



Goggle : People Video Analytics and Deep Learning Platform

- ชื่อภาษาไทย -

นายปฐมพงศ์ สินธุจาม

นายศุภกร เบญจวิกรัย

นายอุกฤษฎ์ เลิศวรรณาการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมหุ่นยนต์และระบบอัตโนมัติ

สถาบันวิทยาการหุ่นยนต์ภาครสนา

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ปีการศึกษา 2562



Goggle : People Video Analytics and Deep Learning Platform

- ชื่อภาษาไทย -

นายปฐมพงศ์ สินธุจาม

นายศุภกร เบญจวิกรัย

นายอุกฤษฎ์ เลิศวรรณาการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมหุ่นยนต์และระบบอัตโนมัติ

สถาบันวิทยาการหุ่นยนต์ภาคสนาม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ปีการศึกษา 2562

- ชื่อภาษาไทย -

นายปฐมพงศ์ สินธุ์งาม

นายศุภกร เบญจวิกรัย

นายอุกฤษฎ์ เลิศวรรณาการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมหุ่นยนต์และระบบอัตโนมัติ

สถาบันวิทยาการหุ่นยนต์ภาคสนาม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ปีการศึกษา 2562

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ดร.อาบทิพย์ ชีรวงศ์กิจ)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

(นายธนัชชา ชูพจน์เจริญ)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

(รศ.ดร.ชิต เหล่าวัฒนา)

กรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ดร.ปิติวุฒิ ชีรกิตติกุล)

กรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ดร.สุรชัย วงศ์บุณย์ยง)

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ชื่อวิทยานิพนธ์	- ชื่อภาษาไทย -
หน่วยกิต	6
ผู้เขียน	นายปัจมพงศ์ สินธุจิต นายศุภกร เบญจวิกรัย นายอุตุษฐ์ เลิศวรรณการ
อาจารย์ที่ปรึกษา	ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก นายธนัชชา ชูพจน์เจริญ ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม รศ.ดร.ชิต เหล่าวัฒนา
หลักสูตร	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมหุ่นยนต์และระบบอัตโนมัติ
คณะ	สถาบันวิทยาการหุ่นยนต์ภาคสนาม
ปีการศึกษา	2562

บทคัดย่อ

งานวิทยานิพนธ์นี้เป็นงานที่เกี่ยวกับการออกแบบและจัดทำแพลตฟอร์มหุ่นยนต์อิเล็กทรอนิกส์ด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ โดยใช้ชื่อว่า หุ่นยนต์อิเล็กทรอนิกส์ UTHAI และจุดประสงค์เพื่อให้นักวิจัยท่านอื่นสามารถนำไปพัฒนาต่อได้ง่าย ภาพรวมของวิทยานิพนธ์นี้จะแบ่งออกเป็นทั้งหมดสามส่วน คือ ส่วนแรกเป็นส่วนของการออกแบบและจัดสร้าง ส่วนสองของหุ่นยนต์อิเล็กทรอนิกส์ ส่วนที่สองเป็นส่วนของการพัฒนาโปรแกรมที่ใช้ในระบบด้วย ROS และ ส่วนสุดท้ายเป็นส่วนที่ออกแบบระบบพื้นฐานสำหรับการพัฒนาหุ่นยนต์อิเล็กทรอนิกส์ รวมไปถึงมีเอกสาร คู่มือที่อยู่ในรูปแบบออนไลน์

คำสำคัญ : แพลตฟอร์มหุ่นยนต์อิเล็กทรอนิกส์ / ระบบพื้นฐานหุ่นยนต์ / ROS / เครื่องพิมพ์สามมิติ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร.นัชชา ชูพจน์เจริญ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ที่ได้สละเวลามาให้คำปรึกษา ชี้แนะแนวทาง ให้ความรู้ในด้านต่างๆ ที่จำเป็นต่องานวิจัย รวมถึงการให้การสนับสนุนในเรื่องอุปกรณ์ในการทำวิจัย ตลอดจนช่วยตรวจสอบและแก้ไขวิทยานิพนธ์ให้เป็นไปอย่างสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.ชิต เหล่าวัฒนา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้ชี้แนะแนวทางให้คำแนะนำ และให้เกียรติเข้าร่วมการสอบวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร.ภิวดา มณีวรรณ และนายวิษณุ จุราวี ที่ได้ให้คำแนะนำในการแก้ไขปัญหาด้านต่างๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการทำวิจัย และได้ให้การสนับสนุนอุปกรณ์สำคัญที่ใช้ในการทำวิจัย

