การออกแบบระบบหุ่นยนต์เดลต้าแบบสามองศาอิสระสำหรับทำงานกำหนดตำแหน่งหมุดร่วมกับมนุษย์ในเวลาจริง

นายภัทรวุธ สุภามา

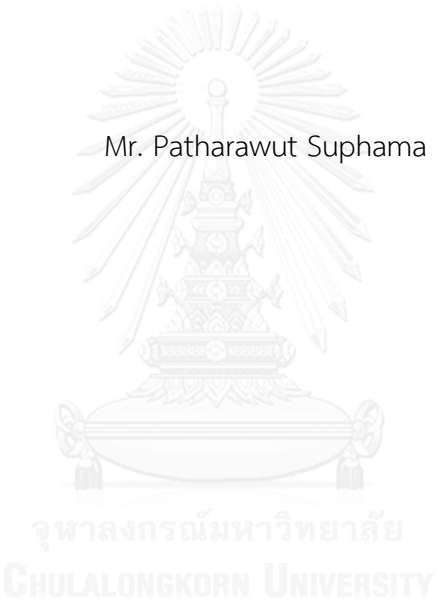
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

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.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2557
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DESIGN OF A THREE DEGREES OF FREEDOM DELTA TELEROBOT FOR PEG POSITIONING TASK WITH HUMAN IN REAL TIME.

Mr. Patharawut Suphama



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Mechanical Engineering
Department of Mechanical Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2014

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การออกแบบระบบหุ่นยนต์เดลต้าแบบสามองศาอิสระสำหรับทำงานกำหนดตำแหน่งหมุดร่วมกับมนุษย์ในเวลาจริง
โดย	นายภัทรวุธ สุภามา
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ ดร.รัชทิน จันทร์เจริญ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.บัณฑิต เอื้ออาภรณ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สัณหพศ จันทรานุวัฒน์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ ดร.รัชทิน จันทร์เจริญ)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิทยา วัณณสุโภประสิทธิ์)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร.จารุบุตร คณะนัย)

ภัทรวุธ สุภามา : การออกแบบระบบหุ่นยนต์เดลต้าแบบสามองศาอิสระสำหรับทำงานกำหนดตำแหน่งหมุดร่วมกับมนุษย์ในเวลาจริง (DESIGN OF A THREE DEGREES OF FREEDOM DELTA TELEROBOT FOR PEG POSITIONING TASK WITH HUMAN IN REAL TIME.) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: รศ. ดร.รัชทิน จันทร์เจริญ, 61 หน้า.

การออกแบบระบบหุ่นยนต์เดลต้าแบบสามองศาอิสระสำหรับทำงานกำหนดตำแหน่งหมุดร่วมกับมนุษย์ในเวลาจริง เป็นการออกแบบระบบหุ่นยนต์เพื่อนำมาใช้กับงานกำหนดตำแหน่งหมุดซึ่งมีความซับซ้อน สภาพแวดล้อมไม่คงที่ รวมทั้งมีแรงสัมผัสระหว่างหุ่นยนต์กับชิ้นงาน ดังนั้นจึงมีองค์ประกอบภายในระบบที่มีความซับซ้อนทั้งทางด้านโครงสร้างของระบบทางกล ส่วนต่อประสานและระบบควบคุม การออกแบบหุ่นยนต์เดลต้าแบบสามองศาอิสระมีเหตุผลมาจากน้ำหนักที่เบาของโครงสร้างทำให้สามารถควบคุมหุ่นยนต์ให้เคลื่อนที่ได้อย่างรวดเร็วเหมาะกับการทำงานร่วมกับมนุษย์ในเวลาจริงเนื่องจากการตอบสนองที่รวดเร็ว และทำให้สามารถใช้ระบบขับเคลื่อนที่มีขนาดเล็กประหยัดพลังงาน รวมทั้งมีความปลอดภัยต่อมนุษย์ การทำงานกำหนดตำแหน่งหมุดของหุ่นยนต์จำเป็นต้องมีการควบคุมตำแหน่งและแรงของหุ่นยนต์ซึ่งเป็นการควบคุมตำแหน่ง/แรงแบบไฮบริด รวมทั้งอุปกรณ์คอมไพลอันท์แบบพาสซีฟที่ฐานพื้นที่ทำงานเพื่อช่วยให้การเคลื่อนที่ระหว่างหุ่นยนต์กับชิ้นงานเป็นแบบคอมไพลอันท์ เพื่อให้สามารถปักหมุดลงหลุมได้ง่ายขึ้นและลดความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับชิ้นงานและหุ่นยนต์ วิทยานิพนธ์นี้จึงนำหลักการของฟิตต์มาพัฒนาวิธีการประเมินและประยุกต์ให้เหมาะสมเพื่อประเมินสมรรถนะการทำงานของหุ่นยนต์ร่วมกับมนุษย์ ได้ข้อสรุปว่า ประการแรก มนุษย์จับปลายแขนหุ่นยนต์ปักหมุดมีสมรรถนะการทำงานดีกว่ามนุษย์ควบคุมหุ่นยนต์โดยใช้อุปกรณ์ควบคุมแฮปติกที่มีเพียงการควบคุมตำแหน่ง และแฮปติกที่มีการควบคุมทั้งตำแหน่งและแรง โดยเป็นการควบคุมแรงในแนวระนาบผ่านทางระบบควบคุม การใช้แฮปติกทั้งสองแบบมีสมรรถนะการทำงานใกล้เคียงกัน ประการต่อมา คือ การใช้เครื่องมือกระทำกับชิ้นงานหรือแท่งหมุดซึ่งเป็นแท่งทรงกระบอกขนาดเล็กกว่าขนาดหลุมที่ปักลงไปจะมีสมรรถนะการทำงานดีกว่าการใช้แท่งทรงกระบอกขนาดพอดีขนาดหลุม เนื่องจากดัชนีความยากของการทำงานแตกต่างกัน และประการสุดท้าย พบว่า การทำงานโดยการมองชิ้นงานโดยตรงไม่ผ่านระบบภาพจะมีสมรรถนะการทำงานดีกว่าการใช้ระบบภาพในการควบคุมหุ่นยนต์

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ปีการศึกษา 2557

5770536621 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING
KEYWORDS: TELEROBOTICS, PEG-IN-HOLE TASK, PERFORMANCE.

PATHARAWUT SUPHAMA: DESIGN OF A THREE DEGREES OF FREEDOM DELTA TELEROBOT FOR PEG POSITIONING TASK WITH HUMAN IN REAL TIME.. ADVISOR: ASSOC. PROF. RATCHATIN CHANCHAROEN, Ph.D., 61 pp.

Design of a three degrees of freedom delta telerobot for peg positioning task with human in real time is to be applied to a complex task which is peg-in-hole task in uncertainties of the environment from physical interactions and mechanical contacts with the environment. The complicated systems, including mechanical structure, human-machine interfaces, and control systems, play an essential role in design. The delta robot has low mass structure and fast response, suitable for work with human in real time and possible to use small motors to save energy. A Hybrid Position/Force control and a passive compliant device are required to accomplish the peg positioning task assisting the robot to peg easily and reducing damages of both the robot and a work piece. This thesis proposes a performance evaluation of control the delta telerobot for peg positioning task with human in real time. The result shows that using the Haptic device has time to completion as close as the Haptic device with force control in the system and both time to completion are more than human moving the end effector himself. Using the smaller peg has less time to completion than the larger one due to the different index of difficulty. Moreover, operating the peg positioning task in direct view gives the better performance than 3D view.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

Department: Mechanical Engineering Student's Signature .....
Field of Study: Mechanical Engineering Advisor's Signature .....
Academic Year: 2014

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.รัชทิน จันทร์เจริญ ที่ได้มอบโอกาสในการทำวิทยานิพนธ์นี้ รวมทั้งสละเวลาส่วนตัวทุ่มเทให้ความรู้ ดูแลให้คำแนะนำ และผลักดันให้งานสำเร็จลุล่วงอย่างใกล้ชิด ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สัณหพศ จันทรานุวัฒน์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิทยา วัณณสุโภประสิทธิ์ สำหรับการเสียสละเวลาให้คำแนะนำแนวทางในการทำวิจัย ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พงศ์แสน พิทักษ์วัชระ สำหรับอุปกรณ์ควบคุม และการสนับสนุนที่มีคุณค่าเป็นอย่างยิ่งในการทำวิทยานิพนธ์ ขอขอบคุณ นายจารุบุตร คณะนัย และนายนภสร โกวรรธนะกุล รุ่นพี่นิสิตปริญญาเอก และปริญญาโท ในห้องปฏิบัติการ ที่ได้ให้คำปรึกษาและแนะนำในความรู้ที่เกี่ยวข้องกับวิทยานิพนธ์ สุดท้ายขอขอบคุณทุนสนับสนุนวิจัยจากโครงการศึกษาต่อเนื่องตรี-โท คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ
กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ
สารบัญ ..... ช
สารบัญภาพ ..... ญ
สารบัญตาราง ..... ฏ
บทที่ 1 บทนำ 1
1.1 ที่มาและความสำคัญ 1
1.2 วัตถุประสงค์ 3
1.3 ขอบเขตของโครงงาน 3
1.4 ขั้นตอนการดำเนินการ 3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 4
บทที่ 2 ปริทัศน์วรรณกรรม 5
2.1 ความหมาย และความสำคัญของการควบคุมหุ่นยนต์เพื่อให้ทำงานร่วมกับมนุษย์ 5
2.2 งานวิจัยเกี่ยวกับหุ่นยนต์เดลต้า 7
2.3 งานวิจัยเกี่ยวกับการทำงานกำหนดตำแหน่งหมุดของหุ่นยนต์ 8
2.4 งานวิจัยเกี่ยวกับการประเมินสมรรถนะการทำงานของหุ่นยนต์ร่วมกับมนุษย์ 9
บทที่ 3 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง 11
3.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวกับกลศาสตร์ของหุ่นยนต์เดลต้า 11
3.1.1 การกำหนดตัวแปร (Geometric Parameters) 11
3.1.2 จลนศาสตร์ไปข้างหน้า (Forward Kinematics) 11
3.1.3 จลนศาสตร์แบบผกผัน (Inverse Kinematics) 12

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

หน้า

3.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวกับการทำงานกำหนดตำแหน่งหมุดของหุ่นยนต์ 12
3.2.1 การควบคุมตำแหน่งและแรง (Position/Force control) 13
3.2.1.1 การควบคุมตำแหน่ง/แรงแบบไฮบริด (Hybrid position/force control)... 14
3.2.1.2 การควบคุมแบบคอมไพลอันซ์ (Compliance control) 18
3.2.2 การเคลื่อนที่แบบคอมไพลอันท์ (Compliant motion) ของหุ่นยนต์..... 20
3.3 ทฤษฎีที่เกี่ยวกับการทำงานของหุ่นยนต์ร่วมกับมนุษย์ในเวลาจริง 21
3.3.1 ปัจจัยด้านความปลอดภัยต่อมนุษย์ 21
3.3.2 ปัจจัยด้านการรับรู้ของมนุษย์..... 22
3.3.2.1 ความหน่วงของเวลา (Time delay)..... 22
3.3.2.2 ส่วนต่อประสานระหว่างมนุษย์และหุ่นยนต์ (Human-machine interfaces) 23
3.4 ทฤษฎีที่เกี่ยวกับการประเมินสมรรถนะการทำงานของหุ่นยนต์ร่วมกับมนุษย์ 25
บทที่ 4 การออกแบบระบบหุ่นยนต์เดลต้า 28
4.1 คุณสมบัติของหุ่นยนต์เดลต้า..... 28
4.2 การออกแบบโครงสร้างทางกล 29
4.3 ระบบขับเคลื่อนและวัดตำแหน่ง..... 30
4.4 การออกแบบหุ่นยนต์เดลต้าเพื่อทำงานกำหนดตำแหน่งหมุดร่วมกับมนุษย์ในเวลาจริง..... 31
4.4.1 ขั้นตอนการควบคุมหุ่นยนต์ทำงานกำหนดตำแหน่งหมุด 31
4.4.2 ส่วนประกอบของหุ่นยนต์สำหรับการทำงานกำหนดตำแหน่งหมุด 32
4.4.2.1 ปลายแขนหุ่นยนต์ (End effector)..... 33
4.4.2.2 ตัวตรวจวัดแรง (Force sensor)..... 34
4.4.2.3 เครื่องมือที่กระทำกับชิ้นงาน (Tool) 34
4.4.3 ส่วนพื้นที่สำหรับการทำงานกำหนดตำแหน่งหมุด 36

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

หน้า

4.4.3.1 ชิ้นงาน 36
4.4.3.1.1 แผ่นเจาะรู (Hole mask) 36
4.4.3.1.2 แป้นปุ่มกด (Keypad) 36
4.4.3.1.3 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ (Micro controller) 37
4.4.3.2 ฐานพื้นที่ทำงาน 38
4.4.4 ส่วนต่อประสานระหว่างมนุษย์และหุ่นยนต์สำหรับการทำงานกำหนดตำแหน่งหมุดในเวลาจริง 39
4.4.4.1 ระบบภาพ (Visual system) 39
4.4.4.1.1 กล้องดิจิตอล 39
4.4.4.1.2 หน้าจอแสดงผล 41
4.4.4.2 อุปกรณ์ควบคุม 42
4.5 การควบคุมหุ่นยนต์เดลต้าสำหรับทำงานกำหนดตำแหน่งหมุดร่วมกับมนุษย์ในเวลาจริง 43
4.6 ระบบสัญญาณควบคุมหุ่นยนต์สำหรับทำงานกำหนดตำแหน่งหมุดร่วมกับมนุษย์ในเวลาจริง 44
บทที่ 5 ผลการประเมินสมรรถนะการทำงานของหุ่นยนต์ร่วมกับมนุษย์ 46
5.1 ผลการประเมินสมรรถนะการทำงานของหุ่นยนต์สำหรับทำงานกำหนดตำแหน่งหมุดร่วมกับมนุษย์ในเวลาจริง 46
5.2 สรุปผลประเมินสมรรถนะการทำงานของหุ่นยนต์สำหรับทำงานกำหนดตำแหน่งหมุดร่วมกับมนุษย์ในเวลาจริง 48
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย 51
รายการอ้างอิง 54
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 61

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญภาพ

รูปที่ 3.1 แผนภาพการควบคุมตำแหน่งและแรง 14
รูปที่ 3.2 ระบบควบคุมตำแหน่ง/แรงแบบไฮบริด 16
รูปที่ 4.1 โครงสร้างของหุ่นยนต์เดลต้า 29
รูปที่ 4.2 ระบบขับเคลื่อนและวัดตำแหน่ง 30
รูปที่ 4.3 ภาพรวมของระบบหุ่นยนต์เดลต้าแบบสามองศาอิสระสำหรับทำงานกำหนดตำแหน่งหมุดร่วมกับมนุษย์ในเวลาจริง 32
รูปที่ 4.4 ปลายแขนหุ่นยนต์ส่วนบน 33
รูปที่ 4.5 ปลายแขนหุ่นยนต์ส่วนล่าง 33
รูปที่ 4.6 ตัวตรวจวัดแรง 34
รูปที่ 4.7 เครื่องมือที่กระทำกับชิ้นงาน 35
รูปที่ 4.8 ปลายแขนหุ่นยนต์ที่ติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆขณะทำงานกำหนดตำแหน่งหมุด 35
รูปที่ 4.9 ชิ้นงานส่วนที่เป็นแผ่นเจาะรู 36
รูปที่ 4.10 แป้นปุ่มกด 37
รูปที่ 4.11 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ 37
รูปที่ 4.12 ฐานพื้นที่ทำงาน 38
รูปที่ 4.13 ชิ้นงานบนฐานพื้นที่ทำงาน 39
รูปที่ 4.14 การวางตำแหน่งของระบบกล้องดิจิตอล 40
รูปที่ 4.15 การวางตำแหน่งระบบหน้าจอแสดงผล 41
รูปที่ 4.16 อุปกรณ์ควบคุมแฮปติก 42
รูปที่ 4.17 แผนภาพการควบคุมหุ่นยนต์สำหรับทำงานกำหนดตำแหน่งหมุดร่วมกับมนุษย์ในเวลาจริง 44
รูปที่ 4.18 แผนภาพระบบสัญญาณหุ่นยนต์ สำหรับทำงานกำหนดตำแหน่งหมุดร่วมกับมนุษย์ในเวลาจริง 45

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ 5.1 การเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการควบคุมหุ่นยนต์ทำงานกำหนดตำแหน่งหมุดร่วมกับมนุษย์ในแต่ละวิธีการผ่านทางการมองเห็นของมนุษย์โดยตรง 47

รูปที่ 5.2 การเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการควบคุมหุ่นยนต์ทำงานกำหนดตำแหน่งหมุดร่วมกับมนุษย์ในแต่ละวิธีการผ่านทางระบบภาพจากกล้อง 47

รูปที่ 5.3 การเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการควบคุมหุ่นยนต์ทำงานกำหนดตำแหน่งหมุดร่วมกับมนุษย์ในแต่ละวิธีการ 48

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญตาราง

ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขบังคับของการทำงานกำหนดตำแหน่งหมุด [44] 15

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ประวัติศาสตร์ของหุ่นยนต์มีมายาวนานควบคู่กับแนวคิดการนำหุ่นยนต์มาใช้ทำงานแทนมนุษย์เพื่อให้ความเป็นอยู่มนุษย์มีความสะดวกสบายขึ้น ยุคของหุ่นยนต์ที่เกิดการปฏิวัติวงการอุตสาหกรรมเริ่มต้นที่ช่วงปี ค.ศ.1970 หุ่นยนต์อุตสาหกรรม (Industrial robot) ถูกสร้างขึ้นเพื่อทำงานแทนมนุษย์ผ่านการเขียนชุดคำสั่งในขั้นตอนก่อนปฏิบัติงาน ดังนั้นหุ่นยนต์อุตสาหกรรมจะทำงานภายใต้เงื่อนไขสภาพแวดล้อมที่คงที่ มีตำแหน่งของการเคลื่อนที่แต่ละขั้นตอนชัดเจนและไม่เปลี่ยนแปลง เนื่องจากระดับการประมวลผลสมองกลของหุ่นยนต์ยังไม่ก้าวหน้าพอ ด้วยข้อจำกัดของรูปแบบงานที่ต้องการสภาพแวดล้อมคงที่

ต่อมาจึงมีการพัฒนาหุ่นยนต์รูปแบบมนุษย์สั่งการหุ่นยนต์ (Master-slave robot) ในช่วงปี ค.ศ.1980 เพื่อให้มนุษย์เป็นผู้ควบคุมหุ่นยนต์ภายใต้สภาพแวดล้อมที่ไม่คงที่ เนื่องจากรูปแบบงานในสภาพแวดล้อมดังกล่าวต้องการสมองมนุษย์ในการตัดสินใจ รวมถึงความชำนาญในทักษะต่างๆและกระบวนการคิดของมนุษย์ ทำให้รูปแบบดังกล่าวมนุษย์จะควบคุมหุ่นยนต์เกือบทั้งหมด

การควบคุมหุ่นยนต์ระยะไกล (Teleoperation) เป็นหนึ่งในรูปแบบมนุษย์สั่งการหุ่นยนต์ เป็นการควบคุมหุ่นยนต์จัดการกับสภาพแวดล้อมที่มนุษย์เข้าถึงยาก โดยมนุษย์ควบคุมหุ่นยนต์ผ่านส่วนต่อประสานระหว่างมนุษย์และหุ่นยนต์ด้วยอุปกรณ์ควบคุม (Human Machine Interface device) และสังเกตการณ์ผ่านทางหน้าจอแสดงผลแบบสัญญาณป้อนกลับ (Visual feedback display)

ในช่วงปี ค.ศ.1990 นักวิจัยนำเอาเทคโนโลยีที่ก้าวหน้าขึ้นมาพัฒนาหุ่นยนต์ควบคุมระยะไกลเกิดรูปแบบใหม่ในการควบคุมหุ่นยนต์ คือ การควบคุมหุ่นยนต์ระยะไกลให้ทำงานร่วมกับมนุษย์ (Telerobot) เป็นการควบคุมหุ่นยนต์แบบกึ่งอัตโนมัติ (Semi-autonomous robot) การทำงานร่วมกันระหว่างมนุษย์กับหุ่นยนต์จะมีมนุษย์ทำงานในส่วนที่ตนเองถนัด เช่น ทักษะความชำนาญ การตัดสินใจ การจัดการกับรูปแบบงานในสภาพแวดล้อมไม่คงที่ และหุ่นยนต์จะช่วยควบคุมในส่วนที่เหลือที่หุ่นยนต์มีความถนัดมากกว่ามนุษย์ เช่น การประมวลผล การคำนวณ การวัด และงานที่เกี่ยวข้องกับตำแหน่งการเคลื่อนที่

วิทยานิพนธ์นี้จะเน้นไปที่การออกแบบและควบคุมหุ่นยนต์เพื่อให้ทำงานร่วมกับมนุษย์ได้ในเวลาจริงที่เป็นการควบคุมระยะไกล ซึ่งยังคงมีประเด็นที่น่าศึกษาและสามารถพัฒนาเพื่อให้ระบบมีความสมบูรณ์มากขึ้นได้ การออกแบบระบบหุ่นยนต์ทำงานร่วมกับมนุษย์จะก่อให้เกิดประสิทธิภาพใน

การทำงานอย่างยิ่งในงานหลากหลายประเภท จึงมีประโยชน์และมีความสำคัญมากในปัจจุบัน รวมถึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในการมีบทบาทและเป็นส่วนหนึ่งในชีวิตประจำวันของมนุษย์ในอนาคตอันใกล้อีกด้วย

วิทยานิพนธ์นี้ออกแบบระบบควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์ร่วมกับมนุษย์โดยใช้หุ่นยนต์เดลต้า เพราะโครงสร้างที่มีน้ำหนักเบาทำให้มีการตอบสนองที่รวดเร็ว และมีความปลอดภัยต่อมนุษย์เหมาะกับการทำงานร่วมกันระหว่างมนุษย์และหุ่นยนต์ โดยวิเคราะห์เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของหุ่นยนต์สองลักษณะคือ หุ่นยนต์โครงสร้างอนุกรม (Serial link) และหุ่นยนต์โครงสร้างขนาน (Parallel link) หรือโครงสร้างแบบปิด ได้ข้อสรุปว่าหุ่นยนต์โครงสร้างแบบขนานจะมีน้ำหนักเบากว่า เพราะสามารถรับภาระต่อน้ำหนักของหุ่นยนต์ได้มากกว่าหุ่นยนต์โครงสร้างแบบอนุกรม เนื่องจากโครงสร้างขนานมีจำนวนแขนและข้อต่อที่ปลายหุ่นยนต์มากกว่าโครงสร้างอนุกรม ทำให้มีภาระเฉลี่ยขณะทำงานบนแต่ละแขนของโครงสร้างขนานมีขนาดน้อยกว่าแบบอนุกรม

การที่หุ่นยนต์จำเป็นต้องมีน้ำหนักเบามีความสำคัญมาก เพราะต้องใช้ในการทำงานร่วมกับมนุษย์ ซึ่งต้องการให้หุ่นยนต์มีการตอบสนองที่รวดเร็วและมนุษย์ไม่รู้สึกถึงเวลาหน่วง และต้องคำนึงถึงความปลอดภัยของมนุษย์ หุ่นยนต์โครงสร้างขนานที่มีน้ำหนักเบาจะมีการตอบสนองที่รวดเร็วและมีอันตรายต่อมนุษย์น้อยลง รวมถึงการขับเคลื่อนที่ง่ายขึ้นทำให้มอเตอร์มีขนาดเล็กลงอีกด้วย

การออกแบบระบบหุ่นยนต์เดลต้าแบบสามองศาอิสระเพื่อให้ทำงานร่วมกับมนุษย์ในเวลาจริงจะนำไปใช้กับการทำงานกำหนดตำแหน่งหมุด เพราะเป็นงานที่มีแรงกระทำกับสภาพแวดล้อมหรือชิ้นงาน เพื่อศึกษาระบบหุ่นยนต์ที่จะจัดการกับแรงเหล่านั้น ทั้งการออกแบบระบบควบคุมแรง และการออกแบบทางกล งานกำหนดตำแหน่งหมุด (Peg positioning task) หรืองานปักหมุดลงหลุม (Peg-in-hole task) สามารถนำไปใช้จริงได้ในอุตสาหกรรมการประกอบชิ้นส่วนทางกล โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมยานยนต์

เมื่อออกแบบระบบหุ่นยนต์เดลต้าแบบสามองศาอิสระสำหรับทำงานกำหนดตำแหน่งหมุดร่วมกับมนุษย์ในเวลาจริงให้สามารถทำงานได้ ขั้นต่อไปคือการประเมินสมรรถนะการทำงานของหุ่นยนต์ร่วมกับมนุษย์ ในอดีตการควบคุมหุ่นยนต์ระยะไกล (Tele-operated system) ที่เป็นการควบคุมแบบ มนุษย์สั่งการหุ่นยนต์ นำหลักการของฟิตต์ (Fitts' Law) มาใช้ในการประเมิน ซึ่งเป็นการทดสอบสมรรถนะการทำงานของมนุษย์ในการใช้มือและแขนเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการโดยไม่คำนึงถึงเส้นทางการเคลื่อนที่

วิทยานิพนธ์นี้ได้ออกแบบให้ชิ้นงานอยู่ในสภาพแวดล้อมไม่คงที่ กล่าวคือ มีลำดับการทำงานที่ไม่แน่นอน โดยจะทำการสุ่มตำแหน่งของหลุมที่จะต้องบังคับหุ่นยนต์ไปปักหมุด เพื่อให้เป็นงานที่เหมาะสมสำหรับควบคุมหุ่นยนต์ทำงานร่วมกับมนุษย์ และไม่สามารถใช้หุ่นยนต์อุตสาหกรรมได้ ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้ไม่สามารถนำหลักการของฟิตต์มาใช้ได้โดยตรง เพราะหลักการของฟิตต์ตำแหน่ง

ในการเคลื่อนที่แต่ละรอบการทดลองจะมีความแน่นอน รวมทั้งระบบหุ่นยนต์ทำงานร่วมกับมนุษย์สามารถปรับค่าเกนให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่เร็วเกินขีดจำกัดของกล้ามเนื้อมนุษย์ได้ ทำให้หลักการของฟิตต์ที่ใช้สำหรับทดสอบมนุษย์เป็นหลักไม่ควรนำมาใช้โดยตรงเช่นเดียวกัน วิทยานิพนธ์นี้จึงนำหลักการของฟิตต์มาพัฒนาวิธีการประเมินและประยุกต์ให้เหมาะสม

การออกแบบระบบหุ่นยนต์เดลต้าแบบสามองศาอิสระสำหรับทำงานกำหนดตำแหน่งหมุดร่วมกับมนุษย์ในเวลาจริงจะออกแบบโดยเน้นไปที่โครงสร้างทางกลและระบบหุ่นยนต์เดลต้าเพื่อให้ทำงานร่วมกับมนุษย์ โดยเฉพาะส่วนประกอบต่างๆภายในระบบ ที่จะช่วยเหลือการทำงานของหุ่นยนต์ร่วมกับมนุษย์ให้เหมาะสม เช่น ส่วนต่อประสาน หรือระบบภาพที่ประกอบด้วยกล้องและหน้าจอแสดงผล ตัวตรวจวัดแรง และฐานพื้นที่ทำงาน เพื่อให้ทำงานกำหนดตำแหน่งหมุดร่วมกับมนุษย์ แล้วนำหลักการของฟิตต์มาพัฒนาวิธีการประเมินสมรรถนะการทำงาน เพื่อประยุกต์ใช้ในการประเมินผ่านการจำลองการทำงานกำหนดตำแหน่งหมุด

1.2 วัตถุประสงค์

1.เพื่อพัฒนาระบบหุ่นยนต์เดลต้าแบบสามองศาอิสระให้ทำงานร่วมกับมนุษย์ในเวลาจริง

2.เพื่อพัฒนากรอบการประเมินสมรรถนะการทำงานของระบบหุ่นยนต์ที่ทำงานร่วมกับมนุษย์

1.3 ขอบเขตของโครงงาน

1.ออกแบบระบบหุ่นยนต์เดลต้าแบบสามองศาอิสระสำหรับทำงานร่วมกับมนุษย์ในเวลาจริง โดยคำนึงถึงโครงสร้างทางกลและระบบหุ่นยนต์เดลต้าเพื่อให้ทำงานร่วมกับมนุษย์ โดยเฉพาะส่วนประกอบต่างๆภายในระบบ ที่จะช่วยเหลือการทำงานของหุ่นยนต์ร่วมกับมนุษย์ให้เหมาะสม เช่น ส่วนต่อประสาน หรือระบบภาพที่ประกอบด้วยกล้องและหน้าจอแสดงผล ตัวตรวจวัดแรง และฐานพื้นที่ทำงาน เพื่อให้ทำงานกำหนดตำแหน่งหมุดร่วมกับมนุษย์

2.นำหลักการของฟิตต์มาพัฒนาวิธีการประเมินสมรรถนะการทำงาน เพื่อประยุกต์ใช้ในการประเมินผ่านการจำลองการทำงานกำหนดตำแหน่งหมุด

1.4 ขั้นตอนการดำเนินการ

1.ศึกษาและค้นคว้างานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับระบบควบคุมหุ่นยนต์เพื่อให้ทำงานร่วมกับมนุษย์ และศึกษาการทำงานและกลไกของหุ่นยนต์แบบเดลต้า

2.ออกแบบระบบควบคุมหุ่นยนต์เดลต้าให้สามารถทำงานร่วมกับมนุษย์ในเวลาจริงโดยใช้อุปกรณ์ช่วยเหลือสำหรับการทำงาน เช่น ส่วนต่อประสาน หรือระบบภาพที่ประกอบด้วยกล้องและหน้าจอแสดงผล ตัวตรวจวัดแรง และฐานพื้นที่ทำงาน

3.ศึกษาการเขียนโปรแกรม สำหรับเขียนคำสั่งในการควบคุมหุ่นยนต์ และศึกษาระบบควบคุมทั้งหมดที่จำเป็นในการเชื่อมต่ออุปกรณ์ควบคุมกับหุ่นยนต์

