



การควบคุมเชิงพฤติกรรมสำหรับหุ่นยนต์ในการส่งของให้มนุษย์  
Human Inspired Behavioural Control for  
Robot-to-Human Object Handover

ธนพงษ์ สุทธิโพธิ์นันท์  
Tanapong Sutiphotinun

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา  
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและเมคาทรอนิกส์  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

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

Engineering

Prince of Songkla University

2564

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์









การควบคุมเชิงพฤติกรรมสำหรับหุ่นยนต์ในการส่งของให้มนุษย์  
Human Inspired Behavioural Control for  
Robot-to-Human Object Handover

ธนพงษ์ สุทธิโพธิ์นันท์  
Tanapong Sutiphotinun

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา  
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกลและเมคาทรอนิกส์  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

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

Prince of Songkla University

2564

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์





ชื่อวิทยานิพนธ์      การควบคุมเชิงพฤติกรรมสำหรับหุ่นยนต์ในการส่งของให้มนุษย์  
ผู้เขียน              นาย ธนพงษ์ สุทธิโพธิ์นันท์  
สาขาวิชา            วิศวกรรมเครื่องกลและเมคาทรอนิกส์

---

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

คณะกรรมการสอบ

.....  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปรมินทร์ เณรานนท์)

.....ประธานกรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สราวุธ เวชกิจ)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปรมินทร์ เณรานนท์)

.....  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาสกร เวสสะโกศล)

.....กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาสกร เวสสะโกศล)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา  
วิศวกรรมเครื่องกลและเมคาทรอนิกส์

.....  
(ศาสตราจารย์ ดร.ดำรงศักดิ์ ฟ้างู๋สง)  
คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย



ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคล  
ที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ.....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปรมินทร์ เณรานนท์)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ลงชื่อ.....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาสกร เวสสะโกศล)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ลงชื่อ.....

(นายธนพงษ์ สุทธิโพธิ์นันท์)

นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ  
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....

(นายธนงพงษ์ สุทธิโพธิ์นันท์)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์      การควบคุมเชิงพฤติกรรมสำหรับหุ่นยนต์ในการส่งของให้มนุษย์  
 ผู้เขียน                นายธนพงษ์ สุทธิโพธิ์นันท์  
 สาขาวิชา              วิศวกรรมเครื่องกลและเมคาทรอนิกส์  
 ปีการศึกษา            2563

### บทคัดย่อ

ปัจจุบันหุ่นยนต์เริ่มมีบทบาทที่สำคัญมากขึ้นต่อการดำรงชีวิตประจำวันของมนุษย์ อันเนื่องมาจากหุ่นยนต์สามารถทำงานร่วมกับมนุษย์ในหลายรูปแบบได้อย่างปลอดภัย อีกทั้งพบว่าสังคมผู้สูงอายุและคนพิการกลายเป็นปัญหาใหญ่ที่ส่งผลกระทบต่อประเทศไทยและทั่วโลกเนื่องจากขาดแคลนคนดูแล เพื่อยกระดับคุณภาพชีวิตของผู้สูงอายุและผู้พิการ จึงเริ่มมีการพิจารณานำหุ่นยนต์บริการเพื่อสนับสนุนงานบ้าน โดยเฉพาะอย่างยิ่งการส่งสิ่งของให้แก่มนุษย์ ดังนั้นวิทยานิพนธ์นี้จึงมุ่งเน้นไปที่การพัฒนาการควบคุมหุ่นยนต์ โดยเริ่มต้นศึกษาการควบคุมเชิงพฤติกรรมในการปฏิสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์กับมนุษย์ที่สามารถส่งวัตถุระหว่างกันได้อย่างเป็นธรรมชาติและปลอดภัย โดยการทดสอบการส่งวัตถุระหว่างมนุษย์กับมนุษย์เบื้องต้น (Human-Human Handover : HHH) เริ่มจากการศึกษาลักษณะพฤติกรรมการส่งแบบไดนามิกของผู้เข้าร่วมการทดลองใน HHH ผลที่ได้จากการทดลองสามารถอธิบายพฤติกรรมการส่งวัตถุของมนุษย์อย่างละเอียด, รูปแบบแรงปฏิสัมพันธ์, เวลาในการส่งมอบวัตถุ, ตำแหน่งการถ่ายโอน, และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแขนของผู้ส่งขณะส่งวัตถุ โดยผลจากการศึกษาการตอบสนองต่อพฤติกรรมของ HHH จะนำไปสู่การออกแบบกรอบแนวคิดที่เหมาะสมสำหรับระบบควบคุมหุ่นยนต์สำหรับหุ่นยนต์ส่งของให้มนุษย์ (Human-Robot Handover : HRH) งานวิจัยนี้นำหุ่นยนต์บริการที่มีชื่อว่า Human Support Robot (HSR) ในการทดลอง โดยมีจุดประสงค์คือต้องการควบคุมพฤติกรรมการส่งวัตถุของหุ่นยนต์ให้มีพฤติกรรมที่ใกล้เคียงกับมนุษย์ ด้วยการควบคุมแบบอิมพีแดนซ์ที่เหมาะสมสำหรับควบคุมตำแหน่งของ HSR ที่ขึ้นอยู่กับแรงปฏิสัมพันธ์ขณะที่ปฏิสัมพันธ์กับมนุษย์ ค่าพารามิเตอร์อิมพีแดนซ์ที่เหมาะสมต่อการควบคุมพฤติกรรมการส่งวัตถุของหุ่นยนต์ HSR ถูกระบุในการทดลอง โดยผลจากการทดลองและการยอมรับจากผู้เข้าร่วมการทดลองพบว่า การควบคุมแบบอิมพีแดนซ์สามารถควบคุมให้หุ่นยนต์มีพฤติกรรมการส่งวัตถุที่ใกล้เคียงกับมนุษย์ได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้กล่าวได้ว่าสามารถทำให้หุ่นยนต์ HSR สามารถส่งวัตถุให้แก่มนุษย์ได้อย่างเป็นธรรมชาติ และปลอดภัย

**Thesis Title** Human Inspired Behavioural Control for Robot-to-Human Object Handover  
**Author** Mr. Tanapong Sutiphotinun  
**Major Program** Mechanical and Mechatronics Engineering  
**Academic Year** 2020

### **Abstract**

Currently, robots play an increasingly important role in human life, as the robots are capable of safely performing human-robot interactive tasks. As ageing and disability societies have become a challenge social problem in Thailand and all over the world, due to the shortage of care workers. Subsequently, to enhance the quality of life of elderly and disabled people, service robots have been taken into account to support household chores, particularly passing an object to a human. Therefore, this thesis focuses on the development of robotic human-like control by initially understanding how an equivalent human-human interaction can perform object handover naturally, reliably and safely. The preliminary human-human handover (HHH) tests were carried out to acknowledge the dynamic behavioural characteristics of the human participants in HHH. The experimental findings intensively explained human handover strategies, the interactive force profiles, object handover times, transfer locations, and the mathematical model of the giver's arm while regulating the exerted force. The understanding of HHH behavioural responses leads to the proper design of a conceptual framework for a robot control system. The substantive tests were developed, in which a Toyota Human Support Robot (HSR) was implemented based on human-like behavioural control. Additionally, the robotic impedance control, which is suitable to control the HRS's force-position relation while interacting with the human environment, was used. The optimized impedance parameters were experimentally identified. The main results show that the performance of the robot impedance control can be considered acceptable for HHH. This allowed the HSR to successfully pass the object to the human in a safe, reliable, and timely manner.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงด้วยความกรุณาจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปรมินทร์ เณรานนท์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาสกร เวสสะโกศล อาจารย์ที่ปรึกษา ร่วม ที่กรุณาให้การสนับสนุนและฝึกฝนระเบียบวิธีคิด ในการทำวิจัย เสียสละเวลาในการให้คำปรึกษา แนะนำความรู้ แนวคิด เอกสาร ข้อเสนอแนะที่มี ประโยชน์ในการทำวิจัยเป็นอย่างดี รวมถึงการช่วยเหลือแก้ไขปัญหาต่างๆ ตลอดจนตรวจทานและ ดำเนินแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้ดำเนินไปอย่าง สมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรารุช เวชกิจ ประธานกรรมการสอบ วิทยานิพนธ์ ที่เสียสละเวลา ให้คำปรึกษา คำแนะนำ และข้อเสนอแนะของงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.พฤทธิกร สมิตไมตรี ที่อนุญาตให้ใช้หุ่นยนต์ Human Support Robot ของทาง Toyota สำหรับการวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ สมาชิกทีม Dongyang Team ในการให้ความช่วยเหลือและ ถ่ายทอดองค์ความรู้เกี่ยวกับวิธีการใช้งานหุ่นยนต์

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์และบุคลากรในภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลทุกๆ ท่าน ที่ ให้ความรู้ และการช่วยเหลือในด้านต่างๆ มาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย สงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ ที่ให้ความอนุเคราะห์สำหรับสถานที่และอุปกรณ์เครื่องมือใน การ ทำวิจัย ขอขอบพระคุณ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ ที่สนับสนุน งบประมาณในการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณ คุณประนอม ภักดีรัฐรัตน์ ที่ช่วยดำเนินงานเอกสารต่างๆ

ขอขอบคุณนักศึกษามหาบัณฑิตวิศวกรรม และบัณฑิตวิศวกรรมทุกท่าน ที่มีส่วน ร่วมและให้ความช่วยเหลือในการทำวิจัยและทดลอง

ธนพงษ์ สุทธิโพธิ์นันท์

## สารบัญ

	หน้า
การควบคุมเชิงพฤติกรรมสำหรับหุ่นยนต์ในการส่งของให้มนุษย์.....	1
การควบคุมเชิงพฤติกรรมสำหรับหุ่นยนต์ในการส่งของให้มนุษย์.....	1
ชื่อวิทยานิพนธ์ การควบคุมเชิงพฤติกรรมสำหรับหุ่นยนต์ในการส่งของให้มนุษย์ .....	2
บทคัดย่อ.....	5
กิตติกรรมประกาศ.....	7
สารบัญ.....	8
สารบัญรูป.....	12
สารบัญตาราง.....	16
<b>บทที่ 1 บทนำ.....</b>	<b>1</b>
1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	6
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	6
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	7
1.5 ภาพรวมของวิทยานิพนธ์.....	7
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....</b>	<b>9</b>
2.1 การทบทวนวรรณกรรมเกี่ยวกับงานวิจัยทางการส่งของระหว่างมนุษย์กับมนุษย์ (BACKGROUND OF HUMAN-TO-HUMAN OBJECT HANDOVER).....	9
2.2 การทบทวนวรรณกรรมเกี่ยวกับงานวิจัยทางการส่งของระหว่างมนุษย์กับหุ่นยนต์ (BACKGROUND OF HUMAN-TO-ROBOT OBJECT HANDOVER).....	12
2.3 หุ่นยนต์ HUMAN SUPPORT ROBOT (HSR).....	16
2.3.1 ส่วนประกอบต่าง ๆ ของหุ่นยนต์ HSR.....	17
2.3.2 ความสามารถและขีดจำกัดการทำงานของหุ่นยนต์.....	19
2.3.3 ซอฟต์แวร์ของหุ่นยนต์HSR.....	20
2.3.4 เมทริกซ์การแปลง (Transformation matrix).....	22
2.3.5 จลศาสตร์ของหุ่นยนต์ (Robot Kinematics).....	23
2.3.6 การอ้างอิงมุมแบบโรลล์ – พิตช์ - ยอว์ (Roll-Pitch-Yaw).....	24
2.3.7 หลักการของเดนาวิท-ฮาร์เทนเบิร์ก (Denavit-Hartenberg convention)....	25
2.4 ระบบควบคุมแรงและตำแหน่ง (FORCE/POSITION REAL-TIME CONTROL SYSTEM).....	26

2.4.1 การควบคุมแบบอิมพีแดนซ์ (Impedance Control) .....	26
2.4.2 ระบบควบคุมแรงแบบเอกซ์พลีซิที (Explicit force control).....	28
2.4.3 ระบบควบคุมแรงแบบ External force control หรือ Position-based force control.....	30
2.4.4 ระบบควบคุมแบบ Proportional-Integral-Derivative Control (PID) .....	31
2.5 การลดทอนสัญญาณของตัวกรองสัญญาณ (FILTER) .....	32
2.5.1 ตัวกรองสัญญาณความถี่ต่ำ (Low Pass Filter) .....	32
2.5.2 ตัวกรองค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ (Moving average filter).....	32
2.6 การวิเคราะห์และการประเมินทางสถิติ .....	34
2.6.1 การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (Analysis Of Variance) .....	34
2.6.2 การวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis).....	34
2.7 ความปลอดภัยในการทำงานร่วมกันระหว่างมนุษย์กับหุ่นยนต์ (SAFETY FOR HUMAN ROBOT INTERACTION).....	35
การทำงานร่วมกันระหว่างหุ่นยนต์และมนุษย์ มีหลักการหรือข้อบังคับที่เป็นสากล เพื่อป้องกันอันตรายที่เกิดจากความผิดพลาดขณะหุ่นยนต์ทำงานทางด้านอุตสาหกรรม [27] โดยในการทำงานของหุ่นยนต์ในงานวิจัยนี้ต้องมีระบบที่สอดคล้องกับข้อบังคับต่อไป.....	35
2.7.1 Safety-rated monitored stop (SMS) ใช้เพื่อหยุดการเคลื่อนไหวของหุ่นยนต์ในพื้นที่ทำงานร่วมกันก่อนที่ผู้ปฏิบัติงานจะเข้าสู่พื้นที่ทำงานร่วมกันเพื่อโต้ตอบกับระบบหุ่นยนต์ และทำงานให้เสร็จ.....	35
2.7.2 Speed and separation monitoring (SSM) ใช้ในกรณีที่ระบบหุ่นยนต์และผู้ปฏิบัติงานอาจเคลื่อนที่ไปพร้อมกันในพื้นที่ทำงานร่วมกัน ในระหว่างการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ระบบหุ่นยนต์จะไม่เข้าใกล้ผู้ปฏิบัติงานเกินกว่าระยะการแยกป้องกันที่กำหนดไว้ .....	35
2.7.3 Power and force limiting (PFL) ใช้ในกรณีที่ระบบหุ่นยนต์ต้องได้รับการออกแบบเพื่อลดความเสี่ยงให้กับผู้ปฏิบัติงานอย่างเพียงพอ โดยไม่เกินค่าขีดจำกัดของเกณฑ์ที่บังคับใช้สำหรับการสัมผัสแบบกึ่งคงที่ และแบบชั่วคราวตามที่กำหนดโดยการประเมินความเสี่ยง.....	35
2.7.4 New modes of operation อนุญาตให้มีมาตรฐานเกี่ยวข้องกับพื้นที่ทำงานของหุ่นยนต์ เช่น การออกแบบการควบคุมหุ่นยนต์ให้ทำงานร่วมกับผู้ปฏิบัติงานของมนุษย์ในพื้นที่การทำงานเดียวกัน .....	36

2.7.5 Control reliability มีการแก้ไขระบบควบคุมซึ่งจะช่วยให้สามารถควบคุมให้มีความปลอดภัยสูง รวมทั้งมีช่องสำหรับซอฟต์แวร์ที่ทันสมัย การเดินสายไฟหรือระบบอิเล็กทรอนิกส์ และเทคโนโลยีเครือข่าย.....	36
2.7.6 Safeguarding and clearance มีการประเมินผลความปลอดภัยเมื่อมีการทำงานหยุดชั่วคราว โดยมีการโหลดข้อมูลต่าง ๆ เช่น สถิติสูงสุดของหุ่นยนต์ หรือความเร็วสูงสุด.....	36
2.8 ระบบปฏิบัติการสำหรับหุ่นยนต์ (ROBOT OPERATING SYSTEM : ROS).....	36
2.8.1 Transform (TF) .....	37
2.8.2 The Unified Robot Description Format (URDF).....	38
2.8.3 You only look once (YOLO).....	39
<b>บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย .....</b>	<b>41</b>
3.1 การวิเคราะห์แรงสำหรับการส่งวัตถุระหว่างมนุษย์กับมนุษย์ (FORCE ANALYSIS OF HUMAN-TO-HUMAN OBJECT HANDOVER).....	42
3.2 การออกแบบระบบการศึกษาพฤติกรรมส่งวัตถุระหว่างมนุษย์กับมนุษย์ (HUMAN-TO-HUMAN OBJECT HANDOVER).....	44
3.2.1 เซนเซอร์ตรวจวัดแรงและแรงบิด ATI: 6-AXIS FORCE AND TORQUE SENSOR (MINI40 IP65/IP68 SERIES).....	45
3.2.2 เซนเซอร์ตรวจจับภาพ Asus Xtion Pro Live .....	46
3.2.3 ระบบการตรวจจับวัตถุ (Object detection system).....	46
3.2.4 วัตถุสำหรับการทดลอง .....	48
3.3 การออกแบบระบบการศึกษาพฤติกรรมส่งวัตถุระหว่างมนุษย์กับหุ่นยนต์ (HUMAN-TO-ROBOT OBJECT HANDOVER) .....	49
3.3.1 ระบบการตรวจจับแรง (Force/Torque system).....	50
3.4 รูปแบบการเชื่อมโยงซอฟต์แวร์ (SOFTWARE ARCHITECTURE) .....	51
3.4.1 รูปแบบการเชื่อมโยงซอฟต์แวร์ของการศึกษาพฤติกรรมส่งวัตถุระหว่างมนุษย์กับมนุษย์ (Software architecture of HHH).....	51
3.4.2 รูปแบบการเชื่อมโยงซอฟต์แวร์ของการศึกษาพฤติกรรมส่งวัตถุระหว่างมนุษย์กับหุ่นยนต์ (Software architecture of HRH).....	52
3.5 จลศาสตร์ของหุ่นยนต์ HSR (KINEMATICS OF HSR).....	53
3.5.1 ระบบจัดการความร่วมมือทั้งร่างกาย (Whole-body cooperative manipulation system).....	53



3.6 การควบคุมอิมพีแดนซ์ HSR (IMPEDANCE CONTROL) .....	57
<b>บทที่ 4 วิธีการทดลองและผลการทดลอง .....</b>	<b>59</b>
4.1 การศึกษาและวิเคราะห์พฤติกรรมการส่งวัตถุระหว่างมนุษย์กับมนุษย์ (HHH).....	60
4.1.1 การทดลองที่ 1 การศึกษาและวิเคราะห์ลำดับพฤติกรรมการส่งวัตถุระหว่างมนุษย์กับมนุษย์ (Behaviour sequence of HHH) .....	62
4.1.2 การทดลองที่ 2 การศึกษาและวิเคราะห์ตำแหน่งการถ่ายโอนวัตถุในการปฏิสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์กับมนุษย์ (The location of the object transfer in HHH) 65	
4.1.3 การทดลองที่ 3 การศึกษาและวิเคราะห์แรงปฏิสัมพันธ์ในขณะถ่ายโอนวัตถุ (Analysis of the bilateral force in the transfer phase).....	70
4.2 การออกแบบกรอบแนวความคิดในการศึกษาพฤติกรรมการส่งวัตถุระหว่างมนุษย์กับหุ่นยนต์ (HRH) จากการศึกษาและวิเคราะห์พฤติกรรมการส่งวัตถุของมนุษย์ (HHH).....	74
4.3 การศึกษาและวิเคราะห์พฤติกรรมการส่งวัตถุระหว่างมนุษย์กับหุ่นยนต์ (HRH).....	75
4.3.1 การศึกษาความปลอดภัยจากการควบคุมหุ่นยนต์ด้วยการควบคุมแบบอิมพีแดนซ์สำหรับการส่งวัตถุให้แก่มนุษย์ (Force-Impedance Control for safe Human-to-robot handovers).....	77
4.3.2 การออกแบบกรอบการทำงานการส่งวัตถุของหุ่นยนต์จากการควบคุมแบบอิมพีแดนซ์ให้มีพฤติกรรมที่เทียบเคียงกับมนุษย์ .....	78
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....</b>	<b>89</b>
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	89
5.2 ปัญหาและแนวทางแก้ไข .....	90
5.3 แนวทางการพัฒนาต่อไป .....	90
<b>บรรณานุกรม.....</b>	<b>92</b>
<b>ภาคผนวก ก ข้อมูลจำเพาะหุ่นยนต์บริการและอุปกรณ์เสริม.....</b>	<b>98</b>
<b>ภาคผนวก ข ส่วนประกอบของหุ่นยนต์และอุปกรณ์เสริม .....</b>	<b>104</b>
<b>ภาคผนวก ค การเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่างๆกับ ROS.....</b>	<b>111</b>
<b>ภาคผนวก ง บทความทางวิชาการ.....</b>	<b>116</b>
<b>ประวัติผู้เขียน.....</b>	<b>130</b>

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1-1 รูปแบบการทดลอง HRH โดยการเปลี่ยนแปลงเฉพาะค่าคงที่ของตัวหน่วง [1].....	2
รูปที่ 1-2 รูปแบบการทดลองการควบคุมหุ่นยนต์ที่ช่วยถือวัตถุร่วมกันกับมนุษย์ [2].....	3
รูปที่ 1-3 รูปแบบการทำงานของหุ่นยนต์ KUKA LBR [3] .....	4
รูปที่ 1-4 รูปแบบการทดลองโดยการเรียนรู้การส่งวัตถุระหว่างมนุษย์กับมนุษย์ [4] .....	5
รูปที่ 1-5 รูปแบบการทดลอง HRH ที่ได้จากอัลกอริทึม PI control และ FLC [5].....	5
รูปที่ 2-1 รูปแบบการทดสอบการส่งวัตถุ [6].....	9
รูปที่ 2-2 โมเดลอิมพีแดนซ์ของแขนมนุษย์ [6].....	10
รูปที่ 2-3 รูปแบบการทดสอบการส่งวัตถุ [7].....	10
รูปที่ 2-4 (a) การทดสอบการศึกษาพฤติกรรมต่างๆจากประสาทสัมผัสต่างๆของการส่งวัตถุของมนุษย์ .....	11
รูปที่ 2-5 แผนผังจำลองการปฏิสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์กับมนุษย์ [9].....	11
รูปที่ 2-6 การทำงานร่วมกันระหว่างมนุษย์และหุ่นยนต์ (Human-Robot cooperative task) [10] .....	12
รูปที่ 2-7 แสดงถึงลักษณะการทำงานของหุ่นยนต์ร่วมกับที่จับประตู่ [11].....	13
รูปที่ 2-8 Schematic การทำความสะอาดที่จับราวบันไดโดยใช้แขนหุ่นยนต์ [12].....	13
รูปที่ 2-9 ลักษณะการทำงานของหุ่นยนต์ในการหยิบจับวัตถุโดยใช้ Impedance Control [13] .....	14
รูปที่ 2-10 แสดงถึงลักษณะการทำงานของหุ่นยนต์ทำงานร่วมกันกับมนุษย์ [14].....	15
รูปที่ 2-11 การทดลองสำหรับการตรวจจับวัตถุ [15] .....	15
รูปที่ 2-12 แสดงการทำงานของหุ่นยนต์ร่วมกับมนุษย์ [16].....	16
รูปที่ 2-13 หุ่นยนต์ Human Support Robot (HSR) [17] .....	17
รูปที่ 2-14 การใช้งาน HSR (a) ช่วยเหลือผู้พิการ, (b) ควบคุมจากทางไกลได้, (c) ทำงานบ้าน [17] 17	17
รูปที่ 2-15 ความสามารถต่าง ๆ ของตัวทำงานส่วนปลาย [17].....	18
รูปที่ 2-16 แสดงถึงข้อต่อและลิงค์ต่างๆ รวมถึงตำแหน่งของเซนเซอร์ ของหุ่นยนต์ HSR [17].....	19
รูปที่ 2-17 การหยิบจับวัตถุ สามทิศทาง [17] .....	19
รูปที่ 2-18 แสดงการทำงานของหุ่นยนต์ร่วมกับมนุษย์ [17] .....	20
รูปที่ 2-19 โครงสร้างของระบบซอฟต์แวร์ [17].....	21
รูปที่ 2-20 แสดงตัวอย่างเวกเตอร์ของเมทริกซ์การแปลงมี 2 กรอบอ้างอิง .....	22

รูปที่ 2-21 แสดงตัวอย่างเวกเตอร์ของเมทริกซ์การแปลงที่มี 3 กรอบอ้างอิง .....	23
รูปที่ 2-22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพอร์เวิร์สคิเนมาติกส์และอินเวิร์สคิเนมาติกส์ของ Joint space และ Cartesian space [18].....	23
รูปที่ 2-23 ลักษณะการอ้างอิงมุมแบบโรลล์-พิทช์-ยอร์ว (Roll-Pitch-Yaw) [18] .....	25
รูปที่ 2-24 แสดงตัวอย่างการกำหนดข้อต่อและลิงค์ [18].....	25
รูปที่ 2-25 แผนภาพบล็อกสำหรับการควบคุมแบบอิมพีแดนซ์ [19].....	28
รูปที่ 2-26 แผนภาพบล็อกการควบคุมแรงแบบเอกซ์พลีซิที (Explicit force control) [20] .....	29
รูปที่ 2-27 แผนภาพบล็อกการควบคุมแรงแบบอิมพลีซิที (Implicit force control) [20].....	29
รูปที่ 2-28 แผนผังการควบคุมแรงแบบ External force control [22].....	30
รูปที่ 2-29 กราฟแสดงความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter) .....	32
รูปที่ 2-30 สัญญาณสื่อสารขาเข้าและสัญญาณขาออกหลังผ่านการกรองสัญญาณ [24].....	33
รูปที่ 2-31 แผนภาพการเชื่อมต่อของ ROS [29] .....	37
รูปที่ 2-32 การแสดง TF ของระบบหุ่นยนต์ [29].....	37
รูปที่ 2-33 รูปการสร้างโมเดลหุ่นยนต์ด้วย URDF [29].....	38
รูปที่ 2-34 แผนผังแสดงการทำงานของแพ็คเกจ Robot state publisher.....	38
รูปที่ 2-35 รูปแบบการวิเคราะห์ Single neural network ของ YOLO [30].....	39
รูปที่ 3-1 โมเดลจำลองเชิงกล [31] .....	43
รูปที่ 3-2 รูปแบบการเชื่อมโยงของระบบ HHH .....	45
รูปที่ 3-3 การเชื่อม The Net F/T system กับ เซนเซอร์ [32].....	46
รูปที่ 3-4 เซนเซอร์ตรวจจับภาพ Asus Xtion Pro Live [33].....	46
รูปที่ 3-5 ตัวอย่างการตรวจจับวัตถุของหุ่นยนต์ HSR (Object detection).....	47
รูปที่ 3-6 ตัวอย่างแสดงการทำงานของ YOLO.....	48
รูปที่ 3-7 วัตถุที่ใช้ในการทดลอง.....	48
รูปที่ 3-8 (a) ฝาปิด มวลโลหะที่นำมาเพิ่มน้ำหนัก (b) ลักษณะของขวด.....	48
รูปที่ 3-9 (a) งานยี่ดระหว่างเซนเซอร์วัดแรงและขวด (b) ก้อนโลหะเพื่อเพิ่มมวลของขวด .....	49
รูปที่ 3-10 รูปแบบการเชื่อมโยงของระบบ HRH .....	49
รูปที่ 3-11 แผนภาพเชื่อมโยงการทำงานของ HRH .....	50
รูปที่ 3-12 ตัวอย่างแสดงถึงทิศทางของแรงดึง.....	51
รูปที่ 3-13 ตัวอย่างแสดงถึงทิศทางของแรงบีบ .....	51
รูปที่ 3-14 รูปแบบการเชื่อมโยงซอฟต์แวร์ HHH [31].....	52
รูปที่ 3-15 รูปแบบการเชื่อมโยงซอฟต์แวร์ HRH [34] .....	53

รูปที่ 3-16 กลไกการขับเคลื่อนแบบล้อคู่ [17].....	53
รูปที่ 3-17 แผนผังลำดับระบบจัดการความร่วมมือของหุ่นยนต์ [17].....	54
รูปที่ 3-18 แสงผลลัพธ์ของการวางแผนวิธีการเคลื่อน (a) การทำงานส่วนปลายไปตามเส้นตรง หรือ (b) วิธีที่จะเคลื่อนที่ไปตามเส้นโค้งวงกลม โดยกำหนดองศาอิสระของฐาน HSR [17].....	56
รูปที่ 3-19 เซนเซอร์ LIDAR [17] .....	57
รูปที่ 3-20 แผนภาพแสดงการควบคุมแบบอิมพีแดนซ์ [35] .....	58
รูปที่ 4-1 วัตถุที่ใช้และพฤติกรรมที่ส่งสำหรับการทดลองของ HHH [31] .....	61
รูปที่ 4-2 รูปแบบการส่งมอบวัตถุระหว่างมนุษย์กับมนุษย์ [31].....	63
รูปที่ 4-3 ตัวอย่างผลการทดลองการปรับเปลี่ยนน้ำหนักของวัตถุ.....	63
รูปที่ 4-4 โพรไฟล์วิถีความนิ่มนวลที่สุดของกระจัด, ความเร็ว, และความเร่ง [31].....	64
รูปที่ 4-5 แบบจำลองวิถีความนิ่มนวลที่สุด (MJT) [41].....	65
รูปที่ 4-6 แรงปฏิสัมพันธ์ที่เกิดจากผู้ส่ง ( $fa$ ) และผู้รับ ( $fl$ ) [44] .....	71
รูปที่ 4-7 วัตถุที่มีน้ำหนักที่แตกต่างกันมีผลต่อแรงในแนวนอน .....	71
รูปที่ 4-8 (a) การกระจัด ( $u$ ) และวิถีของแรงปฏิสัมพันธ์ ( $y$ ).....	74
รูปที่ 4-9 ลักษณะและท่าทางสำหรับการทดสอบของ HRH.....	76
รูปที่ 4-10 โครงสร้างของตัวทำงานส่วนปลายของหุ่นยนต์ HSR [46].....	77
รูปที่ 4-11 พารามิเตอร์อิมพีแดนซ์สำหรับแบบจำลองของแขนมนุษย์ [6] .....	79
รูปที่ 4-12 $K = 0$ นิวตันเมตรต่อเรเดียน เปลี่ยนแปลงเฉพาะค่า $D$ .....	81
รูปที่ 4-13 $D = 0$ นิวตันเมตรวินาทีต่อเรเดียน เปลี่ยนแปลงเฉพาะค่า $K$ .....	82
รูปที่ 4-14 $D = 50$ นิวตันเมตรวินาทีต่อเรเดียน เปลี่ยนแปลงเฉพาะค่า $K$ .....	85
รูปที่ 4-15 $D = 75$ นิวตันเมตรวินาทีต่อเรเดียน เปลี่ยนแปลงเฉพาะค่า $K$ .....	86
รูปที่ 4-16 เปรียบเทียบโพรไฟล์การส่งวัตถุที่ใกล้เคียงกัน .....	87
รูปที่ 4-17 เปรียบเทียบโพรไฟล์การส่งวัตถุ .....	87
รูปที่ ข-0-1 หุ่นยนต์ Human support robot .....	105
รูปที่ ข-0-2 เซนเซอร์วัดแรง ATI .....	106
รูปที่ ข-0-3 แผนภาพโครงสร้างของการติดตั้งเซนเซอร์ .....	106
รูปที่ ข-0-4 ข้อควรระวังและการใช้งานเบื้องต้น .....	106
รูปที่ ข-0-5 แผนภาพโครงสร้างของเซนเซอร์ด้านข้าง .....	107
รูปที่ ข-0-6 แผนภาพโครงสร้างของเซนเซอร์.....	107
รูปที่ ข-0-7 แผนภาพการประกอบขวด.....	108
รูปที่ ข-0-8 แผนภาพของขวดส่วนบน .....	108

รูปที่ ข-0-9 แผนภาพของขวดส่วนล่าง.....	109
รูปที่ ข-0-10 แผนภาพของฝาปิดมวล.....	109
รูปที่ ข-0-11 แผนภาพแผ่นงานยึดติดระหว่างตัวขวดกับเซนเซอร์วัดแรง .....	110
รูปที่ ค-0-1 การเชื่อมต่อเซนเซอร์วัดแรงกับ ROS.....	112
รูปที่ ค-0-2 ข้อมูลที่ได้จากเซนเซอร์ที่แสดงบนหน้า terminal.....	113
รูปที่ ค-0-3 เว็บไซต์ของหุ่นยนต์ HSR [48].....	113
รูปที่ ค-0-4 การเชื่อมต่อหุ่นยนต์แบบใช้สาย [48].....	114
รูปที่ ค-0-5ค่า ping แสดงการเชื่อมต่อของหุ่นยนต์ [48] .....	114
รูปที่ ค-0-6 การควบคุมหุ่นยนต์ผ่านหน้าเว็บเบราว์เซอร์ [48].....	115

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2-1 ข้อกำหนดพื้นฐานของหุ่นยนต์ HSR .....	20
ตารางที่ 4-1 ความสัมพันธ์ของส่วนสูงของแต่ละบุคคลที่ขึ้นกับระยะการกระจัดในการส่งวัตถุใน แนวนอน ( $x$ -direction).....	66
ตารางที่ 4-2 ความสัมพันธ์ของส่วนสูงของแต่ละบุคคลที่ขึ้นกับระยะการกระจัดในการส่งวัตถุใน แนวตั้ง ( $y$ -direction).....	67
ตารางที่ 4-3 ผลลัพธ์จากการใช้ One-way ANOVA [31].....	68
ตารางที่ 4-4 ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยโดยประมาณและผลลัพธ์ของ One-way ANOVA [31] .....	69
ตารางที่ 4-5 ผลลัพธ์ค่าเฉลี่ยของแรงปฏิสัมพันธ์และเวลาในการถ่ายโอนวัตถุ [31].....	72
ตารางที่ 4-6 ความสัมพันธ์ของเวลาในการถ่ายโอนวัตถุกับมวลของวัตถุที่เปลี่ยนแปลงไป [31].....	72
ตารางที่ 4-7 ผลลัพธ์จากการเปลี่ยนแปลงตัวแปรค่าคงที่ของสปริง (K) และตัวหมุนง (D) [34] .....	78
ตารางที่ 4-8 ผลการทดลอง (a) เปลี่ยนแปลงเฉพาะ D (b) เปลี่ยนแปลงเฉพาะ K.....	83
ตารางที่ 4-9 ผลการทดลองการกำหนดค่าคงที่ของตัวหมุนง.....	86
ตารางที่ ก-1 รายละเอียดของหุ่นยนต์ Human Support Robot.....	99
ตารางที่ ก-2 รายละเอียดของหุ่นยนต์ Human Support Robot.....	100
ตารางที่ ก-3 รายละเอียดของหุ่นยนต์ Human Support Robot.....	101
ตารางที่ ก-4 รายละเอียดของ joint.....	101
ตารางที่ ก-5 รายละเอียดของ ATI: 6-AXIS FORCE AND TORQUE SENSOR.....	102
ตารางที่ ก-6 รายละเอียดของกล้อง Asus Xtion pro live 3d sensor .....	103

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

ณ ปัจจุบัน หุ่นยนต์มีบทบาทและหน้าที่เป็นอย่างมากในภาคอุตสาหกรรม การเกษตร และการบริการ เนื่องจากหุ่นยนต์สามารถทำงานในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกันหรือแม้แต่สภาวะแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม สามารถทำงานที่ซ้ำไปซ้ำมาในระยะเวลาที่ยาวนาน และมีความแม่นยำในการทำงานมากกว่ามนุษย์ แต่บางครั้งหุ่นยนต์ประเภทอาศัยการโปรแกรมลักษณะจับสิ่งของ (Pick and Place) ก็ไม่เหมาะสมที่จะทำงานที่มีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของงานบ่อยๆหรือตัวงานที่มีลักษณะมีความยืดหยุ่นมากๆได้ จึงทำให้เริ่มมีการพัฒนาระบบที่ทำให้หุ่นยนต์มีความฉลาดมากยิ่งขึ้น โดยหนึ่งในความท้าทายอย่างหนึ่งคือการพัฒนาหุ่นยนต์ให้สามารถทำงานร่วมกันกับมนุษย์อย่างมีประสิทธิภาพหรือที่เรียกว่า Human-Robot cooperation งานลักษณะแบบนี้ต้องการผสมผสานความสามารถ การตัดสินใจของมนุษย์ร่วมกันกับความสามารถในการทำงานที่แม่นยำของหุ่นยนต์ จากแนวคิดนี้จึงมีการนำความสามารถของเครื่องจักรหรือหุ่นยนต์มาช่วยในการทำงานในลักษณะการปฏิสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์และหุ่นยนต์ (Human-Robot Interaction : HRI) โดยวัตถุประสงค์เพื่อให้ทีมดองานนำมาศึกษาการใช้งานและพัฒนาต่อยอดให้หุ่นยนต์ พัฒนาฟังก์ชันการทำงานที่หลากหลายที่รองรับกับการทำงานจริงร่วมกับมนุษย์ (Human-to-Robot Interaction : HRI) ในสถานการณ์ต่างๆ ให้มีประสิทธิภาพการทำงานมากยิ่งขึ้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ ผลผลิต และคุณภาพของงาน ดังจะเห็นได้ในปัจจุบันที่มีการนำเครื่องจักรหรือหุ่นยนต์ และระบบอัตโนมัติเข้ามาประยุกต์ใช้ในชีวิตของมนุษย์อย่างมาก เช่น หุ่นยนต์ดูดฝุ่นหรือหุ่นยนต์ดูแลผู้ป่วยที่ใช้ภายในบ้าน โดรนฉีดสารเคมีที่ใช้ในทางการเกษตร หุ่นยนต์ลำเลียงสินค้าที่ใช้ในทางอุตสาหกรรม และหุ่นยนต์ที่ช่วยในการถือกล่องผ่าตัดที่ใช้ทางการแพทย์ ฯลฯ จากความสำคัญดังกล่าว จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้

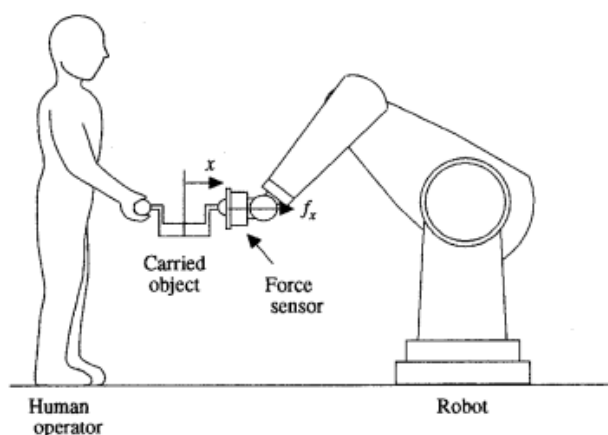
สืบเนื่องจากทีมดองาน คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชาเครื่องกล มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ได้รับมอบหุ่นยนต์บริการ (Service robot) ที่มีชื่อว่า Human Support Robot (HSR) หุ่นยนต์ HSR เป็นหุ่นยนต์มาตรฐานอุตสาหกรรมที่มี 8 องศาอิสระ (Degree of freedom : DOF) ที่ประกอบไปด้วยแขน 4 องศาอิสระ, มือจับ 1 องศาอิสระ, และฐาน 3 องศาอิสระ ซึ่งเป็นหุ่นยนต์ของบริษัท TOYOTA ที่ถูกออกแบบมาเพื่อให้มีวัตถุประสงค์ในการบริการและอำนวยความสะดวกต่างๆ ให้กับคนใช้, ผู้สูงอายุ, หรือเป็นหุ่นยนต์บริการภายในสถานที่ต่างๆ เช่น บ้าน, ห้อง, หรือโรงพยาบาล

ในปี 2018 ทีมดองานได้เข้าร่วมการแข่งขัน World Robot Summit 2018 ณ ประเทศญี่ปุ่น และในการแข่งขันมีหลายภารกิจ ได้แก่ การรับคำสั่งเสียงจากผู้ใช้งาน การค้นหาด้วยการตรวจจับวัตถุตามคำสั่งของผู้ใช้งาน (Objects detection Task) การหยิบจับวัตถุและนำไปวางวัตถุตามคำสั่งของ

ผู้ใช้งานที่สั่งไว้ ฯลฯ จากความผิดพลาดในการแข่งขันที่ผ่านมาในทางที่พบปัญหาที่หุ่นยนต์ส่งวัตถุให้มนุษย์ที่ไม่เป็นธรรมชาติส่งผลให้วัตถุที่ส่งเสียหาย หรือพลัดตกลงพื้นในหลายๆ ครั้ง กล่าวคือ ปัญหาของภารกิจนี้คือ การส่งวัตถุให้แก่มนุษย์ยังไม่มีประสิทธิภาพเท่าที่ควร อันเนื่องมาจากผู้รับจะต้องออกแรงในการดึงวัตถุในปริมาณที่มากเพื่อทำให้หุ่นยนต์ปล่อยวัตถุ หุ่นยนต์ไม่มีการเคลื่อนไหวและการเคลื่อนที่ตามแรงที่มากระทำต่อวัตถุ รวมถึงพฤติกรรมท่าทางการส่งวัตถุและตำแหน่งการส่งวัตถุที่ไม่สอดคล้องกับผู้รับ ทำให้ภารกิจนี้ไม่เป็นไปอย่างธรรมชาติ ทางผู้วิจัยจึงได้นำภารกิจหุ่นยนต์ส่งวัตถุให้มนุษย์ (Human-Robot Handover : HRH) ที่เป็นหน้าที่หลักของหุ่นยนต์บริการที่ต้องอำนวยความสะดวกในการส่งวัตถุ หรือสิ่งของต่างๆ ให้กับผู้สูงอายุ, คนใช้ติดเตียง, หรือผู้พิการ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นการศึกษาและพัฒนาระบบหุ่นยนต์ให้สามารถทำงานในลักษณะเช่นเดียวกับพฤติกรรมของมนุษย์ และสิ่งสำคัญต้องไม่ทำอันตรายหรือสร้างความเสียหายแก่สิ่งของ, มนุษย์, และสภาพแวดล้อม

จากการทบทวนวรรณกรรมที่ผ่านมา พบว่างานวิจัยทางด้านการพัฒนาหุ่นยนต์ในการส่งของให้มนุษย์ (Human-robot handover: HRH) มีอยู่อย่างจำกัด และเป็นงานวิจัยที่ค่อนข้างท้าทายในปัจจุบัน จากการศึกษาในงานวิจัยของหลาย ๆ กลุ่มวิจัยดังตัวอย่างต่อไปนี้

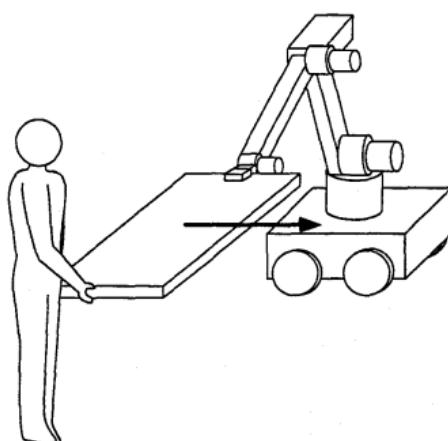
งานวิจัยของ Ryojun Ikeura และคณะ [1] นำเสนอวิธีการควบคุมอิมพีแดนซ์แบบแปรผันของหุ่นยนต์เพื่อทำงานร่วมกับมนุษย์ และทำการปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ในระบบควบคุมแรงเพื่อแสดงให้เห็นการทำงานร่วมกันระหว่างหุ่นยนต์กับมนุษย์ นี้ลักษณะการทำงานที่ดีที่สุด โดยเปลี่ยนแปลงเฉพาะค่าคงที่ของตัวหน่วง (Damping) เท่านั้น และจะทำการส่งวัตถุ ในแนวระนาบเท่านั้น



รูปที่ 1-1 รูปแบบการทดลอง HRH โดยการเปลี่ยนแปลงเฉพาะค่าคงที่ของตัวหน่วง [1]

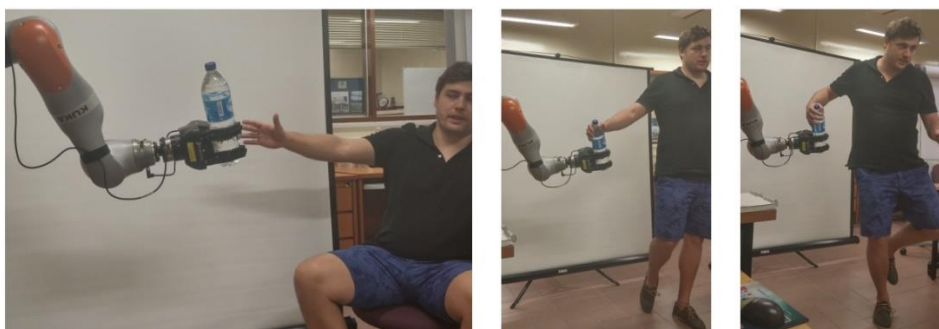


งานวิจัยของ Kazuhiro KOSUGE และคณะ [2] นำเสนออัลกอริทึม (Algorithm) สำหรับระบบควบคุมหุ่นยนต์ที่ช่วยถือวัตถุร่วมกับมนุษย์ในการขนย้ายสิ่งของ โดยระบบของหุ่นยนต์จะถูกออกแบบให้สามารถเคลื่อนย้ายวัตถุไปตามทิศทางของแรงที่ไม่แน่นอน ซึ่งตรวจวัดจากแรงที่กระทำกับวัตถุจากผู้ใช้งาน โดยใช้การควบคุมแรงแบบอิมพีแดนซ์ดังแสดงรูปที่ 1-2 โดยจะทำการทดลองและศึกษาคุณสมบัติต่างๆ เช่น แรงที่กระทำต่อหุ่นยนต์, การควบคุมตำแหน่ง, การควบคุมความเร็ว, และการควบคุมความเร่ง ในการทำการศึกษาและทดลองในงานวิจัยนี้

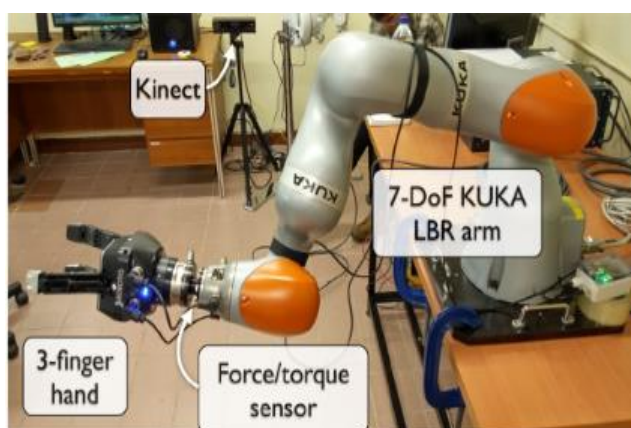


รูปที่ 1-2 รูปแบบการทดลองการควบคุมหุ่นยนต์ที่ช่วยถือวัตถุร่วมกับมนุษย์ [2]

งานวิจัยของ Andras Kupcsik และคณะ [3] กล่าวถึง การพัฒนาอัลกอริทึมและระบบการส่งมอบวัตถุของหุ่นยนต์ เพื่อให้การเคลื่อนไหวของหุ่นยนต์สอดคล้องกับมนุษย์ และมีการหยิบจับที่เหมาะสมกับลักษณะของวัตถุนั้นๆ ดังรูปที่ 1-3 (a) โดยเริ่มจากทำการเรียนรู้การส่งมอบวัตถุจากการตอบสนอง (Feedback) ของมนุษย์ ซึ่งการทดลองนี้จะใช้สองคำถามในการตัดสินใจว่าต้องปรับค่าพารามิเตอร์ในการส่งมอบวัตถุอย่างไร คำถามแรกคือ การส่งมอบวัตถุทำได้หรือไม่ และคำถามที่สองคือ การส่งมอบวัตถุดีขึ้นกว่าเดิมหรือไม่ สองคำถามนี้จะ เป็น Feedback ของมนุษย์ที่จะทำการปรับหรือตั้งค่าพารามิเตอร์การเคลื่อนไหวของหุ่นยนต์ให้สอดคล้องกับมนุษย์ การทดลองนี้จะใช้หุ่นยนต์ KUKA LBR และ Robotic 3-finger ดังรูปที่ 1-3 (b) มีการติด Force/Torque sensor เพื่อให้การวัดแรงและแรงบิดภายนอกมีความแม่นยำ มีการทดลองของงานวิจัยนี้ คือ การวางขวดน้ำ 1.5 ลิตร ไว้ที่ตำแหน่งซึ่งหุ่นยนต์ถูกตั้งโปรแกรมให้ไปรับวัตถุ และจากนั้นหุ่นยนต์จะย้ายขยับไปยังตำแหน่งที่กำหนดไว้ล่วงหน้า และจะใช้ กล้อง Kinect Sensor ดังรูปที่ 1-3 (b) เพื่อตรวจจับตำแหน่งมือของมนุษย์ ต่อจากนั้นจะส่งมอบวัตถุให้สัมพันธ์กับตำแหน่งของมนุษย์ โดยมนุษย์จะทำการตรวจสอบ Feedback และปรับค่าพารามิเตอร์ เพื่อให้มีการทำงานที่ดีที่สุด

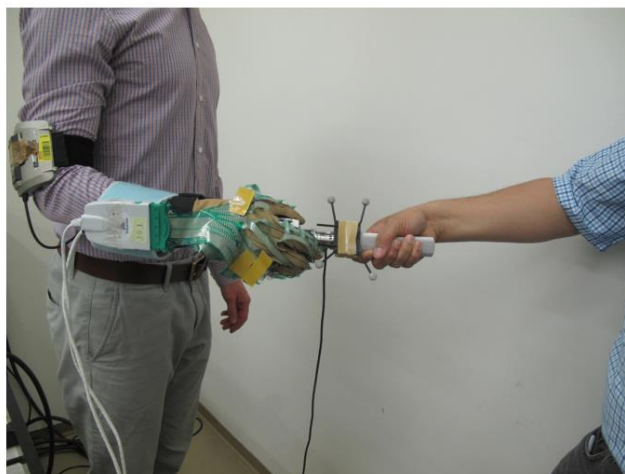


(a) แสดงถึงการส่งวัตถุของหุ่นยนต์ให้มีการเคลื่อนไหวที่สอดคล้องกับมนุษย์



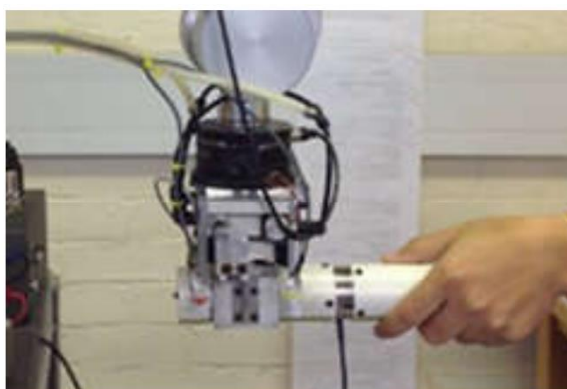
(b) ส่วนประกอบของหุ่นยนต์และอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในการทำการทดลอง  
รูปที่ 1-3 รูปแบบการทำงานของหุ่นยนต์ KUKA LBR [3]

งานวิจัยของ Jos'e R. Medina และคณะ [4] งานวิจัยนี้กล่าวถึง การออกแบบระบบควบคุม หุ่นยนต์สำหรับการส่งวัตถุระหว่างหุ่นยนต์กับมนุษย์ ด้วยการเรียนรู้จากการทดลองการส่งวัตถุระหว่าง มนุษย์กับมนุษย์ โดยเงื่อนไขของการทดลองการส่งวัตถุครั้งนี้ จะต้องเป็นวิธีการส่งวัตถุแบบต่อเนื่องและ ไม่จำกัดเวลา วิธีการทดลองคือ จะทำการเก็บข้อมูลการส่งวัตถุระหว่างมนุษย์กับมนุษย์ก่อน ซึ่งจะให้ ผู้ทำการทดลองคนแรกสวมใส่ถุงมือ Cyberglove ที่มี Force/Torque Sensor สำหรับตรวจวัดแรง และมี Opti Track สำหรับบันทึกท่าทางการเคลื่อนไหวการส่งวัตถุ ผู้ทำการทดลองคนที่สองติด Opti Track ที่บริเวณข้อมือเพื่อทำการบันทึกท่าทางการเคลื่อนไหวการส่งวัตถุเช่นเดียวกัน และผู้ทำการ ทดลองจะสลับกันทำหน้าที่เป็นทั้งผู้รับและผู้ให้ เพื่อเพิ่มการเรียนรู้ให้มากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 1-4



รูปที่ 1-4 รูปแบบการทดลองโดยการเรียนรู้การส่งวัตถุระหว่างมนุษย์กับมนุษย์ [4]

อีกทั้งจากการศึกษางานวิจัยของ Paramin Neranon [5] งานวิจัยนี้เกี่ยวกับการมีปฏิสัมพันธ์กันระหว่างมนุษย์กับหุ่นยนต์ โดยงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงการออกแบบและพัฒนาระบบการส่งวัตถุระหว่างหุ่นยนต์กับมนุษย์ดังรูปที่ 1-5 โดยจะเปรียบเทียบ อัลกอริทึม Proportional Integral (PI) Control และ Fuzzy Logic Control (FLC) สำหรับการควบคุมตำแหน่งหุ่นยนต์อ้างอิงตามแรง (Position-based Force Control) เพื่อควบคุมแรงที่กระทำต่อหุ่นยนต์แบบเรียลไทม์ (Realtime) ซึ่งการทดลองนี้จะเปรียบเทียบแรงปฏิสัมพันธ์กับเวลาการส่งของระหว่างมนุษย์และหุ่นยนต์ที่ใช้ อัลกอริทึมการควบคุมแรงด้วย FLC กับ PI ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าหุ่นยนต์สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและปลอดภัยตรงตามเวลาที่เหมาะสม อีกทั้งพบว่า FLC สามารถชดเชยค่าการเปลี่ยนแปลงในระบบที่ไม่ใช่เชิงเส้นได้ดีกว่า PI ซึ่งส่งผลให้ FLC มีประสิทธิภาพและความเสถียรภาพที่ดีกว่า แต่ทั้งนี้งานวิจัยนี้ทำการศึกษาแค่การส่งของในแกนเดียวเท่านั้น



รูปที่ 1-5 รูปแบบการทดลอง HRH ที่ได้จากอัลกอริทึม PI control และ FLC [5]

จากการทบทวนวรรณกรรมที่กล่าวมาข้างต้นพบว่า งานวิจัยดังกล่าวจะมีข้อจำกัดในการออกแบบตัวควบคุมเชิงพฤติกรรมของหุ่นยนต์สำหรับ HRH การควบคุมแบบอิมพีแดนซ์ส่วนใหญ่จะมีการปรับค่าพารามิเตอร์แค่ตัวเดียว อีกทั้งส่วนใหญ่หุ่นยนต์ที่ถูกนำมาศึกษาในการปฏิสัมพันธ์ร่วมกับมนุษย์ (HRI) มักนิยมใช้หุ่นยนต์อาทิวเลท (Articulated robot) เป็นหุ่นยนต์ถูกติดตั้งอยู่กับที่ และเป็นหุ่นยนต์แบบ 3R กล่าวคือมีข้อต่อทั้ง 3 ตัวเป็นแบบหมุนที่มี 7 DoF ทำให้มีลักษณะการเคลื่อนไหวคล้ายแขนของมนุษย์ โดยหุ่นยนต์ประเภทนี้จะถูกนำมาใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ เป็นจำนวนมาก ส่งผลให้มีงานวิจัยที่ศึกษาหุ่นยนต์ประเภทนี้เป็นจำนวนมาก ดังนั้นงานวิจัยนี้จะประยุกต์ใช้หุ่นยนต์ชนิดเคลื่อนที่ได้ (Mobile robot) ในการปฏิสัมพันธ์ร่วมกับมนุษย์สำหรับการออกแบบกรอบแนวคิดของการควบคุมหุ่นยนต์เชิงพฤติกรรม ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงต้องการศึกษารายละเอียดของพฤติกรรมการส่งวัตถุของมนุษย์ทุกด้าน เช่น ลำดับพฤติกรรมการส่งวัตถุ, ตำแหน่งในการส่งวัตถุ, เวลาในการถ่ายโอนวัตถุ, แรงปฏิสัมพันธ์ขณะถ่ายโอนวัตถุ, และคุณลักษณะฟังก์ชันการถ่ายโอน (Transfer function) ของคนส่ง เพื่อนำไปออกแบบระบบการส่งวัตถุของหุ่นยนต์ให้มีพฤติกรรมการส่งวัตถุอย่างเป็นธรรมชาติ และมีพฤติกรรมที่ใกล้เคียงมนุษย์

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1) ศึกษาและวิเคราะห์พฤติกรรมการส่งวัตถุระหว่างมนุษย์กับมนุษย์เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบระบบควบคุมเชิงพฤติกรรมของหุ่นยนต์
- 2) ออกแบบและพัฒนาอัลกอริทึมในการควบคุมหุ่นยนต์ HSR เชิงพฤติกรรมและการควบคุมตำแหน่งหุ่นยนต์แบบอิมพีแดนซ์สำหรับการส่งวัตถุแก่มนุษย์ได้อย่างเป็นธรรมชาติ และมีพฤติกรรมที่เทียบเคียงกับมนุษย์ รวมถึงไม่มีความเสี่ยงต่อที่จะเกิดอันตรายต่อผู้ใช้งาน

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) ประยุกต์ใช้หุ่นยนต์ HSR สำหรับการส่งวัตถุให้แก่มนุษย์
- 2) กริปเปอร์ (Gripper) ของหุ่นยนต์ HSR มีลักษณะแบบ 2 นิ้ว สามารถหยิบจับวัตถุที่มีน้ำหนักสูงสุดไม่เกิน 1.2 กิโลกรัม และมีเส้นผ่าศูนย์กลางของวัตถุไม่เกิน 130 มิลลิเมตร
- 3) ในงานวิจัยนี้จะศึกษาการส่งวัตถุเสมือนจริงโดยให้ส่งในแนวด้านหน้าของผู้รับในแนวนอน ( $x$ -direction) เป็นหลัก ซึ่งในกรณีที่เหลือหุ่นยนต์จะเคลื่อนไหวตามแรงในแกนนั้นๆด้วยเสมือนการส่งของในชีวิตประจำวัน
- 4) ลักษณะของวัตถุขณะทำการถ่ายโอนจะต้องพยายามให้อยู่ในลักษณะที่ตั้งตรงหรือตั้งฉากกับพื้น ตลอดการวิจัย