ขอขอบพระคุณอาจารย์ อับพิพัฒ์ ธิรวงศ์กิจ ที่กรุณาให้เกียรติเป็นประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อการจัดทำวิทยานิพนธ์ให้ดำเนินไปอย่างสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร.ปิติวุฒย์ ธีรกิตติคุล ที่กรุณาให้เกียรติเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อการวิจัย และการแก้ไขปรับปรุงงานวิจัย ตลอดจนตรวจแก้วิทยานิพนธ์ให้ดำเนินไปอย่างสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณอาจารย์ ดร.สุภาชัย วงศ์บุณย์ยง ที่กรุณาให้เกียรติเป็นกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่อการวิจัย และการแก้ไขปรับปรุงงานวิจัย ตลอดจนตรวจแก้วิทยานิพนธ์ให้ดำเนินไปอย่างสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ และบุคลากรในสถาบันวิทยาการหุ่นยนต์ภาคนามทุกท่าน ที่ได้ให้คำปรึกษาและช่วยเหลือด้านสถานที่พร้อมทั้งสิ่งอำนวยความสะดวกต่างๆ ในระหว่างการทำวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณนักศึกษาปริญญาตรี สถาบันวิทยาการหุ่นยนต์ภาคนามทุกท่าน ที่ได้ให้คำแนะนำ ถ้ามี แล้วเป็นกำลังใจมาโดยตลอด

และสุดท้ายนี้ ขอน้อมรำลึกถึงพระคุณบิดา มารดา และครอบครัว ที่ส่งเสริมให้กำลังใจ และให้การสนับสนุนในเรื่องต่างๆ จนกระทั่งข้าพเจ้าประสบความสำเร็จในการศึกษา

นายปฐมพงศ์ สินธุรงาม
นายศุภกร เบญจวิกรัย
นายอุกฤษฎ์ เลิศวรณากุล

สารบัญ

เรื่อง	หน้า
บทคัดย่อ	ค
กิตติกรรมประกาศ	๔
สารบัญ	จ
รายการรูปภาพ	ช
รายการตรางา.....	ณ
รายการสัญลักษณ์.....	ภ
ประมวลศัพท์และตัวย่อ.....	ภ
บทที่ 1 บทนำ.....	๑
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	1
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	1
1.4 ขอบเขตการดำเนินงาน.....	2
1.5 ภาพรวมของระบบและขั้นตอนการดำเนินงาน	2
บทที่ 2 ระเบียบวิธีวิจัย	๓
2.1 หน้าที่ความรับผิดชอบ.....	3
2.2 แผนการดำเนินงาน	3
2.3 การออกแบบโครงสร้างของหุ่นยนต์	4
2.3.1 โครงสร้างของหุ่นยนต์ชีวนิรดิษ UTHAI	4
2.3.2 การจัดทำชิ้นส่วนโครงสร้างของหุ่นยนต์ชีวนิรดิษ UTHAI	6
2.3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในหุ่นยนต์ชีวนิรดิษ UTHAI.....	7
2.3.4 การเชื่อมต่อดิจิตอลเซอร์โวและเซนเซอร์.....	11
2.3.5 การตั้งค่าดิจิตอลเซอร์โว.....	12
2.3.6 การเชื่อมต่อหน่วยประมวลผลระดับสูงและระดับต่ำ	15
2.4 การออกแบบโปรแกรมด้วย ROS	16
2.4.1 กำหนดพิกัดเฟรมให้กับหุ่นยนต์ชีวนิรดิษ.....	16
2.4.2 การแปลงข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบ URDF	17
2.4.3 โครงสร้างการติดต่อสื่อสารระหว่าง Node ใน ROS	20

สารบัญ (ต่อ)

เรื่อง	หน้า
2.5 การออกแบบระบบพื้นฐาน	25
2.5.1 วางแผนสร้างของระบบพื้นฐาน	25
2.5.2 ออกแบบสถาปัตยกรรมของที่นั่นยนต์	27
2.5.3 จัดทำคู่มือและเอกสารการใช้งาน	29
เอกสารอ้างอิง.....	29
ภาคผนวก ก ข้อมูลเบื้องต้นของที่นั่นยนต์ชีวามโนยด์ UTHAI	30
ก.1 ค่าคุณสมบัติทางพลศาสตร์	30
ประวัติผู้เขียน	43