4.ออกแบบกรอบการประเมินสมรรถนะการทำงานของหุ่นยนต์ร่วมกับมนุษย์ แล้วทดสอบระบบควบคุมหุ่นยนต์ให้สามารถทำงานได้จริงกับรูปแบบงานที่ออกแบบขึ้น

5.ปรับปรุงวิธีการทดสอบ และแบบทดสอบการทำงาน เพื่อให้สามารถวัดสมรรถนะการทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ และมีความเหมาะสมในการทำงาน แล้วทดสอบอีกครั้ง (ข้อ 4)

6.ทวนสอบผลลัพธ์ที่ได้ ทำซ้ำข้อ 5 จนได้ผลลัพธ์ที่น่าเชื่อถือ

7.วิเคราะห์ และอภิปรายผลการทดสอบ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.ได้ระบบควบคุมหุ่นยนต์เดลต้าให้สามารถทำงานร่วมกับมนุษย์ได้ในเวลาจริง และพัฒนาระบบควบคุมให้มีระบบช่วยเหลือการทำงานเพื่อให้ระบบควบคุมหุ่นยนต์ให้ทำงานร่วมกับมนุษย์มีประสิทธิภาพ

2.สามารถนำระบบควบคุมหุ่นยนต์เดลต้าที่ทำงานร่วมกับมนุษย์ในเวลาจริง ไปประยุกต์ใช้กับงานในรูปแบบอื่นเพื่อก่อให้เกิดนวัตกรรม วิธีการ กระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์รูปแบบใหม่ที่สร้างสรรค์ขึ้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 2
ปริทัศน์วรรณกรรม

การทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องจะทำให้เข้าใจถึงที่มาและความสำคัญของปัญหาใน แล้วนำแนวคิดเหล่านั้นมาวิเคราะห์หาแนวทางพัฒนางานวิจัย เพื่อให้แก้ปัญหาที่มีในอดีตและก่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดในการทำวิจัยต่อไป

2.1 ความหมาย และความสำคัญของการควบคุมหุ่นยนต์เพื่อให้ทำงานร่วมกับมนุษย์

ประวัติศาสตร์ของหุ่นยนต์มีมายาวนานควบคู่กับแนวคิดการนำหุ่นยนต์มาใช้ทำงานแทนมนุษย์เพื่อให้ความเป็นอยู่มนุษย์มีความสะดวกสบายขึ้น ยุคของหุ่นยนต์ที่เกิดการปฏิวัติวงการอุตสาหกรรมเริ่มต้นที่ช่วงปี ค.ศ.1970 หุ่นยนต์อุตสาหกรรม (Industrial robot) ถูกสร้างขึ้นเพื่อทำงานแทนมนุษย์ผ่านการเขียนชุดคำสั่งในขั้นตอนก่อนปฏิบัติงาน ดังนั้นหุ่นยนต์อุตสาหกรรมจะทำงานภายใต้เงื่อนไขสภาพแวดล้อมที่คงที่ มีตำแหน่งของการเคลื่อนที่แต่ละขั้นตอนชัดเจนและไม่เปลี่ยนแปลง เนื่องจากระดับการประมวลผลสมองกลของหุ่นยนต์ยังไม่ก้าวหน้าพอ ด้วยข้อจำกัดของรูปแบบงานที่ต้องการสภาพแวดล้อมคงที่

ต่อมาจึงมีการพัฒนาหุ่นยนต์รูปแบบมนุษย์สั่งการหุ่นยนต์ (Master-slave robot) [1, 2] ในช่วงปี ค.ศ.1980 เพื่อให้มนุษย์เป็นผู้ควบคุมหุ่นยนต์ภายใต้สภาพแวดล้อมที่ไม่คงที่ เนื่องจากรูปแบบงานในสภาพแวดล้อมดังกล่าวต้องการสมองมนุษย์ในการตัดสินใจ รวมถึงความชำนาญในทักษะต่างๆและกระบวนการคิดของมนุษย์ ทำให้รูปแบบดังกล่าวมนุษย์จะควบคุมหุ่นยนต์เกือบทั้งหมด

การควบคุมหุ่นยนต์ระยะไกล (Teleoperation) เป็นหนึ่งในรูปแบบมนุษย์สั่งการหุ่นยนต์ เป็นการควบคุมหุ่นยนต์จัดการกับสภาพแวดล้อมที่มนุษย์เข้าถึงยาก โดยมนุษย์ควบคุมหุ่นยนต์ผ่านส่วนต่อประสานระหว่างมนุษย์และหุ่นยนต์ด้วยอุปกรณ์ควบคุม (Human Machine Interface device) และสังเกตการณ์ผ่านทางหน้าจอแสดงผลแบบสัญญาณป้อนกลับ (Visual feedback display) ตัวอย่างเช่น หุ่นยนต์สำรวจดาวเคราะห์ [3] หุ่นยนต์โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ และหุ่นยนต์ตรวจจับวัตถุระเบิด

ในช่วงปี ค.ศ.1990 นักวิจัยนำเอาเทคโนโลยีที่ก้าวหน้าขึ้นมาพัฒนาหุ่นยนต์ควบคุมระยะไกล เกิดรูปแบบใหม่ในการควบคุมหุ่นยนต์ คือ การควบคุมหุ่นยนต์ระยะไกลให้ทำงานร่วมกับมนุษย์ (Telerobot) เป็นการควบคุมหุ่นยนต์แบบกึ่งอัตโนมัติ (Semi-autonomous robot) การทำงานร่วมกันระหว่างมนุษย์กับหุ่นยนต์จะมีมนุษย์ทำงานในส่วนที่ตนเองถนัด เช่น ทักษะความชำนาญ การตัดสินใจ การจัดการกับรูปแบบงานในสภาพแวดล้อมไม่คงที่ และหุ่นยนต์จะช่วยควบคุมในส่วนที่

เหลือที่หุ่นยนต์มีความถนัดมากกว่ามนุษย์ เช่น การประมวลผล การคำนวณ การวัด และงานที่เกี่ยวข้องกับตำแหน่งการเคลื่อนที่

การควบคุมหุ่นยนต์ให้ทำงานร่วมกับมนุษย์จึงมีข้อได้เปรียบกว่าการใช้หุ่นยนต์อุตสาหกรรมในรูปแบบที่มีสภาพแวดล้อมไม่คงที่ เพราะเป็นงานที่มีรูปแบบซับซ้อน ไม่สามารถรู้การลำดับการทำงานได้ หากไม่มีมนุษย์ควบคุมในระบบจะต้องเขียนโปรแกรมที่มีความซับซ้อนอย่างมากขึ้นมาเพื่อจัดการกับสภาพแวดล้อมที่ไม่คงที่ ดังนั้นจึงใช้มนุษย์มาช่วยในการตัดสินใจจัดการกับรูปแบบงานที่มีความซับซ้อน

การควบคุมหุ่นยนต์ให้ทำงานร่วมกับมนุษย์จะมีข้อได้เปรียบกว่ามนุษย์ทำงานเพียงลำพังในรูปแบบงานที่หุ่นยนต์มีความถนัด กล่าวคืองานที่มีการคำนวณและประมวลผลเกี่ยวกับตำแหน่ง การวัด และการควบคุมปัจจัยทางกายภาพอื่นๆ เช่น การควบคุมแรง การควบคุมความร้อน การควบคุมการเคลื่อนที่ของชิ้นส่วนทางกล รวมทั้งประเภทที่มนุษย์เข้าถึงยาก เช่น งานที่มีขนาดเล็กเกินไป งานที่มีน้ำหนักมากเกินไป งานที่มีความเสี่ยงจากสารเคมี หรือความร้อน ทำให้งานในรูปแบบที่ต้องการการประมวลผลที่รวดเร็วและงานที่มนุษย์เข้าถึงยาก จึงจำเป็นต้องใช้หุ่นยนต์ช่วยเหลือมนุษย์ในการทำงาน ดังนั้นการควบคุมหุ่นยนต์ให้ทำงานร่วมกับมนุษย์จึงมีความเหมาะสมในรูปแบบงานที่อยู่ในสภาพแวดล้อมไม่คงที่ มนุษย์เข้าถึงยาก และจำเป็นต้องมีการควบคุมทางกายภาพ

รูปแบบงานที่น่าสนใจที่ใช้การควบคุมหุ่นยนต์ให้ทำงานร่วมกับมนุษย์ เช่น งานที่มีขนาดเล็กมนุษย์ไม่สามารถเข้าถึงได้จะมีกล้องที่มีกำลังขยายสูงติดที่หุ่นยนต์ แล้วแสดงผลไปที่จอภาพเพื่อช่วยเหลือผู้ควบคุมให้เห็นชิ้นงานได้อย่างละเอียด จากนั้นใช้อุปกรณ์ควบคุมที่มีความละเอียดหรือการปรับเปลี่ยนค่าเกนของระบบควบคุมทำให้สามารถบังคับการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ได้ในระดับมิลลิเมตร ซึ่งงานวิจัยในลักษณะนี้ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในการผ่าตัดที่มีความละเอียดระดับไมโครเมตร [4] รวมทั้งสามารถควบคุมแรงที่กระทำกับชิ้นงานได้โดยตัวตรวจวัดแรง เพื่อใช้งานกับชิ้นงานที่ต้องการแรงที่เหมาะสมโดยเฉพาะงานที่มีการสัมผัสกับชิ้นงาน สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้อย่างหลากหลายในทางการแพทย์ [5, 6] งานที่ต้องอาศัยความรู้ และความชำนาญของมนุษย์ในการทำงานควบคู่กับความสามารถของหุ่นยนต์เพื่อให้ได้งานที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น เช่น การผ่าตัดซึ่งยังต้องการแพทย์ผู้เชี่ยวชาญและมีหุ่นยนต์ช่วยเหลือทำให้แผลผ่าตัดมีขนาดเล็ก งานดัดแปลงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องการมนุษย์ทำการดัดแปลงแต่ต้องการความแม่นยำจากหุ่นยนต์ งานพิมพ์ภาพสามมิติโดยใช้มนุษย์ควบคุม [7] ซึ่งเป็นงานที่เกี่ยวข้องกับศิลปะจึงจำเป็นต้องมีมนุษย์ในระบบแต่ต้องมีหุ่นยนต์ช่วยในการควบคุมการไหล ความร้อนของหัวพิมพ์ รวมทั้งช่วยควบคุมแกนเคลื่อนที่บางทิศทาง และในปัจจุบันการควบคุมหุ่นยนต์ทำงานร่วมกับมนุษย์ไม่ได้มีการควบคุมจากระยะไกลเพียงเท่านั้น แต่มีการควบคุมหุ่นยนต์โดยมนุษย์เป็นผู้สวมใส่โครงสร้างของหุ่นยนต์ เรียกว่าหุ่นยนต์เอ็กโซสเกเลตอน (Exoskeleton robot) ซึ่งเป็นการควบคุมหุ่นยนต์ร่วมกับมนุษย์โดยร่างกายมนุษย์สัมผัสโดยตรงกับ

ชิ้นส่วนทางกลของหุ่นยนต์ มีการวิจัยเพื่อนำไปใช้งานในหลายด้านทั้งการทหาร อุตสาหกรรม และทางการแพทย์ โดยเฉพาะการนำหุ่นยนต์ทำงานร่วมกับมนุษย์ในรูปแบบนี้ ช่วยเหลือในการทำกายภาพบำบัดของผู้ป่วยที่มีปัญหาเกี่ยวกับกล้ามเนื้อ [8]

วิทยานิพนธ์นี้จะเน้นไปที่การออกแบบและควบคุมหุ่นยนต์เพื่อให้ทำงานร่วมกับมนุษย์ได้ในเวลาจริงที่เป็นการควบคุมระยะไกล (Telerobot) ซึ่งยังคงมีประเด็นที่น่าศึกษาและสามารถพัฒนาเพื่อให้ระบบมีความสมบูรณ์มากขึ้นได้ การออกแบบระบบหุ่นยนต์ทำงานร่วมกับมนุษย์จะก่อให้เกิดประสิทธิภาพในการทำงานอย่างยิ่งในงานหลากหลายประเภท จึงมีประโยชน์และมีความสำคัญมากในปัจจุบัน รวมถึงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในการมีบทบาทและเป็นส่วนหนึ่งในชีวิตประจำวันของมนุษย์ในอนาคตอันใกล้อีกด้วย

2.2 งานวิจัยเกี่ยวกับหุ่นยนต์เดลต้า

วิทยานิพนธ์นี้ออกแบบระบบควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์ร่วมกับมนุษย์โดยใช้หุ่นยนต์เดลต้า [9-14] เพราะโครงสร้างที่มีน้ำหนักเบาทำให้มีการตอบสนองที่รวดเร็ว และมีความปลอดภัยต่อมนุษย์ เหมาะกับการทำงานร่วมกันระหว่างมนุษย์และหุ่นยนต์ โดยวิเคราะห์เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของหุ่นยนต์สองลักษณะคือ หุ่นยนต์โครงสร้างอนุกรม (Serial link) และหุ่นยนต์โครงสร้างขนาน (Parallel link) หรือโครงสร้างแบบปิด ได้ข้อสรุปว่าหุ่นยนต์โครงสร้างแบบขนานจะมีน้ำหนักเบากว่า เพราะสามารถรับภาระต่อน้ำหนักของหุ่นยนต์ได้มากกว่าหุ่นยนต์โครงสร้างแบบอนุกรม เนื่องจากโครงสร้างขนานมีจำนวนแขนและข้อต่อที่ปลายหุ่นยนต์มากกว่าโครงสร้างอนุกรม ทำให้มีภาระเฉลี่ยขณะทำงานบนแต่ละแขนของโครงสร้างขนานมีขนาดน้อยกว่าแบบอนุกรม

การที่หุ่นยนต์จำเป็นต้องมีน้ำหนักเบามีความสำคัญมาก เพราะต้องใช้ในการทำงานร่วมกับมนุษย์ ซึ่งต้องการให้หุ่นยนต์มีการตอบสนองที่รวดเร็วและมนุษย์ไม่รู้สึกถึงเวลาหน่วง และต้องคำนึงถึงความปลอดภัยของมนุษย์ หุ่นยนต์โครงสร้างขนานที่มีน้ำหนักเบาจะมีการตอบสนองที่รวดเร็วและมีอันตรายต่อมนุษย์น้อยลง รวมถึงการขับเคลื่อนที่ง่ายขึ้นทำให้มอเตอร์มีขนาดเล็กลงอีกด้วย

สาเหตุในการใช้หุ่นยนต์เดลต้าอีกประการ คือ ความแม่นยำของหุ่นยนต์โครงสร้างขนานมีมากกว่าอนุกรม เพราะค่าความคลาดเคลื่อนจะไม่สะสมในแต่ละข้อต่อจนมีขนาดมากเหมือนในโครงสร้างอนุกรม แต่ข้อเสีย คือ หุ่นยนต์เดลต้าจะต้องใช้ระบบควบคุมที่มีคณิตศาสตร์เกี่ยวข้องกับการคำนวณจลนศาสตร์ (Kinematics) [15-19] ซึ่งความซับซ้อนมากกว่าโครงสร้างอนุกรม เพราะการเคลื่อนที่และตำแหน่งของปลายแขนมีผลกับชุดแขนที่ขนานกันทั้งหมด หุ่นยนต์เดลต้าจะประกอบด้วยฐานที่ยึดติดกับปลายแขน และมอเตอร์ทั้งสามชุดเชื่อมต่อกันไปยังปลายสุดที่มีหน้าที่ใช้ในการทำงานบนพิกัดสามมิติซึ่งมีองศาอิสระเป็นสาม

2.3 งานวิจัยเกี่ยวกับการทำงานกำหนดตำแหน่งหมุดของหุ่นยนต์

การออกแบบระบบหุ่นยนต์เดลต้าแบบสามองศาอิสระเพื่อให้ทำงานร่วมกับมนุษย์ในเวลาจริง จะนำไปใช้กับการทำงานกำหนดตำแหน่งหมุด เพราะเป็นงานที่มีแรงกระทำกับสภาพแวดล้อมหรือชิ้นงาน เพื่อศึกษาระบบหุ่นยนต์ที่จะจัดการกับแรงเหล่านั้น ทั้งการออกแบบระบบควบคุมแรง และการออกแบบทางกล งานกำหนดตำแหน่งหมุด (Peg positioning task) หรืองานปักหมุดลงหลุม (Peg-in-hole task) สามารถนำไปใช้จริงได้ในอุตสาหกรรมการประกอบชิ้นส่วนทางกล โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมยานยนต์

เมื่องานในรูปแบบนี้เป็นที่สนใจต่อวงการอุตสาหกรรม ดังนั้นจึงมีงานวิจัยที่ศึกษาการควบคุมหุ่นยนต์เพื่อให้ทำงานกำหนดตำแหน่งหมุดมาโดยตลอด ตั้งแต่ยุคหุ่นยนต์อุตสาหกรรม งานวิจัยการควบคุมหุ่นยนต์เพื่อทำงานปักหมุดลงหลุมมีทั้งการควบคุมหุ่นยนต์อุตสาหกรรม การควบคุมหุ่นยนต์ทำงานร่วมกับมนุษย์โดยตรงกับชิ้นงาน (Cooperative robot) และการควบคุมหุ่นยนต์ระยะไกล แต่วิทยานิพนธ์นี้จะออกแบบระบบควบคุมหุ่นยนต์ให้ทำงานร่วมกับมนุษย์เพื่อทำงานกำหนดตำแหน่งหมุด

จากการศึกษางานวิจัยในอดีตพบว่า การควบคุมหุ่นยนต์ให้ทำงานปักหมุดจะต้องคำนึงถึงแรงขณะควบคุมหุ่นยนต์ในเวลาจริง [20] เมื่อมีแรงกระทำระหว่างโครงสร้างหุ่นยนต์กับชิ้นงาน ทำให้ต้องออกแบบการควบคุมแรงเพื่อให้หุ่นยนต์สามารถทำงานปักหมุดลงหลุมได้ มีงานวิจัยที่ศึกษาการควบคุมแรงโดยใช้การประมวลผลจากตัวตรวจวัดแรงและโมเมนต์ และการควบคุมแบบคอมไพลอันซ์ (Compliance control) เพื่อประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมยานยนต์ ทั้งการควบคุมหุ่นยนต์อุตสาหกรรม [21] และการควบคุมหุ่นยนต์ระยะไกล [22]

งานวิจัยที่นำเสนอวิธีการควบคุมหุ่นยนต์สำหรับงานปักหมุดมีการควบคุมแบบไฮบริด (Hybrid control) [23] ที่เป็นการควบคุมตำแหน่ง/แรง โดยเฉพาะการควบคุมแบบอิมพิแดนซ์ (Impedance control) ซึ่งเป็นการควบคุมแบบต้านทานการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ [24] โดยการใช้ตัวตรวจวัดแรงแล้วทำการควบคุมแรง การใช้การควบคุมอิมพิแดนซ์เพื่อจัดการกับแรงปฏิกิริยาระหว่างปลายแขนหุ่นยนต์และสภาพแวดล้อม หรือชิ้นงาน รวมทั้งใช้แบบจำลองพลศาสตร์ (Dynamic model) ช่วยในการวิเคราะห์ [25] และการใช้การควบคุมแบบอิมพิแดนซ์ร่วมกับแรงเสมือน (Virtual force) เพื่อให้หุ่นยนต์ช่วยเหลือมนุษย์ในการทำงานปักหมุด [26]

ในงานวิจัยทั่วไปที่ศึกษาการควบคุมหุ่นยนต์สำหรับงานปักหมุด จะเน้นไปที่การศึกษาการควบคุมในช่วงที่เป็นการใส่แท่งทรงกระบอกหรือหมุดลงไปในหลุม (The insertion phase) แต่การควบคุมในช่วงที่เป็นการเคลื่อนที่เพื่อหาตำแหน่งหลุม และการวางแนวแกนของแท่งทรงกระบอก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

เพื่อให้ตรงกับหลุม (The preceding phases) ก็เป็นสิ่งสำคัญเช่นเดียวกัน [27] และสำหรับการควบคุมหุ่นยนต์ระยะไกลเพื่อทำงานปักหมุด ประเด็นศึกษาที่ต้องคำนึงถึงก็คือ การพัฒนาเครื่องมือที่เกี่ยวข้องกับการรับรู้และการตอบสนองของผู้ทดลอง (Perceptual tools) ซึ่งมีงานวิจัยที่ใช้เครื่องมือนี้ด้วยการติดตั้งระนาบเสมือน (Virtual fixtures) จำกัดการเคลื่อนที่ของการควบคุมให้ง่ายขึ้น เพื่อช่วยในการควบคุมหุ่นยนต์ให้ทำงานปักหมุด [28]

นอกจากหุ่นยนต์โครงสร้างอนุกรมที่นิยมใช้ในการทำงานปักหมุด ยังมีงานวิจัยที่ศึกษาถึงการควบคุมหุ่นยนต์โครงสร้างขนานเพื่อทำงานปักหมุด [29] และใช้การควบคุมแบบอิมพิแดนซ์เหมือนกับงานวิจัยอื่นๆ แต่ส่วนที่แตกต่างคือปลายแขนสามารถหมุนรอบแกนได้ขณะจับแท่งทรงกระบอก ซึ่งเป็นงานวิจัยที่น่าสนใจเกี่ยวกับการเลือกใช้หุ่นยนต์โครงสร้างขนานเช่นเดียวกับวิทยานิพนธ์นี้

2.4 งานวิจัยเกี่ยวกับการประเมินสมรรถนะการทำงานของหุ่นยนต์ร่วมกับมนุษย์

เมื่อออกแบบระบบหุ่นยนต์เดลต้าแบบสามองศาอิสระสำหรับทำงานกำหนดตำแหน่งหมุดร่วมกับมนุษย์ในเวลาจริงให้สามารถทำงานได้ ขั้นต่อไปคือการประเมินสมรรถนะการทำงานของหุ่นยนต์ร่วมกับมนุษย์ ในอดีตการควบคุมหุ่นยนต์ระยะไกล (Tele-operated system) [2, 28, 30, 31] ที่เป็นการควบคุมแบบมนุษย์สั่งการหุ่นยนต์ นำหลักการของฟิตต์ (Fitts' Law) [32] ซึ่งเป็นการทดสอบสมรรถนะการทำงานของมนุษย์ในการใช้มือและแขนเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการ โดยไม่คำนึงถึงเส้นทางการเคลื่อนที่ จึงไม่ใช้หลักการทดสอบสมรรถนะการทำงานแบบสเตียริ่ง (Steering Law) [33] การทดสอบของงานวิจัยนำผลทดสอบสมรรถนะการทำงานของหุ่นยนต์โดยมีมนุษย์ควบคุมไปเปรียบเทียบกับการทำงานของมนุษย์เพียงลำพังในงานรูปแบบเดียวกัน ผลการทดลองที่ได้พบว่าหลักการของฟิตต์ให้ผลเป็นที่น่าพอใจในการประเมินสมรรถนะการทำงานของหุ่นยนต์ที่ควบคุมด้วยมนุษย์ ถึงแม้หุ่นยนต์ที่ควบคุมด้วยมนุษย์จะมีสมรรถนะการทำงานด้อยกว่าการทำงานด้วยมนุษย์เพียงลำพัง โดยในงานที่มีระดับความยากเท่ากันมนุษย์จะใช้เวลาในการทำงานเร็วกว่าหุ่นยนต์ระยะไกลที่มนุษย์ควบคุม เนื่องจากลักษณะงานที่ทำเป็นงานสำหรับมนุษย์ หรือมนุษย์มีความถนัด (Human scaled tasks) ทำให้มนุษย์ทำงานได้ดีกว่านั่นเอง

ต่อมามีงานวิจัยที่นำหลักการของฟิตต์มาประยุกต์ใช้กับระบบควบคุมหุ่นยนต์เดลต้าให้ทำงานร่วมกับมนุษย์ในเวลาจริง [12, 34] ที่มีรูปแบบงานเป็นการควบคุมหุ่นยนต์เพื่อตรวจจับวัตถุเป็นงานที่ไม่มีแรงกระทำกับสภาพแวดล้อม และอยู่ในสภาวะแวดล้อมคงที่

วิทยานิพนธ์นี้ได้ออกแบบให้ชิ้นงานอยู่ในสภาพแวดล้อมไม่คงที่ กล่าวคือ มีลำดับการทำงานที่ไม่แน่นอน โดยจะทำการสุ่มตำแหน่งของหลุมที่จะต้องบังคับหุ่นยนต์ไปปักหมุด เพื่อให้เป็นงานที่เหมาะสมสำหรับควบคุมหุ่นยนต์ทำงานร่วมกับมนุษย์ และไม่สามารถใช้หุ่นยนต์อุตสาหกรรมได้ ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้ไม่สามารถนำหลักการของฟิตต์มาใช้ได้โดยตรง เพราะหลักการของฟิตต์ตำแหน่ง

ในการเคลื่อนที่แต่ละรอบการทดลองจะมีความแน่นอน รวมทั้งระบบหุ่นยนต์ทำงานร่วมกับมนุษย์สามารถปรับค่าเกนให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่เร็วเกินขีดจำกัดของกล้ามเนื้อมนุษย์ได้ ทำให้หลักการของฟิตต์ที่ใช้สำหรับทดสอบมนุษย์เป็นหลักไม่ควรนำมาใช้โดยตรงเช่นเดียวกัน วิทยานิพนธ์นี้จึงนำหลักการของฟิตต์มาพัฒนาวิธีการประเมินและประยุกต์ให้เหมาะสม

การประเมินสมรรถนะการทำงานของหุ่นยนต์ร่วมกับมนุษย์ในเวลาจริง นอกจากหลักการของแบบทดสอบ รูปแบบการควบคุมหุ่นยนต์หรือระบบหุ่นยนต์ก็มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง โดยองค์ประกอบในระบบที่ต้องคำนึงถึงมีหลายส่วนด้วยกัน เช่น ส่วนต่อประสานที่ทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์ควบคุม (Human machine interface device) ทำหน้าที่เชื่อมต่อและสื่อสารมนุษย์กับหุ่นยนต์เข้าด้วยกัน การทำงานร่วมกันระหว่างมนุษย์และหุ่นยนต์จำเป็นที่มนุษย์จะต้องควบคุมหุ่นยนต์ได้อย่างรวดเร็ว สามารถเคลื่อนไหวได้ง่ายไม่ซับซ้อน ให้ความรู้สึกเสมือนโครงสร้างหุ่นยนต์เคลื่อนที่ตามร่างกายอย่างอิสระที่สุดที่เป็นไปได้ การออกแบบและพัฒนาระบบการควบคุมหุ่นยนต์ จึงต้องคำนึงถึงอุปกรณ์ควบคุมโดยพัฒนาให้มีการทำงานที่เหมาะสมกับการทำงาน การควบคุมหุ่นยนต์มีการใช้อุปกรณ์ควบคุมหลายรูปแบบที่มีโครงสร้างแตกต่างกัน ยกตัวอย่างเช่น การนำกล้องอาร์จีบีดี (RGBD camera) ที่ใช้ในวงการเกมมาประยุกต์ใช้ในการควบคุมหุ่นยนต์ [35, 36] ที่เป็นการควบคุมผ่านมือมนุษย์แบบไร้การสัมผัส หรือแม้แต่อุปกรณ์ควบคุมแฮปติก (Haptic device) ที่ถูกออกแบบมาเพื่อควบคุมหุ่นยนต์โดยเฉพาะมาพัฒนาในการควบคุมหุ่นยนต์ให้ทำงานร่วมกับมนุษย์ [34, 37] รวมทั้งมีแรงตอบสนองขณะควบคุม [38] และส่วนต่อประสานต่อมาคือ ระบบภาพ จากที่กล่าวดังข้างต้นว่าการทำงานร่วมกันระหว่างมนุษย์และหุ่นยนต์จำเป็นที่มนุษย์จะต้องควบคุมหุ่นยนต์ได้อย่างรวดเร็ว การตอบสนองต่อการเคลื่อนที่ของมนุษย์ที่ทำให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ตามจะต้องลื่นไหล และมีการป้อนสัญญาณภาพกลับมาสู่การรับรู้ของมนุษย์เพื่อทราบว่า การเคลื่อนที่ปลายแขนของหุ่นยนต์ และสภาพชิ้นงานเป็นอย่างไร จึงต้องคำนึงถึงการออกแบบระบบภาพ รูปแบบคุณสมบัติต่างๆของระบบภาพ [9-11, 39] และคุณสมบัติของสัญญาณภาพ เวลาในการตอบสนองและเวลาหน่วงของสัญญาณภาพ ดังนั้นการศึกษาเวลาหน่วง (Delay time) ภายในระบบการควบคุมหุ่นยนต์ทำงานร่วมกับมนุษย์เพื่อลดผลกระทบของเวลาหน่วงภายในระบบ [5, 12, 40-42] จะทำให้ระบบมีความเสถียรและมนุษย์สามารถควบคุมหุ่นยนต์ได้อย่างราบลื่นมากยิ่งขึ้น ซึ่งมีผลโดยตรงกับสมรรถนะการทำงานของระบบหุ่นยนต์ทำงานร่วมกับมนุษย์ในเวลาจริง

บทที่ 3
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในบทนี้จะกล่าวถึงการแก้ปัญหาทางวิศวกรรมซึ่งต้องอาศัยความรู้ทางทฤษฎี อันดับแรกการออกแบบระบบหุ่นยนต์เดลต้าแบบสามองศาอิสระ สำหรับทำงานกำหนดตำแหน่งหมุดร่วมกับมนุษย์ในเวลาจริง จำเป็นต้องศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับการออกแบบหุ่นยนต์เดลต้าแบบสามองศาอิสระ และการคำนวณโดยเฉพาะจลนศาสตร์ของหุ่นยนต์เดลต้า เมื่อจัดสร้างให้หุ่นยนต์ให้สามารถเคลื่อนที่ได้ตามต้องการจึงศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับการทำงานกำหนดตำแหน่งหมุดของหุ่นยนต์ เพื่อออกแบบระบบควบคุมตำแหน่งและแรงของหุ่นยนต์ให้สามารถทำงานกำหนดตำแหน่งหมุดได้ จากนั้นศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวกับการทำงานของหุ่นยนต์ร่วมกับมนุษย์ในเวลาจริง ทั้งด้านปัจจัยความปลอดภัยของมนุษย์ และด้านการรับรู้ของมนุษย์ขณะทำงานร่วมกับหุ่นยนต์ ในท้ายที่สุดจึงศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับการประเมินสมรรถนะการทำงานของหุ่นยนต์ร่วมกับมนุษย์เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในวิทยานิพนธ์