5) ออกแบบและพัฒนาระบบการเคลื่อนที่และเคลื่อนไหวของหุ่นยนต์ที่ควบคุมด้วยแรงแบบอิมพีแดนซ์ เนื่องจากให้ระบบหุ่นยนต์ให้มีพฤติกรรมการส่งวัตถุที่เทียบเคียงกับมนุษย์

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้หุ่นยนต์ที่ถูกพัฒนาด้วยอัลกอริทึมการควบคุมเชิงพฤติกรรมที่สามารถส่งวัตถุให้แก่มนุษย์ได้อย่างเป็นธรรมชาติ และมีความปลอดภัย มีระบบควบคุมแรงและสามารถทำให้หุ่นยนต์มีพฤติกรรมได้เทียบเคียงกับมนุษย์มากที่สุด

#### 1.5 ภาพรวมของวิทยานิพนธ์

ภาพรวมของวิทยานิพนธ์ โดยแบ่งเป็นทั้งหมด 5 บทและมีรายละเอียดดังนี้

**บทที่ 1** นำเสนอเกี่ยวกับที่มาและความสำคัญของงานวิจัย การทบทวนเอกสารที่เกี่ยวข้องเบื้องต้น ที่สอดคล้องกับการออกแบบระบบหุ่นยนต์ให้สามารถทำงานร่วมกันกับมนุษย์ได้ รวมถึงวัตถุประสงค์ ขอบเขตของงานวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้

**บทที่ 2** นำเสนอรายละเอียดของทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง โดยมีการทบทวนวรรณกรรมเกี่ยวกับวิธีการส่งมอบวัตถุระหว่างมนุษย์กับมนุษย์ ซึ่งจะเน้นกรอบแนวคิดเชิงพฤติกรรมที่จะนำไปสู่การออกแบบระบบควบคุมของหุ่นยนต์ให้สามารถการทำงานในภารกิจส่งมอบวัตถุหรือสิ่งของระหว่างหุ่นยนต์กับมนุษย์ได้ หลักการทำงานของหุ่นยนต์ หลักการระบุตำแหน่งและวางตัวของหุ่นยนต์ รายละเอียดอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ เช่น เซนเซอร์ตรวจจับแรง เซนเซอร์ตรวจจับภาพ รวมถึงหลักการควบคุมแรงแบบอิมพีแดนซ์ การออกแบบระบบความปลอดภัยในการทำงานร่วมกันระหว่างหุ่นยนต์กับมนุษย์

**บทที่ 3** ระเบียบวิธีการวิจัย ในส่วนนี้จะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลักคือ ส่วนแรกเป็นการนำเสนอขั้นตอนรายละเอียดการศึกษาการวางแผนการออกแบบการทดลองและวิเคราะห์พฤติกรรมการส่งมอบวัตถุระหว่างมนุษย์กับมนุษย์ โดยพิจารณาตำแหน่ง ความเร็ว ความเร่ง เวลาท่าทาง จุดรับส่งวัตถุ และแรงในการรับและส่งของมนุษย์ ส่วนที่สองจะเป็นการออกแบบระบบพัฒนาระบบควบคุมหุ่นยนต์โดยอาศัยกรอบแนวคิดจากพฤติกรรมของมนุษย์ เพื่อให้หุ่นยนต์ HSR ให้สามารถส่งวัตถุแก่มนุษย์ได้อย่างเป็นธรรมชาติ ราบเรียบ โดยมีรายละเอียดเกี่ยวกับการควบคุมแรงแบบอิมพีแดนซ์และหาค่าตัวแปร ที่เหมาะสมกับการทำงานสำหรับหุ่นยนต์ HSR และมีการออกแบบระบบความปลอดภัยที่ไม่ให้มีความเสี่ยงที่จะเกิดอันตรายต่อผู้ใช้

**บทที่ 4** วิธีการทดลองและผลการทดลอง จะนำเสนอเกี่ยวกับวิธีการและผลการทดลอง โดยจะแบ่งการทดลองออกเป็น 2 การทดลองใหญ่ๆ การทดลองที่ 1 เป็นการศึกษากิจกรรมการส่งวัตถุระหว่างมนุษย์กับมนุษย์ โดยจะคำนึงถึงน้ำหนักของวัตถุที่แตกต่างกัน ความสูงของผู้

ทดสอบ ระยะห่างในการส่งวัตถุ ตำแหน่งการหยิบจับวัตถุ เพื่อหาความสัมพันธ์ที่มีผลต่อ ความเร็ว เวลา และ แรงในการส่งวัตถุ การทดลองที่ 2 ทดสอบเพื่อหาค่าตัวแปรของระบบควบคุมอิมพีแดนซ์ที่เหมาะสมเป็นการศึกษาการใช้แรงเป็นตัวควบคุมการเคลื่อนที่และการเคลื่อนไหวของหุ่นยนต์ โดยควบคุมแรงแบบอิมพีแดนซ์จะมีความสัมพันธ์กับตัวแปร เช่น ค่าคงที่ของสปริง (Spring stiffness : K) มวล (Mass : M) และตัวหน่วง (Damping factor : D) ที่ส่งผลต่อแรง (Force) การทดลองที่ 3 เป็นการนำการทดลองที่ 1 และการทดลองที่ 2 มาประยุกต์ร่วมกัน และทดลองหาค่าคงที่ของสปริงและตัวหน่วงที่เหมาะสมกับการทำงานในการส่งวัตถุของหุ่นยนต์ HSR นี้สามารถเทียบเคียงกับมนุษย์ได้อย่างเป็นธรรมชาติ ราบเรียบ และไม่เป็นอันตรายต่อมนุษย์

**บทที่ 5** สรุปผลและเสนอแนะ เป็นการนำเสนอในการสรุปผล การประเมินปัญหา รวมถึงข้อแนะนำในการแก้ไขและพัฒนา

ส่วนสุดท้ายคือ เอกสารการตีพิมพ์เผยแพร่วิทยานิพนธ์ ได้นำเสนอในส่วนของภาคผนวกท้ายเล่ม วิทยานิพนธ์

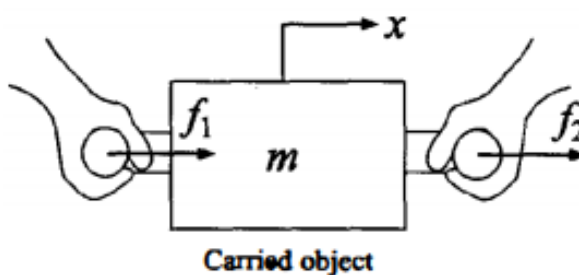
## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

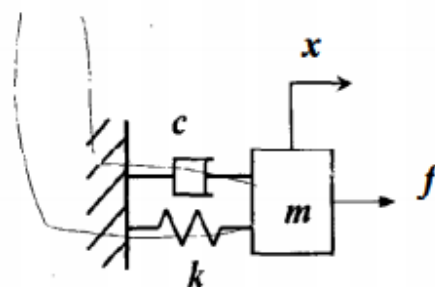
ในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดทฤษฎีและการทบทวนวรรณกรรมสำหรับการออกแบบกรอบการทำงานและพัฒนาระบบการส่งวัตถุของหุ่นยนต์ให้แก่มนุษย์ เพื่อให้เข้าใจและพัฒนาระบบให้ตรงตามเป้าหมาย โดยจะกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยดังนี้ เช่น การส่งของระหว่างมนุษย์กับมนุษย์ (HHH), การส่งของระหว่างมนุษย์กับหุ่นยนต์ (HRH), หุ่นยนต์ HSR, ระบบควบคุมแรงและตำแหน่ง (Force/position Real-time control system), การลดทอนสัญญาณของตัวกรองสัญญาณ (Filter), การวิเคราะห์และการประเมินทางสถิติ, ความปลอดภัยในการทำงานร่วมกันระหว่างมนุษย์กับหุ่นยนต์ (Safety for Human Robot Interaction), และระบบปฏิบัติการสำหรับหุ่นยนต์ (Robot Operating System : ROS)

#### 2.1 การทบทวนวรรณกรรมเกี่ยวกับงานวิจัยทางการส่งของระหว่างมนุษย์กับมนุษย์ (Background of Human-to-Human object handover)

หัวข้อนี้จะกล่าวถึงการทบทวนวรรณกรรมเกี่ยวกับงานวิจัยทางด้านพฤติกรรมกรรมการส่งของระหว่างมนุษย์ งานวิจัยของ M.M. Rahman และคณะ [6] กล่าวว่า การที่จะออกแบบระบบให้หุ่นยนต์สามารถทำงานร่วมกับมนุษย์ได้จำเป็นจะต้องศึกษาลักษณะการทำงานร่วมกันระหว่างมนุษย์ เช่น การถ่ายโอนวัตถุระหว่างมนุษย์กับมนุษย์ จากการศึกษาพบว่าการเคลื่อนย้ายวัตถุได้นั้นจะขึ้นอยู่กับมนุษย์คนใดคนหนึ่งเท่านั้น ที่จะเป็นผู้กำหนดในการส่งวัตถุ และอีกคนจะมีพฤติกรรมขึ้นกับผู้กำหนดและจะมีความสอดคล้องกับการส่งวัตถุดังรูปที่ 2-1 เนื่องจากไดนามิกของแรงจะเปลี่ยนแปลงไปตามแรงและตำแหน่งจากผู้กำหนด ที่สำคัญงานวิจัยนี้กล่าวว่า ลักษณะโครงสร้างทางกายภาพของมนุษย์นั้นมีลักษณะเหมือนกับโมเดลอิมพีแดนซ์ดังรูปที่ 2-2

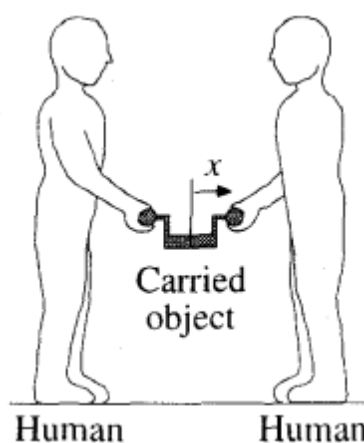


รูปที่ 2-1 รูปแบบการทดสอบการส่งวัตถุ [6]



รูปที่ 2-2 โมเดลอิมพีแดนซ์ของแขนมนุษย์ [6]

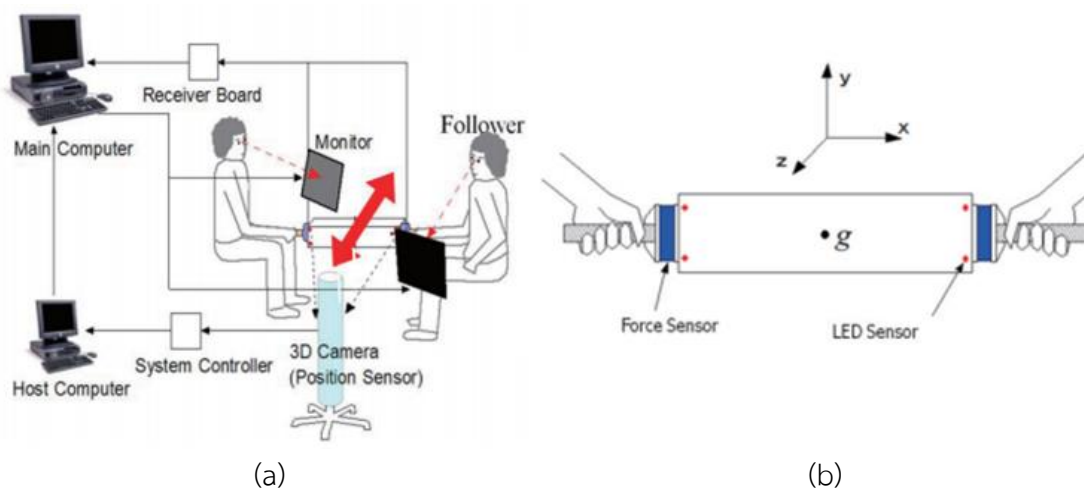
งานวิจัยของ Ryojun Ikeura และคณะ [7] ศึกษาและวิเคราะห์ลักษณะพฤติกรรมของมนุษย์ที่ทำงานร่วมกัน โดยออกแบบการทดลองและศึกษาการปรับเปลี่ยนค่าตัวแปรตัวหน่วง สปริง และมวล มาควบคุมแรงของแขนในการส่งวัตถุของมนุษย์ และผลจากการศึกษาพบว่าลักษณะของมนุษย์เป็นไปตามโมเดลจำลองทาคณิตศาสตร์ ทำให้สามารถนำไปออกแบบการทำงานให้กับหุ่นยนต์ได้ในอนาคต



รูปที่ 2-3 รูปแบบการทดสอบการส่งวัตถุ [7]

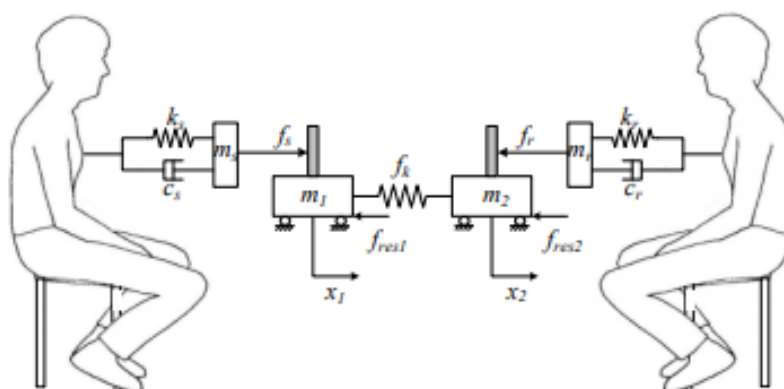
งานวิจัยของ Shahrman Bin Abu Bakar และคณะ [8] กล่าวว่าการทำงานที่จะให้หุ่นยนต์สามารถทำงานร่วมกับมนุษย์ได้อย่างราบรื่นและมั่นใจได้ว่างานจะเสร็จสมบูรณ์ได้จะต้องปราศจากความเครียด (Stress) และความล้า (Fatigue) ต่อมนุษย์ เนื่องจากหุ่นยนต์ไม่รู้จักความรู้สึกของมนุษย์ เราจึงจำเป็นต้องจำลองลักษณะการเคลื่อนไหวของมนุษย์และสอนหุ่นยนต์ให้สามารถทำงานร่วมกับมนุษย์ได้ โดยจะต้องศึกษาจากการทำงานร่วมกันระหว่างมนุษย์กับมนุษย์ โดยพื้นฐานกรอบแนวคิดของมนุษย์จะใช้ทักษะการได้ยิน การเห็นภาพ หรือการสัมผัส เพื่อให้บรรลุภารกิจได้ รูปที่ 2-4 (a-b)





รูปที่ 2-4 (a) การทดสอบการศึกษาพฤติกรรมต่างๆจากประสาทสัมผัสต่างๆของการส่งวัตถุของมนุษย์  
 (b) ลักษณะของวัตถุที่มีการติดตั้งเซ็นเซอร์วัดแรง [8]

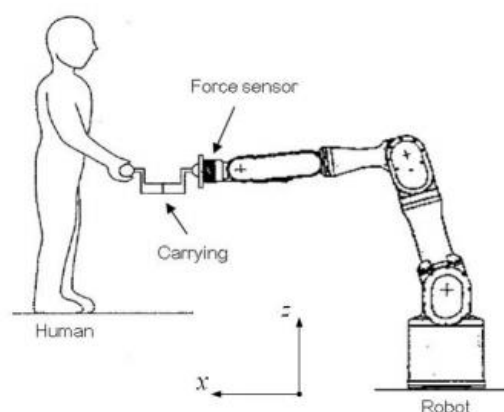
งานวิจัยของ Paramin Neranon และคณะ [9] นี้แนะนำการปฏิสัมพันธ์ร่วมกันระหว่างมนุษย์กับมนุษย์ (Human-human interaction : HHI ) เพื่อนำไปออกแบบการทำงานให้กับหุ่นยนต์ เพื่อให้สามารถทำงานร่วมกันกับมนุษย์ได้ โดยทำการออกแบบจำลองพฤติกรรมของมนุษย์ในการส่งวัตถุระหว่างกันโดยปราศจากการสื่อสารระหว่างกันของมนุษย์ดังรูปที่ 2-5 และผลที่ได้พบว่าลักษณะการออกแรงของมนุษย์สอดคล้องกับรูปแบบโมเดลของ McRuer Crossover



รูปที่ 2-5 แผนผังจำลองการปฏิสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์กับมนุษย์ [9]

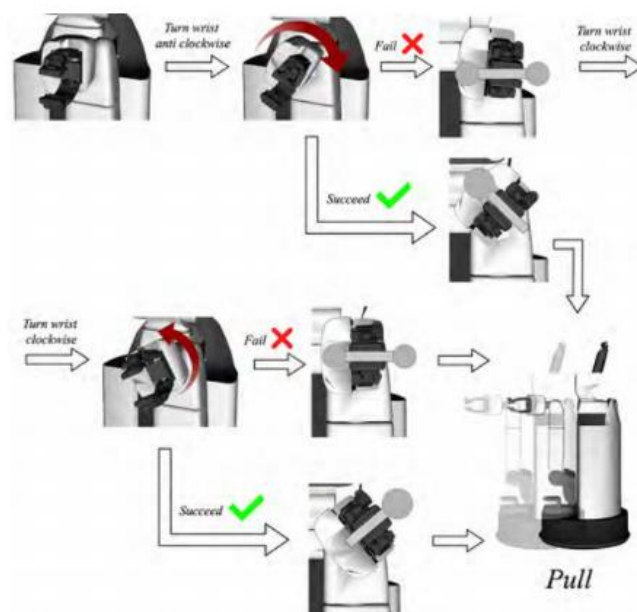
## 2.2 การทบทวนวรรณกรรมเกี่ยวกับงานวิจัยทางการส่งของระหว่างมนุษย์กับหุ่นยนต์ (Background of Human-to-Robot object handover)

จากการศึกษางานวิจัยของ วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ และคณะ [10] ได้เสนอเทคนิคการออกแบบระบบควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์สำหรับการนำหุ่นยนต์ในอุตสาหกรรมมาประยุกต์ใช้ในการทำงานร่วมกับมนุษย์ ดังรูปที่ 2-6 โดยการใช้การควบคุมแบบอิมพีแดนซ์ (Impedance control) ในงานวิจัยนี้จะใช้แขนกลที่มี 6 องศาอิสระ มาทำการควบคุมการทำงาน ซึ่งจะศึกษาและพัฒนาสมการทางคณิตศาสตร์ต่าง ๆ ของแขนกล และสมการพลวัตสำหรับการควบคุมการทำงานของแขนกล โดยจะเปรียบเทียบระบบการทำงานของระบบควบคุมหุ่นยนต์ แบบ Inverse dynamic control กับ Impedance control ในพิกัดการทำงาน แบบ Cartesian space ผลที่ได้คือ ผลของการจำลองการทำงานของระบบควบคุมแบบอิมพีแดนซ์ของแขนกลจะเห็นได้ว่าเป็นไปตามแนวโน้มของสมการและแรงสัมผัสภายนอกที่มากระทำกับส่วนปลายของแขนกล



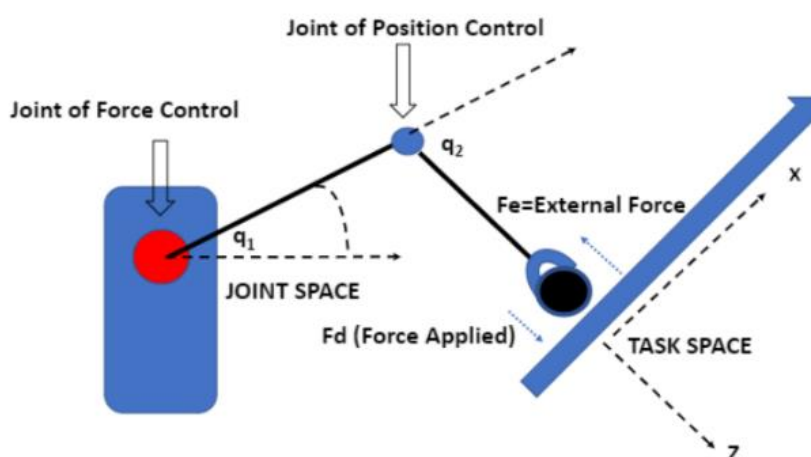
รูปที่ 2-6 การทำงานร่วมกันระหว่างมนุษย์และหุ่นยนต์ (Human-Robot cooperative task) [10]

การศึกษางานวิจัยของ Miguel Arduengo Garcia และคณะ [11] กล่าวว่า หุ่นยนต์บริการภายในบ้านจะทำงานได้ครอบคลุมทั่วทั้งบ้านได้จะต้องสามารถเปิดประตูในแต่ละห้องได้ ซึ่งทางผู้วิจัยจึงได้พัฒนากรอบการทำงานให้กับหุ่นยนต์บริการให้สามารถตรวจจับประตู ที่จับประตู และสามารถประมวลผลสำหรับการประมาณค่าส่วนมือจับ (End-effector) หรือทำทางแบบเรียวลท์มัจจะ ใช้ Impedance control และแพลตฟอร์มต่าง ๆ ในหุ่นยนต์เพื่อให้บรรลุเป้าหมายดังรูปที่ 2-7 ผลที่ได้ คือ ได้แพลตฟอร์มและกรอบการทำงานเบื้องต้น ที่หุ่นยนต์สามารถทำงานร่วมกับประตูพื้นฐานและแพลตฟอร์มและกรอบการทำงานนี้สามารถนำไปพัฒนาต่อยอดแพลตฟอร์มนี้ต่อไป



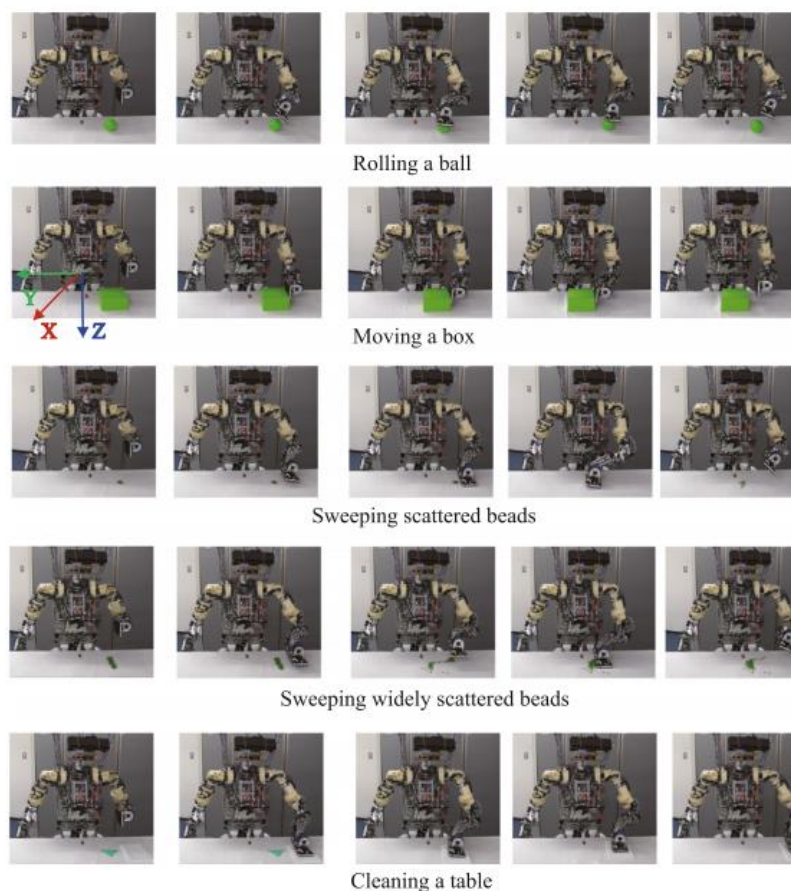
รูปที่ 2-7 แสดงถึงลักษณะการทำงานของหุ่นยนต์ร่วมกับที่จับประตู่ [11]

จากการศึกษางานวิจัยของ Madan Mohan Rayguru และคณะ [12] กล่าวถึงการพัฒนากลยุทธ์ในการปรับตัวสำหรับการควบคุมตำแหน่ง และการควบคุมแรง เพื่อให้หุ่นยนต์สามารถทำความสะอาดที่จับราวบันไดได้ดังรูปที่ 2-8 ผู้วิจัยจึงมีการออกแบบโมเดลการควบคุมแรงแบบใหม่ ซึ่งใช้เทคนิคการหน่วงเวลา (Time Delay Estimation) และใช้ Impedance Filter ลำดับที่สองในการสร้างโมเดลแบบใหม่ ซึ่งมีชื่อว่า Hybrid Impedance Control ทำให้ง่ายต่อการควบคุมตำแหน่งและแรงของหุ่นยนต์



รูปที่ 2-8 Schematic การทำความสะอาดที่จับราวบันไดโดยใช้แขนหุ่นยนต์ [12]

จากการศึกษาวิจัยของ Wataru Takano และคณะ [13] เสนอแนวทางการควบคุมการเคลื่อนไหวทั้งร่างกายของหุ่นยนต์จากการรับรู้ด้วยภาพและแรงปฏิกิริยาจากภายนอก โดยการสร้างกรอบการทำงานของหุ่นยนต์ที่จะตอบสนองแรงปฏิกิริยาจากภายนอก (Impedance control) และการรับรู้ด้วยภาพ ไปควบคุมตำแหน่ง แรง และการเคลื่อนไหวของหุ่นยนต์สำหรับในการหยิบจับวัตถุให้มีพฤติกรรมคล้ายมนุษย์ เพื่อให้บรรลุภารกิจดังรูปที่ 2-9 และจากการพัฒนาทำให้หุ่นยนต์สามารถบรรลุภารกิจได้



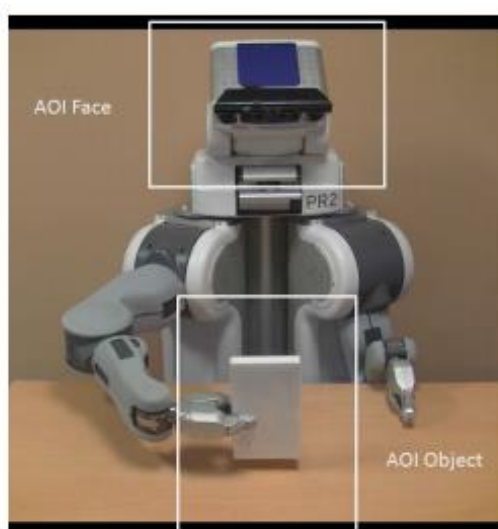
รูปที่ 2-9 ลักษณะการทำงานของหุ่นยนต์ในการหยิบจับวัตถุโดยใช้ Impedance Control [13]

จากการศึกษาวิจัยของ Jun Nakanishi และคณะ [14] เสนอแนวทางการพัฒนาระบบการควบคุมหุ่นยนต์จากระยะไกล (Teleoperation system) สำหรับการสั่งการอัลกอริทึมของจลนศาสตร์ผกผัน (Inverse kinematics) ในการทำงานร่วมกับมนุษย์ (Human-Robots Interaction : HRI) ดังรูปที่ 2-10 ผลจากการศึกษาสามารถควบคุมหุ่นยนต์และใช้อัลกอริทึมในการควบคุมหุ่นยนต์ให้ทำงานร่วมกับมนุษย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เป็นไปอย่างธรรมชาติ และมีการทำงานที่คล้ายคลึงกับมนุษย์



รูปที่ 2-10 แสดงถึงลักษณะการทำงานของหุ่นยนต์ทำงานร่วมกับมนุษย์ [14]

งานวิจัยของ Mamoun Gharbi และคณะ [15] นี้เป็นการศึกษาหุ่นยนต์บริการให้สามารถทำการส่งวัตถุให้แก่มนุษย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพและเป็นธรรมชาติ โดยการใช้การมองเห็นของหุ่นยนต์ช่วยในการส่งวัตถุเพื่อให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น จึงศึกษาถึงตำแหน่งของการเคลื่อนไหวของหัวของหุ่นยนต์เพื่อที่จะให้กล้องที่ถูกติดตั้งอยู่สามารถตรวจจับวัตถุและส่งวัตถุให้แก่มนุษย์ได้อย่างแม่นยำและนำไปช่วยการตัดสินใจและควบคุมการเคลื่อนไหวของหุ่นยนต์ โดยการใช้การเรียนรู้จากพฤติกรรมจากมนุษย์



รูปที่ 2-11 การทดลองสำหรับการตรวจจับวัตถุ [15]

บทความวิจัยของ Prakarn Jaroonsorn และ คณะ [16] เน้นที่การออกแบบกรอบการควบคุม หุ่นยนต์ที่ใช้สำหรับการบรรเทาทุกข์ ที่ทำงานร่วมกันระหว่างมนุษย์กับหุ่นยนต์ โดยจากการพัฒนาการควบคุมแรงและความเร็วภายใน เพื่อนำไปสร้างอัลกอริทึมของหุ่นยนต์ที่สามารถถือสิ่งของร่วมกับมนุษย์ อย่างปลอดภัยและเชื่อถือได้ โดยใช้แรงจากภายนอกในการควบคุมการเคลื่อนไหวของหุ่นยนต์ ที่จะเชื่อมโยงกับการควบคุมการเคลื่อนไหวในรูปแบบ PI



รูปที่ 2-12 แสดงการทำงานของหุ่นยนต์ร่วมกับมนุษย์ [16]

### 2.3 หุ่นยนต์ Human Support Robot (HSR)

Human support robot (HSR) [17] เป็นหุ่นยนต์ที่ถูกใช้งานกันอย่างกว้างขวางในการดูแลผู้สูงอายุหรือการช่วยเหลือการพยาบาล เนื่องจากหุ่นยนต์ HSR เป็นประเภทหุ่นยนต์บริการที่สามารถเคลื่อนที่ได้ (Mobile robot) และมีแขนที่สามารถหยิบจับวัตถุหรือสิ่งของได้ดังรูปที่ 2-13 ทำให้สามารถใช้งานในชีวิตประจำวันและการทำงานได้อย่างอิสระและหลากหลายรูปแบบ ทางโตโยต้ากำลังพัฒนาความสามารถของหุ่นยนต์เหล่านี้ตั้งแต่การทำงานขั้นพื้นฐานจนถึงขั้นสูง เช่น การหยิบจับวัตถุ การนำทางการโต้ตอบกับมนุษย์ หรือแม้กระทั่งการดูแลรักษาและการจัดการด้านสุขภาพ โดย HSR ได้รับการยอมรับในการนำไปใช้ในสถานที่ดูแลผู้สูงอายุ และในบ้านของคนพิการอีกด้วย HSR สามารถควบคุมผ่าน Tablet PC ซึ่งผู้ดูแลและสมาชิกในครอบครัวสามารถสื่อสารกับเจ้าของหุ่นยนต์ผ่าน Skype หรือบริการอื่น ๆ ได้อย่างง่ายดายดังรูปที่ 2-14 ซึ่งส่วนประกอบและรายละเอียดที่สำคัญของหุ่นยนต์ HSR ดังแสดงในหัวข้อต่อไปนี้



รูปที่ 2-13 หุ่นยนต์ Human Support Robot (HSR) [17]



(a)

(b)



(c)

รูปที่ 2-14 การใช้งาน HSR (a) ช่วยเหลือผู้พิการ, (b) ควบคุมจากทางไกลได้, (c) ทำงานบ้าน [17]

### 2.3.1 ส่วนประกอบต่าง ๆ ของหุ่นยนต์ HSR

ตัวทำงาน (Actuator) มีหน้าที่สำหรับขับเคลื่อนโครงสร้างของหุ่นยนต์ให้เคลื่อนที่หรือเคลื่อนไหวได้ ซึ่งหุ่นยนต์ HSR ในงานวิจัยนี้ อาศัยมอเตอร์ในการขับเคลื่อนแต่ละข้อต่อให้เคลื่อนไหวได้

เซ็นเซอร์ (Sensor) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ตรวจสอบสภาพแวดล้อมหรือวัตถุให้กับหุ่นยนต์ เช่น เอ็นโค้ดเดอร์ (Encoders) เป็นเซ็นเซอร์ที่ช่วยให้ทราบค่าตำแหน่งของข้อต่อว่าเคลื่อนที่ไปได้กี่องศา Force/Torque Sensor เป็นเซ็นเซอร์ที่ช่วยให้ทราบค่าแรงต่าง ๆ ที่มากระทำกับเซ็นเซอร์ กล้อง (Camera) เป็นเซ็นเซอร์ที่ช่วยในการตรวจสอบตำแหน่งของวัตถุ เป็นต้น ดังรูปที่ 2-16

ส่วนควบคุม (Controller) เป็นส่วนที่ใช้ในการสั่งการทำงานของหุ่นยนต์ให้ทำงานตามวัตถุประสงค์ที่ได้รับมอบหมาย สามารถกำหนดเป้าหมายการทำงาน โดยมีข้อมูลสภาพแวดล้อมจากเซนเซอร์เป็นตัวป้อนข้อมูลกลับเพื่อบอกให้ทราบถึงการทำงานใน ณ เวลาขณะนั้น

ส่วนประมวลผล (Processor) เป็นส่วนที่มีหน้าที่ในการคำนวณหาค่าต่างๆ ที่ได้มาจากส่วนควบคุม เปรียบเสมือนสมองของหุ่นยนต์ ที่ทำหน้าที่คำนวณ ประมวลผล ตัดสินใจ เปรียบเทียบ ตลอดจนควบคุมการแสดงผลลัพธ์ เป็นต้น

ซอฟต์แวร์ (Software) สามารถแบ่งประเภทได้หลายแบบ คือ (1) ซอฟต์แวร์ระบบ เช่น ระบบปฏิบัติการของคอมพิวเตอร์ (2) ซอฟต์แวร์ประยุกต์ คือ โปรแกรมย่อยของคอมพิวเตอร์ ใช้ในงานเฉพาะ ในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงระบบปฏิบัติการสำหรับหุ่นยนต์ หรือ Robot operating system (ROS) เป็นระบบที่ใช้สำหรับจัดการทำงานและควบคุม ส่วนต่างๆของระบบหุ่นยนต์ให้สามารถทำงานร่วมกันได้

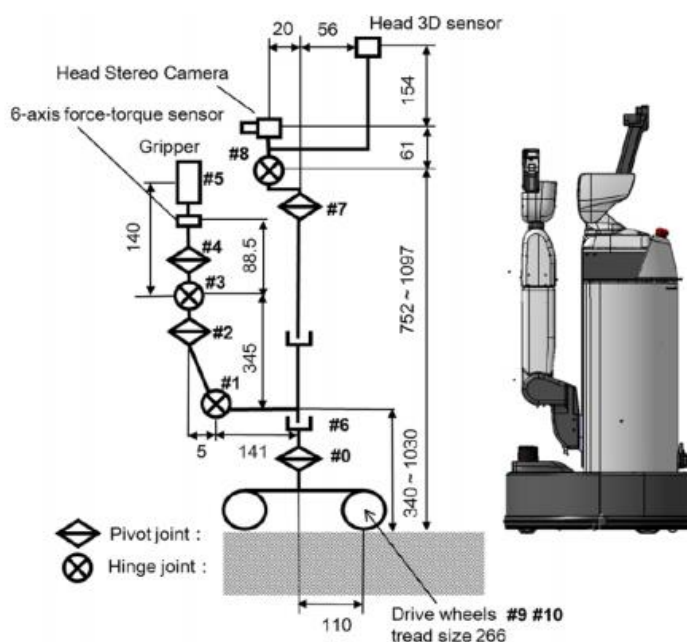
ตัวทำงานส่วนปลาย (End-effector) เป็นส่วนที่อยู่ปลายสุดของหุ่นยนต์ มี ลักษณะแตกต่างกันตามลักษณะงานที่ใช้ เช่น งานหยิบจับวัตถุงานเชื่อมเหล็ก งานพ่นสี เป็นต้น ซึ่งหุ่นยนต์ HSR จะมีลักษณะเป็นมือ แต่มีเพียง 2 นิ้ว (Gripper 2-finger) ไว้สำหรับหยิบจับวัตถุดังรูปที่ 2-15



รูปที่ 2-15 ความสามารถต่าง ๆ ของตัวทำงานส่วนปลาย [17]

โครงสร้างหุ่นยนต์ (Manipulator) ส่วนประกอบของหุ่นยนต์ทุกชิ้น ต่อเข้ารวมกันให้เป็นรูปร่าง ประกอบไปด้วย ลิงค์ (Links) และข้อต่อ (Joints) โดยลิงค์เปรียบเสมือนแขนของหุ่นยนต์ซึ่งระหว่างลิงค์จะมีข้อต่อเชื่อมเข้าด้วยกันดังรูปที่ 2-16 จากรูปพบว่าหุ่นยนต์ HSR มี 8 องศาอิสระ (Degree of Freedom : DoF) ประกอบไปด้วย 3 DoF ที่ฐาน (Mobile base) 4 DoF ที่แขน (Arm) และ 1 DoF ที่ลำตัว (Torso lift)

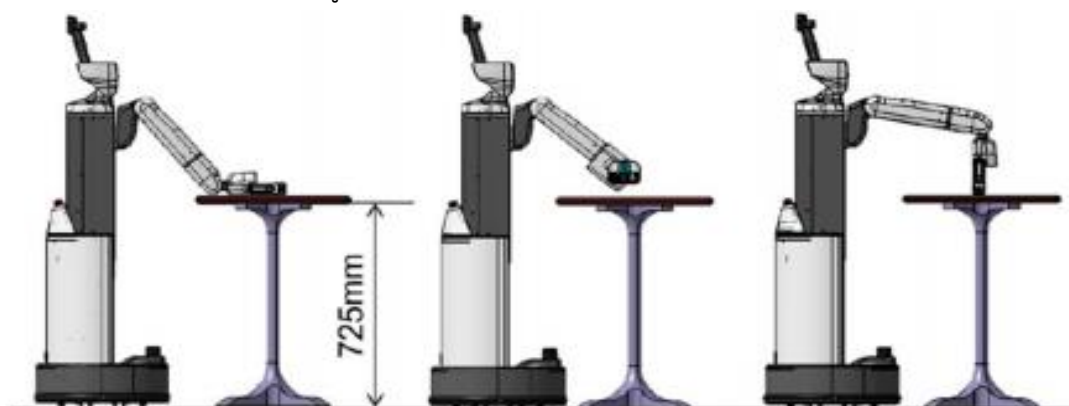




รูปที่ 2-16 แสดงถึงข้อต่อและลิงค์ต่างๆ รวมถึงตำแหน่งของเซนเซอร์ ของหุ่นยนต์ HSR [17]

### 2.3.2 ความสามารถและขีดจำกัดการทำงานของหุ่นยนต์

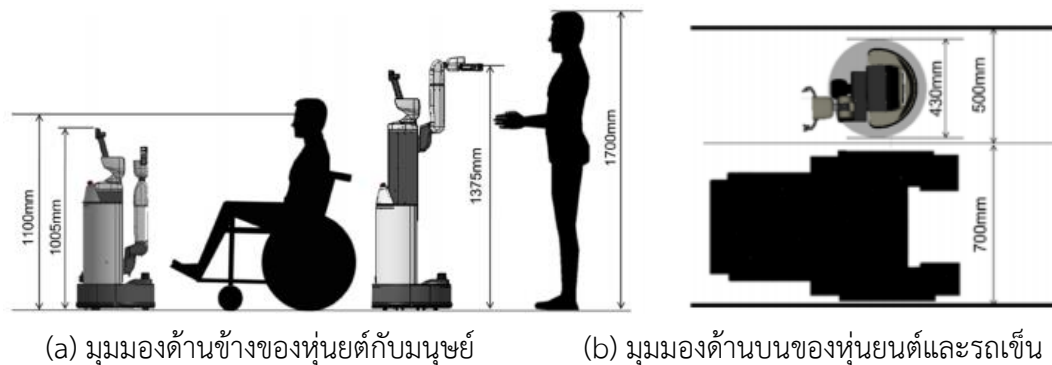
หุ่นยนต์ HSR ถูกออกแบบให้สามารถหยิบวัตถุที่มีน้ำหนักมากที่สุดคือ 1.2 กิโลกรัม เนื่องจากการออกแบบการเคลื่อนไหวของแขน ทำให้สามารถครอบคลุมการหยิบจับวัตถุได้ถึง สามทิศทาง (ด้านบน,ด้านหน้า,ด้านข้าง) ดังรูปที่ 2-17



รูปที่ 2-17 การหยิบจับวัตถุ สามทิศทาง [17]

หุ่นยนต์ HSR สามารถยืดตัวและแขนให้มีความสูงได้สูงสุด 1.35 เมตร เพื่อไว้สำหรับการทำงาน ร่วมกับมนุษย์ขณะยืนอยู่รูปที่ 2-18 (a) และมีการออกแบบให้ความกว้างของหุ่นสามารถทำงานร่วมกับผู้ป่วยที่นั่งรถเข็นได้ด้วยรูปที่ 2-18 (b) โดยหุ่นยนต์จะมีความเร็วในการเคลื่อนที่สูงสุด 0.8

กิโลเมตร/ชั่วโมง และมีระบบประมวลผลความเร็วให้เหมาะสมกับการทำงานนั้นๆ เพื่อความปลอดภัยแก่ผู้ใช้งาน



(a) มุมมองด้านข้างของหุ่นยนต์กับมนุษย์

(b) มุมมองด้านบนของหุ่นยนต์และรถเข็น

รูปที่ 2-18 แสดงการทำงานของหุ่นยนต์ร่วมกับมนุษย์ [17]

หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่ผ่านพื้นที่ต่างระดับได้ 5 มิลลิเมตรและเคลื่อนที่ผ่านพื้นที่ที่มีความชันได้ไม่เกิน 5 องศา ดังนั้นการไหลของหุ่นยนต์ จะมีการเคลื่อนไหวทั้งฐานและแขนไปพร้อมกัน ข้อกำหนดพื้นฐานจะแสดงดังตารางที่ 2-1

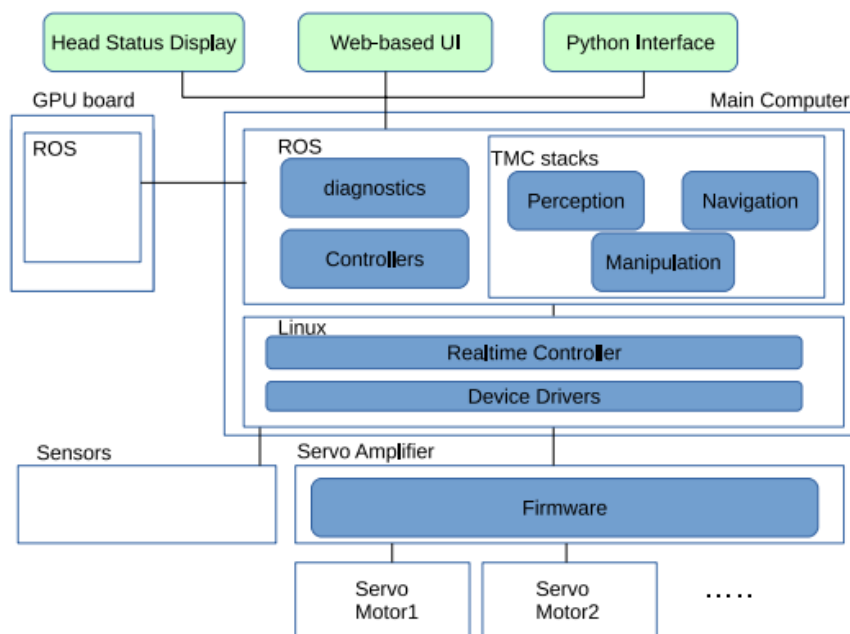
ตารางที่ 2-1 ข้อกำหนดพื้นฐานของหุ่นยนต์ HSR

Height	$\varphi 430 \times 1005$ ( $\sim 1350$ ) mm
Weight	37 kg
Arm length	600 mm
Shoulder height	340 $\sim$ 1030 mm
Grasped object	$\sim 1.2$ kg weight
	$\sim 130$ mm width
Maximum velocity	0.8 km/h
Mobility performance	$\sim$ mm difference in level
	$\sim$ deg slope

### 2.3.3 ซอฟต์แวร์ของหุ่นยนต์HSR

ซอฟต์แวร์ของหุ่นยนต์ HSR ถูกพัฒนาบน ROS (Robot Operating System) โครงสร้างภาพรวมของระบบจะแสดงดังรูปที่ 2-19 ระบบซอฟต์แวร์จะแบ่งออกเป็นสี่ระบบย่อย (1) ระบบย่อยการควบคุมอุปกรณ์ซึ่งก็คือ โครงสร้างโดยกลุ่มของวงจรรขยายเซอร์โว (2) การเคลื่อนไหวควบคุมระบบย่อยซึ่งทำงานแบบเรียลไทม์บนคอมพิวเตอร์หุ่นยนต์ (3) ส่วนย่อยที่ทำงานระดับสูงกว่าซึ่ง

ประกอบด้วยกลุ่มโหนด ROS ก็ดำเนินการบนคอมพิวเตอร์หุ่นยนต์เช่นกันและ (4) ระบบย่อยส่วนต่อประสานผู้ใช้



รูปที่ 2-19 โครงสร้างของระบบซอฟต์แวร์ [17]

- ระบบควบคุมการเคลื่อนไหว (Motion control subsystem)

ระบบควบคุมการเคลื่อนไหวจะเป็นแบบ Real-time ที่ผู้ใช้สามารถสั่งงาน HSR ได้ผ่าน Linux kernel โดยใช้โปรแกรม PREEMPT\_RT สำหรับสื่อสารกับอุปกรณ์ต่างๆและควบคุมอุปกรณ์ต่างๆ ด้วย ROS และหุ่นยนต์ HSR ได้รับการพัฒนาคอนโทรลเลอร์สำหรับฮาร์ดแวร์โดยเฉพาะอีกด้วย เช่น การเคลื่อนที่ของฐานรอบทิศทาง, การควบคุมกริปเปอร์, การควบคุมเซนเซอร์, และการควบคุมตัวทำงานเสริม เป็นต้น โดยจะถูกควบคุมผ่าน ROS เช่นกัน

- ระบบควบคุมอุปกรณ์ (Device control subsystem)

เป็นระบบที่ได้รับคำสั่งจากระบบควบคุมการเคลื่อนไหว เพื่อควบคุมเซอร์โวมอเตอร์และมอเตอร์ผ่าน RS485 ที่เป็นโปรโตคอลในการสื่อสารพิเศษโดยเฉพาะ โดยรูปแบบการสื่อสารจะเป็นแบบ Master-slave

- ระบบควบคุมการทำงาน (Functional subsystem)

ระบบควบคุมการทำงานในระดับสูงที่ผู้พัฒนาสามารถเข้าถึงไฟล์ฮาร์ดแวร์ของหุ่นยนต์ผ่านทางอินเทอร์เฟซได้ และผู้พัฒนาพัฒนาแพ็คเกจ ROS เพื่อใช้ในควบคุมและรับรู้การเคลื่อนไหวแบบอิสระของหุ่นยนต์

- ระบบควบคุมการเชื่อมต่อกับผู้ใช้ (User interface subsystem)

ผู้ใช้สามารถควบคุมและสั่งการหุ่นยนต์จากทางไกลผ่านทางหน้าอินเทอร์เน็ตเฟส เพื่อให้ง่ายต่อการใช้งาน

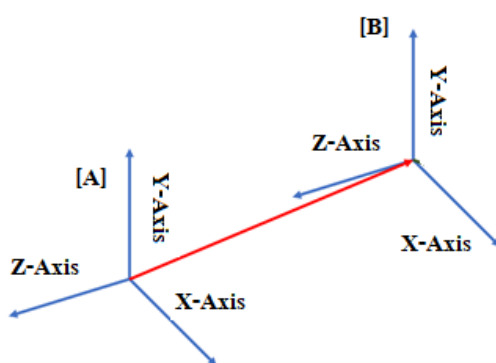
### 2.3.4 เมทริกซ์การแปลง (Transformation matrix)

เมทริกซ์การแปลง (Transformation matrix) จากหนังสือวิทยาการหุ่นยนต์และเทคโนโลยี [18] เป็นชุดข้อมูลทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ระบุตำแหน่งเวกเตอร์ จึงเป็นวิธีการที่สามารถใช้ระบุตำแหน่งแลพพฤติกรรมของหุ่นยนต์ได้ โดยหุ่นยนต์ 1 ตัวนั้นประกอบไปด้วยกลไกส่วนต่าง ๆ ที่ทำหน้าที่รองรับกับความต้องการของมนุษย์ การทำงานที่มีทิศทางเคลื่อนไหวนั้นจำเป็นต้องมีการกำหนดระบบพิกัดและกรอบอ้างอิง (Frame) แสดงดังสมการที่ (2-1)

$${}^A T_B = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & P_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & P_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-1)$$

เมื่อ  $\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix}$  ใช้แทนเวกเตอร์ระบุทิศทาง (Rotation vector) เมื่อ  $r_{ij}$  คือ เมทริกซ์แถวที่

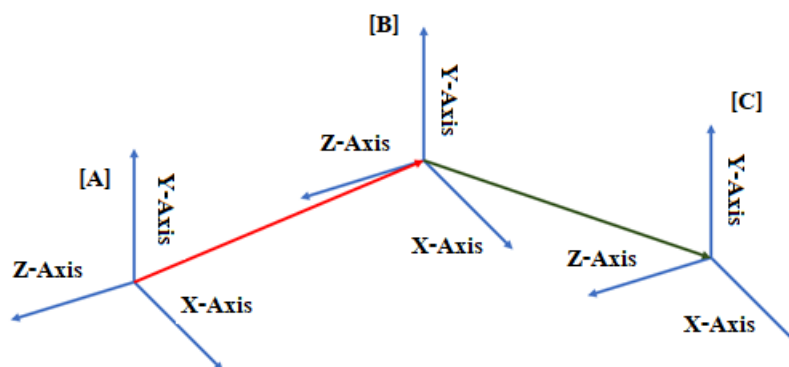
$i$  หลักที่  $j$  และ  $\begin{bmatrix} P_x \\ P_y \\ P_z \end{bmatrix}$  ใช้แทนเวกเตอร์ระบุตำแหน่ง (Position vector) เมื่อ  $P_x, P_y, P_z$  คือ ตำแหน่งในแนวแกน  $x$   $y$  และ  $z$  ตามลำดับ



รูปที่ 2-20 แสดงตัวอย่างเวกเตอร์ของเมทริกซ์การแปลงมี 2 กรอบอ้างอิง

โดย  ${}^A T_B$  เป็นเมทริกซ์การแปลงของกรอบอ้างอิง A เทียบกับกรอบอ้างอิง B ซึ่งในที่นี้อาจเปรียบได้กับตัวฐานหุ่นยนต์ [A] และแขนของหุ่นยนต์ [B] ดังรูปที่ 2-20 แต่หากมีกรอบอ้างอิงจำนวนที่มากกว่า 2 ดังรูปที่ 2-21 สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

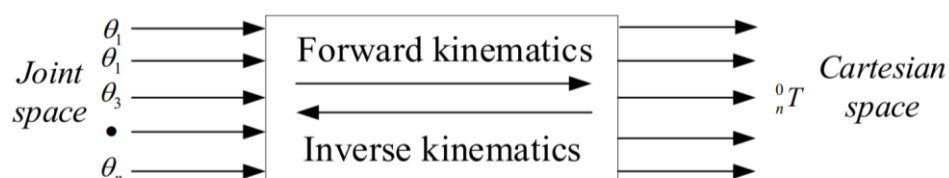
$${}^A_C T = {}^A_B T \cdot {}^B_C T \quad (2-2)$$



รูปที่ 2-21 แสดงตัวอย่างเวกเตอร์ของเมทริกซ์การแปลงที่มี 3 กรอบอ้างอิง

### 2.3.5 จลศาสตร์ของหุ่นยนต์ (Robot Kinematics)

จลศาสตร์หุ่นยนต์ (Robot kinematics) จากหนังสือวิทยาการหุ่นยนต์และเทคโนโลยี [18] เป็นการศึกษาการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ ซึ่งในการสร้างแบบจำลองจลศาสตร์ของกลไกหุ่นยนต์ในการวิเคราะห์พฤติกรรมเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ หลักการวิเคราะห์พฤติกรรมเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ จำเป็นต้องใช้ค่าพิกัดของหุ่นยนต์มาวิเคราะห์หรือการใช้เมทริกซ์การแปลงมาคำนวณ ดังรูปที่ 2-22 ซึ่งทิศทางการคำนวณสามารถทำได้ 2 รูปแบบ คือ ไคเนเมติกส์ไปข้างหน้า (Forward kinematics) และไคเนเมติกส์ย้อนกลับ (Inverse Kinematics)



รูปที่ 2-22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างฟอร์เวิร์สไคเนมาติกส์และอินเวิร์สไคเนมาติกส์ของ Joint space และ Cartesian space [18]

โดยไคเนเมติกส์ไปข้างหน้า (Forward kinematics) เป็นการวิเคราะห์ตำแหน่งข้อต่อของหุ่นยนต์ ตั้งแต่ฐานไปจนถึงส่วนปลาย หากมีข้อมูลของค่าพิกัดที่ส่วนฐาน และไคเนเมติกส์ย้อนกลับ (Inverse kinematics) เป็นการวิเคราะห์ตำแหน่งของค่าพิกัดส่วนปลายของแขนหุ่นยนต์หรือพิกัดเป้าหมาย หากที่มีข้อมูลของค่าพิกัดย้อนกลับไปหาข้อต่อต่างๆ เพื่อหาตำแหน่งของแต่ละข้อต่อ ซึ่งเป็นวิธีการที่มีความยุ่งยากมากกว่าฟอร์เวิร์สไคเนมาติกส์ ต้องใช้หลักการทางคณิตศาสตร์ประกอบกับประสบการณ์ของผู้ใช้ในการแก้ปัญหาดังกล่าว

### 2.3.6 การอ้างอิงมุมแบบโรลล์ - พิตช์ - ยอร์ (Roll-Pitch-Yaw)

เป็นการอ้างอิงมุมเทียบกับกรอบการเคลื่อนที่ [18] การอ้างอิงมุมลักษณะนี้มีไว้ใช้เพื่ออธิบายการเคลื่อนที่แบบหมุน เช่น ของเรือหรือเครื่องบินดังรูปที่ 2-23 ตัวอย่างที่แสดงจะการอ้างอิงมุมแบบโรลล์ - พิตช์ - ยอร์ (Roll-Pitch-Yaw) ในกรณีของเครื่องบินประเภท Fixed-wing แกน  $x$  จะติดกับลำตัวของเครื่องบินอยู่ในทิศทางของการเคลื่อนที่ไปข้างหน้า แกน  $y$  จะชี้ไปในทิศทางของปีกเครื่องบิน ส่วนแกน  $z$  จะเป็นแกนแนวตั้งที่ชี้ตั้งฉากพื้นดิน สมมติว่าเครื่องอยู่ในแนวระดับเดียวกับพื้นดิน การอ้างอิงมุมแบบโรลล์ - พิตช์ - ยอร์จะถูกกำหนดตามมุมของการหมุนรอบแกน  $xyz$  ที่ถูกแทนด้วยโรลล์ ( $\alpha$ ) พิตช์ ( $\beta$ ) และ ยอร์ ( $\gamma$ ) ตามลำดับ สังเกตได้ว่าการหมุนลักษณะนี้จะไม่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของตำแหน่งของกรอบ เพียงแต่เป็นการเปลี่ยนแนวการวางตัวให้เป็นไปตามที่ต้องการเท่านั้น สำหรับเมทริกซ์ของการอ้างอิงมุมแบบโรลล์-พิตช์-ยอร์เป็นการหาเมทริกซ์แบบคูณข้างหลังเนื่องจากเป็นการอ้างอิงเทียบกับกรอบเคลื่อนที่ โดยเริ่มจากหมุนมุม  $\alpha$  เทียบแกน  $z$  ตามด้วยหมุนมุม  $\beta$  เทียบแกน  $y$  สุดท้ายคือ หมุนมุม  $\gamma$  เทียบแกน  $x$  ดังสมการที่ (2-3)

$$R_{(\alpha,\beta,\gamma)} = R_{(z,\alpha)}R_{(y,\beta)}R_{(x,\gamma)} \quad (2-3)$$

โดยที่

$$R(x, \gamma) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & C\gamma & -S\gamma \\ 0 & S\gamma & C\gamma \end{bmatrix}, R(y, \beta) = \begin{bmatrix} C\beta & 0 & S\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -S\beta & 0 & C\beta \end{bmatrix} \text{ และ } R(z, \alpha) = \begin{bmatrix} C\alpha & -S\alpha & 0 \\ S\alpha & C\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

ดังนั้น

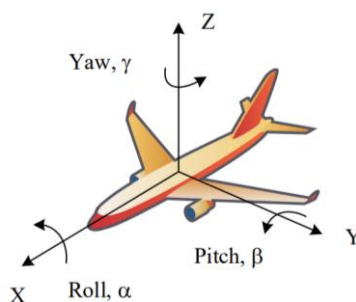
$$R_{(\alpha,\beta,\gamma)} = \begin{bmatrix} C\alpha C\beta & -S\alpha C\gamma + C\alpha S\beta S\gamma & S\alpha S\gamma + C\alpha S\beta C\gamma \\ S\alpha C\beta & C\alpha C\gamma + S\alpha S\beta S\gamma & -C\alpha S\gamma + S\alpha S\beta C\gamma \\ -S\beta & C\alpha S\gamma & C\alpha C\gamma \end{bmatrix}$$

