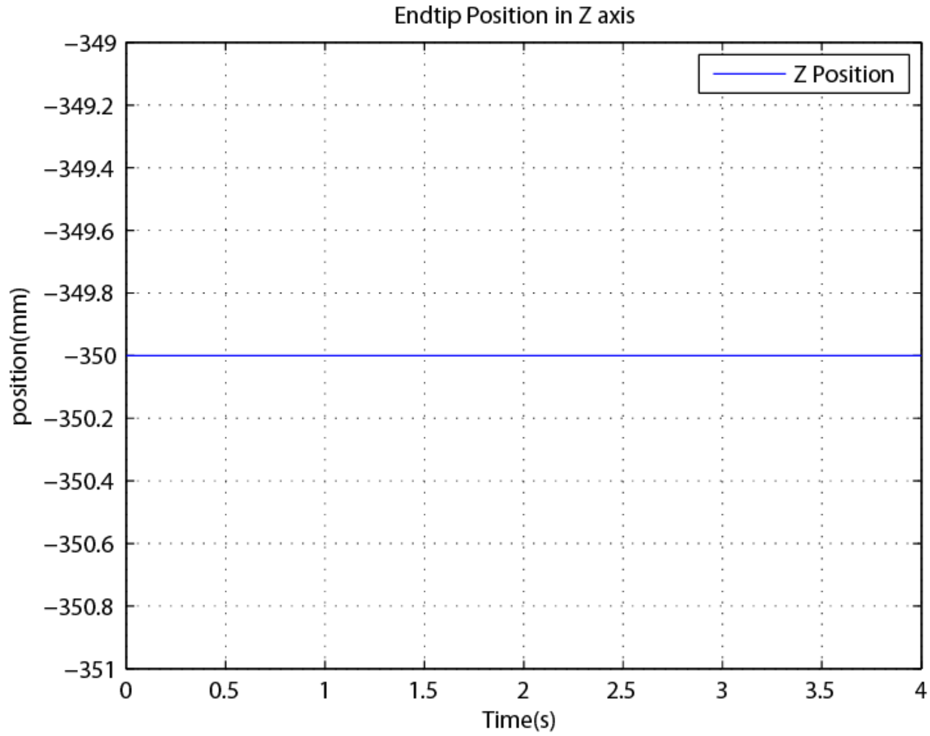
จากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่า หุ่นยนต์จุฬาเดลต้าสามารถติดตามการเคลื่อนที่ของจุดที่สลับไปมาได้ โดยมีเวลาเข้าที่เท่ากับ 1.5 วินาที โดยใช้วิธีควบคุมแบบสองวงที่มีความถี่ไม่เท่ากัน



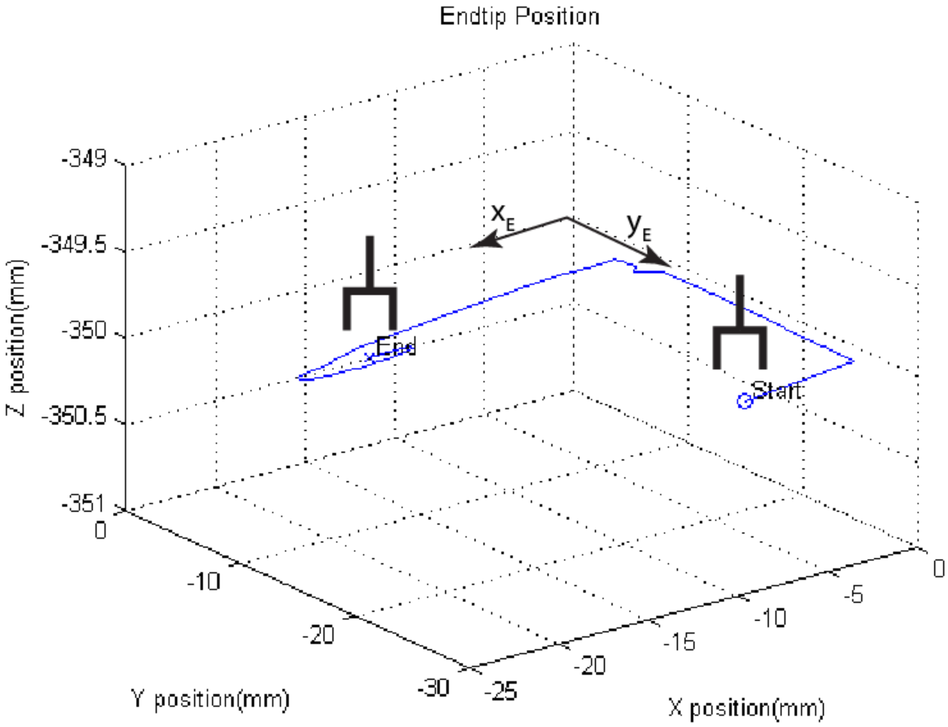
ก.ผลตอบสนองของตำแหน่งปลายแขนติดตามตำแหน่งภาพแบบสเต๊ป ในแนวแกน x