3.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวกับกลศาสตร์ของหุ่นยนต์เดลต้า

การออกแบบหุ่นยนต์เดลต้าแบบสามองศาอิสระ การเคลื่อนที่ของตำแหน่งหุ่นยนต์เป็นหัวใจหลักในการควบคุมหุ่นยนต์ให้ทำงานตามที่ต้องการ การคำนวณความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งปลายแขนหุ่นยนต์กับตำแหน่งข้อต่อจึงเป็นพื้นฐานสำคัญซึ่งต้องนำมาใช้ในการควบคุมหุ่นยนต์

3.1.1 การกำหนดตัวแปร (Geometric Parameters)

วิธีการแก้สมการจลนศาสตร์ของหุ่นยนต์เดลต้าจำเป็นต้องเลือกกรอบอ้างอิง $\{R\}$ [16] ซึ่งมีจุดอ้างอิงที่ตรงกลางของฐานหุ่นยนต์ และมีดัชนี i เป็นลำดับแขนของหุ่นยนต์ซึ่งทำมุมกันแต่ละแขน 120 องศาแทนด้วย α_i จะได้เมทริกซ์การหมุน (Rotational Matrix) ดังสมการ

$$ {}^{R}_{i}R_{z} = \begin{bmatrix} \cos\alpha_i & -\sin\alpha_i & 0 \\ \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3.1} $$

3.1.2 จลนศาสตร์ไปข้างหน้า (Forward Kinematics)

คำนวณโดยการหาจุดตัดของรูปทรงกลมสามรูป ที่มีจุดศูนย์กลางอยู่บนตำแหน่งข้อต่อระหว่างแขนบนกับแขนล่าง และมีรัศมีเป็นความยาวของแขนล่างเท่ากับ r [13] จะได้สมการทรงกลมคือ

$$(x-x_0)^2+(y-y_0)^2+(z-z_0)^2=r^2 \tag{3.2}$$

โดยที่ $(x,\mathrm{y},\mathrm{z})$ คือจุดตัดของวงกลมทั้งสามกับตำแหน่งปลายแขนของหุ่นยนต์ $(x_0,\mathrm{y}_0,\mathrm{z}_0)$ ดังนั้นจะได้สมการเพื่อหาตำแหน่งของปลายแขนหุ่นยนต์ (End effector) ดังต่อไปนี้ [43]

$$\begin{pmatrix}(x-[(l_1\cos(\theta_1)+D)\cos(\alpha_1)])^2\\(x-[(l_1\cos(\theta_2)+D)\cos(\alpha_2)])^2\\(x-[(l_1\cos(\theta_3)+D)\cos(\alpha_3)])^2\end{pmatrix}+\begin{pmatrix}(y-[-(D+l_1\cos(\theta_1))\sin(\alpha_1)])^2\\(y-[-(D+l_1\cos(\theta_2))\sin(\alpha_2)])^2\\(y-[-(D+l_1\cos(\theta_3))\sin(\alpha_3)])^2\end{pmatrix}+$$
$$\begin{pmatrix}(z-[-l_1\sin(\theta_1)])^2\\(z-[-l_1\sin(\theta_2)])^2\\(z-[-l_1\sin(\theta_3)])^2\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}{l_2}^2\\{l_2}^2\\{l_2}^2\end{pmatrix} \tag{3.3}$$

โดยที่

D คือระยะห่างระหว่างกรอบอ้างอิงกับตำแหน่งของมอเตอร์ตัวใดตัวหนึ่ง

l_1, l_2 คือความยาวของแขนบนและแขนล่างตามลำดับ และ

$\theta_1,\theta_2,\theta_3$ คือมุมที่ข้อต่อระหว่างแขนบนกับฐานหุ่นยนต์หรือระนาบแนวนอนของกรอบอ้างอิงของแขนที่ติดกับมอเตอร์แต่ละชุดตามลำดับ

3.1.3 จลนศาสตร์แบบผกผัน (Inverse Kinematics)

จลนศาสตร์แบบผกผันสามารถแก้ได้ด้วยความสัมพันธ์ของรูปทรงทางเรขาคณิต รูปทรงกลมและวงกลม โดยกำหนดจุดตัดร่วมกันของทรงกลมและวงกลมที่มีจุดศูนย์กลางที่ตำแหน่งบนด้านของปลายแขนและตำแหน่งของข้อต่อระหว่างแขนบนกับมอเตอร์หรือแกนเพลาตามลำดับ [13] รัศมีของทรงกลมคือความยาวของแขนล่าง และรัศมีของวงกลมคือความยาวของแขนบน จะได้ว่ามุมระหว่างแขนบนกับฐานของหุ่นยนต์สามารถคำนวณได้จากสมการ 3.3 เช่นเดียวกัน แต่รูปแบบการวางตัวของแขนหุ่นยนต์ (Configuration) สามารถมีได้หลายรูปแบบในตำแหน่งเดียวกันจึงต้องกำหนดเงื่อนไขเพิ่มเติมในภายหลัง

3.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวกับการทำงานกำหนดตำแหน่งหมุดของหุ่นยนต์

การควบคุมหุ่นยนต์ให้ทำงานกำหนดตำแหน่งหมุดหรือการปักหมุดลงหลุม ต้องมีระบบควบคุมตำแหน่ง เพื่อให้สามารถบังคับปลายแขนหุ่นยนต์ที่มีหมุดไปยังตำแหน่งหรือหลุมที่ต้องการได้ เมื่อเคลื่อนที่ปักหมุดลงหลุม จะทำให้เกิดแรงปฏิกิริยาระหว่างปลายแขนหุ่นยนต์กับบริเวณหลุมหรือชิ้นงานหากการควบคุมตำแหน่งมีความคลาดเคลื่อน จึงจำเป็นต้องมีระบบควบคุมแรงนอกเหนือจาก

การควบคุมตำแหน่ง เพื่อให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปในทิศทางตรงกันข้ามกับแรงที่เกิดขึ้นจนสามารถปักหมุดลงหลุมได้โดยไม่เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างหุ่นยนต์และชิ้นงาน

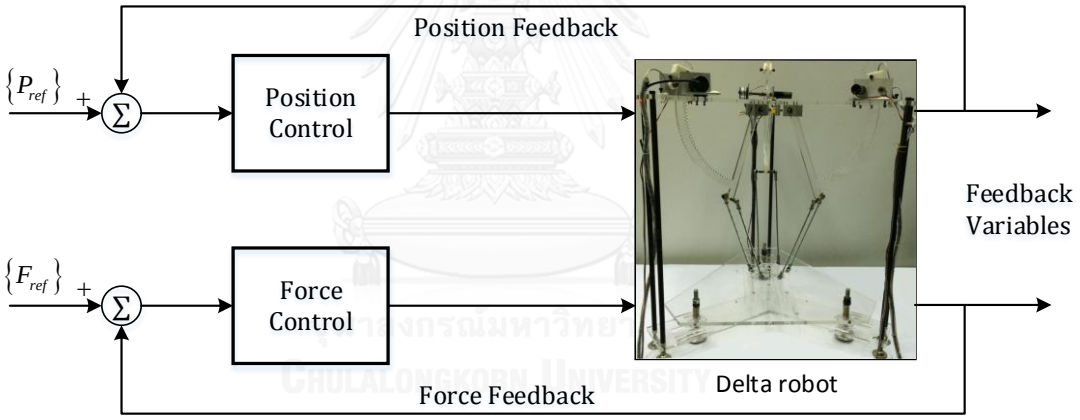
3.2.1 การควบคุมตำแหน่งและแรง (Position/Force control)

การควบคุมหุ่นยนต์สำหรับงานที่ไม่มีความซับซ้อนโดยทั่วไปจะเป็นการควบคุมตำแหน่งและการเคลื่อนที่เพียงอย่างเดียว แต่สำหรับงานที่มีความซับซ้อนโดยเฉพาะงานที่จำเป็นต้องมีการควบคุมปฏิกิริยาทางกายภาพที่มีการสัมผัสทางกลเกิดขึ้นกับสิ่งแวดล้อมหรือชิ้นงาน หุ่นยนต์จะต้องมีคุณสมบัติในการปรับเปลี่ยนตัวเองเพื่อจัดการกับสภาพแวดล้อมเหล่านั้นได้ ดังเช่นการตอบสนองต่อแรงปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นกับปลายแขนของหุ่นยนต์ การปรับการเคลื่อนที่เพื่อจัดการกับสภาพแวดล้อมที่ไม่แน่นอน จึงจำเป็นต้องหาวิธีการในการควบคุมหุ่นยนต์สำหรับงานประเภทดังกล่าว

การควบคุมแรง และการควบคุมแบบคอมไพลอันซ์ (Compliance control) [44] คือวิธีการพื้นฐานในการควบคุมหุ่นยนต์ เพื่อจัดการกับแรงปฏิกิริยาทางกลเมื่อพบกับสภาพแวดล้อมที่ไม่คงที่เหล่านั้น การควบคุมแรงมีหลายรูปแบบ ดังเช่น การควบคุมตำแหน่ง/แรงแบบไฮบริด (Hybrid position/force control) เป็นการควบคุมแบบผสมมีการควบคุมแรงและตำแหน่งพร้อมกัน โดยแยกแกนควบคุมในแต่ละแกนจะควบคุมแรงหรือตำแหน่งเพียงอย่างเดียว ซึ่งใช้จัดการกับเงื่อนไขข้อบังคับทางเรขาคณิตที่ถูกกำหนดโดยสภาพแวดล้อม การควบคุมแบบคอมไพลอันซ์ หรือการควบคุมความแข็งตึง (Stiffness control) ที่สร้างความสัมพันธ์ระหว่างแรงทางกลกับระยะยืดของโครงสร้าง เพื่อหาคอมไพลอันซ์หรือค่าความแข็งตึงที่มีแรงป้อนกลับ (Force feedback) สำหรับใช้ในงานควบคุมหุ่นยนต์ในงานประเภทที่จำเป็นต้องมีการควบคุมแรง นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่นำเสนอการควบคุมแรงในระบบควบคุมหุ่นยนต์ระยะไกล [45-47] ได้แก่ 1.การควบคุมแบบสลับเวลา (Traded control) เป็นการควบคุมที่มีการแบ่งช่วงการควบคุม เริ่มแรกเมื่อควบคุมหุ่นยนต์จะใช้การควบคุมตำแหน่งจากข้อมูลภาพ เมื่อเข้าใกล้วัตถุหรือชิ้นงานแล้วเกิดแรงสัมผัสจะสลับเป็นการควบคุมแรง ทำให้สามารถควบคุมหุ่นยนต์ได้อย่างรวดเร็วในขณะไม่มีแรงสัมผัส 2.การควบคุมแบบผสานข้อมูล (Shared control) เป็นการควบคุมแรงและตำแหน่งจากข้อมูลภาพพร้อมกัน รวมทั้งควบคุมผสานกันในแกนเดียวกัน โดยการคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งและแรงที่รับข้อมูลมาจากอุปกรณ์ตรวจวัดแรงและอุปกรณ์ควบคุมตำแหน่ง 3.การควบคุมแบบผสมหรือการควบคุมตำแหน่ง/แรงแบบไฮบริด (Hybrid position/force control) ดังที่กล่าวไว้แล้วข้างต้น วิทยานิพนธ์นี้จะเน้นวิจัยและศึกษาการควบคุมตำแหน่ง/แรงแบบไฮบริด เพื่อนำมาใช้ในการควบคุมแรงสำหรับการควบคุมหุ่นยนต์เดลต้าทำงานกำหนดตำแหน่งหมุดร่วมกับมนุษย์ในเวลาจริง

3.2.1.1 การควบคุมตำแหน่ง/แรงแบบไฮบริด (Hybrid position/force control)

เป็นการควบคุมแบบผสมมีการควบคุมแรงและตำแหน่งพร้อมกัน โดยแยกแกนควบคุมระหว่างการควบคุมแรงและการควบคุมตำแหน่ง กล่าวคือในแต่ละแกนจะควบคุมแรงหรือตำแหน่งเพียงอย่างเดียว แกนที่ควบคุมแรงและตำแหน่งจะตั้งฉากกัน มีหลักการ [44] คือ เมื่อพิจารณาการวาดรูปลงบนกระดาษด้วยดินสอ สำหรับมนุษย์เป็นงานที่ไม่ซับซ้อนในการควบคุมตำแหน่งและแรงที่มือขณะจับดินสอวาดรูปลงบนกระดาษ แต่เมื่อควบคุมหุ่นยนต์ทำงานดังกล่าวต้องใช้การควบคุมที่มีความซับซ้อนยิ่งขึ้น ไม่สามารถใช้เพียงการควบคุมตำแหน่งเพียงอย่างเดียวได้ โดยทั่วไปแล้วการควบคุมหุ่นยนต์ในลักษณะนี้จะใช้การควบคุมตำแหน่งในแกนที่มีระนาบบนแผ่นกระดาษ เพื่อใช้ดินสอวาดรูปให้มีรูปแบบตามที่ต้องการ และจะใช้การควบคุมแรงในแกนที่ตั้งฉากกับระนาบนั้น เพื่อให้ปลายดินสอสัมผัสลงบนกระดาษอย่างสม่ำเสมอ ดังนั้นการควบคุมจึงต้องมีวงลูบควบคุม (Control loops) ที่แตกต่างกัน โดยมีแผนภาพการควบคุมตำแหน่งและแรงอย่างง่ายดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนภาพการควบคุมตำแหน่งและแรง

งานกำหนดตำแหน่งหมุด (Peg positioning task) หรือการปักแท่งหมุดลงหลุม (Peg-in-hole task) เป็นงานที่จำเป็นต้องมีการควบคุมแรง เมื่อปักหมุดลงในหลุมในทิศทางแนวดิ่ง จะกำหนดสมมติฐานให้ไม่มีแรงเสียดทานในหลุม และไม่คำนึงผลของแรงเฉื่อย เมื่อกำหนดกรอบบนชิ้นงาน (Constraint frame, C-frame) โดยมีระบบพิกัด xyz เทียบกับกรอบดังกล่าว วิธีการกำหนดเงื่อนไขบังคับทางเรขาคณิต ซึ่งแสดงลักษณะของกายภาพทางกลจะถูกกำหนดด้วยเงื่อนไขบังคับทางธรรมชาติ (Natural Constraints) และเงื่อนไขที่ถูกกำหนดด้วยวัตถุประสงค์ของงาน (Tasks) ให้มีการเคลื่อนที่สอดคล้องกับเงื่อนไขบังคับทางธรรมชาติคือ เงื่อนไขบังคับเทียม (Artificial Constraints) [48, 49] เงื่อนไขบังคับของงานกำหนดตำแหน่งหมุดจะพิจารณาได้ตามสถานการณ์ขณะทำงาน โดย

แบ่งเป็น 1.แท่งหมุดอยู่ในตำแหน่งยังไม่สัมผัสกับผิวชิ้นงาน 2.แท่งหมุดสัมผัสผิวชิ้นงานบริเวณรอบข้างหลุม 3.แท่งหมุดกำลังเคลื่อนที่ลงหลุม (ปักหมุด) 4.แท่งหมุดสัมผัสกับก้นหลุม ซึ่งมีเงื่อนไขบังคับทางธรรมชาติ และเงื่อนไขบังคับเทียมแตกต่างกันในแต่ละสถานการณ์ หากพิจารณาขณะแท่งหมุดกำลังเคลื่อนที่ลงหลุม หรือการปักหมุดจะได้ว่า เมื่อแท่งหมุดเคลื่อนที่อยู่ในหลุมจะไม่สามารถเคลื่อนที่ในทิศทาง x และ y ได้ซึ่งเป็นข้อบังคับทางเรขาคณิต ดังนั้น $v_x = v_y = 0$ และแท่งหมุดไม่สามารถหมุนรอบแกน x และ y ได้ทำให้ $\omega_x = \omega_y = 0$ ซึ่งเป็นเงื่อนไขบังคับทางธรรมชาติแบบจลน์ (Kinematic) เมื่อพิจารณาขณะปักหมุดในทิศทาง z ความเร็วในการเคลื่อนที่ของหมุดลงหลุมเป็นค่าใดๆที่มากกว่าศูนย์จึงกำหนดให้ $v_z = V > 0$ และไม่มีการหมุนหมุดรอบแกน z ทำให้ $\omega_z = 0$ ซึ่งเป็นเงื่อนไขบังคับเทียมแบบจลน์ สำหรับเงื่อนไขแบบสถิต (Static) แรงและทอร์กจะถูกพิจารณากำหนดให้ไม่มีแรงเสียดทานในทิศ z ทำให้ $f_z = \tau_z = 0$ ซึ่งเป็นเงื่อนไขบังคับทางธรรมชาติแบบสเตติก และเช่นเดียวกันกำหนดให้ไม่มีการเคลื่อนที่ในทิศ x และ y ทำให้ไม่มีการชนกับผนังของหลุมจะได้ว่า $f_x = \tau_x = f_y = \tau_y = 0$ ซึ่งเป็นเงื่อนไขบังคับเทียมแบบสถิต

ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขบังคับของการทำงานกำหนดตำแหน่งหมุด [44]

	จลน์	สถิต
เงื่อนไขบังคับทางธรรมชาติ	$v_x = v_y = 0$ $\omega_x = \omega_y = 0$	$f_z = \tau_z = 0$
เงื่อนไขบังคับเทียม	$v_z = V > 0$ $\omega_z = 0$	$f_x = \tau_x = f_y = \tau_y = 0$

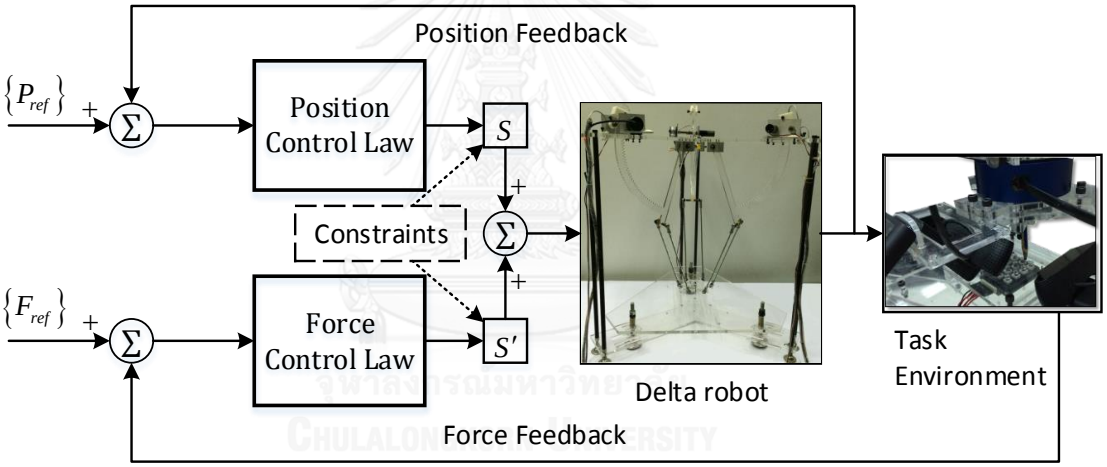
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

จะพบว่าแกนของเงื่อนไขบังคับทางธรรมชาติจะตั้งฉากกับแกนของเงื่อนไขบังคับเทียม ทำให้ได้ข้อสรุปว่าทิศทางในการควบคุมแรงหรือการควบคุมตำแหน่งในกรอบบนชิ้นงานตั้งฉากกัน และมีผลทำให้มีสมมติฐานดังต่อไปนี้ 1.ในแต่ละแกนของกรอบบนชิ้นงานสามารถมีการควบคุมได้เพียงการควบคุมตำแหน่ง หรือการควบคุมแรงอย่างใดอย่างหนึ่ง 2.ไม่มีแรงเสียดทานเข้ามาเกี่ยวข้อง 3.การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์จะต้องสัมพันธ์กับเงื่อนไขบังคับทางเรขาคณิต ดังนั้นจากรูปที่ 3.2 เมทริกซ์ S และ S' หรือ ซีเลคชันเมทริกซ์ (Selection matrix) [44, 47] กำหนดแกนควบคุมตำแหน่งหรือแรงในระบบคาร์ทีเซียน ซึ่งเป็นเมทริกซ์ทแยงมุม (Diagonal matrix) โดย S กำหนดแกนควบคุมตำแหน่ง และ S' กำหนดแกนควบคุมแรง เพื่อนำสัญญาณไปใช้ในการควบคุมหุ่นยนต์ สำหรับงานกำหนดตำแหน่งหมุดหรืองานปักหมุดลงหลุม (Peg-in-hole task) โดยทั่วไปจะได้ว่า

$$S = diag(1\,1\,0) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{3.4}$$

$$S' = diag(0\,0\,1) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3.5}$$

โดยจะมีการควบคุมตำแหน่งที่บนระนาบ x และ y เพื่อเคลื่อนที่แท่งหมุดให้ลงหลุมตามตำแหน่งที่ต้องการ แล้วควบคุมแรงในทิศแนวดิ่ง z ให้แท่งหมุดสัมผัสกับขอบหลุมจนกระทั่งเคลื่อนที่ลงหลุมไปยังก้นหลุม



รูปที่ 3.2 ระบบควบคุมตำแหน่ง/แรงแบบไฮบริด

การควบคุมแรงแบ่งได้เป็นสองประเภท ได้แก่ การควบคุมแรงแบบเอ็กซ์พลิซิท (Explicit force control) และการควบคุมแรงแบบอิมพลิซิท (Implicit force control) [49] การควบคุมแรงแบบเอ็กซ์พลิซิทเป็นการควบคุมแรงโดยตรง การควบคุมตำแหน่ง/แรงแบบไฮบริดจะเป็นการควบคุมแบบเอ็กซ์พลิซิทถ้าแกนที่ควบคุมแรงมีการควบคุมแรงโดยตรง ไม่ผ่านการควบคุมตำแหน่ง โดยการนำสัญญาณของแรงป้อนกลับจากการวัดผ่านตัวตรวจวัดแรงมาชดเชยจากแรงที่ต้องการ ซึ่งจะนำสัญญาญไปควบคุมหุ่นยนต์ตามทิศทางและขนาดของแรงจนกว่าจะได้แรงตามต้องการ ไม่มีการคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งและแรงสัมผัส ส่วนการควบคุมแบบอิมพลิซิทเป็นการควบคุมแรงโดยอ้อม ใช้หลักการควบคุมแรงผ่านการควบคุมตำแหน่ง จึงต้องมีความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งและแรงสัมผัส ตัวอย่างของการควบคุมแบบอิมพลิซิทมีดังต่อไปนี้

การควบคุมแรงแบบอินทิกรัล (Integral control) โดยใช้ควบคุมแรงในแนวแกน z หรือในแนวดิ่ง (Vertical axis) ซึ่งจะมีค่าเกนแบบอินทิกรัล K_{fi} แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงในแนวแกน z และตำแหน่งของหุ่นยนต์หรือชิ้นงานในแนวแกน z และใช้การควบคุมตำแหน่งในแนวแกน x และ y ดังสมการดังต่อไปนี้ [47]

$$z_{ref} = \int K_{fi}(f_{ref} - f_{actual})dt \qquad \text{การควบคุมแรง (3.6)}$$

$$\tau = K_d(\dot{\theta}_{ref} - \dot{\theta}_{actual}) + K_p(\theta_{ref} - \theta_{actual}) \qquad \text{การควบคุมตำแหน่ง (3.7)}$$

โดยที่

z_{ref} คือตำแหน่งอ้างอิงในแนวแกน z ของข้อต่อหุ่นยนต์

K_{fi} คือค่าเกนแบบอินทิกรัล

f_{ref} คือแรงอ้างอิงที่ต้องการ, f_{actual} คือแรงที่วัดได้จากตัวตรวจวัดแรง

τ คือแรงบิดที่เป็นสัญญาณที่นำไปควบคุมข้อต่อ

θ_{ref} คือมุมอ้างอิงของข้อต่อ, θ_{actual} คือมุมที่วัดได้จากอุปกรณ์ตรวจวัดตำแหน่ง

K_p คือค่าเกนแบบสัดส่วน

K_d คือค่าเกนแบบอนุพันธ์หรือค่าเกนของความหน่วง

จากสมการที่ 3.6 เมื่อตัวตรวจวัดแรงนำแรงที่วัดได้ไปชดเชยกับแรงที่ต้องการได้เป็นค่าความผิดพลาดของแรง แล้วนำไปคำนวณหาตำแหน่งอ้างอิงของข้อต่อในแนวแกน z โดยใช้ค่าเกนแบบอินทิกรัล เมื่อได้ตำแหน่งอ้างอิงในแนวแกน z แล้วจะนำไปรวมกับสัญญาณตำแหน่งอ้างอิงแกนที่เหลือเพื่อหามุมอ้างอิงแล้วชดเชยมุมที่วัดได้ เพื่อคำนวณหาแรงบิดเพื่อใช้เป็นสัญญาณควบคุมข้อต่อของหุ่นยนต์ในสมการที่ 3.7

การควบคุมแรงแบบอิมพิแดนซ์ (Impedance control) เป็นอีกหนึ่งในการควบคุมแรงโดยอ้อม หรือการควบคุมแบบอิมพลิซิท ใช้ควบคุมแรงที่เกิดจากการสัมผัสระหว่างหุ่นยนต์กับสิ่งแวดล้อมหรือชิ้นงาน โดยเฉพาะงานที่ต้องการความละเอียด เช่น งานประกอบชิ้นส่วนทางกล (Assembly task) ใช้หลักการของความต้านทานสภาพการเคลื่อนที่ [24] และใช้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงสัมผัสและตำแหน่งของปลายแขนหุ่นยนต์ในการควบคุมแรง [49-51] โดยใช้ระบบการเคลื่อนที่ของมวลที่ติดกับสปริงที่มีตัวหน่วง (Damper) เป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ดังสมการต่อไปนี้

$$f_e = M(\ddot{x}_{ref} - \ddot{x}_{actual}) + C(\dot{x}_{ref} - \dot{x}_{actual}) + K(x_{ref} - x_{actual}) \qquad (3.8)$$

โดยที่

f_e คือแรงเจเนอรัลไรซ์ (Generalized force) ที่สิ่งแวดล้อมกระทำต่อปลายแขนหุ่นยนต์

M, C, K คือเมทริกซ์ทแยงมุมที่ค่าคงที่แบบโพซิทีฟเดฟินิท (Diagonal positive definite matrix) ที่เป็นค่าความเฉื่อย (Inertia) ค่าความหน่วง (Damping) ค่าแข็งตึง (Stiffness) ที่ต้องการตามลำดับ

x_{ref} คือเวคเตอร์ตำแหน่งอ้างอิงที่ต้องการ, x_{actual} คือเวคเตอร์ตำแหน่งที่วัดได้

$$\ddot{x} = \ddot{x}_{ref} + M^{-1}[-f_e + C(\dot{x}_{ref} - \dot{x}_{actual}) + K(x_{ref} - x_{actual})] \tag{3.9}$$

โดยที่

$\ddot{x}$ คือความเร่งปลายแขนของหุ่นยนต์ที่ต้องการสำหรับการควบคุมแบบอิมพิแดนซ์

เมื่อได้ความเร่งปลายแขนของหุ่นยนต์ที่ต้องการจะนำไปใช้คำนวณในสมการการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ต่อไป ซึ่งแตกต่างกันในหุ่นยนต์แต่ละประเภท ดังนั้นจะเห็นว่าการควบคุมแรงแบบอิมพิแดนซ์จึงต้องคำนึงถึงความสัมพันธ์ระหว่างแรงสัมผัสที่สิ่งแวดล้อมและตำแหน่งการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เพื่อนำมาใช้ควบคุมในสมการการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ในท้ายที่สุด

3.2.1.2 การควบคุมแบบคอมไพลอันซ์ (Compliance control)

การควบคุมแบบคอมไพลอันซ์จะใช้ข้อมูลของทั้งแรงและตำแหน่ง เพื่อควบคุมปฏิกิริยาทางกายภาพที่เกิดขึ้นกับสภาพแวดล้อมหรือชิ้นงาน แตกต่างจากการควบคุมตำแหน่ง/แรงแบบไฮบริดที่มีการควบคุมระหว่างแรงและตำแหน่งแยกจากกัน การควบคุมแบบคอมไพลอันซ์จะใช้หลักการในการหาความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดและแรงที่เกิดขึ้นบนปลายแขนหุ่นยนต์ โดยมีความสัมพันธ์ดังสมการต่อไปนี้ [44]

$$\triangle p = CF \tag{3.10}$$

โดยที่

$\triangle p$ คือ เวคเตอร์ $m \times 1$ การกระจัดที่เกิดขึ้นบนจุดปลายแขนของหุ่นยนต์