รายการรูปภาพ

รูป	หน้า
รูปที่ 2.1 การออกแบบโครงสร้างของหุ่นยนต์ UTHAI.....	4
รูปที่ 2.2 ภาพแสดงแสดงโครงสร้างของหุ่นยนต์ UTHAI	5
รูปที่ 2.3 ภาพแสดงการติดตั้งเซนเซอร์ในจุดต่างๆ	5
รูปที่ 2.4 แสดงประสิทธิภาพของมอเตอร์ EX-106+.....	7
รูปที่ 2.5 ภาพแสดงการติดต่อสื่อสารระหว่างคอมพิวเตอร์กับดิจิตอลเซอร์วิส	8
รูปที่ 2.6 ภาพแสดงการเลือกโหมดใช้งานของ USB2Dynamixel	8
รูปที่ 2.7 USB2RS485 Module	8
รูปที่ 2.8 แสดงเซนเซอร์ IMU MPU9250	9
รูปที่ 2.9 ตัวรับสัญญาณ Wifi ของ RaspberryPi	9
รูปที่ 2.10 ตัวกระจายและรับส่งสัญญาณ wifi.....	9
รูปที่ 2.11 Schematic ของจრ Ground Contact Sensor	10
รูปที่ 2.12 แผงวงจร Ground Contact Sensor ที่ประกอบเสร็จแล้ว	10
รูปที่ 2.13 การเชื่อมต่อกันระหว่างดิจิตอลเซอร์วิส	11
รูปที่ 2.14 การเชื่อมต่อระหว่างตัวรับรู้ ตัวประมวลผล และตัวขับเคลื่อน	11
รูปที่ 2.15 การเชื่อมต่อกันระหว่างตัวประมวลผล	15
รูปที่ 2.16 ตัวอย่างการใช้งานบอร์ดสั่งการดิจิตอลเซอร์วิส	15
รูปที่ 2.17 ตัวอย่าง link ใน urdf.....	18
รูปที่ 2.18 การอธิบาย link ใน URDF ไฟล์.....	18
รูปที่ 2.19 ตัวอย่าง joint ใน urdf	19
รูปที่ 2.20 การอธิบาย Joint ใน URDF ไฟล์.....	19
รูปที่ 2.21 การติดต่อสื่อสารระหว่าง Node	20
รูปที่ 2.22 โครงสร้างพื้นฐานของหุ่นยนต์ชีวามโนยด์ UTHAI	25
รูปที่ 2.23 ภาพการเปลี่ยนส่วนของฮาร์ดแวร์เป็นระบบจำลอง.....	26
รูปที่ 2.24 ตัวอย่างการนำโครงสร้างพื้นฐานไปประยุกต์ใช้ ในแอพลิเคชันการพูดคุยโต้ตอบกับมนุษย์.....	26
รูปที่ 2.25 สถาปัตยกรรมของหุ่นยนต์ Robotis OP3	27
รูปที่ 2.26 สถาปัตยกรรมของหุ่นยนต์ชีวามโนยด์ UTHAI	27
รูปที่ 2.27 บอร์ดคอนโทรลเลอร์ Odroid XU4.....	28

รายการรูปภาพ (ต่อ)

รูป	หน้า
รูปที่ 2.28 บอร์ดคอนโทรลเลอร์ Nucleo F411RE.....	28
รูปที่ ก.1 ภาพแสดงช่วงล่างทั้งตัว	30
รูปที่ ก.2 ภาพแสดงก้านต่อ Right Hip Yaw.....	31
รูปที่ ก.3 ภาพแสดงก้านต่อ Left Hip Yaw	32
รูปที่ ก.4 ภาพแสดงก้านต่อ Right Hip Roll.....	33
รูปที่ ก.5 ภาพแสดงก้านต่อ Left Hip Roll	34
รูปที่ ก.6 ภาพแสดงก้านต่อ Right Hip Pitch	35
รูปที่ ก.7 ภาพแสดงก้านต่อ Left Hip Pitch.....	36
รูปที่ ก.8 ภาพแสดงก้านต่อ Right Knee Pitch.....	37
รูปที่ ก.9 ภาพแสดงก้านต่อ Left Knee Pitch	38
รูปที่ ก.10 ภาพแสดงก้านต่อ Right Ankle Pitch	39
รูปที่ ก.11 ภาพแสดงก้านต่อ Left Ankle Pitch.....	40
รูปที่ ก.12 ภาพแสดงก้านต่อ Right Ankle Roll.....	41
รูปที่ ก.13 ภาพแสดงก้านต่อ Left Ankle Roll	42

รายการตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงสมบัติทางกลของวัสดุต่าง ๆ	5
ตารางที่ 2.2 ตารางแสดงสมบัติทางกลของวัสดุพลาสติก	6
ตารางที่ 2.3 ตารางแสดงขนาดของชิ้นงานที่สามารถพิมพ์ได้ในเครื่องพิมพ์ชนิดต่างๆ	6
ตารางที่ 2.4 Message Geometry Point	20
ตารางที่ 2.5 Message Geometry Quaternion	21
ตารางที่ 2.6 Message Geometry Pose	21
ตารางที่ 2.7 Message Geometry Vector3	21
ตารางที่ 2.8 Message Geometry Twist	21
ตารางที่ 2.9 Message Navigation Odometry	21
ตารางที่ 2.10 Message Geometry Pose2D	22
ตารางที่ 2.11 Message Navigation Path	22
ตารางที่ 2.12 Message Geometry PoseStamped	22
ตารางที่ 2.13 Message Trajectory JointTrajectory	23
ตารางที่ 2.14 Message Trajectory JointTrajectoryPoint	23
ตารางที่ 2.15 Message Sensor JointState	23
ตารางที่ 2.16 Message Geometry Wrench	23
ตารางที่ 2.17 Message Sensor Imu	24
ตารางที่ 2.18 Message Sensor MagneticField	24
ตารางที่ 2.19 ตารางแสดงรายการของวัสดุต่าง ๆ	29
ตารางที่ ก.1 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ทั้งตัว	30
ตารางที่ ก.2 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ Right Hip Yaw	31
ตารางที่ ก.3 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ Left Hip Yaw	32
ตารางที่ ก.4 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ Right Hip Roll	33
ตารางที่ ก.5 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ Left Hip Roll	34
ตารางที่ ก.6 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ Right Hip Pitch	35
ตารางที่ ก.7 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ Left Hip Pitch	36
ตารางที่ ก.8 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ Right Knee Pitch	37

รายการตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
ตารางที่ ก.9 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ Left Knee Pitch	38
ตารางที่ ก.10 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ Right Ankle Pitch	39
ตารางที่ ก.11 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ Left Ankle Pitch.....	40
ตารางที่ ก.12 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ Right Ankle Roll.....	41
ตารางที่ ก.13 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ Left Ankle Roll	42