ข.ผลตอบสนองของตำแหน่งปลายแขนติดตามตำแหน่งภาพแบบสเต๊ป ในแนวแกน y



ค.ผลตอบสนองของตำแหน่งปลายแขนติดตามตำแหน่งภาพแบบสเต๊ป ในแนวแกน z

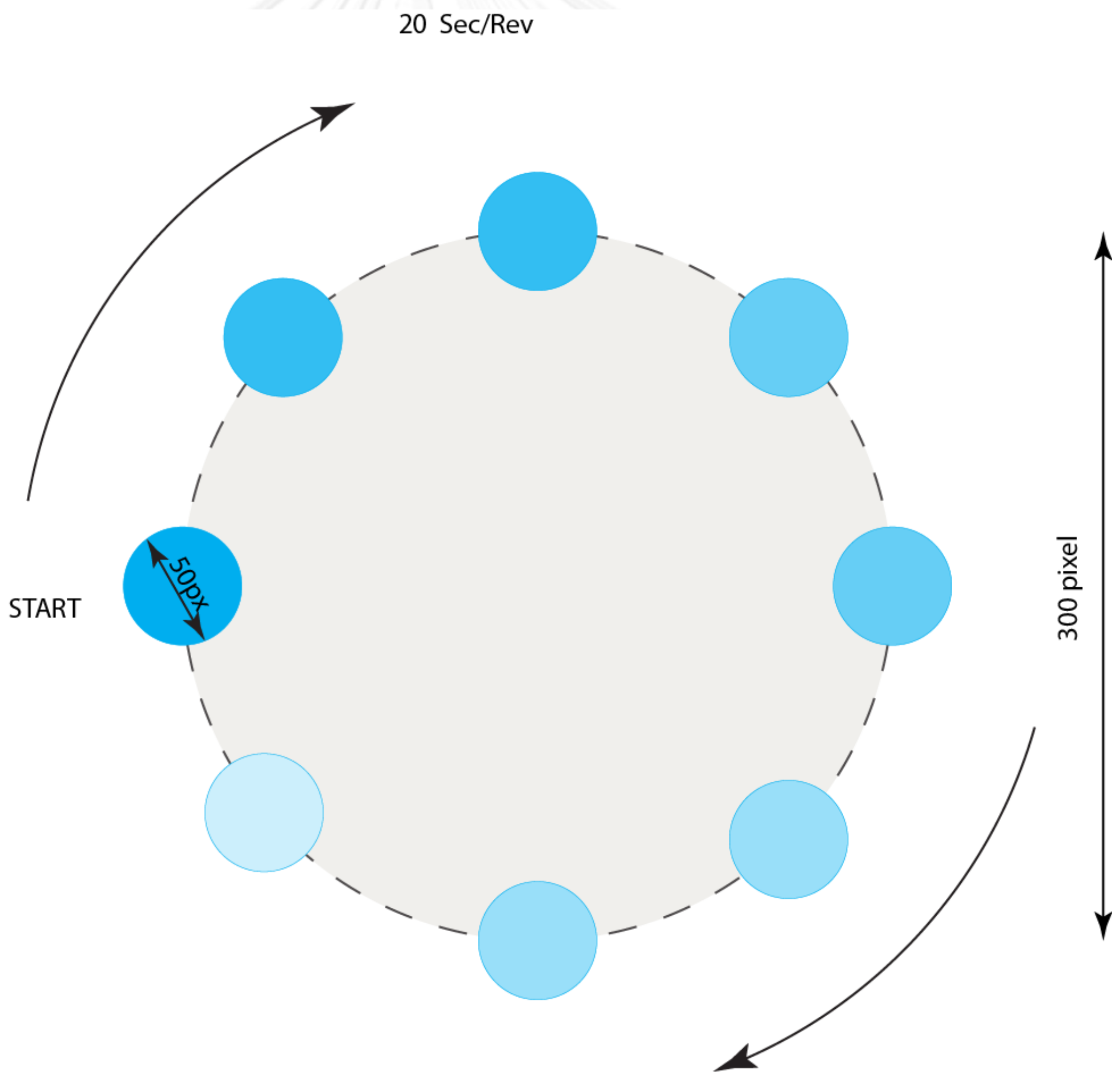


ง ตำแหน่งปลายแขนติดตามตำแหน่งภาพแบบสเต๊ป

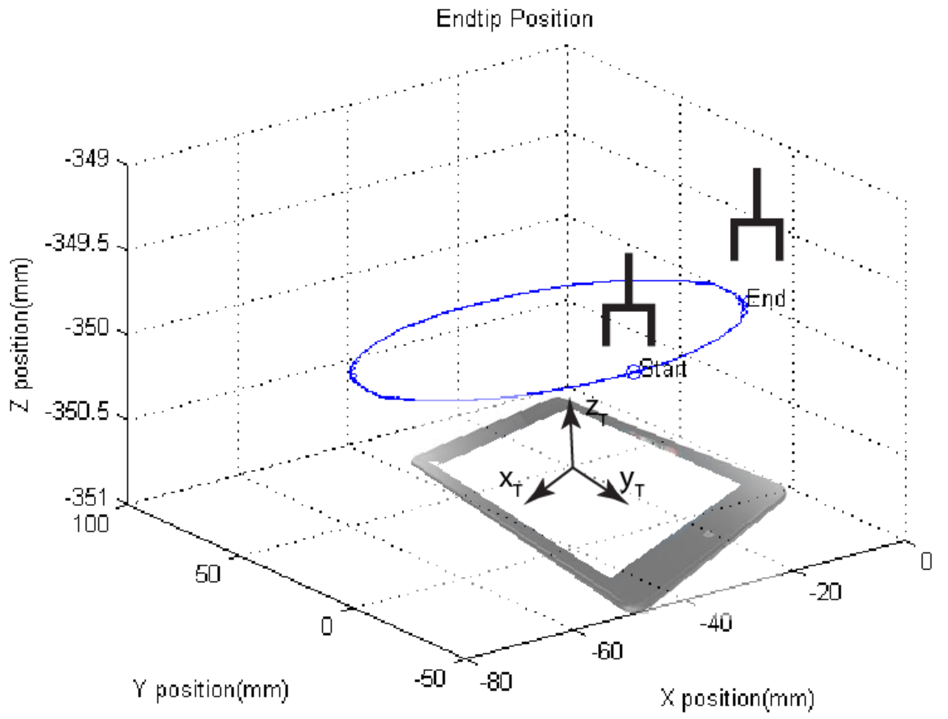
รูปที่ 6.11 ผลตอบสนองของหุ่นยนต์จุฬาเดลต้า

6.5.3 การทดสอบหุ่นยนต์จุฬาเดลต้าติดตามสัญญาณกล้องแบบวงกลม

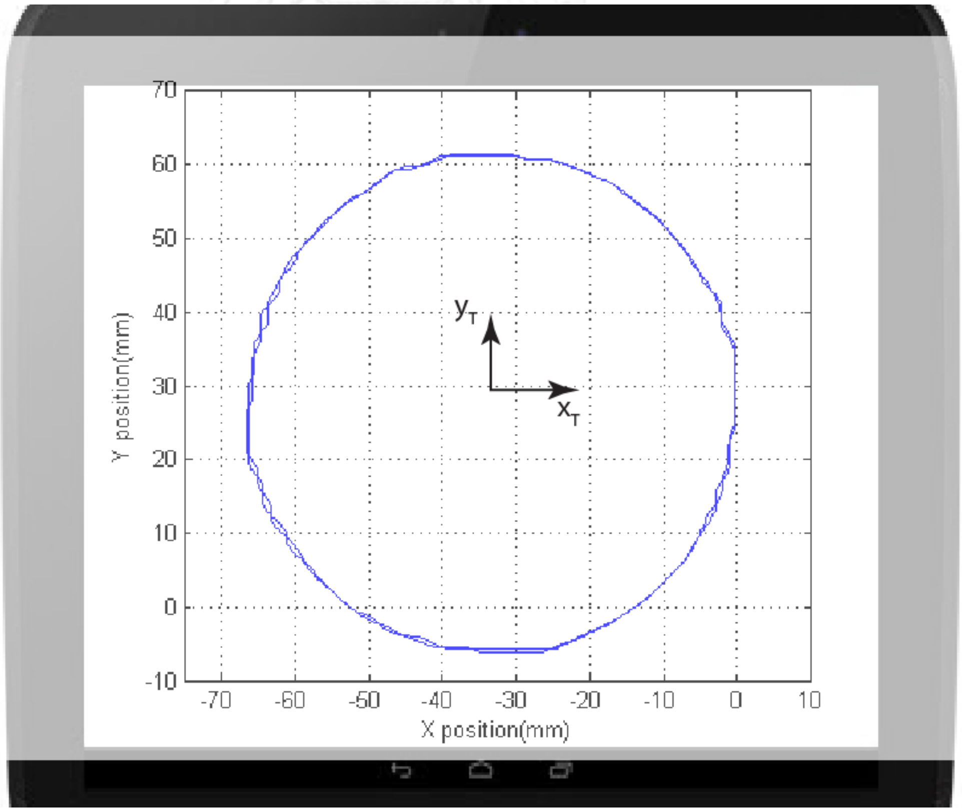
การทดสอบหุ่นยนต์จุฬาเดลต้าติดตามสัญญาณแบบวงกลมทำเพื่อทดสอบประสิทธิภาพในการติดตามการเคลื่อนที่ โดยการทดสอบจะนำแท็บแล็ต วางที่ด้านล่างดังรูปที่ 6.8 โดยหุ่นยนต์จะติดตามวิดีโอที่มีจุดสีน้ำเงินที่มีพิกัดของสีในปริภูมิ HSV โดยมีค่าสีสัน (Hue) เท่ากับ 240 องศา ค่าความอิ่มของสี (Saturation) เท่ากับ 100 % และค่าความเข้า (Value) เท่ากับ 100 โดยวงกลมที่เคลื่อนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 50 พิกเซล วิ่งไปในเส้นทางเดินวงกลมที่มีรัศมี 300 พิกเซล ซึ่งมีคาบในการวิ่งเท่ากับ 20 วินาที ดังรูปที่ 6.12 มา โดยใช้วิธีการควบคุมดังหัวข้อที่ 6.5.1 ที่กล่าวมาแล้ว



รูปที่ 6.12 ภาพการเคลื่อนที่ของจุดเป็นวงกลมจุดสีน้ำเงิน



ก ภาพแสดงทิศทางของปลายแขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่เป็นวงกลมบนระนาบ สามมิติ.



ข.ภาพแสดงทิศทางของปลายแขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่เป็นวงกลมบนระนาบx-y.