F คือ เวคเตอร์ $m \times 1$ แรงที่เกิดขึ้นบนจุดปลายแขนของหุ่นยนต์

C คือ เมทริกซ์คอมไพลอันซ์ $m \times m$

เมทริกซ์ผกผันของเมทริกซ์คอมไพลอันซ์ คือเมทริกซ์ความแข็งตึง

$$K = C^{-1} \tag{3.11}$$

เมทริกซ์คอมไพลอันซ์และเมทริกซ์ความแข็งตึงถูกออกแบบเพื่อให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์และ เงื่อนไขบังคับในการทำงาน เช่น การควบคุมหุ่นยนต์ให้เปิดประตูด้วยการจับลูกบิด การเคลื่อนที่ของบานประตูจะถูกกำหนดด้วยเงื่อนไขบังคับทางเรขาคณิต โดยมีเส้นทางการเคลื่อนที่เป็นเส้นโค้งที่เป็นส่วนของวงกลมที่มีจุดศูนย์กลางอยู่ที่บานพับ ถ้าปลายแขนของหุ่นยนต์มีค่าความแข็งตึงสูงจะยึดลูกบิดแน่น เมื่อเคลื่อนที่จะทำให้ประตูเสียหาย จึงต้องออกแบบให้ปลายแขนของหุ่นยนต์มีค่าความแข็งตึงต่ำ หรือมีค่าคอมไพลอันซ์สูงในทิศตั้งฉากกับการเคลื่อนที่หรือทิศแนวเดียวกับรัศมีของการเคลื่อนที่ เพื่อให้ปลายแขนของหุ่นยนต์มีความยืดหยุ่น ไม่ออกแรงดึงลูกบิดประตูจนทำให้เกิดความเสียหาย และกำหนดค่าความแข็งตึงสูง หรือค่าคอมไพลอันซ์ต่ำในทิศขนานกับการเคลื่อนที่เพื่อที่แขนของหุ่นยนต์สามารถออกแรงผลักประตูขณะเปิดได้แม้มีแรงเสียดทาน กำหนดระบบพิกัดอ้างอิงให้ทิศ x ตั้งฉากกับการเคลื่อนที่หรืออยู่ในแนวรัศมี และ y มีทิศขนานกับการเคลื่อนที่จะได้ค่าความแข็งตึงของปลายแขนหุ่นยนต์สำหรับการเปิดประตูมีค่าดังสมการดังต่อไปนี้ [44]

$$K = \begin{bmatrix} k_x & 0 \\ 0 & k_y \end{bmatrix};\ k_x << 1, k_y >> 1 \tag{3.12}$$

การออกแบบระบบควบคุมแบบคอมไพลอันซ์มีหลายวิธีการ การใช้ค่าเกนแบบสัดส่วนเป็นหนึ่งในวิธีที่ง่ายที่สุด เมทริกซ์คอมไพลอันซ์และเมทริกซ์ความแข็งตึงที่ปลายแขนหุ่นยนต์จะถูกกำหนดจากการปรับค่าเกนป้อนกลับของตำแหน่งข้อต่อ (Joint feedback gains) จะได้ว่าจากทฎษฎีบท [44] ค่าเมทริกซ์ความแข็งตึง K_p ของจุดปลายแขนหุ่นยนต์ที่ต้องการมีความสัมพันธ์ดังสมการดังต่อไปนี้

$$F = K_p \triangle p \tag{3.13}$$

จะได้ว่าค่าเกนป้อนกลับของตำแหน่งข้อต่อ K_q เป็นไปตามความสัมพันธ์ดังสมการ 3.14

$$K_q = J^T K_p J \tag{3.14}$$

โดยที่

J คือ เมทริกซ์จาโคเบียน (Jacobian matrix) เป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วปลายแขนของหุ่นยนต์ (Endpoint velocity) $\dot{p}$ และความเร็วข้อต่อ (Joint velocity) $\dot{q}$ และสมการดังกล่าวกำหนดให้ไม่มีแรงเสียดทานภายในข้อต่อ

พิสูจน์โดยใช้เมทริกซ์จาโคเบียนหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดของข้อต่อ (Joint torques) และค่าเกนป้อนกลับของตำแหน่งข้อต่อจากสมการ 3.14 จะได้ว่า

$$\tau = J^T F = J^T K_p \triangle p = J^T K_p J \cdot \triangle q \tag{3.15}$$

$$\tau = K_q \triangle q \tag{3.16}$$

ดังนั้นจะได้ค่าเกนป้อนกลับของตำแหน่งข้อต่อสำหรับใช้ในการควบคุมแบบคอมไพลอันซ์ ซึ่งสามารถนำความสัมพันธ์ระหว่างการกระจัดและแรงของข้อต่อที่ปลายแขนหุ่นยนต์ไปใช้ในการควบคุมแรงได้

3.2.2 การเคลื่อนที่แบบคอมไพลอันท์ (Compliant motion) ของหุ่นยนต์

การเคลื่อนที่แบบคอมไพลอันท์ (Compliant motion) มีส่วนสำคัญช่วยให้หุ่นยนต์สามารถตอบสนองและปรับสภาพการเคลื่อนที่เมื่อสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมหรือชิ้นงาน ซึ่งจะช่วยให้มีความปลอดภัยขณะปฏิบัติงาน และเป็นที่นิยมใช้งานจริงในอุตสาหกรรมโดยเฉพาะอุตสาหกรรมประกอบชิ้นส่วนทางกล เพราะการใช้การควบคุมแรงมีความยุ่งยาก กล่าวคือขั้นตอนการคำนวณมีความซับซ้อน ขาดความแม่นยำถ้าแบบจำลองทางคณิตศาสตร์หรือตัวตรวจวัดแรงมีคุณภาพไม่ดีพอ การทำให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่แบบคอมไพลอันท์ ไม่จำเป็นต้องใช้การควบคุมแรงแบบคอมไพลอันซ์เท่านั้น แต่ยังสามารถใช้อุปกรณ์คอมไพลอันท์ (Compliant devices) ได้อีกด้วย อุปกรณ์ดังกล่าวแบ่งเป็นสามประเภท [52] ได้แก่

1.อุปกรณ์คอมไพลอันท์แบบแอคทีฟ (Active compliant devices) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ระบบควบคุมผ่านทางซอฟต์แวร์ที่ควบคุมโดยคอมพิวเตอร์ เมื่อเกิดการสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมข้อต่อของหุ่นยนต์จะมีแรงกระทบกับโครงสร้างที่แข็งเกร็ง และมีผลของเวลาหน่วงในการตอบสนองต่อแรงสัมผัสที่เกิดขึ้นเนื่องจากการประมวลผลและรับข้อมูลจากอุปกรณ์ตรวจวัดภายในระบบ โดยเฉพาะสัญญาณแรงป้อนกลับจากตัวตรวจวัดแรง ซึ่งมีข้อเสียคือ มีราคาแพง ไม่ปลอดภัยเมื่อระบบไฟฟ้าเกิดปัญหา และมีความซับซ้อน แต่มีข้อดีคือมีความสามารถในการโปรแกรมระบบสูง ทำให้ระบบมีความยืดหยุ่นสามารถปรับค่าตัวแปรแบบออนไลน์ได้ ดังนั้นการควบคุมแรงแบบคอมไพลอันซ์จึงเป็นหนึ่งในระบบที่ใช้อุปกรณ์คอมไพลอันท์แบบแอคทีฟ ตัวอย่างอุปกรณ์คอมไพลอันท์แบบแอคทีฟ เช่น ตัวขับเคลื่อนแบบไฮดรอลิก (Hydraulic actuators) ตัวขับเคลื่อนแบบนิวเมติก (Pneumatic actuators) และตัวขับเคลื่อนแบบอิเล็กโทรแมกเนติก (Electromagnetic actuators)

2.อุปกรณ์คอมไพลอันท์แบบพาสซีฟ (Passive compliant devices) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ชิ้นส่วนทางกลแบบพาสซีฟ โดยเฉพาะสปริง เพื่อหลีกเลี่ยงแรงสัมผัสที่มากเกินไปจนทำให้โครงสร้างเสียหายทั้งต่อหุ่นยนต์และชิ้นงาน ชิ้นส่วนที่มีความยืดหยุ่นจะเก็บสะสมพลังงานทางกลทำให้ลดการดูดซับพลังงานโดยรวมของระบบ รวมทั้งยังทำให้เกิดการเคลื่อนที่แบบคอมไพลอันท์แม้ระบบไฟฟ้าล้มเหลว และข้อต่อทำงานผิดพลาด ตัวอย่างอุปกรณ์คอมไพลอันท์แบบพาสซีฟที่ประสบความสำเร็จและใช้งานอย่างแพร่หลายคือ อาร์ซีซี (RCC) หรือ อุปกรณ์รีโมทเซ็นเตอร์คอมไพลอันซ์ (Remote Center Compliance device) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ประกอบด้วยสปริงที่มีหกองศาอิสระติดตั้งระหว่างข้อต่อแขนหุ่นยนต์และปลายแขนทำให้มีการเคลื่อนที่แบบคอมไพลอันท์อย่างลื่นไหลขณะทำงาน หรือมีแรงสัมผัสระหว่างปลายแขนหุ่นยนต์และสิ่งแวดล้อม

3.อุปกรณ์คอมไพลอันท์แบบเซมิแอคทีฟ (Semi compliant devices) เป็นอุปกรณ์ที่รวบรวมจุดเด่นของอุปกรณ์คอมไพลอันท์แบบแอคทีฟและพาสซีฟเข้าด้วยกัน ทำให้มีความแม่นยำที่สูงขึ้น มีความปลอดภัย มีความยืดหยุ่นในการปรับสภาพการควบคุมที่เป็นความสามารถของอุปกรณ์แบบแอคทีฟ ใช้พลังงานน้อย และสามารถลดแรงกระทบและการสั่นสะเทือนที่ทำให้มนุษย์มีความปลอดภัย รวมทั้งมีความสามารถในการขับกลับสูงซึ่งได้จากแบบพาสซีฟ ตัวอย่างเช่น ตัวขับเคลื่อนแบบวัสดุโลหะอัลลอยด์จำรูป (Shape memory alloy based actuators) และตัวขับเคลื่อนแบบเพียโซอิเล็กทริก (Piezoelectric actuators)

วิทยานิพนธ์นี้นำหลักการควบคุมตำแหน่งและแรง มาประยุกต์ใช้กับการควบคุมหุ่นยนต์สำหรับทำงานกำหนดตำแหน่งหมุดร่วมกับมนุษย์ในเวลาจริง โดยวิธีการที่ใช้คือ การควบคุมตำแหน่ง/แรงแบบไฮบริด แบบอิมพลิซิท ซึ่งมีการควบคุมแรงแบบอินทิกรัลโดยใช้ควบคุมแรงในแนวแกนระนาบหรือแนวแกน x และ y และใช้การควบคุมตำแหน่งในแนวแกนดิ่งหรือแนวแกน z ซึ่งเป็นการนำเสนอรูปแบบที่แตกต่างจากทฤษฎีที่กล่าวมา แต่ยังคงมีหลักการคล้ายกัน และการทำงานกำหนดตำแหน่งหมุด ต้องคำนึงถึงการเคลื่อนที่เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดแรงสัมผัสระหว่างหุ่นยนต์กับชิ้นงานมากเกินไปจนทำให้เกิดความเสียหาย จึงออกแบบให้หุ่นยนต์มีการเคลื่อนที่แบบคอมไพลอันท์โดยใช้อุปกรณ์คอมไพลอันท์แบบพาสซีฟที่ฐานพื้นที่ทำงานของหุ่นยนต์ ซึ่งจะกล่าวถึงละเอียดในบทการออกแบบหุ่นยนต์ต่อไป

3.3 ทฤษฎีที่เกี่ยวกับการทำงานของหุ่นยนต์ร่วมกับมนุษย์ในเวลาจริง

การควบคุมหุ่นยนต์ให้ทำงานร่วมกับมนุษย์มีปัจจัยหลายประการที่ต้องคำนึงถึง โดยสาระสำคัญอันดับแรกคือการตอบสนองหรือปฏิกิริยาระหว่างมนุษย์และหุ่นยนต์ (Human robot interaction: HRI) ซึ่งมีทั้งปฏิกิริยาทางการรับรู้ของมนุษย์และหุ่นยนต์ (Cognitive human robot interaction: cHRI) และปฏิกิริยาทางกายภาพของมนุษย์และหุ่นยนต์ (Physical human robot interaction: pHRI) [52] มีงานวิจัยมากมายได้ศึกษาเกี่ยวกับผลของปัจจัยดังกล่าวทั้งปฏิกิริยาทางการรับรู้ [12, 30] และทางกายภาพ [52] ที่มีผลต่อการทำงานของหุ่นยนต์ร่วมกับมนุษย์ ดังนั้นการออกแบบพัฒนาและการนำหุ่นยนต์ไปใช้งานจริง จึงต้องตระหนักถึงปัจจัยเหล่านี้เพื่อให้สามารถควบคุมหุ่นยนต์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และมีความปลอดภัยต่อทั้งมนุษย์และโครงสร้างของหุ่นยนต์

3.3.1 ปัจจัยด้านความปลอดภัยต่อมนุษย์

ปัจจัยด้านความปลอดภัยของมนุษย์เป็นปัจจัยที่สำคัญ จำเป็นต้องพิจารณาเกี่ยวกับปฏิกิริยาทางกายภาพของมนุษย์และหุ่นยนต์ เนื่องจากการทำงานร่วมกับระหว่างมนุษย์และหุ่นยนต์อาจมีแรงทางกายภาพที่หุ่นยนต์กระทำที่มนุษย์ทั้งทางตรงและทางอ้อม การควบคุมหุ่นยนต์ให้ทำงานร่วมกับมนุษย์จะมีพื้นที่การทำงานร่วมกันระหว่างมนุษย์และหุ่นยนต์ ประเภทของการควบคุมหุ่นยนต์ให้

ทำงานร่วมกับมนุษย์ที่จำเป็นต้องคำนึงถึงปฏิกิริยาทางกายภาพ เช่น หุ่นยนต์ช่วยเหลือหรือหุ่นยนต์ตรวจสอบ หุ่นยนต์เอ็กโซสเกเลตอน หุ่นยนต์ทำงานร่วมกับมนุษย์โดยตรงกับชิ้นงาน (Cooperative robot) และหุ่นยนต์ระยะไกลเพื่อทำงานร่วมกับมนุษย์ (Telerobot) ในสภาพแวดล้อมที่มีชิ้นงานดังกล่าวจึงต้องมีวิธีการหรือมาตรฐานทางด้านความปลอดภัย งานวิจัยทั่วโลก [52] ปฏิบัติและยึดถือมาตรฐานด้านความปลอดภัยของ ISO เพื่อหลีกเลี่ยงความเสี่ยงและความอันตรายที่อาจเกิดขึ้น

ในปี ค.ศ.1992 มาตรฐานด้านความปลอดภัยของหุ่นยนต์อุตสาหกรรมได้ถูกนำมาใช้คือมาตรฐาน ISO10218 หรือ ISO1992 ซึ่งให้ข้อแนะนำเกี่ยวกับข้อคำนึงเกี่ยวกับความปลอดภัยในด้านการออกแบบ การสร้าง การเขียนโปรแกรม การปฏิบัติงาน และการซ่อมบำรุง ต่อมาในปี ค.ศ.2006 เมื่อเทคโนโลยีก้าวหน้ามากยิ่งขึ้น จึงมีมาตรฐานความปลอดภัยรูปแบบใหม่ที่เพิ่มเติมจากมาตรฐานเดิมคือ มาตรฐาน ISO10218-1 หรือ ISO2006 ที่เพิ่มเติมเกี่ยวกับข้อจำเป็นขณะควบคุมหุ่นยนต์อุตสาหกรรมให้ปฏิบัติงาน ที่เป็นมาตรฐานที่คำนึงถึงทั้งสภาพแวดล้อมและโครงสร้างหุ่นยนต์ การควบคุมหุ่นยนต์ร่วมกับมนุษย์จึงนำหลักการดังกล่าวมาใช้ และการใช้งานหุ่นยนต์จะต้องปฏิบัติตามมาตรฐานดังต่อไปนี้อย่างน้อยหนึ่งประการ

1.ความเร็วจุดศูนย์กลางของเครื่องมือ (Tool center point: TCP) จะต้องไม่เกิน 0.25 เมตรต่อวินาที

2.กำลังขับเคลื่อน (Dynamic power) สูงสุดต้องไม่เกิน 80 วัตต์

3.แรงสถิต (Static force) สูงสุดต้องไม่เกิน 150 นิวตัน

3.3.2 ปัจจัยด้านการรับรู้ของมนุษย์

ปัจจัยด้านการรับรู้ของมนุษย์เกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาทางการรับรู้ของมนุษย์และหุ่นยนต์ เป็นความรู้สึกของมนุษย์ต่อสภาพปัจจุบัน (Feeling of presence) [2] กล่าวคือเป็นความสามารถของมนุษย์ในการรับรู้สภาพสิ่งแวดล้อมตรงหน้าตนเองได้ และแยกแยะได้ว่าแตกต่างจากสภาพแวดล้อมที่หุ่นยนต์ทำงานอยู่ แต่ในทางอุดมคติมนุษย์จะต้องไม่สามารถแยกแยะความรู้สึกว่าตนเองไม่ได้อยู่ในสภาพแวดล้อมเดียวกับหุ่นยนต์

3.3.2.1 ความหน่วงของเวลา (Time delay)

มีหลากหลายปัจจัยที่ส่งผลต่อความรู้สึกของมนุษย์ต่อสภาพปัจจุบัน ปัจจัยแรกซึ่งเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการส่งข้อมูลระหว่างมนุษย์และหุ่นยนต์ คือความหน่วงของเวลา (Time delay) ที่มนุษย์จะรู้สึกขณะควบคุมหุ่นยนต์ เมื่อมนุษย์เคลื่อนไหวเพื่อสั่งการหุ่นยนต์ หุ่นยนต์จะเคลื่อนที่ตามคำสั่งนั้นทันทีที่ผ่านช่วงเวลาหนึ่งไป และส่งข้อมูลตำแหน่งหรือภาพป้อนกลับมาให้มนุษย์รับทราบเมื่อเวลา

ผ่านไปอีกช่วงหนึ่งเช่นกัน ท้ายที่สุดมนุษย์จะรับข้อมูลเหล่านั้นผ่านทางประสาทการรับรู้โดยใช้เวลาในการตอบสนอง ช่วงเวลาเหล่านั้นคือเวลาหน่วงภายในระบบเมื่อมนุษย์ทำงานร่วมกับหุ่นยนต์นั่นเอง

มีงานวิจัยที่ศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงเวลาหน่วง (Delay time) ที่มีผลต่อสมรรถนะการทำงานของหุ่นยนต์ร่วมกับมนุษย์ [12] ในการทำงานร่วมกับมนุษย์และหุ่นยนต์ ความเร็วในการตอบสนองระหว่างมนุษย์และหุ่นยนต์จะเป็นตัวบ่งชี้ถึงประสิทธิภาพการทำงาน ยิ่งมีความเร็วในการตอบสนองเร็วหรือมีเวลาหน่วงน้อยจะทำให้การทำงานมีความลื่นไหล และเกิดความคล่องตัวไม่ติดขัดขณะทำงาน ทำให้ใช้เวลาในการทำภารกิจลดลงซึ่งเป็นตัวแปรสมรรถนะในการทำงานที่สำคัญมาก ผลของเวลาหน่วงจะมีผลมาทั้งจากหุ่นยนต์และมนุษย์ ทางหุ่นยนต์จากการรับส่งข้อมูลของอุปกรณ์ภายในระบบ เช่น การรับสัญญาณภาพผ่านกล้องดิจิตอล การประมวลผลภายในระบบ และการส่งสัญญาณตำแหน่งควบคุม ทางมนุษย์จากเวลาปฏิกิริยาตอบสนองของมนุษย์ และความพร้อมทางด้านร่างกาย

จากการศึกษาของงานวิจัย [12] พบว่าเวลาหน่วงของระบบจะมีผลต่อสมรรถนะการทำงานร่วมกันของมนุษย์และหุ่นยนต์เมื่อมีค่ามากถึงระดับหนึ่ง และจะไม่มีผลต่อสมรรถนะการทำงานหากทำให้ระบบมีเวลาหน่วงน้อยไปกว่าค่าดังกล่าว เนื่องจากการตอบสนองของมนุษย์มีขีดจำกัด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ศึกษาความหน่วงของเวลาที่มีในระบบควบคุมหุ่นยนต์ระยะไกล [5, 41, 42] ที่เสนอเวลาหน่วงมากที่สุดภายในระบบที่สามารถยอมรับได้มีค่าประมาณ 300 มิลลิวินาที ดังนั้นจึงสามารถออกแบบพัฒนาระบบให้สามารถมีเวลาหน่วงภายในระบบน้อยกว่าค่าดังกล่าวก็เพียงพอ วิธีการโดยทั่วไปในการลดความหน่วงของเวลาภายในระบบคือลดปริมาณข้อมูล หรือบีบอัดข้อมูลที่รับส่งภายในระบบ ในวิทยานิพนธ์นี้ได้นำหลักการนี้มาใช้ โดยการปรับเปลี่ยนคุณสมบัติ ความละเอียดของภาพจากกล้องดิจิตอลให้มีค่าที่เหมาะสม ทำให้ข้อมูลภาพมีขนาดไม่ใหญ่เกินไป และสามารถควบคุมหุ่นยนต์ได้อย่างลื่นไหล ทำให้ลดงบประมาณในการจัดสร้างและผลิตระบบหุ่นยนต์ เพราะไม่จำเป็นต้องสิ้นเปลืองในการผลิตหรือใช้อุปกรณ์ที่มีคุณภาพและราคาสูงจนเกินความจำเป็น

3.3.2.2 ส่วนต่อประสานระหว่างมนุษย์และหุ่นยนต์ (Human-machine interfaces)

นอกจากความหน่วงที่มีผลต่อความรู้สึกของมนุษย์ต่อสภาพปัจจุบัน ยังมีอีกปัจจัยอื่นเข้ามาเกี่ยวข้องคือ ส่วนต่อประสานระหว่างมนุษย์และหุ่นยนต์ที่มีหน้าที่เชื่อมต่อสื่อสารหรือรับส่งข้อมูลระหว่างสภาพแวดล้อมพื้นที่ที่หุ่นยนต์ทำงานและสภาพแวดล้อมพื้นที่ที่มนุษย์ควบคุม ส่วนต่อประสานจะทำให้มนุษย์สามารถรับรู้สภาพแวดล้อมของชิ้นงานได้ เพื่อตอบสนองหรือควบคุมหุ่นยนต์ให้เกิดปฏิกิริยาทางกายภาพกับชิ้นงาน ดังนั้นส่วนต่อประสานที่ทำให้มนุษย์รับรู้สภาพแวดล้อมของชิ้นงานเกี่ยวข้องกับการมองเห็นและการจำลองสภาพสิ่งแวดล้อมในพื้นที่ที่มนุษย์ควบคุม มุมมองการ

มองเห็นของมนุษย์มีผลต่อการแยกแยะความรู้สึกของมนุษย์ระหว่างสภาพแวดล้อมที่มนุษย์ควบคุมอยู่กับสภาพแวดล้อมจริงหรือบริเวณชิ้นงานที่หุ่นยนต์ทำงาน

มุมมองที่ดีที่สุดคือมุมมองโดยตรง ซึ่งมนุษย์จะอยู่ในพื้นที่ทำงานเดียวกับหุ่นยนต์ แต่ถ้าเป็นการควบคุมหุ่นยนต์จากระยะไกลจำเป็นที่จะต้องมีจอภาพแสดงผลเป็นตัวกลาง จึงมีงานวิจัย [30] ที่นำเสนอวิธีการควบคุมหุ่นยนต์ระยะไกลผ่านทางสามมุมมอง ได้แก่ มุมมองโดยตรงที่มนุษย์มองเห็นชิ้นงานตรงหน้า มุมมองสองมิติเป็นภาพในระนาบโดยใช้กล้องตัวเดียวแสดงภาพไปยังหน้าจอตรงหน้ามนุษย์ และมุมมองสามมิติที่ได้จากการใช้กล้องสองตัวส่งภาพไปยังหน้าจอสองหน้าจอเปรียบเสมือนมุมมองจากตาขวาและซ้ายของมนุษย์ ซึ่งผลที่ได้เป็นไปตามคาดนั่นคือ มุมมองโดยตรงมีสมรรถนะการทำงานของการควบคุมหุ่นยนต์ดีที่สุด และมุมมองสามมิติ มุมมองสองมิติ รองลงมาตามลำดับ ความรู้สึกของมนุษย์ต่อสภาพปัจจุบันผ่านมุมมองสองมิติจะทำให้มนุษย์ยังคงสามารถแยกแยะสภาพสิ่งแวดล้อมได้ และมุมมองสามมิติก็จะทำให้แยกแยะได้ยากขึ้น หมายความว่า การออกแบบระบบส่วนต่อประสานหรือจำลองให้สภาพแวดล้อมของพื้นที่ที่มนุษย์ควบคุมใกล้เคียงพื้นที่จริงเสมือนมุมมองโดยตรงให้มากขึ้น ก็จะทำให้การควบคุมหุ่นยนต์ร่วมกับมนุษย์ในเวลาจริงมีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้น วิทยานิพนธ์นี้จึงนำหลักการดังกล่าวมาออกแบบการระบบควบคุมหุนยนต์ในเวลาจริง โดยมนุษย์จะควบคุมหุ่นยนต์ผ่านทางหน้าจอแสดงผลสองหน้าจอที่ส่งภาพมาจากกล้องทั้งสองตัว และจัดวางตำแหน่งให้เหมาะสมที่สุดเพื่อให้มนุษย์รู้สึกใกล้เคียงเสมือนอยู่ในสภาพแวดล้อมที่หุ่นยนต์ทำงานให้มากที่สุด จะเห็นได้ว่ามุมมองการมองเห็นขณะทำงานมีผลต่อความรู้สึกของมนุษย์ต่อสภาพปัจจุบันซึ่งมีหน้าจอแสดงผลเป็นส่วนต่อประสานเชื่อมต่อระหว่างมนุษย์กับหุ่นยนต์

นอกเหนือจากส่วนต่อประสานด้านการรับรู้ ยังมีส่วนต่อประสานที่ทำหน้าที่ส่งข้อมูลการเคลื่อนไหวของมนุษย์ไปยังหุ่นยนต์ เพื่อใช้ในการควบคุมหุ่นยนต์ให้ได้ตำแหน่งตามที่ต้องการ การออกแบบระบบควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์ร่วมกับมนุษย์ในเวลาจริง อุปกรณ์ส่วนต่อประสาน (Human-machine interface device) มีความสำคัญมาก เพราะเป็นอุปกรณ์ที่มนุษย์สัมผัสหรือมีปฏิสัมพันธ์โดยตรง ทำให้การเคลื่อนไหวของร่างกายมนุษย์สอดคล้องกับการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ตามที่ต้องการ ความรู้สึกของมนุษย์ต่อสภาพปัจจุบันในด้านกายภาพจะต้องลื่นไหล สามารถรับรู้การเคลื่อนไหวของหุ่นยนต์และตอบสนองร่างกายตนเองได้อย่างง่ายดายที่สุด

ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงออกแบบระบบให้มีอุปกรณ์ควบคุมที่เป็นส่วนต่อประสาน สำหรับเคลื่อนที่ปลายแขนหุ่นยนต์สามองศาอิสระได้ในเวลาจริง นั่นคืออุปกรณ์แฮปติก (Haptic device) ซึ่งถูกออกแบบให้เหมาะสมกับการใช้งานในการควบคุมหุ่นยนต์ โดยจะกล่าวละเอียดในบทถัดไป

3.4 ทฤษฎีที่เกี่ยวกับการประเมินสมรรถนะการทำงานของหุ่นยนต์ร่วมกับมนุษย์

เมื่อออกแบบระบบหุ่นยนต์เดลต้าแบบสามองศาอิสระ ให้สามารถทำงานกำหนดตำแหน่งหมุดร่วมกับมนุษย์ในเวลาจริงได้เป็นผลสำเร็จ ขั้นต่อไปคือประเมินสมรรถนะการทำงานของหุ่นยนต์สำหรับทำงานกำหนดตำแหน่งหมุดร่วมกับมนุษย์ในเวลาจริง มีงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการประเมินสมรรถนะการทำงานของหุ่นยนต์ร่วมกับมนุษย์ [2, 28, 30, 31] นำหลักการของฟิตต์ (Fitts' Law) ซึ่งเป็นการทดสอบสมรรถนะการทำงานของมนุษย์ในการเคลื่อนที่มือและแขนไปยังตำแหน่งที่ต้องการ [32] มาประยุกต์ใช้ในการประเมินสมรรถนะการทำงานของหุ่นยนต์ร่วมกับมนุษย์ โดยแบ่งเป็นการทดลองดังต่อไปนี้

1.การทดลองกดซ้ำไปมา (Reciprocal Tapping) คือการเคลื่อนที่มือสลับไปมาระหว่างสองด้านของแผ่นทดสอบด้วยการใช้ปากกา (Stylus) กดไปยังตำแหน่งกึ่งกลางพื้นที่รูปสี่เหลี่ยมสองรูปที่มีระยะห่างระหว่างกันซึ่งอยู่ตรงข้ามกันทำเช่นนี้สลับไปมา แล้วจับเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่จากตำแหน่งเริ่มต้นไปยังตำแหน่งสุดท้าย จากนั้นทำซ้ำโดยการเปลี่ยนขนาดของรูปสี่เหลี่ยมให้มีความกว้าง (Tolerance, W_s) ได้แก่ 2 1 0.5 และ 0.25 นิ้ว เช่นเดียวกันทำซ้ำโดยการเพิ่มระยะห่างระหว่างกึ่งกลางของรูปสี่เหลี่ยมทั้งสองด้าน (Movement amplitude, A) ได้แก่ 2 4 8 และ 16 นิ้ว จะได้ผลการทดลองทั้งหมด 16 กรณี โดยทำการทดลองกับทดสอบทั้งหมด 16 คน

ผลการทดลองที่ได้จะเป็นเวลาที่ใช้ในการทำงานเฉลี่ย (Time to completion, t) ความคลาดเคลื่อนในการทำงาน (Error, %) และดัชนีของสมรรถนะการทำงาน (The performance index, I_p) ที่เปลี่ยนแปลงไปตามดัชนีความยากของงาน (Index of difficulty, I_d) จากผลการทดลองรูปแบบแรกได้ข้อสรุปว่าขนาดความกว้างของรูปสี่เหลี่ยม (Tolerance, W_s) กับระยะห่างระหว่างกึ่งกลางรูปสี่เหลี่ยม (Movement amplitude, A) มีความสัมพันธ์กันดังสมการ

$$I_d = -\log_2 \frac{W_s}{2A} \; [bits / response] \tag{3.17}$$

ดัชนีความยากของงาน (Index of difficulty, I_d) คือระดับความยากของงานยิ่งมีค่ามากจะทำให้ใช้เวลาในการทำงานมากขึ้น (Time to completion, t) มีความสัมพันธ์แบบเส้นตรง

$$t = aI_d + b \quad [s] \tag{3.18}$$

ซึ่งเป็นไปตามผลการทดลอง เมื่อลดขนาดความกว้างของรูปสี่เหลี่ยมเป็นการลดค่าที่ยอมรับได้ของการทำงาน (Tolerance, W_s) ซึ่งเป็นการเพิ่มดัชนีความยากของงานจะใช้เวลาในการเคลื่อนที่จากตำแหน่งเริ่มต้นไปยังตำแหน่งสุดท้ายมากขึ้น (Time to completion, t) หรือ เช่นเดียวกันถ้าหาก