สามารถคำนวณหาค่าRPYได้โดยการเทียบกับค่าพิกัด  $r_{ij}$  จะได้ว่า

$$\alpha = \text{atan2}\left(\frac{r_{21}}{r_{11}}\right)$$

$$\beta = \text{atan2}\left(\frac{-r_{31}}{\cos(\alpha)r_{11} + \sin(\alpha)r_{21}}\right)$$

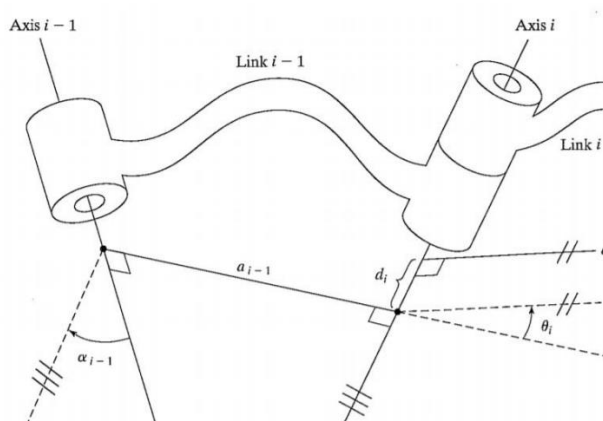
$$\gamma = \text{atan2}\left(\frac{r_{32}}{r_{33}}\right)$$



รูปที่ 2-23 ลักษณะการอ้างอิงมุมแบบโรลล์-พิทช์-ยอร์ว (Roll-Pitch-Yaw) [18]

### 2.3.7 หลักการของเดนาวิท-ฮาร์เทนเบิร์ก (Denavit-Hartenberg convention)

หลักการของเดนาวิท-ฮาร์เทนเบิร์ก [18] นำมาใช้ในการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์โดยอาศัยการพิจารณาหุ่นยนต์เป็นโครงสร้างที่ประกอบด้วย ข้อต่อ และลิงค์มาต่อเข้าด้วยกัน ซึ่งชนิดของข้อต่อสามารถเป็นได้ทั้ง ข้อต่อแบบหมุน (Revolute joint) และข้อต่อแบบเลื่อน (Prismatic joint) โดยขั้นตอนเริ่มจากการกำหนดกรอบอ้างอิงประจำแต่ละข้อต่อดังรูปที่ 2-24



รูปที่ 2-24 แสดงตัวอย่างการกำหนดข้อต่อและลิงค์ [18]

การกำหนดหมายเลขของกรอบอ้างอิงประจำข้อต่อ ซึ่งจะกำหนดตามหมายเลขประจำแกนหมุน สมมติให้ข้อต่อแรกเป็นข้อต่อ  $i - 1$  ส่วนข้อต่อถัดไปเป็นข้อต่อ  $i$  และ  $i + 1$  ตามลำดับ โดยอาจจะมีข้อต่อที่อยู่ก่อนหน้าหรือหลังจากนี้ก็ได้ ในการกำหนดหมายเลขประจำลิงค์ให้กำหนดลิงค์  $i - 1$  อยู่ระหว่างข้อต่อ  $i - 1$  กับข้อต่อ  $i$  และลิงค์  $i$  อยู่ระหว่างข้อต่อ  $i$  กับข้อต่อ  $i + 1$  จากนั้นพิจารณาการเปลี่ยนตำแหน่งและการวางตัวของกรอบอ้างอิงที่อยู่ติดกันโดยใช้เมทริกซ์การแปลง ตามสมการต่อไปนี้

$${}^{i-1}T = Rot_{(x,\alpha_{i-1})} Tran_{(\alpha_{i-1},0,0)} Rot_{(z,\theta_i)} Tran_{(0,0,d_i)} \quad (2-7)$$

$$\begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 & a_{i-1} \\ \sin\theta_i\cos\alpha_{i-1} & \cos\theta_i\cos\alpha_{i-1} & -\sin\alpha_{i-1} & -d_i\sin\alpha_{i-1} \\ \sin\theta_i\sin\alpha_{i-1} & \cos\theta_i\sin\alpha_{i-1} & \cos\alpha_{i-1} & d_i\cos\alpha_{i-1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2-8)$$

โดยที่  $a_i$  คือ ระยะจากแกน  $Z_i$  ไปยัง  $Z_{i+1}$  ตามแกน  $X_i$   
 $\alpha_i$  คือ มุมจากแกน  $Z_i$  ไปยัง  $Z_{i+1}$  รอบแกน  $X_i$   
 $d_i$  คือ ระยะจากแกน  $X_{i-1}$  ไปยัง  $X_i$  ตามแกน  $Z_i$   
 $\theta_i$  คือ มุมจากแกน  $X_{i-1}$  ไปยัง  $X_i$  รอบแกน  $Z_i$

ซึ่งตัวแปรดังกล่าวจะถูกเรียกว่า เดนาวิท-ฮาร์เทนเบิร์ก พารามิเตอร์ (DH parameters)

## 2.4 ระบบควบคุมแรงและตำแหน่ง (Force/position real-time control system)

Force/position real-time control คือหลักการควบคุมพื้นฐานที่สำคัญของหุ่นยนต์ ในการควบคุมตำแหน่งของหุ่นยนต์ให้เปลี่ยนแปลงไปตามการตอบสนองต่อสิ่งแวดล้อมหรือสภาพแวดล้อม ที่มากระทำกับหุ่นยนต์ สำหรับงานวิจัยนี้จะใช้แรงจากภายนอกมากระทำกับตัวทำงานส่วนปลายของหุ่นยนต์เพื่อควบคุมการเคลื่อนไหวและเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์

### 2.4.1 การควบคุมแบบอิมพีแดนซ์ (Impedance Control)

การทำงานร่วมกันระหว่างมนุษย์และหุ่นยนต์ (Human-Robot interaction : HRI) มักจะเป็นการควบคุมแรงที่อยู่ในรูปแบบของความต้านทานการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์ เพื่อให้มีความต่อเนื่องและราบเรียบ จากการวิเคราะห์การมีปฏิสัมพันธ์กันของแขนหุ่นยนต์ (Manipulator) กับสิ่งแวดล้อม (Environment) ภายใต้การปฏิสัมพันธ์ของ Inverse dynamics control in Cartesian space ซึ่งจะอ้างอิงถึงรูปแบบทางพลวัตของแขนกลดังนี้ [19]

$$B(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) = u - J^T(q)h \quad (2-9)$$

เมื่อ  $J(q)$  คือ เมทริกซ์จาโคเบียน  $h$  คือเวกเตอร์ของการออกแรงสัมผัสของตัวทำงานส่วนปลายของแขนที่กระทำต่อสิ่งแวดล้อม และ  $u$  คือ กฎการควบคุม ซึ่งสามารถแสดงได้ดังนี้

$$u = B(q)\alpha + n(q, \dot{q}) \quad (2-10)$$

สมการที่ (2-10) คือ การจัดรูปแบบของตัวควบคุม  $u$  ให้อยู่ในรูปแบบสเตต โดยที่



$$n(q, \dot{q}) = C(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) \quad (2-11)$$

จะได้

$$\ddot{q} = \alpha \quad (2-12)$$

เมื่อ  $\alpha$  คืออินพุตเวกเตอร์ที่ถูกตั้งขึ้นมาใหม่

จากการควบคุมแขนกลจากการที่มีแรงมากกระทำต่อตัวทำงานส่วนปลายของแขนกล สามารถแสดงได้โดย

$$\ddot{q} = \alpha - B^{-1}(q)J^{-1}(q)h \quad (2-13)$$

จากสมการที่ (2-13) จะเป็นเทอมที่ไม่เป็นเชิงเส้น เนื่องจากเทอมของแรงสัมผัส สำหรับแขนกลแบบ nonredundant สามารถแสดงค่าอินพุตได้ดังนี้

$$\alpha = J_A^{-1}(q)M_d^{-1}(M_d\ddot{p}_d + K'_d\dot{p} + K'_p\tilde{p} - M_dJ_A(q, \dot{q})\dot{q}) \quad (2-14)$$

เมื่อ  $M_d$  คือ เมทริกซ์ของมวล  $K'_d$  คือ เมทริกซ์ของตัวหน่วง และ  $K'_p$  คือ เมทริกซ์ของสปริง

จาโคเบียนที่ปรากฏในสมการที่ (2-21) เป็นจาโคเบียนรูปร่าง แต่จาโคเบียนที่ปรากฏในสมการที่ (2-14) จะเป็นจาโคเบียนวิเคราะห์ ดังนั้นสามารถสร้างความสัมพันธ์ใหม่ขึ้นมาคือ

$$T_A^T(x)h = h_A \quad (2-15)$$

เมื่อ  $T_A$  คือ เมทริกซ์การแปลงระหว่างสองจาโคเบียนแทนค่าสมการที่ (2-14) ลงในสมการที่ (2-13) จะได้

$$M_d\ddot{p} + K'_d\dot{p} + K'_p\tilde{p} = M_dB_A^{-1}(q)h_A \quad (2-16)$$

เมื่อ

$$B_A(q) = J_A^{-T}(q)B(q)J_A^{-1}(q) \quad (2-17)$$

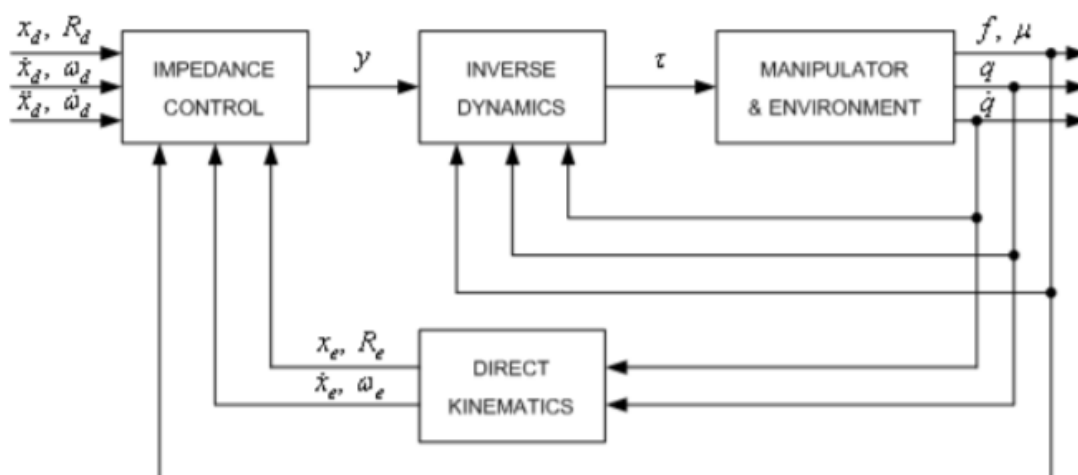
เมื่อ  $B_A(q)$  คือ เมทริกซ์ความเฉื่อยของแขนกลในพิกัด Cartesian space ซึ่งเมทริกซ์นี้จะถูกนิยามให้มีค่าเป็นบวก และค่าจาโคเบียนวิเคราะห์จะต้องเป็นแรงค์เต็ม (Full rank)

โดยปกติแล้วสมการที่ (2-14) จะเป็นความสัมพันธ์ที่ถูกกำหนดขึ้นในรูปแบบของอิมพีแดนซ์ทางกล (Mechanical impedance) ระหว่างเวกเตอร์ของแรงลัพธ์  $M_d B_A^{-1}(q) h_A$  และเวกเตอร์ของระยะการกระจัด ( $\tilde{p}$ ) ใน Cartesian ซึ่งอิมพีแดนซ์นี้สามารถแสดงให้อยู่ในรูปแบบของคุณสมบัติทางกล ของระบบมวล สปริง และตัวหน่วง ซึ่งสามารถระบุพฤติกรรมทางพลวัตได้โดยตรง

จากสมมติฐานของความคลาดเคลื่อนแบบอิสระในการวัดแรง จะทำให้สามารถเขียนสมการของการควบคุมแขนกลแบบอิมพีแดนซ์ใหม่ได้ดังนี้

$$M_d \ddot{\tilde{p}} + K_D \dot{\tilde{p}} + K_P \tilde{p} = h_A \quad (2-18)$$

โดยที่  $M_d$  คือ เมทริกซ์สัมประสิทธิ์ของระบบมวลที่ต้องการ  $K_D$  คือ เมทริกซ์สัมประสิทธิ์ของตัวหน่วงที่ต้องการ  $K_P$  คือ เมทริกซ์สัมประสิทธิ์ของสปริงที่ต้องการ และ  $h_A$  คือแรงสัมผัสที่กระทำต่อตัวทำงานส่วนปลายของแขนกลจากสิ่งแวดล้อมภายนอก สำหรับการควบคุมแบบอิมพีแดนซ์แสดงได้ดังรูปที่ 2-25

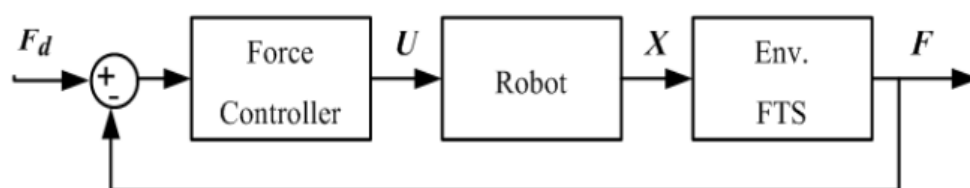


รูปที่ 2-25 แผนภาพบล็อกสำหรับการควบคุมแบบอิมพีแดนซ์ [19]

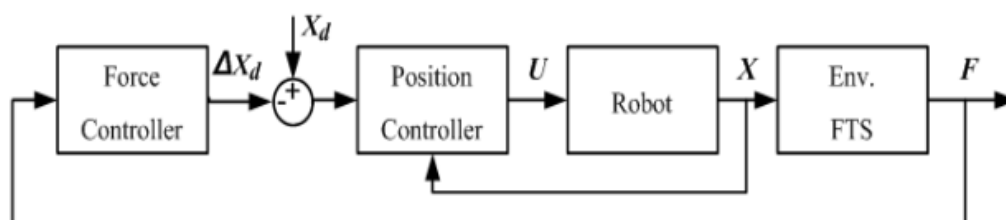
#### 2.4.2 ระบบควบคุมแรงแบบเอกซ์พลีซิที (Explicit force control)

งานวิจัยของ Alexander Winkler และ Jozef Suchy [20] แสดงการเปรียบเทียบระหว่าง การควบคุมแรงแบบเอกซ์พลีซิที (Explicit force control) และระบบควบคุมแรงแบบอิมพลีซิที (Implicit force control) กล่าวคือ การควบคุมแรงแบบเอกซ์พลีซิที (Explicit force control) คือการควบคุมแบบผสมระหว่างแรงและตำแหน่ง โดยการควบคุมตำแหน่งจะเป็นการเปรียบเทียบความต่างระหว่าง

ตำแหน่งของแขนกล ณ ขณะนั้นกับตำแหน่งของแขนกลที่ต้องการหลังจากนั้นจะส่งไปยังตัวควบคุมตำแหน่ง ส่วนการควบคุมแรงจะเป็นการเปรียบเทียบระหว่างแรงที่กระทำที่ตัวทำงานส่วนปลายกับแรงที่ต้องการให้แขนหุ่นยนต์สัมผัสกับวัตถุหลังจากนั้นจะส่งไปยังตัวควบคุมแรง เพื่อคำนวณหาค่าสัญญาณควบคุมที่ใช้สำหรับควบคุมแขนหุ่นยนต์ต่อไปดังรูปที่ 2-26 การควบคุมแรงแบบอิมพลีซิท (Implicit force control) คือการควบคุมแรงผ่านตัวควบคุมตำแหน่ง ซึ่งวิธีควบคุมแบบอิมพีแดนซ์ (Impedance control) เป็นวิธีหนึ่งของการควบคุมแรงแบบอิมพลีซิท (Implicit force control) พบว่าการควบคุมแรงแบบเอกซ์พลีซิท (Explicit force control) เป็นการควบคุมแรงโดยตรงทำให้ผลตอบสนองของการควบคุมแรงที่ค่อนข้างเร็ว แต่การควบคุมแรงแบบอิมพลีซิท (Implicit force control) มีความเสถียรภาพมากกว่า เนื่องจากจะคำนวณตำแหน่งหรือความเร็วของตัวทำงานส่วนปลายเพื่อเกิดวัตถุให้เกิดแรงกระทำกับตัวทำงานส่วนปลายตามที่ต้องการก่อน หลังจากนั้นจึงส่งสัญญาณเข้าไปยังตัวควบคุมตำแหน่งเพื่อควบคุมแขนหุ่นยนต์ต่อไปดังรูปที่ 2-27



รูปที่ 2-26 แผนภาพบล็อกการควบคุมแรงแบบเอกซ์พลีซิท (Explicit force control) [20]



รูปที่ 2-27 แผนภาพบล็อกการควบคุมแรงแบบอิมพลีซิท (Implicit force control) [20]

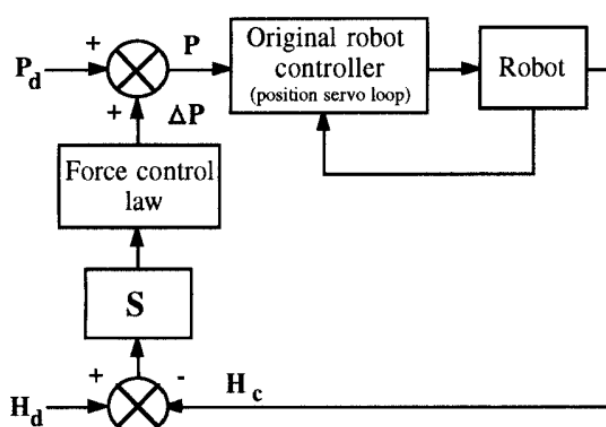
โดยที่	$F$	คือ เวกเตอร์แรงและแรงบิดที่วัดได้จากเซ็นเซอร์วัดแรง
	$F_d$	คือ เวกเตอร์แรงและแรงบิดที่กระทำต่อระบบ
	$U$	คือ เอาต์พุตที่ได้จากระบบควบคุมแรง
	$X$	คือ ตำแหน่งและทิศทางของตัวทำงานส่วนปลาย
	$X_d$	คือ การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งและทิศทางของตัวทำงานส่วนปลายที่ต้องการ

$\Delta X_d$  คือ การเปลี่ยนแปลงตำแหน่งและทิศทางของตัวทำงาน ส่วนปลายที่ได้จากระบบควบคุมแรง

สำหรับการควบคุมแบบอิมพลีซิที Implicit force control นั้นจะถูกจำกัดอยู่กับหุ่นยนต์บางประเภท ซึ่งจากการควบคุมหุ่นยนต์ในปัจจุบันจะเป็นลักษณะของ Position-based devices หรือ หุ่นยนต์ที่ควบคุมด้วยตำแหน่ง ดังนั้นเพื่อให้การควบคุมแรงง่ายขึ้นเลยมีการควบคุมที่เรียกว่า External force control หรือ Position-based force control

### 2.4.3 ระบบควบคุมแรงแบบ External force control หรือ Position-based force control

การควบคุมนี้ถูกพัฒนาขึ้นโดย De Schutter and Van Brussel [21] และงานวิจัยของ Eric Degoulange และคณะ [22] กล่าวว่าถ้าการที่จะออกแบบระบบควบคุมให้มีประสิทธิภาพที่ดีที่สุดได้ จะต้องอาศัยการหาค่าคงที่หรือค่า Gain ที่เหมาะสมเพื่อให้ระบบเสถียรและแม่นยำ การปรับเปลี่ยนค่าคงที่ (Gain) ใด ๆ ในระบบมักจะส่งผลการตอบสนองที่ไม่เหมือนกัน เช่น หากลดค่า Gain มากเกินไประบบจะมีความไว (Sensitivity) ที่ต่ำและต้องใช้แรงในปริมาณที่มาก แต่หากเพิ่มค่า Gain ให้มีค่าที่สูงเกินไประบบก็จะมี การตอบสนองเร็วจนทำให้เกิดการสั่น (Oscillations) และนำไปสู่ความไม่เสถียรของระบบ สำหรับแผนผังการควบคุม (Control block diagram) ของการควบคุมแรงภายนอก (External force control) ประกอบด้วย 2 ลูปควบคุมที่ซ้อนกันคือลูปล่างควบคุมแรงและลูปบนควบคุมตำแหน่งแสดงดังรูปที่ 2-28



รูปที่ 2-28 แผนผังการควบคุมแรงแบบ External force control [22]

โดยที่	$P$	คือ ทำทางของหุ่นยนต์สำหรับอ้างอิง
	$P_d$	คือ ทำทางของหุ่นยนต์ที่ต้องการ
	$\Delta P$	คือ รูปแบบทำทางของหุ่นยนต์ที่ได้จากการคำนวณ
	$H_c$	คือ แรงและเวลาปัจจุบัน
	$H_d$	คือ แรงและเวลาที่ต้องการ
	$S$	คือ เมทริกซ์ที่ควบคุมทิศทางของแรงสำหรับควบคุมตำแหน่งของหุ่นยนต์

#### 2.4.4 ระบบควบคุมแบบ Proportional-Integral-Derivative Control (PID)

การควบคุมการเคลื่อนไหวของหุ่นยนต์ด้วยระบบควบคุมแบบ PID [23] เป็นระบบควบคุมที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในวงการด้านอุตสาหกรรม หรือ วงการด้านหุ่นยนต์ ที่ต้องการการควบคุมแบบเรียลไทม์ (Real-time) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ง่ายต่อการปรับพารามิเตอร์และต่อการใช้งาน โดยการควบคุมแบบ PID จะเป็นการคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนที่หามาได้จากความแตกต่างระหว่างค่าที่ต้องการ (Setpoint) กับค่าที่วัดได้ (Actual) ตัวควบคุมจะพยายามลดค่าความคลาดเคลื่อนให้เหลือน้อยที่สุดด้วยการ ปรับสัญญาณขาเข้าของกระบวนการโดยสามารถแบ่งย่อยได้เป็น P, PI, และ PD ได้ ขึ้นอยู่กับลักษณะงานที่ต้องการใช้ โดยระบบควบคุมแบบ PID เป็นไปตามสมการดังนี้

$$U(t) = U_P(t) + U_I(t) + U_D(t) \quad (2-19)$$

$$U(t) = K_P[y_s(t) - y(t)] + K_I \int_0^t [y_s(\tau) - y(\tau)] d\tau + K_D \frac{d[y_s(t) - y(t)]}{dt} \quad (2-20)$$

$$U(t) = K_P e + K_I \int_0^{-1} e(\tau) d\tau + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (2-21)$$

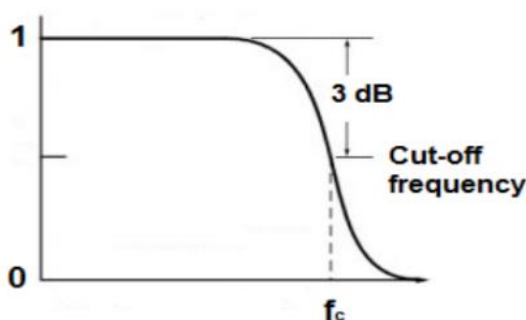
เมื่อ	$y_s$	คือ ค่า setpoint ที่ต้องการ
	$y(t)$	คือ ค่าที่วัดได้
	$e(t)$	คือ ความแตกต่างระหว่างค่าที่ต้องการกับค่าจริง
	$U(t)$	คือ ค่าเอาต์พุตของระบบควบคุม PID
	$U_P(t)$	คือ ค่าเอาต์พุตของระบบควบคุม Proportional
	$U_I(t)$	คือ ค่าเอาต์พุตของระบบควบคุม Integral
	$U_D(t)$	คือ ค่าเอาต์พุตของระบบควบคุม Derivative
	$K_P$	คือ ค่าคงที่ของระบบควบคุม Proportional
	$K_I$	คือ ค่าคงที่ของระบบควบคุม Integral

$K_D$	คือ ค่าคงที่ของระบบควบคุม Derivative
$t$ และ $\tau$	คือ เวลาต่อเนื่องและเวลาในการสุ่ม (Sampling time)

## 2.5 การลดทอนสัญญาณของตัวกรองสัญญาณ (Filter)

### 2.5.1 ตัวกรองสัญญาณความถี่ต่ำ (Low Pass Filter)

สำหรับขั้นตอนการอ่านข้อมูลสัญญาณจากตัวเซนเซอร์วัดแรงในแต่ละครั้ง อาจจะมีคามผิดพลาดบ้างเมื่อความถี่สูงๆ ซึ่งอาจจะขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของตัวเซนเซอร์ที่อ่านข้อมูลหรือประสิทธิภาพของไมโครคอนโทรลเลอร์ อีกทั้งการสั่นของหุ่นยนต์เองซึ่งมีความถี่สูงก็อาจจะส่งผลต่อการรบกวนระบบสัญญาณ ดังนั้นจึงใช้ตัวกรองสัญญาณความถี่ต่ำ Low-pass filter ซึ่งเป็นตัวกรองที่สามารถกำจัดสัญญาณรบกวนที่มีความถี่สูงออก ส่วนความถี่ที่ต่ำจะผ่านไปได้ดังรูปที่ 2-29 ทำให้ได้สัญญาณในการควบคุมหุ่นยนต์ที่มีคุณภาพที่ดีขึ้น



รูปที่ 2-29 กราฟแสดงความถี่ต่ำผ่าน (Low Pass Filter)

วิธีการนี้ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในโปรแกรมเพื่อกำจัดสัญญาณไฟฟ้ความถี่สูงที่รบกวนระบบ ซึ่งอธิบายได้ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ ดังสมการที่ (2-22)

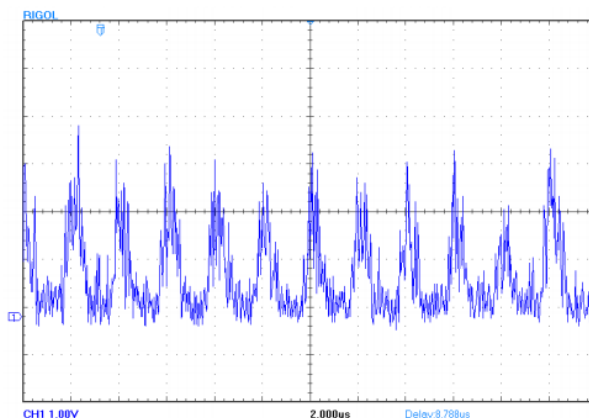
$$y(n) = ((a) \times x(n)) + ((1 - a) \times y(n - 1)) \quad (2-22)$$

โดยที่	$y(n)$	คือ ค่าที่ถูกกรองแล้ว ณ เวลานั้น ในรอบปัจจุบัน
	$y(n - 1)$	คือ ค่าที่ถูกกรองแล้วในรอบก่อนหน้า
	$x(n)$	คือ ค่าที่อ่านได้จากเซนเซอร์ในรอบปัจจุบัน
	$a$	คือ ค่าคงที่ของตัวกรอง ซึ่งมีค่าระหว่าง 0 - 1

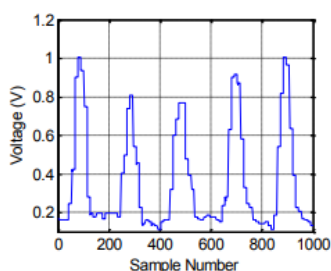
### 2.5.2 ตัวกรองค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ (Moving average filter)

งานวิจัยของ Pengfei Luo และคณะ [24] มีการใช้ตัวกรองแบบ Moving average filter สำหรับกรองสัญญาณอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet : UV) โดยตัวกรองแบบ Moving average filter

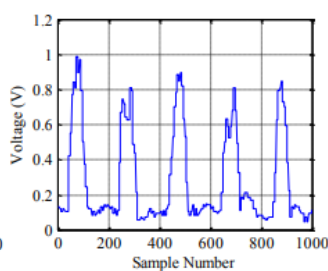
มีหลักการในการเก็บข้อมูลหลายค่าตามจำนวนที่ต้องการนำมาหาค่าเฉลี่ย ในทุก ๆ ครั้งของข้อมูลตัว  
 เก่าที่สุดของชุดสัญญาณขาเข้าที่นำมาวิเคราะห์จะถูกลบออก จากนั้นจะนำค่าใหม่เข้ามาวิเคราะห์  
 เพื่อกรองสัญญาณรบกวน (Noise) ที่ไม่ต้องการออกดังรูปที่ 2-30 (a) และจำแนกสัญญาณ  
 อัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet : UV) ออกตามความถี่ต่าง ๆ ดังรูปที่ 2-30 (b-d)



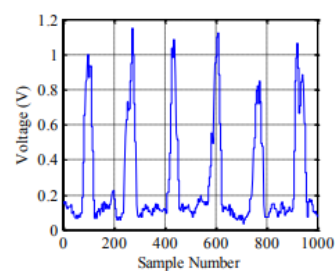
(a) สัญญาณอัลตราไวโอเล็ตที่มีสัญญาณรบกวน (Noise disturbed signal)



(b) 8.3 MHz



(c) 16.7 MHz



(d) 25 MHz

รูปที่ 2-30 สัญญาณสื่อสารขาเข้าและสัญญาณขาออกหลังผ่านการกรองสัญญาณ [24]  
 วิธีการนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในโปรแกรมสำหรับทำให้สัญญาณราบเรียบขึ้น โดยสามารถอธิบาย  
 ได้โดยดังสมการที่ (2-23)

$$y[i] = \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} x[i+j] \quad (2-23)$$

เมื่อ	$x[i]$	คือ สัญญาณขาเข้าตัวที่ $i$
	$y[i]$	คือ สัญญาณขาออกตัวที่ $i$
	$N$	คือ จำนวนข้อมูลที่นำมากรองสัญญาณ

## 2.6 การวิเคราะห์และการประเมินทางสถิติ

### 2.6.1 การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (Analysis Of Variance)

เป็นวิธีการพิสูจน์หาความแตกต่างของค่าเฉลี่ยทางสถิติ [25] ที่พัฒนาขึ้นโดยหลักการในการวิเคราะห์ คือ แยกความแปรปรวนของข้อมูลออกเป็นส่วนๆ ตามสาเหตุดังนี้

ความแปรปรวนทั้งหลายเกิดจากความแปรผันจากการทดลอง, ความแปรผันระหว่างหน่วยทดลอง, และ ความผิดพลาดจากการทดลอง เขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\text{Total} = \text{Treatment} + \text{Experiment} + \text{Error} \quad (2-24)$$

โดยจะต้องตั้งสมมติฐานของการวิจัยได้ดังนี้

- 1) กำหนดสมมติฐานในการทดสอบ

$$\text{สมมติฐานหลัก } (H_0) : \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \dots = \mu_n$$

$$\text{สมมติฐานรอง } (H_1) : \text{มีค่าเฉลี่ยอย่างน้อย 1 คู่ที่แตกต่างกัน}$$

โดยที่  $\mu$  คือค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่าง และ  $n$  คือจำนวนกลุ่มตัวอย่าง

- 2) กำหนดระดับนัยสำคัญ ( $\alpha$ ) ในงานวิจัยนี้ใช้ 0.05 หมายความว่า มีโอกาสผิดพลาดได้ 5 เปอร์เซ็นต์
- 3) นำค่าความสำคัญที่ได้จากการคำนวณ (Sig.) ของโปรแกรม SPSS มาเปรียบเทียบกับ ค่าระดับนัยสำคัญ ถ้าค่า Sig. น้อยกว่า  $\alpha$  จะถือว่ายอมรับ สมมติฐานหลัก

### 2.6.2 การวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis)

คือการศึกษาถึงความสัมพันธ์ของสองตัวแปร [26] สามารถใช้ได้กับหลายลักษณะความสัมพันธ์ และปริมาณตัวแปร

การทดสอบนัยสำคัญทางสถิติ

- 1) T-Statistic เมื่อเราได้ Model มาแล้วจะต้องพิสูจน์ทางสถิติ ค่าคงที่ ( $\beta_0$ ) และสัมประสิทธิ์ของตัวแปรอิสระทุกค่า ( $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ ) ว่ามีนัยสำคัญต่อ Model หรือไม่ โดยตั้งสมมติฐานดังนี้

$$H_0: \beta_i = 0$$

$$H_1: \beta_i \neq 0$$

ถ้าค่า T ที่ได้จากการคำนวณ น้อยกว่าค่า T ที่ได้จกตาราง ให้ถือว่ายอมรับสมมติฐานหลัก

- 2) F-Statistic เป็นตัวพิสูจน์ว่าโมเดลนั้นมีค่าความคลาดเคลื่อนมากแค่ไหน โดยตั้งสมมติฐานดังนี้

$$H_0: \text{ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นเกือบทั้งหมดมาจากตัวแปรอิสระ}$$

$$H_1: \text{ค่าความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นส่วนน้อยมาจากตัวแปรอิสระ}$$



ถ้าหากพบว่า ค่า F-Statistic มีค่าต่ำกว่า ค่า F ที่ได้จากรายง ถือได้ว่ายอมรับสมมติฐานหลัก แปลว่าโมเดลนั้นมีความผิดพลาดสูง

- 3)  $R^2$  เป็นค่าที่บ่งบอกว่าข้อมูลดิบของการวิเคราะห์นั้นเหมาะสมหรือไม่ โดยมีค่าระหว่าง 0 – 1 ถ้าหากมีค่าเข้าใกล้ 1 มากเท่าไรการวิเคราะห์จะมีประสิทธิภาพมากเท่านั้น โดยทั่วไปควรมีค่า 0.6 ขึ้นไป แต่ก็ไม่ได้มีกฎเกณฑ์แน่นอนตายตัว

$$R^2 = 100 \times \left( 1 - \frac{\sum_{i=1}^N \varepsilon^2}{\sum_{i=1}^N (y - \hat{y})^2} \right) \% \quad (2-25)$$

## 2.7 ความปลอดภัยในการทำงานร่วมกันระหว่างมนุษย์กับหุ่นยนต์ (Safety for human robot interaction)

การทำงานร่วมกันระหว่างหุ่นยนต์และมนุษย์ มีหลักการหรือข้อบังคับที่เป็นสากล เพื่อป้องกันอันตรายที่เกิดจากความผิดพลาดขณะหุ่นยนต์ทำงานทางด้านอุตสาหกรรม [27] โดยในการทำงานของหุ่นยนต์ในงานวิจัยนี้ต้องมีระบบที่สอดคล้องกับข้อบังคับต่อไป

**2.7.1 Safety-rated monitored stop (SMS)** ใช้เพื่อหยุดการเคลื่อนไหวของหุ่นยนต์ในพื้นที่ทำงานร่วมกันก่อนที่ผู้ปฏิบัติงานจะเข้าสู่พื้นที่ทำงานร่วมกันเพื่อโต้ตอบกับระบบหุ่นยนต์ และทำงานให้เสร็จ.

**2.7.2 Speed and separation monitoring (SSM)** ใช้ในกรณีที่ระบบหุ่นยนต์และผู้ปฏิบัติงานอาจเคลื่อนที่ไปพร้อมกันในพื้นที่ทำงานร่วมกัน ในระหว่างการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ระบบหุ่นยนต์จะไม่เข้าใกล้ผู้ปฏิบัติงานเกินกว่าระยะการแยกป้องกันที่กำหนดไว้

**2.7.3 Power and force limiting (PFL)** ใช้ในกรณีที่ระบบหุ่นยนต์ต้องได้รับการออกแบบเพื่อลดความเสี่ยงให้กับผู้ปฏิบัติงานอย่างเพียงพอ โดยไม่เกินค่าขีดจำกัดของเกณฑ์ที่บังคับใช้สำหรับการสัมผัสแบบกึ่งคงที่ และแบบชั่วคราวตามที่กำหนดโดยการประเมินความเสี่ยง.

มาตรฐานความปลอดภัยสำหรับหุ่นยนต์ซึ่งได้รับการแก้ไขและตีพิมพ์ในปี พ.ศ. 2549 และการเปลี่ยนแปลงที่สำคัญมีดังนี้ [28]

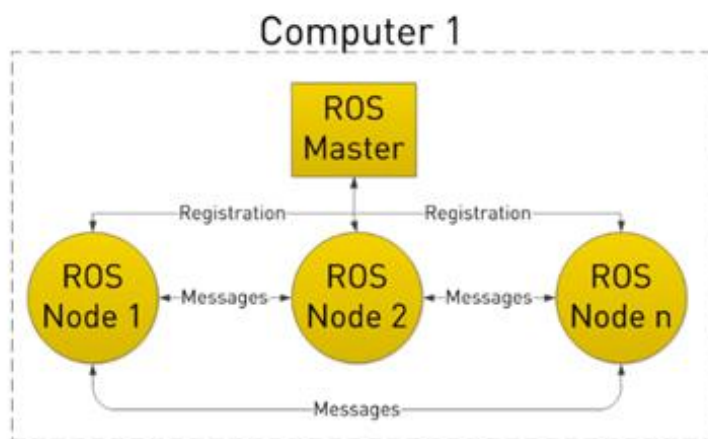
**2.7.4 New modes of operation** อนุญาตให้มีมาตรฐานเกี่ยวข้องกับพื้นที่ทำงานของหุ่นยนต์ เช่น การออกแบบการควบคุมหุ่นยนต์ให้ทำงานร่วมกับผู้ปฏิบัติงานของมนุษย์ในพื้นที่การทำงานเดียวกัน

**2.7.5 Control reliability** มีการแก้ไขระบบควบคุมซึ่งจะช่วยให้สามารถควบคุมให้มีความปลอดภัยสูง รวมทั้งมีช่องสำหรับซอฟต์แวร์ที่ทันสมัย การเดินสายไฟหรือระบบอิเล็กทรอนิกส์ และเทคโนโลยีเครือข่าย

**2.7.6 Safeguarding and clearance** มีการประเมินผลความปลอดภัยเมื่อมีการทำงานหยุดชั่วคราว โดยมีการโหลดข้อมูลต่าง ๆ เช่น สถิติสูงสุดของหุ่นยนต์ หรือความเร็วสูงสุด

## 2.8 ระบบปฏิบัติการสำหรับหุ่นยนต์ (Robot Operating System : ROS)

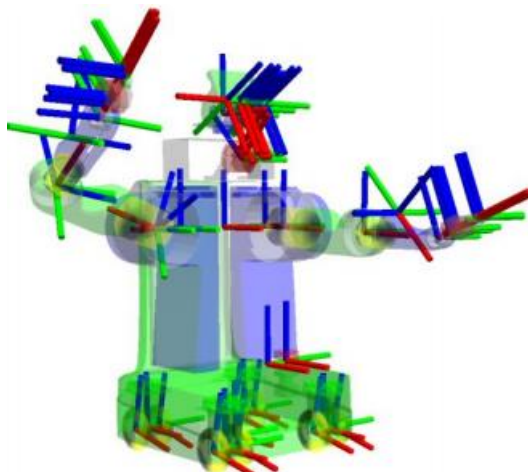
ระบบปฏิบัติการสำหรับหุ่นยนต์ หรือที่นิยมเรียกกันว่า ROS (Robot Operating System) [29] คือ ระบบปฏิบัติการสำหรับหุ่นยนต์ที่เป็นที่แพร่หลายในปัจจุบัน มีระบบที่ออกแบบมารองรับการทำงานในลักษณะเฉพาะส่วน โดยส่วนใหญ่หุ่นยนต์รุ่นใหม่ ๆ ออกแบบมาเพื่อให้ใช้งานและรองรับการทำงานบน ROS แล้วทั้งสิ้น จุดเด่นที่เห็นได้ชัดคือ ROS มีความยืดหยุ่นในการทำงานสูง เนื่องจากในปัจจุบันนั้น เพราะระบบหุ่นยนต์จะประกอบไปด้วยหลากหลายส่วน ไม่ว่าจะเป็นระบบโครงสร้างระบบการมองด้วยภาพ, ระบบนำทาง, ระบบปัญญาประดิษฐ์ (AI : Artificial Intelligence), และระบบหยิบจับวัตถุ เป็นต้น นักพัฒนาหลายคนใช้ในการพัฒนาระบบต่างๆขึ้นมา เช่น การพัฒนาหุ่นยนต์บริการและใช้งานภายในบ้านโดยมีฟังก์ชันการทำงานหลักๆ คือ สามารถเดินภายในบ้านแบบอัตโนมัติ สามารถรับคำสั่งด้วยเสียง จากมนุษย์สามารถหยิบจับวัตถุหรือสิ่งของ มีระบบจดจำใบหน้าของผู้ใช้งาน นักพัฒนาแต่ละคน ย่อมมีความเชี่ยวชาญในแต่ละส่วนแตกต่างกัน ด้วยเหตุผลตามทีกล่าวมา ROS ถูกออกแบบมา เพื่อแก้ปัญหาข้างต้น ให้กลุ่มคนเหล่านี้สามารถทำงานร่วมกันและแบ่งปันโอเคียซึ่งกันและกันได้ มีแพคเกจ (Package) ที่เกี่ยวกับหุ่นยนต์ให้เลือกใช้มากมายและเป็นซอฟต์แวร์โอเพนซอร์ซ (Open source software) มีขนาดชุมชนหรือนักพัฒนาที่กว้างขวางมาก มีกระทู้ถาม-ตอบ สำหรับ เรื่องหุ่นยนต์โดยเฉพาะให้สำหรับคนที่เจอปัญหาในการใช้งาน โครงสร้างการทำงานของ ROS จะ ทำงานเป็น Node ซึ่งแต่ละ Node จะสื่อสารกันผ่าน Topic และ Service โดยมี ROS master เป็นตัวจัดการทั้งหมดดังรูปที่ 2-31



รูปที่ 2-31 แผนภาพการเชื่อมต่อของ ROS [29]

### 2.8.1 Transform (TF)

Transform หรือ TF เป็นแพ็คเกจของ ROS ที่ถูกออกแบบมาเพื่อใช้สำหรับการติดตามการเปลี่ยนแปลงระหว่างเฟรม (Frame) ใดๆที่เชื่อมต่อกัน โดยจะมีตัวแปรสำคัญคือ ตำแหน่ง (Position) และการวางตัว (Orientation) รูปที่ 2-32 แสดงถึงตัวอย่างการแสดงผลของ TF ในระบบหุ่นยนต์.



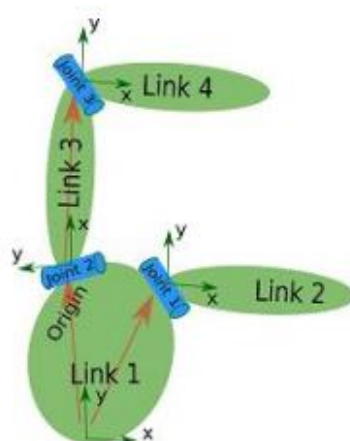
รูปที่ 2-32 การแสดง TF ของระบบหุ่นยนต์ [29]

โดยระบบหุ่นยนต์ทั่วไป มักจะมีเฟรมพิกัด (Coordinate frames) 3 มิติที่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลา เช่น เฟรมของโลก (World frame) เฟรมของฐานหุ่นยนต์ (Base frame) เฟรมของมือจับ (Gripper frame) เฟรมของหัวหุ่นยนต์ (Head frame) เป็นต้น หากต้องการติดตามเฟรมเหล่านี้ตลอดเวลา ผู้ใช้งานอาจจะต้องคำนึง รูปแบบการวางตัวของวัตถุอยู่ในลักษณะไหนเมื่อเทียบกับเฟรมของฐานหุ่นยนต์ ตำแหน่งปัจจุบันของเฟรมของฐานหุ่นยนต์อยู่ตรงไหนของเฟรมแผนที่ เป็นต้น เพื่อจะได้

ควบคุมการเคลื่อนที่และการเคลื่อนไหวของหุ่นยนต์ได้แบบถูกต้องและแบบเรียลไทม์ (Real-time) จึงจำเป็นต้องใช้ TF ที่สามารถติดตามการเปลี่ยนแปลงระหว่างเฟรมแบบเรียลไทม์ (Real-time) และสามารถทำงานได้ในระบบกระจาย (Distributed system) ที่สามารถใช้งานร่วมกับ ROS ได้อีกด้วย

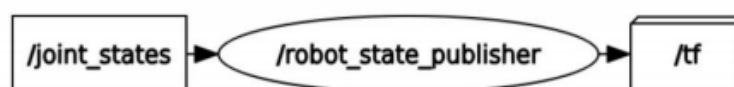
## 2.8.2 The Unified Robot Description Format (URDF)

The Unified Robot Description Format (URDF) เป็นรูปแบบไฟล์ XML (Extensible Markup Language) ที่ใช้ใน ROS เพื่ออธิบายองค์ประกอบทั้งหมดของหุ่นยนต์ เช่น ลิงค์ (Link) ข้อต่อ (Joint) ขนาด (Dimension) เซนเซอร์ (Sensor) รวมถึงสามารถระบุคุณสมบัติทางจลศาสตร์ (Kinematics) และ ไดนามิก (Dynamic) ขององค์ประกอบต่างๆของหุ่นยนต์ เช่น มวล (Mass) ความเฉื่อย (Inertia) ความหน่วง (Damping) ความเสียดทาน (Friction) เป็นต้น ในไฟล์ URDF จะต้องระบุความสัมพันธ์ระหว่างลิงค์ (link) และข้อต่อ (joint) ในหุ่นยนต์และบันทึกไฟล์ด้วยนามสกุล URDF ดังรูปที่ 2-33



รูปที่ 2-33 รูปการสร้างโมเดลหุ่นยนต์ด้วย URDF [29]

หลังจากได้ไฟล์ URDF ของหุ่นยนต์ อีกหนึ่งแพ็คเกจ (Package) ที่ใช้ในการเก็บค่าสถานะ (State) ต่างๆของหุ่นยนต์จริง (Real robot) เช่น องศาการหมุนของมอเตอร์ ค่าระยะทางที่เซนเซอร์อ่านค่าได้มาและแสดงในโปรแกรมจำลอง (Simulation) ของ ROS ให้สัมพันธ์กับโมเดลหุ่นยนต์ที่เราสร้าง คือ Robot state publisher เป็นแพ็คเกจ ที่สามารถส่งค่าสถานะปัจจุบันของหุ่นยนต์ให้อยู่ในรูปของ TF ที่เป็นค่าตำแหน่งใน 3 มิติเพื่อที่จะให้ ROS สามารถนำ TF ไปใช้ได้ดังแสดงในรูปที่ 2-34

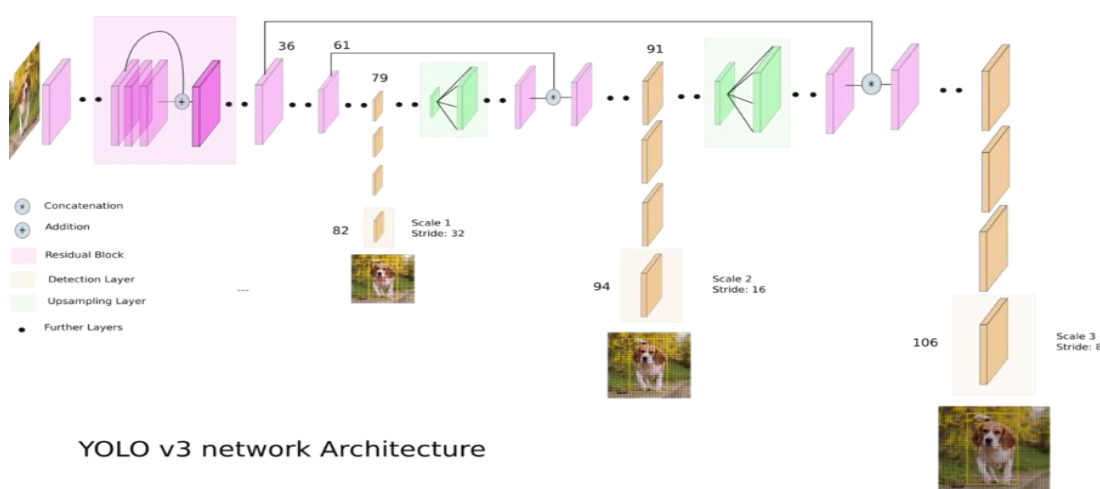


รูปที่ 2-34 แผนผังแสดงการทำงานของแพ็คเกจ Robot state publisher

### 2.8.3 You only look once (YOLO)

You Only Look Once (YOLO) [30] คือโครงข่ายประสาทเทียม Deep Neural Network (DNN) ที่ใช้สำหรับการจดจำวัตถุจากภาพ และสามารถตรวจจับวัตถุแบบ Real-Time ได้บน Pascal Titan Xประมวลผลภาพที่ 30 FPS และมี mAP 57.9% สำหรับ COCO test-dev เป็นหนึ่งในอัลกอริทึม (Algorithm) การตรวจจับวัตถุแบบ Real-Time ที่มีเร็วและมีความแม่นยำอยู่ในระดับเกณฑ์ที่ดี

ระบบตรวจจับจะปรับรูปแบบของตัวแยกประเภทหรือตัวระบุตำแหน่งเพื่อดำเนินการตรวจจับ หากใช้แบบจำลองหลายๆแบบและมีตำแหน่งที่หลากหลาย จะทำให้การตรวจจับวัตถุมีความแม่นยำ และถูกต้องมากขึ้นด้วย ระบบการตรวจจับจะทำการวิเคราะห์รูปภาพและจัดหมวดหมู่ โดยวิเคราะห์จากขนาดและมุมต่างๆของวัตถุเพื่อให้ตรวจจับวัตถุได้ถูกต้อง YOLO จะใช้ Single neural network ในการวิเคราะห์ภาพ ซึ่ง Single neural network คือ ศาสตร์แขนงหนึ่งทางด้านปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence : AI) ที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานหลายด้านได้อย่างมีประสิทธิภาพ เช่น การจำแนกรูปแบบ การควบคุม การหาความเหมาะสม การจัดกลุ่ม และมีการคาดการณ์ภาพเพื่อความรวดเร็ว ซึ่งจะมีการวิเคราะห์ตามการคาดการณ์ไว้ด้วยดังรูปที่ 2-35



YOLO v3 network Architecture

รูปที่ 2-35 รูปแบบการวิเคราะห์ Single neural network ของ YOLO [30]

จากการทบทวนวรรณกรรมการส่งวัตถุระหว่างมนุษย์กับมนุษย์ (HHH) พบว่าโครงสร้างทางกายภาพของมนุษย์มีลักษณะเหมือนกับแบบจำลองอิมพีแดนซ์ตั้งที่กล่าวไว้ในงานวิจัยของ M.M. Rahman และคณะ [6] ซึ่งการออกแบบระบบหุ่นยนต์ให้สามารถทำงานร่วมกับมนุษย์ได้จำเป็นที่จะต้องศึกษาลักษณะการทำงานร่วมกันระหว่างมนุษย์ก่อน [6-9]

จากการทบทวนวรรณกรรมการส่งวัตถุระหว่างมนุษย์กับหุ่นยนต์ (HRH) พบว่าจะใช้แรงของมนุษย์ที่กระทำต่อตัวทำงานส่วนปลายของหุ่นยนต์เป็นตัวแปรควบคุมสำหรับควบคุมพฤติกรรมของ

หุ่นยนต์ [10-16] รวมถึงมีการประยุกต์ใช้เทคนิค เช่น ใช้เทคนิคการทวนเวลา [12] หรือเซนเซอร์อื่น ๆ เช่น เซนเซอร์การตรวจจับภาพ [13] และ [15] ร่วมด้วย เพื่อให้หุ่นยนต์มีประสิทธิภาพการทำงานร่วมกันกับมนุษย์ที่มากขึ้น จากที่กล่าวมาข้างต้นนี้จะเป็นกรอบแนวคิดที่ผู้วิจัยจะนำไปประยุกต์ใช้ใน ออกแบบการทดลองของการศึกษาพฤติกรรมการส่งวัตถุระหว่างมนุษย์กับมนุษย์ (HHH) และ ประยุกต์ใช้วิธีการควบคุมแรงและตำแหน่งที่ได้จากการทบทวนวรรณกรรม [10-16] และ [19-23] สำหรับการออกแบบการทดลองของการศึกษาพฤติกรรมการส่งวัตถุระหว่างมนุษย์กับหุ่นยนต์ โดย ประยุกต์ใช้การลดทอนสัญญาณเพื่อกำจัดสัญญาณที่รบกวน (Noise) ที่ได้จากเซนเซอร์ต่าง ๆ รวมถึง นำการวิเคราะห์และการประเมินทางสถิติพิสูจน์ผลการทดลอง โดยรายละเอียดการออกแบบการทดลองจะกล่าวในบทถัดไป

### บทที่ 3

#### วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบระบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์และมนุษย์ (HHI), ระบบปฏิสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์และหุ่นยนต์ (HRI), อุปกรณ์ที่ใช้, และการเชื่อมโยงซอฟต์แวร์ รวมถึงอธิบายทฤษฎีและหลักการเพิ่มเติมที่ผู้วิจัยนำมาใช้สำหรับทำการศึกษาในงานวิจัยนี้ เพื่อนำไปออกแบบกรอบการทำงานในการส่งวัตถุให้กับหุ่นยนต์ HSR ให้สามารถทำงานร่วมกันกับมนุษย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เป็นธรรมชาติและปลอดภัยแก่มนุษย์ รวมถึงมีพฤติกรรมที่ใกล้เคียงกับมนุษย์ โดยงานวิจัยนี้ได้พัฒนาซอฟต์แวร์ของหุ่นยนต์ HSR ได้แก่ แพ็คเคจการตรวจจับวัตถุ (Yolo), แพ็คเคจการควบคุมแบบอิมพีแดนซ์ (Impedance control), แพ็คเคจการเคลื่อนที่ (Hybrid inverse kinematics และ CBIIRRT2), และแพ็คเคจเซนเซอร์วัดแรง (Force sensor) และพัฒนาอัลกอริทึมในการควบคุมหุ่นยนต์ให้สามารถเลียนแบบการทำงานของ HHH ใน HRH ได้ ดังนั้นในบทที่ 3 เรื่องระเบียบวิธีวิจัยจะกล่าวถึงงานทั้งหมดที่ได้ทำในงานวิจัยนี้ โดยเนื้อหาจะประกอบด้วย (1) การวิเคราะห์แรงสำหรับการส่งวัตถุระหว่างมนุษย์กับมนุษย์ (Force analysis of human-to-human object handover), (2) การออกแบบระบบการศึกษาพฤติกรรมส่งวัตถุระหว่างมนุษย์กับมนุษย์ (Human-to-human object handover), (3) การออกแบบระบบการศึกษาพฤติกรรมส่งวัตถุระหว่างมนุษย์กับหุ่นยนต์ (Human-to-robot object handover), (4) รูปแบบการเชื่อมโยงซอฟต์แวร์ (Software architecture), (5) จลศาสตร์ของหุ่นยนต์ HSR (Kinematics of HSR) และ (6) การควบคุมอิมพีแดนซ์ HSR (Impedance control) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

จากการที่ผู้วิจัยได้ศึกษางานวิจัยที่ได้กล่าวในบทก่อนหน้า พบว่ามีการใช้แรงและทิศทางของแรงในการส่งวัตถุ ลักษณะหรือรูปทรงของวัตถุ รวมถึงพฤติกรรมในการส่งวัตถุที่แตกต่างกัน เนื่องจากงานวิจัยนี้ผู้วิจัยต้องการศึกษาการส่งวัตถุที่จะส่งวัตถุได้โดยเลียนแบบการส่งของใน 3 มิติเหมือนกับการส่งของในชีวิตจริง โดยให้หุ่นยนต์สามารถตอบสนองต่อแรงด้วยการควบคุมแบบอิมพีแดนซ์ (Impedance control) และในขณะที่แรงที่  $x$  (หรือแกนด้านทแยงของหุ่นยนต์) จะถูกนำมาพิจารณาเพื่อใช้ในการควบคุมการถ่ายโอนวัตถุ วัตถุที่ใช้มีรูปทรงเป็นทรงกระบอก ซึ่งขณะทำการส่งวัตถุนั้นวัตถุจะต้องตั้งตรงหรือตั้งฉากกับพื้นเสมอ ดังรูปที่ 3-1 (a) ทำให้ผู้วิจัยจะต้องทำการศึกษาและวิเคราะห์แรงของการส่งวัตถุระหว่างมนุษย์กับมนุษย์ เพื่อนำผลการศึกษามาสร้างกรอบแนวคิดในการควบคุมหุ่นยนต์ส่งวัตถุให้แก่มนุษย์ (HRH)

จากการที่ผู้วิจัยได้ศึกษางานวิจัยที่ได้กล่าวในบทก่อนหน้า พบว่ามีการใช้แรงและทิศทางของแรงในการส่งวัตถุ ลักษณะหรือรูปทรงของวัตถุ รวมถึงพฤติกรรมในการส่งวัตถุที่แตกต่างกัน เนื่องจากงานวิจัยนี้ผู้วิจัยต้องการศึกษาการส่งวัตถุที่จะส่งวัตถุได้โดยเลียนแบบการส่งของใน 3 มิติเหมือนกับการส่งของในชีวิตจริง โดยให้หุ่นยนต์สามารถตอบสนองต่อแรงด้วยการควบคุมแบบอิมพีแดนซ์

(Impedance control) และในขณะแรงที่  $x$  (หรือแกนด้านหยิบของหุ่นยนต์) จะถูกนำมาพิจารณาเพื่อใช้ในการควบคุมการถ่ายโอนวัตถุ วัตถุที่ใช้มีรูปทรงเป็นทรงกระบอก ซึ่งขณะทำการส่งวัตถุนั้น วัตถุจะต้องตั้งตรงหรือตั้งฉากกับพื้นเสมอ ดังรูปที่ 3-1 (a) ทำให้ผู้วิจัยจะต้องทำการศึกษาและวิเคราะห์แรงของการส่งวัตถุระหว่างมนุษย์กับมนุษย์ เพื่อนำผลการศึกษามาสร้างกรอบแนวคิดในการควบคุมหุ่นยนต์ส่งวัตถุให้แก่มนุษย์ (HRH)