รูปที่ 6.13 ผลตอบสนองของหุ่นยนต์จุฬาเดลต้าด้วยสัญญาณภาพวงกลม

จากรูปที่ 6.13 จะเห็นว่าปลายแขนของหุ่นยนต์จุฬาเดลต้าสามารถติดตามการเคลื่อนที่ของจุดวงกลมที่เคลื่อนที่ไปในแนววงกลมด้วยคาบเท่ากับ 20 วินาที จะเห็นได้ว่าการควบคุมแบบสองวงสามารถทำงานได้เป็นอย่างดี แม้ว่าการควบคุมวงนอกและวงในปรับด้วยความถี่ที่ไม่เท่ากัน ซึ่งการควบคุมแบบนี่ค่อนข้างที่จะมีความซับซ้อนในการโปรแกรม

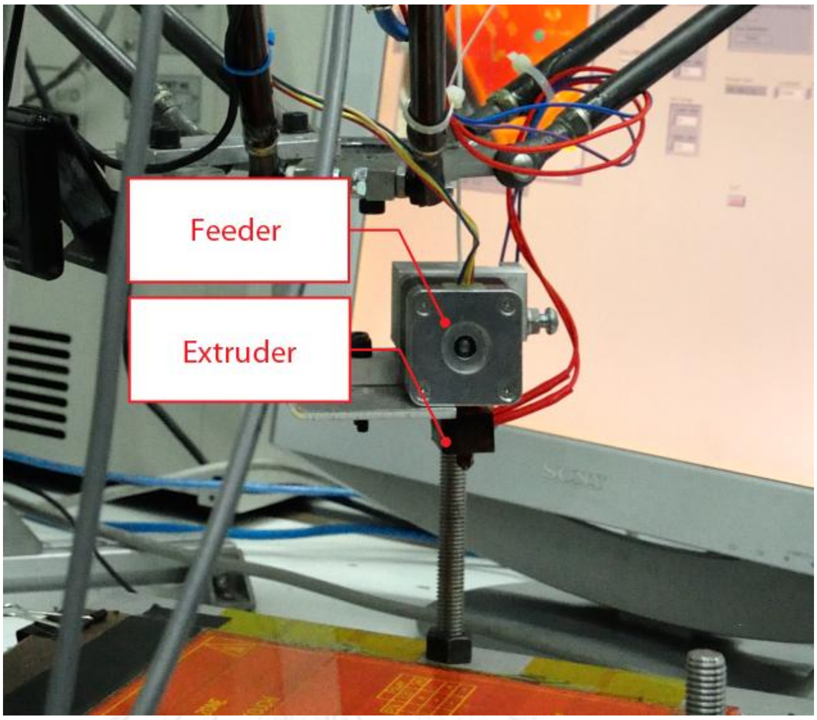
6.6 การประยุกต์ใช้การควบคุมกล้องร่วมกับหุ่นยนต์เดลต้า

ในส่วนนี้จะเป็นการใช้งานหุ่นยนต์เดลต้าร่วมกับกล้องดิจิตอล เพื่อที่จะทดสอบการทำงานร่วมกับหัวพิมพ์สามมิติ การใช้งานจะให้ระบบตรวจหาจุดตำแหน่งของจุดที่เปลี่ยนไปแล้วนำมาชดเชยความถูกต้องของการพิมพ์สามมิติ ซึ่งจะมีการทดลองเปรียบเทียบการทำงานระหว่างการพิมพ์สามมิติด้วยหุ่นยนต์จุฬาเดลต้าด้วย G-Code เพียงอย่างเดียวกับการพิมพ์สามมิติด้วยหุ่นยนต์จุฬาเดลต้าด้วย G-Code ที่ชดเชยตำแหน่งด้วยกล้อง

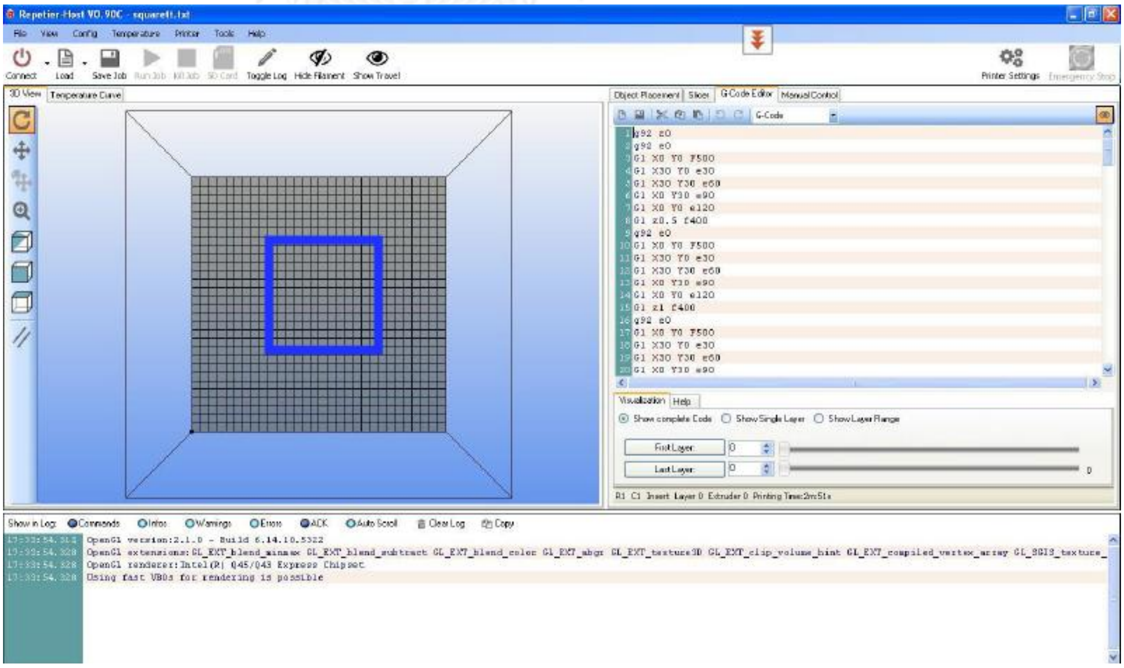
การทดสอบส่วนนี้จะต้องทำการติดตั้งหัวพิมพ์สามมิติไว้ที่ตรงปลายแขนของหุ่นยนต์จุฬาเดลต้า ดังรูปที่ 6.14 หัวพิมพ์จะประกอบด้วยสองส่วนคือ ส่วนแรกหัวพิมพ์จะประกอบด้วยตัวทำความร้อนสำหรับละลายเส้นพลาสติก (Filament) และเซนเซอร์วัดอุณหภูมิ ส่วนที่สองคือส่วนป้อนเส้นพลาสติก ซึ่งจะมีมอเตอร์แบบสเต็ปเปอร์พร้อมตัวป้อน คอยทำงานป้อนเส้นพลาสติกให้ตรงไปตามคำสั่งที่รับมาผ่านการสั่งงานด้วย G-code ซึ่งโปรแกรมสำหรับสั่งงาน G-Code ดังรูปที่ 6.15

การทำงานของระบบควบคุมจะประกอบด้วยวงการคำนวณทั้งหมดสองวง โดยวงใน (Inner loop) เป็นวงควบคุมการทำงานของข้อต่อแต่ละข้อต่อ การทำงานคือรับค่าตำแหน่งของปลายแขนที่ต้องการมาคำนวณผ่านจลศาสตร์ย้อนกลับ จะได้มุมองศาที่ต้องการมาแล้วเปรียบเทียบกับมุมของข้อต่อในขณะนั้นจากนั้นใช้ตัวควบคุมแบบสัดส่วนบวกกับแบบอนุพันธ์ คำนวณหาค่าแรงบิดที่ต้องการออกมาแล้วส่งค่าไปยังแผงควบคุมเพื่อที่จะสัญญาณไปควบคุมมอเตอร์ต่อไป โดยการทำงานของวงในนี้จะทำงานที่ความถี่ 1000 เฮิรตซ์ โดยที่วงนอก (Outer loop) เป็นวงควบคุมด้วยกล้องการทำงานคือกล้องจะถ่ายภาพที่ความละเอียด 640x480 พิกเซลที่ความถี่เท่ากับ 30 เฮิรตซ์ มาคำนวณผ่านจาโคเบียนรูปภาพจะได้ค่าระยะห่างของจุดเทียบกับจุดเริ่มต้นออกมา เนื่องการการทำงานของวงในและวงนอกทำงานด้วยความถี่ไม่เท่ากัน การที่ทั้งสองจะทำงานร่วมกันได้ต้องมีบล็อกเปลี่ยนความถี่ (Rate transition) ดังรูปที่ 6.16 ให้สามารถทำงานร่วมกันได้