เพิ่มระยะห่างระหว่างกึ่งกลางรูปสี่เหลี่ยม (Movement amplitude, *A*) ซึ่งเป็นการเพิ่มดัชนีความยากของงานเช่นเดียวกันจะทำให้ใช้เวลาในการทำงานมากขึ้น (Time to completion, *t*) และสามารถหาดัชนีของสมรรถนะการทำงาน (The performance index, I_p) จากความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีความยากของงาน (Index of difficulty, I_d) กับเวลาที่ใช้ในการทำงานเฉลี่ย (Time to completion, *t*) ดังสมการ

$$I_p = -\frac{1}{t}\log_2 \frac{W_s}{2A} = \frac{I_d}{t} \ [bits/\sec] \tag{3.19}$$

ดัชนีความยากของงาน (Index of difficulty, I_d) ยิ่งมีค่ามากจะทำให้ดัชนีของสมรรถนะการทำงาน (The performance index, I_p) มีค่ามากขึ้นโดยมีความสัมพันธ์แบบเส้นตรง

2.การทดลองย้ายแผ่นวงแหวน (Disc Transfer) คือการย้ายวงแหวนจากเสาทางซ้ายไปยังทางขวาที่มีระยะห่างและตรงกันข้ามกันทีละอัน แล้ววัดเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่จากตำแหน่งเริ่มต้นไปยังตำแหน่งสุดท้าย จากนั้นทำซ้ำโดยการเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูวงแหวน กำหนดให้ค่าแตกต่างระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของรูวงแหวนและเสาเป็นค่าที่ยอมรับได้ของการทำงาน (Tolerance, W_s) เช่นเดียวกันทำซ้ำโดยการเพิ่มระยะห่างระหว่างกึ่งกลางของเสาทั้งสองด้าน (Movement amplitude, *A*) จะได้ผลการทดลองทั้งหมด 16 กรณี โดยทำการทดลองกับทดสอบทั้งหมด 16 คน ผลการทดลองมีแนวโน้มเหมือนกับการทดลองแรก

3.การทดลองย้ายแท่งหมุด (Pin Transfer) คือการย้ายแท่งจากรูทางซ้ายไปยังทางขวาที่มีระยะห่างและตรงกันข้ามกันทีละอัน แล้ววัดเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่จากตำแหน่งเริ่มต้นไปยังตำแหน่งสุดท้าย จากนั้นทำซ้ำโดยการเปลี่ยนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่ง กำหนดให้ค่าแตกต่างระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของรูและแท่งเป็นค่าที่ยอมรับได้ของการทำงาน (Tolerance, W_s) เช่นเดียวกันทำซ้ำโดยการเพิ่มระยะห่างระหว่างกึ่งกลางของรูทั้งสองด้าน (Movement amplitude, *A*) จะได้ผลการทดลองทั้งหมด 20 กรณี โดยทำการทดลองกับทดสอบทั้งหมด 20 คน เช่นเดียวกันผลการทดลองมีแนวโน้มเหมือนกับการทดลองแรก

วิทยานิพนธ์นี้ได้ออกแบบให้ชิ้นงานอยู่ในสภาพแวดล้อมไม่คงที่ กล่าวคือ มีลำดับการทำงานที่ไม่แน่นอน โดยจะทำการสุ่มตำแหน่งของหลุมที่จะต้องบังคับหุ่นยนต์ไปปักหมุด เพื่อให้เป็นงานที่เหมาะสมสำหรับควบคุมหุ่นยนต์ทำงานร่วมกับมนุษย์ และไม่สามารถใช้หุ่นยนต์อุตสาหกรรมได้ ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้ไม่สามารถนำหลักการของฟิตต์มาใช้ได้โดยตรง เพราะหลักการของฟิตต์ตำแหน่งในการเคลื่อนที่แต่ละรอบการทดลองจะมีความแน่นอน รวมทั้งระบบหุ่นยนต์ทำงานร่วมกับมนุษย์สามารถปรับค่าเกนให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่เร็วเกินขีดจำกัดของกล้ามเนื้อมนุษย์ได้ ทำให้หลักการของ

ฟิตต์ที่ใช้สำหรับทดสอบมนุษย์เป็นหลักไม่ควรนำมาใช้โดยตรงเช่นเดียวกัน วิทยานิพนธ์นี้จึงนำหลักการของฟิตต์มาพัฒนาวิธีการประเมินและประยุกต์ให้เหมาะสม

การประยุกต์หลักการฟิตต์ คือ ใช้ตัวแปรสมรรถนะการทำงานที่เป็นเวลาที่ใช้ในการทำภารกิจจากหลักการของฟิตต์เพียงอย่างเดียว แตกต่างจากฟิตต์ที่จะใช้ดัชนีความยากของงานและดัชนีสมรรถนะการทำงานในการวิเคราะห์ เพราะการปักหมุดแบบสุ่มทำให้ระยะห่างระหว่างกึ่งกลางของรู (Movement amplitude, *A*) มีค่าแตกต่างกันในแต่ละรอบการทดลอง ดังนั้นดัชนีความยากของงานในแต่ละรอบจึงมีค่าไม่คงที่

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 4
การออกแบบระบบหุ่นยนต์เดลต้า

ในบทนี้จะกล่าวถึงแนวทางการออกแบบหุ่นยนต์เดลต้าแบบสามองศาอิสระสำหรับทำงานกำหนดตำแหน่งหมุดร่วมกับมนุษย์ในเวลาจริง

4.1 คุณสมบัติของหุ่นยนต์เดลต้า

วิทยานิพนธ์นี้ออกแบบระบบควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์ร่วมกับมนุษย์โดยใช้หุ่นยนต์เดลต้า [9-14] เพราะโครงสร้างที่มีน้ำหนักเบาทำให้มีการตอบสนองที่รวดเร็ว และมีความปลอดภัยต่อมนุษย์ เหมาะกับการทำงานร่วมกันระหว่างมนุษย์และหุ่นยนต์ โดยวิเคราะห์เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของหุ่นยนต์สองลักษณะคือ หุ่นยนต์โครงสร้างอนุกรม (Serial link) และหุ่นยนต์โครงสร้างขนาน (Parallel link) หรือโครงสร้างแบบปิด ได้ข้อสรุปว่าหุ่นยนต์โครงสร้างแบบขนานจะมีน้ำหนักเบากว่า เพราะสามารถรับภาระต่อน้ำหนักของหุ่นยนต์ได้มากกว่าหุ่นยนต์โครงสร้างแบบอนุกรม เนื่องจากโครงสร้างขนานมีจำนวนแขนและข้อต่อที่ปลายหุ่นยนต์มากกว่าโครงสร้างอนุกรม ทำให้มีภาระเฉลี่ยขณะทำงานบนแต่ละแขนของโครงสร้างขนานมีขนาดน้อยกว่าแบบอนุกรม

การที่หุ่นยนต์จำเป็นต้องมีน้ำหนักเบามีความสำคัญมาก เพราะต้องใช้ในการทำงานร่วมกับมนุษย์ ซึ่งต้องการให้หุ่นยนต์มีการตอบสนองที่รวดเร็วและมนุษย์ไม่รู้สึกถึงเวลาหน่วง และต้องคำนึงถึงความปลอดภัยของมนุษย์ หุ่นยนต์โครงสร้างขนานที่มีน้ำหนักเบาจะมีการตอบสนองที่รวดเร็วและมีอันตรายต่อมนุษย์น้อยลง รวมถึงการขับเคลื่อนที่ง่ายขึ้นทำให้มอเตอร์มีขนาดเล็กลงอีกด้วย

สาเหตุในการใช้หุ่นยนต์เดลต้าอีกประการ คือ ความแม่นยำของหุ่นยนต์โครงสร้างขนานมีมากกว่าอนุกรม เพราะค่าความคลาดเคลื่อนจะไม่สะสมในแต่ละข้อต่อจนมีขนาดมากเหมือนในโครงสร้างอนุกรม แต่ข้อเสีย คือ หุ่นยนต์เดลต้าจะต้องใช้ระบบควบคุมที่มีคณิตศาสตร์เกี่ยวข้องกับการคำนวณจลนศาสตร์ (Kinematics) [15-19] ซึ่งความซับซ้อนมากกว่าโครงสร้างอนุกรม เพราะการเคลื่อนที่และตำแหน่งของปลายแขนมีผลกับชุดแขนที่ขนานกันทั้งหมด

หุ่นยนต์เดลต้าจะประกอบด้วยฐานที่ยึดติดกับปลายแขน และมอเตอร์ทั้งสามชุดเชื่อมต่อกันไปยังปลายสุดที่มีหน้าที่ใช้ในการทำงานบนพิกัดสามมิติซึ่งมีองศาอิสระเป็นสาม หุ่นยนต์เดลต้าในวิทยานิพนธ์นี้ดัดแปลงจากหุ่นยนต์เดลต้าที่มีอยู่แล้วในห้องปฏิบัติการ [13] เพื่อลดเวลาในการออกแบบตั้งแต่เริ่มต้น แล้วเน้นไปที่การออกแบบชิ้นส่วนทางกล ระบบอิเล็กทรอนิกส์ และระบบควบคุมเพื่อให้ทำงานร่วมกับมนุษย์ได้ดีขึ้นโดยปรับเปลี่ยนโครงสร้างบางส่วน ในท้ายที่สุดได้รายละเอียดจำเพาะของหุ่นยนต์ดังนี้

4.2 การออกแบบโครงสร้างทางกล

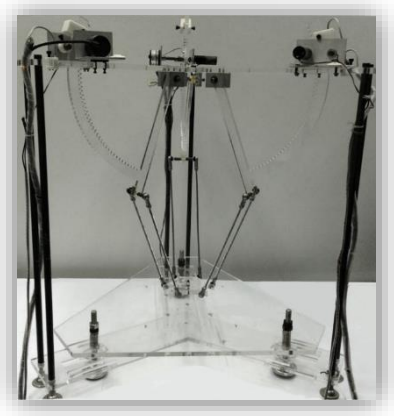
ดังที่กล่าวในคุณสมบัติของหุ่นยนต์เดลต้าซึ่งเป็นหุ่นยนต์โครงสร้างแบบขนานจะมีน้ำหนักเบากว่า เพราะสามารถรับภาระต่อน้ำหนักของหุ่นยนต์ได้มากกว่าหุ่นยนต์โครงสร้างแบบอนุกรม ดังนั้นจึงสามารถออกแบบหุ่นยนต์ให้โครงสร้างมีขนาดไม่ใหญ่จนเกินไป และใช้อะคลิลิกซึ่งเป็นวัสดุที่มีน้ำหนักเบาในการเป็นโครงสร้างหลักของหุ่นยนต์ และชิ้นส่วนแต่ละชิ้นจะต้องออกแบบให้เหมาะสมกับการวางตัวของระบบขับเคลื่อนและกลไกที่มีสามชุดซึ่งเป็นคุณลักษณะเฉพาะของหุ่นยนต์เดลต้า โดยมีส่วนประกอบสำคัญดังต่อไปนี้

1.ฐานหุ่นยนต์ (Base) มีขนาดความยาวด้าน 200 มิลลิเมตร ความหนา 12 มิลลิเมตร มวล 400 กรัม ด้านบนประกอบด้วยมอเตอร์ และอุปกรณ์วัดตำแหน่ง (Encoder) 3 ชุด ด้านล่างถูกยึดติดกับส่วนแขนบนของหุ่นยนต์ 3 ชิ้น

2.แขนบน (Upper link) มีขนาดความยาว 250 มิลลิเมตร ความหนา 10 มิลลิเมตร มวล 120 กรัม ทั้งสามชิ้นมีขนาดเท่ากัน ปลายด้านบนยึดกับฐานหุ่นยนต์ ปลายด้านล่างยึดกับส่วนแขนล่างของหุ่นยนต์

3.แขนล่าง (Lower link) มีขนาดความยาว 320 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร มวล 32 กรัม มีทั้งหมด 6 ชิ้น แบ่งเป็น 3 คู่ แต่ละคู่ขนานกัน ปลายแขนด้านล่างทุกชิ้นประกอบเข้ากับปลายแขนของหุ่นยนต์

4.ปลายแขนหุ่นยนต์ (End effector) มีขนาดความยาวด้าน 150 มิลลิเมตร ความหนา 12 มิลลิเมตร มวล 80 กรัม เป็นชิ้นส่วนที่มีหน้าที่ในการทำงานโดยตรงกับชิ้นงาน ในการควบคุมหุ่นยนต์ขณะทำงานจริงจะคำนึงถึงตำแหน่งและแรงที่กระทำเทียบกับชิ้นงานเป็นสำคัญ ดังนั้นปลายแขนหุ่นยนต์จึงถูกออกแบบให้มีความเหมาะสมในการทำงานร่วมกับมนุษย์ ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

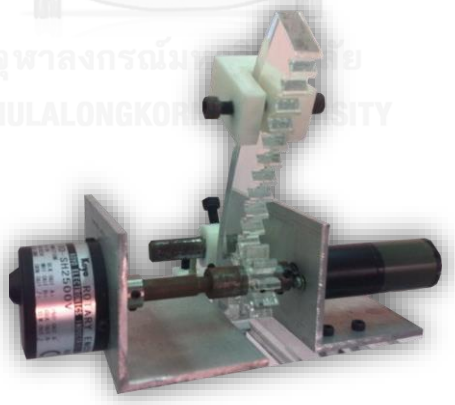


รูปที่ 4.1 โครงสร้างของหุ่นยนต์เดลต้า

4.3 ระบบขับเคลื่อนและวัดตำแหน่ง

ระบบขับเคลื่อนดังรูปที่ 4.2 ใช้สำหรับขับเคลื่อนแขนบนของหุ่นยนต์ทั้งสามชุด จึงจำเป็นต้องมีมอเตอร์ที่เหมือนกันทั้งสามชิ้น หุ่นยนต์เดลต้ามีโครงสร้างที่มีน้ำหนักเบาสามารถใช้ชุดขับที่มีขนาดเล็กได้ เนื่องจากไม่ต้องการกำลังมากในการขับเคลื่อน เหตุผลอีกประการคือการใช้ชุดขับที่มีขนาดเล็กทำให้เกิดแรงบิดน้อยสามารถทำให้โครงสร้างที่ปลายแขนมีความสามารถในการขับกลับ (Back drivability) ได้ ส่งผลที่ดีต่อความปลอดภัยของมนุษย์ตามมาตรฐานความปลอดภัย และลดความเสียหายต่อโครงสร้างของหุ่นยนต์หากเกิดความผิดพลาดขณะควบคุมหุ่นยนต์ ซึ่งจะมีประโยชน์ต่อการทำงานที่มีแรงกระทำระหว่างหุ่นยนต์และชิ้นงานโดยเฉพาะงานกำหนดตำแหน่งหมุด ดังนั้นสามารถหลีกเลี่ยงการใช้มอเตอร์ขนาดใหญ่ที่ให้กำลังมากเกินไป รวมทั้งการใช้มอเตอร์ขนาดเล็กจะประหยัดพลังงานในการขับเคลื่อน มอเตอร์ที่เลือก [13] เป็นแบบแม่เหล็กถาวร ไฟฟ้ากระแสตรง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 22 มิลลิเมตร ใช้แรงดัน 12 โวลต์ และให้กำลัง 6 วัตต์ ซึ่งทำให้สอดคล้องกับมาตรฐานความปลอดภัยในด้านการออกแบบและการใช้งานหุ่นยนต์ ISO10218-1

ระบบวัดตำแหน่งใช้สำหรับวัดตำแหน่งการหมุนของมอเตอร์ เพื่อคำนวณตำแหน่งปลายแขนหุ่นยนต์ จึงต้องการระบบวัดที่มีความแม่นยำเหมาะสมกับชนิดของชิ้นงาน ดังนั้นเลือกใช้อุปกรณ์วัดตำแหน่งที่มีความละเอียด 2500 พัลส์ต่อรอบ มีความละเอียดการวัดตำแหน่ง 0.5 มิลลิเมตร ซึ่งถือว่าเป็นมีความแม่นยำที่เหมาะสม



รูปที่ 4.2 ระบบขับเคลื่อนและวัดตำแหน่ง

4.4 การออกแบบหุ่นยนต์เดลต้าเพื่อทำงานกำหนดตำแหน่งหมุดร่วมกับมนุษย์ในเวลาจริง

4.4.1 ขั้นตอนการควบคุมหุ่นยนต์ทำงานกำหนดตำแหน่งหมุด

การควบคุมหุ่นยนต์ให้ทำงานกำหนดตำแหน่งหมุด ผู้ทดลองจะต้องบังคับปลายแขนของหุ่นยนต์เดลต้าที่ติดเครื่องมือกระทำกับชิ้นงาน ซึ่งมีรูปร่างเป็นแท่งทรงกระบอก ปลายทรงกรวย รวมทั้งมีตัวตรวจวัดแรงและกล้องติดอยู่ที่ปลายแขนด้วยเช่นกัน ผู้ควบคุมมีหน้าที่บังคับปลายแขนหุ่นยนต์ให้ปักแท่งทรงกระบอกลงไปในชิ้นงานที่มีรูปร่างเป็นหลุม 12 หลุมที่เป็นรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ภายในหลุมด้านล่างจะรองรับด้วยปุ่มกดที่มีเลข 0 ถึง 9 เครื่องหมายดอกจัน (*) และเครื่องหมายสี่เหลี่ยม (#) ตามตำแหน่งบนแป้นปุ่มกด โดยลำดับการทำงานจะแสดงให้เห็นบนหน้าจอแสดงผลซึ่งจะแสดงตัวเลขแบบสุ่ม ผู้ควบคุมจะต้องควบคุมหุ่นยนต์ให้ปักแท่งทรงกระบอกไปในหลุมตามตัวเลขที่ปรากฏขึ้นมาแบบสุ่ม จนกระทั่งปลายของแท่งทรงกระบอกกดไปยังปุ่มกด เมื่อปุ่มกดถูกกดตัวเลขถัดมาจะถูกสุ่มปรากฏที่หน้าจอ จากนั้นจึงทำซ้ำจนกว่าจะครบ 20 รอบ บันทึกเวลาทั้งหมดที่ใช้ในการเสร็จภารกิจ ผลการทดลองจะใช้ข้อมูลจากผู้ทดลอง 1 คน เพราะระบบมีความซับซ้อนต้องใช้เวลาในการฝึกการควบคุม และเพื่อหลีกเลี่ยงความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกับระบบ

การทดลองชุดแรกจะไม่ใช้ระบบภาพในการทดลองโดยมนุษย์ผู้ควบคุมจะมองชิ้นงาน และปลายแขนของหุ่นยนต์ที่มีแท่งทรงกระบอกด้วยมุมมองโดยตรงหรือผ่านทางสายตาโดยตรง และเปลี่ยนอุปกรณ์การควบคุมปลายแขนของหุ่นยนต์ ได้แก่ 1.ใช้มือมนุษย์จับปลายแขนของหุ่นยนต์โดยตรง 1.มนุษย์ใช้อุปกรณ์แฮปติกในการควบคุมหุ่นยนต์ 2.มนุษย์ใช้อุปกรณ์แฮปติกในการควบคุมหุ่นยนต์ที่มีการควบคุมแรงในแนวระนาบผ่านทางระบบควบคุม เพื่อทำการทดลองซ้ำจะได้ผลการทดลองเป็นข้อมูล 3 ชุด

จากนั้นทำการทดลองชุดที่สองซึ่งจะใช้ระบบภาพในการทดลอง โดยมนุษย์ผู้ควบคุมจะมองชิ้นงานและปลายแขนของหุ่นยนต์ที่มีแท่งทรงกระบอกผ่านทางจอภาพเท่านั้น และเปลี่ยนอุปกรณ์การควบคุมปลายแขนของหุ่นยนต์เช่นเดียวกัน จะได้ผลการทดลองรวมทั้งสิ้น 6 ชุด การทดลองชุดที่ 1 และ 2 จะใช้เครื่องมือกระทำกับชิ้นงานที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกรวย 5 มิลลิเมตร ต่อไปทำการทดลองซ้ำกับการทดลองชุดที่ 1 และ 2 ตามลำดับแต่เปลี่ยนเครื่องมือกระทำกับชิ้นงานให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกรวย 6 มิลลิเมตรเป็นการทดลองชุดที่ 3 และ 4 สุดท้ายจะได้ข้อมูลของผลการทดลองรวมทั้งสิ้น 12 ชุด นำผลการทดลองที่ได้นำมาวิเคราะห์รูปแบบในการควบคุมหุ่นยนต์ร่วมกับมนุษย์ในเวลาจริง สำหรับทำงานกำหนดตำแหน่งหมุด

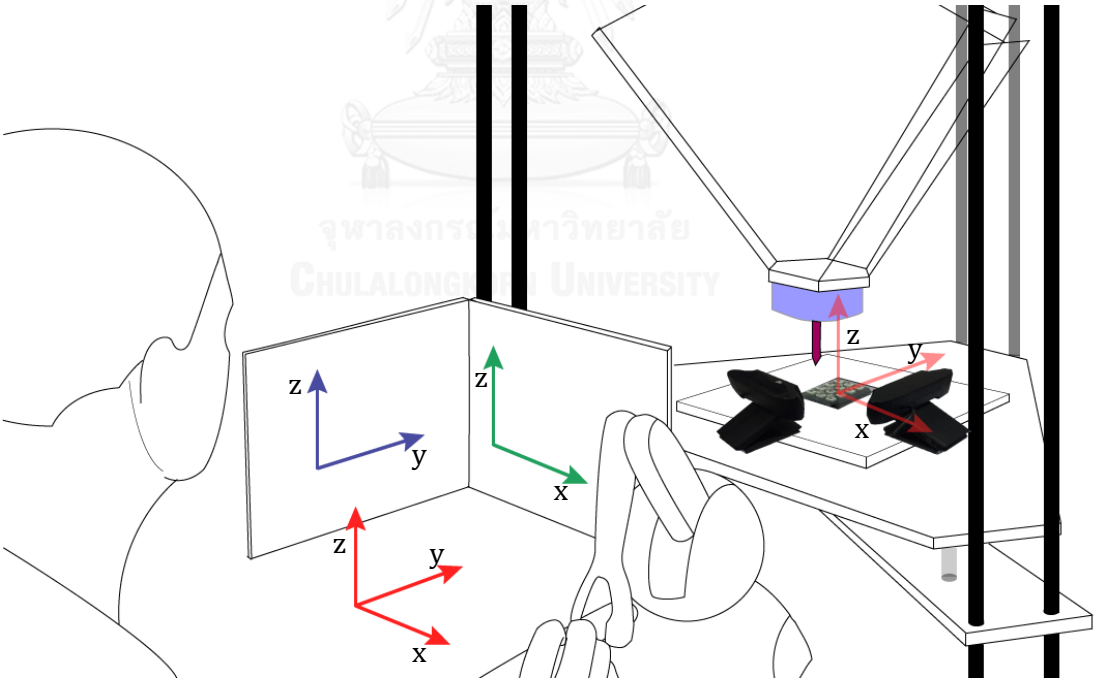
ดังนั้นการออกแบบโปรแกรมที่ใช้ในการควบคุมเงื่อนไขการทดลอง จึงต้องคำนึงถึงตัวแปร คือ ตำแหน่งของหลุมหรือปุ่มกดตามลำดับการทำงาน ซึ่งเป็นตัวเลขที่ปรากฏบนหน้าจอแบบสุ่ม วิธีการออกแบบใช้โปรแกรมแมทแลบ (MATLAB) รับภาพวิดีโอผ่านทางกล้องที่ปลายแขนหุ่นยนต์แล้ว

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

แสดงสภาพแวดล้อมของชิ้นงานและปลายแขนหุ่นยนต์ขึ้นบนหน้าจอแสดงผล ใช้โปรแกรมของไมโครคอนโทรลเลอร์ในการสุ่มตัวเลข รับค่าปุ่มกดและจับเวลาที่ใช้ในการทำภารกิจเพื่อเป็นเงื่อนไขในการทดลอง แล้วแสดงเงื่อนไขเหล่านั้นผ่านทางจอแสดงผล เพื่อให้ผู้ควบคุมหรือผู้ทดลองปฏิบัติตามเพื่อผ่านเงื่อนไขจนกว่าภารกิจจะเสร็จสิ้น ดังที่กล่าวมาทั้งหมด การทดสอบนี้จึงเป็นงานที่มีแรงกระทำบนชิ้นงาน และชิ้นงานอยู่ในสภาวะสภาพแวดล้อมไม่คงที่

4.4.2 ส่วนประกอบของหุ่นยนต์สำหรับการทำงานกำหนดตำแหน่งหมุด

การควบคุมหุ่นยนต์เดลต้าเพื่อให้ทำงานร่วมกับมนุษย์ในเวลาจริง จำเป็นต้องมีการออกแบบองค์ประกอบที่ทำหน้าที่ช่วยเหลือการทำงานร่วมกับมนุษย์ ซึ่งขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย การออกแบบคำนึงถึงปัจจัยที่เกี่ยวกับมนุษย์ เช่น ส่วนต่อประสานที่คำนึงถึงความสามารถในการรับรู้ของมนุษย์ในด้านการมองเห็นและด้านการควบคุม การเคลื่อนไหว การตอบสนอง และความปลอดภัยของมนุษย์ ปัจจัยที่มีผลต่อความเสียหายของหุ่นยนต์ รวมทั้งปัจจัยที่เกี่ยวกับรูปแบบการทดลองหรือการใช้งานจริง หรือแม้แต่ความสะดวกในการใช้งาน จึงออกแบบองค์ประกอบทั้งหมด และได้ระบบหุ่นยนต์เดลต้าแบบสามองศาอิสระสำหรับทำงานกำหนดตำแหน่งหมุดร่วมกับมนุษย์ในเวลาจริงซึ่งมีภาพรวมของระบบดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ภาพรวมของระบบหุ่นยนต์เดลต้าแบบสามองศาอิสระสำหรับทำงานกำหนดตำแหน่งหมุดร่วมกับมนุษย์ในเวลาจริง

4.4.2.1 ปลายแขนหุ่นยนต์ (End effector)

เป็นชิ้นส่วนที่มีหน้าที่ในการทำงานโดยตรงกับชิ้นงาน ในการควบคุมหุ่นยนต์ขณะทำงานจริงจะคำนึงถึงตำแหน่งและแรงที่กระทำเทียบกับชิ้นงานเป็นสำคัญ ดังนั้นปลายแขนหุ่นยนต์จึงถูกออกแบบให้มีความเหมาะสมในการทำงานร่วมกับมนุษย์ การทดลองเพื่อประเมินสมรรถนะการทำงานร่วมกันระหว่างหุ่นยนต์เดลต้ากับมนุษย์ จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์เสริมหลายชนิดเพื่อทำหน้าที่ต่างๆ เช่น ตัวตรวจวัดแรง (Force sensor) เพื่อทำหน้าที่ตรวจวัดแรงและโมเมนต์ที่เกิดขึ้นบนปลายแขนหุ่นยนต์ เครื่องมือที่กระทำกับชิ้นงานโดยตรง ซึ่งในการทำงานกำหนดตำแหน่งหมุดเครื่องมือจะมีลักษณะทรงกระบอก (Cylinder tool) และกล้องวิดีโอขนาดเล็ก (Webcam) เป็นต้น อุปกรณ์เสริมเหล่านี้จะถูกติดตั้งบนปลายแขนของหุ่นยนต์ ดังนั้นจึงต้องออกแบบปลายแขนของหุ่นยนต์ให้มีความยืดหยุ่นในการใช้งาน สามารถติดตั้งอุปกรณ์ได้หลากหลาย รวมทั้งสามารถปรับเปลี่ยนและติดตั้งอุปกรณ์ได้สะดวกง่ายดายดังรูปที่ 4.4 ปลายแขนชิ้นบนจะถูกออกแบบให้ยึดติดตัวตรวจวัดแรงด้านบน และปลายแขนชิ้นล่างจะยึดกับตัวตรวจวัดแรงด้านล่างเพื่อใช้สำหรับติดตั้งอุปกรณ์ชิ้นอื่น จึงต้องมีรูปร่างดังรูปที่ 4.5

รูปที่ 4.4 ปลายแขนหุ่นยนต์ส่วนบน

รูปที่ 4.5 ปลายแขนหุ่นยนต์ส่วนล่าง

4.4.2.2 ตัวตรวจวัดแรง (Force sensor)