รายการสัญลักษณ์

θ	เชิงตัว
d	distance
kg	Kilogram
m^2	Square Metre

ประมวลศัพท์และตัวย่อ

UTHAI	Universal Template for Humanoid Algorithm Interface
ROS	Robot Operating System
IMU	Inertial Measurement Unit
Dof	Degree of Freedom
CoM	Center of Mass
ZMP	Zero Moment Point
PLA	Polylactic acid
ABS	Acrylonitrile butadiene styrene
KMUTT	King Mongkut's University of Technology Thonburi
Liws	ลูกิจกรรม โซลูชันส์ ทรัพย์
θ	เชิงตัว

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

บริษัท เพอเซ็ปท์รา ดำเนินธุรกิจเกี่ยวกับด้าน artificial intelligence service โดยลูกค้านั้นมีความต้องการที่จะให้ทางบริษัทสร้างปัญญาประดิษฐ์(artificial intelligence) เพื่อนำไปใช้งานหรือแก้ปัญหาที่ต่างกันออกไป ทำให้การสร้างปัญญาประดิษฐ์ (artificial intelligence) เพื่อตอบสนองความต้องการของลูกค้าเหล่านั้นต้องมีขุดข้อมูลที่เหมาะสมกับปัญหานั้นๆ เช่น ร้านขายของแห่งหนึ่งต้องการรู้ว่าในแต่ละวันมีลูกค้าเดินเข้าร้านกี่คน เป็นผู้ชายกี่คน เป็นผู้หญิงกี่คน เป็นต้น ซึ่งการจะได้ข้อมูลที่เหมาะสมกับงานนั้น ต้องใช้มนุษย์ในการสร้างขึ้นมาโดยการเก็บข้อมูลวิดีโอ และสร้าง label สำหรับใช้ในการสร้างโมเดล machine learning ด้วยตัวเอง ถ้าหากมีวิดีโอดูเป็นจำนวนมาก การที่จะใช้มนุษย์ในการสร้าง label นั้นอาจจะต้องใช้มนุษย์เป็นจำนวนมาก หรือ ก่อให้เกิดภาระแก่มนุษย์ อีกทั้งการสร้าง label

นั้นเป็นงานที่ลำบาก และน่าเบื่อ ทางคณะผู้วิจัยจึงมีความต้องการที่จะออกแบบ และพัฒนา video analytics platform ที่มีเครื่องมือในการสร้าง label สำหรับวิดีโอ เพื่อช่วยแบ่งเบาภาระของผู้พัฒนาในการสร้าง label เพื่อนำไปสร้างโมเดล machine learning สำหรับใช้แก้ปัญหาที่ลูกค้าต้องการ โดยโครงการนี้เน้นศึกษาการวิเคราะห์และจัดจำการกระทำของมนุษย์จากภาพเคลื่อนไหวเป็นหลัก

1.2 วัตถุประสงค์

- 1 เพื่อออกแบบ และ สร้างระบบที่สามารถตรวจสอบมนุษย์ และจัดจำการกระทำพื้นฐานของมนุษย์ภายในสำนักงาน ประกอบด้วย ยืน นั่ง ใช้คอมพิวเตอร์ เล่นโทรศัพท์ เดิน กินข้าว โดยใช้ปัญญาประดิษฐ์มาประมวลผลกับวิดีโอ
- 2 เพื่อพัฒนาเครื่องมือในการทำ video labeling ในการสร้างข้อมูลที่ใช้สร้างโมเดลจากวิดีโอ ให้สามารถทำได้ง่าย และ มีประสิทธิภาพที่สูงกว่าเครื่องมือตัวอื่นในปัจจุบัน

1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1 พัฒนาเครื่องมือในการทำ labeling โดยมี artificial intelligence เข้ามาช่วย ที่สามารถสร้าง label ที่สามารถนำไปใช้สร้างโมเดล machine learning ได้
- 2 พัฒนาต้นแบบของ video analytics platform ที่สามารถรับวิดีโอดูเข้ามาในระบบแล้วสร้างรายงานเกี่ยวกับกิจกรรมของมนุษย์ในวิดีโอด้วย
- 3 สร้างและทดสอบโมเดลสำหรับทำ action recognition อย่างน้อย 2 โมเดล