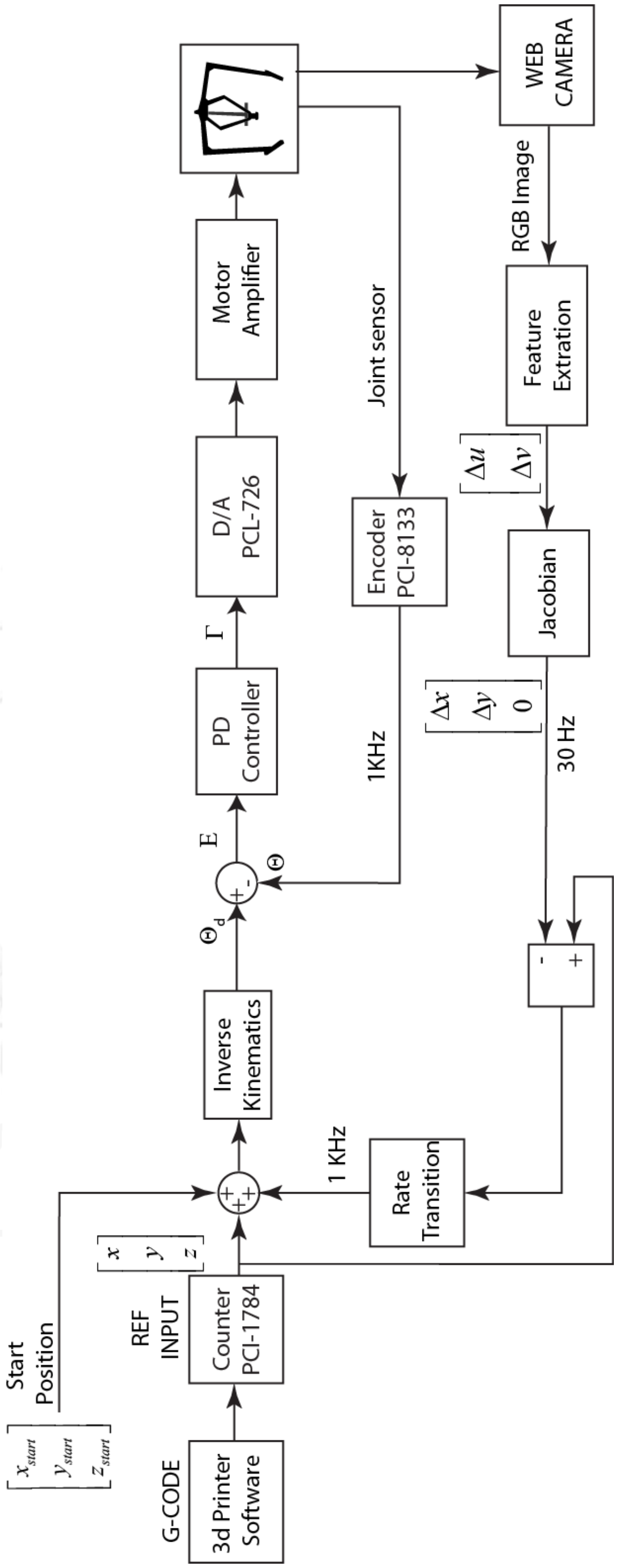
การทำงานพิมพ์สามมิติด้วยการชดเชยด้วยกล้องเริ่มทำงานด้วยการให้ หุ่นยนต์ยนต์จุฬาเดลต้าไปอยู่ในตำแหน่งเริ่มต้น $[x_{start} \quad y_{start} \quad z_{start}]^T$ แล้วเริ่มทำงานโดยตำแหน่งที่รับค่าจากคำสั่ง G-Code และข้อมูลกล้องจะเริ่มต้นที่ตำแหน่งจุดอ้างอิงเดียวกัน คำสั่ง G-Code ที่รับค่ามาจะได้ค่า $[x \quad y \quad z]^T$ เมื่อเริ่มเคลื่อนที่หัวพิมพ์ตามคำสั่งของ G-Code วงควบคุมด้วยกล้องจะทำการวัดตำแหน่งที่ปลายแขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่มาเคลื่อนที่ไปเท่าใด $[\Delta x \quad \Delta y \quad 0]^T$ หลังจากนั้นจะทำการเปรียบเทียบค่าตำแหน่งที่เคลื่อนไปกับตำแหน่งกล้องที่วัดได้ จะได้ค่าความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งปลายแขนที่วิ่งออกไป จากนั้นก็นำไปชดเชย โดยการบวกเพิ่มเข้าไปทำให้เป็นค่าตำแหน่งที่ควรจะวิ่งไปจริงเท่าใด



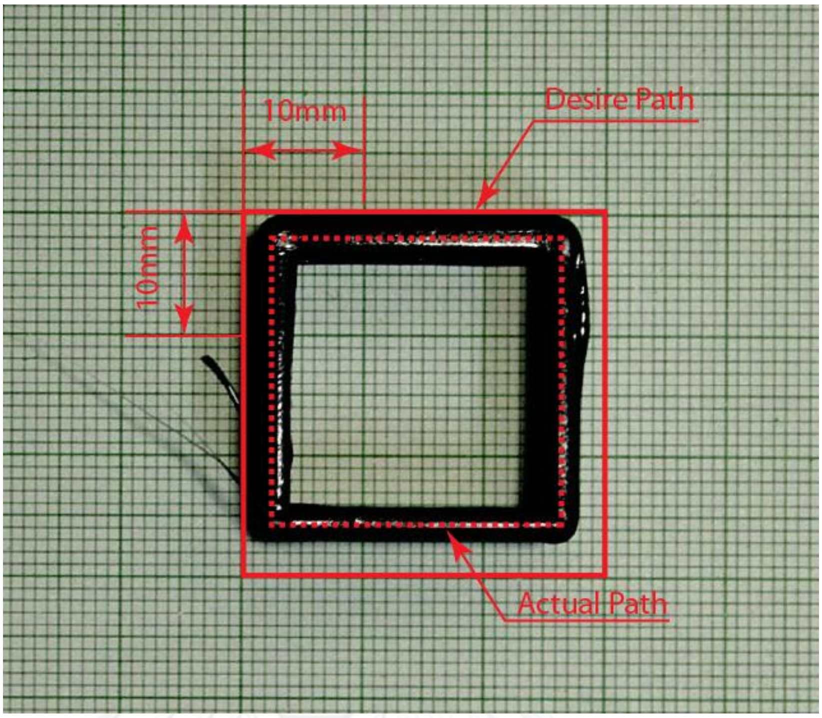
รูปที่ 6.14 การติดตั้งหัวพิมพ์สามมิติบนหุ่นยนต์จุฬาเดลต้า