ตัวตรวจวัดแรงดังรูปที่ 4.6 เป็นอุปกรณ์ที่มีหน้าที่ตรวจวัดแรงและโมเมนต์ที่เกิดขึ้นบนปลายแขนหุ่นยนต์ขณะปลายแขนกระทำลงบนชิ้นงานดังรูป 4.8 การวัดแรงที่เกิดขึ้นภายในหุ่นยนต์และชิ้นงานเพื่อตรวจวัดแรงแล้วควบคุมตำแหน่งปลายแขนของหุ่นยนต์ให้เคลื่อนที่ตามต้องการ ตัวตรวจวัดแรงสามารถวัดขนาดแรงได้ในสามแกนและโมเมนต์อีกสามแกน แต่การทำงานกำหนดตำแหน่งหมุดในวิทยานิพนธ์นี้จะควบคุมเฉพาะแรงในแนวแกนระนาบ x-y โดยใช้ตัวควบคุมแบบอินทิกรัล เมื่อเคลื่อนที่ปลายแท่งทรงกระบอกไปชนแผ่นชิ้นงานที่เจาะรู ตัวตรวจวัดแรงจะวัดแรงในแนวแกน x และ y ส่งสัญญาณไปยังตัวควบคุมส่วนควบคุมแรงที่มีหน้าที่ในทำการหักล้างให้แรงในแนวแกนทั้งสองมีค่าเป็นศูนย์ เพราะแรงอ้างอิงที่ต้องการกำหนดให้มีค่าเป็นศูนย์คือควบคุมไม่ให้เกิดแรงสัมผัสระหว่างปลายแขนหุ่นยนต์กับชิ้นงานในแนวระนาบ ซึ่งหมายความว่าปลายแท่งทรงกระบอกจะต้องไม่สัมผัสหรือไม่มีแรงกระทำกับชิ้นงานในแนวแกน x และ y เท่ากับว่าจะต้องมีตำแหน่งอยู่ในหลุม การหักล้างแรงเหล่านั้นจะใช้วิธีการสั่งให้ปลายแขนหุ่นยนต์เคลื่อนที่ออกจากชิ้นงานหรือควบคุมแรงโดยอ้อมผ่านทางการควบคุมตำแหน่ง โดยเคลื่อนที่ออกไปตามทิศทางเดียวกับแรงที่ชิ้นงานกระทำต่อปลายหมุดทรงกระบอก และเคลื่อนที่จนกว่าแรงในแนวแกน x และ y จะเป็นศูนย์ ซึ่งเป็นการควบคุมแรงในการเคลื่อนที่หุ่นยนต์ โดยสมมติฐานของวิทยานิพนธ์นี้คือการออกแบบให้หุ่นยนต์มีตัวตรวจวัดแรงและตัวควบคุมแรงสำหรับงานกำหนดตำแหน่งหมุดร่วมกับมนุษย์ในเวลาจริงจะช่วยเหลือให้ทำงานปักหมุด และทำให้หุ่นยนต์มีสมรรถนะการทำงานที่ดีขึ้น

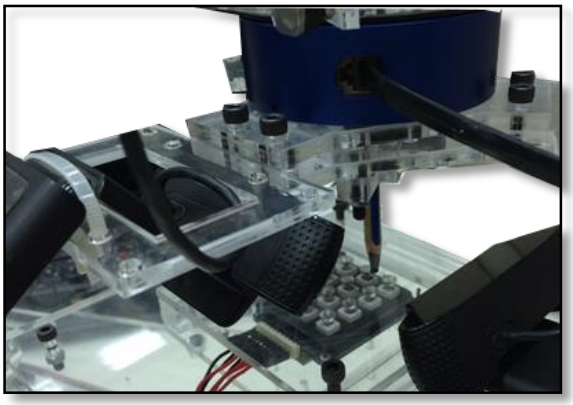
รูปที่ 4.6 ตัวตรวจวัดแรง

4.4.2.3 เครื่องมือที่กระทำกับชิ้นงาน (Tool)

เครื่องมือที่กระทำกับชิ้นงานดังรูปที่ 4.7 เป็นอุปกรณ์ที่มีหน้าที่กระทำลงบนชิ้นงานตามรูปแบบของงาน เครื่องมือที่ใช้โดยทั่วไป ตัวอย่างเช่น ดอกสว่าน ใบมีด (Cutting tool) หัวพิมพ์พลาสติก (Extruder) อุปกรณ์จับชิ้นงาน (Gripper or Air chuck) อุปกรณ์ทรงกระบอกหรือที่จับ

ปากกา (Cylinder tool) เป็นต้น ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ในการกำหนดตำแหน่งหมุดต้องมีรูปร่างเป็นหมุดทรงกระบอก หรืออุปกรณ์ทรงกระบอก (Cylinder tool) มีสองส่วน ได้แก่ ที่จับยึดด้ามทรงกระบอกและวัตถุทรงกระบอก โดยที่จับยึดด้ามทรงกระบอกจะออกแบบให้ติดตั้งกับปลายแขนของหุ่นยนต์ ดังรูปที่ 4.8 และสามารถยึดวัตถุทรงกระบอกได้ด้วยการสวมเข้าไปที่ตรงกลางแล้วขันเกลียวด้านข้าง จึงปรับเปลี่ยนขนาดของวัตถุทรงกระบอกได้หลายขนาด และวัตถุทรงกระบอกที่ใช้ในการทดลองจะมีลักษณะเป็นแท่งทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 8 มิลลิเมตร ที่ปลายมีรูปร่างทรงกรวยสองขนาด ได้แก่ เส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร และ 6 มิลลิเมตร เนื่องจากการทดลองจะทำการปักไปยังรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร สมมติฐานว่าปลายที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตรที่เล็กกว่าขนาดรูจะปักลงไปในหลุมง่ายกว่าปลายที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตรที่พอดีขนาดรู และต้องการให้เกิดแรงเฉือนและแรงในแนวระนาบ x-y ขณะทำการปักแท่งไปยังหลุมเพื่อช่วยบังคับทิศทางในการปักแท่งลงหลุมได้ง่ายขึ้น และสามารถวัดขนาดแรงในแนวระนาบได้เพื่อนำไปควบคุมการเคลื่อนที่ให้แท่งลงหลุมได้ดีขึ้นเมื่อใช้ระบบควบคุมช่วยเหลือ จึงต้องออกแบบให้เป็นรูปร่างทรงกรวยที่ปลายทรงกระบอก ดังนั้นจึงเลือกใช้ดินสอไม้เพราะสามารถเหลาให้ได้รูปร่างตามต้องการได้

รูปที่ 4.7 เครื่องมือที่กระทำกับชิ้นงาน



รูปที่ 4.8 ปลายแขนหุ่นยนต์ที่ติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆขณะทำงานกำหนดตำแหน่งหมุด

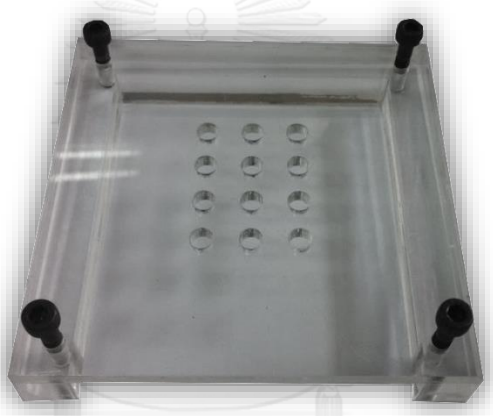
4.4.3 ส่วนพื้นที่สำหรับการทำงานกำหนดตำแหน่งหมุด

4.4.3.1 ชิ้นงาน

ชิ้นงาน คือส่วนของงานที่ถูกปลายแขนของหุ่นยนต์ออกแรงกระทำ ชิ้นงานจะอยู่ในสภาวะแวดล้อมที่ไม่คงที่ มีองค์ประกอบและรายละเอียดดังนี้

4.4.3.1.1 แผ่นเจาะรู (Hole mask)

แผ่นเจาะรู ดังรูปที่ 4.9 ที่แต่ละรูมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร จำนวน 12 รู เป็นแผ่นอะคริลิกรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีความหนา 5 มิลลิเมตร ทำหน้าที่เป็นหลุมซึ่งเป็นสิ่งกีดขวางหรือเงื่อนไขของตำแหน่งการเคลื่อนที่แบบปักหมุดของแท่งทรงกระบอกที่ปลายแขนหุ่นยนต์ ด้านล่างจะมีแป้นปุ่มกด (Keypad) อยู่ที่ฐาน ติดตั้งที่ตำแหน่งกึ่งกลางฐานพื้นที่ทำงานดังรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.9 ชิ้นงานส่วนที่เป็นแผ่นเจาะรู

Chulalongkorn University

4.4.3.1.2 แป้มปุ่มกด (Keypad)

แป้นปุ่มกด ดังรูปที่ 4.10 มีปุ่มกด 12 ปุ่มอยู่ตรงตำแหน่งหลุมแต่ละหลุมของแผ่นเจาะรูด้านบนพอดี เป็นองค์ประกอบสำคัญในการออกแบบเพื่อให้หุ่นยนต์ทำงานร่วมกับมนุษย์ เนื่องจากขณะผู้ทดลองควบคุมหุ่นยนต์ให้แท่งกระบอกเคลื่อนที่ปักลงหลุมแต่ละหลุม ผู้ทดลองไม่สามารถทราบได้ว่าแท่งกระบอกได้ปักลงไปสำเร็จ ลงไปลึกพอตามที่ต้องการ หรือปักลงหลุมที่ถูกต้องหรือไม่ จึงจำเป็นที่จะต้องออกแบบให้มีตัวตรวจจับการปักลงหลุม ซึ่งก็คือแป้นปุ่มกดที่เชื่อมต่อกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ (Micro controller)

ดังนั้นการใช้แป้นปุ่มกดทำให้ไม่จำเป็นต้องใช้การควบคุมแรงในแนวแกนดิ่ง หรือแกน z เพราะสามารถรับรู้ได้ทันทีว่าปักหมุดสำเร็จผ่านทางหน้าจอแสดงผลในส่วนของไมโครคอนโทรลเลอร์ที่แจ้งเตือนว่าหมุดได้กดไปยังปุ่มกด หรือลงหลุมสำเร็จเรียบร้อยแล้ว

รูปที่ 4.10 แป้นปุ่มกด

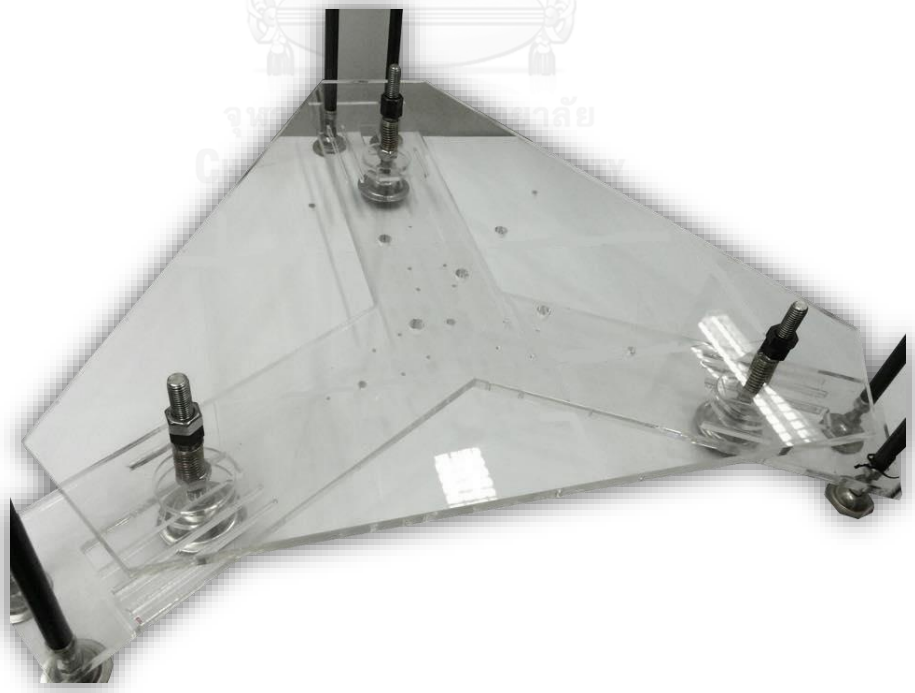
4.4.3.1.3 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ (Micro controller)

บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ ดังรูป 4.11 รุ่น Arduino MEGA2560 ทำหน้าที่ในการสุ่มตัวเลขที่เป็นเป้าหมายในการเคลื่อนที่ ส่งค่าไปแสดงผลยังหน้าจอแสดงผลเพื่อให้ผู้ทดลองได้ทราบตัวเลขเป้าหมาย และทำหน้าที่รับค่าปุ่มที่ถูกกดจากแป้นปุ่มกดว่าถูกต้องตรงตามตัวเลขเป้าหมายหรือไม่ ถ้าไม่จะไม่สุ่มเลขถัดไป รวมทั้งทำหน้าที่จับเวลาที่ใช้ในการทำภารกิจ สรุปแล้วจึงเป็นส่วนที่ถูกเขียนโปรแกรม และใช้ประมวลผลในการทำงานกำหนดตำแหน่งหมุดเพื่อให้มนุษย์สามารถทำงานร่วมกับหุ่นยนต์ได้ดีขึ้น ติดตั้งที่ขอบของฐานพื้นที่ทำงานดังรูปที่ 4.13

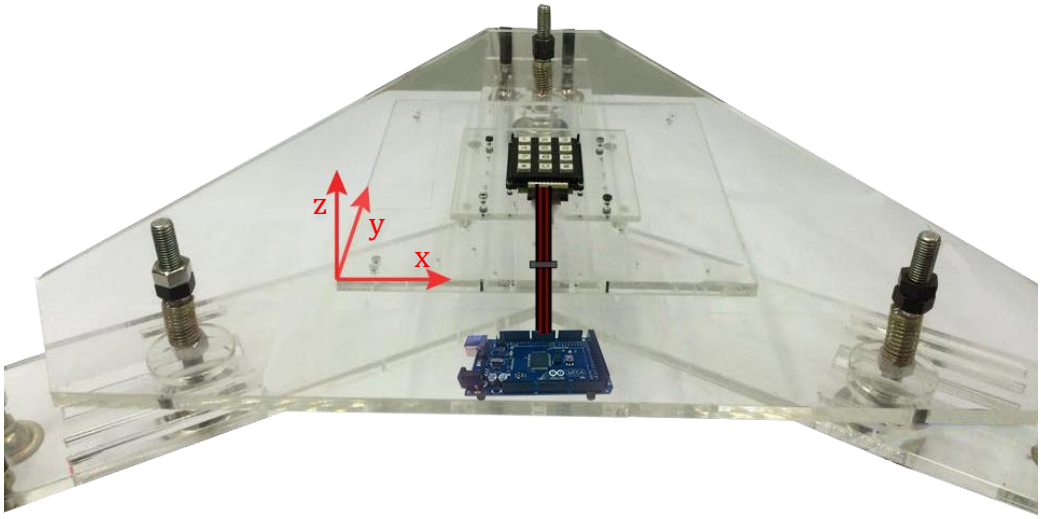
รูปที่ 4.11 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์

4.4.3.2 ฐานพื้นที่ทำงาน

ฐานพื้นที่ทำงาน ประกอบด้วยสองส่วนดังรูป 4.12 ส่วนล่างทำหน้ายึดโครงสร้างเสาทั้งสามชุดของหุ่นยนต์ให้อยู่กับที่ และส่วนบนวางบนส่วนล่วงโดยมีสปริงสามชุดรับน้ำหนัก ฐานพื้นที่ทำงานส่วนบนจะทำหน้าที่วางและจับยึดชิ้นงาน จึงออกแบบให้มีความยืดหยุ่นในการใช้งาน สามารถติดตั้งแผ่นทดสอบหรือจับยึดชิ้นงานได้หลายรูปแบบ ในงานกำหนดตำแหน่งหมุดมีการติดตั้งชิ้นงานบนกึ่งกลางฐานพื้นที่ทำงานดังรูป 4.13 การออกแบบเพื่อให้หุ่นยนต์ทำงานกำหนดตำแหน่งหมุดร่วมกับมนุษย์คือ การติดสปริงไว้เพื่อลดการดูดซับพลังงานโดยรวมของระบบ เพราะชิ้นส่วนทางกลที่มีความยืดหยุ่นจะเก็บสะสมพลังงานทางกลไว้ ทำให้หลีกเลี่ยงแรงสัมผัสที่มากเกินไปจนอาจทำให้โครงสร้างของหุ่นยนต์หรือชิ้นงานเกิดความเสียหาย เพื่อวัตถุประสงค์เช่นเดียวกับความสามารถในการขับกลับของปลายแขนหุ่นยนต์ ซึ่งเป็นการใช้หลักการของอุปกรณ์คอมไพลอันท์แบบพาสซีฟ ทำให้ส่งผลที่ดีต่อความปลอดภัยของมนุษย์ และลดความเสียหายต่อโครงสร้างของหุ่นยนต์หากเกิดความผิดพลาดขณะควบคุมหุ่นยนต์ อุปกรณ์คอมไพลอันท์แบบพาสซีฟมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการควบคุมหุ่นยนต์ที่มีแรงสัมผัสกับสิ่งแวดล้อมหรือชิ้นงาน โดยเฉพาะในการทำงานปักหมุดซึ่งจะทำให้สามารถควบคุมหุ่นยนต์ทำงานกำหนดตำแหน่งหมุดได้ง่ายขึ้น ใช้เวลาในการทำภารกิจน้อยลง และมีสมรรถนะการทำงานที่ดีขึ้น



รูปที่ 4.12 ฐานพื้นที่ทำงาน



รูปที่ 4.13 ชิ้นงานบนฐานพื้นที่ทำงาน

4.4.4 ส่วนต่อประสานระหว่างมนุษย์และหุ่นยนต์สำหรับการทำงานกำหนดตำแหน่งหมุดในเวลาจริง

ส่วนต่อประสานระหว่างมนุษย์และหุ่นยนต์มีหน้าที่เชื่อมต่อสื่อสาร หรือรับส่งข้อมูลระหว่างสภาพแวดล้อมพื้นที่ที่หุ่นยนต์ทำงานและสภาพแวดล้อมพื้นที่ที่มนุษย์ควบคุม ส่วนต่อประสานจะทำให้มนุษย์สามารถรับรู้สภาพแวดล้อมของชิ้นงานได้ เพื่อตอบสนองหรือควบคุมหุ่นยนต์ให้เกิดปฏิกิริยาทางกายภาพกับชิ้นงาน

4.4.4.1 ระบบภาพ (Visual system)

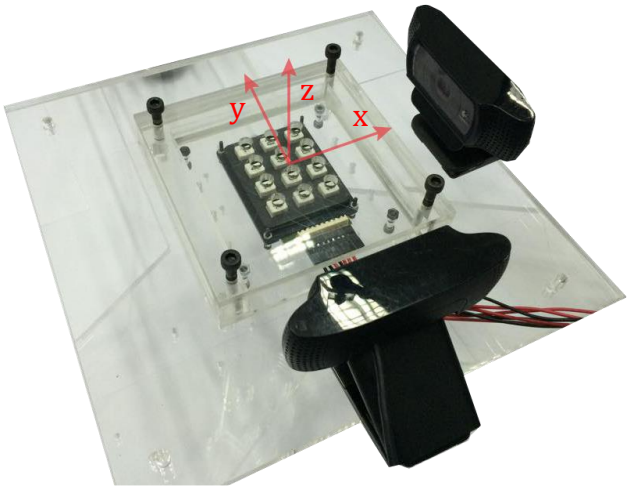
ระบบภาพ คือระบบที่สำคัญมากในการควบคุมหุ่นยนต์เพื่อทำงานร่วมกับมนุษย์ในเวลาจริง เพราะเป็นส่วนที่รับข้อมูลของสภาพแวดล้อมของชิ้นงานเพื่อใช้ในการควบคุมหุ่นยนต์ ประกอบด้วยสองส่วนหลัก ได้แก่ กล้องดิจิตอล และจอภาพแสดงผล

4.4.4.1.1 กล้องดิจิตอล

กล้องดิจิตอลทำหน้าที่ถ่ายภาพวิดีโอบริเวณปลายแขนของหุ่นยนต์กับชิ้นงาน เพื่อส่งสัญญาณไปยังจอภาพแสดงผลต่อไป โดยเชื่อมต่อผ่านยูเอสบี (USB) กับเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ทำหน้าที่เป็นเครื่องโฮส (Host PC) กล้องที่ใช้เป็นกล้องวิดีโอขนาดเล็ก (Webcam camera) เนื่องจากต้องติดตั้งบนปลายแขนของหุ่นยนต์จึงควรมีขนาดไม่ใหญ่มากนักซึ่งจะเป็นภาระกีดขวางขณะหุ่นยนต์เคลื่อนที่ และถ้ามีน้ำหนักมากเกินไปก็จะเป็นภาระการรับน้ำหนักของหุ่นยนต์ การทดลองนี้จะใช้กล้อง 2 ตัว เพราะต้องการมุมมองภาพที่เป็นตำแหน่งของปลายแท่งทรงกระบอก และหลุมที่ต้องการทั้งในทิศทางแนวแกนระนาบ x y และทิศทางในแนวดิ่ง z การใช้กล้องเพียงตัวเดียว ทำให้ผู้ทดลองไม่สามารถรู้ตำแหน่งในสามมิติของปลายแขนหุ่นยนต์ที่มีแท่งทรงกระบอกได้ ทำให้ไม่สามารถทำงานปักแท่งทรงกระบอกลงหลุมที่ต้องการ การติดตั้งกล้องตัวแรกสามารถติดตั้งที่ปลายแขนหุ่นยนต์ เพื่อให้

ได้มุมมองภาพของตำแหน่งแท่งทรงกระบอกและหลุมในทิศทางแนวแกน x และ z กล้องจะอยู่ด้านล่างในทิศลบ y ของชิ้นงานหากมองจากมุมสูง การติดตั้งกล้องตัวที่สองไม่สามารถติดตั้งบนปลายแขนได้เนื่องจากมีโครงสร้างแขนล่างของหุ่นยนต์ที่กีดขวางอยู่ รวมทั้งจะเป็นการเพิ่มภาระน้ำหนักให้กับปลายแขนของหุ่นยนต์จนเกินไป จึงติดตั้งกล้องใกล้กับชิ้นงานโดยกล้องจะอยู่ด้านขวาในทิศบวก x หน้ากล้องหันไปยังชิ้นงานที่เป็นหลุมสำหรับถ่ายภาพหลุมและปลายแท่งทรงกระบอกในแนวแกน y และ z กล้องตัวแรกนั้นก็สามารถติดตั้งใกล้ชิ้นงานได้เช่นกันแทนที่จะติดตั้งบนปลายแขนของหุ่นยนต์ ดังรูปที่ 4.14 กล้องตัวแรกจะติดตั้งที่ตำแหน่งที่มีระยะห่างจากจุดกึ่งกลางชิ้นงานไปถึงหน้ากล้องไปทางทิศลบ y ประมาณ 10 เซนติเมตร และกล้องตัวที่สองจะติดตั้งที่ตำแหน่งที่มีระยะห่างจากจุดกึ่งกลางชิ้นงานไปถึงหน้ากล้อง ไปทางทิศบวก x ประมาณ 10 เซนติเมตร การใช้กล้องในระบบถึง 2 ตัวเป็นการเพิ่มเวลาหน่วงให้กับระบบเป็นอย่างมากจึงจำเป็นต้องออกแบบโปรแกรมให้มีการตอบสนองที่อยู่ในขอบเขตที่รับได้ โดยพิจารณาจากผลของเวลาหน่วงที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสมรรถนะการทำงาน หรือการตอบสนองของผู้ทดลอง [12] จึงมีการเชื่อมต่อกล้องทั้งสองกับคอมพิวเตอร์ 2 เครื่องแยกกัน เพราะระบบคำนึงถึงเวลาหน่วง หรือการตอบสนองเป็นสำคัญ การประมวลผลแยกกันจึงเป็นทางเลือกที่ง่ายที่สุด โดยไม่ได้คำนึงในด้านการใช้อุปกรณ์ให้น้อยที่สุด การทดลองซึ่งมีความซับซ้อนมากทำให้ต้องออกแบบระบบกล้องเพื่อให้มนุษย์ทำงานร่วมกับหุ่นยนต์ได้ง่าย ในกรณีนี้คือเน้นประเด็นสำคัญในเรื่องความรู้สึกของมนุษย์ต่อสภาพปัจจุบัน ประการแรกคือช่วยเหลือให้มนุษย์เห็นมุมมองชิ้นงานที่เป็นสภาพแวดล้อมอย่างครบถ้วน และสามารถแปลความหมายทางกายภาพได้ทันทีผ่านระบบหน้าจอแสดงผล ประการถัดมาคือการคำนึงถึงเวลาหน่วงของระบบหรือการตอบสนองของระบบ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 4.14 การวางตำแหน่งของระบบกล้องดิจิตอล

4.4.4.1.2 หน้าจอแสดงผล

หน้าจอแสดงผล ทำหน้าที่รับภาพจากกล้องแล้วแสดงวิดีโอบนจอภาพเพื่อให้มนุษย์ผู้ควบคุมมองเห็นสภาพแวดล้อม และตำแหน่งของปลายแขนหุ่นยนต์กับชิ้นงานขณะทำงาน มนุษย์ต้องตอบสนองต่อภาพที่เห็นอย่างรวดเร็วและทันที โดยมนุษย์ควบคุมหุ่นยนต์ผ่านอุปกรณ์ควบคุมให้ทำงานตามที่ต้องการด้วยการรับรู้ผ่านทางจอภาพ ดังนั้นการวางจอภาพในพื้นที่ที่มนุษย์ควบคุมหุ่นยนต์ และจำนวนจอภาพที่ต้องการใช้งานขึ้นอยู่กับรูปแบบของงานที่ทำเช่นเดียวกับกล้อง จากการใช้กล้องในระบบภาพสองตัว และใช้คอมพิวเตอร์ในการประมวลผลแยกกันสองเครื่อง จึงใช้หน้าจอแสดงผลสองหน้าจอ เหตุผลที่สำคัญในการใช้หน้าจอแสดงผลสองหน้าจอคือ การทำให้ผู้ทดลองที่เฝ้ามองชิ้นงานและปลายแขนหุ่นยนต์ สามารถแปลความหมายทางกายภาพของรูปภาพได้ทันทีผ่านตำแหน่งการวางหน้าจอ ซึ่งเป็นการจำลองสภาพแวดล้อมพื้นที่ที่มนุษย์ควบคุมให้ใกล้เคียงกับสภาพแวดล้อมของชิ้นงาน โดยคำนึงถึงความรู้สึกของมนุษย์ต่อสภาพปัจจุบันเป็นสำคัญ โดยหน้าจอแรกจะวางอยู่ด้านหน้าผู้ควบคุมแล้วแสดงภาพจากกล้องตัวที่ 1 ซึ่งภาพจะอยู่แนวแกนนอน x และแนวตั้ง z หน้าจอที่สองจะวางอยู่ด้านข้างผู้ทำการทดลองทางด้านซ้ายมือ จะแสดงภาพจากกล้องตัวที่ 2 ซึ่งภาพจะอยู่แนวแกนนอน y และแนวตั้ง z การวางตำแหน่งจอภาพ ดังรูป 4.15 จึงมีความสำคัญอย่างยิ่งเพราะทำให้ภาพการเคลื่อนที่ซึ่งแสดงบนหน้าจอแสดงผล มีทิศทางเสมือนจริง ส่งผลให้ผู้ทดลองสามารถแปลความหมายได้ทันทีไม่สับสนทิศทาง ขณะควบคุมปลายแท่งทรงกระบอกปักไปยังหลุมที่ต้องการ รวมทั้งทำให้ประสิทธิภาพการทำงานหรือสมรรถนะการทำงานดีขึ้นด้วย จึงเป็นการส่วนสำคัญเพื่อให้มนุษย์ทำงานกำหนดตำแหน่งหมุดร่วมกับหุ่นยนต์ในเวลาจริง

รูปที่ 4.15 การวางตำแหน่งระบบหน้าจอแสดงผล

4.4.4.2 อุปกรณ์ควบคุม

อุปกรณ์ควบคุมที่มนุษย์ผู้ควบคุมใช้ในระบบควบคุมหุ่นยนต์ สำหรับทำงานกำหนดตำแหน่งหมุดร่วมกับมนุษย์ในเวลาจริง คือ อุปกรณ์แฮปติก (Haptic device) หรืออุปกรณ์ควบคุมแฟนธ่อม ออมนิ แฮปติก (Phantom Omni Haptic Device) [53] ดังรูปที่ 4.16 เป็นส่วนต่อประสานที่ทำหน้าที่ส่งข้อมูลการเคลื่อนไหวของมือมนุษย์ไปยังหุ่นยนต์ เพื่อใช้ในการควบคุมหุ่นยนต์ให้ได้ตำแหน่งตามที่ต้องการ

การออกแบบระบบควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์ร่วมกับมนุษย์ในเวลาจริง อุปกรณ์ส่วนต่อประสาน (Human-machine interface device) มีความสำคัญมาก เพราะเป็นอุปกรณ์ที่เชื่อมต่อระหว่างมนุษย์และหุ่นยนต์ ซึ่งมนุษย์สัมผัสหรือมีปฏิสัมพันธ์โดยตรง มีหน้าที่ทำให้การเคลื่อนไหวของร่างกายมนุษย์สอดคล้องกับการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ตามที่ต้องการ ความรู้สึกของมนุษย์ต่อสภาพปัจจุบันในด้านกายภาพจะต้องลื่นไหล สามารถรับรู้การเคลื่อนไหวของหุ่นยนต์และตอบสนองร่างกายตนเองได้อย่างง่ายดายที่สุด เพราะการที่มนุษย์สามารถควบคุมปลายแขนของหุ่นยนต์ได้ใกล้เคียงเปรียบเสมือนมือของตนเองได้ดีขึ้น จะทำให้สมรรถนะการทำงานในการควบคุมหุ่นยนต์ดีขึ้นตามไปด้วย

ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงออกแบบระบบให้มีอุปกรณ์ควบคุมที่เป็นส่วนต่อประสาน สำหรับเคลื่อนที่ปลายแขนหุ่นยนต์สามองศาอิสระได้ในเวลาจริงเพื่อนำมาใช้ในการทำงานกำหนดตำแหน่งหมุด โดยใช้อุปกรณ์แฮปติกซึ่งถูกออกแบบให้เหมาะสมกับการใช้งานในการควบคุมหุ่นยนต์ และใช้สำหรับในโปรแกรมออกแบบผ่านคอมพิวเตอร์ เป็นอุปกรณ์ควบคุมที่มีจำนวน 6 องศาอิสระ และมีฟังก์ชันแรงป้อนกลับ (Force feedback) เพื่อตอบสนองการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์โดยสามารถปรับให้มีแรงกระทำที่มือขณะควบคุมหุ่นยนต์