### 3.1 การวิเคราะห์แรงสำหรับการส่งวัตถุระหว่างมนุษย์กับมนุษย์ (Force analysis of human-to-human object handover)

เบื้องต้นเพื่อให้เข้าใจถึงลักษณะของแรงที่เกิดขึ้นใน HHH การทดลองนี้อธิบายถึงแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับแรงของผู้ส่ง (Giver) และผู้รับ (Receiver) สามารถอธิบายได้ด้วยไดอะแกรมเชิงกลดังรูปที่ 3-1 (a) พิจารณาพฤติกรรมของการส่งวัตถุระหว่างมนุษย์นี้จะขึ้นอยู่กับแรง ( $f_h$ ) ที่ออกแรงทำให้วัตถุเคลื่อนที่ อิมพีแดนซ์ของแขนมนุษย์ ประกอบด้วยตัวแปรมวล ( $m$ ) ค่าคงที่ของสปริง ( $K$ ) และตัวหน่วง ( $B$ ) โดยที่  $x, \dot{x}$ , และ  $\ddot{x}$  คือการกระจัด ความเร็ว และความเร่ง ตามลำดับ ดังนั้นแบบจำลองพลวัตของแขนมนุษย์แสดงดังสมการต่อไปนี้ [31]

$$f_h(t) = m(t)\ddot{x}(t) + c(t)\dot{x}(t) + k(t)x(t) \quad (3-1)$$

จากสมการที่ (3-1) ซึ่งอยู่ในรูปแบบโดเมนเวลาต่อเนื่องซึ่งสามารถเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของโดเมนเวลาแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete-time) ได้ดังสมการด้านล่าง โดยค่าเวลาที่ได้จากการสุ่มตัวอย่างทุกๆ  $T$  วินาที (Sampling time) ด้วยจำนวนตัวอย่างทั้งหมด  $n$  ตัว ที่ไม่ต่อเนื่องแต่ละตัวอย่าง (Number of samples) ตามลำดับ

$$f_h(n) = m(n)\ddot{x}(n) + c(n)\dot{x}(n) + k(n)x(n) \quad (3-2)$$

โดยสมมติว่า

$$\dot{x}(n) = \left[ \frac{x(n) - x(n-1)}{T} \right], \quad (3-3)$$

และ

$$\ddot{x}(n) = \left[ \frac{\dot{x}(n) - \dot{x}(n-1)}{T} \right] \quad (3-4)$$



นำสมการที่ (3-3) และ (3-4) แทนในสมการที่ (3-2) จะได้

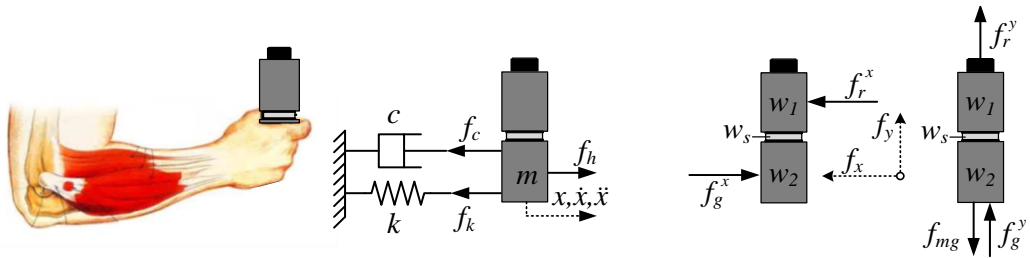
$$f_h(n) = m(t) \left\{ \left[ \frac{x(n)-x(n-1)}{T^2} \right] - \left[ \frac{x(n-1)-x(n-2)}{T^2} \right] \right\} + c(t) \left[ \frac{x(n)-x(n-1)}{T} \right] + k(n)x(n), \quad (3-5)$$

หรือ

$$f_h(n) = a_1x(n) + a_2x(n - 1) + a_3x(n - 2), \quad (3-6)$$

โดยที่

$$a_1 = \left[ \frac{m(n)+c(n)+k(n)T^2}{T^2} \right], a_2 = \left[ \frac{-2m(n)-c(n)}{T^2} \right], \text{ และ } a_3 = \left[ \frac{m(n)}{T^2} \right]$$



(a) ความต้านทานของแขนมนุษย์ขณะถือวัตถุ

(b) แผนภาพอิสระของวัตถุ

รูปที่ 3-1 โมเดลจำลองเชิงกล [31]

การพิจารณาแรงหลักสำหรับการส่งมอบวัตถุคือแรงในแนวแกน  $x$  โดยแรงปฏิสัมพันธ์ (Interactive force) ของผู้ส่งและผู้รับที่กระทำต่อวัตถุแสดงด้วย  $f_g$  และ  $f_r$  ตามลำดับ แรงปฏิสัมพันธ์ (Interactive force) ที่ทำในแนวแกน  $x$  และแกน  $y$  ถูกแสดงด้วย  $f_{int}^x$  และ  $f_{int}^y$  แรงที่วัดด้วยเซนเซอร์หลายแกนของ ATI mini40 multi-axis แบบ Real-time คือ  $f_{meas}^x$  และ  $f_{meas}^y$  (ค่าเฉลี่ยของแรงแนวแกน  $x$  และค่าเฉลี่ยของแรงแนวแกน  $y$  ตามลำดับ) โดยก่อนการทดสอบเซนเซอร์วัดแรงจะต้องทำการไบแอส (หรือการตั้งค่าศูนย์ของอุปกรณ์วัด) ค่าให้มีค่าเป็นศูนย์ก่อนเสมอ ดังนั้นการวิเคราะห์แรงแบบไดนามิกสามารถแดงได้ตามแผนภาพแรงแบบอิสระดังรูปที่ 3-1 (b) จากความสัมพันธ์ของแรงที่ได้จากการส่งวัตถุในแนวแกน  $x$  จะได้

$$f_{int}^x = f_{meas}^x(t) = f_g(t) - f_r(t).. \quad (3-7)$$

จากการพิจารณาแรงในการส่งวัตถุในแนวแกนตั้ง ( $f_{int}^y$ ) จากการทดสอบแรงทางกายภาพแบบไดนามิก จะพบว่ารูปแบบและทิศทางของวัตถุมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยเมื่เทียบกับน้ำหนัก

รวมของวัตถุ ดังนั้นการทดลองในงานวิจัยนี้จะถือว่า แรงในการส่งมอบวัตถุในแนวตั้ง (Vertical) เสมือนค่าคงที่ จึงได้ว่าน้ำหนักรวมของวัตถุ ( $f_{mg}$ ) มีค่าเท่ากับแรงที่มากกระทำกับวัตถุในแนวตั้ง (Vertical) ที่เรียกว่า Holding upright forces ของผู้ส่ง ( $f_g^y$ ) และผู้รับ ( $f_r^y$ ) ดังสมการที่ (3-9)

$$f_{mg}(t) = w_1(t) + w_2(t) + w_s(t), \quad (3-8)$$

และ

$$f_{mg}(t) = f_g^y(t) + f_r^y(t) \quad (3-9)$$

แรงปฏิสัมพันธ์ในการส่งมอบวัตถุในแนวตั้ง ( $f_{int}^y$ ) จะเป็นตัวแปรอ้างอิงที่มีผลต่อผู้รับ ดังสมการ (3-10) โดยที่  $f_{bias}$  คือค่าเริ่มต้นของน้ำหนัก ( $w_1$ ) จึงได้ว่า ( $f_{bias} = w_1$ )

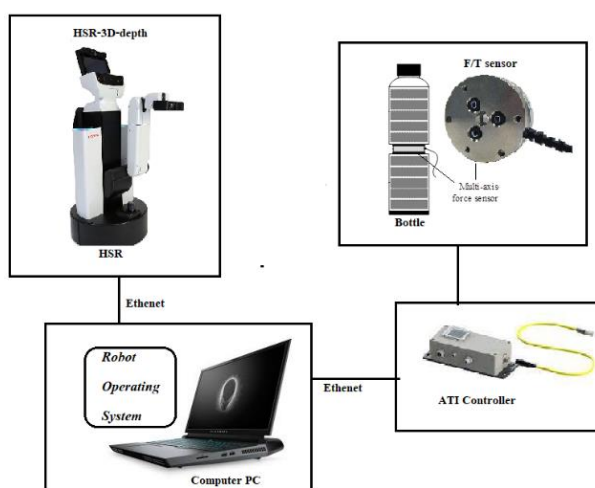
$$f_{int}^y(t) = f_{meas}^y(t) - w_s(t) - w_2(t) - f_{bias}(t) \quad (3-10)$$

จากการที่ผู้วิจัยได้ศึกษาและวิเคราะห์แรงในการส่งวัตถุระหว่างมนุษย์กับมนุษย์และศึกษาวิธีการวิจัยของงานวิจัยต่างๆที่ได้กล่าวในบทก่อนหน้า ผู้วิจัยจึงได้ออกแบบการทดลองไว้ 2 ส่วนหลัก (1) การศึกษาพฤติกรรมการส่งวัตถุระหว่างมนุษย์กับมนุษย์ (HHH) เพื่อทำความเข้าใจถึงพฤติกรรมต่างๆของมนุษย์ เช่น แรงในการส่งวัตถุ, ระยะห่างในการส่งวัตถุ, ระยะความสูงในการส่งวัตถุและท่าทางในการส่งวัตถุ เป็นต้น ผลจากการศึกษาจะเป็นข้อมูลที่ไว้สำหรับสอนให้กับหุ่นยนต์ HSR ให้มีการทำงานและพฤติกรรมที่เทียบเคียงกับมนุษย์มากที่สุด การทดลองที่ (2) การศึกษาพฤติกรรมการส่งวัตถุระหว่างมนุษย์กับมนุษย์ (HRH) จะเป็นการศึกษาการควบคุมการเคลื่อนไหวและเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ให้ทำงานสอดคล้องกับแรงภายนอกที่มากกระทำ รวมถึงศึกษาการควบคุมแรงของหุ่นยนต์ไม่ให้เกิดความเสียหายหรือเป็นอันตรายต่อสภาพแวดล้อมและมนุษย์ ดังจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

### 3.2 การออกแบบระบบการศึกษาพฤติกรรมการส่งวัตถุระหว่างมนุษย์กับมนุษย์ (Human-to-Human Object Handover)

ในการศึกษาพฤติกรรมการส่งวัตถุระหว่างมนุษย์กับมนุษย์ (HHH) นี้ โดยมีวัตถุประสงค์ดังนี้ (1) ตรวจสอบลำดับพฤติกรรมการส่งวัตถุของมนุษย์และวิเคราะห์ตำแหน่งของจุดถ่ายโอนวัตถุขณะถ่ายโอนวัตถุ, (2) เข้าใจความสัมพันธ์ของแรงปฏิสัมพันธ์แบบไดนามิกของผู้ส่ง (Giver) และผู้รับ (Sender) ขณะถ่ายโอนวัตถุที่ขึ้นอยู่กับเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของวัตถุ, และ (3) ควบคุมแรงปฏิสัมพันธ์

สัมพันธ์ก่อนปล่อยวัตถุเพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของแขนของผู้ส่ง (Giver) โดยวัตถุที่ใช้จะถูกติดตั้งเซนเซอร์วัดแรง ATI mini40 multi-axis ตรงกลางของขดตั้งรูปที่ 3-7 เพื่อตรวจจับสัญญาณของแรงที่ใช้ในการส่งและรับวัตถุ และมีขนาดการเปลี่ยนแปลงมวลของขดตั้งตั้งแต่ 0.25, 0.35, 0.45, และ 0.55 กิโลกรัม ขณะเดียวกันกล้อง HSR-3D-depth ที่ถูกติดตั้งบริเวณส่วนหัวของหุ่นยนต์ตั้งรูปที่ 3-4 จะทำการตรวจจับระยะห่างของของผู้ส่งและผู้รับ ความสูงในการส่งวัตถุ รวมถึงตำแหน่งการเคลื่อนที่ และความเร็วในการเคลื่อนที่ของวัตถุตั้งตัวอย่างการจับวัตถุแสดงตั้งรูปที่ 3-5 ข้อมูลที่ได้จากเซนเซอร์วัดแรงและเซนเซอร์ตรวจจับวัตถุนี้จะถูกนำกลับมาประมวลผลในคอมพิวเตอร์ตั้งรูปที่ 3-2 โดยข้อมูลทั้งหมดจะถูกประเมินและวิเคราะห์ทางสถิติซึ่ง ประกอบด้วย การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (Analysis Of Variance) และการวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) เพื่อพิสูจน์หาความแตกต่างของค่าเฉลี่ยทางสถิติ และความสัมพันธ์ของสองตัวแปร ตามลำดับ



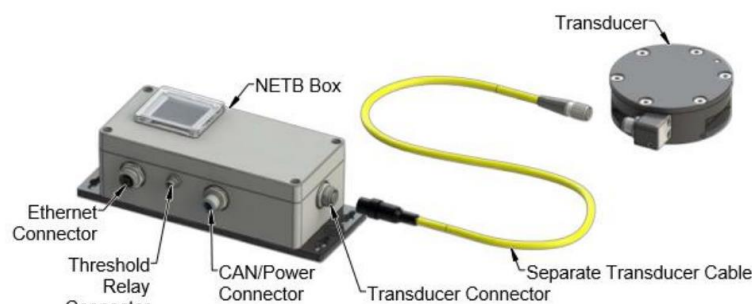
รูปที่ 3-2 รูปแบบการเชื่อมโยงของระบบ HHH

### 3.2.1 เซนเซอร์ตรวจวัดแรงและแรงบิด ATI: 6-AXIS FORCE AND TORQUE SENSOR (MINI40 IP65/IP68 SERIES)

สำหรับการศึกษาและทดลองของงานวิจัยนี้ จำเป็นจะต้องมีอุปกรณ์ที่สามารถวัดแรงที่บริเวณวัตถุที่ต้องส่งมอบ เพื่อต้องการทราบแรงที่หุ่นยนต์กระทำขณะส่งมอบวัตถุให้กับมนุษย์ ซึ่งงานวิจัยนี้ใช้เซนเซอร์วัดแรงและแรงบิด (Multi-axis force/torque sensor) ยี่ห้อ ATI Gamma มีความแข็งเกร็ง (Stiffness) สูง ไม่มีแรงหน่วง (Damping force) ข้อดีคือการวัดค่าของแรงในช่วงระยะเวลาสั้น ๆ จะมีความถูกต้องมากขึ้น เซนเซอร์สามารถตรวจวัดได้ 6 ค่า คือ ค่าของแรงในแนวแกน  $x, y,$  และ  $z$  ( $F_x, F_y,$  และ  $F_z$ ) และค่าของแรงบิดในแนวแกน  $x, y,$  และ  $z$  ได้แก่ ( $T_x, T_y,$  และ  $T_z$ ) มีช่วงของการวัดแรงแนวแกน  $x$  และ  $y \pm 60$  นิวตัน ที่ความละเอียด 0.02 นิวตัน แรงแนวแกน  $z$  180

นิวตัน ที่ความละเอียด 0.04 นิวตัน และแรงบิดสูงสุดแนวแกน  $x, y$ , และ  $z \pm 4$  นิวตันต่อเมตร มีความละเอียด 0.0005 นิวตันเมตร

ระบบของเซนเซอร์วัดแรงและแรงบิดจะรองรับการสื่อสารแบบ EtherNet/IP (Ethernet industrial protocol) ที่เข้ากันได้กับ DeviceNet ของระบบ Net F/T ซึ่งประกอบด้วย เซนเซอร์วัดแรงและแรงบิด สายเชื่อมต่อ และกล่อง Net box ดังรูปที่ 3-3



รูปที่ 3-3 การเชื่อมต่อ The Net F/T system กับ เซนเซอร์ [32]

### 3.2.2 เซนเซอร์ตรวจจับภาพ Asus Xtion Pro Live

กล่องที่ติดตั้งอยู่บริเวณส่วนหัวของหุ่นยนต์ คือ Asus Xtion Pro Live ที่สามารถให้ภาพที่มีขนาด VGA 640x480 และมีความละเอียด 30 เฟรมต่อวินาที (fps) หรือ QVGA 320x240 ที่ความละเอียด 60 เฟรมต่อวินาที (fps) ดังรูปที่ 3-4 จะประกอบไปด้วย (1) โปรเจกเตอร์ IR (2) กล้องสี RGB (3) กล้อง IR และสามารถตรวจจับความลึกได้ถึง 16 บิต ที่สามารถแสดงค่าความละเอียดได้ในระดับมิลลิเมตร

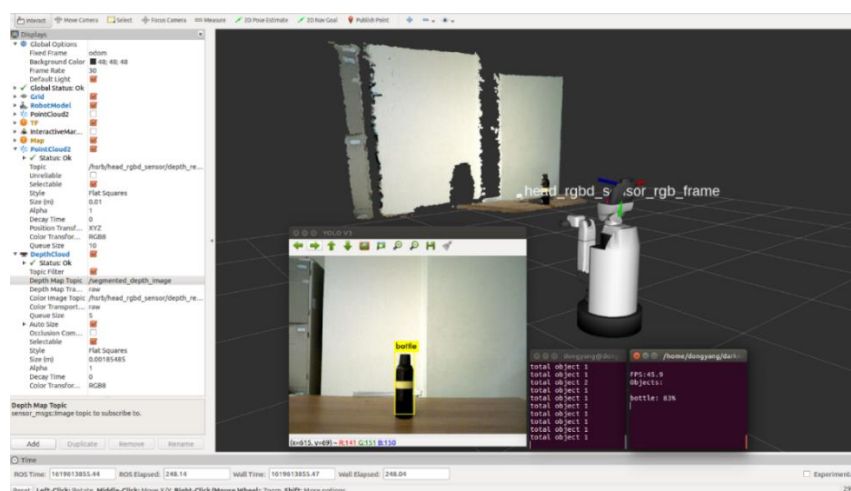


รูปที่ 3-4 เซนเซอร์ตรวจจับภาพ Asus Xtion Pro Live [33]

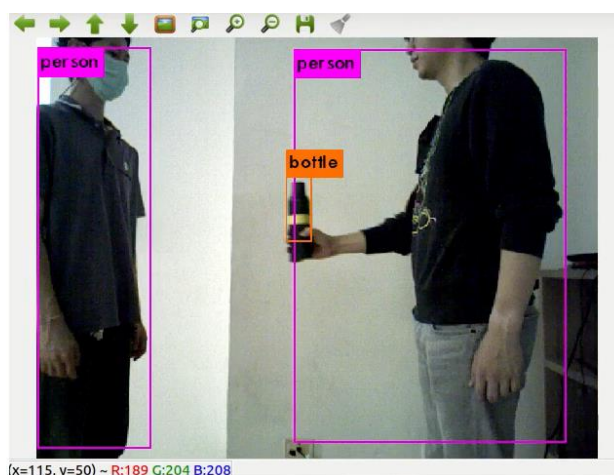
### 3.2.3 ระบบการตรวจจับวัตถุ (Object detection system)

เนื่องด้วยกล่อง HSR-3D-depth ที่ถูกติดตั้งบริเวณส่วนหัวของหุ่นยนต์ HSR สามารถตรวจจับวัตถุ และสามารถวัดระดับความลึกหรือระยะห่างของวัตถุเทียบกับตัวหุ่นยนต์ได้ จึงได้นำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยนี้ดังรูปที่ 3-5 และรูปที่ 3-6 ในการตรวจจับตำแหน่งของผู้ส่ง (Giver) ผู้รับ

(Receiver) และวัตถุขณะถ่ายโอนวัตถุแบบเรียลไทม์ (Real-time) โดยผู้วิจัยประยุกต์ใช้ไลบรารี (library) ที่มีชื่อว่า YOLO object detection นำมาประยุกต์ร่วมแพ็คเกจกล้องของหุ่นยนต์ กล่าวคือ จะต้องทำการนำค่าความลึกและความกว้างที่มากที่สุดของกล้องที่จะทำการอ่านค่าได้ มาเทียบกับขนาดการอ่านค่าและการแสดงภาพของ YOLO เพื่อให้มีอัตราส่วนที่ตรงกันกับระยะห่างจริง จากนั้นเมื่อหุ่นยนต์ตรวจจับวัตถุได้ YOLO จะทำการสร้างกรอบล้อมรอบวัตถุ และคำนวณหาจุดกึ่งกลางของวัตถุ เมื่อจุดกึ่งกลางนี้เคลื่อนที่ไปที่ใด ๆ ของการแสดงผลภาพของ YOLO ก็สามารถคำนวณกลับมาหาระยะการเคลื่อนที่จริงของวัตถุได้



รูปที่ 3-5 ตัวอย่างการตรวจจับวัตถุของหุ่นยนต์ HSR (Object detection)



(a) การตรวจจับตำแหน่งของมนุษย์และขวด

```

dongyang@dongyang-PC: ~/darknet_ws
total object 2
total object 2
total object 2
total object 2
total object 2
total object 2
total object 2
total object 2
total object 2
total object 2
total object 4
total object 3
total object 3

/home/dongyang/darknet_ws/src/darkn
FPS: 49.6
Objects:
person: 89%
person: 86%
bottle: 40%

```

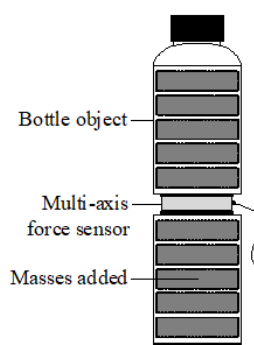
(b) แสดงจำนวนที่ตรวจจับได้

(c) แสดงเปอร์เซ็นต์ความแม่นยำในการตรวจจับ

รูปที่ 3-6 ตัวอย่างแสดงการทำงานของ YOLO

### 3.2.4 วัตถุประสงค์สำหรับการทดลอง

วัตถุที่ถูกออกแบบให้มีลักษณะคล้ายกับขวดน้ำดังรูปที่ 3-7 ขวดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 มิลลิเมตร ความยาวของขวดยาว 270 มิลลิเมตร มีมวล 0.25 กิโลกรัมรวม ดังรูปที่ 3-8 (b) โดยจะมีเซนเซอร์วัดแรงติดตั้งอยู่ตรงกลางขวดด้วยงานยึด ซึ่งแสดงดังรูปข้างล่าง วัตถุนี้สามารถเพิ่มมวลได้ตั้งแต่ 0.25 - 0.55 กิโลกรัม โดยเพิ่มมวลได้ครั้งละ 0.1 กิโลกรัม และมีฝาปิดกั้นมวล



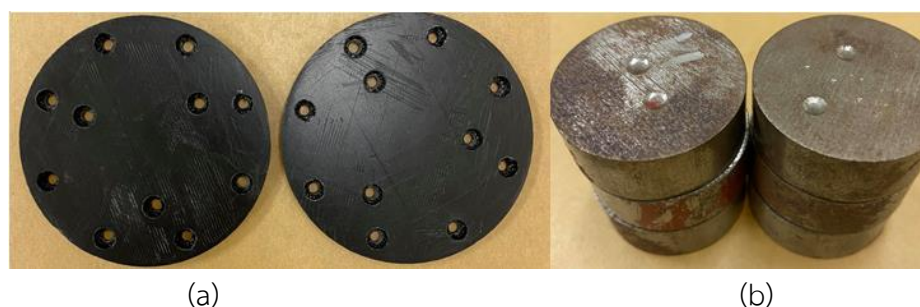
รูปที่ 3-7 วัตถุที่ใช้ในการทดลอง



(a)

(b)

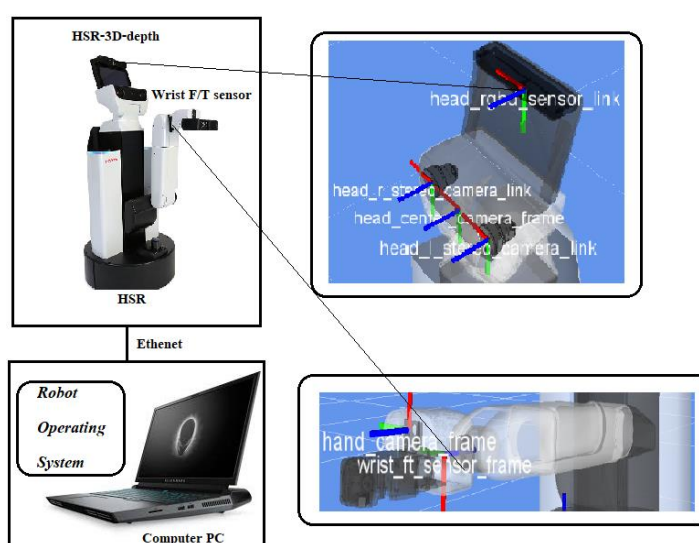
รูปที่ 3-8 (a) ฝาปิด มวลโลหะที่นำมาเพิ่มน้ำหนัก (b) ลักษณะของขวด



รูปที่ 3-9 (a) งานยึดระหว่างเซนเซอร์วัดแรงและขด (b) ก้อนโลหะเพื่อเพิ่มมวลของขด

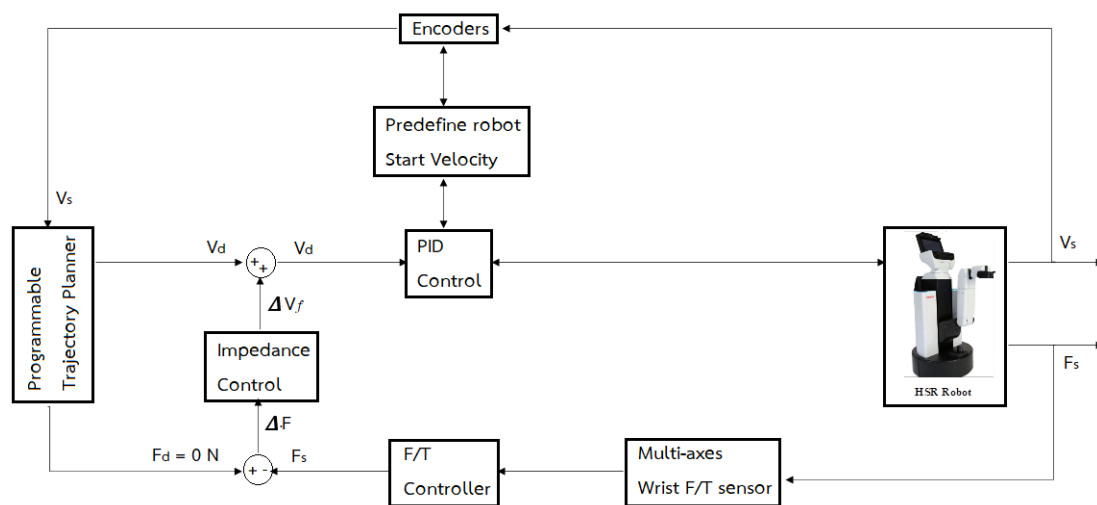
### 3.3 การออกแบบระบบการศึกษาพฤติกรรมการส่งวัตถุระหว่างมนุษย์กับหุ่นยนต์ (Human-to-Robot object Handover)

ในการศึกษาพฤติกรรมการส่งวัตถุระหว่างมนุษย์กับหุ่นยนต์ (HRH) นี้ จะให้ผู้เข้าร่วมการทดลองทำการรับวัตถุจากหุ่นยนต์ กรอบแนวคิดการควบคุมหุ่นยนต์เชิงพฤติกรรมนั้นได้มาจากการศึกษาวิเคราะห์ผลการทดลองใน 3.2 ทั้งนี้ระบบการควบคุมหุ่นยนต์ให้สามารถเคลื่อนไหวตามแรงกระทำนั้นต้องอาศัยเซนเซอร์ตรวจวัดแรงถูกติดตั้งที่บริเวณข้อมือของหุ่นยนต์ดังรูปที่ 3-10 ข้อมูลที่ได้จะถูกส่งไปประมวลผลที่คอมพิวเตอร์ด้วยอัลกอริทึมการควบคุมแบบอิมพีแดนซ์ ก่อนที่จะส่งไปควบคุมการเคลื่อนที่และเคลื่อนไหวของหุ่นยนต์ เพื่อให้หุ่นยนต์ทำงานได้สอดคล้องกับแรงภายนอกที่มากระทำ ผ่านการใช้แพ็คเกจ Impedance control ที่ถูกติดตั้งในหุ่นยนต์ ขณะเดียวกันกล้อง HSR-3D-depth จะทำการตรวจจับตำแหน่งการเคลื่อนที่ของวัตถุและความเร็วการเคลื่อนที่ของวัตถุ โดยการเชื่อมต่อบนระบบจะเป็นดังรูปที่ 3-10



รูปที่ 3-10 รูปแบบการเชื่อมโยงของระบบ HRH

โดยแผนผังแสดงการทำงานและการควบคุมระบบของหุ่นยนต์ HSR แสดงดังรูปที่ 3-11 ประกอบด้วยลูกควบคุม 2 ลูกที่ซ้อนกัน กล่าวคือลูกบนควบคุมความเร็วของหุ่นยนต์ และลูกล่างควบคุมแรงและแรงบิดของหุ่นยนต์ โดยเริ่มต้นหุ่นยนต์จะเคลื่อนที่ตามขนาดและทิศทางของความเร็วที่ถูกกำหนดไว้ตอนต้น ( $V_d$ ) ซึ่งความเร็วที่ใช้ในการเคลื่อนที่ที่มีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาอันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงของความเร่ง ความเร็วที่ไม่เสถียรนี้จะถูกควบคุมด้วยตัวควบคุม PID เพื่อให้การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์มีความเสถียรภาพ โดยหุ่นยนต์จะมีเอ็นโค้ดเดอร์ (Encoders) ที่ติดตั้งที่มอเตอร์ของหุ่นยนต์เพื่อทำหน้าที่ตรวจวัดความเร็วของการหมุนของล้อ ถ้าหากมีแรงกระทำที่ตัวทำงานส่วนปลาย ( $F_s$ ) ปริมาณและทิศทางของแรงที่ได้จากเซนเซอร์ตรวจวัดแรงและแรงบิดที่ถูกติดตั้งที่ข้อมือของหุ่นยนต์จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับแรงที่กำหนดไว้ตอนต้นหรือแรงอ้างอิงมีค่าเท่ากับ 0 นิวตัน ( $F_d = 0\text{ N}$ ) โดยแรงและแรงบิดที่ได้จากเปรียบเทียบ ( $\Delta F$ ) นี้จะเป็นตัวแปรควบคุมพฤติกรรมของหุ่นยนต์ กล่าวคือ แรงและแรงบิดที่ได้จากเปรียบเทียบ ( $\Delta F$ ) จะถูกนำไปคำนวณร่วมกับตัวแปรของระบบตัวควบคุมอิมพีแดนซ์ เพื่อให้ได้ความเร็วและทิศทางของการเคลื่อนที่ ( $\Delta V_f$ ) ที่สอดคล้องกับแรงและทิศทางแรงที่มากกระทำที่ตัวทำงานส่วนปลาย โดย  $V_s$  คือความเร็วปัจจุบันที่ได้จากตัวควบคุม PID

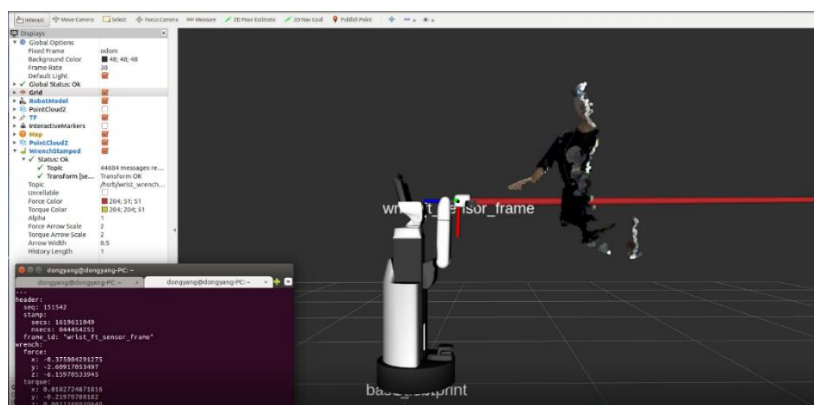


รูปที่ 3-11 แผนภาพเชื่อมโยงการทำงานของ HRH

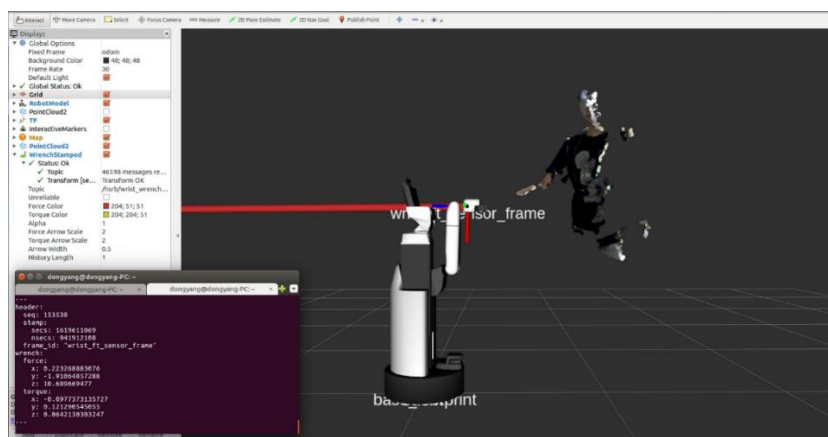
### 3.3.1 ระบบการตรวจรับแรง (Force/Torque system)

เซนเซอร์วัดแรงที่ถูกติดตั้งอยู่ในบริเวณข้อต่อของตัวทำงานส่วนปลาย และมีแค้คเกจสำหรับการใช้งานเซนเซอร์วัดแรง ซึ่งเป็นเซนเซอร์ที่สามารถวัดแรงได้ 6 แกน และสามารถแสดงถึงทิศทางของแรงที่กระทำต่อเซนเซอร์ได้ผ่าน RVIZ ซึ่งในงานวิจัยนี้ จะใช้แรงโต้ตอบในแนวแกนนอน คือ แรงดึง (Tension force) และ แรงบีบ (compression force) ดังรูปที่ 3-12 และรูปที่ 3-13 ตามลำดับ





รูปที่ 3-12 ตัวอย่างแสดงถึงทิศทางของแรงดึง



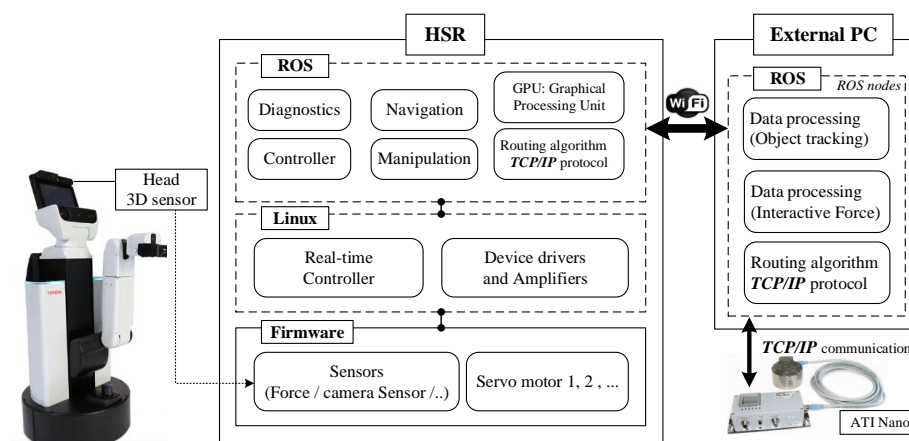
รูปที่ 3-13 ตัวอย่างแสดงถึงทิศทางของแรงบีบ

### 3.4 รูปแบบการเชื่อมโยงซอฟต์แวร์ (Software architecture)

#### 3.4.1 รูปแบบการเชื่อมโยงซอฟต์แวร์ของการศึกษาพฤติกรรมการส่งวัตถุระหว่างมนุษย์กับมนุษย์ (Software architecture of HHH)

สำหรับการวัดแรงปฏิสัมพันธ์ขณะทำการส่งมอบวัตถุระหว่างมนุษย์กับมนุษย์ เช่น เซอร์วัดแรง จะต่อกับกล่องควบคุมสำหรับส่งปริมาณสัญญาณมาตรฐานวัดที่มีความแม่นยำ และสามารถสื่อสารกับ ROS ที่ติดตั้งกับคอมพิวเตอร์ โดยใช้แพ็คเกจการสื่อสาร TCP/IP และมีการใช้เซ็นเซอร์ตรวจจับภาพ HSR-3D-depth ที่ติดอยู่บริเวณส่วนหัวของหุ่นยนต์ HSR สำหรับการตรวจจับและติดตามวัตถุ ในการหาโปรไฟล์ความเร็วของวัตถุในขณะเคลื่อนที่ระหว่างทำการถ่ายโอนวัตถุ จากนั้นข้อมูลจะถูกส่งไปยังคอมพิวเตอร์ผ่านสาย LAN หรือ แบบ Wireless เพื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลต่อไปดังรูปที่ 3-14 ที่แสดงถึงรูปแบบการเชื่อมโยงซอฟต์แวร์ โดยการควบคุมการทำงานของระบบการศึกษาพฤติกรรมการส่งวัตถุระหว่างมนุษย์กับมนุษย์ (HHH) นี้ ถูกควบคุมภายใต้ระบบปฏิบัติการหุ่นยนต์ (ROS) โปรแกรม

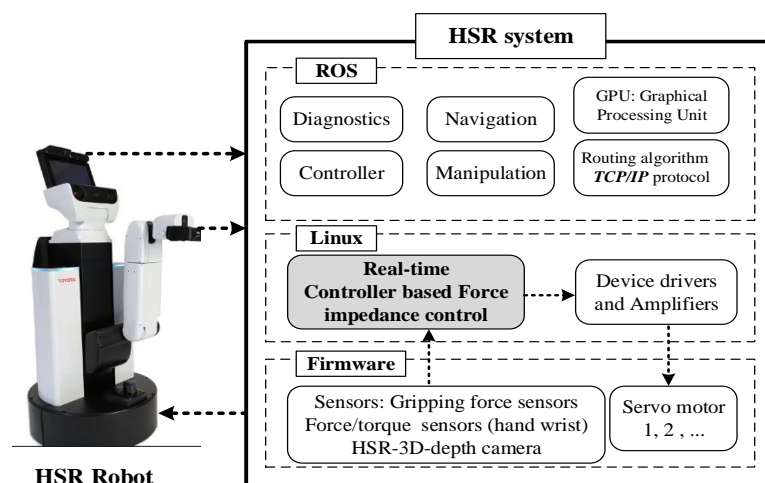
ย่อยทั้งหมดจะต้องทำงานพร้อมกัน และต้องมีอัตราการสื่อสารที่คงที่ ซึ่งการติดตั้งและการเตรียมพร้อมสำหรับการทดลอง ในแต่ละการวิจัยย่อยจะเหมือนกันทั้งหมด



รูปที่ 3-14 รูปแบบการเชื่อมโยงซอฟต์แวร์ HHR [31]

### 3.4.2 รูปแบบการเชื่อมโยงซอฟต์แวร์ของการศึกษาพฤติกรรมการส่งวัตถุระหว่างมนุษย์กับหุ่นยนต์ (Software architecture of HRH)

สำหรับการวัดแรงปฏิสัมพันธ์ขณะทำการส่งวัตถุระหว่างมนุษย์กับหุ่นยนต์เซนเซอร์วัดแรงที่ข้อมือของหุ่นยนต์จะส่งปริมาณสัญญาณมาตรวัดที่มีความแม่นยำ และสามารถสื่อสารกับ ROS ที่ติดตั้งกับคอมพิวเตอร์ และมีการใช้เซนเซอร์ตรวจจับภาพ HSR-3D-depth ที่ติดอยู่บริเวณส่วนหัวของหุ่นยนต์ HSR สำหรับการตรวจจับและติดตามวัตถุ ในการหาโปรไฟล์ความเร็วของวัตถุในขณะที่เคลื่อนที่ระหว่างทำการถ่ายโอนวัตถุ จากนั้นข้อมูลจะถูกส่งไปยังคอมพิวเตอร์ผ่านสาย LAN หรือแบบ Wireless เพื่อทำการวิเคราะห์โครงสร้างของซอฟต์แวร์สำหรับการควบคุมการทำงานของ การศึกษาพฤติกรรมการส่งวัตถุระหว่างมนุษย์กับหุ่นยนต์ (HRH) นี้ ถูกควบคุมภายใต้ระบบปฏิบัติการหุ่นยนต์ (ROS) โปรแกรมย่อยทั้งหมดจะต้องทำงานพร้อมกันและอัตราการสื่อสารต้องคงที่ ดังรูปที่ 3-15 และใช้แพ็คเกจ Impedance Control ในหุ่นยนต์สำหรับปรับเปลี่ยนค่าพารามิเตอร์ โดยใช้เทคนิคปรับเทียบค่า ในวิเคราะห์การหาความสัมพันธ์



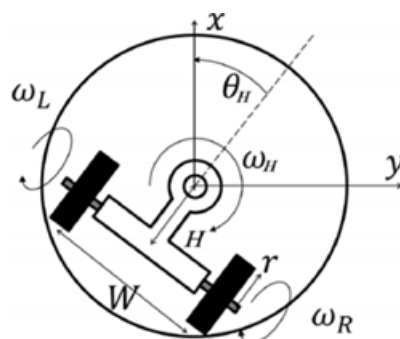
รูปที่ 3-15 รูปแบบการเชื่อมโยงซอฟต์แวร์ HRH [34]

### 3.5 จลศาสตร์ของหุ่นยนต์ HSR (Kinematics of HSR)

#### 3.5.1 ระบบจัดการความร่วมมือทั้งร่างกาย (Whole-body cooperative manipulation system)

หุ่นยนต์ HSR จะใช้กลไกการขับเคลื่อนแบบล้อคู่ (dual-wheel caster-drive) ดังแสดงรูปที่

3-16



รูปที่ 3-16 กลไกการขับเคลื่อนแบบล้อคู่ [17]

การควบคุมการเคลื่อนไหวทั้งร่างกายจะถูกอธิบายด้วย จาคอเบียน (Jacobian ,  $J$ ) ดังสมการที่ (3-11)

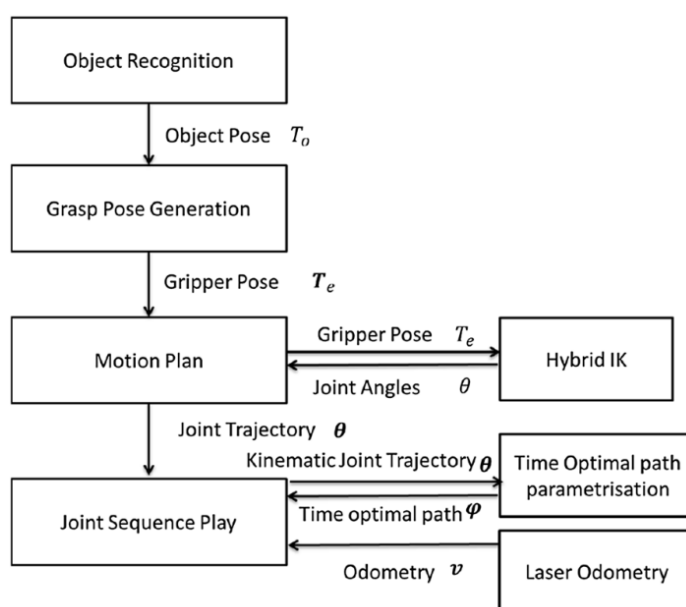
$$J = \begin{bmatrix} \frac{r}{2} \cos \theta_H - \frac{rH}{w} \sin \theta_H & \frac{r}{2} \cos \theta_H + \frac{rH}{w} \sin \theta_H & 0 \\ \frac{r}{2} \sin \theta_H + \frac{rH}{N} \cos \theta_H & \frac{r}{2} \sin \theta_H - \frac{rH}{N} \cos \theta_H & 0 \\ \frac{r}{w} & -\frac{r}{w} & 1 \end{bmatrix} \quad (3-11)$$

โดยที่	$r$	คือ รัศมีของล้อ
	$\theta_H$	คือ มุมของแกนหมุน
	$w$	คือ ระยะห่างระหว่างล้อ
	$H$	คือ ระยะห่างจากแกนกลางลำตัวถึงเพลา

จาโคเบียน ( $J$ ), ความเร็วของล้อขวา, ล้อซ้าย และแกนหมุน ( $\omega_R, \omega_L, \omega_H$ ) จะถูกกำหนดมาจากความเร็วของตัวหุ่นยนต์ ( $\dot{x}, \dot{y}, \dot{\theta}$ ) ดังสมการที่ (3-12)

$$\begin{bmatrix} \omega_R \\ \omega_L \\ \omega_H \end{bmatrix} = J^{-1} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (3-12)$$

สมการจาโคเบียนนี้สามารถหาความเร็วการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ที่มีการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมตลอดเวลาได้ เนื่องจากเป็นกลไกไฮโลนิกจึงสามารถหาความเร็วได้ทุกทิศทาง จากการออกแบบนี้ ทำให้หุ่นยนต์สามารถวางตำแหน่งตัวทำงานส่วนปลายได้หลากหลาย เนื่องจากการทำงานร่วมกันระหว่างฐาน 4 DoF ของแขนและ 1 DoF ของลำตัว โดยรูปที่ 3-17 แสดงถึงระบบจัดการความร่วมมือของหุ่นยนต์ HSR



รูปที่ 3-17 แผนผังลำดับระบบจัดการความร่วมมือของหุ่นยนต์ [17]

### ●การรับรู้วัตถุ (Object recognition)

ตำแหน่งและการวางแนวของวัตถุตรวจจับได้จากกล้องเซนเซอร์ความลึก หรืออื่น ๆ ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ที่ต้องการใช้ และสภาพแวดล้อม

### ●ท่าทางของตัวทำงานส่วนปลาย (Grasp pose generation)

ลำดับของจำนวนท่าทางตัวทำงานส่วนปลาย  $T_e = \{T_{e_1}, T_{e_2}, \dots, T_{e_n}\}$  โดยที่  $T_{e_i}$  คือท่าทางของตัวทำงานส่วนปลายที่จะทำการหยิบจับวัตถุ ซึ่งจำนวนท่าทางในการหยิบจับวัตถุ ( $i$ ) จะขึ้นอยู่กับตำแหน่ง และแนวการเคลื่อนที่ของตัวทำงานส่วนปลาย

### ●การวางแผนการเคลื่อนไหว (Motion planning)

สิ่งนี้จะคำนวณวิถีการเคลื่อนไหวของทั้งร่างกาย การเคลื่อนที่ของฐาน รวมถึงการหลีกเลี่ยงการชนกับวัตถุภายนอก และตัวมันเองเพื่อจะวางแผนและเคลื่อนที่ไปยังที่ที่ต้องการ ซึ่งจะใช้หลักของจลนศาสตร์การผกผัน (Inverse kinematics) เป็นพื้นฐานในการออกแบบการเคลื่อนที่และวางแผน ซึ่งจะใช้เวลาในการประมวลผลเป็นเวลานาน นักพัฒนาจึงพัฒนาอัลกอริทึมขึ้นมาใหม่ชื่อว่าจลนศาสตร์การผกผันแบบไฮบริด (Hybrid Inverse kinematics) เพื่อลดเวลาการประมวลผล

### ●การดำเนินการเคลื่อนไหว (Motion execution)

สมการทางเรขาคณิตของการเคลื่อนที่และเคลื่อนไหวของหุ่นยนต์ จะถูกแปลงสมการใหม่ที่มีเวลาเข้ามาเกี่ยวข้อง โดยจะกำหนดเวลาที่เหมาะสมและดีที่สุด โดยจะใช้เซนเซอร์วัดระยะเพื่อนำมาประมวลผลร่วมกับเวลาที่กำหนดเพื่อให้ได้ความเร็วในการเคลื่อนที่

### ●CBiRRT2

CBiRRT2 ถูกออกแบบมาเพื่อวิเคราะห์ แก้ไขปัญหาและประมวลผลงานที่มีความซับซ้อน อันเนื่องมาจากสภาพแวดล้อม ข้อจำกัด หรือเงื่อนไขต่าง ๆ เพื่อให้บรรลุภารกิจนั้นอย่างรวดเร็ว ซึ่ง CBiRRT2 เป็นตัวแปรของอัลกอริทึมแบบสองทิศทาง Rapidly exploring Random Tree (PRT) ที่สามารถวิเคราะห์หารูปแบบการทำงานได้จากการกำหนดค่า ซึ่งการจะทำให้อัลกอริทึมนี้บรรลุผลอย่างมีประสิทธิภาพจะต้องใช้หลัก Task Space Region (TSR) และเป็นไปตามเงื่อนไขดังต่อไปนี้ (1) จำกัดจำนวนตัวอย่างในการค้นหารูปแบบการทำงาน และ (2) กำหนดเงื่อนไขเพิ่มเติมในระหว่างค้นหารูปแบบ การทำงานของ CBiRRT2 สำหรับระบบจัดการการเคลื่อนไหวของหุ่นยนต์รอบทิศทางมีการลักษณะการทำงาน 2 แบบ (1) เคลื่อนมือไปยังเป้าหมายให้มากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ โดยฐานของหุ่นยนต์จะมีการเคลื่อนที่น้อยที่สุดที่เป็นไปได้ ดังรูปที่ 3-18 (a) และ (2) ฐานจะเคลื่อนที่ไปยังเป้าหมายมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ โดยแขนของหุ่นยนต์จะเคลื่อนที่ไปหาวัตถุที่น้อยที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ ดังรูปที่ 3-18 (b) ซึ่งการเคลื่อนไหวของแขนและการเคลื่อนไหวของฐาน จำเป็นที่จะต้องใช้จลนศาสตร์แบบผกผัน การวางแผนการเคลื่อนที่ และระยะห่างที่เหมาะสมสำหรับการหยิบจับวัตถุ



รูปที่ 3-18 แสดงผลลัพธ์ของการวางแผนวิถีการเคลื่อน (a) การทำงานส่วนปลายไปตามเส้นตรง หรือ (b) วิธีที่จะเคลื่อนที่ไปตามเส้นโค้งวงกลม โดยกำหนดองศาอิสระของฐาน HSR [17]

#### ●Hybrid inverse kinematics

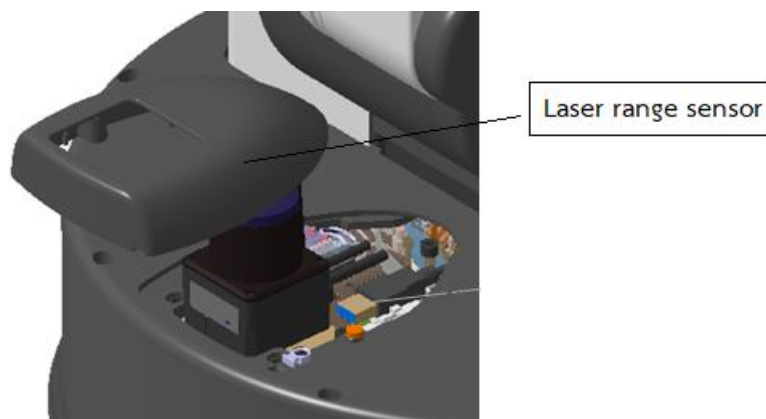
การวางแผนการเคลื่อนไหว ในระบบ CBiRRT2 จะนำจลนศาสตร์แบบผกผันมาคำนวณหลายๆ ครั้งเพื่อให้ได้วิถีการเคลื่อนไหวที่ดีที่สุด ซึ่งจะนิยมใช้แนวความคิดเชิงวิเคราะห์มากกว่าแนวความคิดที่เป็นทางคณิตศาสตร์ HSR มีแนวทางการวิเคราะห์สำหรับ 8 DoF (5 arm DoF + 3 base DoF) และมีแนวทางการคิดที่สามารถให้หุ่นยนต์ทำงานได้เหมาะสมกับทุกที่ทั่วโลก

#### ●กรอบของการกำหนดพารามิเตอร์เส้นทางเวลาที่เหมาะสมที่สุด (Time optimal path parameterization : TOPP)

โดยทั่วไปหุ่นยนต์จะเคลื่อนที่ได้อย่างแม่นยำและสอดคล้องกับวิถีทางเรขาคณิตของร่างกายทั้งหมดจำเป็นต้องพิจารณาขีดจำกัดของมอเตอร์และแรงเสียดทาน เนื่องจาก HSR ใช้กลไกการขับเคลื่อนล้อคู่ จึงมีความสัมพันธ์ของข้อจำกัดของความเร็ว และแรงบิดของล้อจึงมีวิธีการที่ซับซ้อนสำหรับการเปลี่ยนแปลงความเร็วและการหมุน จึงเป็นเรื่องยากสำหรับการกำหนดค่าจำกัดของความเร็วของหุ่นยนต์ HSR ดังนั้น TOPP จึงถูกออกแบบมาเพื่อแก้ไขปัญหา

#### ●Laser Odometry

การเคลื่อนที่ของฐานที่เป็นส่วนหนึ่งขององศาอิสระ (DoF) สำหรับวางตำแหน่งมือของหุ่นยนต์ เนื่องจากเอนโค้ดเดอร์ (Encoder) ที่ติดอยู่กับมอเตอร์ไม่มีความแม่นยำพอ จึงใช้เซนเซอร์วัดระยะทางที่มีชื่อว่าเซนเซอร์ LiDAR (Light Detection and Ranging) ที่ถูกติดตั้งอยู่ที่ฐานของหุ่นยนต์แสดงดังรูปที่ 3-19 สำหรับวัดระยะทางและปรับปรุงความแม่นยำในการเคลื่อนที่ของฐานหุ่นยนต์ HSR



รูปที่ 3-19 เซนเซอร์ LIDAR [17]

### 3.6 การควบคุมอิมพีแดนซ์ HSR (Impedance Control)

การควบคุมแบบอิมพีแดนซ์ [35] คือ การควบคุมแรงต้านเชิงกลของตัวทำงานส่วนปลาย ของหุ่นยนต์ที่สามารถปรับได้โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงโต้ตอบและตำแหน่งของหุ่นยนต์ วิธีนี้จะใช้การป้อนค่าแรงกลับสำหรับการควบคุมแบบอิมพีแดนซ์ เพื่อนำไปควบคุมความแตกต่างระหว่างตำแหน่งที่ต้องการและตำแหน่งจริง

การควบคุมอิมพีแดนซ์ คือ ระบบควบคุมหุ่นยนต์แบบเชิงกลของหุ่นยนต์ ที่สามารถกำหนดได้จากความสัมพันธ์ระหว่างความเร็ว ( $\dot{X}$ ) และแรงภายนอก ( $F$ ) โดยทั่วไปลักษณะทางโครงสร้างของหุ่นยนต์จะเทียบเท่ากับ ฟังก์ชันอนุพันธ์การถ่ายโอนลำดับที่ 2 ของ มวล (Mass), สปริง (Spring), และตัวลดแรงสั่นสะเทือนหรือตัวหน่วง (Damper) สมการของระบบควบคุมแบบอิมพีแดนซ์ดังต่อไปนี้

$$M_d(\ddot{X} - \ddot{X}_d) + D_d(\dot{X} - \dot{X}_d) + K_d(X - X_d) = -F \quad (3-13)$$

วิธีการเคลื่อนที่แบบเรียลไทม์ของตัวทำงานส่วนปลายของหุ่นยนต์ สามารถควบคุมได้ด้วยความเร่งดังนี้

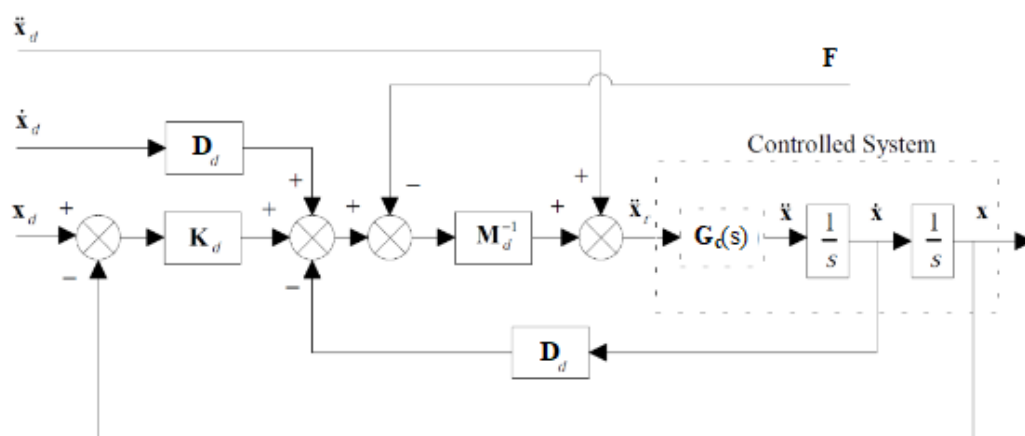
$$\ddot{X} = \ddot{X}_d + M_d^{-1}[-F + D_d(\dot{X} - \dot{X}_d) + K_d(X - X_d)] \quad (3-14)$$

โดยที่	$M_d$	คือ เมทริกซ์ความเฉื่อย (Inertia matrix)
	$D_d$	คือ เมทริกซ์ตัวหน่วง (Damping matrix)
	$K_d$	คือ เมทริกซ์ค่าความแข็งของสปริง (Stiffness matrix)
	$X, \dot{X}, \ddot{X}$	คือ ค่าตำแหน่ง, ความเร็ว, และความเร่ง ณ ขณะนั้นของหุ่นยนต์ตามลำดับ

$X_d, \dot{X}_d, \ddot{X}_d$  คือ ค่าตำแหน่ง, ความเร็ว, และความเร่งที่ต้องการตามลำดับ

$F$  คือ แรงภายนอกที่ได้จากตัวทำงานส่วนปลายของหุ่นยนต์

ในงานวิจัยนี้จะหาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงแรงที่ขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงตัวแปลงค่าคงที่ของสปริง (K) และตัวหน่วง (D) เพื่อควบคุมพฤติกรรมของหุ่นยนต์ [34] ดังการทดลองที่ 4.2.1 และ 4.2.2 โดยสมการที่ (3-14) สามารถแสดงแผนภาพการควบคุมหุ่นยนต์ด้วยการควบคุมแบบอิมพีแดนซ์ได้ดังรูปที่ 3-20



รูปที่ 3-20 แผนภาพแสดงการควบคุมแบบอิมพีแดนซ์ [35]