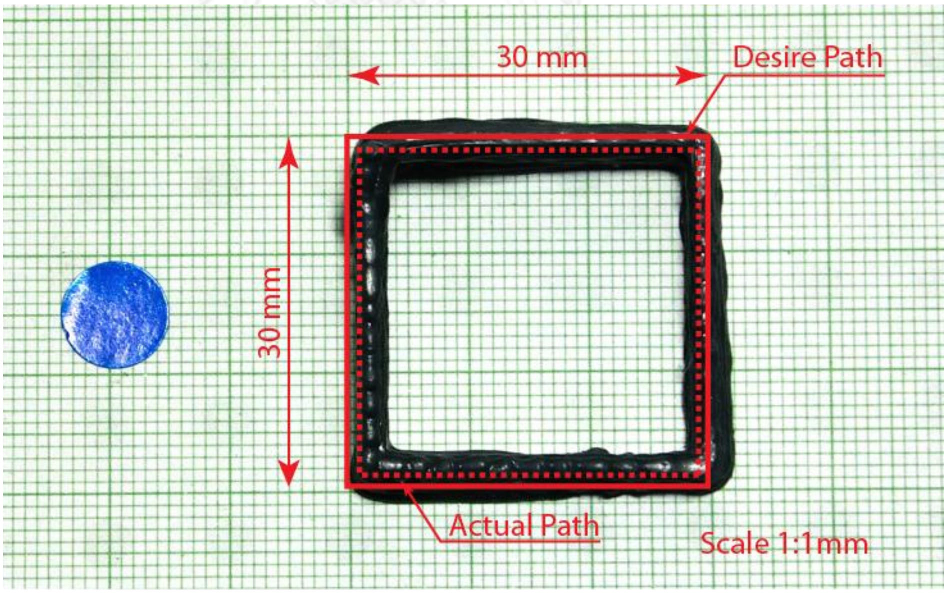
รูปที่ 6.15 ซอฟแวร์สำหรับสำหรับสั่งงานด้วย G-Code



รูปที่ 6.16 แผนผังการควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ด้วยตำแหน่งจาก G-Code



ก.การพิมพ์โดยการไม่มีการชดเชยค่าจากกล้อง



ข.การพิมพ์โดยการมีการชดเชยค่าจากกล้อง

รูปที่ 6.17 ผลการพิมพ์แบบด้วยหุ่นยนต์เดลต้าโดยใช้ G-Code

จากรูปเป็นผลการพิมพ์ด้วยคำสั่ง G-Code โดยให้หุ่นยนต์จุฬาเดลต้าพิมพ์สี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด 30 มิลลิเมตร จากรูปที่ 6.17 ก.เป็นการพิมพ์สามมิติด้วยคำสั่ง G-Code เพียงอย่างเดียว เห็นว่าหัวพิมพ์ พิมพ์สี่เหลี่ยมออกมามีความกว้าง 27 มิลลิเมตร และยาว 28 มิลลิเมตร จะเห็นได้ว่าขนาดของสี่เหลี่ยมมีความคลาดเคลื่อนออกไป 3 มิลลิเมตรในแนวกว้าง และ 2 มิลลิเมตรในแนวยาว จากนั้นจึงทำการทดสอบอีกครั้งหนึ่งโดยครั้งนี้จะใช้ข้อมูลจากกล้องเข้ามาชดเชยการเคลื่อนที่ของตำแหน่งปลายแขนของหุ่นยนต์ตามที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น จะเห็นว่าผลการพิมพ์เป็นไปดังรูปที่ 6.17ข จากภาพรูปสี่เหลี่ยมที่พิมพ์ออกมามีความกว้าง 29 มิลลิเมตร และยาว 29 มิลลิเมตร จะเห็นว่าขนาดของสี่เหลี่ยมที่พิมพ์ออกมามีความคลาดเคลื่อนน้อยลงไป คือมีความคลาดเคลื่อนออกไป 1 มิลลิเมตรในแนวกว้าง และ 1 มิลลิเมตรในแนวยาว แสดงว่าการชดเชยตำแหน่งปลายแขนของหุ่นยนต์จุฬาเดลต้าด้วยกล้องสามารถทำให้ การเคลื่อนที่ของตำแหน่งปลายแขนได้แม่นมากขึ้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 7.
สรุปผลการวิจัย

7.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยฉบับนี้ได้ทำพัฒนาจัดสร้างต้นแบบหุ่นยนต์จุฬาเดลต้าแบบ 3 องศาอิสระ ได้เป็นผลสำเร็จ การควบคุมหุ่นยนต์สามารถควบคุมในระดับข้อต่อ (Joint level) และสามารถควบคุมตำแหน่งปลายแขนสัมพัทธ์กับแกนฐานของหุ่นยนต์ไปในพื้นที่ใช้งานของหุ่นยนต์ได้อย่างทั่วถึง โดยมีประสิทธิภาพของหุ่นยนต์ดังนี้มีความเร็วสูงสุดและความเร่งสูงสุดซึ่งหุ่นยนต์จุฬาเดลต้าสามารถควบคุมในระดับข้อต่อเท่ากับ 50 องศาต่อวินาที และ 5 องศาต่อวินาที^{2} ตามลำดับ มีความเที่ยงและความแม่น ในการเคลื่อนตำแหน่งปลายแขนของหุ่นยนต์จุฬาเดลต้าเท่ากับ 17.87 เปอร์เซ็นต์ และ0.1 มิลลิเมตรตามลำดับ และสามารถโปรแกรมควบคุมโปรแกรมด้วยภาษาแบบกราฟิกได้โดยวิธีการโปรแกรมผู้วิจัยได้พัฒนาโปรแกรมติดต่อและควบคุมอุปกรณ์ต่างๆในเวลาจริง ผ่านการสื่อสารในระดับล่าง (Low level programing) โดยได้พัฒนาโปรแกรมผ่านแผนที่หน่วยความจำ (Memory maps) ซึ่งทำให้สามารถพัฒนาและโปรแกรมระบบควบคุมได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้เป็นประโยชน์ต่อการพัฒนางานวิจัย ได้อย่างรวดเร็ว

การเสนอการควบคุมตำแหน่งหุ่นยนต์เดลต้าด้วยสัญญาณป้อนกลับจากปลายแขน วิธีการที่นำเสนอใช้การนำกล้องดิจิตอลแบบยูเอสบีมาติดตั้งที่ตำแหน่งปลายแขนของหุ่นยนต์แล้ว นำภาพที่ได้มาคำนวณหาตำแหน่งที่ปลายแขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปแล้วนำมาชดเชยปลายแขนของหุ่นยนต์ให้วิ่งไปยังตำแหน่งที่ถูกต้อง ระบบควบคุมทีนำเสนอใช้วิธีควบคุมแบบสองวงที่มีความถี่ในการทำงานไม่เท่ากัน การโปรแกรมระบบควบคุมจึงมีความสลับซับซ้อน ซึ่งจะใช้วิธีการควบคุมจะแบ่งออกเป็นสองวงควบคุมดังนี้ วงในเป็นการควบคุมตำแหน่งข้อต่อของแกนหุ่นยนต์เดลต้าทั้งสามแกน ซึ่งตัวควบคุมที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ ตัวควบคุมแบบสัดส่วนบวกกับแบบอนุพันธ์ (PD control) ซึ่งจะคำนวณแรงบิดของมอเตอร์แต่ละแกน แล้วส่งค่าออกไปยังแผงวงจรควบคุม เพื่อส่งสัญญาณไปยังอุปกรณ์ขยายสัญญาณและตัวขับมอเตอร์ต่อไป ส่วนการควบคุมในวงนอก จะเป็นการทำงานของระบบกล้องดิจิตอลแบบยูเอสบีซึ่งการทำงานจะใช้การถ่ายภาพผ่านระบบสื่อสารแบบยูเอสบี (USB) แล้วทำการประมวลผลภาพ โดยการประมวลผลภาพนั้นก่อนการทำงานต้องทำการสอบเทียบอุปกรณ์กล้องและตำแหน่งการติดตั้งของกล้องก่อนการใช้งาน การประมวลผลด้วยภาพนั้นมีการทำงานหลักอยู่สองขั้นตอน ขั้นตอนแรกคือการตัดสีของภาพ การทำงานในส่วนนี้จะทำงานด้วยการเปลี่ยนปริภูมิของสีจาก ปริภูมิ RGB ไปยังปริภูมิ HSV จากนั้นทำการกำหนดสีที่ต้องการหา ขั้นตอนที่สองที่หาวัตถุ (Feature extraction) ซึ่งจะใช้วิธีของฮัฟท์ในการค้นหาตำแหน่งวัตถุ จากนั้นนำตำแหน่งวัตถุที่ได้ส่งไปคำนวณหาตำแหน่งที่ปลายแขนของหุ่นยนต์เคลื่อนไปผ่านการคำนวณผ่าน จาโคเบียนภาพ หลังจากได้ตำแหน่งของปลายแขนหุ่นยนต์จุฬาเดลต้าแล้ว ทำการเปลี่ยนเทียบกับตำแหน่งที่หุ่นยนต์