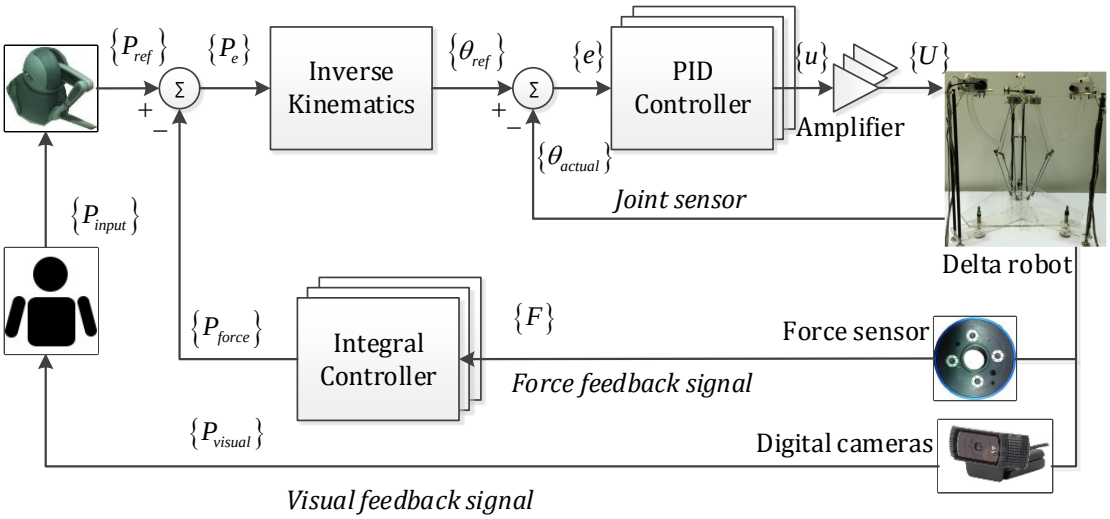
อุปกรณ์แฮปติกเป็นอุปกรณ์ที่สามารถควบคุมได้อิสระหลายทิศทางในเวลาเดียวกัน ในการทำงานกำหนดตำแหน่งหมุดในงานวิจัยนี้จะเป็นการควบคุมหุ่นยนต์เพียงสามอิสระ อุปกรณ์แฮปติกที่มีจำนวนองศาอิสระเท่ากับ 6 ซึ่งมากกว่า จึงสามารถนำมาควบคุมหุ่นยนต์ให้ทำงานที่มีสามองศาอิสระได้

รูปที่ 4.16 อุปกรณ์ควบคุมแฮปติก

4.5 การควบคุมหุ่นยนต์เดลต้าสำหรับทำงานกำหนดตำแหน่งหมุดร่วมกับมนุษย์ในเวลาจริง

เมื่อทำการออกแบบระบบหุ่นยนต์เดลต้าแบบสามองศาอิสระสำหรับทำงานกำหนดตำแหน่งหมุดร่วมกับมนุษย์ในเวลาจริงเสร็จสิ้น ทำให้ทราบรายละเอียดขององค์ประกอบต่างๆที่จำเป็นในระบบ และขั้นตอนการทำงานของหุ่นยนต์ร่วมกับมนุษย์สำหรับงานกำหนดตำแหน่งหมุด จึงออกแบบระบบควบคุมหุ่นยนต์สำหรับทำงานกำหนดตำแหน่งหมุดร่วมกับมนุษย์ในเวลาจริง ดังรูปที่ 4.17 ที่ประกอบด้วยตัวควบคุม และระบบส่งสัญญาณเพื่อเชื่อมต่อสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ต่างๆในระบบ

ระบบควบคุมดังกล่าวแตกต่างจากระบบควบคุมหุ่นยนต์โดยทั่วไป เนื่องจากมีมนุษย์เข้ามาเกี่ยวข้องโดยตรงจึงจำเป็นต้องมีมนุษย์หรือผู้ทดลอง (Operator) อยู่ในระบบ มนุษย์จะป้อนสัญญาณที่เป็นตำแหน่งในสามมิติ P_{input} ไปที่อุปกรณ์ควบคุม (Human machine interface device) นั่นคืออุปกรณ์แฮปติก (Haptic device) ซึ่งเป็นตำแหน่งของมือมนุษย์เทียบกับอุปกรณ์ควบคุม เพื่อให้อุปกรณ์ควบคุมส่งต่อสัญญาณตำแหน่งเทียบกับแกนอ้างอิง P_{ref} ที่กำหนดไปที่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จลศาสตร์ผกผัน แปลงค่าตำแหน่งของปลายแขนหุ่นยนต์ที่ต้องการในสามมิติเป็นตำแหน่งมุมองศาของแขนหุ่นยนต์ที่ต้องการ θ_{ref} ค่าที่ได้จะผ่านตัวควบคุมแบบพีไอดีเพื่อควบคุมสัญญาณให้ได้การตอบสนองของสัญญาณตามต้องการ คำนวณค่าแรงบิดแล้วขยายสัญญาณที่ตัวขยายสัญญาณออกมาเป็นแรงดันไฟฟ้า U เพื่อไปใช้ในการขับมอเตอร์ ปลายแขนหุ่นยนต์จะเคลื่อนที่ไปตำแหน่งที่ต้องการได้นั้น จะต้องชดเชยตำแหน่งองศาจากสัญญาญป้อนกลับจากระบบวัดตำแหน่งที่ได้ค่าตำแหน่งองศาจริง θ_{actual} เพื่อคำนวณค่าความคลาดเคลื่อน e และการทดลองปักแท่งทรงกระบอกลงหลุม เมื่อแท่งทรงกระบอกสัมผัสที่ชิ้นงาน ตัวตรวจวัดแรงจะส่งสัญญาณแรงที่วัดได้ป้อนกลับเข้าระบบควบคุมแบบอินทิกรัลเพื่อทำให้แรงในแนวระนาบ x-y มีค่าเป็นศูนย์ การควบคุมแรงในแนวแกนระนาบจะใช้ซีเลคชันเมทริกซ์ (Selection Matrices) ซึ่งจากแผนภาพการควบคุมได้ทำการละไว้แต่จะอยู่ภายในตัวควบคุมแรง ซึ่งเป็นการควบคุมแรง/ตำแหน่งแบบไฮบริด แบบอิมพลิซิทหรือการควบคุมแรงโดยอ้อม โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งและแรงเป็นค่าเกนในตัวควบคุมอินทิกรัล แล้วส่งสัญญาณควบคุมตำแหน่งจากการควบคุมแรง P_{force} เพื่อให้แท่งทรงกระบอกเคลื่อนที่ลงหลุม รวมทั้งกล้องสองตัวที่ชิ้นงานจะส่งสัญญาณภาพของตำแหน่งแท่งทรงกระบอกกับหลุมที่ต้องการ P_{vision} กลับไปที่มนุษย์ผู้ควบคุม เพื่อผู้ควบคุมจะบังคับหุ่นยนต์และแท่งทรงกระบอกไปยังตำแหน่งของหลุมที่ต้องการ ด้วยการชดเชยตำแหน่งจากภาพเคลื่อนไหวในเวลาจริงผ่านการรับรู้ของมนุษย์ ซึ่งเป็นระบบควบคุมแบบวงปิดจนกว่าแท่งทรงกระบอกจะเคลื่อนที่ลงหลุมไปกดบนปุ่มกดที่มีตัวเลขที่ต้องการ แล้วเริ่มทำซ้ำจนกว่าภารกิจจะเสร็จสิ้น

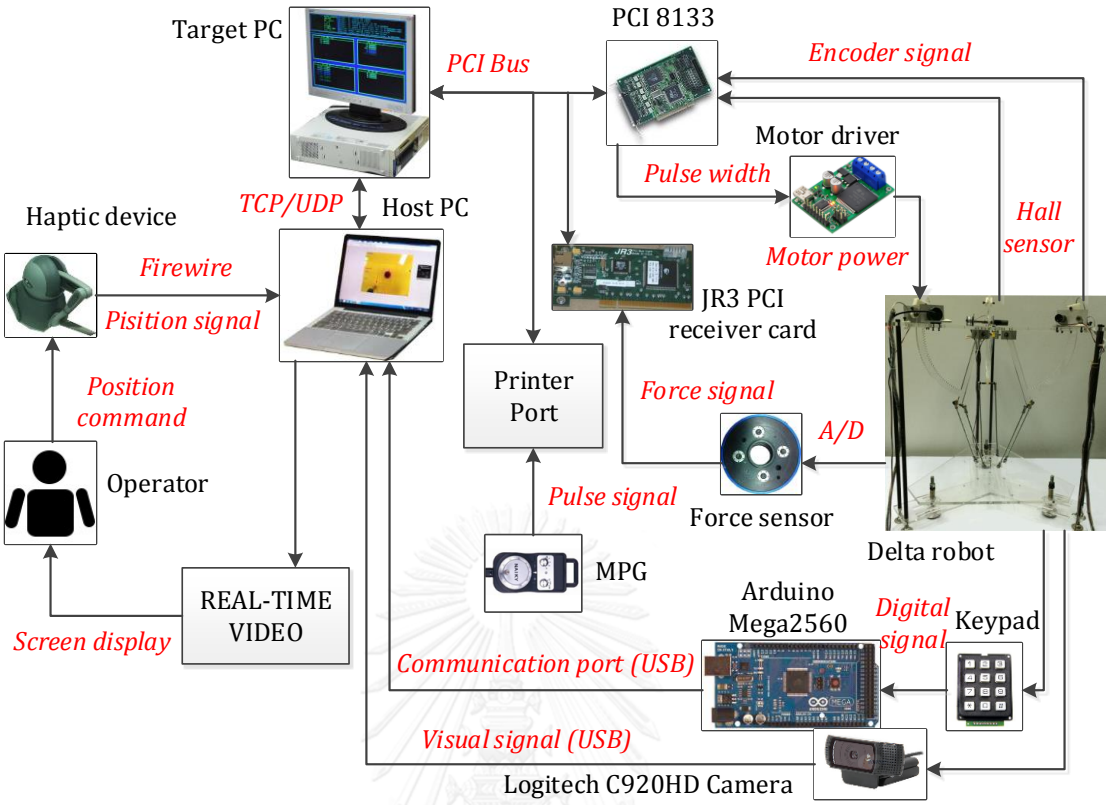


รูปที่ 4.17 แผนภาพการควบคุมหุ่นยนต์สำหรับทำงานกำหนดตำแหน่งหมุดร่วมกับมนุษย์ในเวลาจริง

4.6 ระบบสัญญาณควบคุมหุ่นยนต์สำหรับทำงานกำหนดตำแหน่งหมุดร่วมกับมนุษย์ในเวลาจริง

เนื่องจากรูปแบบของงานกำหนดตำแหน่งหมุดมีความซับซ้อน และงานอยู่ในสภาวะสภาพแวดล้อมไม่คงที่ ทำให้ระบบอิเล็กทรอนิกส์ การจ่ายพลังงาน และการเชื่อมต่อสื่อสารหรือการส่งสัญญาณระหว่างอุปกรณ์ซึ่งมีมนุษย์เข้ามาเกี่ยวข้องด้วยมีความซับซ้อนด้วยเช่นกัน จึงออกแบบระบบสัญญาณให้มีความถี่ 10 กิโลเฮิร์ต ซึ่งทำให้ระบบมีการตอบสนองรวดเร็ว ส่งผลดีต่อการตอบสนองของมนุษย์และสมรรถนะการทำงานของหุ่นยนต์ร่วมกับมนุษย์ในเวลาจริง สัญญาณตำแหน่งจากตัววัดตำแหน่งจะถูกส่งไปยังแผงควบคุมพีซีไอ-8133 (PCI-8133) และมีระบบกล้องเชื่อมต่อผ่านยูเอสบีไปที่คอมพิวเตอร์โฮส และมีการส่งข้อมูลประมวลผลผ่านระบบทีซีพี/ยูดีพี (TCP/UDP) ไปที่คอมพิวเตอร์เป้าหมายเพื่อทำการควบคุม ระบบพลังงานเพื่อลดสัญญาณรบกวนจึงแยกเป็นสองส่วน ส่วนแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์ใช้ไฟฟ้ากระแสตรง 5 โวลต์ แบบควบคุม และส่วนระบบขับเคลื่อนใช้ไฟฟ้ากระแสตรง 12 โวลต์ แบบไม่ควบคุม ระบบควบคุมมีองค์ประกอบสำคัญในการทำงานร่วมกับมนุษย์อื่นๆที่มีรายละเอียด ดังรูปที่ 4.18

ส่วนของชิ้นงานที่เป็นแป้นปุ่มกดจะทำหน้าที่เป็นตัวตรวจจับแท่งหมุดที่ปลายแขนหุ่นยนต์เมื่อปักลงหลุมผ่านทางแรงสัมผัสและส่งสัญญาณดิจิตอลไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์เพื่อตรวจสอบเงื่อนไขลำดับการทำงานว่าถูกต้องหรือไม่ หากถูกต้องไมโครคอนโทรลเลอร์ที่เชื่อมต่อกับเครื่องโฮสผ่านทางยูเอสบีจะแจ้งเตือนไปยังหน้าจอแสดงผล ในหน้าจอเดียวกันกับสัญญาณภาพวิดีโอจากกล้องดิจิตอล เพื่อส่งข้อมูลไปยังระบบการรับรู้ของมนุษย์ผู้ควบคุมสำหรับใช้ในการตัดสินใจ และบังคับหุ่นยนต์ให้ทำงานกำหนดตำแหน่งหมุดจนกว่าจะสำเร็จภารกิจ



รูปที่ 4.18 แผนภาพระบบสัญญาณหุ่นยนต์
สำหรับทำงานกำหนดตำแหน่งหมุดร่วมกับมนุษย์ในเวลาจริง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 5
ผลการประเมินสมรรถนะการทำงานของหุ่นยนต์ร่วมกับมนุษย์

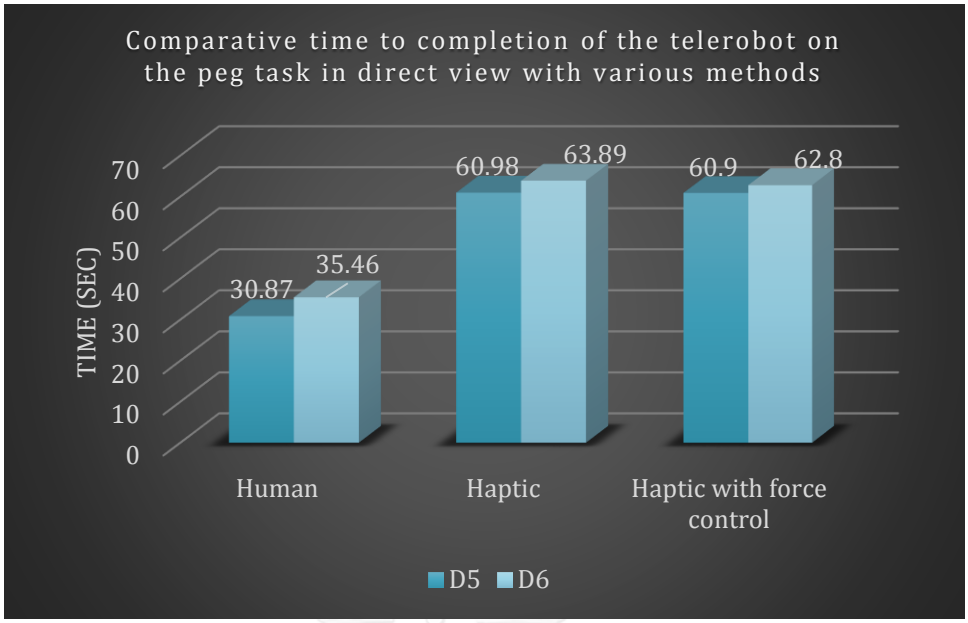
การประเมินสมรรถนะการทำงานของหุ่นยนต์สำหรับงานกำหนดตำแหน่งหมุดร่วมกับมนุษย์ในเวลาจริง โดยมีรายละเอียดขั้นตอนการทดลองตามที่ได้กล่าวไว้ในบทการออกแบบระบบหุ่นยนต์เดลต้า หัวข้อขั้นตอนการควบคุมหุ่นยนต์ทำงานกำหนดตำแหน่งหมุด การประเมินสมรรถนะการทำงานเพื่อเปรียบเทียบสมรรถนะการทำงานในแต่ละรูปแบบที่แตกต่างกัน ได้แก่ มุมมองที่ใช้ในการควบคุม อุปกรณ์ควบคุม วิธีการควบคุม และขนาดหมุด ท้ายที่สุดจะได้ผลการทดลองที่เป็นเวลาที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งเป็นตัวแปรสมรรถนะการทำงานที่ต้องการ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

5.1 ผลการประเมินสมรรถนะการทำงานของหุ่นยนต์สำหรับทำงานกำหนดตำแหน่งหมุดร่วมกับมนุษย์ในเวลาจริง

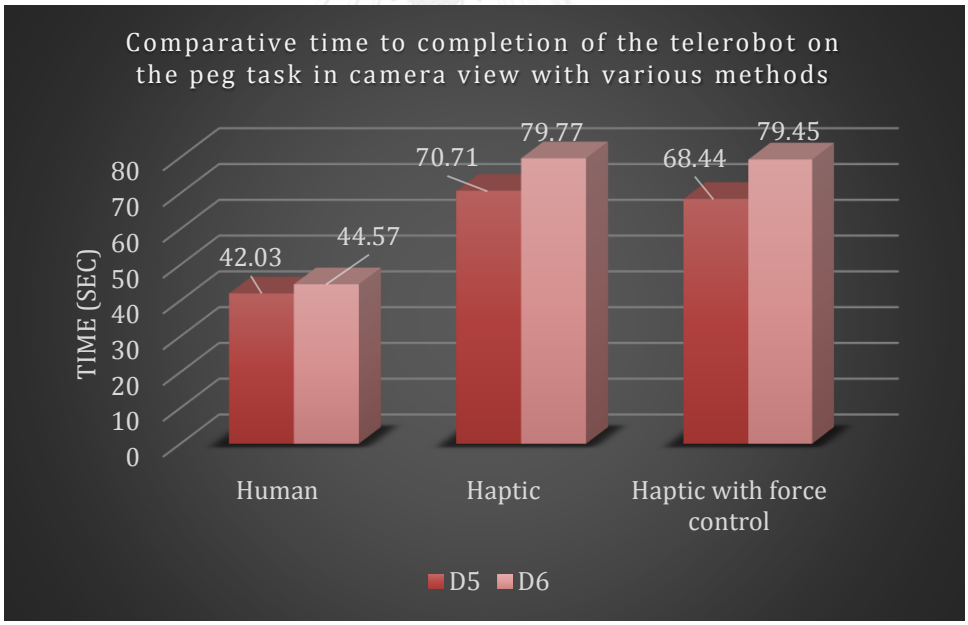
จากการประเมินโดยมีผู้ทำการประเมิน 1 คน ทำการทดลองในแต่ละรอบสุ่มตัวเลข 20 ครั้ง ผลการประเมินพบว่า ดังรูปที่ 5.1 เมื่อมนุษย์ควบคุมหุ่นยนต์โดยไม่ใช้ระบบภาพ แต่ใช้สายตามองชิ้นงานโดยตรง มนุษย์จับปลายแขนหุ่นยนต์ปักหมุด (Human) ใช้เวลาในการทำภารกิจน้อยที่สุด ซึ่งมีสมรรถนะการทำงานกำหนดตำแหน่งหมุดดีที่สุด และเวลาที่ใช้ในการทำภารกิจ เมื่อมนุษย์ใช้อุปกรณ์ควบคุมแฮปติก (Haptic) ใกล้เคียงกับ มนุษย์ใช้แฮปติกที่มีการควบคุมแรงในแนวระนาบผ่านทางระบบควบคุม (Haptic with force control) ซึ่งทั้งสองวิธีการใช้เวลามากกว่ามนุษย์ทำงานประมาณ 100% และ 80% ในกรณีที่ใช้แท่งหมุดทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 (D5) และ 6 มิลลิเมตร (D6) ตามลำดับ

และดังรูปที่ 5.2 เมื่อมนุษย์ควบคุมหุ่นยนต์โดยใช้ระบบภาพ ผู้ทดลองใช้สายตามองชิ้นงานผ่านทางหน้าจอแสดงผลที่มีสองหน้าจอ มนุษย์จับปลายแขนหุ่นยนต์ปักหมุดใช้เวลาในการทำภารกิจน้อยที่สุด ซึ่งมีสมรรถนะการทำงานกำหนดตำแหน่งหมุดดีที่สุด และเวลาที่ใช้ในการทำภารกิจ เมื่อมนุษย์ใช้อุปกรณ์ควบคุมแฮปติกใกล้เคียงกับ มนุษย์ใช้แฮปติกที่มีการควบคุมแรงในแนวระนาบผ่านทางระบบควบคุม ซึ่งใช้เวลามากกว่ามนุษย์ทำงานประมาณ 70% และ 80% ในกรณีที่ใช้แท่งทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 และ 6 มิลลิเมตร ตามลำดับ

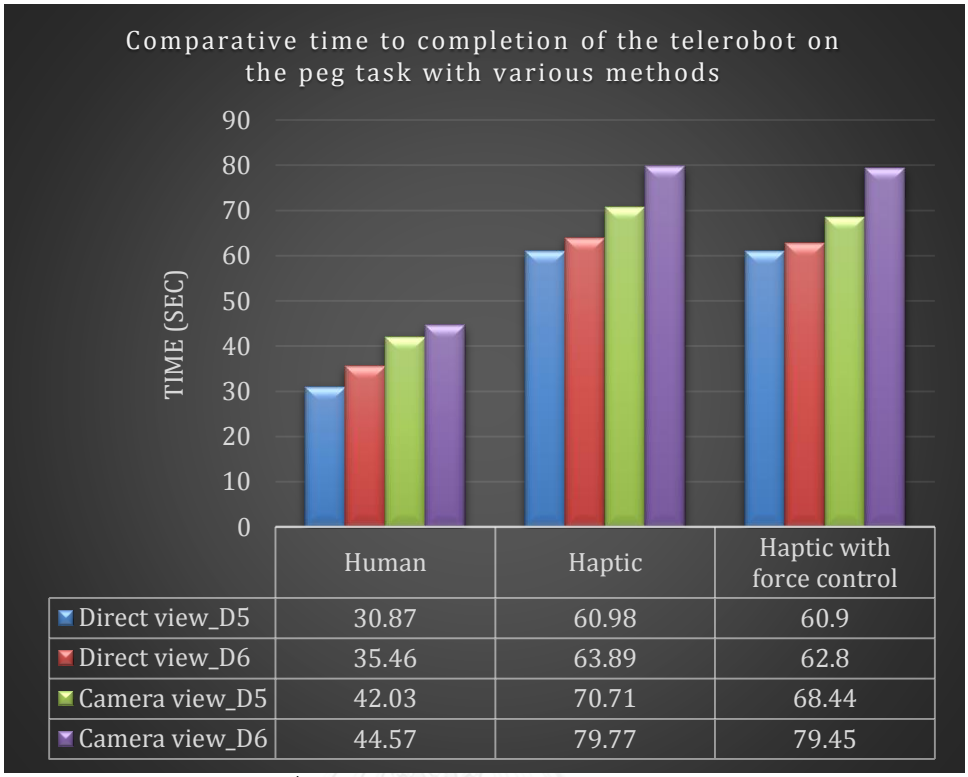
เมื่อนำผลการทดลองทั้งสองชุดมาเปรียบเทียบกันดังรูปที่ 5.3 การควบคุมหุ่นยนต์โดยไม่ใช้ระบบภาพหรือใช้มุมมองโดยตรงมีสมรรถนะการทำงานที่ดีกว่าใช้ระบบภาพที่เป็นมุมมองสามมิติ พิจารณาเปรียบเทียบเมื่อมนุษย์ใช้อุปกรณ์ควบคุมชนิดเดียวกันคือ แฮปติกที่มีการควบคุมแรงในแนวระนาบผ่านทางระบบควบคุม และใช้แท่งทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร พบว่าการควบคุมหุ่นยนต์ผ่านระบบภาพจะใช้เวลาในการทำภารกิจมากกว่ามุมมองโดยตรง 12%



รูปที่ 5.1 การเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการควบคุมหุ่นยนต์ทำงานกำหนดตำแหน่งหมุดร่วมกับมนุษย์ในแต่ละวิธีการผ่านทางการมองเห็นของมนุษย์โดยตรง



รูปที่ 5.2 การเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการควบคุมหุ่นยนต์ทำงานกำหนดตำแหน่งหมุดร่วมกับมนุษย์ในแต่ละวิธีการผ่านทางระบบภาพจากกล้อง



รูปที่ 5.3 การเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการควบคุมหุ่นยนต์ทำงานกำหนดตำแหน่งหมุดร่วมกับมนุษย์ในแต่ละวิธีการ

5.2 สรุปผลประเมินสมรรถนะการทำงานของหุ่นยนต์สำหรับทำงานกำหนดตำแหน่งหมุดร่วมกับมนุษย์ในเวลาจริง

การพัฒนาระบบหุ่นยนต์เดลต้าแบบสามองศาอิสระให้ทำงานร่วมกับมนุษย์ในเวลาจริง เมื่อนำไปใช้ในการทำงานกำหนดตำแหน่งหมุดสามารถทำงานได้จริง เพราะการออกแบบโดยเฉพาะส่วนประกอบต่างๆภายในระบบ สามารถช่วยเหลือการทำงานของหุ่นยนต์ร่วมกับมนุษย์ได้อย่างเหมาะสม กล่าวคือ ส่วนต่อประสาน ที่เป็นระบบภาพที่ประกอบด้วยกล้องและหน้าจอแสดงผลสามารถแสดงสภาพแวดล้อมได้ และผู้ควบคุมสามารถใช้อุปกรณ์ควบคุมปลายแขนของหุ่นยนต์ไปยังตำแหน่งที่ต้องการได้ ตัวตรวจวัดแรงสามารถวัดค่าแรงที่กระทำกับชิ้นงานแล้วส่งสัญญาณไปยังระบบควบคุมตำแหน่ง/แรงแบบไฮบริดเพื่อควบคุมตำแหน่งแท่งหมุดให้ลงหลุมได้ และฐานพื้นที่ทำงานแบบพาสซีฟทำให้เกิดการเคลื่อนที่แบบคอมไพลอันท์ขณะทำการปักหมุดเป็นส่วนสำคัญในการช่วยให้แท่งหมุดปักลงหลุม ดังนั้นจึงสามารถนำระบบหุ่นยนต์เดลต้าแบบสามองศาอิสระให้ทำงานร่วมกับมนุษย์ในเวลาจริงที่ออกแบบขึ้น นำไปประเมินสมรรถนะการทำงานของหุ่นยนต์สำหรับทำงานกำหนดตำแหน่งหมุดร่วมกับมนุษย์ในเวลาจริงได้

การประเมินสมรรถนะการทำงานของหุ่นยนต์ สำหรับทำงานกำหนดตำแหน่งหมุดร่วมกับมนุษย์ในเวลาจริง นำหลักการของฟิตต์มาประยุกต์ใช้ในการประเมินผ่านการจำลองการทำงานกำหนดตำแหน่งหมุด โดยใช้ตัวแปรสมรรถนะเป็นเวลาที่ใช้ในการทำภารกิจ แต่พัฒนากรอบการประเมินโดยออกแบบให้ชิ้นงานอยู่ในสภาพแวดล้อมไม่คงที่ กล่าวคือ มีลำดับการทำงานที่ไม่แน่นอน โดยจะทำการสุ่มตำแหน่งของหลุมที่จะต้องบังคับหุ่นยนต์ไปปักหมุด เพื่อให้เป็นงานที่เหมาะสมสำหรับควบคุมหุ่นยนต์ทำงานร่วมกับมนุษย์ และไม่สามารถใช้หุ่นยนต์อุตสาหกรรมได้ ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้ไม่สามารถนำหลักการของฟิตต์มาใช้ได้โดยตรง เพราะหลักการของฟิตต์ตำแหน่งในการเคลื่อนที่แต่ละรอบการทดลองจะมีความแน่นอน รวมทั้งระบบหุ่นยนต์ทำงานร่วมกับมนุษย์สามารถปรับค่าเกนให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่เร็วเกินขีดจำกัดของกล้ามเนื้อมนุษย์ได้ ทำให้หลักการของฟิตต์ที่ใช้สำหรับทดสอบมนุษย์เป็นหลักไม่ควรนำมาใช้โดยตรงเช่นเดียวกัน วิทยานิพนธ์นี้จึงนำหลักการของฟิตต์มาพัฒนาวิธีการประเมินและประยุกต์ให้เหมาะสม ผลการประเมินได้ข้อสรุปว่า

1.มนุษย์จับปลายแขนหุ่นยนต์ปักหมุดมีสมรรถนะการทำงานดีกว่ามนุษย์ควบคุมหุ่นยนต์โดยใช้อุปกรณ์ควบคุมแฮปติกที่มีเพียงการควบคุมตำแหน่ง และแฮปติกที่มีการควบคุมทั้งตำแหน่งและแรง โดยเป็นการควบคุมแรงในแนวระนาบผ่านทางระบบควบคุมด้วยการใช้ตัวตรวจวัดแรงเป็นส่วนหนึ่งของระบบควบคุม การใช้แฮปติกทั้งสองแบบมีสมรรถนะการทำงานใกล้เคียงกัน

2.การใช้เครื่องมือกระทำกับชิ้นงานหรือแท่งหมุด ซึ่งเป็นแท่งทรงกระบอกขนาดเล็กกว่าขนาดหลุมที่ปักลงไปจะมีสมรรถนะการทำงานดีกว่าการใช้แท่งทรงกระบอกขนาดพอดีขนาดหลุม เนื่องจากดัชนีความยากของการทำงานแตกต่างกัน

3.การทำงานโดยการมองชิ้นงานโดยตรงไม่ผ่านระบบภาพจะมีสมรรถนะการทำงานดีกว่าการใช้ระบบภาพในการควบคุมหุ่นยนต์