จากการทบทวนวรรณกรรม และผลที่ได้จากวิเคราะห์แรงของการส่งวัตถุระหว่างมนุษย์กับมนุษย์พบว่า แรงในการส่งวัตถุในแนวตั้ง ( $f_{int}^y$ ) เหมือนค่าคงที่ กล่าวคือน้ำหนักรวมของวัตถุ ( $f_{mg}$ ) มีค่าเท่ากับแรงที่มากระทำกับวัตถุในแนวตั้ง (Vertical) จากที่กล่าวมาข้างต้นนี้ผู้วิจัยจึงออกแบบการทดลองไว้ 2 ส่วน คือ (1) การศึกษาพฤติกรรมการส่งวัตถุระหว่างมนุษย์กับมนุษย์ (HHH) และ(2) การศึกษาพฤติกรรมการส่งวัตถุระหว่างหุ่นยนต์กับมนุษย์ (HRH) โดยมีการอธิบายรายละเอียดต่าง ๆ ประกอบด้วย วิธีการทดลอง วิธีการวิเคราะห์ การเชื่อมโยงซอฟต์แวร์ อุปกรณ์ที่ใช้ และระบบต่าง ๆ เช่น ระบบตรวจจับวัตถุ ระบบตรวจวัดแรง และการควบคุมพฤติกรรมหุ่นยนต์ด้วยการควบคุมอิมพีแดนซ์ดังที่กล่าวไว้ข้างต้น โดยการศึกษาการทดลอง การวิเคราะห์การทดลอง และผลการทดลองจะกล่าวในบทถัดไป



## บทที่ 4

### วิธีการทดลองและผลการทดลอง

บทนี้จะอธิบายวิธีการทดลอง, ผลการทดลอง, และการวิเคราะห์ผลการทดลอง สำหรับการออกแบบระบบการควบคุมเชิงพฤติกรรมของหุ่นยนต์ HSR ในการส่งวัตถุให้แก่มนุษย์ (HRH) [36] โดยหุ่นยนต์จะต้องมีพฤติกรรมการส่งวัตถุที่เทียบเคียงกับมนุษย์ [37]

จากที่กล่าวไว้ในบทก่อนหน้า การที่จะให้หุ่นยนต์สามารถทำงานร่วมกันกับมนุษย์และมีพฤติกรรมที่เทียบเคียงกับมนุษย์ได้นั้น จำเป็นที่จะต้องศึกษาพฤติกรรมท่าทางการส่งวัตถุระหว่างมนุษย์กับมนุษย์ (HHH) ก่อนนำมาประยุกต์ใช้ให้หุ่นยนต์มีพฤติกรรมเช่นเดียวกับมนุษย์ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการออกแบบการทดลองไว้ 2 ส่วน คือ (1) การศึกษาพฤติกรรมการส่งวัตถุระหว่างมนุษย์กับมนุษย์ (HHH) ซึ่งรวมไปถึงแรงในการรับวัตถุและส่งวัตถุ เวลาในการส่งวัตถุ ความเร็วในการส่งวัตถุ ตำแหน่งของผู้รับและผู้ส่งขณะทำการส่งวัตถุระหว่างกัน โดยข้อมูลที่ได้จากการทดลองนี้จะประกอบแนวความคิดสำหรับการออกแบบระบบการควบคุมเชิงพฤติกรรมของหุ่นยนต์ให้มีพฤติกรรมท่าทางและโครงสร้างการทำงานเช่นเดียวกับมนุษย์ และ (2) การศึกษาพฤติกรรมการส่งวัตถุระหว่างมนุษย์กับหุ่นยนต์ (HRH) โดยการทดลองนี้จะเป็นการศึกษาระบบควบคุมการเคลื่อนไหวของหุ่นยนต์ด้วยการควบคุมแบบอิมพีแดนซ์ (Impedance Control) การควบคุมนี้จะช่วยกำหนดแรงที่จะถูกส่งผ่านไปสู่มนุษย์ที่ทำงานร่วมกันกับหุ่นยนต์ (Impedance Control of Human-Robot Cooperative Task) อย่างเหมาะสมและมีประสิทธิภาพ การควบคุมแบบอิมพีแดนซ์นี้จะอยู่ในรูปแบบฟังก์ชันอนุพันธ์การถ่ายโอนอันดับที่ 2 ของระบบมวล (M) สปริง (K) และตัวหน่วง (D) ดังนั้นการทดลองนี้จึงมีจุดประสงค์ คือต้องการหาค่าของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เหมาะสมสำหรับการควบคุมแรง โดยเบื้องต้นจะเป็นการหาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงของแรงที่ขึ้นอยู่กับเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ของสปริงและตัวหน่วง การทดลองนี้จะกำหนดให้มวลมีค่าคงที่ เนื่องจากน้ำหนักของแขนของหุ่นยนต์ HSR มีค่าคงที่ตลอดเวลา หลังจากที่ได้พารามิเตอร์ดังกล่าวจนทำให้ได้ระบบควบคุมการเคลื่อนไหวของหุ่นยนต์ที่ตอบสนองต่อแรงในการส่งวัตถุให้มนุษย์ที่เหมาะสม กล่าวคือ ระบบควบคุมการเคลื่อนไหวของหุ่นยนต์ HSR สำหรับการส่งมอบวัตถุให้แก่มนุษย์ด้วยการควบคุมแบบอิมพีแดนซ์ (Impedance Control) จะต้องสามารถควบคุมหุ่นยนต์ให้มีพฤติกรรมการส่งวัตถุที่เทียบเคียงกับมนุษย์อย่างเป็นธรรมชาติมากที่สุด จากนั้นผลการทดลองดังกล่าวจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองแรก คือ การศึกษาพฤติกรรมการส่งวัตถุระหว่างมนุษย์กับมนุษย์ (HHH) เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของหุ่นยนต์ HSR จากการออกแบบกรอบแนวความคิดของพฤติกรรมการส่งวัตถุของมนุษย์ ว่ามีประสิทธิภาพมากน้อยเพียงใด

ภาพรวมของการทดลองแบ่งเป็น 5 การทดลอง โดยการทดลองที่ศึกษาการทำงานร่วมกันระหว่างมนุษย์กับมนุษย์ (HHH) 3 การทดลอง ประกอบด้วย (1) ศึกษาและวิเคราะห์ลำดับพฤติกรรม

ของมนุษย์ขณะทำการส่งวัตถุ (Behaviour sequence of HHH), (2) การศึกษาและวิเคราะห์ตำแหน่งของการถ่ายโอนวัตถุในการปฏิสัมพันธ์กันระหว่างมนุษย์กับมนุษย์ (The location of the object transfer in HHH), (3) การศึกษาและวิเคราะห์แรงปฏิสัมพันธ์ในขณะถ่ายโอนวัตถุ (Analysis of the bilateral force in the transfer phase) และการทดลองที่จะศึกษาจากการปฏิสัมพันธ์ร่วมกันระหว่างหุ่นยนต์กับมนุษย์ (HRH) 2 การทดลอง ประกอบด้วย (1) ศึกษาและวิเคราะห์ระบบควบคุมพฤติกรรมของหุ่นยนต์ด้วยการควบคุมแบบอิมพีแดนซ์ (Impedance Control) ของหุ่นยนต์สำหรับการส่งวัตถุให้แก่มนุษย์ (2) ออกแบบระบบควบคุมพฤติกรรมของหุ่นยนต์ด้วยการควบคุมแบบอิมพีแดนซ์ (Impedance Control) จากกรอบแนวความคิดของพฤติกรรมกรรมการส่งวัตถุของมนุษย์ เพื่อให้หุ่นยนต์มีพฤติกรรมกรรมการส่งวัตถุอย่างเป็นธรรมชาติและมีประสิทธิภาพที่เทียบเคียงกับมนุษย์มากที่สุด

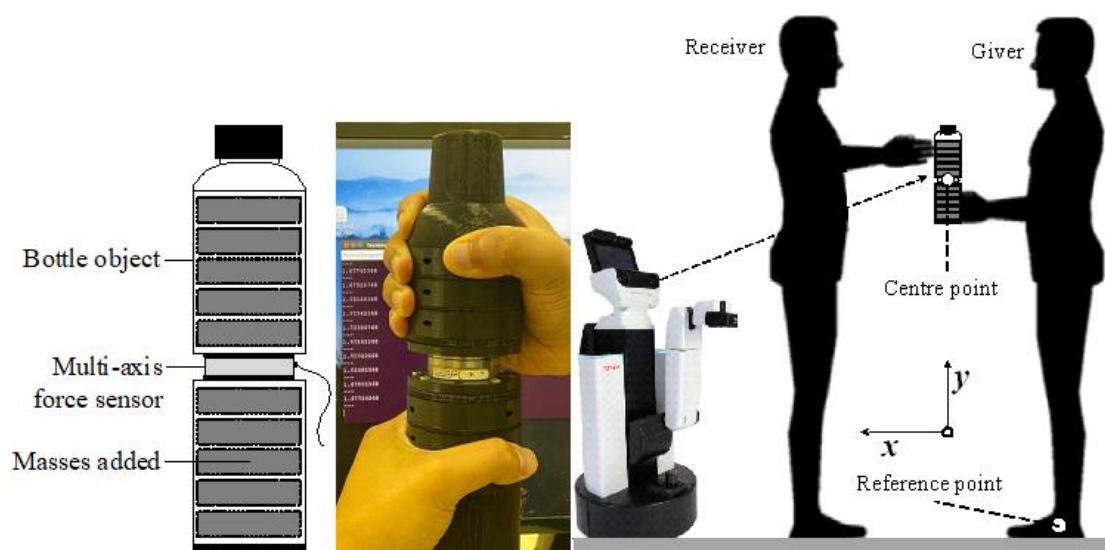
#### 4.1 การศึกษาและวิเคราะห์พฤติกรรมกรรมการส่งวัตถุระหว่างมนุษย์กับมนุษย์ (HHH)

มนุษย์มีสมองและระบบประสาทที่ควบคุมและสั่งการเคลื่อนไหวร่างกาย ให้ผู้ส่ง (Giver) และผู้รับ (Receiver) มีพฤติกรรมกรรมการส่งและรับวัตถุเป็นไปอย่างราบรื่นและสอดคล้องกัน ถึงแม้ว่าลักษณะโครงสร้างทางกายภาพที่แตกต่างกันของมนุษย์ที่ส่งผลต่อพฤติกรรมกรรมการส่งวัตถุก็ตาม เช่น ส่วนสูงที่แตกต่างกันในแต่ละบุคคล หรือความยาวของแขนที่แตกต่างกันในแต่ละบุคคล เป็นต้น รวมถึงปัจจัยอื่นๆ ที่อาจจะส่งผลต่อพฤติกรรมในการส่งวัตถุ เช่น ความแตกต่างของระยะห่างในการส่ง หรือน้ำหนักของวัตถุที่ต้องการส่ง เป็นต้น โดยมนุษย์ทุกคนจะเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมกรรมการส่งให้สอดคล้องกับปัญหาดังกล่าว เพื่อให้การส่งวัตถุบรรลุผล แต่หุ่นยนต์ไม่สามารถแก้ไขปัญหามีความซับซ้อนจากหลากหลายปัจจัยเหมือนมนุษย์ได้ จึงเป็นที่มาของการวิจัยในหัวข้อนี้ [31] เพื่อพัฒนาอัลกอริทึมที่สามารถเพิ่มศักยภาพของหุ่นยนต์ที่เทียบเคียงกับมนุษย์ได้

● **วัตถุประสงค์ของการวิจัย** คือ เพื่อทำการวิเคราะห์และศึกษาพฤติกรรมท่าทางการส่งวัตถุระหว่างกันของมนุษย์ (HHH) อันเนื่องมาจากจากพฤติกรรมกรรมการส่งที่ซับซ้อนของมนุษย์และโครงสร้างทางกายภาพที่แตกต่างกัน ทำให้ในหัวข้อวิจัยนี้ สามารถแบ่งหัวข้อการทดลองเพิ่มเติมได้ 3 การทดลองดังต่อไปนี้

- 1) การศึกษาและวิเคราะห์ลำดับพฤติกรรมกรรมการส่งวัตถุระหว่างมนุษย์กับมนุษย์ (Behaviour sequence of HHH)
- 2) การศึกษาและวิเคราะห์ตำแหน่งของการถ่ายโอนวัตถุในการปฏิสัมพันธ์กันระหว่างมนุษย์กับมนุษย์ (The locations of the object transfer in HHH)
- 3) การศึกษาและวิเคราะห์แรงปฏิสัมพันธ์ในขณะถ่ายโอนวัตถุ (Analysis of the bilateral force in the transfer phase)

• **วิธีการทดลอง** จากงานวิจัยของ ประมินทร์ เณรานนท์ [5] ได้เสนอแนะว่าในการศึกษาพฤติกรรมการทำงานร่วมกันระหว่างมนุษย์กับมนุษย์ (HHI) จะต้องศึกษาผู้เข้าร่วมวิจัยอย่างน้อย 18 คู่ เพื่อให้แน่ใจว่าผลการทดสอบจะมีนัยสำคัญทางสถิติ และงานวิจัยนี้มีการศึกษาในหัวข้อวิจัยที่ใกล้เคียงกับงานวิจัยนี้ ดังนั้นในการทดลองทั้งหมดจะมีผู้เข้าร่วมการทดลองที่ถนัดมือขวาจำนวน 20 คู่ ประกอบไปด้วยผู้ชายและผู้หญิง เพื่อทำหน้าที่เป็นทั้งผู้ส่ง (Giver) และผู้รับ (Receiver) วัตถุ และจะให้ผู้เข้าร่วมการทดลองทำการส่งวัตถุระหว่างกัน โดยจะแบ่งผู้เข้าร่วมการทดลองเป็น 5 กลุ่ม กลุ่มละ 4 คน แต่ละกลุ่มจะได้ชุดตัวอย่าง 12 การทดลอง โดยมีข้อปฏิบัติในการทำการทดสอบที่ผู้เข้าร่วมทุกคนต้องทำเหมือนกัน คือ ใช้มือเดียวในการจับวัตถุ ต้องถือวัตถุให้มีลักษณะตั้งตรงหรือตั้งฉากกับพื้น และต้องทำการส่งวัตถุเป็นเส้นตรงและขนานกับพื้น (Horizontal) เท่านั้นดังรูปที่ 4-1 (b) โดยวัตถุที่ใช้ในการทดสอบ คือ วัตถุที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 มิลลิเมตร ความยาวของขวดยาว 270 มิลลิเมตร มีมวล 0.25 กิโลกรัม ซึ่งวัตถุนี้สามารถเพิ่มมวลได้ตั้งแต่ 0.25 - 0.55 กิโลกรัม โดยเพิ่มมวลได้ครั้งละ 0.1 กิโลกรัม มีการติดตั้งเซนเซอร์วัดแรง ATI mini40 multi-axis ตรงกลางของขวด โดยช่วงของการวัดคือ  $\pm 80$  นิวตัน ความละเอียด 0.02 นิวตัน ดังรูปที่ 4-1 (a)



(a) ลักษณะของวัตถุ

(b) ลักษณะและท่าทางที่ต้องกาศึกษา

รูปที่ 4-1 วัตถุที่ใช้และพฤติกรรมกรส่งสำหรับการทดลองของ HHH [31]

#### 4.1.1 การทดลองที่ 1 การศึกษาและวิเคราะห์ลำดับพฤติกรรมกรรมการส่งวัตถุระหว่างมนุษย์กับมนุษย์ (Behaviour sequence of HHH)

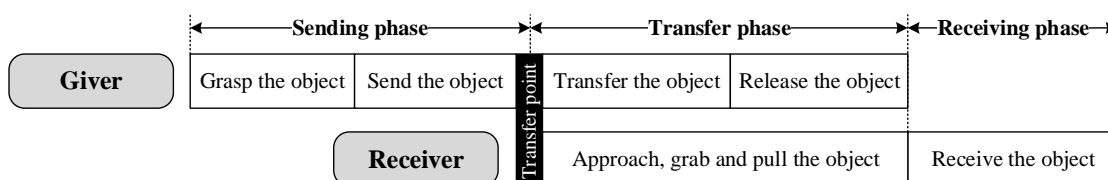
การทดลองนี้ต้องการศึกษาและวิเคราะห์ลำดับพฤติกรรมกรรมการส่งวัตถุของมนุษย์ และหาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของวัตถุที่อาจส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมกรรมการส่งวัตถุของมนุษย์ เพื่อเป็นกรอบแนวความคิดให้กับหุ่นยนต์มีรูปแบบและลำดับพฤติกรรมกรรมการส่งวัตถุเช่นเดียวกับมนุษย์

- **วิธีการทดลอง** ผู้วิจัยจะให้ผู้เข้าร่วมการทดลองทำการส่งวัตถุระหว่างกัน และผู้เข้าร่วมการทดลองจะต้องสลับกันเป็นทั้งผู้ส่ง (Giver) และผู้รับ (Receiver) ในขั้นตอนของการส่งผู้ส่ง (Giver) จะต้องทำการส่งวัตถุเป็นเส้นตรงหรือขนานกับพื้นและต้องส่งวัตถุเป็นไปอย่างธรรมชาติ โดยจะให้ผู้ส่ง (Giver) สวมผ้าปิดตาเพื่อจะเป็นการศึกษาแรงปฏิสัมพันธ์ที่เป็นตัวแปรควบคุมในการปล่อยวัตถุของผู้ส่ง (Giver) เพียงตัวแปรเดียว และขณะทำการส่งวัตถุและรอให้ผู้รับ (Receiver) เดินเข้ามารับของโดยผู้ส่ง (Giver) จะต้องยืนอยู่ตรงหน้าของผู้รับ (Receiver) ตลอดการทดลอง ขณะเดียวกันผู้รับ (Receiver) จะเดินเข้ามาและหยุดในตำแหน่งถ่ายโอนวัตถุตามความเหมาะสมของผู้รับ (Receiver) และทำการรับวัตถุ ทุกการทดลองจะมีการส่งและรับวัตถุที่มีน้ำหนัก 0.25, 0.35, 0.45, และ 0.55 กิโลกรัม เพื่อหาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของวัตถุที่อาจส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมกรรมการส่งวัตถุของมนุษย์ การทดลองนี้มีข้อควรระวังหลายประการ เช่น การเคลื่อนที่ของวัตถุและรูปแบบแรงปฏิสัมพันธ์ (Interactive force) ขณะทำการส่ง จะต้องเป็นไปในรูปแบบหรือมาตรฐานเดียวกันตลอดการทดสอบ และผลลัพธ์ที่ได้ในแต่ละชุดการทดสอบจะต้องทำการคำนวณหาค่าเฉลี่ยและเป็นมาตรฐานเดียวกัน (Normalization) ก่อนการนำไปประยุกต์ใช้

- **ผลจากการทดลองจากการศึกษาลำดับพฤติกรรมกรรมการส่งวัตถุของมนุษย์** จากผลการทดลองพบว่า ขั้นตอนลำดับในการส่งของสามารถแบ่งออกมาได้เป็น 3 ขั้นตอน ประกอบด้วย ขั้นตอนการส่ง (Sending phase) ขั้นตอนการถ่ายโอน (Transferring phase) และขั้นตอนการรับ (Receiving phase) ดังแสดงในรูปที่ 4-2 โดยสามารถอธิบายขั้นตอนการส่งวัตถุได้ดังนี้

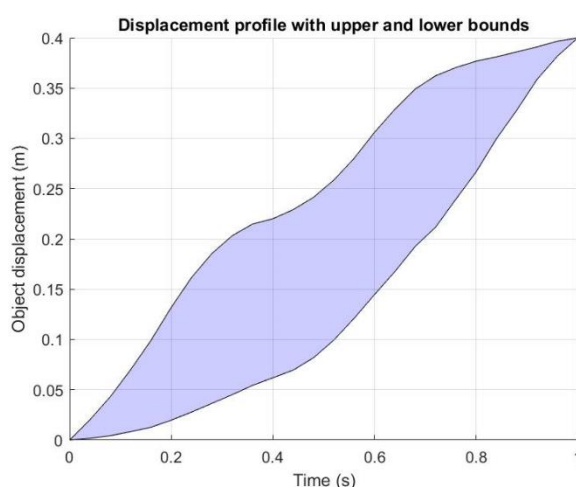
ขั้นตอนแรกของพฤติกรรมกรรมการส่งจะเริ่มจาก ผู้ส่ง (Giver) จะเริ่มโดยการหยิบจับวัตถุ (Grasp the object) เพื่อเตรียมที่จะส่งวัตถุให้แก่ผู้รับในลำดับถัดมา ขั้นตอนนี้จะเรียกว่า ขั้นตอนการส่ง (Sending phase) จากนั้นเมื่อผู้ส่ง (Giver) ทำการถือวัตถุและเคลื่อนที่วัตถุมาได้ถึงจุดหนึ่งที่มีชื่อว่า จุดถ่ายโอน (Transfer point) ซึ่งถือว่าเป็นจุดที่สำคัญของการส่งวัตถุเป็นอย่างมาก เนื่องจากจะเป็นจุดที่ผู้รับ (Receiver) จะเตรียมพร้อมรับวัตถุและมีการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมกรรมการรับวัตถุให้สอดคล้องกับการส่งวัตถุ ก่อนเข้าสู่ขั้นตอนของการถ่ายโอน (Transfer phase) โดยขั้นตอนนี้ จะมีการปฏิสัมพันธ์กันระหว่างผู้ส่ง (Giver) กับผู้รับ (Receiver) โดยผู้รับ (Receiver) จะรับวัตถุและออกแรงดึงวัตถุเข้าหาตัว (Grab and pull the object) ซึ่งแรงดึงนี้จะเป็นตัวแปรควบคุมที่ส่งผลกระทบต่อตัดสินใจการปล่อยวัตถุ (Release the object) ของผู้ส่ง (Giver) และผู้รับ (Receiver) จะรับวัตถุ

(Receive the object) ซึ่งถือว่าเป็นขั้นตอนสุดท้ายของการส่ง ขั้นตอนนี้จะเรียกว่า ขั้นตอนการรับ (Receiving phase) และถือว่าเป็นอันสิ้นสุดสำหรับพฤติกรรมกรรมการส่งวัตถุของมนุษย์



รูปที่ 4-2 รูปแบบการส่งมอบวัตถุระหว่างมนุษย์กับมนุษย์ [31]

- ผลจากการทดลองจากการศึกษาหาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของวัตถุที่อาจส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมกรรมการส่งวัตถุของมนุษย์ ผลที่ได้จากการศึกษาจะถูกนำมาทำให้อยู่ในรูปแบบของเวลาที่มาตรฐานเดียวกัน (Normalization) ที่แสดงในรูปที่ 4-3 เพื่อเปรียบเทียบลักษณะโปรไฟล์การเคลื่อนที่ของวัตถุที่เกิดจากพฤติกรรมกรรมการส่งวัตถุของมนุษย์ที่แตกต่างกันในแต่ละบุคคล พบว่าโปรไฟล์การเคลื่อนที่ของวัตถุมีลักษณะที่แตกต่างกันบ้างตามลักษณะพฤติกรรมกรรมการส่งวัตถุของมนุษย์ที่อาจได้รับผลมาจากความแตกต่างทางกายภาพของมนุษย์จึงส่งผลให้ลักษณะกราฟของแรงมีช่วงการรับ-ส่งไม่เท่ากัน ดังนั้นจึงมีการปรับแต่งเส้นโปรไฟล์การเคลื่อนที่ (Curve fitting) ใน MATLAB เพื่อหาลักษณะโปรไฟล์การเคลื่อนที่ของวัตถุให้อยู่บนฐานเวลาเฉลี่ยเดียวกัน โดยขอบเขตของเส้นกราฟแรงแสดงในรูปที่ 4-4 จากนั้นโปรไฟล์การเคลื่อนที่ของวัตถุสามารถหาคำนวณหาโปรไฟล์ความเร็วเฉลี่ยได้โดยถูกแสดงในรูปที่ 4-4 เช่นเดียวกัน จากโปรไฟล์ความเร็วเฉลี่ยนี้ แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงมวลจะไม่ส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมกรรมการส่งวัตถุของมนุษย์ โดยมนุษย์ทุกคนจะมีพฤติกรรมกรรมการส่งที่เป็นธรรมชาติและเหมือนกัน กล่าวคือในขณะที่เริ่มต้นของการส่งวัตถุจะมีความเร็วที่มีค่าเพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากมีความเร่ง และเมื่อใกล้ถึงจุดถ่ายโอน (Transfer point) ความเร็วจะมีค่าค่อยๆ ลดลง



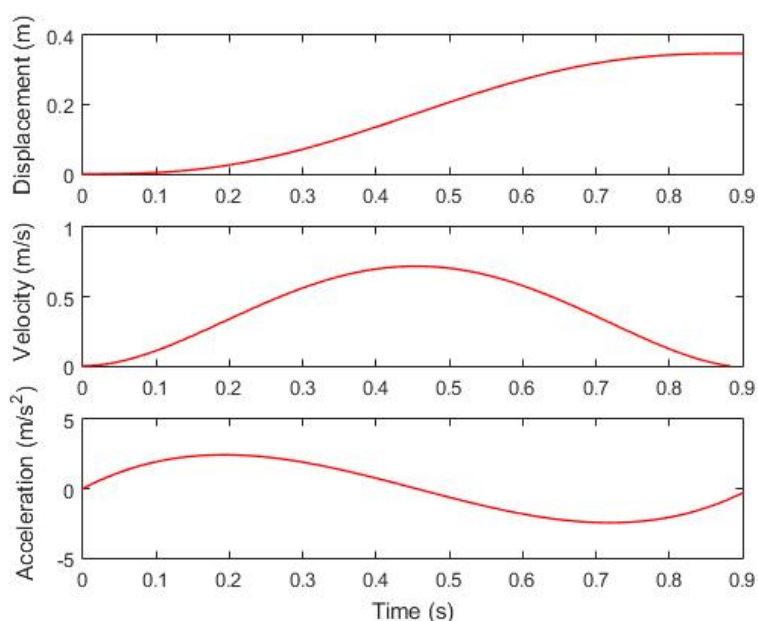
รูปที่ 4-3 ตัวอย่างผลการทดลองการปรับเปลี่ยนน้ำหนักของวัตถุ

และมีค่าเฉลี่ยของการกระจัดในการส่ง มีระยะประมาณ 0.35 เมตร (โดยค่า Std. คือ 0.07 ม.) ในเวลา 0.91 วินาที (โดยค่า Std. คือ 0.11 วินาที) จากข้อมูลทั้งหมดที่ผู้วิจัยได้ปรับแต่งเส้นโปรไฟล์ การเคลื่อนที่ (Curve fitting) ใน MATLAB ทำให้สามารถหาฟังก์ชันสมการพหุนามกำลัง 3-4-5 ของการกระจัด ( $x$ ) ความเร็ว ( $\dot{x}$ ) และความเร่ง ( $\ddot{x}$ ) ของการเคลื่อนที่ของวัตถุแบบจุดต่อจุด ที่สอดคล้องกับสมมติฐานในตอนแรกว่า ความเร็วและความเร่ง ในตอนเริ่มต้นและตอนสิ้นสุดของการเคลื่อนที่ จะต้องมีค่าเป็นศูนย์ ดังรูปที่ 4-4 และสมการต่อไปนี้

$$x(t) = 3.36t^5 - 7.65t^4 + 4.64t^3 \quad (4-1)$$

$$\dot{x}(t) = 16.8t^4 - 30.6t^3 + 13.92t^2 \quad (4-2)$$

$$\ddot{x}(t) = 67.2t^3 - 91.8t^2 + 27.84t^1 \quad (4-3)$$

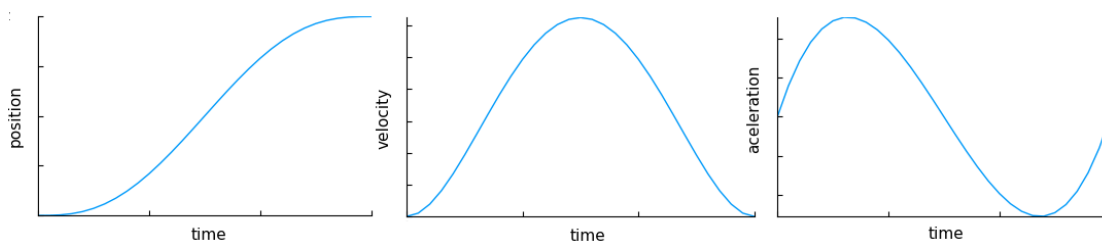


รูปที่ 4-4 โปรไฟล์วิถีความนิ่มนวลที่สุดของกระจัด, ความเร็ว, และความเร่ง [31]

งานวิจัยของ Markus Huber และคณะ [38] และงานวิจัยของ Elena De Momi และคณะ [39] กล่าวว่าลักษณะโปรไฟล์ของการกระจัด, ความเร็ว, และความเร่งที่ได้จากพฤติกรรมการส่งวัตถุ ระหว่างมนุษย์กับมนุษย์ (HHH) มีลักษณะเป็นไปตามโปรไฟล์วิถีความนิ่มนวลที่สุด (Minimum jerk trajectory : MJT) ผลที่ได้จากการทดลองนี้พบว่าโปรไฟล์การกระจัดของวัตถุดังรูปที่ 4-4 มีลักษณะเป็นไปตามแบบจำลองวิถีความนิ่มนวลที่สุด (MJT) ดังรูปที่ 4-5 ที่พัฒนาโดย Flash และ Hogan (1985) [40] โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของวิถีความนิ่มนวลที่สุด (MJT) สามารถอธิบายได้ว่าการเคลื่อนไหวของแขนมนุษย์เป็นอย่างไร โดยจะอธิบายเป็นแบบจุดต่อจุดของการเคลื่อนที่ หลังจาก

ปรับแต่งเส้นโปรไฟล์การเคลื่อนที่ (Curve fitting) ใน MATLAB ทำให้ได้พหุนามลำดับที่ 5 ของสมการฟังก์ชันวิถีความโน้มถ่วงที่สุด (MJT) ดังสมการที่ (4-4)

$$J = \int_0^{t_f} \left[ \left( \frac{d^3x}{dt^3} \right)^2 \right] dt \quad (4-4)$$



รูปที่ 4-5 แบบจำลองวิถีความโน้มถ่วงที่สุด (MJT) [41]

- **สรุปผลการทดลอง** พบว่าการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของวัตถุจะไม่ส่งผลต่อพฤติกรรมการส่งวัตถุของมนุษย์อย่างมีนัยสำคัญ และลำดับพฤติกรรมกรรมการส่งวัตถุของมนุษย์ จะเป็นกรอบแนวความคิดสำหรับนำไปออกแบบลำดับพฤติกรรมกรรมการส่งวัตถุให้แก่หุ่นยนต์

#### 4.1.2 การทดลองที่ 2 การศึกษาและวิเคราะห์ตำแหน่งการถ่ายโอนวัตถุในการปฏิสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์กับมนุษย์ (The location of the object transfer in HHH)

การทดลองนี้จะกล่าวถึงสมมติฐานที่มีความว่า ส่วนสูงของแต่ละบุคคลมีผลต่อตำแหน่งในการส่งวัตถุหรือไม่

- **วิธีการทดลอง** ผลที่ได้จากการทดสอบก่อนหน้าแสดงให้เห็นว่า การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของวัตถุจะไม่ส่งผลต่อพฤติกรรมการส่งวัตถุของมนุษย์ ดังนั้นในหัวข้อการทดลองนี้จึงใช้วัตถุที่มีมวล 0.55 กิโลกรัมตลอดการทดสอบ และวิธีการส่งวัตถุจะเหมือนกับการทดลองก่อนหน้า โดยเชิญผู้เข้าร่วมการทดลองจำนวน 20 คู่ ประกอบไปด้วยผู้ชายและผู้หญิงที่มีความสูงระหว่าง 160-180 เซนติเมตร ความสูงและความยาวของแขนจะถูกบันทึกไว้ก่อนการทดลอง และแบ่งผู้เข้าร่วมการทดลองเป็น 5 กลุ่ม กลุ่มละ 4 คน แต่ละกลุ่มจะได้ชุดตัวอย่าง 12 การทดลอง โดยการทดลองนี้จะมีข้อปฏิบัติขณะทำการทดสอบ คือ หลังจากก๊วตอยู่ ณ ตำแหน่งถ่ายโอนแล้ว ผู้รับจึงจะสามารถรับวัตถุได้ โดยตำแหน่งของการส่งมอบวัตถุจะถูกกำหนดในรูปของพิกัด ขึ้นกับจุดอ้างอิงของผู้ส่งดังรูปที่ 4-1 (b) แต่ละคู่ของผู้เข้าร่วมการทดลองจะต้องทำการทดลองซ้ำจำนวน 5 ครั้งต่อ 1 การทดลอง

#### 4.1.2.1. การวิเคราะห์เพื่อหาความสัมพันธ์ของส่วนสูงของแต่ละบุคคลที่ส่งผลต่อตำแหน่งการส่งวัตถุ

• **วิธีการวิเคราะห์** ใช้วิธีการเปรียบเทียบที่ใช้ในการตรวจสอบค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่าง 4 กลุ่มที่เหมาะสมคือ การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน ที่มีชื่อเรียกว่า ANOVA (Keppel 1991) [42] ตำแหน่งการส่งมอบวัตถุและระยะการกระจัดในแนวนอน ( $x$ -direction) และแนวตั้ง ( $y$ -direction) จะเป็นตัวแปรที่จะใช้ในทางสถิติ การทดลองนี้จะใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ในโปรแกรม R ใช้ค่าระดับนัยสำคัญที่มีค่า  $\alpha = 0.05$  เพื่อพิสูจน์ความสูงของแต่ละบุคคลว่ามีผลต่อตำแหน่ง โดยมีการตั้งสมมติฐานดังต่อไปนี้

สมมติฐานหลัก ( $H_0$ ) คือ ค่าเฉลี่ยของทุกกลุ่มการทดลองเท่ากัน

สมมติฐานรอง ( $H_1$ ) คือ ค่าเฉลี่ยของกลุ่มทดลองทั้งหมดไม่เท่ากัน

ตัวอย่างของความสัมพันธ์ของส่วนสูงของผู้เข้าร่วมวิจัยแต่ละบุคคลที่ขึ้นกับระยะการกระจัดในการส่งวัตถุในแนวนอน ( $x$ -direction) ดังตารางที่ 4-1 และตัวอย่างของความสัมพันธ์ของส่วนสูงของผู้เข้าร่วมวิจัยแต่ละบุคคลที่ขึ้นกับระยะการกระจัดในการส่งวัตถุในตั้ง ( $y$ -direction) ดังตารางที่ 4-2

ตารางที่ 4-1 ความสัมพันธ์ของส่วนสูงของแต่ละบุคคลที่ขึ้นกับระยะการกระจัดในการส่งวัตถุในแนวนอน ( $x$ -direction)

		Sender				
		Hight(cm)	H1 (160)	H2 (169)	H3 (174)	H4 (180)
Receiver	H1 (160)	91	90	93	85	89.7
		89	95	92	82	
		90	89	93	83	
		91	94	91	85	
		88	95	94	84	
	H2 (169)	95	90	100	95	94.35
		95	91	98	96	
		94	89	101	94	
		92	90	99	97	
		96	88	96	91	
	H3 (174)	84	83	85	90	87.35
		85	86	88	98	
		82	85	87	90	
		86	82	89	91	
		85	82	89	100	
	H4 (180)	90	97	100	96	95.95
		93	97	98	95	
		94	97	99	95	
		92	96	101	94	
		91	99	98	97	
avg	90.15	90.75	94.55	91.9	91.8375	



ตารางที่ 4-2 ความสัมพันธ์ของส่วนสูงของแต่ละบุคคลที่ขึ้นกับระยะการกระจัดในการส่งวัตถุในแนวตั้ง ( $y$ -direction)

	Sender					
	Hight(cm)	H1 (160)	H2 (169)	H3 (174)	H4 (180)	avg
Receiver	H1 (160)	91	90	93	85	
		89	95	92	82	
		90	89	93	83	
		91	94	91	85	
		88	95	94	84	
	H2 (169)	95	90	100	95	
		95	91	98	96	
		94	89	101	94	
		92	90	99	97	
		96	88	96	91	
	H3 (174)	84	83	85	90	
		85	86	88	98	
		82	85	87	90	
		86	82	89	91	
		85	82	89	100	
	H4 (180)	90	97	100	96	
		93	97	98	95	
		94	97	99	95	
		92	96	101	94	
		91	99	98	97	
avg	90.15	90.75	94.55	91.9	91.8375	

ผลจากการวิเคราะห์จาก ANOVA แสดงดังตารางที่ 4-3 โดยการวิเคราะห์นี้จะนำค่าระดับนัยสำคัญที่คำนวณได้มาจากการทดลองมาเปรียบเทียบกับค่าระดับนัยสำคัญที่กำหนดไว้ก่อนการทดลอง ( $\alpha = 0.05$ ) จากผลการทดลองการส่งวัตถุของระยะการกระจัดในแนวนอน ( $x$ -direction) ดังตารางที่ 4-3 (a) พบว่ามีค่าระดับนัยสำคัญที่ได้จากการทดลองมีค่าเท่ากับ 0.14 ซึ่งมีค่ามากกว่าค่าระดับนัยสำคัญที่กำหนดไว้ก่อนการทดลอง ( $\alpha = 0.05$ ) แสดงว่าการทดลองนี้จะต้องยอมรับสมมติฐานหลัก ( $H_0$ ) จากผลการทดลองการส่งวัตถุของระยะการกระจัดในแนวตั้ง ( $y$ -direction) ดังตารางที่ 4-3 (b) พบว่าค่าระดับนัยสำคัญมีค่าเท่ากับ  $5.6 \times 10^{-10}$  ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่าระดับนัยสำคัญที่กำหนดไว้ก่อนการทดลอง ( $\alpha = 0.05$ ) มาก แสดงว่า การทดลองนี้จะถูกปฏิเสธจากสมมติฐานหลัก ( $H_0$ ) โดยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ตารางที่ 4-3 ผลลัพธ์จากการใช้ One-way ANOVA [31]

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Sig.
ind	4	0.01896	0.004739	1.829	<b>0.14</b>
Residuals	55	0.11659	0.002591		

(a) การกระจัดในแนวนอน

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Sig.
ind	4	0.04399	0.010998	21.53	<b>5.6e-10</b>
Residuals	55	0.02299	0.000511		

(b) การกระจัดในแนวตั้ง

• **สรุปผลการทดลอง** จากการทดลองนี้ สรุปได้ว่า ส่วนสูงของแต่ละบุคคลจะไม่มีผลต่อระยะการกระจัดในการส่งวัตถุในแนวนอน ( $x$ -direction) และมีระยะการกระจัดเฉลี่ยเท่ากับ 95.33 เซนติเมตร แต่มีผลต่อระยะกระจัดในการส่งวัตถุในแนวตั้ง ( $y$ -direction) จึงต้องทำการวิเคราะห์ต่อเพื่อหาว่า ส่วนสูงผู้ส่ง (Giver) กับผู้รับ (Receiver) ที่มีผลต่อระยะการกระจัดของการส่งวัตถุในแนวตั้ง ( $y$ -direction)

4.1.2.2. การวิเคราะห์เพื่อหาความสัมพันธ์ของส่วนสูงของผู้ส่งกับผู้รับที่มีผลต่อระยะการกระจัดของการส่งวัตถุในแนวตั้ง ( $y$ -direction)

• **วิธีการวิเคราะห์** โดยการใช้ Response Surface Methodology (RSM) ลำดับที่สองซึ่งเป็นเทคนิคการวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์และสถิติ ที่เหมาะสำหรับหาความสัมพันธ์ที่ไม่แน่นอนของสองตัวแปร (Montogomer,2001) [43] โดยค่าพารามิเตอร์สัมประสิทธิ์ที่ไม่ทราบค่าจะถูกแทนโดย  $\beta_i$  ในแบบจำลองลำดับที่สองจะประกอบไปด้วย แบบจำลองลำดับที่หนึ่ง, พารามิเตอร์ลำดับที่สอง ( $\beta_{ii}x_i^2$ ), พารามิเตอร์ที่สัมพันธ์กันระหว่างผู้ส่งและผู้รับ ( $\beta_{ij}x_ix_j$ ) โดยสมมติให้  $x_1$  และ  $x_2$  คือ ส่วนสูงของผู้ส่งและผู้รับตามลำดับ และ  $y$  คือการกระจัดของการส่งวัตถุในแนวแกนตั้ง ( $y$ -direction) ฟังก์ชันการกระจัดของการส่งวัตถุในแนวตั้ง ( $y$ -direction) จะถูกแสดงโดยสมการ (4-5)

$$y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_{11}x_1^2 + \beta_{22}x_2^2 + \beta_{12}x_1x_2 \quad (4-5)$$

การวิเคราะห์ค่าความแปรปรวนของตัวแปรและค่าสัมประสิทธิ์ของการถดถอยโดยใช้โปรแกรม SPSS โดยใช้ค่าความเชื่อมั่น 95% ( $\alpha = 0.05$ ) และตั้งสมมติฐานดังนี้

สมมติฐานหลัก ( $H_0$ ) คือ ตัวแปรต้นและตัวแปรตามไม่มีความสัมพันธ์กันอย่างมีนัยสำคัญ  
 สมมติฐานรอง ( $H_1$ ) คือ มีตัวแปรต้นอย่างน้อยหนึ่งตัวที่มีผลต่อตัวแปรตามอย่างมีนัยสำคัญ  
 ค่าสัมประสิทธิ์ของสมการพหุนามลำดับที่สองสามารถประมาณค่าได้จากตารางที่ 4-4 ที่แสดงค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยโดยประมาณและผลลัพธ์ของ One-way ANOVA โดยมีเงื่อนไขเบื้องต้นดังนี้ ค่าความแปรปรวนของการแจกแจงแต่ละตัวจะต้องมีค่าคงที่สำหรับค่าทั้งหมดของตัวแปรอิสระและความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตามและตัวแปรอิสระแต่ละตัวจะเป็นเชิงเส้นโดยจะใช้โปรแกรม SPSS ในการวิเคราะห์ และเพื่อกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ของพหุนามลำดับที่สองของฟังก์ชันการกระจัดของการส่งวัตถุในแนวตั้ง ( $y$ -direction) ถูกแสดงในสมการที่ (4-6)

$$y = 8.23 + 0.243x_1 - 9.592x_2 - 1.626x_1^2 + 1.441x_2^2 + 3.189x_1x_2 \quad (4-6)$$

ตารางที่ 4-4 ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยโดยประมาณและผลลัพธ์ของ One-way ANOVA [31]

Coefficients										
Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	95.0% Confidence Interval for B		Correlations		
	B	Std. Error	Beta			Lower Bound	Upper Bound	Zero-order	Partial	Part
(Constant)	<b>8.243</b>	4.003		2.059	0.059	-0.344	16.829			
x1	<b>0.243</b>	0.155	0.355	1.566	0.140	-0.090	0.575	-0.006	0.386	0.172
x2	<b>-9.592</b>	4.741	-14.016	-2.023	0.063	-19.759	0.576	0.797	-0.476	-0.223
x1 <sup>2</sup>	<b>-1.626</b>	0.467	-9.640	-3.485	0.004	-2.627	-0.625	-0.031	-0.682	-0.384
x2 <sup>2</sup>	<b>1.441</b>	1.276	7.101	1.129	0.278	-1.296	4.178	0.799	0.289	0.124
x1x2	<b>3.189</b>	0.920	10.893	3.466	0.004	1.216	5.163	0.554	0.680	0.382

Model Summary									
Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate	Change Statistics				
					R Square Change	F Change	df1	df2	Sig. F Change
1	0.911 <sup>a</sup>	0.830	0.770	0.0221439	0.830	13.704	3	56	0.000

a. Predictors: (Constant), x1x2, x2<sup>2</sup>, x1, x1<sup>2</sup>, x2

ANOVA <sup>a</sup>					
Model	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1 Regression	0.034	3	.007	13.704	.000 <sup>b</sup>
1 Residual	0.007	56	.000		
Total	0.040	59			

a. Dependent Variable: y

b. Predictors: (Constant), x1x2, x2<sup>2</sup>, x1, x1<sup>2</sup>, x2

จากนั้นใช้เทคนิค ANOVA เพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ทางสถิติของตัวแปรต้น ( $x_1$  และ  $x_2$ ) และตัวแปรตาม ( $y$ ) โดยค่าระดับนัยสำคัญที่ได้จากการคำนวณมีค่าเท่ากับ 0.00 แสดงให้เห็นว่าสมมติฐานหลัก ( $H_0$ ) ถูกปฏิเสธแต่ยอมรับสมมติฐานรอง ( $H_1$ ) กล่าวคือ ตัวแปรต้นอย่างน้อยหนึ่งตัวแปรที่มีผลต่อตัวแปรตามอย่างมีนัยสำคัญที่มีค่าความเชื่อมั่น 95% และจากการวิเคราะห์หาค่าความน่าเชื่อถือของฟังก์ชันการกระจัดของการส่งวัตถุในแนวตั้ง ( $y$ -direction) ด้วยการวิเคราะห์แบบ  $R^2$  ผลที่ได้มีค่าเท่ากับ 0.83 หรือหมายถึงมีความน่าเชื่อถือเท่ากับ 83% สามารถอธิบายได้ว่าตัวแปรต้นมีความสัมพันธ์กับตัวแปรตามอย่างมีนัยสำคัญ และส่งผลต่อสมการที่ (4-6) ให้มีความน่าเชื่อถือเท่ากับ 83% ถึงแม้ว่าหากพิจารณาอย่างละเอียดพบว่า ตัวแปรบางพจน์จะไม่มีนัยสำคัญกับสมการที่ (4-6)

แต่ในการศึกษานี้ก็ยังคงใช้ เนื่องจากระยะเวลาในการพิจารณาพจน์เหล่านี้ใช้เวลาที่น้อยมากเนื่องจากระบบมี Sampling rate ที่สูง อีกทั้งการคงไว้ซึ่งพจน์เหล่านี้ก็จะส่งผลให้เปอร์เซ็นต์ความน่าเชื่อถือของฟังก์ชันที่ได้จากการวิเคราะห์  $R^2$  มีค่าสูงมากยิ่งขึ้นอีกด้วย

**สรุปผลการทดลอง** จากสมมติฐานที่คาดการณ์ไว้ตอนต้น กล่าวคือ ส่วนสูงของผู้ส่ง (Giver) และผู้รับ (Receiver) มีผลต่อระยะการกระจัดของการส่งวัตถุในแนวตั้ง ( $y$ -direction) และมีค่าระยะการกระจัดเฉลี่ยเท่ากับ 119.86 เซนติเมตร ดังนั้นถือว่าสมมติฐานนี้เป็นจริงและสมการที่ได้จากการทดลองนี้สามารถยอมรับได้ที่ความน่าเชื่อถือคือ 95 % ( $\alpha = 0.05$ )

#### 4.1.3 การทดลองที่ 3 การศึกษาและวิเคราะห์แรงปฏิสัมพันธ์ในขณะถ่ายโอนวัตถุ (Analysis of the bilateral force in the transfer phase)

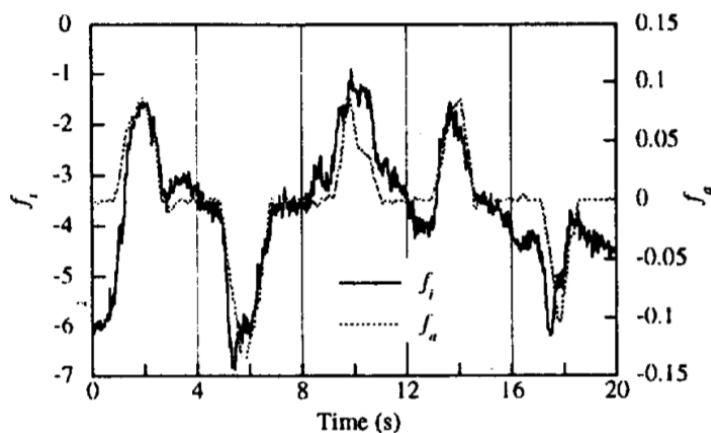
หัวข้อนี้จะทำการศึกษาแรงปฏิสัมพันธ์ในขณะถ่ายโอนวัตถุ โดยระยะของการถ่ายโอนวัตถุคือเริ่มจากจุดที่ผู้ส่งเริ่มทำการถ่ายโอนวัตถุให้แก่ผู้รับ และเมื่อผู้รับรับวัตถุจะถือว่าสิ้นสุดระยะการถ่ายโอนวัตถุ

• **วิธีการทดลอง** การทดลองในหัวข้อนี้จะใช้วิธีการทดลองเช่นเดียวกับการทดลองก่อนหน้า เงื่อนไขในการทดลองนี้ คือ วิธีการเคลื่อนที่ในการถ่ายโอนวัตถุจะต้องเหมือนกันตลอดการทดลอง ผู้เข้าร่วมการทดลองทุกคนต้องมีพฤติกรรมและลำดับการส่งมอบวัตถุต้องเหมือนกัน โดยใช้วัตถุที่มีน้ำหนัก 0.55 กิโลกรัม ตลอดการทดลองรวมถึงวิธีการส่งวัตถุ และวิธีการแบ่งกลุ่มสำหรับเก็บผลการทดลอง แต่จะแตกต่างจากการทดลองก่อนหน้านี้ตรงที่จะให้ผู้ส่ง (Giver) ไม่ต้องสวมผ้าปิดตาเนื่องจากต้องการควบคุมระยะการถ่ายโอนวัตถุให้คงที่เพื่อศึกษาแรงปฏิสัมพันธ์เพียงอย่างเดียว สำหรับทำการทดลอง โดยทิศทางของแรงปฏิสัมพันธ์ที่กระทำต่อวัตถุ ( $f_{int}^x$ ) จะขึ้นอยู่กับผลรวมแรงของผู้ส่งและผู้รับวัตถุ ( $f_g^x$  และ  $f_r^x$ ) ดังสมการที่ (3-7) และ  $f_{int}^y$  ตามสมการที่ (3-10) ที่ใช้สำหรับการพิจารณาการวิเคราะห์แรงแบบไดนามิกที่ตอบสนองต่อแรงปฏิสัมพันธ์จากพฤติกรรมของผู้เข้าร่วมการทดลอง ดังนั้นแรงปฏิสัมพันธ์ในแนวนอน ( $f_{int}^x$ ) จึงมีผลต่อการถ่ายโอนวัตถุดังแสดงรูปที่ 4-7

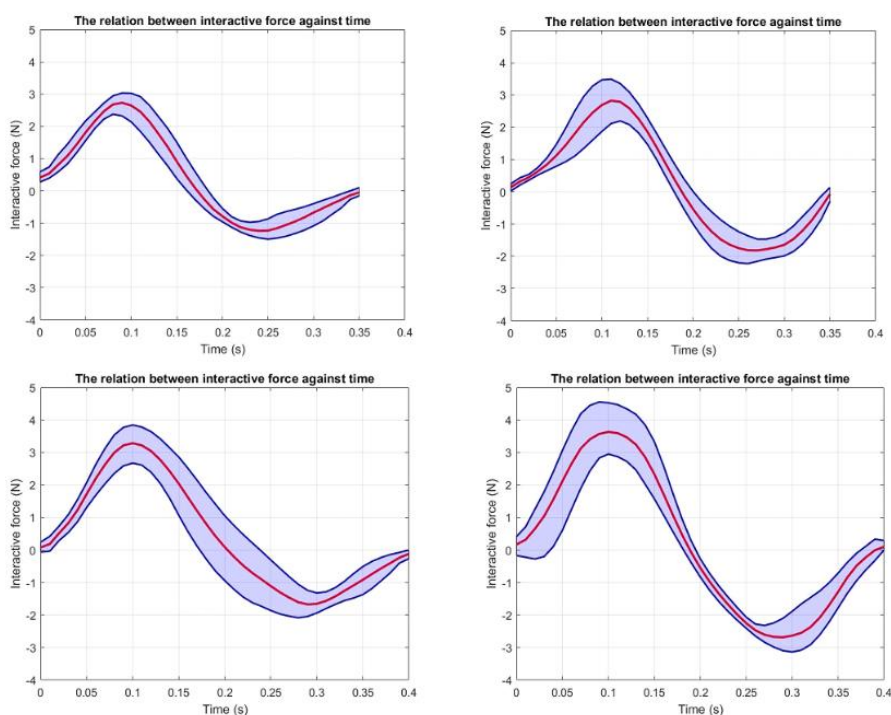
แรงปฏิสัมพันธ์ในแนวนอน ( $f_{int}^x$ ) คือ แรงสองแรงที่มีทิศทางตรงกันข้ามมากระทำต่อวัตถุ ในขณะที่การถ่ายโอนวัตถุ นั่นคือ แรงบีบ (compression force) และ แรงดึง (Tension force) กล่าวคือแรงโต้ตอบที่มีค่ามาก ( $f_{int}^x$ )<sub>max</sub> และแรงโต้ตอบที่มีค่าน้อย ตามลำดับ ( $f_{int}^x$ )<sub>min</sub> ที่มีผลต่อเวลาในการถ่ายโอนวัตถุ ( $t_{trf}$ ) =  $t_{pos} + t_{neg}$

จากงานวิจัยของ Ryojun Ikeura และคณะ [44] ที่ศึกษาแรงปฏิสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์กับมนุษย์ กล่าวว่าผู้ส่งจะเป็นผู้ควบคุมตำแหน่งของวัตถุ โดยจะใช้แรงที่เกิดจากความเร่ง ( $f_a$ ) ในการควบคุมตำแหน่งของวัตถุ และผู้รับจะเป็นผู้ตามที่จะออกแรงภายใน ( $f_i$ ) เพื่อให้สอดคล้องกับผู้ส่ง ผล

ที่ได้จากงานวิจัยแสดงในรูปที่ 4-6 พบว่าแรงของผู้ส่ง (Giver) จะมีขนาดที่อยู่ในช่วง -0.15 ถึง 0.1 นิวตัน และผู้รับ (Receiver) จะมีขนาดที่อยู่ในช่วง 1 ถึง 7 นิวตัน



รูปที่ 4-6 แรงปฏิสัมพันธ์ที่เกิดจากผู้ส่ง ( $f_a$ ) และผู้รับ ( $f_i$ ) [44]



รูปที่ 4-7 วัตถุที่มีน้ำหนักที่แตกต่างกันมีผลต่อแรงในแนวนอน

● **ผลจากการทดลอง** ผลที่ได้จากการทดลองถูกแสดงดังรูปที่ 4-7 พบว่าการปรับเปลี่ยนน้ำหนักของวัตถุมีผลต่อแรงปฏิสัมพันธ์ในแนวนอน ( $f_{int}^x$ ) โดยน้ำหนักจะมีความสัมพันธ์แบบแปรผันตรงกับแรงปฏิสัมพันธ์ แต่การปรับเปลี่ยนน้ำหนักของวัตถุจะไม่มีผลกระทบต่อเวลาในการถ่ายโอนวัตถุ ดังตารางที่ 4-6 ที่แสดงให้เห็นว่าค่าระดับนัยสำคัญที่ได้จากการวิเคราะห์ทางสถิติแบบ One-

way ANOVA มีค่าเท่ากับ 0.394 แสดงว่าเวลาในการถ่ายโอนไม่ได้รับผลกระทบจากการปรับเปลี่ยนน้ำหนักของวัตถุอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 4-5 ผลลัพธ์ค่าเฉลี่ยของแรงปฏิสัมพันธ์และเวลาในการถ่ายโอนวัตถุ [31]

Mass (Kg)	Maximum interactive force (N)		Minimum interactive force (N)		Transfer time (s) ( $t_{trf}$ )	
	Average	Std.	Average	Std.	Average	Std.
0.25	2.77	0.90	-1.28	0.51	0.39	0.07
0.35	2.92	1.18	-1.58	0.72	0.39	0.07
0.45	3.30	1.54	-1.87	0.67	0.43	0.09
0.55	3.42	1.13	-2.28	0.81	0.42	0.08

ตารางที่ 4-6 ความสัมพันธ์ของเวลาในการถ่ายโอนวัตถุกับมวลของวัตถุที่เปลี่ยนแปลงไป [31]

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Sig.
ind	3	0.0178	0.005937	1.007	0.394
Residuals	76	0.4479	0.005893		

ดังนั้นเพื่อให้เข้าใจถึงแรงปฏิสัมพันธ์แบบไดนามิกของพฤติกรรมการส่งวัตถุของมนุษย์ จะถูกอธิบายด้วยฟังก์ชันการถ่ายโอน (Transfer function) เพื่อหารูปแบบลักษณะพลวัตของผู้ส่ง และใช้โปรแกรม The autoregressive exogenous model (ARX) ในการสร้างแบบจำลองพลวัตที่ซับซ้อนของมนุษย์เทียบกับเวลา เป็นโปรแกรมที่สามารถประมาณค่าพหุนามที่มีลำดับสูงๆได้ เนื่องจากลำดับของพหุนามนั้นถูกกำหนดจากฟังก์ชันการถ่ายโอนที่มีทั้งการสุ่มและกำหนดค่า ผลลัพธ์ที่ได้จากการสังเกต  $\bar{y}(k)$  คือ ผลรวมของการถ่ายโอนในอดีต และกำหนดค่าอินพุต  $\mu_0(k)$ . สัญญาณรบกวนระบบคือ  $e(k)$ , และ  $A(q^{-1})$  ซึ่ง  $B(q^{-1})$  แสดงถึงพหุนามถดถอยของ  $q^{-1}$ . แบบจำลองของโครงสร้าง ARX (Diversi et al., 2010) [45] อธิบายเป็นสมการได้ดังต่อไปนี้

$$A(q^{-1})\bar{y}(k) = B(q^{-1})\mu_0(k) + e(k), \quad (4-7)$$

$$A(q^{-1}) = 1 + a_1q^{-1} + \dots + a_nq^{-n}, \quad (4-8)$$

$$B(q^{-1}) = b_0 + b_1q^{-1} + \dots + b_nq^{-n}. \quad (4-9)$$

จากการมีสัญญาณรบกวนเพิ่มขึ้น คือ  $\mu_0(k)$  และ  $\bar{y}(k)$  และมี  $\tilde{u}(k)$  และ  $\tilde{y}(k)$  ทำให้ได้  $u(k)$  และ  $y(k)$  ในรูปสมการใหม่

$$u(k) = \mu_0(k) + \tilde{u}(k) \quad (4-10)$$

$$y(k) = \bar{y}(k) + \tilde{y}(k). \quad (4-11)$$

จากนั้นใช้โปรแกรม MATLAB ในการวิเคราะห์เพื่อสร้างแบบจำลองพารามิเตอร์ที่ไม่ทราบค่า โดยเลือกชุดของพหุนาม  $n_a$  และ  $n_b$  เพื่อลดข้อผิดพลาดในการพยากรณ์และเพื่อให้ได้แบบจำลองของมนุษย์ที่มีประสิทธิผล และใช้โปรแกรม ARX จะทำการตรวจสอบความถูกต้องของโมเดลจำลองที่ประกอบไปด้วย the percentage of best fit ( $R^2$ ), the mean sum of square error (MSE) และ the final prediction error (FPE) ดังแสดงในสมการต่อไปนี้

$$R^2 = 100 \times \left( 1 - \frac{\sum_{i=1}^N \varepsilon^2}{\sum_{i=1}^N (y - \hat{y})^2} \right) \% , \quad (4-12)$$

$$R^2 = 100 \times \left( 1 - \frac{\sum_{i=1}^N \varepsilon^2}{\sum_{i=1}^N (y - \hat{y})^2} \right) \% , \quad (4-13)$$

$$FPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y - \hat{y})^2 \left[ \frac{(1 + \frac{P}{N})}{(1 - \frac{P}{N})} \right]. \quad (4-14)$$