เคลื่อนที่ไป จากนั้นนำค่าความผิดพลาดไปชดเชยการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ ทำให้ปลายแขนของหุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้อย่างถูกต้องมากขึ้น

จากผลการทดสอบประสิทธิภาพการควบคุมตำแหน่งปลายแขนของหุ่นยนต์จุฬาเดลต้าจะเห็นได้ ว่าการควบคุมตำแหน่งปลายแขนของหุ่นยนต์นั้น มีความไม่แม่นตรงเนื่องจากปัจจัยตัวแปรต่างๆที่ถูกนำคำนวณผ่านจลศาสตร์ย้อนกลับ อีกทั้งการสอบเทียบของหุ่นยนต์ก็เป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ทำให้ การควบคุมตำแหน่งปลายแขนของหุ่นยนต์มีความถูกต้องมากน้อยเพียงใด ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีวิธีใดวิธีหนึ่งในการเพิ่มความแม่นของตำแหน่งปลายแขนของหุ่นยนต์ ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการควบคุมตำแหน่งปลายแขนของหุ่นยนต์โดยใช้ กล้องดิจิตอลแบบยูเอสบีเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ จากผลการทดลองจะเห็นการพิมพ์สามมิติ โดยการใช้ค่าตำแหน่งจากกล้องชดเชยการเคลื่อนที่ของปลายแขนหุ่นยนต์ จะเห็นว่าชิ้นงานที่พิมพ์ออกมาจากหัวพิมพ์มีความถูกต้องมากขึ้น เปรียบเทียบกับชิ้นงานที่พิมพ์ออกมาจากหัวพิมพ์ที่ไม่ได้ใช้ระบบควบคุมที่นำเสนอ จะเห็นว่าการเพิ่มค่าแม่นยำของตำแหน่งปลายแขนของหุ่นยนต์โดยใช้กล้องนั้น มีประสิทธิภาพให้ชิ้นงานที่พิมพ์ออกมาดีขึ้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รายการอ้างอิง

1. Hui-Hung, L., et al. Robust control for a delta robot. in SICE Annual Conference (SICE), 2012 Proceedings of. 2012.
2. Poppeová, V., et al., DELTA ROBOTS – ROBOTS FOR HIGH SPEED MANIPULATION.
3. de Jong, J.J., et al. A method for evaluation and comparison of parallel robots for safe human interaction, applied to robotic TMS. in Biomedical Robotics and Biomechatronics (BioRob), 2012 4th IEEE RAS & EMBS International Conference on. 2012.
4. Vischer, P. and R. Clavel, Kinematic calibration of the parallel Delta robot. Robotica, 1998. **16**: p. 207-218.
5. Jiangping, M., et al. The error modeling and accuracy synthesis of a 3-DOF parallel robot Delta-S. in Information and Automation, 2009. ICIA '09. International Conference on. 2009.
6. Brogårdh, T. Design of high performance parallel arm robots for industrial applications. in Proceeding of Asymposium Commenmorating the Legacy, Works and Life of Sir Robert Stawell Ball Upon the 100th Anniversary of A Treatise on the Thoery fo Screws. 2000.
7. Gosselin and Clement, Kinematic Analysis, Optimization and Programming of Parallel Kinematic Robotic Manipulators. 1988, McGill University.
8. Liu, X.-J. and J. Wang, Some New Parallel Mechanisms Containing the Planar Four-Bar Parallelogram. The International Journal of Robotics Research, 2003. **22**.
9. Merlet and J.P., Parallel Robots. 2008, Springer.
10. EPSON ROBOT. SCARA ROBOT Available from: http://robots.epson.com/.
11. STRUIJK, ROBOTICS IN THE ERA - CHALLENGES ON ROBOT DESIGN. Debreceni Muszaki Kozlemenyek, 2011.
12. Briot, S. and I.A. Bonev, ARE PARALLEL ROBOTS MORE ACCURATE THAN SERIAL ROBOTS? CSME Transactions, 2007. **31**(4): p. 445-456.
13. Parallemic, Delta Parallel Robot the Story of Success.
14. A., P., Kinematics and workspace analysis of a three-axis parallel manipulator: The Orthoglide. Robotica. **24**: p. 34-99.
15. Clavel, R., Device for movement and positioning of an element in space. 1990.
16. ABB. The Second generation flexpicker. Available from: http://www.abb.com/.
17. Adept Technology, I. Adepth solar brochure. Available from: http://www.adept.com/.
18. FANUC. The m-3ia Robot. Available from: http://www.fanucrobotics.com/.

19. Bosch Packaging Technology. Demaurex. Available from: http://www.boschpackaging.com.
20. Angel, L., et al. Robotenis: parallel robot with visual control. in Automation Congress, 2004. Proceedings. World. 2004.
21. Kananai, J., N. Kowathanakul, and R. Chancharoen, Design and Control of a Chula Parallel Delta Rbot, in CRIT. 2012.
22. Poomarin, W., K. Chuengsatiansup, and R. Chanchareon, Visual positioning of a delta robot.
23. Boonhaijaroen, N. and R. Chancharoen. Walking of a delta robot in image space. 2012.
24. Kowathanakul, N., Development of a three degrees of freedom DELTA ROBOT. 2013, Chulalongkorn University.
25. Phanataporn, K. and R. Chacharoen, A up-uc FPGA synergey controller for a Linear delta robot. 2014.
26. Hsu, K.-S., et al., Modelling and index analysis of a Delta-type mechanism. Instn Mech Engrs, 2004. **218**.
27. Fraser, C.S., Invited Review Paper Digital camera self-calibration. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 1997. **52**: p. 149-159.
28. Heikkilä, J. and O. Silvén, A Four-step Camera Calibration Procedure with Implicit Image Correction.
29. Remondino, F. and C. Fraser, DIGITAL CAMERA CALIBRATION METHODS: CONSIDERATIONS AND COMPARISONS. Mechanism and Machine Theory 2007. **42**: p. 859-870.
30. Zhang, Z. Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations. in The Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision. 1999.
31. Corke, P.I., High Performance Visual Closed-Loop Robot Control. 1994, University of Melbourne. p. 546.
32. Ibraheem, N.A., et al., Understanding Color Models: A Review. ARPN Journal of Science and Technology, 2012. **2**(3).
33. Sural, S., G. Qian, and S. Pramanik, SEGMENTATION AND HISTOGRAM GENERATION USING THE HSV COLOR SPACE FOR IMAGE RETRIEVAL.
34. Weijer, J. and C. Schmid. Coloring Local Feature Extraction. in ECCV'06 Proceedings of the 9th European conference on Computer Vision, 2006. 2006.
35. Clark, P. and M. Mirmehdi, Estimating the Orientation and Recovery of Text Planes in a Single Image.