1.4 ขอบเขตการดำเนินงาน

- 1 Labeling tool สามารถตัดวิดีโอเฉพาะในช่วงเวลาที่มีมนุษย์อยู่ได้อัตโนมัติ
- 2 Labeling tool สามารถระบุตำแหน่งได้ว่ามีมนุษย์แต่ละคนในวิดีโออยู่ตรงส่วนใดของวิดีโอและสามารถระบุการกระทำของมนุษย์ในวิดีโอด้วย ประกอบด้วยการทำได้แก่ ยืน นั่ง ใช้คอมพิวเตอร์ เล่นโทรศัพท์ เดิน กินข้าว
- 3 Label ผลลัพธ์ที่ได้จาก labeling tool ต้องสามารถนำไปใช้ในการสร้างโมเดลต่อได้
- 4 พัฒนา Labeling tool ด้วยภาษา Python
- 5 พัฒนา Labeling tool ที่สามารถให้มนุษย์ทำงานแก้ไขได้ เมื่อระบบอัตโนมัติทำงานผิดพลาด
- 6 สร้างโมเดลสำหรับการทำ action recognition อย่างน้อย 2 โมเดลที่สามารถระบุการกระทำของมนุษย์ตามที่กำหนดไว้ได้ เพื่อนำไปใช้ใน video analytics platform
- 7 Video analytics platform ต้องสามารถนำวิดีโอมาวิเคราะห์ข้อมูลการกระทำและตำแหน่งของมนุษย์แต่ละคนได้ และนำข้อมูลเหล่านั้นไปสร้างรายงานอุปกรณ์มาได้
- 8 ความละเอียดอย่างต่ำของวิดีโอด้วยมากกว่า 640×480 (ยาว x สูง)
- 9 วิดีโอด้วยต้องมีเฟรมเรท (fps) อย่างต่ำ 24 fps

1.5 ภาพรวมของระบบและขั้นตอนการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้การดำเนินงานวิจัยถูกแบ่งออกเป็นสองส่วน คือ ส่วนที่หนึ่งส่วนเครื่องมือสำหรับการเตรียมชุดข้อมูล (dataset) เป็นส่วนที่ทำเครื่องมือสำหรับช่วยผู้พัฒนาในการสร้างชุดข้อมูล และส่วนที่สองนำชุดข้อมูลไปสร้างโมเดล

ศึกษาค้นคว้าเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

- ศึกษาเกี่ยวกับการวิเคราะห์ผลวิดีโอ (video analytics)
- ศึกษาเกี่ยวกับชุดข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์ผลวิดีโอ
- ศึกษาเกี่ยวกับโมเดลใช้ในการวิเคราะห์ผลวิดีโอ
- ศึกษาเครื่องมือที่ใช้สำหรับช่วยสร้างชุดข้อมูล

1) ส่วนเครื่องมือสำหรับการเตรียมชุดข้อมูล (dataset)

- ออกรูปแบบหน้าต่างของแอพพลิเคชัน
- สร้างระบบของแอพพลิเคชัน
- ทดสอบการทำงานของแอพพลิเคชัน

2) ส่วนนำชุดข้อมูลไปสร้างโมเดล

- สร้างชุดข้อมูลสำหรับสร้างโมเดล
- สร้างโมเดลสำหรับการทำนายการกระทำของมนุษย์
- ทดสอบการทำงานของโมเดล

บทที่ 2

ระเบียบวิธีวิจัย

ในการทำโครงการวิจัยแอพพลิเคชั่นสำหรับวิเคราะห์วิดีโอ(video analytics) จะมีการทำงานหลากหลายส่วนมาทำงานร่วมกัน ซึ่งทำให้จำเป็นจะต้องมีระเบียบวิธีสำหรับอธิบายภาพรวมโดยในระเบียบวิจัยนี้จะมีหัวข้อ และระเบียบวิธีวิจัยดังนี้

- แผนการดำเนินงาน
- เครื่องมือที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย
- ภาพรวมของแอพพลิเคชั่น
- รายละเอียดของโมเดล

2.1 หน้าที่ความรับผิดชอบ

ปฐมพงศ์ สินธุรงาม สร้างและทดสอบโมเดล 3D และ ทำโปรแกรมในส่วน tracking

ศุภกร เบญจวิกรัย รวบรวมฟังก์ชันต่างๆของแอพพลิเคชั่น และ ทำแอพพลิเคชั่นในส่วน selection , detection

อุฤทธิ์ เลิศวรณาการ สร้างและทดสอบโมเดล Resnet-50 และ ทำโปรแกรมในส่วน person reid

2.2 แผนการดำเนินงาน

โดยจากที่กล่าวไปตอนต้นในบทนำ การดำเนินงานและการออกแบบการสร้างหุ่นยนต์ชีวมโนยด์ UTHAI มีแผนการทำงานซึ่งแบ่งออกเป็นสามส่วนดังนี้ ส่วนแรกคือ ส่วนของอาร์ดแวร์ที่เกี่ยวกับโครงสร้างทางกลของหุ่นยนต์ชีวมโนยด์ เช่น ข้อต่อ ก้านต่อ ฝ่าเท้า รวมไปถึงระบบอิเล็กทรอนิกส์ ตัวประมวลผลการควบคุม เช่นเซอร์วิชั่บเคลื่อนตัวๆ และส่วนที่สองคือ ส่วนของซอฟต์แวร์ที่เกี่ยวข้องกับการติดต่อสื่อสารกันเบื้องต้น การควบคุมตัวขับเคลื่อนที่ข้อต่อ การอ่านค่าเซนเซอร์ และส่วนที่สาม คือระบบพื้นฐานสำหรับการนำໄไปศึกษาและพัฒนา โดยจะครอบคลุมไปถึงเอกสารวิธีการใช้งานในรูปแบบออนไลน์