โดยที่	$y$ และ $\hat{y}$	คือค่าจริงและค่าที่ได้จากการคำนวณ ตามลำดับ
	$N$	คือจำนวนข้อมูลของการทดลอง
	$P$	คือจำนวนของพารามิเตอร์ ( $n_a + n_b + n_c$ ) ตามลำดับ

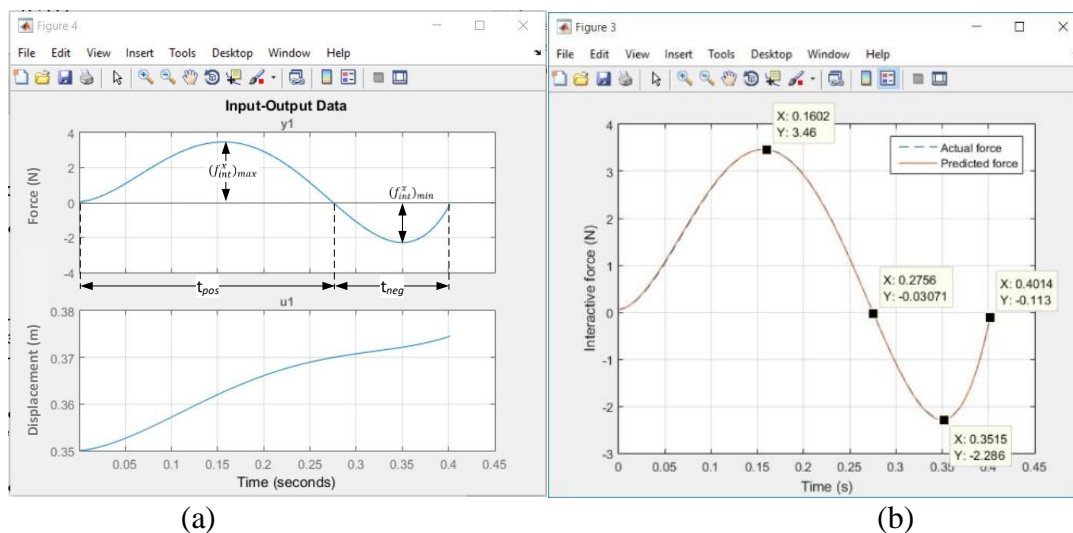
จากการวิเคราะห์ของ ARX แบบเวลาไม่ต่อเนื่องได้ผลลัพธ์ดังนี้

$$A(q^{-1}) = 1 - 2.021q^{-1} + 1.021q^{-2}, \quad (4-15)$$

$$B(q^{-1}) = -27.64q^{-1} + 27.65q^{-2} \quad (4-16)$$

ผลจากการวิเคราะห์พบว่า ค่า  $R^2$  มีค่าเท่ากับ 99.95% , ค่า MSE มีค่าเท่ากับ  $1.6652 \times 10^{-8}$  และค่า FRE มีค่าเท่ากับ  $1.69 \times 10^{-8}$  ตามลำดับ การเปรียบเทียบค่าจริงและค่าที่ได้จากการพยากรณ์แสดงไว้ดังรูปที่ 4-8 พบว่าโปรไฟล์การถ่ายโอนวัตถุจากการพยากรณ์มีโปรไฟล์ที่ใกล้เคียงกับโปรไฟล์การถ่ายโอนวัตถุของมนุษย์ ผลที่ได้จากการวิเคราะห์จากโปรแกรม ARX ฟังก์ชันการถ่ายโอนวัตถุจากผู้ส่ง ( $TF_g$ ) ถึงผู้รับที่แสดงดังนี้

$$TF_g = \frac{-2.63 \times 10^{-4}S + 5211}{S^2 - 20.25S + 51.76} \quad (4-17)$$



(a)

(b)

รูปที่ 4-8 (a) การกระจัด ( $u$ ) และวิถีของแรงปฏิสัมพันธ์ ( $y$ )

(b) การเปรียบเทียบระหว่างค่าจริงกับค่าแนวโน้มที่จะเกิดขึ้น [31]

● **สรุปผลการทดลอง** พบว่าการปรับเปลี่ยนน้ำหนักของวัตถุมีผลต่อแรงปฏิสัมพันธ์ในแนวนอน ( $f_{int}^x$ ) โดยน้ำหนักจะมีความสัมพันธ์แบบแปรผันตรงกับแรงปฏิสัมพันธ์ แต่การปรับเปลี่ยนน้ำหนักของวัตถุจะไม่มีผลกระทบต่อเวลาในการถ่ายโอนวัตถุ ซึ่งสามารถแสดงได้ด้วยวมการเชิงคณิตศาสตร์ดัง Transfer function ใน(4-17)

#### 4.2 การออกแบบกรอบแนวความคิดในการศึกษาพฤติกรรมการส่งวัตถุระหว่างมนุษย์กับหุ่นยนต์ (HRH) จากการศึกษาและวิเคราะห์พฤติกรรมการส่งวัตถุของมนุษย์ (HHH)

ผลที่ได้จากการศึกษาและวิเคราะห์พฤติกรรมการส่งวัตถุของมนุษย์ (HHH) นี้ ถูกนำมาเป็นกรอบแนวความคิดสำหรับการออกแบบพฤติกรรมการส่งวัตถุของหุ่นยนต์ให้สามารถทำงานร่วมกันกับมนุษย์ได้อย่างเป็นธรรมชาติและปลอดภัย โดยผู้วิจัยจะเริ่มจากการออกแบบพฤติกรรมของหุ่นยนต์ให้มีลำดับพฤติกรรมการส่งวัตถุเหมือนกับมนุษย์ ตามผลการทดลองที่ 4.1.1 ที่ศึกษาลำดับพฤติกรรมการส่งวัตถุระหว่างมนุษย์กับมนุษย์ที่ประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนของการส่ง (Sending phase) ขั้นตอนของการถ่ายโอนวัตถุ (Transferring phase) และขั้นตอนของการรับวัตถุ (Receiving phase) ซึ่งผู้วิจัยจะให้ความสำคัญกับจุดถ่ายโอน (Transfer point) เป็นอย่างมาก เนื่องจากเป็นจุดที่มีแรงที่ได้จากการปฏิสัมพันธ์กันระหว่างผู้ส่ง (Giver) กับผู้รับ (Receiver) เกิดขึ้น และผู้วิจัยจะใช้แรงปฏิสัมพันธ์ (Interactive force) นี้ เพื่อเป็นตัวควบคุมเชิงพฤติกรรมของหุ่นยนต์ให้สามารถส่งวัตถุ (Transfer the object) และปล่อยวัตถุ (Release the object) ได้อย่างเป็นธรรมชาติ จากนั้นผู้วิจัยจะออกแบบตำแหน่งการถ่ายโอนวัตถุให้กับหุ่นยนต์ โดยอ้างอิงจากการทดลองที่ 4.1.2 ที่ศึกษาดำเนินการถ่ายโอนวัตถุในการปฏิสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์กับมนุษย์ จากการทดลองนี้ส่งผลต่อขั้นตอน



การส่งวัตถุ (Sending phase) ของหุ่นยนต์ กล่าวคือหุ่นยนต์จะต้องอยู่ในตำแหน่งการส่งวัตถุหรือมีระยะการกระจัดของการส่งวัตถุในแนวนอน ( $x$ -direction) ที่มีระยะห่างจากผู้รับ (Receiver) ประมาณ 0.95 เมตร และออกแบบให้ตัวทำงานส่วนปลายของหุ่นยนต์ต้องมีความสูงประมาณ 1.20 เมตร เพื่อให้การส่งวัตถุของหุ่นยนต์สอดคล้องกับการรับวัตถุของมนุษย์ ที่มีระยะการกระจัดของการส่งวัตถุในแนวตั้ง ( $y$ -direction) ที่ได้จากการทดลองประมาณ 1.19 เมตร และผู้วิจัยจะใช้วัตถุที่มีมวลเท่ากับ 0.25 กิโลกรัมตลอดการทดลองในการศึกษาพฤติกรรมกรรมการส่งวัตถุของหุ่นยนต์ (HRH) เนื่องจากผลการทดลองที่ 4.1.3 ที่ศึกษาแรงปฏิสัมพันธ์ในขณะถ่ายโอนวัตถุ พบว่าการเปลี่ยนแปลงมวลของวัตถุที่ใช้ในการส่งวัตถุจะไม่ส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมกรรมการส่งวัตถุและเวลาถ่ายโอนวัตถุ แต่จะส่งผลกระทบต่อแรงที่ใช้ในการปฏิสัมพันธ์ (Interactive force) เท่านั้น ดังนั้นจากมวลดังกล่าวส่งผลให้แรงที่ใช้ในทางตั้ง (Interactive force) ที่มีขนาดเท่ากับ 1.28 นิวตัน ซึ่งเป็นแรงตั้งที่มีขนาดที่ต่ำที่สุดในงานวิจัยนี้ด้วยเช่นกัน โดยแรงตั้ง (Interactive force) นี้เกิดจากการออกแรงเพื่อดึงวัตถุกลับเข้าหาตัวของผู้รับ (Receiver) ที่จะเกิดขึ้นที่จุดถ่ายโอน (Transfer point)

จากที่กล่าวมาข้างต้นนี้จะเป็นกรอบแนวความคิดสำหรับการออกแบบระบบควบคุมเชิงพฤติกรรมของหุ่นยนต์ ที่จะทำการทดลองการศึกษากิจกรรมกรรมการส่งวัตถุระหว่างมนุษย์กับหุ่นยนต์ (HRH) ต่อไป เพื่อให้หุ่นยนต์พฤติกรรมกรรมการส่งวัตถุและสามารถทำงานร่วมกันกับมนุษย์ได้อย่างเป็นธรรมชาติ และปลอดภัย รวมถึงผลที่ได้จากการการศึกษากิจกรรมกรรมการส่งวัตถุระหว่างมนุษย์กับหุ่นยนต์ (HRH) จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการพฤติกรรมกรรมการส่งวัตถุของมนุษย์ (HHH) เพื่อให้หุ่นยนต์มีพฤติกรรมกรรมการส่งวัตถุที่ใกล้เคียงกับมนุษย์

#### 4.3 การศึกษาและวิเคราะห์พฤติกรรมกรรมการส่งวัตถุระหว่างมนุษย์กับหุ่นยนต์ (HRH)

การควบคุมการเคลื่อนไหวของหุ่นยนต์นั้นมีหลากหลายวิธีดังที่กล่าวไว้ในบทก่อนหน้า ในงานวิจัยนี้จะใช้การควบคุมพฤติกรรมของหุ่นยนต์ด้วยการควบคุมแบบอิมพีแดนซ์ (Impedance Control) เนื่องจากลักษณะโครงสร้างทางกายภาพของแขนมนุษย์มีลักษณะเหมือนกับโมเดลอิมพีแดนซ์ และสามารถปรับค่าตัวแปรหรือกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆของระบบ มวล (mass) ค่าสปริง (K) หรือค่าตัวหน่วง (D) ซึ่งหุ่นยนต์ HSR สามารถเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของการควบคุมแบบอิมพีแดนซ์ (Impedance Control) ได้ทุกทิศทาง ( $x$ -  $y$ - $z$ -direction) โดยการทดลองนี้ จะเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ของการควบคุมแบบอิมพีแดนซ์ (Impedance Control) ของหุ่นยนต์เฉพาะทิศทางเดียว คือ  $x$ -direction แต่ค่าพารามิเตอร์ของการควบคุมแบบอิมพีแดนซ์ (Impedance Control) ในทิศทางอื่นๆ ยังคงให้มีค่าคงเดิมตามที่ถูกตั้งไว้ในหุ่นยนต์ HSR เนื่องจากแรงปฏิสัมพันธ์ขณะทำการถ่ายโอนวัตถุ ซึ่งเป็นตัวแปรในการควบคุมและกำหนดการปล่อยวัตถุของผู้ส่ง (Giver) และรับวัตถุของผู้รับ (Receiver) จะเกิดขึ้นเฉพาะในทิศทาง  $x$ -direction เท่านั้น เพื่อให้หุ่นยนต์สามารถมี

พฤติกรรมที่เทียบเคียงกับมนุษย์ และมีพฤติกรรมอย่างเป็นธรรมชาติมากที่สุด รวมถึงต้องให้การ ทำงานของหุ่นยนต์มีความปลอดภัยต่อมนุษย์ด้วย จึงเป็นที่มาของหัวข้อวิจัย

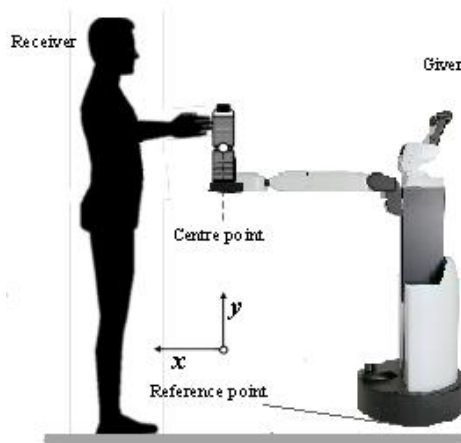
● **วัตถุประสงค์ของการวิจัย** คือ เพื่อให้หุ่นยนต์สามารถทำงานร่วมกันกับมนุษย์ได้อย่างเป็น ธรรมชาติที่สุดและมีความปลอดภัยต่อมนุษย์ ผู้วิจัยจึงแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน ประกอบด้วย

1) ศึกษาและวิเคราะห์ระบบควบคุมพฤติกรรมของหุ่นยนต์ด้วยการควบคุมแบบอิมพีแดนซ์ (Impedance Control) ของหุ่นยนต์

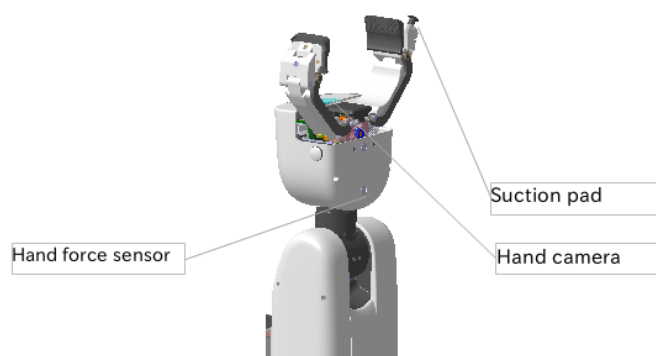
2) ออกแบบระบบควบคุมพฤติกรรมการส่งวัตถุของหุ่นยนต์จากการควบคุมแบบอิมพีแดนซ์ให้มีพฤติกรรมการส่งที่เทียบเคียงกับมนุษย์ในการส่งวัตถุ

โดยแต่ละหัวข้อการวิจัย จะมีวิธีการทดลอง อุปกรณ์ เช่น เซอร์ การเชื่อมโยงซอฟต์แวร์รวมถึงใช้ ทฤษฎีและหลักการที่เหมือนกัน ดังที่จะกล่าวต่อไปนี้

● **วิธีการทดลอง** การทดลองนี้ ผู้วิจัยจะให้ผู้เข้าร่วมการทดลองทำการรับวัตถุจากหุ่นยนต์ที่มี การควบคุมหุ่นยนต์ด้วยการควบคุมแบบอิมพีแดนซ์ โดยมีข้อปฏิบัติในการทำการทดสอบคือ หุ่นยนต์ จะต้องถือวัตถุให้มีลักษณะตั้งตรงหรือตั้งฉากกับพื้นดังรูปที่ 4-9 และหุ่นยนต์ต้องทำการส่งวัตถุในแนว ระนาบตลอดการทดลอง รวมถึงมีการปรับเปลี่ยนตัวแปรพารามิเตอร์ของค่าคงที่ของสปริง (K) และ ค่าตัวหน่วง (D) ผ่านการใช้แพ็คเกจการควบคุมแบบอิมพีแดนซ์ที่ถูกติดตั้งอยู่ในตัวหุ่นยนต์ โดย หุ่นยนต์ HSR เป็นหุ่นยนต์ที่มี 8 องศาอิสระ (DoF) และมีกริปเปอร์ในลักษณะ 2 นิ้ว ที่ถูกขับเคลื่อนด้วย มอเตอร์เดี่ยวและที่บริเวณตัวทำงานส่วนปลายจะมีเซนเซอร์สองประเภทติดตั้งอยู่ ดังรูปที่ 4-10 ประกอบด้วย เซนเซอร์วัดแรงในการหยิบจับวัตถุ และเซนเซอร์วัดแรงและแรงบิดหลายแกนที่ติด ตั้งอยู่บริเวณข้อต่อของมือหุ่นยนต์ ขณะเดียวกันจะใช้เซนเซอร์ตรวจจับวัตถุ HSR-3D-depth ที่ติดตั้ง อยู่บริเวณหัวของหุ่นยนต์ในการตรวจจับตำแหน่งของวัตถุและความเร็วของวัตถุ โดยการทำงานของ ระบบจะต้องสอดคล้องกันและทำการตรวจจับสัญญาณ จากนั้นจะส่งผ่านไปยังคอมพิวเตอร์เพื่อทำ การประมวลผลข้อมูลดังรูปที่ 3-10



รูปที่ 4-9 ลักษณะและท่าทางสำหรับการทดสอบของ HRH



รูปที่ 4-10 โครงสร้างของตัวทำงานส่วนปลายของหุ่นยนต์ HSR [46]

#### 4.3.1 การศึกษาความปลอดภัยจากการควบคุมหุ่นยนต์ด้วยการควบคุมแบบอิมพีแดนซ์ สำหรับการส่งวัตถุให้แก่มนุษย์ (Force-Impedance Control for safe Human-to-robot handovers)

การทดลองนี้ต้องการวิเคราะห์และศึกษาการควบคุมหุ่นยนต์ด้วยการควบคุมแบบอิมพีแดนซ์ สำหรับการส่งวัตถุให้แก่มนุษย์ [34] โดยมีวัตถุประสงค์หลักของการศึกษานี้คือ การประเมินการตอบสนองของหุ่นยนต์แบบไดนามิกที่มีผลจากการควบคุมแรงแบบอิมพีแดนซ์ (Impedance Control) ขณะที่หุ่นยนต์ทำการส่งวัตถุให้แก่มนุษย์ (Robot-to-human object handover tasks) การทำงานร่วมกันระหว่างหุ่นยนต์กับมนุษย์จะมีเรื่องที่ต้องพิจารณาอย่างมาก คือ ความปลอดภัยในการทำงานร่วมกันกับมนุษย์ ซึ่งเป็นสิ่งที่สำคัญที่สุด จึงเป็นที่มาของการศึกษาในหัวข้อนี้

• **วิธีการทดสอบ** ผู้วิจัยจะให้ผู้เข้าร่วมการทดสอบทำการรับวัตถุจากหุ่นยนต์ โดยหนึ่งชุดการทดลองจะมีทำซ้ำสามครั้งและหาค่าเฉลี่ยของแรงจากการปรับตัวแปรค่าคงที่สปริง (K) และตัวหน่วง (D) ขณะเดียวกันจะใช้เซนเซอร์วัดแรงและแรงบิดที่ถูกติดตั้งอยู่บริเวณของตัวทำงานส่วนปลายของหุ่นยนต์ HSR สำหรับการวัดแรงปฏิสัมพันธ์สูงสุด เมื่อหุ่นยนต์ถือวัตถุไปถึงจุดถ่ายโอนวัตถุ มนุษย์จะต้องรับวัตถุและจับวัตถุอย่างมั่นคงและไม่ขยับมือดังรูปที่ 4-9 และจะใช้วัตถุที่มีมวล 0.25 กิโลกรัมตลอดการทดสอบ เพราะว่าการประเมินแรงที่มากระทำต่อวัตถุก่อนที่หุ่นยนต์จะตอบสนองต่อแรงและเคลื่อนไหวตามแรง ทำให้สามารถแบ่งการทดลองออกเป็น 3 การทดลองได้ดังนี้

- 1) เปลี่ยนแปลงตัวแปรเฉพาะค่าคงที่ของตัวหน่วง (Damping factor Varying)
- 2) เปลี่ยนแปลงตัวแปรเฉพาะค่าคงที่ของสปริง (Spring factor Varying)
- 3) เปลี่ยนแปลงตัวแปรทั้งค่าคงที่ของสปริงและตัวหน่วง (D and K factor Varying)

ผลที่ได้ถูกแสดงในตารางที่ 4-7

ตารางที่ 4-7 ผลลัพธ์จากการเปลี่ยนแปลงตัวแปรค่าคงที่ของสปริง (K) และตัวหน่วง (D) [34]

Damping factor (D) Varing			Spring factor (K) Varing			D and K Varing		
D (NmS/rad)	K (Nm/rad)	F (N)	D (NmS/rad)	K (Nm/rad)	F (N)	D (NmS/rad)	K (Nm/rad)	F (N)
20	6	26.0	2	10	26.5	2	6	14.20
		26.1			26.6			14.10
		26.1			26.7			14.00
10	6	19.7	2	8	26.3	1.5	5	13.40
		20.1			26.3			13.60
		19.9			26.2			13.50
2	6	13.8	2	6	13.8	1	4	12.00
		13.5			13.7			12.10
		13.9			14.1			12.40
1	6	9.1	2	4	13.1	1	3	12.00
		9.2			12.8			11.40
		9.3			12.7			11.70
0	6	9.2	2	2	10.7	1	2	10.90
		8.7			11.2			10.50
		8.8			11.0			10.90

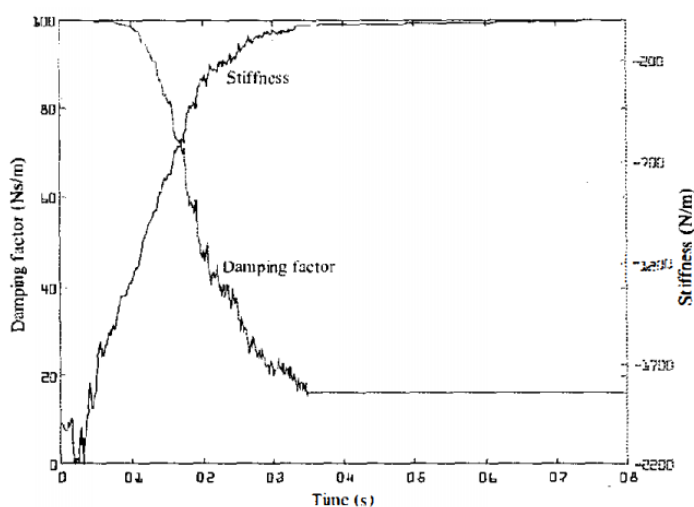
● **สรุปผลจากการทดลอง** จากการพิจารณาการตอบสนองของแรงจากการควบคุมแบบอิมพีแดนซ์ที่แตกต่างกัน พบว่าสามารถแบ่งการควบคุมหุ่นยนต์ด้วยการควบคุมแบบอิมพีแดนซ์ออกเป็น 3 กลุ่มหลักได้ดังนี้ ความต้านทานของหุ่นยนต์แบบอ่อน (Soft) กลาง (Middle) และแข็ง (Hard) โดยการทดสอบแบบที่ (1) และ (3) พบว่าการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ของตัวหน่วง (D) ให้มีปริมาณที่น้อย จะส่งผลทำให้ระบบมีการสั่นสะเทือนที่ลดน้อยลง จึงทำให้พฤติกรรมการส่งวัตถุของหุ่นยนต์มีความนุ่มนวลขึ้น การทดสอบแบบที่ (2) และ (3) พบว่าการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ของสปริง (K) ให้มีปริมาณที่น้อย จะส่งผลต่อพฤติกรรมการส่งวัตถุของหุ่นยนต์ให้มีความนุ่มนวลด้วยเช่นกัน ดังนั้นการจะทำให้หุ่นยนต์สามารถทำงานร่วมกันกับมนุษย์ได้อย่างเหมาะสมและปลอดภัย จะต้องเปลี่ยนแปลงทั้งค่าคงที่ของสปริง (K) และตัวหน่วง (D) ให้เหมาะสมกับการทำงานและโครงสร้างของหุ่นยนต์นั้นๆ

#### 4.3.2 การออกแบบกรอบการทำงานการส่งวัตถุของหุ่นยนต์จากการควบคุมแบบอิมพีแดนซ์ให้มีพฤติกรรมที่เทียบเคียงกับมนุษย์

เพื่อให้ได้ระบบควบคุมการเคลื่อนไหวของหุ่นยนต์ที่ตอบสนองต่อแรงในการส่งวัตถุให้กับมนุษย์ที่เหมาะสม กล่าวคือ ระบบควบคุมการเคลื่อนไหวของหุ่นยนต์ HSR สำหรับการส่งมอบวัตถุให้แก่มนุษย์จากการควบคุมแบบอิมพีแดนซ์ (Impedance Control) จะต้องสามารถควบคุมหุ่นยนต์ให้มีความนุ่มนวลในการส่งวัตถุที่เทียบเคียงกับมนุษย์อย่างเป็นธรรมชาติมากที่สุดและปลอดภัย จากนั้นผลที่ได้จากการทดลองดังกล่าวจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลการทดลองแรก คือ การศึกษาพฤติกรรม การส่ง

วัตถุระหว่างมนุษย์กับมนุษย์ (HHH) เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของหุ่นยนต์ HSR จาก การออกแบบกรอบแนวความคิดของพฤติกรรมการส่งวัตถุของมนุษย์ว่ามีประสิทธิภาพมากน้อย เพียงใด

- **วิธีการทดสอบ** วิธีการทดสอบจะคล้ายกับหัวข้อวิจัยก่อนหน้า โดยให้ผู้เข้าร่วมการทดสอบ ทำการรับวัตถุจากหุ่นยนต์ โดยหนึ่งชุดการทดลองจะทำซ้ำสามครั้งและหาค่าเฉลี่ยของแรงปฏิสัมพันธ์ และเวลาการถ่ายโอนวัตถุ (t) จากการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ของตัวแปร ซึ่งค่าคงที่สปริง (K) และตัวหน่วง (D) ที่จะอ้างอิงจากงานวิจัยของ Rahman และคณะ [6] กล่าวว่าค่าคงที่ของตัวหน่วงของแขน มนุษย์จะมีค่าที่อยู่ในช่วงตั้งแต่ 18 ถึง 100 Ns/m และค่าคงที่ของสปริงของแขนมนุษย์มีค่าที่อยู่ใน ช่วง 100 ถึง 2800 N/m และมีจุดตัดระหว่างค่าคงที่ของตัวหน่วงและค่าคงที่ของสปริงตัดกันคือ ค่าที่เหมาะสมที่สุดของแขนมนุษย์ที่แสดงในรูปที่ 4-11 โดยมีค่าคงที่ตัวหน่วงอยู่ที่ประมาณ 75 Ns/m และมีค่าคงที่ของสปริงประมาณ 600 N/m และอ้างอิงจากค่าที่ถูกติดตั้งไว้ในหุ่นยนต์เบื้องต้น เพื่อนำไปหาค่าคงที่ตัวหน่วงและค่าคงที่สปริงที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการส่งวัตถุให้แก่มนุษย์ และ กำหนดให้ค่ามวลเป็นค่าคงที่เช่นเดิม



รูปที่ 4-11 พารามิเตอร์อิมพีแดนซ์สำหรับแบบจำลองของแขนมนุษย์ [6]

ในขณะที่ทำการส่งวัตถุระหว่างกัน จะใช้เซนเซอร์วัดแรงและแรงบิดที่ถูกติดตั้งอยู่บริเวณตัว ทำงานส่วนปลายของหุ่นยนต์ HSR เมื่อหุ่นยนต์ถือวัตถุไปถึงจุดถ่ายโอนวัตถุ มนุษย์จะต้องรับวัตถุและ จับวัตถุอย่างมั่นคงและไม่ขยับมือดังรูปที่ 4-9 เช่นเดียวกัน และจะใช้วัตถุที่มีมวล 0.25 กิโลกรัมตลอด การทดสอบ ทำให้สามารถแบ่งการทดลองออกเป็น 3 การทดลองได้ดังนี้

- 1) เปลี่ยนแปลงเฉพาะค่าคงที่ของตัวหน่วง (Damping factor Varying)
- 2) เปลี่ยนแปลงเฉพาะค่าคงที่ของสปริง (Spring factor Varying)

3) การศึกษาความสัมพันธ์ของการกำหนดค่าคงที่ของสปริงและการเปลี่ยนแปลงเฉพาะค่าคงที่ของสปริงเพื่อหาแรงปฏิสัมพันธ์และเวลาขณะถ่ายโอนวัตถุที่เหมาะสม

โดยจะเริ่มจากการหาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงของแรงและเวลาที่ขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงเฉพาะค่าคงที่ของสปริงและตัวหน่วงก่อน จากนั้นจะกำหนดขอบเขตสำหรับการ ออกแบบระบบให้หุ่นยนต์มีการส่งวัตถุให้มีประสิทธิภาพอย่างเป็นธรรมชาติและเทียบเคียงกับ พฤติกรรมของมนุษย์ในลำดับถัดไป

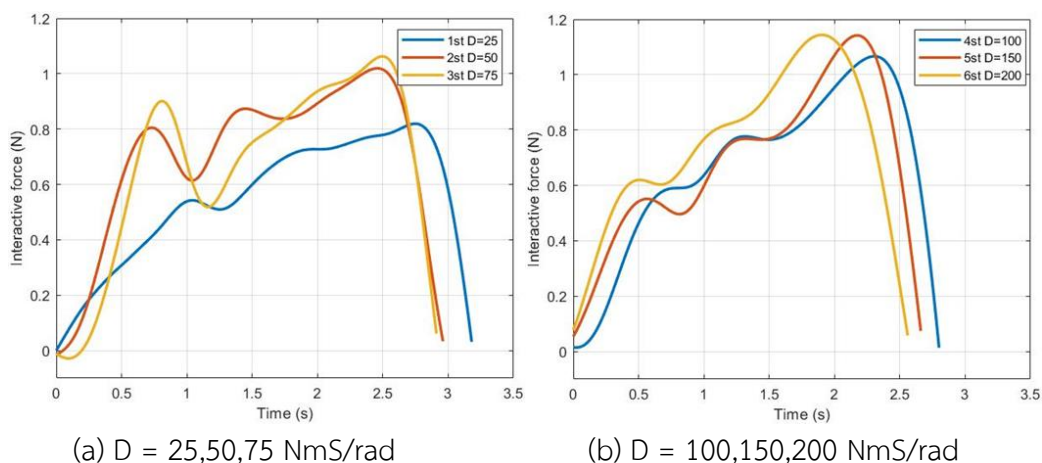
#### 4.3.2.1. การศึกษาความสัมพันธ์ของแรงปฏิสัมพันธ์และเวลาขณะถ่ายโอนวัตถุที่ขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงเฉพาะค่าคงที่ของตัวหน่วง (Damping factor Varying)

ต้องการหาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงของแรงปฏิสัมพันธ์และเวลาขณะถ่ายโอนวัตถุที่ ขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงเฉพาะค่าคงที่ของตัวหน่วง โดยจะให้ค่าคงที่ของสปริงมีค่าเท่ากับศูนย์ตลอด การทดลอง และจะปรับเปลี่ยนตัวแปรเฉพาะค่าคงที่ของตัวหน่วงเท่านั้น และทำการบันทึกผลการ ทดลองดังแสดงตารางที่ 4-8 (a)

- **วิธีการทดลองและผลการทดลอง** ผู้วิจัยจะทำการเปลี่ยนแปลงเฉพาะค่าคงที่ตัวหน่วง โดย กำหนดค่าคงที่ของตัวหน่วงเริ่มต้นไว้ที่ 25 นิวตันเมตรวินาทีต่อเรเดียน และกำหนดค่าคงที่สปริง เริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 0 นิวตันเมตรต่อเรเดียน จะให้ขนาดของแรงปฏิสัมพันธ์เฉลี่ย 1.17 นิวตัน (โดยค่า Std. คือ 0.02 นิวตัน) และเวลาขณะถ่ายโอนวัตถุประมาณ 2.55 วินาที (โดยค่า Std. คือ 0.02 วินาที) และทำการเปลี่ยนแปลงเฉพาะค่าคงที่ของตัวหน่วงเป็น 25, 50, 75, 100, 150, และ 200 นิวตันเมตร วินาทีต่อเรเดียน ตามลำดับ เมื่อตั้งค่าคงที่ของตัวหน่วงไว้ที่ 200 นิวตันเมตรวินาทีต่อเรเดียน พบว่า จะได้ขนาดของแรงปฏิสัมพันธ์เฉลี่ย 0.80 นิวตัน (โดยค่า Std. คือ 0.01 นิวตัน) และเวลาขณะถ่าย โอนวัตถุมีค่าประมาณ 3.17 วินาที (โดยค่า Std. คือ 0.01 วินาที)

- **สรุปผลจากการทดลอง** เมื่อเปรียบเทียบขนาดของแรงและเวลาถ่ายโอนวัตถุที่เกิดขึ้นจาก การเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ของตัวหน่วงเทียบกับค่าคงที่ของตัวหน่วงที่ต่ำที่สุดที่มีค่า 25 นิวตันเมตร วินาทีต่อเรเดียน คิดเป็นร้อยละ พบว่า ถ้าหากตั้งค่าคงที่ของตัวหน่วงให้มีค่าเท่ากับ 100 นิวตันเมตร วินาทีต่อเรเดียน จะมีขนาดแรงประมาณ 1.06 นิวตัน คิดเป็นร้อยละลดลง 9.40 ใช้เวลาในถ่ายโอน วัตถุประมาณ 2.89 วินาที คิดเป็นร้อยละ 13.33 และถ้าหากตั้งค่าคงที่ของตัวหน่วงมีค่าเท่ากับ 200 นิวตันเมตรวินาทีต่อเรเดียน จะส่งผลให้ขนาดของแรงลดลง โดยมีขนาดแรงประมาณ 0.79 นิวตัน คิด เป็นร้อยละ 32.48 ใช้เวลาในถ่ายโอนวัตถุเพิ่มขึ้นประมาณ 3.17 วินาที คิดเป็นร้อยละ 24.31 เมื่อ เปรียบเทียบกับขนาดของแรงที่ได้จากการตั้งค่าคงที่ของตัวหน่วงที่มีค่าเท่ากับ 25 นิวตันเมตรวินาที ต่อเรเดียน ที่ส่งผลให้แรงมีขนาดประมาณ 1.17 นิวตัน โดยใช้เวลากลถ่ายโอนวัตถุประมาณ 2.55 วินาที หลังจากการปรับแต่งเส้นโปรไฟล์แรงปฏิสัมพันธ์ (Curve fitting) ใน MATLAB ของการเปลี่ยนแปลง

ของแรงปฏิสัมพันธ์และเวลาขณะถ่ายโอนวัตถุที่ขึ้นอยู่กับเปลี่ยนแปลงเฉพาะค่าคงที่ของตัวหน่วง แสดงดังรูปที่ 4-12



รูปที่ 4-12  $K = 0$  นิวตันเมตรต่อเรเดียน เปลี่ยนแปลงเฉพาะค่า  $D$

#### 4.3.2.2. การศึกษาความสัมพันธ์ของแรงปฏิสัมพันธ์และเวลาขณะถ่ายโอนวัตถุที่ขึ้นอยู่กับเปลี่ยนแปลงเฉพาะค่าคงที่ของสปริง (Spring factor Varying)

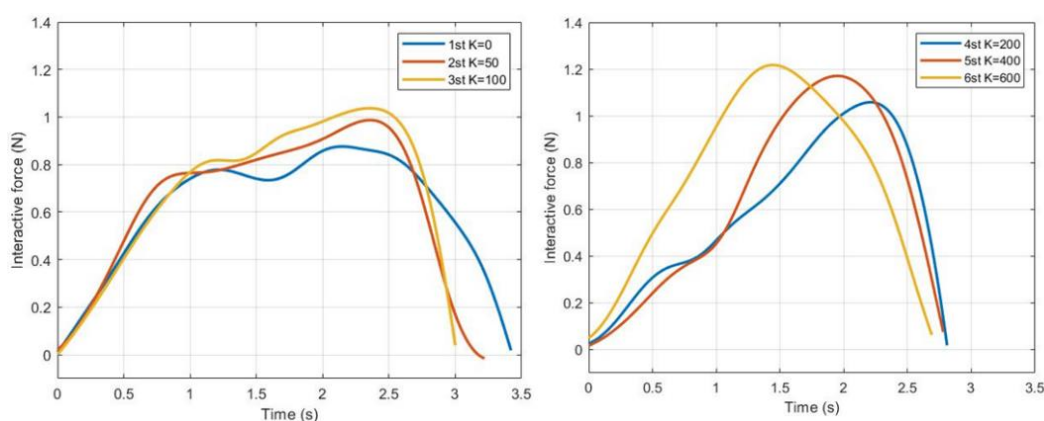
ต้องการหาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงของแรงปฏิสัมพันธ์และเวลาขณะถ่ายโอนวัตถุที่ขึ้นอยู่กับเปลี่ยนแปลงเฉพาะค่าคงที่ของสปริง โดยจะให้ค่าคงที่ของตัวหน่วงมีค่าเท่ากับศูนย์ตลอดการทดลอง และจะเปลี่ยนแปลงเฉพาะค่าคงที่ของสปริงเท่านั้น และทำการบันทึกผลการทดลอง ดังแสดงตารางที่ 4-8 (b)

- **วิธีการทดลองและผลการทดลอง** ผู้วิจัยจะทำการเปลี่ยนแปลงเฉพาะค่าคงที่ของสปริง โดยกำหนดค่าคงที่ของตัวหน่วงเริ่มต้นไว้ที่ 0 นิวตันเมตรต่อเรเดียน และกำหนดค่าคงที่ของตัวหน่วงมีค่าเท่ากับ 0 นิวตันเมตรวินาทีต่อเรเดียน จะให้ขนาดของแรงปฏิสัมพันธ์เฉลี่ย 0.90 นิวตัน (โดยค่า Std. คือ 0.02 นิวตัน) และเวลาในการถ่ายโอนวัตถุประมาณ 3.42 วินาที (โดยค่า Std. คือ 0.02 วินาที) และทำการเปลี่ยนแปลงเฉพาะค่าคงที่ของสปริง โดยเริ่มจาก 0, 50, 100, 200, 400, และ 600 นิวตันเมตรต่อเรเดียน ตามลำดับ เมื่อตั้งค่าคงที่ของสปริงไว้ที่ 600 นิวตันเมตรต่อเรเดียน พบว่าจะได้ขนาดของแรงปฏิสัมพันธ์เฉลี่ย 1.30 นิวตัน (โดยค่า Std. คือ 0.01 นิวตัน) และเวลาขณะทำการถ่ายโอนวัตถุประมาณ 2.69 วินาที (โดยค่า Std. คือ 0.03 วินาที)

- **สรุปผลจากการทดลอง** เมื่อเปรียบเทียบขนาดของแรงและเวลาถ่ายโอนวัตถุที่เกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ของสปริงเทียบกับค่าคงที่ของสปริงที่ต่ำที่สุดที่มีค่า 0 นิวตันเมตรต่อเรเดียน คิดเป็นร้อยละ พบว่า ถ้าหากตั้งค่าคงที่ของสปริงให้มีค่าเท่ากับ 200 นิวตันเมตรต่อเรเดียน จะมีขนาด

แรงประมาณ 1.07 นิวตัน คิดเป็นร้อยละ 20 ใช้เวลาในถ่ายโอนวัตถุลดลงโดยมีเวลาประมาณ 2.79 วินาที คิดเป็นร้อยละ 18.18 และถ้าหากตั้งค่าคงที่สปริงมีค่าเท่ากับ 600 นิวตันเมตรต่อเรเดียน จะส่งผลให้ขนาดของแรงเพิ่มขึ้น โดยมีขนาดแรงประมาณ 1.29 นิวตัน คิดเป็นร้อยละ 44.94 ใช้เวลาในถ่ายโอนวัตถุลดลงโดยมีระยะเวลาประมาณ 2.6 วินาที คิดเป็นร้อยละ 23.75 เมื่อเปรียบเทียบกับขนาดของแรงที่ได้จากการตั้งค่าคงที่ของตัวหน่วงที่มีค่าเท่ากับ 0 นิวตันเมตรต่อเรเดียน ที่ส่งผลให้แรงมีขนาดประมาณ 0.89 นิวตัน โดยใช้เวลากถ่ายโอนวัตถุประมาณ 3.41 วินาที หลังจากการปรับแต่งเส้นโปรไฟล์แรงปฏิสัมพันธ์ (Curve fitting) ใน MATLAB ของการเปลี่ยนแปลงของแรงปฏิสัมพันธ์และเวลาขณะถ่ายโอนวัตถุที่ขึ้นอยู่กับเปลี่ยนแปลงเฉพาะค่าคงที่ของสปริง แสดงดังรูปที่ 4-13

● **จากการทดลองทั้งสองการทดลองข้างต้นนี้** จะอธิบายถึงการเปลี่ยนแปลงของแรงปฏิสัมพันธ์และเวลาขณะถ่ายโอนวัตถุที่ขึ้นอยู่กับเปลี่ยนแปลงเฉพาะค่าคงที่ของสปริงและตัวหน่วง และผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลอง จะช่วยในการลดและกำหนดขอบเขตสำหรับการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ของสปริงและตัวหน่วงใหม่ เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่มีประสิทธิภาพที่เทียบเคียงกับพฤติกรรมการส่งวัตถุของมนุษย์ (HHH) โดยผู้วิจัยจะกำหนดค่าคงที่ของตัวหน่วง (D) ให้เป็นตัวแปรต้น เพราะว่า ตัวหน่วง (D) ทำหน้าที่ควบคุมการสั่นสะเทือนของระบบ กล่าวคือ ตัวหน่วง (D) สามารถเป็นตัวแปรที่ควบคุมที่สามารถลดความถี่การสั่นที่มาจากสปริง และส่งผลให้ระบบของหุ่นยนต์มีความนุ่มนวลที่เหมาะสมต่อการทำงาน เพื่อเป็นขอบเขตสำหรับการออกแบบระบบควบคุมการส่งวัตถุของหุ่นยนต์ด้วยการควบคุมแบบอิมพีแดนซ์



(a)  $K = 0, 50, 100$  Nm/rad

(b)  $K = 200, 400, 600$  Nm/rad

รูปที่ 4-13  $D = 0$  นิวตันเมตรวินาทีต่อเรเดียน เปลี่ยนแปลงเฉพาะค่า  $K$



ตารางที่ 4-8 ผลการทดลอง (a) เปลี่ยนแปลงเฉพาะ D (b) เปลี่ยนแปลงเฉพาะ K

Damping factor (D) Varing				Spring factor (K) Varing			
D (NmS/rad)	K (Nm/rad)	F (N)	t (S)	D (NmS/rad)	K (Nm/rad)	F (N)	t (S)
25	0	1.17	2.56	0	0	0.90	3.42
		1.19	2.55			0.92	3.41
		1.18	2.56			0.89	3.44
50	0	1.15	2.68	0	50	0.97	3.22
		1.16	2.67			0.99	3.21
		1.16	2.66			0.98	3.22
75	0	1.10	2.80	0	100	1.03	3.00
		1.10	2.78			1.01	2.99
		1.12	2.75			1.05	3.01
100	0	1.07	2.91	0	200	1.07	2.81
		1.06	2.94			1.09	2.79
		1.08	2.89			1.09	2.80
150	0	1.03	2.95	0	400	1.20	2.78
		1.00	2.97			1.22	2.77
		1.01	2.96			1.23	2.74
200	0	0.80	3.18	0	600	1.30	2.69
		0.79	3.18			1.31	2.66
		0.82	3.17			1.29	2.71

● จากการทดลองทั้งสองการทดลองข้างต้นนี้ จะอธิบายถึงการเปลี่ยนแปลงของแรงปฏิสัมพันธ์และเวลาขณะถ่ายโอนวัตถุที่ขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงเฉพาะค่าคงที่ของสปริงและตัวหน่วง และผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลอง จะช่วยในการลดและกำหนดขอบเขตสำหรับการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ของสปริงและตัวหน่วงใหม่ เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่มีประสิทธิภาพที่เทียบเคียงกับพฤติกรรมของการส่งวัตถุของมนุษย์ (HHH) โดยผู้วิจัยจะกำหนดค่าคงที่ของตัวหน่วง (D) ให้เป็นตัวแปรต้น เพราะว่า ตัวหน่วง (D) ทำหน้าที่ควบคุมการสั่นสะเทือนของระบบ กล่าวคือ ตัวหน่วง (D) สามารถเป็นตัวแปรที่ควบคุมที่สามารถลดความถี่กระด้างที่เกิดจากสปริง และส่งผลให้ระบบของหุ่นยนต์มีความนุ่มนวลที่เหมาะสมต่อการทำงาน เพื่อเป็นขอบเขตสำหรับการออกแบบระบบควบคุมการส่งวัตถุของหุ่นยนต์ด้วยการควบคุมแบบอิมพีแดนซ์

#### 4.3.2.3. การศึกษาความสัมพันธ์ของการกำหนดค่าคงที่ของสปริงและการเปลี่ยนแปลงเฉพาะค่าคงที่ของสปริงเพื่อหาแรงปฏิสัมพันธ์และเวลาขณะถ่ายโอนวัตถุที่เหมาะสม

การทดลองที่จะเป็นการหาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงของแรงปฏิสัมพันธ์และเวลาขณะถ่ายโอนวัตถุที่ขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ของสปริงและตัวหน่วงที่เหมาะสมต่อการส่งวัตถุของหุ่นยนต์อย่างเป็นธรรมชาติที่สุด และมีพฤติกรรมที่เทียบเคียงกับมนุษย์ จากการศึกษาและ

วิเคราะห์แรงปฏิสัมพันธ์ในขณะถ่ายโอนวัตถุ พบว่า แรงปฏิสัมพันธ์ที่ต่ำที่สุด (Minimum interactive force) สำหรับทำการถ่ายโอนวัตถุที่มีน้ำหนัก 0.25 กิโลกรัม จะใช้แรงปฏิสัมพันธ์ที่มีขนาดประมาณ 1.28 นิวตัน ดังตารางที่ 4-5

- **วัตถุประสงค์** จากการทดลองก่อนหน้า พบว่าค่าคงที่ของตัวหน่วงที่มีค่าเท่ากับ 50 นิวตัน เมตรวินาทีต่อเรเดียน และ 75 นิวตัน เมตรวินาทีต่อเรเดียน ให้ผลการทดลองที่ใกล้เคียงกับการส่งของของมนุษย์มาก เนื่องจากมีขนาดของแรงปฏิสัมพันธ์เฉลี่ยอยู่ที่ 1.16 นิวตัน (โดยค่า Std. คือ 0.02 นิวตัน) และ 1.10 นิวตัน (โดยค่า Std. คือ 0.03 นิวตัน) ตามลำดับ ที่ได้จากรายการที่ 4-6 ที่มีขนาดแรงปฏิสัมพันธ์ที่เทียบเคียงกับแรงปฏิสัมพันธ์ที่ใช้ในการส่งวัตถุของมนุษย์ รวมถึงความรู้สึกของผู้ร่วมการทดลองที่ทำหน้าที่เป็นผู้รับวัตถุจากการส่งวัตถุของหุ่นยนต์ว่ามีความเป็นธรรมชาติและพฤติกรรมที่เทียบเคียงกับมนุษย์ ดังนั้นการทดลองนี้จะทำการศึกษาจากการนำค่าคงที่ของตัวหน่วงที่กำหนดไว้มาทำการวิเคราะห์ร่วมกับการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ของสปริง ที่ส่งผลต่อความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงของแรงปฏิสัมพันธ์และเวลาขณะถ่ายโอนวัตถุ

- **วิธีการทดลอง** จะเป็นการนำค่าคงที่ของตัวหน่วงที่ผู้วิจัยเลือกใช้ มาทำการวิเคราะห์ร่วมกับการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ของสปริง เพื่อหาแรงปฏิสัมพันธ์และเวลาขณะถ่ายโอนวัตถุที่เหมาะสมและเป็นธรรมชาติที่สุด โดยผลที่ได้จากการทดลองนี้จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับแรงปฏิสัมพันธ์ที่ได้จากการส่งวัตถุของมนุษย์ ที่มีแรงปฏิสัมพันธ์เฉลี่ยอยู่ที่ 1.28 นิวตัน รวมถึงต้องมีโปรไฟล์ของแรงปฏิสัมพันธ์ที่เทียบเคียงกัน ที่แสดงในรูปที่ 4-17 (a) โดยการทดลองจะแบ่งออกเป็น 2 การทดลองดังนี้

- 1) กำหนดให้ค่าคงที่ของตัวหน่วงมีค่าเท่ากับ 50 นิวตัน เมตรวินาทีต่อเรเดียน และทำการเปลี่ยนแปลงเฉพาะค่าคงที่ของสปริง

- 2) กำหนดให้ค่าคงที่ของตัวหน่วงมีค่าเท่ากับ 75 นิวตัน เมตรวินาทีต่อเรเดียน และทำการเปลี่ยนแปลงเฉพาะค่าคงที่ของสปริง

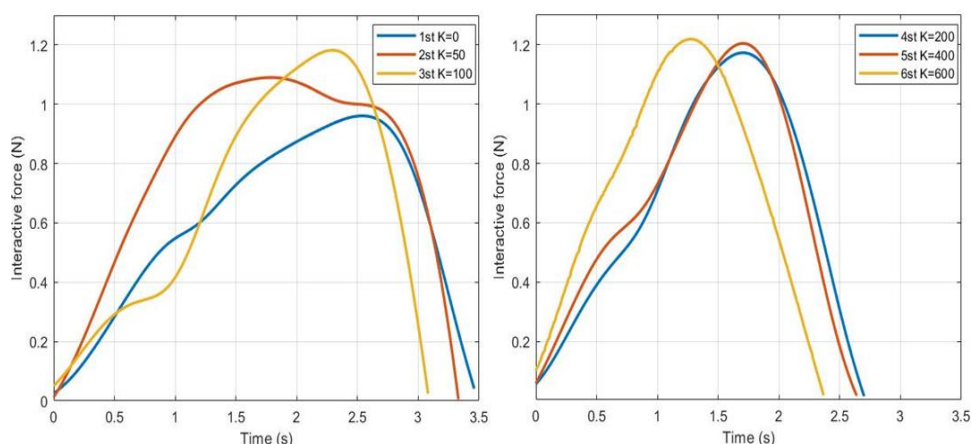
**การทดลองที่ 1** การศึกษาการหาความสัมพันธ์ของแรงปฏิสัมพันธ์และเวลาขณะถ่ายโอนวัตถุที่ขึ้นอยู่กับข้อกำหนดให้ค่าคงที่ของตัวหน่วงมีค่าเท่ากับ 50 นิวตัน เมตรวินาทีต่อเรเดียน และทำการเปลี่ยนแปลงเฉพาะค่าคงที่ของสปริง

- **วิธีการทดลองและผลการทดลอง** จะตั้งค่าคงที่ของตัวหน่วงให้มีค่าเท่ากับ 50 นิวตัน เมตรวินาทีต่อเรเดียน ตลอดการทดลอง และทำการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ของสปริง โดยค่าเริ่มต้นของการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ของสปริง จะเริ่มต้นที่ 0, 50, 100, 200, 400, และ 600 นิวตัน เมตรต่อเรเดียน ตามลำดับ โดยจะทำการทดลองซ้ำ 3 การทดลองต่อ 1 ชุดการทดลองและจดบันทึกผลการทดลองไว้ ดังตารางที่ 4-9 (b) หลังจากการทำ Curve fitting ใน MATLAB ของการเปลี่ยนแปลงของแรงปฏิสัมพันธ์และเวลาขณะถ่ายโอนวัตถุที่ขึ้นอยู่กับเปลี่ยนแปลงเฉพาะค่าคงที่ของสปริง แสดงดังรูปที่ 4-14

**การทดลองที่ 2** การศึกษาการหาความสัมพันธ์ของแรงปฏิสัมพันธ์และเวลาขณะถ่ายโอนวัตถุที่ขึ้นอยู่กับข้อกำหนดให้ค่าคงที่ของตัวหน่วงมีค่าเท่ากับ 75 นิวตันเมตรวินาทีต่อเรเดียน และทำการเปลี่ยนแปลงเฉพาะค่าคงที่ของสปริง

• **วิธีการทดลองและผลการทดลอง** จะตั้งค่าคงที่ของตัวหน่วงให้มีค่าเท่ากับ 75 นิวตันเมตรวินาทีต่อเรเดียน ตลอดการทดลอง และทำการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ของสปริง โดยค่าเริ่มต้นของการเปลี่ยนแปลงค่าคงที่ของสปริง จะเริ่มต้นที่ 0, 50, 100, 200, 400, และ 600 นิวตันเมตรต่อเรเดียน ตามลำดับ โดยจะทำการทดลองซ้ำ 3 การทดลองต่อ 1 ชุดการทดลองและจดบันทึกผลการทดลองไว้ดังตารางที่ 4-9 (a) หลังจากการทำ Curve fitting ใน MATLAB ของการเปลี่ยนแปลงของแรงปฏิสัมพันธ์และเวลาขณะถ่ายโอนวัตถุที่ขึ้นอยู่กับเปลี่ยนแปลงเฉพาะค่าคงที่ของสปริง แสดงดังรูปที่ 4-15

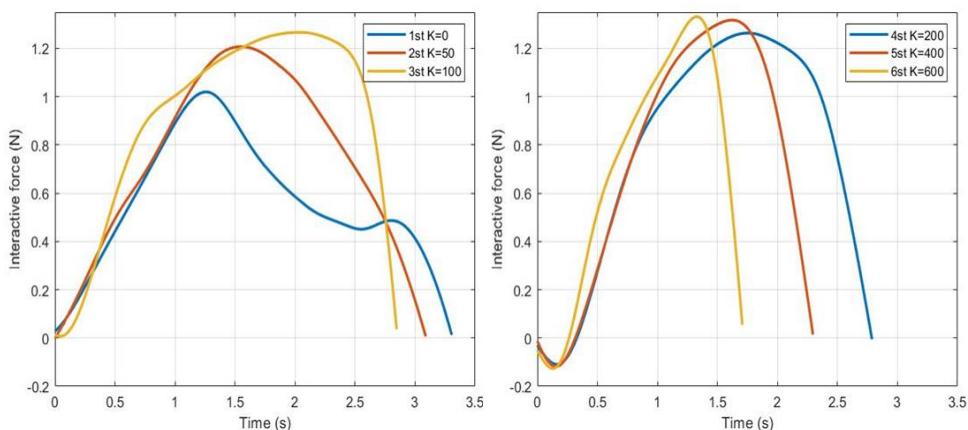
จากการทดลองทั้ง 2 การทดลองข้างต้นนี้ พบว่ามีหลายชุดการทดลองที่มีขนาดของแรงปฏิสัมพันธ์ที่ได้จากพฤติกรรมการส่งวัตถุของหุ่นยนต์ให้แก่มนุษย์ (HRH) ที่แสดงในตารางที่ 4-9 ที่มีขนาดใกล้เคียงกับขนาดของแรงปฏิสัมพันธ์ที่ได้จากพฤติกรรมการส่งวัตถุของมนุษย์ (HHH) อันได้แก่ค่าตัวหน่วง (D) ที่มีค่าคงที่เท่ากับ 50 นิวตันเมตรวินาทีต่อเรเดียน และมีค่าคงที่ของสปริง (K) ที่มีค่าเท่ากับ 100 200 400 และ 600 นิวตันเมตรต่อเรเดียน และค่าตัวหน่วง (D) ที่มีค่าคงที่เท่ากับ 75 นิวตันเมตรวินาทีต่อเรเดียนและมีค่าคงที่ของสปริง (K) ที่มีค่าเท่ากับ 100 200 400 และ 600 นิวตันเมตรต่อเรเดียน หลักจากการทำ Curve fitting ใน MATLAB ดังรูปที่ 4-14 (b) และ รูปที่ 4-15 (b) ตามลำดับ พบว่าโปรไฟล์แรงปฏิสัมพันธ์ที่ได้จากการกำหนดค่าคงที่ของตัวหน่วง (D) ที่มีค่าเท่ากับ 75 นิวตันเมตรวินาทีต่อเรเดียน และมีค่าคงที่ของสปริง (K) ที่มีค่าเท่ากับ 200 400 และ 600 นิวตันเมตรต่อเรเดียน มีโปรไฟล์แรงปฏิสัมพันธ์ที่เทียบเคียงกับโปรไฟล์แรงปฏิสัมพันธ์ที่ได้พฤติกรรมการส่งวัตถุของมนุษย์ ดังรูปที่ 4-16