36. Sturm, P.F. and S.J. Maybank. On plane-based camera calibration: A general algorithm, singularities, applications. in Computer Vision and Pattern Recognition, 1999. IEEE Computer Society Conference on. 1999.
37. Stan, S., et al. Performance analysis of 3 DOF Delta parallel robot. in Human System Interactions (HSI), 2011 4th International Conference on. 2011.
38. Staicu, S. and D.C. Carp-Ciocardia. Dynamic analysis of Clavel's Delta parallel robot. in Robotics and Automation, 2003. Proceedings. ICRA '03. IEEE International Conference on. 2003.
39. Pinzon-Ardila, O., L. Angel, and M. Useche. xPC Target an option for position control of robotic manipulators. in Robotics Symposium, 2011 IEEE IX Latin American and IEEE Colombian Conference on Automatic Control and Industry Applications (LARC). 2011.
40. Shademan, A., et al. Robust Jacobian estimation for uncalibrated visual servoing. in Robotics and Automation (ICRA), 2010 IEEE International Conference on. 2010.
41. Adlink Technology Inc. PCI-8133 Specification. Available from: www.adlinktech.com.
42. Copley Control. ACCELUS PANEL ASP-90-36. Available from: http://www.copleycontrols.com.
43. Logitech. Logitech HD Pro Webcam C920. Available from: www.logitech.com.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ก.
อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ก.1 แผงควบคุม ADLINK รุ่น PCI-8133

ตารางที่ ก.1 คุณสมบัติของแผงควบคุม ADLINK PCI-8133 [41]

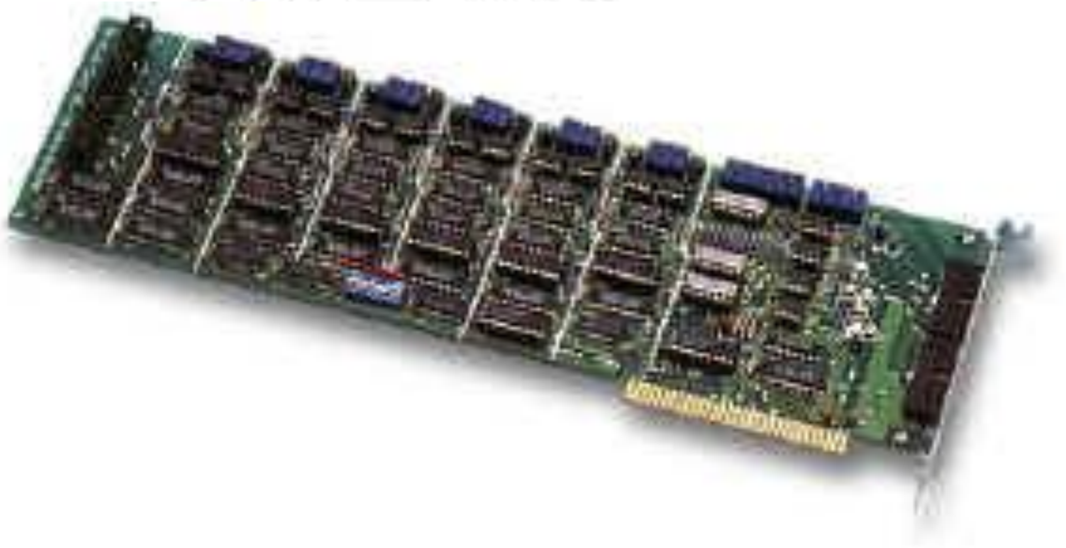
คุณสมบัติ	รายละเอียด
รุ่น	PCI-8133
ความละเอียด	16 บิต
จำนวนช่องสัญญาณ	3 ช่อง
ประเภทของสัญญาณขาเข้า	A,B Phase และindex
ช่องสัญญาณที่1	A,B phase และCCW/CW
ช่องสัญญาณที่2	A,B phase และCCW/CW
ช่องสัญญาณที่3	A,B phase และCCW/CW
ชนิดของตัวกรองสัญญาณ	ตัวกรองดิจิตอล อันดับสาม

รูปที่ ก.1 แผงควบคุม ADLINK รุ่น PCI-8133 [41]

ก.2 แผงควบคุม ADVANTECH PCL-726

ตารางที่ ก.2 คุณสมบัติของแผงควบคุม ADVANTECH PCL-726 [41]

คุณสมบัติ	รายละเอียด
รุ่น	PCL-726
จำนวนช่องของสัญญาณขาเข้าแบบอนาล็อก	6 ช่อง
ความละเอียด	12 บิต
ช่วงของสัญญาณขาออก	Unipolar: 0 ถึง +5 โวลต์, 0 ถึง +10 โวลต์ Bipolar: ±5 โวลต์, ±10 โวลต์
ความแม่น	±0.012% ของช่วงสเกล
ความเป็นเชิงเส้นของสัญญาณ	±½ บิต
จำนวนช่องสัญญาณดิจิตอล	16 ช่อง



รูปที่ ก.2 แผงควบคุม ADVANTECH PCL-726 [41]

ข.3 แผงควบคุม PCI-1784

ตารางที่ ก.3 คุณสมบัติของแผงควบคุม PCI-1784 [41]

คุณสมบัติ	รายละเอียด
รุ่น	PCI-1784
ความละเอียด	32 บิต
จำนวนช่องสัญญาณ	4 ช่อง
ประเภทของสัญญาณขาเข้า	A,B Phase และindex
ช่องสัญญาณที่1	A,B phase และCCW/CW
ช่องสัญญาณที่2	A,B phase และCCW/CW
ช่องสัญญาณที่3	A,B phase และCCW/CW
ชนิดของตัวกรองสัญญาณ	ตัวกรองดิจิตอล อันดับสี่

รูปที่ ก.3 แผงควบคุม PCI-1784 [41]

ก.4 ชุดขับมอเตอร์ ยี่ห้อ Accelus รุ่น ASP-090-36

ตารางที่ ก.4 คุณสมบัติของชุดขับมอเตอร์ ยี่ห้อ Accelus รุ่น ASP-090-36 [42]

คุณสมบัติ	รายละเอียด
รุ่น	ASP-090-36
ความถี่ของสัญญาณออกแบบ pulse width	40 kHz
Position loop update rate	4 kHz
Velocity loop update rate	4 kHz
Current loop update rate	20 kHz
Output Continuous Current Per Phase	12 แอมแปร์
ไฟเลี้ยงวงจร	24-90 โวลต์

รูปที่ ก.4 ชุดขับมอเตอร์ ยี่ห้อ ACCELUS ACP-90-[42]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ก.5 มอเตอร์แบบไม่ใช้แปลงถ่าน รุ่น MBT-N2305

ตารางที่ ก.5 คุณสมบัติของมอเตอร์แบบไม่ใช้แปลงถ่าน รุ่น MBT-N2305

คุณสมบัติ	รายละเอียด
รุ่น	MBT-N2305
แรงบิดสูงสุด	0.334 นิวตัน-เมตร
กระแสสูงสุด	4.7 แอมแปร์
แรงบิดต่อเนื่องสูงสุด	0.106 นิวตัน-เมตร
โมเมนต์ความเฉื่อยของโรเตอร์	0.158 กิโลกรัมต่อวินาที2
น้ำหนัก	0.77 กิโลกรัม
ค่าคงตัวแรงบิด(Torque Constant๗	0.682 N-m/Arms
ค่าคงความต่างศักย์(Voltage Constant)	12 Vrms/rad/sec
ความต้านทานของขดลวด (R)	9.7Ω
ค่าความเหนี่ยมนำ (L)	6.9 mH

รูปที่ ก.5 มอเตอร์แบบไม่ใช้แปลงถ่าน รุ่น MBT-N2305

ก.6 กล้องจุลทรรศน์ดิจิตอล(Digital micro scope)

ตารางที่ ก.6 คุณสมบัติของกล้องจุลทรรศน์ดิจิตอล

คุณสมบัติ	รายละเอียด
รุ่น	U500x
กำลังขยาย	50x-500x
ความละเอียด	2.0 mega pixel
ช่วงความยาวโฟกัส	10-40 มิลลิเมตร
Frame rate	30 Hz
น้ำหนัก	310 กรัม
ขนาด	117x33 มิลลิเมตร
ไฟเลี้ยง	5 โวลต์

รูปที่ ก.6 กล้องจุลทรรศน์ดิจิตอล

ก.7 ชุดสร้างสัญญาณพัลส์ด้วยมือ (Manual pulse generator)

คุณสมบัติของชุดสร้างสัญญาณพัลส์ด้วยมือ

- สวิตซ์ควบคุมสำหรับ x1, x10, x100
- สวิตซ์ควบคุมสำหรับ 4 แกน X,Y,Z,4th axis
- รองรับการใช้งานแบบ $A, \bar{A}, B, \bar{B}$
- ไฟเลี้ยงวงจร 5V+, 150mA
- รองรับการใช้งาน TTL output,ที่+-20mA;

รูปที่ ก.7 ชุดควบคุมด้วยมือ

ก.8 กล้องดิจิตอลแบบยูเอสบี ยี่ห้อ Logitech รุ่น HD Pro c920

คุณสมบัติของชุดสร้างสัญญาณพัลส์ด้วยมือ [43]

- ความละเอียด Full HD (สูงสุด 1920 x 1080 พิกเซล)
- เทคโนโลยี Logitech Fluid Crystal™
- การบีบอัดวิดีโอ H.264*
- เลนส์ Carl Zeiss® พร้อมโฟกัสอัตโนมัติ 20 จังหวะ
- แก้ไขสภาพแสงน้อยโดยอัตโนมัติ
- รับรองการใช้งาน Hi-Speed USB 2.0 (USB 3.0 พร้อมใช้งาน)

รูปที่ ก.8 กล้องดิจิตอลแบบยูเอสบียี่ห้อ Logitech รุ่น HD Pro c920 [43]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาคผนวก ข.