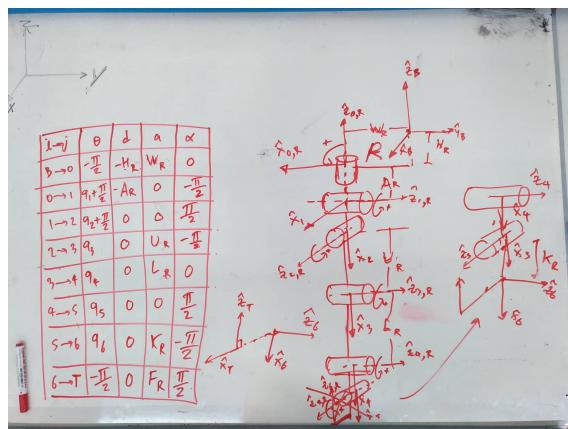
ในการเริ่มทำงานวิจัยที่เกี่ยวกับชีวมโนยด์นั้นสิ่งจำเป็นที่ต้องทำในอันดับแรกคือการศึกษาสิ่งที่เคยมีอยู่ หรืองานวิจัยมีนักวิจัยอื่นที่ทำเอาไว้แล้ว จากนั้นศึกษาทำความเข้าใจใน ข้อดี-ข้อเสีย ของวิธีหรือกระบวนการต่างๆ เพื่อนำมาประยุกต์ใช้กับหุ่นยนต์ชีวมโนยด์ภายในการวิจัยนี้ ในการศึกษาโครงสร้างทางกลและระบบของหุ่นยนต์ชีวมโนยด์ที่มีอยู่แล้วสิ่งที่ต้องดูและให้ความสนใจเป็นพิเศษคือ วิธีการเชื่อมต่อกันระหว่างก้านต่อและข้อต่อ, ลักษณะโครงสร้างที่สามารถทำให้เกิดการเคลื่อนไหวเพียงพอต่อการเดิน, ตำแหน่งที่ใช้ในติดตั้งเซนเซอร์ หรือตัวรับรู้ต่างๆ, การเลือกใช้วัสดุให้เหมาะสม และการทำงานของเซนเซอร์และตัวขับเคลื่อนที่จำเป็นต้องใช้ในการควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์ เมื่อเราทำความศึกษาเสร็จเรียบร้อยแล้ว จึงเริ่มดำเนินงานวิจัยการพัฒนาโครงสร้างและระบบพื้นฐาน ในส่วนนี้ทางกลจะเป็นการออกแบบโครงสร้างและจัดสร้างขึ้นมา ทางซอฟต์แวร์จะเป็นการสร้างแบบจำลองของหุ่นยนต์ ระบบจำลองที่สามารถจำลองการทำงานของหุ่นยนต์ได้ และติดต่อส่วนของทางกลกับทางโปรแกรม สุดท้ายระบบพื้นฐานจะออกแบบโครงสร้างระบบพื้นฐานเพื่อทำให้เกิดการพัฒนาต่อได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในบทนี้ก็จะกล่าวถึงกระบวนการออกแบบและการดำเนินการตามแผนที่วางเอาไว้

2.3 การออกแบบโครงสร้างของหุ่นยนต์

การออกแบบทางโครงสร้างทางกลของหุ่นยนต์ชีวามโนยด์ UTHAI นั้น ผู้วิจัยได้เลือกใช้โปรแกรมออกแบบโครงสร้างเป็นโปรแกรม Solidworks ที่ช่วยในการพัฒนาแบบจำลองของหุ่นยนต์ชีวามโนยด์ UTHAI เนื่องจากโปรแกรม Solidworks เป็นโปรแกรมที่ใช้ในการออกแบบ และวัดแบบทางวิศวกรรม สามารถวิเคราะห์โครงสร้าง การรับแรงของแบบจำลองได้ อีกทั้งยังเป็นเครื่องมือที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย ทำให้สามารถดาวน์โหลดแบบจำลองต่างๆที่มีคนพัฒนาเข้ามาใช้ร่วมกับการออกแบบได้ และด้วยทางผู้วิจัยมีความชำนาญในการพัฒนา ต่อยอดเป็นหลัก ดังนั้นการออกแบบโครงสร้างทางกลของหุ่นยนต์ชีวามโนยด์ UTHAI จึงถูกออกแบบมาเพื่อให้สามารถรองรับการปรับเปลี่ยน เปลี่ยนแปลง แก้ไขขึ้นส่วนต่างๆของตัวหุ่นยนต์ชีวามโนยด์ UTHAI ต่อไปได้