(a)  $K = 0, 50, 100$  Nm/rad

(b)  $K = 200, 400, 600$  Nm/rad

รูปที่ 4-14  $D = 50$  นิวตันเมตรวินาทีต่อเรเดียน เปลี่ยนแปลงเฉพาะค่า K



(a) K = 0,50,100 Nm/rad

(b) K = 200,400,600 Nm/rad

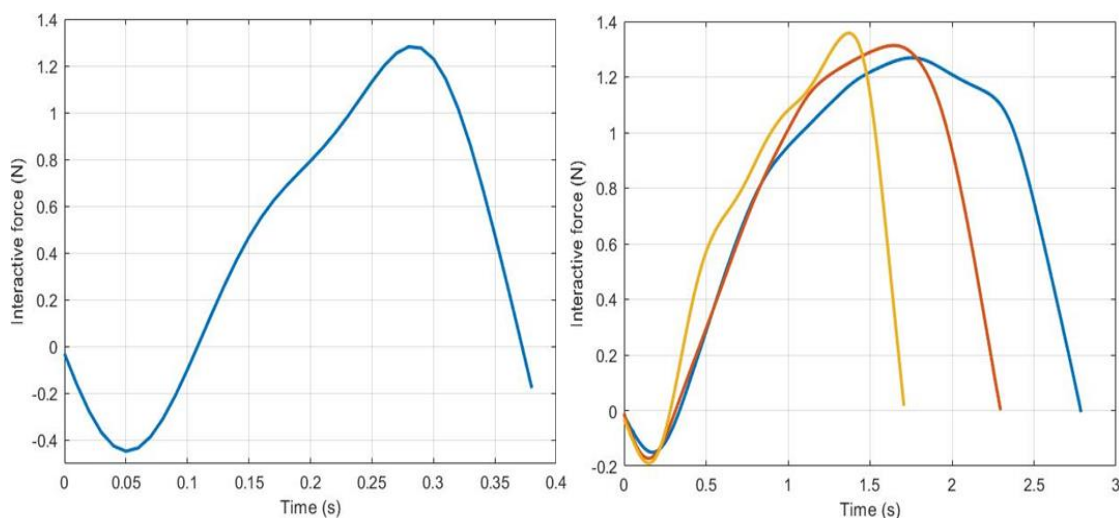
รูปที่ 4-15 D = 75 นิวตันเมตรวินาทีต่อเรเดียน เปลี่ยนแปลงเฉพาะค่า K

ตารางที่ 4-9 ผลการทดลองการกำหนดค่าคงที่ของตัวหน่วง

Spring factor (K) Varing				Spring factor (K) Varing			
D (NmS/rad)	K (Nm/rad)	F (N)	t (s)	D (NmS/rad)	K (Nm/rad)	F (N)	t (s)
75	0	1.10	3.33	50	0	0.95	3.47
		1.11	3.32			0.96	3.46
		1.13	3.31			0.94	3.49
75	50	1.20	3.07	50	50	1.10	3.32
		1.20	3.08			1.09	3.33
		1.21	3.07			1.09	3.31
75	100	1.25	2.95	50	100	1.19	3.09
		1.26	2.96			1.18	3.11
		1.24	2.97			1.20	3.08
75	200	1.28	2.62	50	200	1.22	2.71
		1.29	2.61			1.22	2.70
		1.29	2.60			1.23	2.71
75	400	1.33	2.24	50	400	1.25	2.64
		1.32	2.25			1.24	2.65
		1.31	2.24			1.26	2.63
75	600	1.40	1.83	50	600	1.32	2.34
		1.39	1.84			1.31	2.32
		1.41	1.82			1.33	2.31

(a) D = 75 NmS/rad

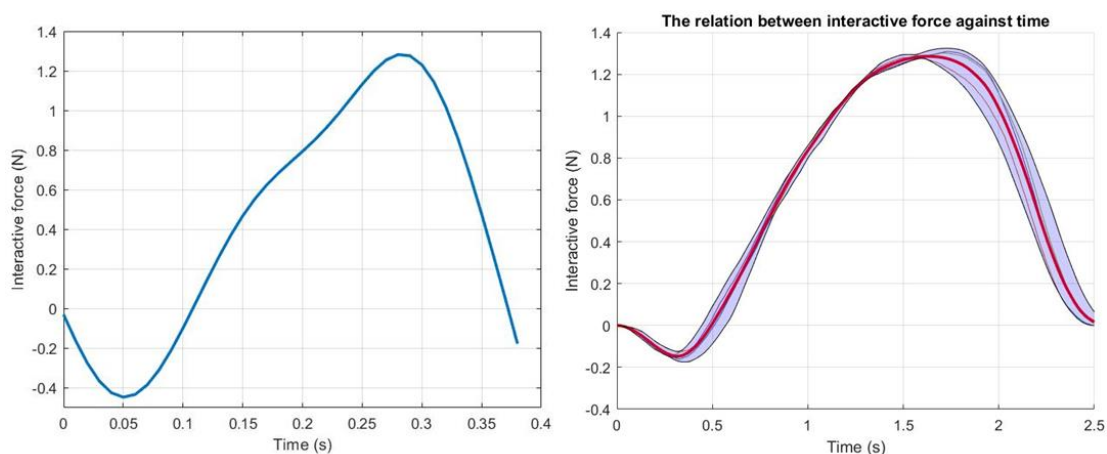
(b) D = 50 NmS/rad



(a) การส่งวัตถุที่มีน้ำหนัก 0.25 กิโลกรัม

(b)  $K = 200$  400 และ 600 Nm/rad

รูปที่ 4-16 เปรียบเทียบโปรไฟล์การส่งวัตถุที่ใกล้เคียงกัน



(a) การส่งวัตถุที่มีน้ำหนัก 0.25 กิโลกรัม

(b)  $D=75$  NmS/rad และ  $K = 400$  Nm/rad

รูปที่ 4-17 เปรียบเทียบโปรไฟล์การส่งวัตถุ

• **สรุปผลการทดลอง** พบว่าสามารถเลือกใช้ค่าคงที่ของตัวหน่วง ( $D$ ) ที่มีค่าเท่ากับ 75 นิวตันเมตรวินาทีต่อเรเดียน และค่าคงที่ของสปริง ( $K$ ) ที่มีค่าเท่ากับ 200 400 และ 600 นิวตันเมตรต่อเรเดียน ได้ทั้ง 3 แบบที่ส่งผลให้รูปแบบแรงในการส่งมีความราบเรียบเทียบเคียงกับมนุษย์ได้ แต่ค่าคงที่ของตัวหน่วง ( $D$ ) ที่มีค่าเท่ากับ 75 นิวตันเมตรวินาทีต่อเรเดียน และมีค่าคงที่ของสปริง ( $K$ ) ที่มีค่าเท่ากับ 400 นิวตันเมตรต่อเรเดียน จะให้ค่าที่เหมาะสมที่สุดกับการควบคุมเชิงพฤติกรรมของหุ่นยนต์ HSR โดยวัดจากความรู้สึกและการยอมรับจากผู้เข้าร่วมการทดลองที่ทำการรับวัตถุจากหุ่นยนต์ โดยมีขนาดแรงปฏิสัมพันธ์เฉลี่ยที่ 1.32 นิวตัน (โดยค่า Std. คือ 0.02 นิวตัน) ดังแสดงในตารางที่ 4-9 ที่ใกล้เคียงกับขนาดของแรงปฏิสัมพันธ์ที่ได้จากพฤติกรรมการส่งวัตถุของมนุษย์ (HHH) ที่

มีขนาดแรงปฏิสัมพันธ์เฉลี่ยเท่ากับ 1.28 นิวตัน และมีลักษณะโปรไฟล์ของแรงปฏิสัมพันธ์ที่ใกล้เคียงกับลักษณะโปรไฟล์ของแรงปฏิสัมพันธ์ที่เกิดจากพฤติกรรมการส่งวัตถุของมนุษย์ (HHH) ที่แสดงในรูปที่ 4-17 รวมถึงช่วงของแรงปฏิสัมพันธ์ที่เกิดจากพฤติกรรมการส่งวัตถุของมนุษย์ มีช่วงที่ใกล้เคียงกับช่วงของแรงปฏิสัมพันธ์ที่เกิดจากพฤติกรรมการส่งวัตถุของหุ่นยนต์อีกด้วย

ถึงแม้ว่าเวลาที่ใช้ในการถ่ายโอนวัตถุจากพฤติกรรมการส่งวัตถุของหุ่นยนต์ (HRH) มีเวลาที่เท่ากับ 2.24 วินาที (โดยค่า Std. คือ 0.02 วินาที) ที่ไม่ใกล้เคียงกับเวลาในการถ่ายโอนวัตถุที่เกิดจากพฤติกรรมการส่งวัตถุของมนุษย์ (HHH) มีสาเหตุมาจากโครงสร้างของหุ่นยนต์มีความแตกต่างกับโครงสร้างของมนุษย์ จึงต้องออกแบบให้หุ่นยนต์มีการเคลื่อนที่หรือเคลื่อนไหวตามแรงที่มากกระทำต่อวัตถุ จนกว่าแรงที่มากกระทำต่อวัตถุจะเข้าสู่จุดที่ตั้งไว้ (Set point) เพื่อให้มีพฤติกรรมการส่งวัตถุให้แก่มนุษย์ได้อย่างเป็นธรรมชาติมากที่สุด นิ่มนวล และปลอดภัย จากที่กล่าวมาทั้งหมดนี้ หุ่นยนต์ HSR สามารถส่งวัตถุให้แก่มนุษย์ได้อย่างเป็นธรรมชาติและปลอดภัย รวมถึงมีประสิทธิภาพที่เทียบเคียงกับพฤติกรรมการส่งวัตถุของมนุษย์

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

ในการศึกษาการส่งวัตถุของหุ่นยนต์ HSR โดยเลียนแบบการส่งของใน 3 มิติเหมือนกับการส่งของในชีวิตจริง โดยให้หุ่นยนต์สามารถตอบสนองต่อแรงด้วยการควบคุมแบบอิมพีแดนซ์ (Impedance control) และในขณะที่แรงแกน  $x$  (หรือแกนด้านหยีบของหุ่นยนต์) จะถูกนำมาพิจารณาเพื่อใช้ในการควบคุมการถ่ายโอนวัตถุ ในงานวิจัยนี้จะแบ่งการศึกษาเป็นหัวข้อหลัก คือ (1) การศึกษาพฤติกรรมกรรมการส่งวัตถุระหว่างมนุษย์กับมนุษย์ (HHH) จากการศึกษาพบประเด็นที่สำคัญสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในหุ่นยนต์ได้ 3 ประเด็น ดังนี้

(1) พฤติกรรมการส่งวัตถุของผู้ส่ง (Giver) ทุกคนมีลำดับการส่งวัตถุที่เหมือนกันโดยแบ่งออกมาได้เป็น 3 ขั้นตอน ประกอบด้วย ขั้นตอนการส่ง (Sending phase), ขั้นตอนการถ่ายโอน (Transfer phase), และขั้นตอนการรับ (Receiving phase)

(2) ส่วนสูงของผู้ส่ง (Giver) กับผู้รับ (Receiver) ไม่มีผลต่อระยะทางการกระจัดในการส่งวัตถุในแนวแกน  $x$  แต่มีผลต่อระยะทางการกระจัดในการส่งวัตถุในแนวแกน  $y$

(3) การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของวัตถุไม่ส่งผลต่อพฤติกรรมกรรมการส่งวัตถุของมนุษย์และเวลาในการถ่ายโอนวัตถุ แต่จะมีผลต่อแรงปฏิสัมพันธ์ในแนวนอน ( $f_{int}^x$ )

จากที่กล่าวมาข้างต้นนี้จะเป็นกรอบแนวความคิดในการออกแบบระบบพฤติกรรมกรรมการส่งวัตถุให้แก่หุ่นยนต์ HSR ในหัวข้อที่ (2) การศึกษาพฤติกรรมกรรมการส่งวัตถุของระหว่างหุ่นยนต์กับมนุษย์ (HRH) ด้วยการควบคุมแบบอิมพีแดนซ์ (Impedance control) จากการศึกษาพบประเด็นที่สำคัญสำหรับการออกแบบระบบการส่งให้กับหุ่นยนต์ 2 ประเด็น ดังนี้

(1) การเปลี่ยนแปลงตัวแปรค่าคงที่ของสปริง (K) และตัวหน่วง (D) จะส่งผลต่อความเสถียรของระบบ ปริมาณแรงปฏิสัมพันธ์ และเวลาในการถ่ายโอนวัตถุ กล่าวคือการเพิ่มค่าคงที่ของตัวหน่วง (D) ส่งผลให้ระยะเวลาในการถ่ายโอนวัตถุที่ค่อนข้างนาน แต่จะใช้แรงปฏิสัมพันธ์ที่ปริมาณที่น้อย และการเพิ่มค่าคงที่ของสปริง (K) ส่งผลให้ต้องใช้แรงในการปฏิสัมพันธ์ในปริมาณที่มาก แต่ระยะเวลาในการถ่ายโอนวัตถุจะค่อนข้างสั้น

(2) จากการเปรียบเทียบระหว่างผลที่ได้จากการวิเคราะห์ระหว่างการส่งวัตถุของหุ่นยนต์กับมนุษย์ (HRH) และมนุษย์กับมนุษย์ (HHH) พบว่าตัวแปรค่าคงที่ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการควบคุมแบบอิมพีแดนซ์ (Impedance control) คือค่าคงที่ของตัวหน่วง (D) ที่มีค่าเท่ากับ 75 นิวตันเมตรวินาทีต่อเรเดียน และค่าคงที่ของสปริง (K) ที่มีค่าเท่ากับ 400 นิวตันเมตรต่อเรเดียน ที่ทำให้การส่งวัตถุของหุ่นยนต์มีพฤติกรรมกรรมการส่ง และแรงปฏิสัมพันธ์ที่ใกล้เคียงกับมนุษย์

จากที่กล่าวมาเบื้องต้น หุ่นยนต์มีพฤติกรรมการส่งวัตถุ และแรงปฏิสัมพันธ์ที่ใกล้เคียงกับพฤติกรรมการส่งวัตถุของมนุษย์ แต่เวลาที่ใช้ในการถ่ายโอนวัตถุของหุ่นยนต์กับมนุษย์ และมนุษย์กับมนุษย์จะมีค่าที่แตกต่างกันประมาณ 1.88 วินาที (โดยค่า Std. คือ 0.06 นิวตัน) เนื่องจากหุ่นยนต์ต้องใช้เวลาในการถ่ายโอนมากกว่าการส่งวัตถุของมนุษย์เพื่อให้มีพฤติกรรมการส่งวัตถุให้มีความเป็นธรรมชาติและราบเรียบที่สุด แต่จากการสังเกตพบว่าเวลาแตกต่างกันไม่มีผลต่อการถ่ายโอน ซึ่งผู้เข้าร่วมการทดลองยอมรับกับเวลาถ่ายโอนของหุ่นยนต์ได้

งานวิจัยนี้ได้บรรลุตามวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ตอนต้น กล่าวคือ

## 5.2 ปัญหาและแนวทางแก้ไข

1. ถ้าหากใช้ทุกฟังก์ชันของหุ่นยนต์ HSR อย่างเต็มระบบและเต็มประสิทธิภาพ โดยไร้การเชื่อมต่อสายชาร์จเข้ากับตัวหุ่นยนต์ในขณะที่ใช้งานจริง หุ่นยนต์จะทำงานได้เพียง 2-3 ชั่วโมง ดังนั้น เมื่อใช้งานครบทุกๆ 2 ชั่วโมง ควรนำหุ่นยนต์ชาร์จไฟทุกครั้ง
2. ในตัวของหุ่นยนต์เองจะมี CPU อยู่ในตัวและถูกติดตั้ง Ubuntu ไว้ซึ่งถ้าหาก เวอร์ชันในหุ่นยนต์และในคอมพิวเตอร์ที่จะนำมาใช้สำหรับพัฒนาหุ่นยนต์และเชื่อมต่อกับหุ่นยนต์ ไม่ตรงกัน จะทำให้ไม่สามารถใช้งานแพ็คเกจหุ่นยนต์ได้ ดังนั้นจะต้องติดตั้ง Ubuntu รุ่นเดียวกันเสมอ
3. ในการใช้งานของหุ่นยนต์ HSR ถ้าหากเชื่อมต่อหุ่นยนต์แบบ Wireless มักจะมีปัญหาในการทำงานที่ล่าช้าเนื่องจากการรับส่งข้อมูลที่ไม่ค่อยเสถียร ดังนั้นจะต้องนำ laptop ติดตั้งกับตัวหุ่นยนต์และเชื่อมต่อกับหุ่นยนต์ผ่านสาย LAN ทำให้การใช้งานหุ่นยนต์มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น

## 5.3 แนวทางการพัฒนาต่อไป

เนื่องจากในงานวิจัยนี้เป็นเพียงการออกแบบระบบการส่งมอบวัตถุระหว่างหุ่นยนต์กับมนุษย์เท่านั้น ดังนั้นควรจะพัฒนาระบบการทำงานที่ครอบคลุมในการปฏิบัติภารกิจในการช่วยช่วยเหลือและบริการ ในด้านการส่งมอบวัตถุให้เต็มรูปแบบ ซึ่งตัวหุ่นยนต์ HSR มีเซนเซอร์ในการสร้างแผนที่ตรวจจับวัตถุทั้งความลึก สี และแสง ตรวจจับแรง รวมถึงมีแพ็คเกจต่างๆเบื้องต้น ทำให้สามารถนำไปพัฒนาระบบและต่อยอดให้หุ่นยนต์สามารถทำภารกิจด้านการบริการได้เต็มรูปแบบและเต็มประสิทธิภาพได้ ดังต่อไปนี้

1. หุ่นยนต์สามารถรับคำสั่งเสียงและตอบรับกับผู้ใช้งานได้
2. หุ่นยนต์สามารถค้นหาสิ่งของหรือวัตถุ ภายในห้อง, อาคาร, หรือสถานที่นั้นๆได้ตามที่ผู้ใช้งานสั่ง โดยสามารถหลีกเลี่ยงอุปสรรคและสิ่งกีดขวางได้



3. หุ่นยนต์สามารถหยิบจับสิ่งของที่ต้องการได้ โดยไม่ก่อให้เกิดความเสียหายแก่ตัววัตถุ และสภาพแวดล้อม
4. ในการส่งมอบวัตถุ หุ่นยนต์ควรตรวจสอบถึง ความสูงและอริยาบถของผู้รับ ก่อนทำการส่งมอบวัตถุ เพื่อให้หุ่นยนต์สามารถปรับระดับความสูงให้สอดคล้องกับอริยาบถของผู้รับ
5. เนื่องจากในงานวิจัยนี้ เป็นเพียงการส่งมอบวัตถุ ที่วัตถุมีลักษณะตั้งตรงและส่งมอบวัตถุในแนวแกนนอนเท่านั้น ดังนั้นควรจะพัฒนาระบบการส่งมอบวัตถุให้ครอบคลุมทุกแนวแกน
6. พัฒนาระบบการควบคุมแรงด้วยการควบคุมแบบอิมพีแดนซ์ทั้ง 3 แกน เพื่อให้หุ่นยนต์มีพฤติกรรมการส่งวัตถุที่หลากหลายมากขึ้น

## บรรณานุกรม

- [1] R. Ikeura และ H. Inooka, “Variable impedance control of a robot for cooperation with a human”, ใน *Proceedings of 1995 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Nagoya, Japan, 1995, ปี 3, น. 3097–3102. doi: 10.1109/ROBOT.1995.525725.
- [2] K. Kosuge และ N. Kazamura, “Control of a robot handling an object in cooperation with a human”, ใน *Proceeding’s 6th IEEE International Workshop on Robot and Human Communication. RO-MAN’97 SENDAI*, Sendai, Japan, 1997, น. 142–147. doi: 10.1109/ROMAN.1997.646971.
- [3] “(PDF) Learning Dynamic Robot-to-Human Object Handover from Human Feedback”.  
[https://www.researchgate.net/publication/301855547\\_Learning\\_Dynamic\\_Robot-to-Human\\_Object\\_Handover\\_from\\_Human\\_Feedback](https://www.researchgate.net/publication/301855547_Learning_Dynamic_Robot-to-Human_Object_Handover_from_Human_Feedback) (สืบค้น เม.ย. 23, 2019).
- [4] J. R. Medina, F. Duvallet, M. Karnam, และ A. Billard, “A human-inspired controller for fluid human-robot handovers”, ใน *2016 IEEE-RAS 16th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids)*, Cancun, Mexico, พ.ย. 2016, น. 324–331. doi: 10.1109/HUMANOIDS.2016.7803296.
- [5] P. Neranon, “Robot-to-Human Object Handover using a Behavioural Control Strategy”, พ.ย. 2018, น. 1–6. doi: 10.1109/ICSIMA.2018.8688784.
- [6] M. M. Rahman, R. Ikeura, และ K. Mizutani, “Control characteristics of two humans in cooperative task and its application to robot control”, ใน *2000 26th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. IECON 2000. 2000 IEEE International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation. 21st Century Technologies and Industrial Opportunities (Cat. No.00CH37141)*, Nagoya, Japan, 2000, ปี 3, น. 1773–1778. doi: 10.1109/IECON.2000.972544.
- [7] R. Ikeura, A. Morita, และ K. Mizutani, “Variable damping characteristics in carrying an object by two humans”, ใน *Proceeding’s 6th IEEE International Workshop on Robot and Human Communication. RO-MAN’97 SENDAI*, Sendai, Japan, 1997, น. 130–134. doi: 10.1109/ROMAN.1997.646969.

- [8] S. B. A. Bakar, R. Ikeura, A. F. B. Salleh, และ T. Yano, “A study of human-human cooperative characteristic in moving an object”, น. 6.
- [9] P. Neranon และ R. Bicker, “A behavioural control strategy of human-human interaction in an object transfer task”, ใน *2014 UKACC International Conference on Control (CONTROL)*, Loughborough, UK, ก.ค. 2014, น. 285–289. doi: 10.1109/CONTROL.2014.6915154.
- [10] “การควบคุมอิมพีแดนซ์ของหุ่นยนต์สำหรับทำงานร่วมกับมนุษย์.pdf”.
- [11] “TFG\_Miguel\_Arduengo.pdf”.
- [12] M. M. Rayguru, M. R. Elara, B. F. Gomez, และ B. Ramalingam, “A Time Delay Estimation Based Adaptive Sliding Mode Strategy for Hybrid Impedance Control”, *IEEE Access*, ปี 8, น. 155352–155361, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3019429.
- [13] W. Takano, H. Kanayama, T. Takahashi, T. Moridaira, และ Y. Nakamura, “A data-driven approach to probabilistic impedance control for humanoid robots”, *Robot. Auton. Syst.*, ปี 124, น. 103353, ก.พ. 2020, doi: 10.1016/j.robot.2019.103353.
- [14] J. Nakanishi, S. Itadera, T. Aoyama, และ Y. Hasegawa, “Towards the development of an intuitive teleoperation system for human support robot using a VR device”, *Adv. Robot.*, ปี 34, ฉบับที่ 19, น. 1239–1253, ต.ค. 2020, doi: 10.1080/01691864.2020.1813623.
- [15] M. Gharbi, P.-V. Paubel, A. Clodic, O. Carreras, R. Alami, และ J.-M. Cellier, “Toward a better understanding of the communication cues involved in a human-robot object transfer”, ใน *2015 24th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN)*, Kobe, Japan, ส.ค. 2015, น. 319–324. doi: 10.1109/ROMAN.2015.7333626.
- [16] P. Jaroonsorn, P. Neranon, C. Dechwayukul, และ P. Smithmaitrie, “Performance Comparison of Compliance Control based on PI and FLC for safe Human-robot Cooperative Object Carrying”, ใน *2019 First International Symposium on Instrumentation, Control, Artificial Intelligence, and Robotics (ICA-SYMP)*, Bangkok, Thailand, ม.ค. 2019, น. 13–16. doi: 10.1109/ICA-SYMP.2019.8646008.

- [17] T. Yamamoto, K. Terada, A. Ochiai, F. Saito, Y. Asahara, และ K. Murase, “Development of Human Support Robot as the research platform of a domestic mobile manipulator”, *ROBOMECH J.*, ปี 6, ฉบับที่ 1, น. 4, ธ.ค. 2019, doi: 10.1186/s40648-019-0132-3.
- [18] พ. สมิตไมตรี, *วิทยาการหุ่นยนต์และเทคโนโลยี = Robotics and technology / เรียบเรียง โดย พญทธิกร สมิตไมตรี*, พิมพ์ครั้งที่ 1. สงขลา : ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์, 2551. [ออนไลน์]. Available at: <https://www.car.chula.ac.th/display7.php?bib=b1783569>
- [19] “impedance control of robot for human-robot cooperative task drc020.pdf”.
- [20] A. Winkler และ J. Suchý, “Implicit Force Control of a Position Controlled Robot – A Comparison with Explicit Algorithms”, ปี 9, ฉบับที่ 6, น. 7, 2015.
- [21] J. De Schutter และ H. Van Brussel, “Compliant Robot Motion II. A Control Approach Based on External Control Loops”, *Int. J. Robot. Res.*, ปี 7, ฉบับที่ 4, น. 18–33, ส.ค. 1988, doi: 10.1177/027836498800700402.
- [22] E. D. And และ P. Dauchez, “External force control of an industrial puma 560 robot”, *J. Robot. Syst.*, ปี 11, ฉบับที่ 6, น. 523–540, 1994, doi: 10.1002/rob.4620110607.
- [23] Kiam Heong Ang, G. Chong, และ Yun Li, “PID control system analysis, design, and technology”, *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, ปี 13, ฉบับที่ 4, น. 559–576, ก.ค. 2005, doi: 10.1109/TCST.2005.847331.
- [24] Pengfei Luo, Min Zhang, Yile Liu, Dahai Han, และ Qing Li, “A moving average filter-based method of performance improvement for ultraviolet communication system”, ใน *2012 8th International Symposium on Communication Systems, Networks & Digital Signal Processing (CSNDSP)*, Poznan, Poland, ก.ค. 2012, น. 1–4. doi: 10.1109/CSNDSP.2012.6292672.
- [25] “anova”. สืบค้น: พ.ค. 01, 2021. [ออนไลน์]. Available at: <https://sites.google.com/site/mystatistics01/chapter5/anova>
- [26] “regression-analysis”. สืบค้น: พ.ค. 01, 2021. [ออนไลน์]. Available at: <https://sites.google.com/site/mystatistics01/regression-correlation-analysis/regression-analysis>
- [27] B. Matthias, “ISO/TS 15066 - Collaborative Robots Present Status”, น. 23.

- [28] R. Alami และคณะ, “Safe and dependable physical human-robot interaction in anthropic domains: State of the art and challenges”, ใน *2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Beijing, ต.ค. 2006, น. 1–16. doi: 10.1109/IROS.2006.6936985.
- [29] “ros”. สืบค้น: พ.ค. 01, 2021. [ออนไลน์]. Available at: <http://cs60052016.blogspot.com/2016/10/ros-robot-operating-system.html>
- [30] “YOLO: Real-Time Object Detection”. <https://pjreddie.com/darknet/yolo/> (สืบค้น เม.ย. 18, 2019).
- [31] T. Sutiphotinun, P. Neranon, P. Vessakosol, C. Hiransoog, และ J. Sookgaew, “A Human-Inspired Control Strategy: A Framework for Seamless Human-Robot Handovers”, น. 11.
- [32] “ATI-sensor”. สืบค้น: พ.ค. 01, 2021. [ออนไลน์]. Available at: [https://www.emotionsupply.com/ATI\\_F\\_T\\_SENSOR\\_Mini40\\_IP65\\_IP68\\_Series\\_p/mini40ip65ip68.htm](https://www.emotionsupply.com/ATI_F_T_SENSOR_Mini40_IP65_IP68_Series_p/mini40ip65ip68.htm)
- [33] “Specifications-and-comparison-of-Asus-Xtion-Pro-Live-and-Microsoft-Kinect\_tbl1\_259002786”. สืบค้น: พ.ค. 01, 2021. [ออนไลน์]. Available at: [https://www.researchgate.net/figure/Specifications-and-comparison-of-Asus-Xtion-Pro-Live-and-Microsoft-Kinect\\_tbl1\\_259002786](https://www.researchgate.net/figure/Specifications-and-comparison-of-Asus-Xtion-Pro-Live-and-Microsoft-Kinect_tbl1_259002786)
- [34] T. Sutiphotinun, P. Neranon, และ P. Vessakosol, “Force-Impedance Control for Safe Human-Robot Handovers”, น. 2, 2020.
- [35] T. Tsumugiwa, R. Yokogawa, และ K. Yoshida, “Stability analysis for impedance control of robot for human-robot cooperative task system”, ใน *2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) (IEEE Cat. No.04CH37566)*, Sendai, Japan, 2004, ปี 4, น. 3883–3888. doi: 10.1109/IROS.2004.1390020.
- [36] K. B. Reed, J. Patton, และ M. Peshkin, “Replicating Human-Human Physical Interaction”, ใน *Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Rome, Italy, เม.ย. 2007, น. 3615–3620. doi: 10.1109/ROBOT.2007.364032.

- [37] M. Huber, M. Rickert, A. Knoll, T. Brandt, และ S. Glasauer, “Human-robot interaction in handing-over tasks”, *RO-MAN 2008 - 17th IEEE Int. Symp. Robot Hum. Interact. Commun.*, ส.ค. 2008, doi: 10.1109/ROMAN.2008.4600651.
- [38] M. Huber, M. Rickert, A. Knoll, T. Brandt, และ S. Glasauer, “Human-robot interaction in handing-over tasks”, ใน *RO-MAN 2008 - The 17th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication*, Munich, Germany, ส.ค. 2008, น. 107–112. doi: 10.1109/ROMAN.2008.4600651.
- [39] E. De Momi, L. Kranendonk, M. Valenti, N. Enayati, และ G. Ferrigno, “A Neural Network-Based Approach for Trajectory Planning in Robot–Human Handover Tasks”, *Front. Robot. AI*, ปี 3, มิ.ย. 2016, doi: 10.3389/frobt.2016.00034.
- [40] T. Flash และ N. Hogan, “The coordination of arm movements: an experimentally confirmed mathematical model”, *J. Neurosci.*, ปี 5, ฉบับที่ 7, น. 1688–1703, ก.ค. 1985, doi: 10.1523/JNEUROSCI.05-07-01688.1985.
- [41] “Minimum-jerk-trajectories-obtained-when-the-function-qt-is-defined-as-in-Eq-4\_fig1\_338489899”. สืบค้น: พ.ค. 01, 2021. [ออนไลน์]. Available at: [https://www.researchgate.net/figure/Minimum-jerk-trajectories-obtained-when-the-function-qt-is-defined-as-in-Eq-4\\_fig1\\_338489899](https://www.researchgate.net/figure/Minimum-jerk-trajectories-obtained-when-the-function-qt-is-defined-as-in-Eq-4_fig1_338489899)
- [42] Keppel, *Design and analysis: A researcher’s handbook*. Prentice-Hall, Inc., 1991.
- [43] “Response\_Surface\_Methodology.pdf”.
- [44] R. Ikeura, H. Monden, และ H. Inooka, “Cooperative motion control of a robot and a human”, ใน *Proceedings of 1994 3rd IEEE International Workshop on Robot and Human Communication*, Nagoya, Japan, 1994, น. 112–117. doi: 10.1109/ROMAN.1994.365946.
- [45] R. Diversi, R. Guidorzi, และ U. Soverini, “Identification of ARX and ARARX Models in the Presence of Input and Output Noises”, *Eur. J. Control*, ปี 16, ฉบับที่ 3, น. 242–255, ม.ค. 2010, doi: 10.3166/ejc.16.242-255.
- [46] “index.html”. สืบค้น: พ.ค. 01, 2021. [ออนไลน์]. Available at: [https://docs.hsr.io/hsrb\\_user\\_manual\\_en/index.html](https://docs.hsr.io/hsrb_user_manual_en/index.html)
- [47] “net-ft-ros”. สืบค้น: พ.ค. 02, 2021. [ออนไลน์]. Available at: <https://github.com/epfl-lasa/net-ft-ros>


- [48] “index.html”. สืบค้น: พ.ศ. 02, 2021. [ออนไลน์]. Available at:  
[https://docs.hsr.io/hsrb\\_user\\_manual\\_en/index.html](https://docs.hsr.io/hsrb_user_manual_en/index.html)
- [49] “netft\_utils”. สืบค้น: พ.ศ. 02, 2021. [ออนไลน์]. Available at:  
[https://github.com/UTNuclearRoboticsPublic/netft\\_utils](https://github.com/UTNuclearRoboticsPublic/netft_utils)
- [50] D. C. Montgomery, *Design, and analysis of experiments*, Eighth edition.  
Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc, 2013.

ภาคผนวก ก

ข้อมูลจำเพาะหุ่นยนต์บริการและอุปกรณ์เสริม



ตารางที่ ก-1 รายละเอียดของหุ่นยนต์ Human Support Robot

		
<b>Robot</b>		
<b>Size</b>	Footprint	$\phi$ 430mm
	Height (min/max)	1,005/1,350mm (top of the head height)
	The total degree of freedom	11
	Weight	About 37kg
<b>units</b>		
<b>Moving base</b>	Drive system	Omnidirectional moving mechanism
	Use environment	Indoor
		Step 5mm
		Climbing angle 5 °
	Sensors	Laser measuring range sensor (UST-20LX)
		IMU (6DOF)
		Magnetic sensor for stop (N-pole detection type) x2
Maximum speed	0.22m/s (0.8km/h)	
Expandability	USB3.0 x1	

ตารางที่ ก-2 รายละเอียดของหุ่นยนต์ Human Support Robot

Hoisting	Stroke	690mm
	Maximum speed	150mm/s
	Features	Telescope mechanism
Weight compensation mechanism		
Arm	Length	About 600mm
	Movable range (height)	0~1,350mm
	Movable range (depth)	450mm (from the moving base end face)
	Payload (recommended/max)	0.5/1.2kg
	Hand maximum speed	1.1m/s
	Sensors	Absolute type joint angle encoder
		6-axis force sensor
	Features	Weight compensation mechanism
Torque detectable flexible joint x 2 axis		
Gripper	Opening and closing speed	<0.4s (at the maximum opening and closing range)
	Maximum gripping force	40N
	Maximum opening and closing range	135mm
	Maximum suction force	5N
	Sensors	Potentiometer
		Gripping force sensor
		Wide-angle camera
	Features	Flexible parallel fingertips mechanism
		Flexible joint mechanism
		Self-locking mechanism
Suction mechanism		
Power grasp supported		

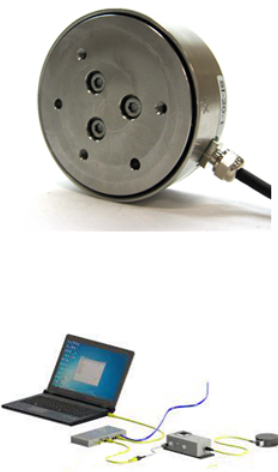
ตารางที่ ก-3 รายละเอียดของหุ่นยนต์ Human Support Robot

Head	CPU	Absolute type joint angle encoder
		RGB-D sensor (Xtion PRO LIVE) x1
		Stereo camera x1
		Wide-angle camera x1
		Microphone array x1
	Expandability	USB2.0 x1 12V-0.5A output x1
Display	Size	7.0 inch
	Resolution	1024 x 600
Body	CPU	<0.4s (at the maximum opening and closing range)
	Embedded GPU board	40N
	Speaker	5W
	Battery	Lithium-ion battery 25V/9.5Ah
	Operation time	About 2 hours
	Expandability	USB3.0 x3
		VGA x1
		LAN x1
		Serial x1
TK1 USB2.0 x1 TK1 Serial x1		

ตารางที่ ก-4 รายละเอียดของ joint

Number	Joint names	type	Axis direction	Range of movement	Remarks
1	base_roll_joint	rotation	z	Infinite rotation	
2	base_l_drive_wheel_joint	rotation	y	Infinite rotation	
3	base_r_drive_wheel_joint	rotation	y	Infinite rotation	
4	arm_lift_joint	Linear motion	z	0~0.69[m]	
5	arm_flex_joint	rotation	-y	-2.617~0[rad]	-150~0[deg]
6	arm_roll_joint	rotation	z	-1.919 ~ 3.665[rad]	-110~210[deg]
7	wrist_flex_joint	rotation	-y	-1.919 ~ 1.221[rad]	-110~70[deg]
8	wrist_roll_joint	rotation	z	-1.919 ~ 3.665[rad]	-110~210[deg]
9	hand_motor_joint	rotation	x	-0.105 ~ 1.239[rad]	-6~71[deg]
10	head_pan_joint	rotation	z	-3.839 ~ 1.745[rad]	-220 ~ 100[deg]
11	head_tilt_joint	rotation	-y	-1.570 ~ 0.523[rad]	-90~30[deg]

ตารางที่ ก-5 รายละเอียดของ ATI: 6-AXIS FORCE AND TORQUE SENSOR  
(MINI40 IP65/IP68 SERIES)

	Single-Axis Overload	
	Fxy	± 810 N
	Fz	± 2400 N
	Txy	± 19 Nm
	Tz	± 20 Nm
	Stiffness (Calculated)	
	X-axis & Y-axis forces (Kx,Ky)	$1.1 \times 10^7$ N/m
	Z-axis force (Kz)	$2.0 \times 10^7$ N/m
	X-axis & Y-axis torque (Ktx,Kty)	$2.8 \times 10^3$ Nm/rad
	Z-axis torque (Ktz)	$4.0 \times 10^3$ Nm/rad
	Resonant Frequency	
	Fx,Fy,Tz	1400 Hz
	Fz,Tx,Ty	1300 Hz
	Physical Specifications	
	Weight*	0.272 kg
Diameter*	53.3 mm	
Height*	21.1 mm	
*Specifications include standard interface plates		

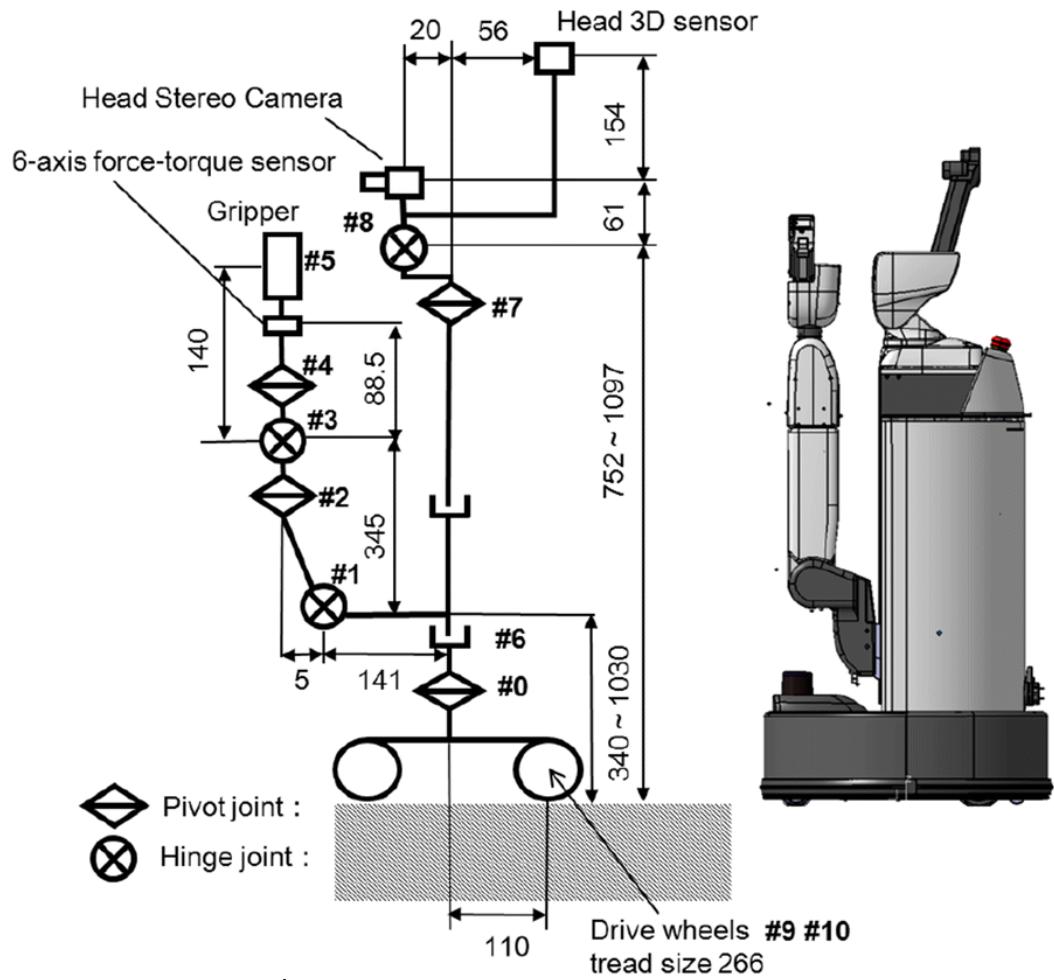
Metric Calibrations (SI)								
Calibration	Fx,Fy	Fz	Tx,Ty	Tz	Fx,Fy	Fz	Tx,Ty	Tz
SI-20-1	20 N	60 N	1 Nm	1 Nm	1/200 N	1/100 N	1/8000 Nm	1/8000 Nm
SI-40-2	40 N	120 N	2 Nm	2 Nm	1/100 N	1/50 N	1/4000 Nm	1/4000 Nm
SI-80-4	60 N	180 N	4 Nm	4 Nm	1/50 N	1/25 N	1/2000 Nm	1/2000 Nm
SENSING RANGES					RESOLUTION			

ตารางที่ ก-6 รายละเอียดของกล้อง Asus Xtion pro live 3d sensor

Metric	Asus Xtion Live Pro	Microsoft Kinect
Price	~\$150 USD	~\$150 USD
Power consumption	<2.5 W	
Distance of use	0.8 m < x < 3.5 m	0.8 m < x < 4 m
Field of view *	58° H; 45° V; 70° D	57.5° H; 43.5° V
Sensor	RGB, Depth and Microphone	RGB, Depth and Microphone
Depth image size	VGA (640 × 480) 30 fps; QVGA (320 × 240) 60 fps	VGA (640 × 480) 30 fps
Resolution	SXVGA (1280*1024)	
Platform	Intel x86; AMD	
OS support	Win 32/64 XP, Vista, 7; Linux Ubuntu 10.10: X86, 32/64 bit, Android	Win 32/64 XP, Vista, 7, 8
Interface	USB2.0	USB2.0
Software	Open NI SDK bundled	Kinect for Windows SDK
Programming languages	C++/C# (Windows); C++ (Linux); Java	C++/C# (Windows); C++ (Linux); Java
Dimensions	18 × 3.5 × 5 cm	28 × 8 × 8 cm

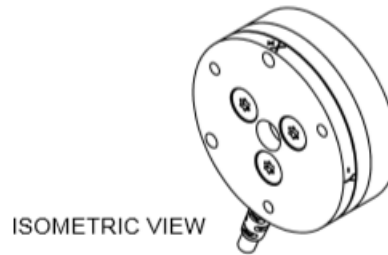
\* Horizontal, Vertical and Diagonal.

ภาคผนวก ข  
ส่วนประกอบของหุ่นยนต์และอุปกรณ์เสริม

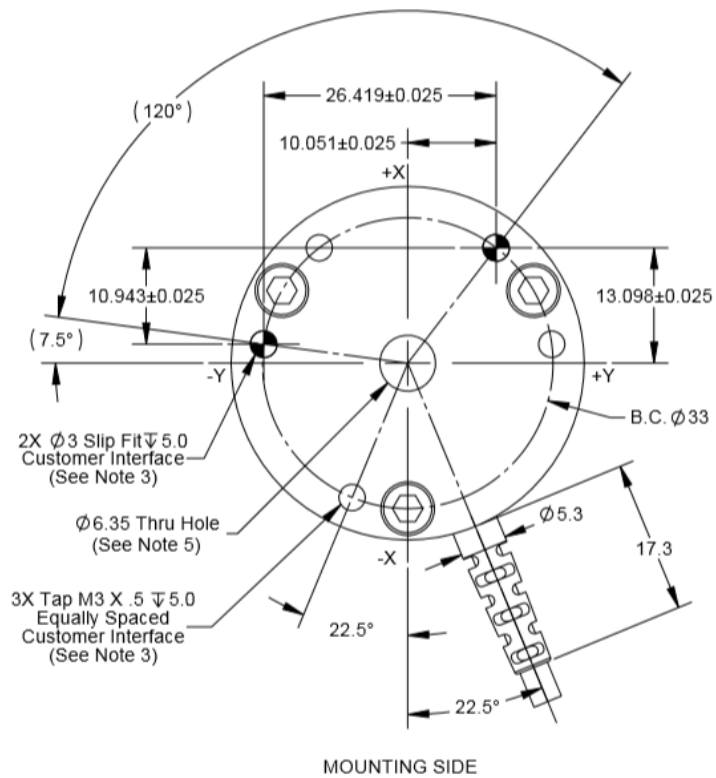


รูปที่ ข-0-1 หุ่นยนต์ Human support robot

## ATI: 6-AXIS FORCE AND TORQUE SENSOR (MINI40 SERIES)



รูปที่ ข-0-2 เซนเซอร์วัดแรง ATI



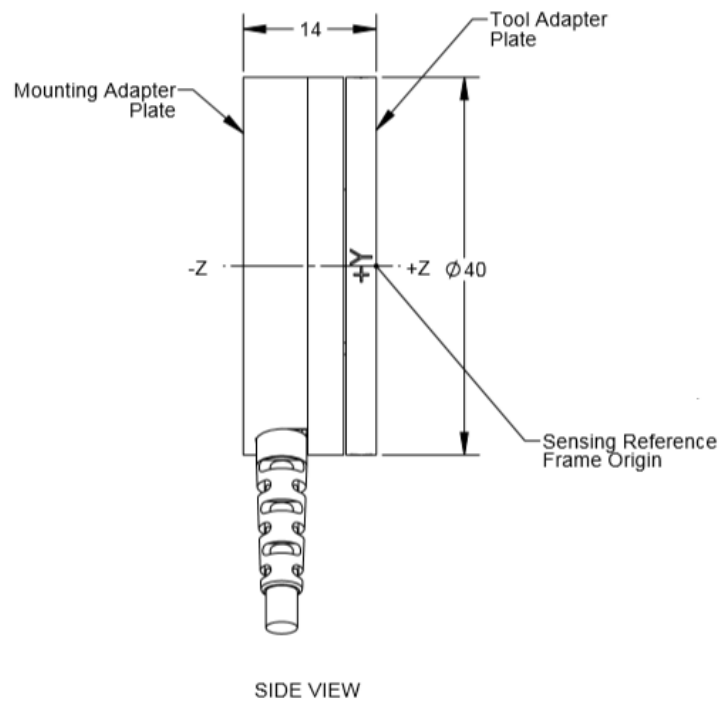
รูปที่ ข-0-3 แผนภาพโครงสร้างของการติดตั้งเซนเซอร์

## Notes:

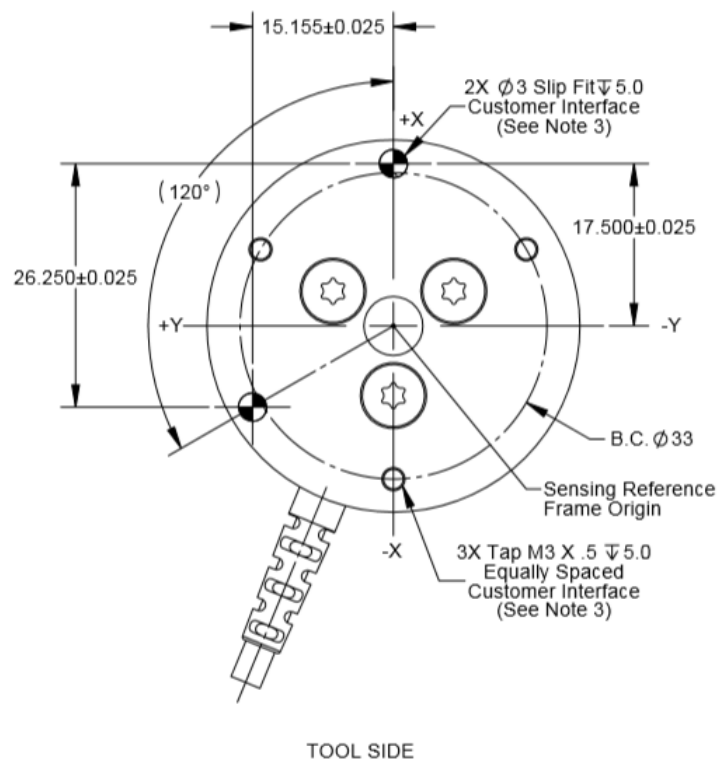
1. Material: Mounting and Tool Adapter made of Aluminum, Transducer made of hardened stainless steel.
2. **WARNING: DO NOT LOOSEN OR REMOVE INTERFACE PLATES OR CABLE DUE TO POTENTIAL DAMAGE.**
3. **DO NOT EXCEED INTERFACE DEPTH. MAY CAUSE DAMAGE**
4. Standard connector (not shown) has 17mm diameter & is 67.5mm long.
5. Do not allow items passing through center hole to touch both the Mounting and Tool Adapter Plates or accuracy will be compromised.

รูปที่ ข-0-4 ข้อควรระวังและการใช้งานเบื้องต้น



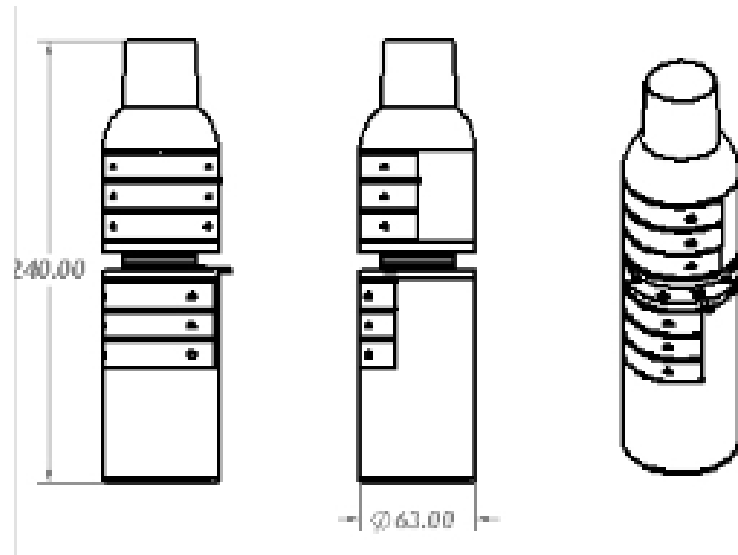


รูปที่ ข-0-5 แผนภาพโครงสร้างของเซนเซอร์ด้านข้าง

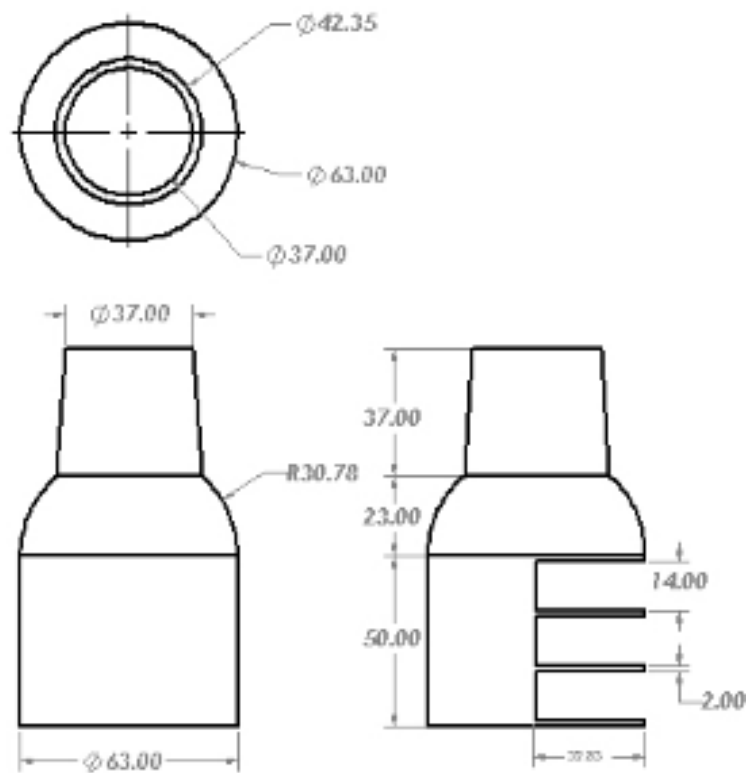


รูปที่ ข-0-6 แผนภาพโครงสร้างของเซนเซอร์

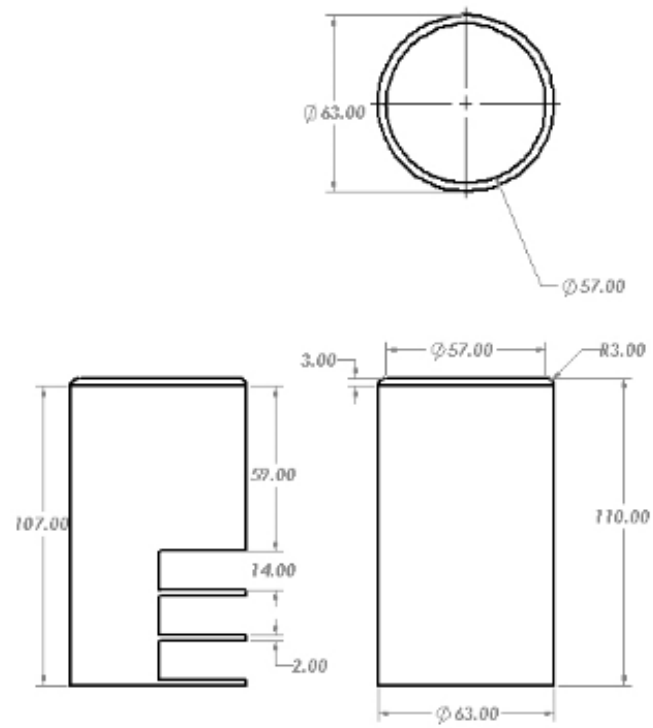
วัตถุสำหรับการทดสอบ



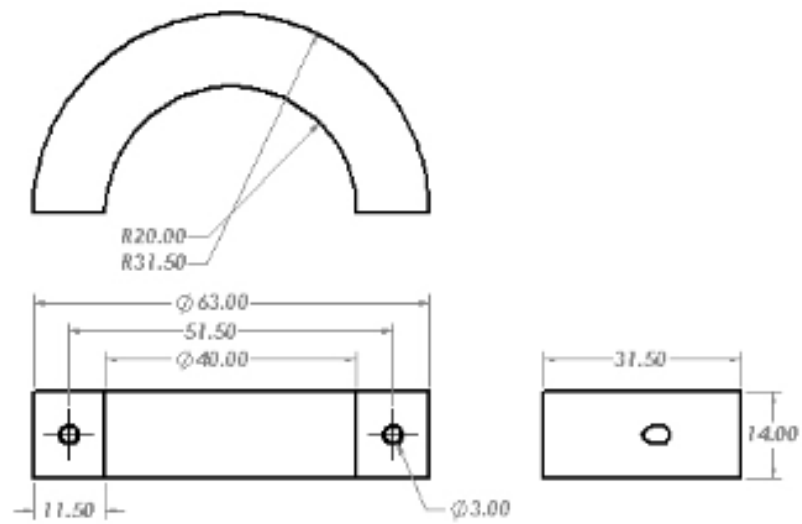
รูปที่ ข-0-7 แผนภาพการประกอบขวด



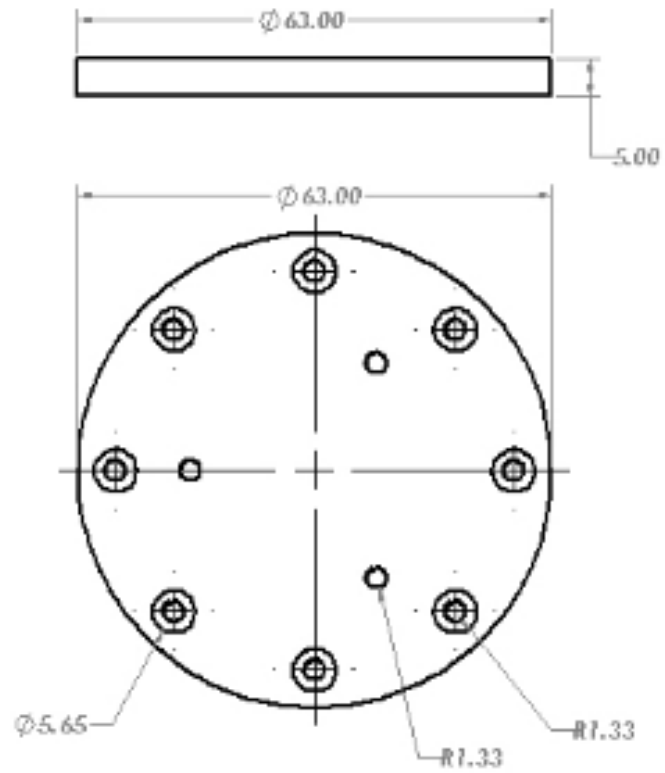
รูปที่ ข-0-8 แผนภาพของขวดส่วนบน



รูปที่ ข-0-9 แผนภาพของขวดส่วนล่าง



รูปที่ ข-0-10 แผนภาพของฝาปิดมวอล

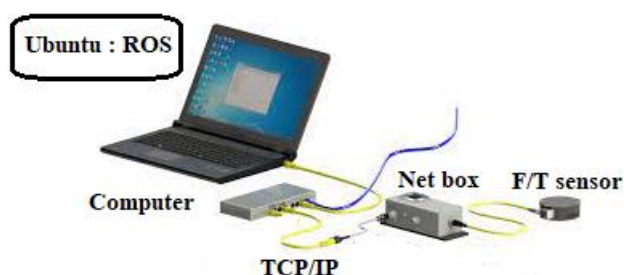


รูปที่ ข-0-11 แผนภาพแผ่นงานยึดติดระหว่างตัวขวดกับเซนเซอร์วัดแรง

ภาคผนวก ค  
การเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่างๆกับ ROS

## การเชื่อมต่อเซนเซอร์วัดแรงและแรงบิด กับ ROS

การนำเซนเซอร์วัดแรงและแรงบิดมาเชื่อมต่อกับ ROS จะต้องมีแพ็คเกจที่ใช้สำหรับการส่งข้อมูลของแรงและแรงบิดที่เซนเซอร์ที่อ่านค่าได้ โดยการเชื่อมต่อกันระหว่างคอนโทรลเลอร์ของเซนเซอร์ Net Box กับ ROS จะเป็นแบบ TCP/IP รูปที่ ค-0-1 ซึ่งแพ็คเกจที่จะใช้ มีชื่อว่า net-ft-ros [47]



รูปที่ ค-0-1 การเชื่อมต่อเซนเซอร์วัดแรงกับ ROS

ขั้นตอนการเชื่อมต่อ เชื่อมต่อด้วยสาย Ethernet กับคอมพิวเตอร์ จากนั้นเปิดหน้าจอ terminal บน Ubuntu ใช้คำสั่ง

ตรวจสอบค่า ping ของเซนเซอร์แสดงขึ้นมา บนหน้า terminal แสดงว่าเซนเซอร์สามารถใช้งานได้ โดยใช้คำสั่ง

```
$ ping IP_NUMBER
```

หรือนำค่า IP\_NUMBER ใส่ในเว็บเบราว์เซอร์ ก็จะได้เห็นเว็บเพจของ ATI แสดงว่าเซนเซอร์พร้อมใช้งานเช่นกัน

หลังจากเชื่อมต่อเซนเซอร์ได้ ก็จะต้องสั่งเซนเซอร์ทำงาน โดยจะต้องเป็นหน้า terminal ใหม่และพิมพ์คำสั่งดังต่อไปนี้

```
$ roslaunch netft_rdt_driver ft_sensor.launch
```

ข้อมูลของแรงและแรงบิดที่เซนเซอร์อ่านค่าได้ในขณะนั้น จะถูกเผยแพร่ผ่าน topic ที่มีชื่อว่า /ft\_sensor/netft\_data โดยมีประเภทของค่าที่มีชื่อเรียกว่า geometry\_msgs/WrenchStamped ดังรูปที่ ค-0-2

```

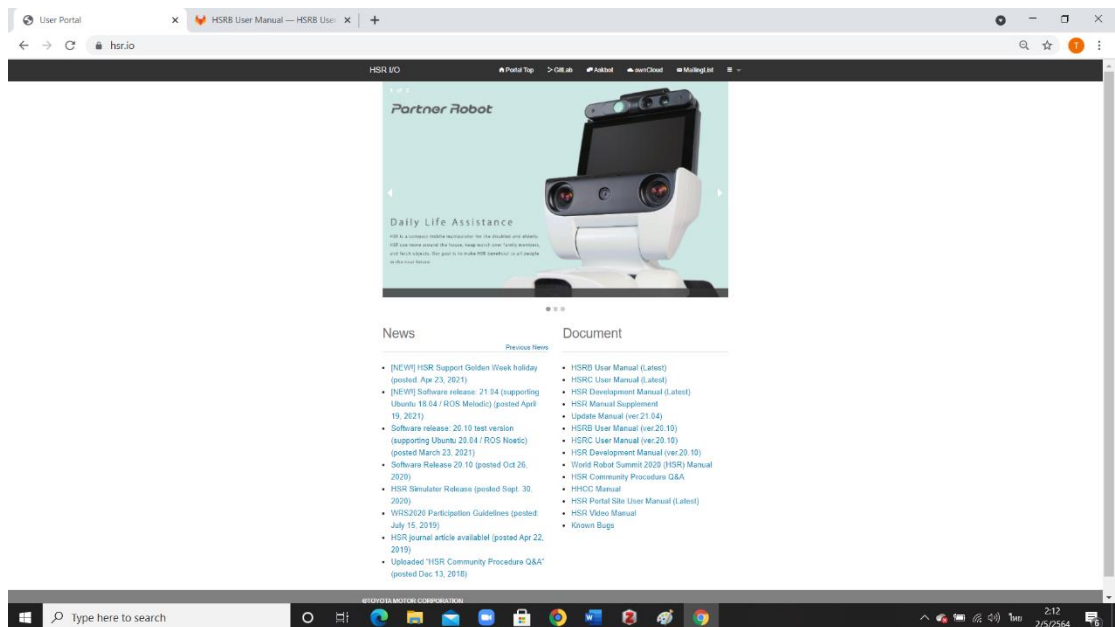
y: 0.278156
z: -1.521172
torque:
x: -0.053746
y: -0.305567
z: -0.057786
...
header:
seq: 961
stamp:
secs: 1509548141
nsecs: 178577313
frame_id: myframe
wrench:
force:
x: 6.964092
y: 0.322478
z: -1.5027
torque:
x: -0.054006
y: -0.305262
z: -0.000793
...