ผลการทดลอง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข.1 การทดสอบวัดความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งปลายแขนของหุ่นยนต์จุฬาเดลต้า โดยเคลื่อนที่ไปในแนวแกน x ระยะ 5 มิลลิเมตร

ลำดับ	x_1 (มิลลิเมตร)	y_1 (มิลลิเมตร)	x_2 (มิลลิเมตร)	y_2 (มิลลิเมตร)	ระยะกระจัด (พิกเซล)	ระยะกระจัด (มิลลิเมตร)
1	270	236	503	160	245.08	4.00
2	269	237	503	165	244.82	4.00
3	269	236	507	163	248.94	4.06
4	269	238	505	163	247.63	4.04
5	270	239	505	163	246.98	4.03
6	268	237	505	164	247.98	4.05
7	272	238	506	163	245.72	4.01
8	269	238	506	164	248.28	4.05
9	270	238	505	163	246.67	4.03
10	269	237	506	164	247.98	4.05
11	269	238	505	165	247.03	4.03
12	273	238	506	163	244.77	3.99
13	270	237	506	163	247.32	4.04
14	271	239	505	165	245.42	4.01
15	272	238	505	163	244.77	3.99

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข.2 การทดสอบวัดความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งปลายแขนของหุ่นยนต์จุฬาเดลต้า โดยเคลื่อนที่ไปในแนวแกน y ระยะ 5 มิลลิเมตร

ลำดับ	x_1 (มิลลิเมตร)	y_1 (มิลลิเมตร)	x_2 (มิลลิเมตร)	y_2 (มิลลิเมตร)	ระยะกระจัด (พิกเซล)	ระยะกระจัด (มิลลิเมตร)
1	165	131	234	373	251.64	4.11
2	163	133	236	373	250.85	4.09
3	163	132	236	372	250.85	4.09
4	163	132	236	372	250.85	4.09
5	164	131	236	370	249.60	4.07
6	163	131	235	371	250.56	4.09
7	163	132	238	372	251.44	4.10
8	164	132	237	372	250.85	4.09
9	164	130	235	372	252.20	4.12
10	162	132	238	371	250.79	4.09
11	163	132	236	371	249.89	4.08
12	164	130	237	373	253.72	4.14
13	165	132	240	373	252.40	4.12
14	165	131	239	374	254.01	4.15
15	167	133	237	373	250	4.08

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข.3 การทดสอบวัดความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งปลายแขนของหุ่นยนต์จุฬาเดลต้าในแนวแกน z

ลำดับ	x (มิลลิเมตร)	y (มิลลิเมตร)	z (มิลลิเมตร)	ลำดับ	x (มิลลิเมตร)	y (มิลลิเมตร)	z (มิลลิเมตร)
1	20	20	7.71	21	-20	20	7.60
2	18	20	7.66	22	-20	18	7.65
3	16	20	7.65	23	-20	16	7.65
4	14	20	7.65	24	-20	14	7.65
5	12	20	7.65	25	-20	12	7.67
6	10	20	7.64	26	-20	10	7.65
7	8	20	7.65	27	-20	8	7.65
8	6	20	7.64	28	-20	6	7.64
9	4	20	7.65	29	-20	4	7.66
10	2	20	7.67	30	-20	2	7.65
11	0	20	7.68	31	-20	0	7.64
12	-2	20	7.70	32	-20	-2	7.64
13	-4	20	7.71	33	-20	-4	7.66
14	-6	20	7.70	34	-20	-6	7.69
15	-8	20	7.70	35	-20	-8	7.67
16	-10	20	7.70	36	-20	-10	7.65
17	-12	20	7.65	37	-20	-12	7.67
18	-14	20	7.60	38	-20	-14	7.65
19	-16	20	7.59	39	-20	-16	7.61
20	-18	20	7.58	40	-20	-18	7.59

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข.4 การทดสอบวัดความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งปลายแขนของหุ่นยนต์จุฬาเดลต้าในแนวแกน z (ต่อ)

ลำดับ	x (มิลลิเมตร)	y (มิลลิเมตร)	z (มิลลิเมตร)	ลำดับ	x (มิลลิเมตร)	y มิลลิเมตร)	z (มิลลิเมตร)
41	-20	-20	7.58	61	20	-20	7.54
42	-18	-20	7.56	62	20	-18	7.55
43	-16	-20	7.58	63	20	-16	7.57
44	-14	-20	7.5	64	20	-14	7.57
45	-12	-20	7.5	65	20	-12	7.58
46	-10	-20	7.52	66	20	-10	7.58
47	-8	-20	7.54	67	20	-8	7.62
48	-6	-20	7.62	68	20	-6	7.59
49	-4	-20	7.62	69	20	-4	7.62
50	-2	-20	7.61	70	20	-2	7.62
51	0	-20	7.62	71	20	0	7.61
52	2	-20	7.63	72	20	2	7.60
53	4	-20	7.58	73	20	4	7.59
54	6	-20	7.58	74	20	6	7.65
55	8	-20	7.58	75	20	8	7.64
56	10	-20	7.59	76	20	10	7.64
57	12	-20	7.56	77	20	12	7.65
58	14	-20	7.58	78	20	14	7.69
59	16	-20	7.55	79	20	16	7.68
60	18	-20	7.54	80	20	18	7.70

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ตารางที่ ข.5 การทดสอบหาจาโคเบียนรูปภาพของปลายแขนของหุ่นยนต์เทียบกับกล้อง

ลำดับ	x_d (มิลลิเมตร)	y_d (มิลลิเมตร)	x_c (มิลลิเมตร)	y_c (มิลลิเมตร)
1	0.02	0	-1.15	-8.50
2	5.02	0	-1.29	-5.84
3	10.06	0	-1.43	-3.02
4	15.02	0	-1.88	-0.18
5	20.02	0	-2.02	2.63
6	25.02	0	-2.47	5.48
7	30.02	0	-2.61	8.31
8	35.02	0	-2.92	11.15
9	40.02	0	-3.21	14.01
10	0.02	0	-8.60	-1.18
11	0.02	5	-5.74	-1.25
12	0.02	10	-3.08	-1.48
13	0.02	15	-0.12	-1.74
14	0.02	20	2.65	-2.08
15	0.02	25	5.44	-2.51
16	0.02	30	8.36	-2.65
17	0.02	35	11.11	-2.99
18	0.02	40	14.07	-3.25

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายจารุบุตร คณะนัย เกิดเมื่อวันที่ 20 เมษายน พ.ศ. 2525 ภูมิลำเนาอยู่ที่จังหวัดแพร่ สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาจากโรงเรียนพิริยาลัยจังหวัดแพร่ หลังจากนั้นได้เข้าศึกษาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต ณ จุฬาลงกรณ์ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จาก ภาควิชาเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ ในปีการศึกษา 2542 และสำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2551 และได้เข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี 2552

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University