2.3.1 โครงสร้างของหุ่นยนต์ชีวามโนยด์ UTHAI

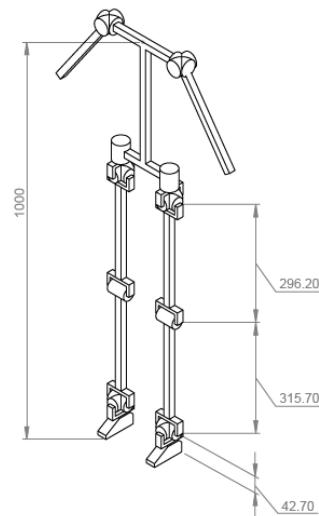
หุ่นยนต์ชีวามโนยด์ที่สร้างขึ้นประกอบด้วยส่วนของลำตัวและส่วนขา ในขาแต่ละข้างออกแบบให้ข้อต่อ มีเป็นลักษณะของข้อต่อแบบหมุน (Revolute joint) เพื่อเลียนแบบโครงสร้างของมนุษย์ที่ประกอบด้วย ส่วนของสะโพกที่มีองศาอิสระจำนวน 3 องศาอิสระ หัวเข่า 1 องศาอิสระ และข้อเท้า 2 องศาอิสระ รวมทั้งขาข้างละ 6 องศาอิสระ ระบบต้นกำลังที่ใช้ในแต่ละข้อต่อเป็นดิจิตอลเซอร์โว การออกแบบหุ่นยนต์ชีวามโนยด์ UTHAI นั้น สิ่งแรกที่ต้องทำ คือ การกำหนดโครงสร้างของข้อต่อและก้านต่อ ดังรูปที่ 2.1 ซึ่งโครงสร้างนั้นทางผู้วิจัยได้อ้างอิงมาจากสัดส่วนของมนุษย์จริง และมีจุดศูนย์กลางมวลอยู่บริเวณกระดูกเชิงกรานของตัวหุ่นยนต์ชีวามโนยด์เอง ดังรูปที่ 2.2



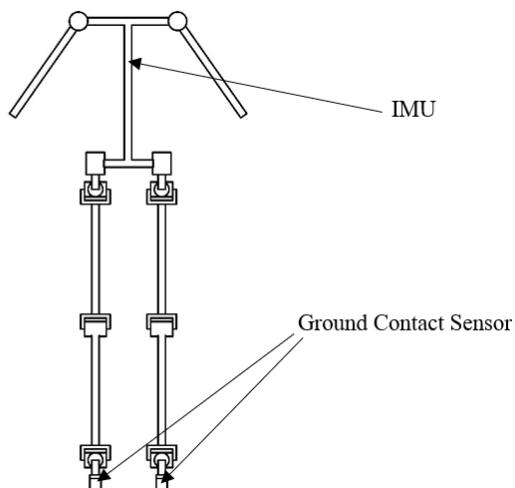
รูปที่ 2.1: การออกแบบโครงสร้างของหุ่นยนต์ UTHAI

เมื่อเราได้แบบของหุ่นยนต์ชีวามโนยด์ UTHAI แล้ว ลำดับต่อไปคือการกำหนดตำแหน่งการติดตั้งเซนเซอร์ และตัวขับเคลื่อนต่างๆเข้าไป โดยมีเซนเซอร์ตรวจการสัมผัสพื้นติดตั้งที่ใต้ฝ่าเท้าของหุ่นยนต์ เช่นเซอร์หน่วยวัดความเร็วอยู่ติดตั้งไว้บริเวณลำตัวของหุ่นยนต์ชีวามโนยด์ และที่ข้อต่อในแต่ละจุดใช้ตัวขับเคลื่อนเป็นดิจิตอลเซอร์โว ดังรูปที่ 2.3

ส่วนวัสดุที่ใช้ทำโครงสร้างหุ่นยนต์ชีวามโนยด์ UTHAI ทางผู้วิจัยเลือกใช้วัสดุหลักเป็น PLA ที่ขึ้นรูปด้วยวิธีการขึ้นรูปสามมิติ ก้านต่อเป็นคาร์บอนไฟเบอร์ เนื่องจากจะทำให้โครงสร้างมีน้ำหนักเบา ขึ้นรูปได้สะดวกทำให้สามารถปรับปรุงแก้ไขง่าย และมีวัสดุเสริมบางชิ้นส่วนที่ทำจากอลูมิเนียมเนื่องจากต้องความแข็งแรงมาก ตั้งตารางที่ 2.1



รูปที่ 2.2: ภาพแสดงแสดงโครงสร้างของหุ่นยนต์ UTHAI



รูปที่ 2.3: ภาพแสดงการติดตั้งเซนเซอร์ในจุดต่างๆ

Material	Longitudinal Tensile Strength (ksi)	Density (g/cm^3)
Carbon Fiber	300	1.55
Steel	100	7.7
Titanium	120	4.34
Aluminum	35	2.7
PLA 3D printing (50 % infill)	3.5	1.26
PLA 3D printing (100 % infill)	5.5	1.26

ตารางที่ 2.1: ตารางแสดงสมบัติทางกลของวัสดุต่าง ๆ

2.3.2 การจัดทำขึ้นส่วนโครงสร้างของหุ่นยนต์ชีวามโนยร์ UTHAI

ในการจัดทำขึ้นส่วนโครงสร้างของหุ่นยนต์ชีวามโนยร์อุทัยนันททาง ผู้วิจัยได้คำนึงถึงความแข็งแรงเป็นหลักซึ่งมีความสำคัญมาก ในการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ อีกทั้งยังต้องมีน้ำหนักที่เบาเพื่อประหยัดพลังงานที่ต้องใช้ในการขับเคลื่อน¹ ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ใช้การขึ้นรูปชิ้นงานด้วยเทคนิคการพิมพ์สามมิติ โดยจะใช้วัสดุหลักเป็นพลาสติก PLA ซึ่งมีความแข็งมากกว่าและขึ้นรูปง่ายกว่าพลาสติกชนิด ABS ดังตารางที่ 2.2 และก้านต่อเป็นคาร์บอนไฟเบอร์ เพื่อให้ตอบโจทย์กับหุ่นยนต์แพลตฟอร์มเพื่อพัฒนาต่ออยอดในอนาคต ซึ่งผู้ใช้ทุกคนสามารถพิมพ์ชิ้นงานขึ้นมาได้ด้วยตนเอง²