```

รูปที่ ค-0-2 ข้อมูลที่ได้จากเซนเซอร์ที่แสดงบนหน้า terminal

## การเชื่อมต่อหุ่นยนต์ HSR

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลคณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ได้รับหุ่นยนต์ Human Support Robot มาจากบริษัท TOYOTA Japan ซึ่งเป็นหุ่นยนต์บริการสำเร็จรูปและมีแพ็คเกจและคำสั่งเบื้องต้นสำหรับการใช้งานต่างๆ ที่รองรับการใช้งานร่วมกับ ROS เช่น แพ็คการควบคุมเฉพาะฐาน การควบคุมเฉพาะแขน การใช้งานเซนเซอร์ต่างๆ เป็นต้น โดยจะต้องล็อกอินเข้าเว็บไซต์ ที่มีชื่อว่า hsr.io [48] สำหรับศึกษาการใช้งานและข้อมูลต่างๆเกี่ยวกับหุ่นยนต์ได้ดังรูปที่ ค-0-3



รูปที่ ค-0-3 เว็บไซต์ของหุ่นยนต์ HSR [48]

เนื่องจากการเชื่อมต่อหุ่นยนต์นั้นมีหลายวิธี แต่ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัย เลือก การเชื่อมต่อกับเครือข่าย HSR (การเชื่อมต่อแบบใช้สาย) โดยจะใช้สาย LAN ในการเชื่อมต่อ ระหว่างหุ่นยนต์ เข้ากับ Hub อินเทอร์เน็ต และใช้สาย LAN อีกเส้นเชื่อมจากคอมพิวเตอร์เข้ากับ Hub อินเทอร์เน็ตดังรูปที่ ค-0-4 ด้วยเช่นกัน ขั้นตอนมีดังนี้

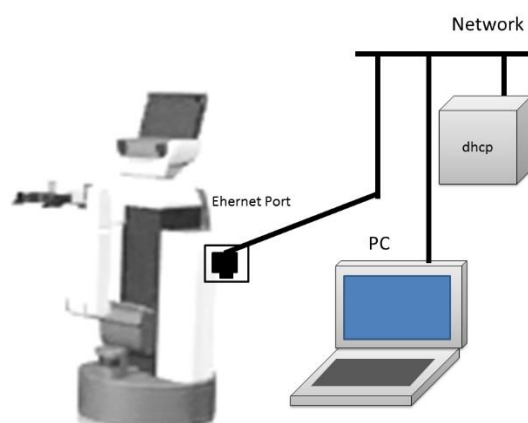
1. เข้าสู่ระบบ HSR (เชื่อมต่อแป้นพิมพ์และยืนยันด้วยจอแสดงผลส่วนหัว)
2. เปลี่ยนไปใช้บัญชีผู้ดูแลระบบ กรุณาสอบถามรหัสผ่านจากผู้ดูแลระบบ และพิมพ์คำสั่ง บนหน้า terminal ที่หุ่นยนต์

```
$ su - administrator
```

3. ในกรณีเชื่อมต่อหุ่นยนต์แบบใช้สาย ให้พิมพ์คำสั่งบนหน้า terminal ที่หุ่นยนต์

```
$ sudo disable_wireless
```

4. ทำการรีสตาร์ทหุ่นยนต์ และเปิดการใช้งานหุ่นยนต์อีกครั้ง



รูปที่ ค-0-4 การเชื่อมต่อหุ่นยนต์แบบใช้สาย [48]

และสามารถทำการตรวจการเชื่อมต่อหุ่นยนต์ว่าสามารถใช้งานได้หรือไม่ คำสั่ง

```
$ ping hsrb.local
```

ถ้าหากหุ่นยนต์เชื่อมต่อได้แล้วจะแสดงข้อมูลดังรูปที่ ค-0-5 ผ่านหน้าต่าง terminal

```
PING hsrb.local (xx.xx.xx.xx) 56(84) bytes of data:
64 bytes from hsrb.local: icmp_seq=1 ttl=64 time=0.589 ms
64 bytes from hsrb.local: icmp_seq=2 ttl=64 time=0.560 ms
64 bytes from hsrb.local: icmp_seq=3 ttl=64 time=0.566 ms
64 bytes from hsrb.local: icmp_seq=4 ttl=64 time=0.538 ms
```

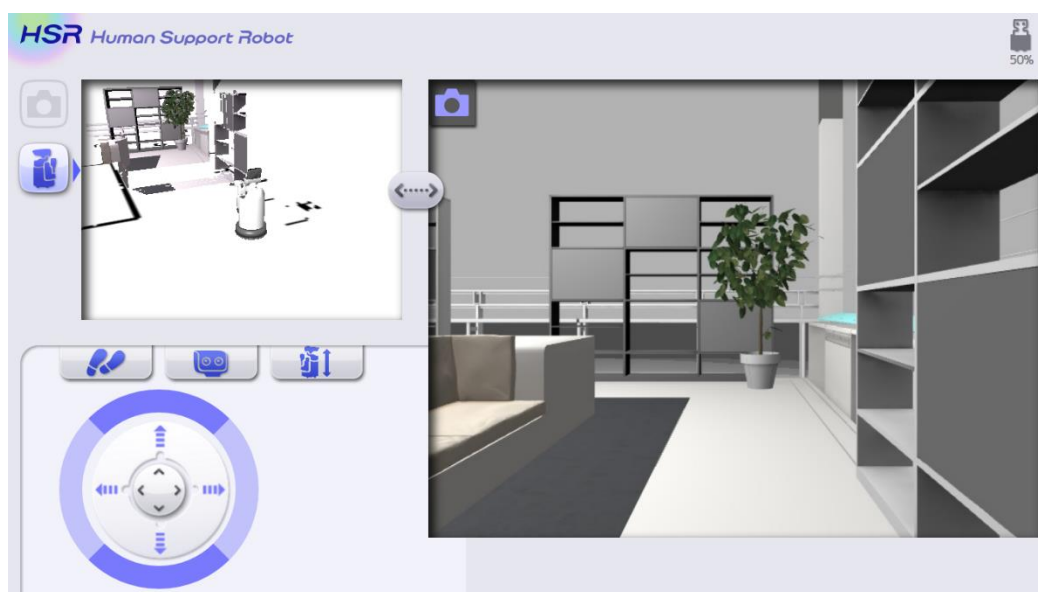
รูปที่ ค-0-5 คำ ping แสดงการเชื่อมต่อของหุ่นยนต์ [48]



### การควบคุมการใช้หุ่นยนต์ HSR

มีหลายวิธี แต่ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยใช้การควบคุมหุ่นยนต์สำหรับการทดลอง 2 วิธีด้วยกัน

1. ควบคุมผ่านหน้าเบราว์เซอร์ เนื่องจาก HSR-HMI (HSR-Human Machine Interface) เป็นระบบGUIสามารถใช้งานหุ่นยนต์จากเบราว์เซอร์ที่มีชื่อว่า <http://hsrb.local/user/> ดังรูปที่ ค-0-6



รูปที่ ค-0-6 การควบคุมหุ่นยนต์ผ่านหน้าเว็บเบราว์เซอร์ [48]

2. การควบคุมโดยใช้ InteractiveMarker ให้เปิดหน้า terminal และพิมพ์คำสั่ง  
\$ hsrb\_mode

ภาคผนวก ง  
บทความทางวิชาการ

## A Human-Inspired Control Strategy: A Framework for Seamless Human-Robot Handovers

Tanapong Sutiphotinun<sup>†</sup>, Paramin Neranon<sup>\*†</sup>, Passakorn Vessakosol<sup>†</sup>, Arisara Romyen<sup>‡</sup>, Chalita Hiransoog<sup>†</sup> and Jeerapa Sookgaew<sup>†</sup>

<sup>†</sup>Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering

<sup>‡</sup>Department of Agricultural Economics, Faculty of Economics Prince of Songkhla University, Hat Yai, Songkhla, 90112, Thailand

\*Corresponding Author Email: [paramin.n@psu.ac.th](mailto:paramin.n@psu.ac.th)

**ABSTRACT:** It can be claimed that understanding kinematically and dynamically how two humans physically collaborate while naturally performing object handover tasks is so crucial and can be used as guidelines in seamless human-robot interaction. This paper investigates the human behavioural responses in human-to-human object handover tasks under changing the object's mass, in which the interactive force between the humans and the object displacement are simultaneously measured in real-time. The results contribute the handover sequences distinctively categorized into three phases, i.e. sending, transfer and receiving postures, where the giver agent primarily decides to release the object. The interactive force analysis and the suitable transfer point between the giver and receiver have been carried out. Additionally, to be a better understanding of human dynamic characteristics, MJT and ARX model have been mathematically implemented. These paradigm findings will be useful for developing a robotic behaviour-based approach in seamless human-robot handovers in future.

**KEYWORDS:** Human-robot interaction; Human-human interaction; Minimum Jerk Trajectory (MJT); Auto-Regressive Exogenous (ARX); Human arm impedance model

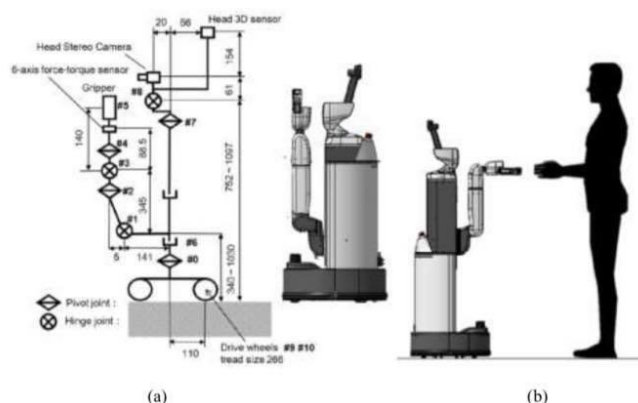
### INTRODUCTION

Robots have been widely developed over the last decades to meet the requirements of improving productivity, quality, accuracy, and reliability in the industry. Subsequently, interest in human-robot interaction (HRI) has tended to increase significantly. One of the most interesting applications for service robots is handing over objects as it occurs frequently for cooperative robots – i.e. handling a mechanic tool to a technician, passing out a bottle of water to a human or deliver medicines to a patient. A crucial challenge is to successfully establish a framework for seamless human-robot object handover (HRH), in which a human and robot are jointly working together to complete a safe and efficient handover task. In object handovers, the handler is defined as an agent who holds an object and passes it to another. The receiver who receives the object is an agent who starts pulling the object and takes responsibility for the object throughout the transferring process.

The researchers postulated that the understanding of the kinematics and dynamics of human-human interaction (HHI) is fundamental in designing an effective HRI system [1-2]. A recent study identified human preferences for arm-base movement in the handover and they found that almost people were preferable service robots offering object handover in front of them [3]. Minimum jerk-based profile was successfully used in the robot to emulate human trajectory behaviour [4]. Additionally, as reviewed, it can be claimed that the object should be held firmly, and during a transfer phase, the object should be in its initial orientation to allow the receiver to grasp it easily as viewed previously [5]. Mason and Mackenzie studied the grip force magnitude during human-to-human object handover (HHH). Their somatosensory systems have to be categorised into synchronizing transfer communication, and the controlled grip forces are significantly in response to changes in load of the transferred object. As reviewed, almost robotic studies have focussed on the handover kinematics; however, there are so few of them that have analysed the dynamics of interactive force analysis during HHH.

*Dong-Yang Robotic Team* from Prince of Songkhla University, Thailand, will be participated in the international service robot competitions of the World Robot Summit (WRS), which is scheduled to be held in 2020 in Japan. In the contest, the Human support robot (HSR) shown in Fig. 1(a) has been used at the Domestic Standard Platform

League (DSPL) of a home service robot. The HSR has been developed and considered as a high technology helper, particularly for peoples with disabilities or elderly in their activities of daily living, i.e. remote care support, housework support, independent living support or object fetch-and-delivery tasks. One of the challenging home service tasks is object handover, in which the robot has to pick up an object from a floor or a desk and handover it to a receiver in a safe and timely manner.



**Figure 1.** (a) Configuration and workspace of the HSR; (b) HSR object handover [10].

To successfully develop an appropriate set of behaviour strategies for HRI control framework in human-to-robot object handover (HRH), it can be adopted by first understanding the dynamics and kinematics of an equivalent HHH task. This research aim is to develop a conceptual guideline for a robotic human-like control strategy in human-robot object handover using the HSR depicted in Fig. 1(b). To successfully achieve the goal mentioned, the following objectives of this study are:

- 1) To examine the human behavioural sequences of the object handover and analyse how the participant pair realizes the transfer point between them while executing the object handover task,
- 2) To understand the behavioural strategies of the givers and receivers in the transfer phase by dynamically evaluating the interactive forces between the pair under the different masses, and
- 3) To mathematically estimate the characteristic model of the giver's arm and perceive how the giver regulates the bilateral force before releasing the object to be transferred to the receiver.

The following sections describe how to successfully adopt the goal as mentioned, consisting of Section 2 that explains the experimental design and force analysis of the HHI object handover tasks, Section 3 that presents the results and their evaluation of the tests, and finally Section 4 representing the conclusion of this study.

#### HUMAN-HUMAN OBJECT HANDOVER TASKS

##### Experimental design

A set of HHH tests has been carried out to investigate handover kinematics (how the giver and receiver behave during performing the cooperative task) and the HHI dynamics involved physical interactive force responses throughout the transfer process. The design of this HHI test relates to the real-world HHH situations, where the giver dexterously passes an object to the receiver in a timely and natural manner without any types of communication. To obtain the goal stated in the previous section, a set of ten right-handed participant pairs was selected to perform all assigned handover tasks to the best of their capacity. They have to grasp the object using one hand, and twisting the object is not allowed. The object was fabricated as a bottle-shaped object with 60mm diameter, 270mm length and a total mass 0.25kg shown in Fig. 2(a). Its moment of inertia can be modified by adding a set of masses, and the total load capacity can be increased from 0.25kg to 0.55kg with 0.1Kg resolution.

To measure the interactive forces between the couple, an ATI mini40 multi-axis force sensor was installed in the middle of the bottle, whose ranges of the measurement is  $\pm 80\text{N}$  with  $0.02\text{N}$  resolutions. The ATI-Net-F/T controller offers the precise quantification of the strain gauge signals and can communicate to a ROS computer using the TCP/IP communication package. The HSR-3D-depth sensor attached to the robot's head was utilized to visually track the object position and corresponding velocity profiles as illustrated in Fig. 2(b). The set of data is then sent to the external (ROS) PC via wireless or wired LAN. The software architecture was mainly constructed under the Robot Operating System (ROS), in which all sub-programs have to be running synchronously and strictly enforced with a fixed communication rate. The overall schematic diagram of the proposed HHH system is depicted in Fig. 3.

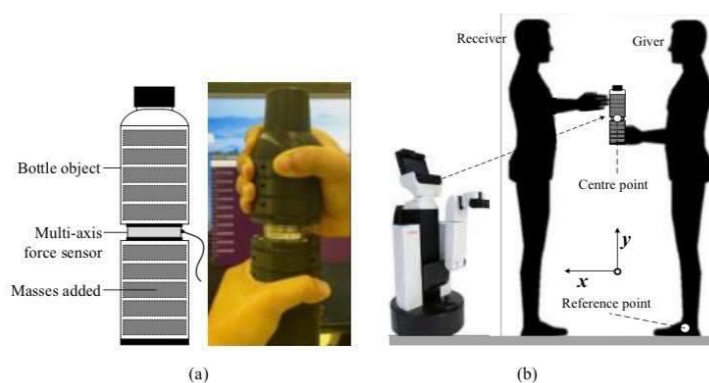


Figure 2. (a) Designed object; (b) Experimental setup of the HHH task.

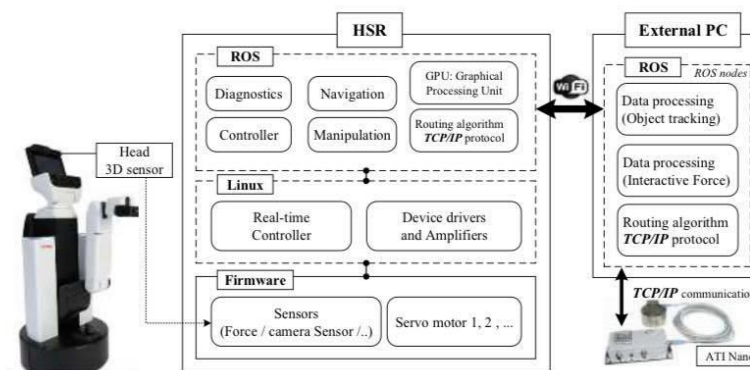
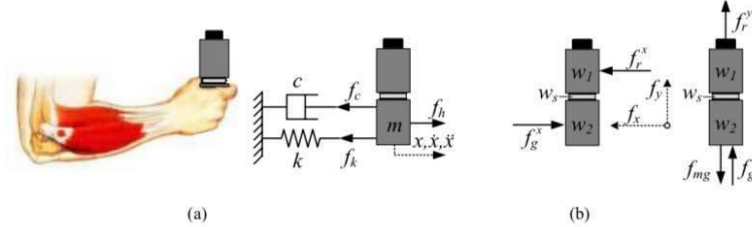


Figure 3. Schematic diagram of the system data acquisition.

According to the HHH procedure, ten participant pairs were undertaken five repetition sets of each handover test under all weight-variable conditions. First, the giver is commanded to grasp and hold the bottle in the upright position. He/she has to walk directly to a transfer area (in front of the receiver) and passes the object horizontally to the receiver without verbal communication. After the object being naturally passed, it is then manipulated to the endpoint by the receiver. In the meantime, the object displacement, velocity and interactive force profiles were simultaneously captured throughout the executed process. The evaluation of the HHH information was detailed in Session 3.

Force analysis



**Figure 4.** (a) Human arm impedance model while holding the object; (b) Free body diagram of the object.

Before analysing the bilateral force signal in the real object transfer phase (written in Subsection 3.3), it requires the basic concepts of the force analysis of the HHH test. The mathematical models of the handler and receiver forces can be conveyed in their simplest forms using the same mechanical modelling diagram shown in Fig. 4(a). It assumes that the haptic interactive behaviour is based on the movement of the object, in which the human applied force is represented by  $f_h$ . The human arm impedance is made up of mass  $m$ , stiffness  $k$  and damping factors  $c$ , and  $x, \dot{x}$  and  $\ddot{x}$  are object displacement, and its corresponding velocity and acceleration respectively. Therefore, a model of handler/receiver human arm dynamics can be derived as the following equations:

$$f_h(t) = m(t)\ddot{x}(t) + c(t)\dot{x}(t) + k(t)x(t) \quad (1)$$

Equation (1) can be transformed into discrete-time values measured at every sampling time  $T$  with the individual discrete number samples represented by  $n$  as given by:

$$f_h(n) = m(n)\ddot{x}(n) + c(n)\dot{x}(n) + k(n)x(n) \quad (2)$$

By assuming that:

$$\dot{x}(n) = \left[ \frac{x(n) - x(n-1)}{T} \right], \quad (3)$$

And that:

$$\ddot{x}(n) = \left[ \frac{\dot{x}(n) - \dot{x}(n-1)}{T} \right]. \quad (4)$$

Subsequently, substituting  $\dot{x}(n)$  and  $\ddot{x}(n)$  in Equation (2) gives

$$f_h(n) = m(n) \left\{ \left[ \frac{x(n) - x(n-1)}{T^2} \right] - \left[ \frac{x(n-1) - x(n-2)}{T^2} \right] \right\} + c(n) \left[ \frac{x(n) - x(n-1)}{T} \right] + k(n)x(n), \quad (5)$$

or

$$f_h(n) = a_1x(n) + a_2x(n-1) + a_3x(n-2), \quad (6)$$

where,  $a_1 = \left[ \frac{m(n) + c(n) + k(n)T^2}{T^2} \right]$ ,  $a_2 = \left[ \frac{-2m(n) - c(n)}{T^2} \right]$ , and  $a_3 = \left[ \frac{m(n)}{T^2} \right]$ .

The haptic interaction is considered as the negotiation of the position trajectory ( $x$ ) of interactive forces between the giver and receiver ( $f_g$  and  $f_r$ ) via the object. The interactive forces in x- and y-axes are  $f_{int}^x$  and  $f_{int}^y$ . The measured forces by the ATI force sensor in both axes in real-time are defined as  $f_{meas}^x$  and  $f_{meas}^y$ . It is noted that before starting the handover test the object was placed at the home position (standing upright), and the force sensor executed the bias function for a zero reference reading. Therefore, the dynamic force analysis can be explained using the free body diagram depicted in Fig. 4(b). Considering the physical interaction force in the x-axis direction gives:

$$f_{int}^x = f_{meas}^x(t) = f_g^x(t) - f_r^x(t) \quad (7)$$

By considering the force analysis in the y-axis direction ( $f_{int}^y$ ), a set of pilot tests were carried out to initially examine the dynamic physical force response along this direction, and it was found that the variation in the  $f_{int}^x$  was too small compared to the total weight ( $f_{mg}$ ) of the object. Hence, the set of experiments was initially categorized

in a quasi-static handover process in the y-direction, in which  $f_{mg}$  is equivalent to the sum of holding upright forces from the giver ( $f_g^y$ ) and the receiver ( $f_r^y$ ) as exposed in the following equations.

$$f_{mg}(t) = w_1(t) + w_2(t) + w_s(t), \quad (8)$$

and 
$$f_{mg}(t) = f_g^y(t) + f_r^y(t) \quad (9)$$

The physical interactive force ( $f_{int}^y$ ) in the dynamic handover process is calculated based on the receiver reference as the following equation, where the  $f_{bias}$  was initially set to  $w_1$  at the early stage ( $f_{bias} = w_1$ ).

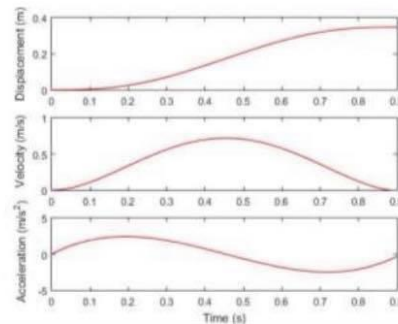
$$f_{int}^y(t) = f_{meas}^y(t) - w_s(t) - w_2(t) - f_{bias}(t), \quad (10)$$

#### TEST RESULTS AND EVALUATION OF HUMAN-HUMAN OBJECT HANDOVER

The tests results can be analysed and categorized into three groups as follows: Subsection 1 that explains the sequence of the object handover pattern and the hand movement trajectory of the giver in the handing phase, Subsection 2 that identifies the locations of the object between each couple in the transfer phase, which have confirmed to be affected by the individual's height and finally Subsection 3 details how to estimate mathematically the behavioural characteristics of the giver to regulate the bilateral force before releasing the object to be transferred to the receiver in transfer and receiving phases.

##### Analysis of the object handover pattern

To obtain a better robot interaction design in object handover, human behaviour has been carefully analysed, and this will allow the HSR to mimic how the giver and receiver act while handling the object. It can be noted that all object movement and interactive force profiles throughout the handover process were strictly required to be normalized based on the average time of each task before further analysis. The results reveal that handover pattern can be interpreted as three distinct phases consisting of sending, transfer and receiving sessions. In the sending phase, the giver starts his/her hand movement by grasping the object and then moves naturally to the transfer area facing to the receiver.



**Figure 5.** Minimum-jerk displacement, velocity and acceleration profiles

According to the human characteristic behaviour during giving the object, careful observation of the object displacement profiles show that they were in agreement with the minimum jerk trajectory (MJT) model developed by Flash and Hogan (1985) [6]. The MJT model expresses mathematically how the human arm movement formulates in terms of estimating the multi-joint arm movement quality while performing the point-to-point motion. After undertaking the MATLAB model identification based on the curve fitting method, it found that the fifth-order polynomial equation for the minimum jerk trajectory (MJT) function detailed below is the best performance of each trajectory.

$$J = \int_0^{t_f} \left[ \left( \frac{d^3x}{dt^3} \right)^2 \right] dt. \quad (11)$$

The results presented that there were significantly unaffected by changing the object weights, and the average velocity profiles in all conditions accelerated at the beginning of the movement and when the object's position approached close to the target demanded, the object then decelerated at the end of the trajectory. The average object displacement in the sending stage is approximately 0.35m (with Std. of 0.07m) over  $t = 0.91$  sec (with Std. of 0.11s). Thus, the criterion function determined from the point-to-point trajectory ( $x$ ) and its corresponding velocity ( $\dot{x}$ ) and acceleration ( $\ddot{x}$ ) by initially assuming that the velocities and accelerations of the start and final points are zero can be expressed as the following equations and Fig. 5.

$$x(t) = 3.36t^5 - 7.65t^4 + 4.64t^3 \quad (12)$$

$$\dot{x}(t) = 16.8t^4 - 30.6t^3 + 13.92t^2 \quad (13)$$

$$\ddot{x}(t) = 67.2t^3 - 91.8t^2 + 27.84t \quad (14)$$

#### Analysis of the location of the object transfer point

According to the transfer session, we first analysed how the subject pair determine the location of the object transfer point, in which the hypothesis of the study is that the handover location is affected by the individual's height. According to the previous test, the giver behaviour was unaffected by changing the object masses in the object sending phase. This experiment, therefore, involves using a constant object mass of 0.550Kg only. The twenty participants are made up of males and females with heights between 160-180cm, whose heights and the lengths of arms were initially recorded before starting the tests. The human subjects were equally grouped into five clusters, in which each group has twelve sample sizes of getting a participant pair out of the four members. After the object is completely moved to a transfer point, the receiver is permitted to grasp the object. Once the human-to-human physical interaction happens, at this point the handover position is defined in terms of the x-y coordinates based on the giver's reference point as depicted in Fig. 2(b). As the five repetition sets have been strategically suggested for each task, more accurate results were delivered as summarized in Tables 1(a)-(b).

**Table 1.** One-way ANOVA results for comparing the means of displacements of the handover location across the groups.

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Sig.
ind	4	0.01896	0.004739	1.829	<b>0.14</b>
Residuals	55	0.11659	0.002591		

(a) Horizontal displacement

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Sig.
ind	4	0.04399	0.010998	21.53	<b>5.6e-10</b>
Residuals	55	0.02299	0.000511		

(b) Vertical displacements

For the comparison of the means of four sample groups, an appropriate method used to investigate the averages of more than two samples is the analysis of variance, which is popularly called ANOVA [7]. To counter any effects of the object transfer location, the displacements in x-and y-directions were statistically determined. Here a one-way ANOVA technique was used to identify whether or not the individual's height affects the handover location. The hypothesis ( $H_0$ ) for the one-way ANOVA test is set as the means of all trial groups are equal. Contrastingly, the alternative hypothesis ( $H_1$ ) is defined that the means of all trial groups are not equal. R program software was employed along with the significance level of  $\alpha = 0.05$  to be adopted.



Due to the ANOVA results of Table 1(a), as the calculated significance value is 0.14 which is greater than 0.05, it is represented that the  $H_0$  was accepted. Then it can be confirmed that the mean (x-axis) displacements of the groups are equal at the 95% confidence interval. Contrastingly, Table 1(b) exhibits the significance value of  $5.6 \times 10^{-10}$ , which is too much less than 0.05 and it is represented that the  $H_0$  was rejected implying there were statistically significant differences among the mean displacements in the y-direction of the groups. Consequently, the next test analysis has been carried out, in which we further investigated the relationship between the giver's and receiver's heights ( $x_1$  and  $x_2$ ) affecting the handover location in the only y-direction ( $y$ ). Response Surface Methodology (RSM), which is a mathematical and statistical technique used to model and evaluate problematic issues in which the real physical relationships are not precisely known was adopted [9].

A second-order response surface was implemented since it is useful and flexible in terms of functional forms. All unknown coefficient parameters ( $\beta_i$ ) can be simply solved using the least square method. The second-order model comprises of the first-order model, all quadratic terms ( $\beta_{ii}x_i^2$ ) and all cross-terms  $\beta_{ij}x_ix_j$ . By assuming that  $x_1$  and  $x_2$  are giver's and receiver's heights and output  $y$  is the transfer vertical displacement respectively, the functional equation can be formulated as in Equation (15).

$$y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_{11}x_1^2 + \beta_{22}x_2^2 + \beta_{12}x_1x_2 \quad (15)$$

**Table 2.** Estimated regression coefficients and the one-way ANOVA results for the second-order polynomial equation.

Coefficients										
Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients Beta	t	Sig.	95.0% Confidence Interval for B		Correlations		
	B	Std. Error				Lower Bound	Upper Bound	Zero-order	Partial	Part
(Constant)	<b>8.243</b>	4.003		2.059	0.059	-0.344	16.829			
x1	<b>0.243</b>	0.155	0.355	1.566	0.140	-0.090	0.575	-0.006	0.386	0.172
x2	<b>-9.592</b>	4.741	-14.016	-2.023	0.063	-19.759	0.576	0.797	-0.476	-0.223
x1 <sup>2</sup>	<b>-1.626</b>	0.467	-9.640	-3.485	0.004	-2.627	-0.625	-0.031	-0.682	-0.384
x2 <sup>2</sup>	<b>1.441</b>	1.276	7.101	1.129	0.278	-1.296	4.178	0.799	0.289	0.124
x1x2	<b>3.189</b>	0.920	10.893	3.466	0.004	1.216	5.163	0.554	0.680	0.382

Model Summary									
Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate	Change Statistics				
					R Square Change	F Change	df1	df2	Sig. F Change
1	0.911*	0.830	0.770	0.0221439	0.830	13.704	3	56	0.000

a. Predictors: (Constant), x1x2, x2<sup>2</sup>, x1, x1<sup>2</sup>, x2

ANOVA <sup>a</sup>					
Model	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
1 Regression	0.034	3	.007	13.704	.000 <sup>b</sup>
1 Residual	0.007	56	.000		
Total	0.040	59			

a. Dependent Variable: y  
b. Predictors: (Constant), x1x2, x2<sup>2</sup>, x1, x1<sup>2</sup>, x2

The analysis of variance of the response variables and regression coefficients using SPSS was carried out. The 95% confidence interval ( $\alpha = 0.05$ ) was adopted, and the null hypothesis ( $H_0$ ) and the alternative hypothesis ( $H_1$ ) are as follows:

$H_0$ : There is no statistically significant relationship between the input variables and the dependent output variable

$H_1$ : At least one of the input variables significantly affects the dependent output variable.

The coefficients of the second-order-polynomial equation can be estimated along with the proposed initial conditions as follows. It is assumed that the variance of the individual distribution has to be constant for all values of the independent variable and that the relationship between the dependent variable and each independent variable has to be linear. Using the SPSS to determine the coefficients of the second-order-polynomial equation gives the descriptive statistics shown in Table 2.

$$y = 8.23 + 0.243x_1 - 9.592x_2 - 1.626x_1^2 + 1.441x_2^2 + 3.189x_1x_2 \quad (16)$$

By applying the ANOVA technique to statistically evaluate the relationship between the system variables ( $x_1$  and  $x_2$ ) and surface roughness ( $y$ ), the significance value was 0.00. It clearly indicates that the hypothesis  $H_0$  was rejected and  $H_1$  was accepted, i.e. at least one of the input variables significantly affected the dependent output at the 95% confidence interval. To decide whether an estimated regression model is acceptable or not, in this case, the computed the number of  $R^2$  is 0.830, which means that 83.0% of the output estimation is meaningfully related to the inputs. Subsequently, the proposed correlation between predicted and actual values is considered acceptable and confirmed the appropriateness of the equation.

Analysis of the bilateral force in the object handover

The transfer phase is where the object starts being transferred to the receiver. The direction of the net interactive force ( $f_{int}^x$ ) depends on the sum of  $f_g^x$  and  $f_r^x$  explained in Equation (7), and  $f_{int}^y$  can be computed using Equation (10). Consider the dynamic force analysis, attempting to describe the behavioural response of how the participant pair regulates their bilateral force before releasing the object to be transferred. The substantive results present that the giver agent was mainly in charge of the object handover timing and force regulation, or it can be implied that the amount of magnitude of threshold force ( $f_{ths}^x$ ) used to decide to release the object to be transferred was indicated by the handler. The observation of physical interactive force in both directions presents that the vertical interactive force ( $f_{int}^y$ ) variation was deemed to be a very small change which can be neglected. The average load transfer between the giver and receiver shows the linear relationship along the handover period and agrees with Equation (9).

**Table 3.** Results of the average interactive force and transfer time against the several masses.

Mass (Kg)	Maximum interactive force (N)		Minimum interactive force (N)		Transfer time (s) ( $t_{trf}$ )	
	Average	Std.	Average	Std.	Average	Std.
0.25	2.77	0.90	-1.28	0.51	0.39	0.07
0.35	2.92	1.18	-1.58	0.72	0.39	0.07
0.45	3.30	1.54	-1.87	0.67	0.43	0.09
0.55	3.42	1.13	-2.28	0.81	0.42	0.08

**Table 4.** One-way ANOVA results for comparing the means of transfer time across the variable mass conditions.

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Sig.
ind	3	0.0178	0.005937	1.007	0.394
Residuals	76	0.4479	0.005893		

Contrastingly, the  $f_{int}^x$  outcomes under the various conditions give significant information. It is noted that all  $f_{int}^x$  trajectories from each condition have been normalized and averaged based on the average time before being evaluated. The  $f_{int}^x$  trajectories indicate the characteristics of the human handler and receiver whilst performing the HHH task. Fig. 6 depicts an example of the average trajectory of the  $f_{int}^x$  under the 0.55Kg-mass scenario and it revealed the response behaviour of  $f_{int}^x$  and horizontal displacement during the handover process. The  $f_{int}^x$  layouts both positive and negative space indicating compression and tension forces respectively, in which the  $(f_{int}^x)_{max}$  and  $(f_{int}^x)_{min}$  are defined as the maximum and minimum  $f_{int}^x$  over the total time period ( $t_{trf}$ ) =  $t_{pos}$  +  $t_{neg}$ . All results can be detailed in Table 3. The interactive force was significantly proportional to the object weight, in which the higher the total object mass, the greater the interactive force in the handover. Nevertheless, the transfer time  $t_{trf}$  was seemed to be significantly unaffected by the variable masses, whose ANOVA results (in Table 4) disclosed the significant level of 0.394. This indicated that there were no statistically significant differences among the means of the sample groups.

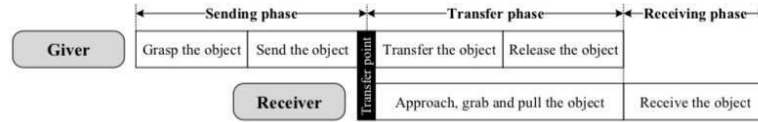


Figure 6. human-to-human object handover pattern.

Therefore, to dynamically understand how the bilateral force behaves in the handover, the human hand behaviour, system identification was mathematically applied to figure out a human dynamic characteristic model of a giver. The autoregressive exogenous model (ARX), which is one of the most robust techniques in the parametric modelling of time series applied for studying complex dynamical systems, was selected. It is a powerful tool for polynomial estimations especially for high orders since this relies on intramural systems such as the transfer function of the deterministic and stochastic parts. The current observation output:  $\bar{y}(k)$  is the sum of its past, and the system input is defined as  $\mu_0(k)$ . The noise signal moderated into the plant is  $e(k)$ , and  $A(q^{-1})$  and  $B(q^{-1})$  denote polynomials with the backward shift operator  $q^{-1}$ . The structural ARX model equation can be expressed as [8]:

$$A(q^{-1}) \bar{y}(k) = B(q^{-1}) \mu_0(k) + e(k), \quad (17)$$

$$A(q^{-1}) = 1 + a_1 q^{-1} + \dots + a_n q^{-n}, \quad (18)$$

$$B(q^{-1}) = b_0 + b_1 q^{-1} + \dots + b_n q^{-n}. \quad (19)$$

For augmentative noises, the  $\mu_0(k)$  and  $\bar{y}(k)$  are assumed to participate with  $\tilde{u}(k)$  and  $\tilde{y}(k)$ , hence the scales  $u(k)$  and  $y(k)$  are written as follows:

$$u(k) = \mu_0(k) + \tilde{u}(k) \quad (20)$$

$$y(k) = \bar{y}(k) + \tilde{y}(k). \quad (21)$$

MATLAB System Identification was executed to appropriately estimate the model unknown parameters by selecting a set of a polynomial of  $n_a$  and  $n_b$  in order to minimize the forecasting errors and to obtain the effective human model. The ARX model validation was successfully executed to verify the simulated model consisting of the percentage of best fit ( $R^2$ ), the mean sum of square error (MSE) and the final prediction error (FPE) as expressed in the following equations, where  $y$  and  $\hat{y}$  are actual and calculated outputs,  $N$  is a number of experimental data, and  $P$  is several parameters ( $n_a + n_b + n_c$ ) respectively.

$$R^2 = 100 \times \left( 1 - \frac{\sum_{i=1}^N e^2}{\sum_{i=1}^N (y - \hat{y})^2} \right) \%, \quad (22)$$

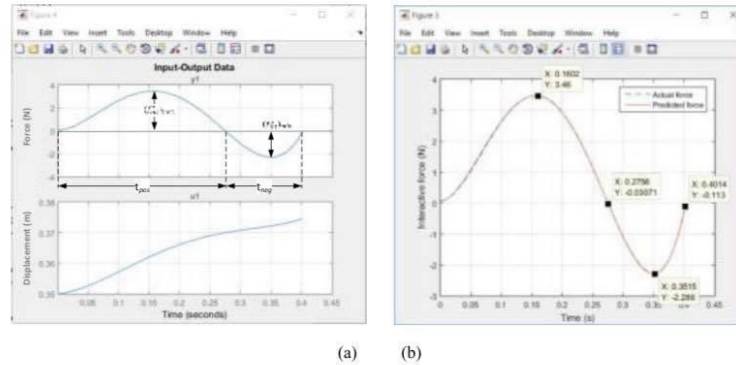
$$R^2 = 100 \times \left( 1 - \frac{\sum_{i=1}^N e^2}{\sum_{i=1}^N (y - \hat{y})^2} \right) \%, \quad (23)$$

$$FPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y - \hat{y})^2 \left[ \frac{(1 + \frac{P}{N})}{(1 - \frac{P}{N})} \right]. \quad (24)$$

The discrete-time ARMAX model was identified, and its results are given as:

$$A(q^{-1}) = 1 - 2.021q^{-1} + 1.021q^{-2}, \text{ and} \quad (25)$$

$$B(q^{-1}) = -27.64q^{-1} + 27.65q^{-2}. \quad (26)$$



**Figure 7.** (a) Displacement ( $u$ ) and interactive force ( $y$ ) trajectories and (b) the comparison between the actual and estimated outcomes.

Fit percentage to the estimated data ( $R^2$ ) is 99.95%, MSE of  $1.6652 \times 10^{-8}$  was achieved and FPE value is  $1.69 \times 10^{-8}$  respectively. The comparison between the actual and predicted values is illustrated in Fig. 7. Regarding the computing results of the ARX model, the giver's hand transfer function ( $TF_g$ ) during jointly working to gather with the receiver is as follows:

$$TF_g = \frac{-2.63 \times 10^{-4}S + 5211}{S^2 - 20.25S + 51.76} \quad (27)$$

To sum up, according to the all test results and their evaluation, it can be therefore summarised that the handover process can be distinctively categorized into three phases, consisting of sending, transfer and receiving postures. The giver agent primarily decides to release the object to be transferred to the receiver who takes the responsibility of the object in the receiving session. The force analysis in the human-human interactive handover and the result discussions have been proposed. Additionally, the object transfer location has been identified. The handover displacement in the y-axis direction is statistically related to the heights of the human pair and unaffected by changing the object masses. The amount of the physical interactive force was significantly proportional to the object mass. Unlike, the transfer time doesn't rely on the changing of the object's moment of inertia. Furthermore, to be more mathematically understanding in the human dynamic responses, the minimum jerk trajectory and autoregressive exogenous models have been strategically implemented.

#### CONCLUSIONS

This study has investigated the human characteristics of the haptic interaction in the substantive object handover tests under the variable weight conditions for the purpose of obtaining a conceptual guideline for a robotic human-like control strategy in human-robot object handover. The paradigm findings present that human behavioural control strategy during the object handover process, which will contribute to successful design for a robotic behaviour-based approach in seamless human-robot handovers, and this will further allow the cooperative HSR to be able to pass the object to a human receiver as human-like dexterity with a smooth, reliable and timely natural manner.

#### REFERENCES

- [1] K. B. Reed, J. Patton, and M. Peshkin, "Replicating human-human physical interaction", *Proceedings of the 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Vol. 1-10, Pp. 3615-3620. 2007.
- [2] A. Kupcsik, D. Hsu, W.S. Lee. "Learning Dynamic Robot-to-Human Object Handover from Human Feedback". In: Bicchi A., Burgard W. (eds) *Robotics Research. Springer Proceedings in Advanced Robotics*, Springer, Cham, Vol 2, 2018.

- [3] K. Koay, E. Sisbot, D. Syrdal, M. Walters, K. Dautenhahn, and R. Alami. "Exploratory study of a robot approaching a person in the context of handing over an object". *Proceedings of the AAAI Spring Symposium on Multi-disciplinary Collaboration or Socially Assistive Robotics, Palo Alto, California, USA*, Pp. 18–24. 2007.
- [4] M. Huber, M. Rickert, A. Knoll, T. Brandt, and S. Glasauer. "Human-robot interaction in handing-over tasks", *Robot and Human Interactive Communication. RO-MAN 2008*. Pp. 107-112. 2008.
- [5] M. Cakmak, S. S. Srinivasa, L. Min Kyung, J Forlizzi. and, S Kiesler. "Human preferences for robot-human hand-over configurations", *Intelligent Robots and Systems (IROS)*. Pp. 1986-1993. 2011
- [6] T Flash. and, N Hogan. "The coordination of arm movements: an experimentally confirmed mathematical model", *The journal of Neuroscience*, Vol. 5, No. 7, Pp. 1688-703. 1985
- [7] G Keppel. "Design and analysis: A researcher's handbook". *Prentice-Hall, Inc.* 1991
- [8] R Diversi., R Guidorzi., and, U Soverini. "Identification of ARX and ARARX Models in the Presence of Input and Output Noises". *European Journal of Control*, Vol. 16, No. 3, 2010. Pp. 242-255. 2010
- [9] D.C. Montgomery. "Design and Analysis of Experiments". *John Wiley and Sons*, New York. 2001
- [10] T. Yamamoto, K. Terada, A. Ochiai, and, K Murase. "Development of Human Support Robot as the research platform of a domestic mobile manipulator". *Robomech Jurnal*, Vol. 6, No. 4, Pp.1-15. 2019

## Force-Impedance Control for Safe Human-Robot Handovers

TANAPONG SUTIPHOTINUN<sup>†1</sup> PARAMIN NERANON<sup>†1\*</sup>  
PASSAKORN VESSAKOSOL<sup>†1</sup>

**Abstract:** One of the crucial challenges to successfully establish a control approach for seamless human-robot object handover is to allow a robot to jointly work together with a human with a safe manner or without the risk of harm or injury by the robot. In this research, Human Support Robot (HSR) has been used in the handover tasks, whose hands were individually attached by a multi-axis force sensor to measure the interactive force acting to the robot end-effector. To adopt the adaptability and robustness in human-robot interaction tasks, robotic force impedance control, which is able to dynamically control the robot motion trajectory and contact force with its environment, has been proposed. The appropriate impedance considered as a mass-spring-damper system has been studied and validated by the object handover tests. The modification of the set of parameters (inertia, damping and stiffness factors) is highly relevant for the cooperative robot behaviour and explained in this paper. Additionally, these results of this study are useful for developing a robotic behaviour-based approach in seamless human-robot handovers in future.

**Keywords:** Impedance control, Human-robot handovers, Human Support Robot (HSR)

### 1. Introduction

At present, service robots have become well-known and more seen in homes, shops, companies, hotels, or hospitals, etc. Service robots have been widely developed. One of its most interesting applications is human-robot object handover, which occurs frequently for cooperative robots – i.e. handling an object to a human, delivering a bottle of water to a patient or passing out a mechanic tool to a technician. This is because the robots have good accuracy, and can move at the whole body and end-effector back to their pre-taught positions and directions. However, the robots still need to be improved in terms of a behavioural control system to facilitate the dexterous transfer of objects safely and speedily.

As mentioned in the previous study of Sutiphotinun and his colleagues [1], the paper proposed guidelines in seamless human-robot object handover interaction by understanding kinematically and dynamically how two humans collaborate while performing object handover tasks naturally. Therefore, this paper focuses on the development of a robotic force control system, which will convey the enhancement of the robot's capabilities in terms of their dependability and stability in the object handover tasks.

### 2. Force Control in Robotic Systems

Robot force control is a fundamental requirement in the achievement of the control of the robot's real-time path in any physical human-robot interaction task. It has been developed in the past three decades, using for example force, torque and visual feedback to operate robots to suitably participate in unstructured environments. Typically, this contact force and torque feedback signals are measured by a multi-axis force/torque sensor before being transferred to the robot controller to generate an updated trajectory of the robot end-effector. This paper emphasizes on the impedance control approach.

The mechanical impedance of a robot end-effector can be adjusted using various relationships between the interactive force and robot position. This method is based upon the control of the difference between the desired and actual position. The force feedback is required to facilitate impedance behaviour [2]. The impedance control approach is that the manipulator control system should be designed not to track a motion trajectory alone but rather to regulate the mechanical impedance ( $Z_m$ ) of the manipulator. This can be defined by the relationship between the velocity ( $\dot{x}$ ) and the applied external force ( $F$ ). In general, the robot characteristic is mechanically equivalent to a second-order mass-spring-damper system, with a transfer function. The impedance control can be exposed as:

$$M_d(\ddot{X} - \ddot{X}_d) + B_d(\dot{X} - \dot{X}_d) + K_d(X - X_d) = -F \quad (1)$$

The real-time trajectory of the robot end-effector can be controlled by acceleration as follows:

$$\ddot{X}_r = \ddot{X}_d + M_d^{-1}[-F + B_d(\dot{X} - \dot{X}_d) + K_d(X - X_d)] \quad (2)$$

where,  $M_d$  is a designed inertia matrix;  $B_d$  is a designed damping matrix;  $K_d$  is a designed stiffness matrix;  $X, \dot{X}, \ddot{X}, X_d, \dot{X}_d, \ddot{X}_d$  are vectors of the actual and desired positions of the robot end-effector and their corresponding velocities and accelerations respectively,  $\ddot{X}_r$  is defined as a reference acceleration; and finally,  $F$  is the force exerted on the robot end-effector. Equation (2) can be depicted as the following figure.

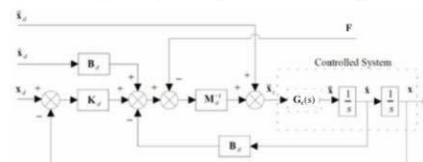


Fig. 1 Block diagram of impedance control scheme [3]

<sup>†1</sup> Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering  
Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla, 90112, Thailand

\*Corresponding author, Email address: paramin.n@psu.ac.th

### 3. Experiments and Results

#### 3.1 Experiments

This section describes the test based on the robotic impedance control which has been implemented to a Human Support Robot (HSR). The key objective of the study is to evaluate the robotic dynamic response based on the force impedance control while the robot handler interacts with the human receiver in the robot-to-human object handover tasks. The HSR [4] has been developed and considered as a high technology helper, particularly for peoples with disabilities or elderly in their activities of daily living. It has seven degrees of freedom arms with a two-fingered gripper driven by a single motor. Two-type force sensors were fabricated at the robot (end-effector) arm, i.e. a gripping force sensor and a multi-axis force/torque sensor attached at an individual hand wrist. For HSR's head, an 3D-depth sensor was attached to visually track an object position and corresponding velocity. The software architecture was mainly constructed under the Robot Operating System (ROS), in which all sub-programs have to be running synchronously and strictly enforced with a fixed communication rate, as schematically illustrated in Fig.2.

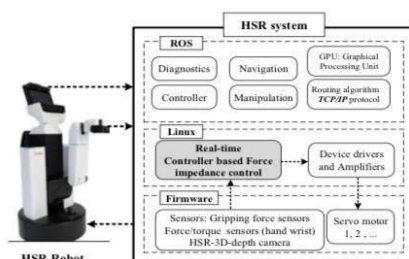


Fig. 2 Schematic diagram of the HSR system

According to the test procedure, a set of participants has undertaken three repetition sets of each handover test under the required variable conditions consisting of spring stiffness ( $B$ ) and damping factor ( $K$ ). In the meantime, the maximum interactive force measured by the HSR force/torque sensor is captured. Once the object manipulated by the HSR robot has arrived at a transfer point, the human receiver has to rigidly grasp the object without moving the hand. This is because we want to first evaluate how the robot force control responses if a participant hand cannot move naturally. It is to be noted that the crucial aspect of the human-robot interaction is to protect the human operator (patient) from the risk of harm or injury by the robot's acting force.

#### 3.2 Experimental results

The human-robot object handover tests were successfully carried out by the selected subject group. The results, including maximum forces from the three subsections, namely, (1) damping factor varying system, (2) stiffness varying system and (3) both damping factor and stiffness varying system, are summarised in Table 1.

Table 1 Experimental results

Damping factor (B) varying			Stiffness (K) varying			B and K varying		
B (Nm/s/rad)	K (Nm/rad)	F (N)	B (Nm/s/rad)	K (Nm/rad)	F (N)	B (Nm/s/rad)	K (Nm/rad)	F (N)
20	6	26.0	2	10	26.5	2	6	14.2
		26.1			26.6			14.1
		26.1			26.7			14.0
10	6	19.7	2	8	26.3	1.5	5	13.4
		20.1			26.3			13.6
		19.9			26.2			13.5
2	6	13.8	2	6	13.8	1	4	12.0
		13.5			13.7			12.1
		13.9			14.1			12.4
1	6	9.1	2	4	13.1	1	3	12.0
		9.2			12.8			11.4
		9.3			12.7			11.7
0	6	9.2	2	2	10.7	1	2	10.9
		8.7			11.2			10.5
		8.8			11.0			10.9

The results present the difference force responses from the force impedance control. This can be assumed that the interactive force can be roughly classified as three main groups: soft, middle and hard categories. According to the (1) and (3) tests, it can be seen that reducing control damping factor gives highly damped behaviour, which is much softer in the robot interactive dynamic response. The outcomes of the (2) and (3) tests show a similar trend as the lower the stiffness values the softer the interactive force response.

### 4. Conclusion

This paper explains the dynamic behavioural characteristics of the HSR robot based on varying the impedance parameters (damping factor and stiffness parameters) of the proposed force impedance control. In future work, we have to optimize the robotic force impedance control (which is affected by a set of appropriate impedance mass-spring-damper factors) to adopt the adaptability and robustness in human-robot interaction. This will be able to dynamically control the robot motion by the contact force in the dexterous object handover task.

### Reference

- [1] Sutiphotinun, T., Neranon\*, P., Vessakosol, P., Romyen, A., Hiransoog, C., Sookgaew, J., 2020. "A Human-Inspired Control Strategy: A Framework for Seamless Human-Robot Handovers". *Journal of Mechanical Engineering Research and Developments*, Vol. 43, No. 3, pp. 235-245.
- [2] T. Tsumugiwa, R. Yokogawa, K. Yoshida, "Stability Analysis for Impedance Control of Robot for Human-Robot Cooperative Task System". *IEEE International Conference on Intelligent Robots and System*, September 28 – October 2, 2004, Sendai, Japan.
- [3] Almeida, F., Lopes, A. n. and Abreu, P., 1999 "Force-impedance control: a new control strategy of robotic manipulators", *Recent advances in Mechatronics*, pp. 126-37.
- [4] Yamamoto, T., Terada, K., Ochiai, A., and Murase, K. 2019. "Development of Human Support Robot as the research platform of a domestic mobile manipulator". *Robomech Journal*, 6 (4), 2019, pp.1-15.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล	นายธนพงษ์ สุทธิโพธิ์นันท์		
รหัสประจำตัวนักศึกษา	6110120056		
วุฒิการศึกษา			
	วุฒิ	ชื่อสถาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกล)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2561

### ทุนการศึกษา (ที่ได้รับในระหว่างการศึกษา)

ทุนบัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ปีงบประมาณ 2561

ทุนอุดหนุนการวิจัยเพื่อวิทยานิพนธ์ ระดับปริญญาโท ปีงบประมาณ 2562

### การตีพิมพ์เผยแพร่ผลงาน

1. Sutiphotinun, T., Neranon\*, P., Vessakosol, P., Romyen, A., Hiransoog, C., Sookgaew, J., 2020. “A Human-Inspired Control Strategy: A Framework for Seamless Human-Robot Handovers” . Journal of Mechanical Engineering Research and Developments, Vol. 43, No. 3, pp. 235-245. (Scopus Index)
2. Sutiphotinun, T., Neranon\*, P., Vessakosol, P., 2020 “Force-Impedance Control for Safe Human-Robot Handovers”. Asia Pacific Conference on Robot IoT Development and Platform 2020 (APRIS2020) (IEEE database, Scopus database)