จากการพิจารณาสมรรถนะการทำงานของหุ่นยนต์ เมื่อผู้ทดลองใช้อุปกรณ์ควบคุมแฮปติกที่มีเพียงการควบคุมตำแหน่งมีค่าใกล้เคียงกับ แฮปติกที่มีการควบคุมทั้งตำแหน่งและแรง ที่มีการควบคุมแรงในแนวระนาบผ่านทางระบบควบคุม เพราะการเคลื่อนที่แบบคอมไพลอันท์ของโครงสร้างหุ่นยนต์มีผลต่อการทำงานกำหนดตำแหน่งหมุด มากกว่าการใช้ระบบควบคุมตำแหน่งและแรงช่วยในการทำงาน การเคลื่อนที่แบบคอมไพลอันท์ที่เกิดขึ้นมีสาเหตุมาจากหลายประการ ได้แก่ 1.การออกแบบฐานพื้นที่ทำงานให้มีสปริง เป็นการใช้หลักการของอุปกรณ์คอมไพลอันท์แบบพาสซีฟ เมื่อเกิดแรงกระทำระหว่างปลายแขนของหุ่นยนต์หรือแท่งหมุดทรงกระบอกกับชิ้นงาน เมื่อแท่งทรงกระบอกสัมผัสกับชิ้นงานบริเวณรอบหลุมที่ต้องการ โครงสร้างที่ปลายแขนหุ่นยนต์จะถูกแรงต้านจากชิ้นงานดันกลับ และชิ้นงานที่ติดกับฐานสปริงก็จะยุบตัวลงไปในลักษณะเอียง ส่งผลให้ปลายแท่งทรงกระบอกเคลื่อนที่ลงหลุมง่ายขึ้น ระบบจะมีค่าความแข็งตึงของโครงสร้างต่ำหรือค่าคอมไพลอันซ์สูง หมายความว่าโครงสร้างทางกายภาพของระบบมีการเปลี่ยนรูปร่างง่ายเมื่อมีแรงกระทำ ทำให้เกิด

การเคลื่อนที่แบบคอมไพลอันท์ 2.หุ่นยนต์เดลต้ามีน้ำหนักเบา เนื่องจากวัสดุหลักที่ใช้เป็นอะคลิลิก วัสดุอะคลิลิกคุณสมบัติของค่าความแข็งตึงต่ำกว่าเหล็ก ทำให้โครงสร้างทางกลของหุ่นยนต์มีค่าคอมไพลอันซ์สูง 3.การใช้ระบบขับเคลื่อนที่มีขนาดเล็ก รวมทั้งอัตราทดที่มีค่าต่ำ ทำให้โครงสร้างและแขนของหุ่นยนต์สามารถขับกลับได้ ระบบจึงมีค่าความแข็งตึงต่ำหรือค่าคอมไพลอันซ์สูง เช่นเดียวกันกับสาเหตุอื่นที่กล่าวมา 4.ระบบควบคุมตำแหน่งและแรง โดยเฉพาะการควบคุมแรงที่ใช้ตัวควบคุมอินทิกรัลถึงแม้จะใช้งานได้จริง แต่อาจจะยังไม่ดีพอในกรณีที่โครงสร้างทางกลมีค่าคอมไพลอันท์สูง ทำให้เมื่อเกิดแรงสัมผัสขึ้น หุ่นยนต์เกิดการเคลื่อนที่แบบคอมไพลอันท์อย่างรวดเร็วทันทีก่อนการควบคุมแรงส่งผล เปรียบเสมือนโครงสร้างทางกลมีบทบาทในการช่วยเหลือการควบคุมหุ่นยนต์ทำงานกำหนดตำแหน่งหมุดร่วมกับมนุษย์ในเวลาจริงมากกว่าระบบควบคุมแรงที่เขียนโปรแกรมขึ้น

อย่างไรก็ตามถึงแม้มนุษย์จะใช้เวลาทำภารกิจน้อยกว่ามนุษย์ควบคุมหุ่นยนต์ กล่าวคือสมรรถนะการทำงานของมนุษย์ในการทำงานกำหนดตำแหน่งหมุดจะดีกว่าใช้อุปกรณ์ควบคุม แต่ชิ้นงานที่นำมาทดสอบอยู่ในรูปแบบงานที่มนุษย์มีความถนัด (Human scaled task) โดยมีขนาดที่มนุษย์สามารถทำงานได้ง่าย และเป็นงานที่ไม่มีสภาวะอันตรายเข้ามาเกี่ยวข้อง มนุษย์จึงยังสามารถทำงานอยู่หน้าชิ้นงานและสัมผัสเครื่องมือที่กระทำกับชิ้นงานได้โดยตรง แต่หากชิ้นงานและเครื่องมือที่กระทำกับชิ้นงานมีน้ำหนักมากเกินไป ขนาดเล็กเกินไป มีสารเคมีหรือความร้อนสูง การทำงานจำเป็นต้องใช้หุ่นยนต์ทำงานร่วมกับมนุษย์ และต้องยอมรับสภาพของสมรรถนะการทำงานที่ด้อยกว่าด้วยข้อจำกัดหลายประการ เช่นเดียวกันการใช้ระบบภาพเข้ามาช่วยเหลือในการควบคุมหุ่นยนต์ซึ่งมีสมรรถนะการทำงานด้อยกว่าการมองชิ้นงานโดยตรง แต่รูปแบบงานที่ผู้ทดลองไม่สามารถอยู่หน้าชิ้นงานได้โดยตรงดังข้างต้น ก็จะมีความจำเป็นที่ต้องใช้ระบบภาพเพื่อช่วยเหลือการทำงานร่วมกันระหว่างมนุษย์และหุ่นยนต์

Chulalongkorn University

บทที่ 6
สรุปผลการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ประสบผลสำเร็จตามวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ การพัฒนาระบบหุ่นยนต์เดลต้าแบบสามองศาอิสระให้ทำงานร่วมกับมนุษย์ในเวลาจริง เมื่อนำไปใช้ในการทำงานกำหนดตำแหน่งหมุดสามารถทำงานได้จริง เพราะการออกแบบโดยเฉพาะส่วนประกอบต่างๆภายในระบบสามารถช่วยเหลือการทำงานของหุ่นยนต์ร่วมกับมนุษย์ได้อย่างเหมาะสม กล่าวคือ ส่วนต่อประสาน ที่เป็นระบบภาพที่ประกอบด้วยกล้องและหน้าจอแสดงผล สามารถแสดงสภาพแวดล้อมได้ และผู้ควบคุมสามารถใช้อุปกรณ์ควบคุมปลายแขนของหุ่นยนต์ไปยังตำแหน่งที่ต้องการได้ ตัวตรวจวัดแรงสามารถวัดค่าแรงที่กระทำกับชิ้นงานแล้วส่งสัญญาณไปยังระบบควบคุมตำแหน่ง/แรงแบบไฮบริดเพื่อควบคุมตำแหน่งแท่งหมุดให้ลงหลุมได้ และฐานพื้นที่ทำงานแบบพาสซีฟทำให้เกิดการเคลื่อนที่แบบคอมไพลอันท์ขณะทำการปักหมุดเป็นส่วนสำคัญในการช่วยให้แท่งหมุดปักลงหลุม ดังนั้นจึงสามารถนำระบบหุ่นยนต์เดลต้าแบบสามองศาอิสระให้ทำงานร่วมกับมนุษย์ในเวลาจริงที่ออกแบบขึ้น นำไปประเมินสมรรถนะการทำงานของหุ่นยนต์สำหรับทำงานกำหนดตำแหน่งหมุดร่วมกับมนุษย์ในเวลาจริงได้

วิทยานิพนธ์บรรลุวัตถุประสงค์ในการพัฒนากรอบการประเมินสมรรถนะการทำงานของหุ่นยนต์ สำหรับทำงานกำหนดตำแหน่งหมุดร่วมกับมนุษย์ในเวลาจริง โดยนำหลักการของฟิตต์มาประยุกต์ใช้ในการประเมินผ่านการจำลองการทำงานกำหนดตำแหน่งหมุด โดยใช้ตัวแปรสมรรถนะเป็นเวลาที่ใช้ในการทำภารกิจ แต่พัฒนากรอบการประเมินโดยออกแบบให้ชิ้นงานอยู่ในสภาพแวดล้อมไม่คงที่ กล่าวคือ มีลำดับการทำงานที่ไม่แน่นอน โดยจะทำการสุ่มตำแหน่งของหลุมที่จะต้องบังคับหุ่นยนต์ไปปักหมุด เพื่อให้เป็นงานที่เหมาะสมสำหรับควบคุมหุ่นยนต์ทำงานร่วมกับมนุษย์ และไม่สามารถใช้หุ่นยนต์อุตสาหกรรมได้ ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้ไม่สามารถนำหลักการของฟิตต์มาใช้ได้โดยตรง เพราะหลักการของฟิตต์ตำแหน่งในการเคลื่อนที่แต่ละรอบการทดลองจะมีความแน่นอน อีกทั้งระบบหุ่นยนต์ทำงานร่วมกับมนุษย์สามารถปรับค่าเกนให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่เร็วเกินขีดจำกัดของกล้ามเนื้อมนุษย์ได้ ทำให้หลักการของฟิตต์ที่ใช้สำหรับทดสอบมนุษย์เป็นหลักไม่ควรนำมาใช้โดยตรงเช่นเดียวกัน วิทยานิพนธ์นี้จึงนำหลักการของฟิตต์มาพัฒนาวิธีการประเมินและประยุกต์ให้เหมาะสม ผลการประเมินได้ข้อสรุปว่า

1.มนุษย์จับปลายแขนหุ่นยนต์ปักหมุดมีสมรรถนะการทำงานดีกว่ามนุษย์ควบคุมหุ่นยนต์โดยใช้อุปกรณ์ควบคุมแฮปติกที่มีเพียงการควบคุมตำแหน่ง และแฮปติกที่มีการควบคุมทั้งตำแหน่งและ

แรง โดยเป็นการควบคุมแรงในแนวระนาบผ่านทางระบบควบคุมด้วยการใช้ตัวตรวจวัดแรงเป็นส่วนหนึ่งของระบบควบคุม การใช้แฮปติกทั้งสองแบบมีสมรรถนะการทำงานใกล้เคียงกัน

2.การใช้เครื่องมือกระทำกับชิ้นงานหรือแท่งหมุด ซึ่งเป็นแท่งทรงกระบอกขนาดเล็กกว่าขนาดหลุมที่ปักลงไปจะมีสมรรถนะการทำงานดีกว่าการใช้แท่งทรงกระบอกขนาดพอดีขนาดหลุม เนื่องจากดัชนีความยากของการทำงานแตกต่างกัน

3.การทำงานโดยการมองชิ้นงานโดยตรงไม่ผ่านระบบภาพจะมีสมรรถนะการทำงานดีกว่าการใช้ระบบภาพในการควบคุมหุ่นยนต์

ปัญหาที่พบในงานวิจัย คือจากการพิจารณาสมรรถนะการทำงานของหุ่นยนต์ เมื่อผู้ทดลองใช้อุปกรณ์ควบคุมแฮปติกที่มีเพียงการควบคุมตำแหน่งมีค่าใกล้เคียงกับ แฮปติกที่มีการควบคุมทั้งตำแหน่งและแรง ที่มีการควบคุมแรงในแนวระนาบผ่านทางระบบควบคุม เพราะการเคลื่อนที่แบบคอมไพลอันท์ของโครงสร้างหุ่นยนต์มีผลต่อการทำงานกำหนดตำแหน่งหมุด มากกว่าการใช้ระบบควบคุมตำแหน่งและแรงช่วยในการทำงาน การเคลื่อนที่แบบคอมไพลอันท์ที่เกิดขึ้นมีสาเหตุมาจากหลายประการ ได้แก่ 1.การออกแบบฐานพื้นที่ทำงานให้มีสปริง เป็นการใช้หลักการของอุปกรณ์คอมไพลอันท์แบบพาสซีฟ เมื่อเกิดแรงกระทำระหว่างปลายแขนของหุ่นยนต์หรือแท่งหมุดทรงกระบอกกับชิ้นงาน เมื่อแท่งทรงกระบอกสัมผัสกับชิ้นงานบริเวณรอบหลุมที่ต้องการ โครงสร้างที่ปลายแขนหุ่นยนต์จะถูกแรงต้านจากชิ้นงานดันกลับ และชิ้นงานที่ติดกับฐานสปริงก็จะยุบตัวลงไปในลักษณะเอียง ส่งผลให้ปลายแท่งทรงกระบอกเคลื่อนที่ลงหลุมง่ายขึ้น ระบบจะมีค่าความแข็งตึงของโครงสร้างต่ำหรือค่าคอมไพลอันซ์สูง หมายความว่าโครงสร้างทางกายภาพของระบบมีการเปลี่ยนรูปร่างง่ายเมื่อมีแรงกระทำ ทำให้เกิดการเคลื่อนที่แบบคอมไพลอันท์ 2.หุ่นยนต์เดลต้ามีน้ำหนักเบา เนื่องจากวัสดุหลักที่ใช้เป็นอะคลิลิก วัสดุอะคลิลิกคุณสมบัติของค่าความแข็งตึงต่ำกว่าเหล็ก ทำให้โครงสร้างทางกลของหุ่นยนต์มีค่าคอมไพลอันซ์สูง 3.การใช้ระบบขับเคลื่อนที่มีขนาดเล็ก รวมทั้งอัตราทดที่มีค่าต่ำ ทำให้โครงสร้างและแขนของหุ่นยนต์สามารถขับกลับได้ ระบบจึงมีค่าความแข็งตึงต่ำหรือค่าคอมไพลอันซ์สูง เช่นเดียวกันกับสาเหตุอื่นที่กล่าวมา 4.ระบบควบคุมตำแหน่งและแรง โดยเฉพาะการควบคุมแรงที่ใช้ตัวควบคุมอินทิกรัลถึงแม้จะใช้งานได้จริง แต่อาจจะยังไม่ดีพอในกรณีที่โครงสร้างทางกลมีค่าคอมไพลอันท์สูง ทำให้เมื่อเกิดแรงสัมผัสขึ้น หุ่นยนต์เกิดการเคลื่อนที่แบบคอมไพลอันท์อย่างรวดเร็วทันทีก่อนการควบคุมแรงส่งผล เปรียบเสมือนโครงสร้างทางกลมีบทบาทในการช่วยเหลือการควบคุมหุ่นยนต์ทำงานกำหนดตำแหน่งหมุดร่วมกับมนุษย์ในเวลาจริง มากกว่าระบบควบคุมแรงที่เขียนโปรแกรมขึ้น ข้อแนะนำแนวทางวิจัยในอนาคตจึงควรออกแบบให้ระบบหุ่นยนต์มีระบบควบคุมตำแหน่งและแรงที่มีความซับซ้อนมากยิ่งขึ้น สามารถปรับเปลี่ยนและตอบสนองได้อย่างรวดเร็ว และควรจะลดผลของค่าคอมไพลอันซ์ในระบบหากต้องการพัฒนาระบบควบคุมเป็นสำคัญ

จากการที่มนุษย์สามารถควบคุมหุ่นยนต์ให้ทำงานกำหนดตำแหน่งหมุดในเวลาจริง และสามารถประเมินสมรรถนะการทำงานของระบบหุ่นยนต์ร่วมกับมนุษย์ ในแบบจำลองรูปแบบงานที่สภาพแวดล้อมไม่คงที่ซึ่งเป็นกรอบการประเมินที่พัฒนาขึ้นต่างจากหลักการของฟิตต์ ดังนั้นการออกแบบระบบหุ่นยนต์เดลต้าแบบสามองศาอิสระสำหรับทำงานกำหนดตำแหน่งหมุดร่วมกับมนุษย์ในเวลาจริง จึงบรรลุวัตถุประสงค์ทุกประการ อย่างไรก็ตามถึงแม้มนุษย์จับปลายแขนหุ่นยนต์ปักหมุดจะใช้เวลาทำภารกิจน้อยกว่ามนุษย์ควบคุมหุ่นยนต์ กล่าวคือ สมรรถนะการทำงานของมนุษย์ในการทำงานกำหนดตำแหน่งหมุดจะดีกว่าใช้อุปกรณ์ควบคุม แต่ชิ้นงานที่นำมาทดสอบอยู่ในรูปแบบงานที่มนุษย์มีความถนัด โดยมีขนาดที่มนุษย์สามารถทำงานได้ง่าย และเป็นงานที่ไม่มีสภาวะอันตรายเข้ามาเกี่ยวข้อง มนุษย์จึงยังสามารถทำงานอยู่หน้าชิ้นงานและสัมผัสเครื่องมือที่กระทำกับชิ้นงานได้โดยตรง แต่หากชิ้นงานและเครื่องมือที่กระทำกับชิ้นงานมีน้ำหนักมากเกินไป ขนาดเล็กเกินไป มีสารเคมีหรือความร้อนสูง การทำงานจำเป็นต้องใช้หุ่นยนต์ทำงานร่วมกับมนุษย์ และต้องยอมรับสภาพของสมรรถนะการทำงานที่ด้อยกว่าด้วยข้อจำกัดหลายประการ เช่นเดียวกันการใช้ระบบภาพเข้ามาช่วยเหลือในการควบคุมหุ่นยนต์ซึ่งมีสมรรถนะการทำงานด้อยกว่าการมองชิ้นงานโดยตรง แต่รูปแบบงานที่ผู้ทดลองไม่สามารถอยู่หน้าชิ้นงานได้โดยตรงดังข้างต้น ก็จะมีความจำเป็นที่ต้องใช้ระบบภาพเพื่อช่วยเหลือการทำงานร่วมกันระหว่างมนุษย์และหุ่นยนต์ ดังนั้นการพัฒนาและแนวทางวิจัยในอนาคต จึงควรออกแบบระบบหุ่นยนต์ให้ทำงานร่วมกับมนุษย์ในเวลาจริงให้สามารถทำงานที่มีรูปแบบซับซ้อนยิ่งขึ้นได้ รวมทั้งออกแบบระบบให้มีประสิทธิภาพ และสมรรถนะการทำงานของหุ่นยนต์ร่วมกับมนุษย์เพิ่มมากขึ้นให้ใกล้เคียงหรือดีกว่ามนุษย์ เช่น การออกแบบโครงสร้างหุ่นยนต์และผลิตโครงสร้างให้มีคุณภาพสูงขึ้น การออกแบบตัวควบคุมหุ่นยนต์ในรูปแบบที่ซับซ้อนและสามารถควบคุมแม่นยำและตอบสนองได้ดีขึ้น และการนำอุปกรณ์ที่เหมาะสม หรือวิธีการจัดการกับสัญญาณภายในระบบรูปแบบใหม่มาประยุกต์ใช้ ก็จะสามารถพัฒนาระบบหุ่นยนต์เพื่อให้ทำงานร่วมกับมนุษย์ในเวลาจริง มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้นในท้ายที่สุดได้

รายการอ้างอิง

[1] J. Guittet and M. Parent, "Programming automatic reflex actions in telemanipulation," in 1979 18*th IEEE Conference on Decision and Control including the Symposium on Adaptive Processes*, 1979, pp. 1021-1023.

[2] C. Passenberg, A. Peer, and M. Buss, "A survey of environment-, operator-, and task-adapted controllers for teleoperation systems," *Mechatronics,* vol. 20, pp. 787-801, 2010.

[3] J. S. Albus, H. G. McCain, and R. Lumia, *NASA/NBS standard reference model for telerobot control system architecture* (*NASREM)*: National Institute of Standards and Technology Gaithersburg, MD, 1989.

[4] D.-S. Kwon, K. Y. Woo, S. K. Song, W. S. Kim, and H. S. Cho, "Microsurgical telerobot system," in *Intelligent Robots and Systems,* 1998. *Proceedings.,* 1998 *IEEE/RSJ International Conference on*, 1998, pp. 945-950.

[5] K. Ono, "Development of an XFEM based Adaptive Contact Model for Telepresence Systems with Time Delay," Technische Universität München, 2011.

[6] K. Corker, J. H. Lyman, and S. Sheredos, "A preliminary evaluation of remote medical manipulators," *Bull Prosthet Res,* vol. 16, pp. 107-34, 1979.

[7] P. Suphama, R. Chancharoen, P. Rerksirathai, and K. Phanatamporn, "3D Printer based on a Delta Robot for Extraordinary Applications," presented at the 5th TSME International Conference on Mechanical Engineering, Thailand, 2014.

[8] N. Angsupasirikul and R. Chancharoen, "An Arm Exoskeleton with VE for Rehabilitation," in *the* 14*th IEEE/RAS-EMBS International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR* 2015), 2015.

[9] N. Boonhaijaroen and R. Chancharoen, "Walking of a Delta Robot in Image Space," in *Applied Mechanics and Materials*, 2013, pp. 38-44.

[10] L. Angel, R. Saltaren, J. Sebastian, A. Hansson, and R. Aracil, "Robotenis: parallel robot with visual control," in *Automation Congress,* 2004. *Proceedings. World*, 2004, pp. 405-412.

[11] J. Kananai, "Position control of a Delta robot with end point feedback," Mechanical engineering, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand., 2013.

[12] P. Suphama and R. Chancharoen, "The Performance of a Delta Telerobot," in *Applied Mechanics and Materials*, 2014, pp. 236-241.

[13] N. Kowathanakul, "Development of a three degrees of freedom Delta robot," Mechanical engineering, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand., 2013.

[14] J. Kananai, N. Kowathanakul, and R. Chancharoen, "Design and Control of a Chula Parallel Delta Robot," in 2012 *TRS Conference on Robotics and Industrial Technology, Mahidol University, Thailand*, 2012.

[15] M. Laribi, L. Romdhane, and S. Zeghloul, "Analysis and dimensional synthesis of the DELTA robot for a prescribed workspace," *Mechanism and machine theory,* vol. 42, pp. 859-870, 2007.

[16] P. Zsombor-Murray, "Descriptive Geometric Kinematic Analysis of Clavel's "Delta" Robot," *Centre of Intelligent Machines, McGill University, USA,* 2004.

[17] M. López, E. Castillo, G. García, and A. Bashir, "Delta robot: inverse, direct, and intermediate Jacobians," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science,* vol. 220, pp. 103-109, 2006.

[18] K. Miller, "Experimental verification of modeling of DELTA robot dynamics by direct application of Hamilton's principle," in *Robotics and Automation,* 1995. *Proceedings.,* 1995 *IEEE International Conference on*, 1995, pp. 532-537.

[19] D. Carp-Ciocardia, "Dynamic analysis of Clavel's delta parallel robot," in *Robotics and Automation,* 2003. *Proceedings. ICRA'*03. *IEEE International Conference on*, 2003, pp. 4116-4121.

[20] L. D. Joly and C. Andriot, "Imposing motion constraints to a force reflecting telerobot through real-time simulation of a virtual mechanism," in *Robotics and Automation,* 1995. *Proceedings.,* 1995 *IEEE International Conference on*, 1995, pp. 357-362.

[21] W. S. Newman, Y. Zhao, and Y.-H. Pao, "Interpretation of force and moment signals for compliant peg-in-hole assembly," in *Robotics and Automation,* 2001. *Proceedings* 2001 *ICRA. IEEE International Conference on*, 2001, pp. 571-576.

[22] W. S. Kim, B. Hannaford, and A. Fejczy, "Force-reflection and shared compliant control in operating telemanipulators with time delay," *Robotics and Automation, IEEE Transactions on,* vol. 8, pp. 176-185, 1992.

[23] Y. Li, "Hybrid control approach to the peg-in hole problem," *Robotics & Automation Magazine, IEEE,* vol. 4, pp. 52-60, 1997.

[24] V. Sangveraphunsiri and P. Pongwasin, "Impedance Control of Robot for Human-Robot Cooperative Task," presented at the the 22nd Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand (ME-NETT), Thailand, 2008.

[25] J. F. Broenink and M. L. Tiernego, "Peg-in-hole assembly using impedance control with a 6 DOF robot," in *Proceedings of the 8th European Simulation Symposium*, 1996, pp. 504-508.

[26] T. Tsumugiwa, R. Yokogawa, and K. Hara, "Variable impedance control with virtual stiffness for human-robot cooperative peg-in-hole task," in *Intelligent Robots and Systems,* 2002. *IEEE/RSJ International Conference on*, 2002, pp. 1075-1081.

[27] H. Bruyninckx, S. Dutre, and J. De Schutter, "Peg-on-hole: a model based solution to peg and hole alignment," in *Robotics and Automation,* 1995. *Proceedings.,* 1995 *IEEE International Conference on*, 1995, pp. 1919-1924.

[28] L. B. Rosenberg, "Virtual fixtures: Perceptual tools for telerobotic manipulation," in *Virtual Reality Annual International Symposium,* 1993., 1993 *IEEE*, 1993, pp. 76-82.

[29] L. Bruzzone, R. Molfino, and M. Zoppi, "Modelling and control of peg-in-hole assembly performed by a translational robot," in *Proc. of the IASTED International Conference on Modelling, Identification and Control*, 2002, pp. 512-517.

[30] G. McLean, B. Prescott, and R. Podhorodeski, "Teleoperated system performance evaluation," *Systems, Man and Cybernetics, IEEE Transactions on,* vol. 24, pp. 796-804, 1994.

[31] M. Mihelj, R. Kamnik, and T. Bajd, "Assessment of Teleoperator Performance," *Electrotechnical Review,* vol. 65, pp. 7-13, 1998.

[32] P. M. Fitts, "The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement," *Journal of experimental psychology,* vol. 47, p. 381, 1954.

[33] J. Accot and S. Zhai, "Performance evaluation of input devices in trajectory-based tasks: an application of the steering law," in *Proceedings of the SIGCHI conference on Human Factors in Computing Systems*, 1999, pp. 466-472.

[34] N. Kowathanakul, P. Suphama, and R. Chancharoen, "Performance of a millimeter manipulation on a telepresence Delta robot," presented at the the 4th TSME International Conference on Mechanical Engineering, Thailand, 2013.

[35] N. Kowathanakul, J. Kananai, and R. Chancharoen, "Control of a Telemanipulator using Freehand and Force/Visual Feedback," presented at the The 3rd TSME International Conference on Mechanical Engineering, Thailand, 2012.

[36] M. Tölgyessy and P. Hubinský, "The Kinect sensor in robotics education," in *Proceedings of 2nd International Conference on Robotics in Education*, 2011, pp. 143-146.

[37] J. M. Sabater, R. Aracil, R. J. Saltaren, and L. Payá, "A novel parallel haptic interface for telerobotic systems," in *Advances in Telerobotics*, ed: Springer, 2007, pp. 45-59.

[38] C. L. Collins and G. L. Long, "The singularity analysis of an in-parallel hand controller for force-reflected teleoperation," *Robotics and Automation, IEEE Transactions on,* vol. 11, pp. 661-669, 1995.

[39] W. Poomarin, K. Chuengsatiansup, and R. Chancharoen, "VISUAL POSITIONING OF A DELTA ROBOT."

[40] N. Y. Chong, T. Kotoku, K. Ohba, K. Komoriya, N. Matsuhira, and K. Tanie, "Remote coordinated controls in multiple telerobot cooperation," in *Robotics and Automation,* 2000. *Proceedings. ICRA'*00. *IEEE International Conference on*, 2000, pp. 3138-3143.

[41] R. Held and N. Durlach, "Telepresence, time delay and adaptation," *Pictorial communication in virtual and real environments,* pp. 232-246, 1991.

[42] T. B. Sheridan, *Telerobotics, automation, and human supervisory control*: MIT press, 1992.

[43] A. Olsson, *Modeling and control of a Delta-3 robot*: Citeseer, 2009.

[44] H. H. Asada, "Introduction to Robotics," *Department of Mechanical Engineering, Massachusetts Institute of Technology,* 2005.

[45] K. Hosoda, K. Igarashi, and M. Asada, "Adaptive hybrid visual servoing/force control in unknown environment," in *Intelligent Robots and Systems' 96, IROS 96, Proceedings of the* 1996 *IEEE/RSJ International Conference on*, 1996, pp. 1097-1103.

[46] B. J. Nelson, J. D. Morrow, and P. K. Khosla, "Improved force control through visual servoing," in *American Control Conference, Proceedings of the* 1995, 1995, pp. 380-386.

[47] K. Srakaew, J. Kananai, and R. Chancharoen, "Hybrid Tele-operated and Force Control of Manipulator Arms," presented at the the 20st Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand (ME-NETT), Thailand, 2006.

[48] J. J. Craig, *Introduction to robotics: mechanics and control* vol. 3: Pearson Prentice Hall Upper Saddle River, 2005.

[49] V. Sangveraphunsiri and B. Panyavoravajn, "Implementation of The Hybrid Control with An Implicit Force for a Manipulator," presented at the the 14st Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand (ME-NETT), Thailand, 2000.

[50] F. Almeida, A. Lopes, and P. Abreu, "Force-impedance control: a new control strategy of robotic manipulators," *Recent advances in Mechatronics,* pp. 126-137, 1999.

[51] N. Hogan, "Impedance control: An approach to manipulation," in *American Control Conference,* 1984, 1984, pp. 304-313.

[52] M. R. Ahmed, "Compliance Control of Robot Manipulator for Safe Physical Human Robot Interaction," 2011.

[53] A. J. Silva, O. Ramirez, V. P. Vega, and J. P. O. Oliver, "Phantom omni haptic device: Kinematic and manipulability," in *Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference,* 2009. *CERMA'*09., 2009, pp. 193-198.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายภัทรวุธ สุภามา เกิดวันที่ 18 กันยายน พ.ศ.2534 ที่จังหวัดนครราชสีมา สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต จากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อวันที่ 19 พฤษภาคม พ.ศ.2557 และเข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโทวิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในโครงการต่อเนื่องตรี-โท 5 ปี เมื่อปีการศึกษา 2557 โดยได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากโครงการดังกล่าว หัวข้องานวิจัยที่สนใจเกี่ยวกับการออกแบบหุ่นยนต์เดลต้าให้ทำงานร่วมกับมนุษย์ในรูปแบบงานประเภทต่างๆ มีโอกาสได้ฝึกงานที่บริษัท NSK Ltd. ประเทศญี่ปุ่น เกี่ยวกับหัวข้อการพัฒนาหุ่นยนต์อุตสาหกรรมแบบเดลต้าสำหรับกระบวนการผลิตตลับลูกปืน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University