Properties	ABS	PLA
Tensile Strength	27 MPa	37 MPa
Elongation	3.5 - 50%	6%
Flexural Modulus	2.1 - 7.6 GPa	4 GPa
Density	1.0 - 1.4 g/cm ³	1.3 g/cm ³
Melting Point	230°C - 240°C	215°C - 235°C
การย่อ屈สลายทางธรรมชาติ	ไม่ได้	ได้ (ภายใต้เงื่อนไขที่ถูกต้อง)

ตารางที่ 2.2: ตารางแสดงสมบัติทางกลของวัสดุพลาสติก

แต่เนื่องจากในปัจจุบันนี้เครื่องพิมพ์สามมิติส่วนมากจะไม่รองรับการพิมพ์ชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งมีขนาดมากกว่า 30x30x30 ซม. (กว้างxยาวxสูง) ดังนั้นชิ้นงานที่ขึ้นรูป ที่มีขนาดใหญ่เกินกว่านี้อาจจะต้องทำการตัดชิ้นงานออกเป็นส่วนย่อยๆก่อน แล้วจึงค่อยนำมาประกอบรวมกันทีหลังอีกรอบหนึ่ง โดยพื้นที่ทำการพิมพ์ของเครื่องพิมพ์สามมิติที่มีวางจำหน่าย³ และใช้งานแพร่หลายในท้องตลาดแสดง ดังตารางที่ 2.3

ชื่อเครื่องพิมพ์สามมิติ	ขนาดความกว้าง (มม.)	ขนาดความลึก (มม.)	ขนาดความสูง (มม.)
MakerBot Replicator+	292	192	165
Ultimaker 3	188	185	200
LulzBot Mini	152	152	158
Dreammaker Overlord Pro Plus	79	79	255
New Matter MOD-t	145	95	125

ตารางที่ 2.3: ตารางแสดงขนาดของชิ้นงานที่สามารถพิมพ์ได้ในเครื่องพิมพ์ชนิดต่างๆ

¹Printing Guide [<https://filaments.ca/pages/temperature-guide>]

²PLA vs ABS [<https://www.3dhubs.com/knowledge-base/pla-vs-abs-whats-difference>]

³The truth about 3D printer maximum print areas [<https://www.zdnet.com/article/what-manufacturers-dont-want-you-to-know-the-truth-about-3d-printer-maximum-print-areas/>]

2.3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในหุ่นยนต์อิวามานอยด์ UTHAI

Dynamixel Servo EX-106+

Dynamixel EX-106+ เป็นตัวขับเคลื่อนที่นิยมใช้ในหุ่นยนต์ปัจจุบัน ซึ่งเป็นเซอร์โวโมเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับทำหุ่นยนต์โดยเฉพาะ ภายในประกอบไปด้วย มอเตอร์กระแสตรง ชุดเฟืองมอเตอร์ ไดรเวอร์คอนโทรลเลอร์ สามารถเชื่อมต่อ กันผ่านบัส RS-485⁴ มีการควบคุมตำแหน่งและความเร็วด้วย PID ภายในมีเซนเซอร์สามารถที่จะอ่านค่าความเร็ว แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า อุณหภูมิ ตำแหน่ง และแรงบิดจากมอเตอร์ทุกด้านได้ แต่ละมอเตอร์แต่ละตัวจะมีบอร์ดควบคุมของตัวเอง เราสามารถที่จะจ่ายไฟให้มอเตอร์และควบคุมผ่าน Serial ได้ ดังรูปที่ 2.4 การทำงานของตัวดิจิตอลเซอร์โวนี้สามารถทำได้ 2 รูปแบบ⁵ คือ

Joint Mode สามารถที่จะควบคุมแรงบิด ความเร็ว และตำแหน่งได้ ความละเอียดในการควบคุมตำแหน่งอยู่ที่ 10bit (0-1023) หมุนได้อยู่ในช่วง -150 ถึง 150 องศา

Wheel Mode สามารถที่จะควบคุมแรงบิด ความเร็ว และทิศทางได้ ความละเอียดของความเร็วอยู่ที่ 10bit (0-1023) สามารถหมุนได้ครบ 360 องศาได้ ความเร็วสูงสุดอยู่ที่ 114 RPM

EX-106 Stats		
Operating Voltage	18.5V	14.8V
Holding Torque	107 kg-cm 1,485 oz-in	84 kg-cm 1,166 oz-in
No-load Speed	0.143 sec/60°	0.182 sec/60°
Weight	154g	
Size	40.2 x 65.1 x 46 mm	
Resolution	0.06°	
Reduction Ratio	1/184	
Operating Angle	251° or Continuous Turn	
Max Current	7000mA	
Standby Current	55 mA	
Operating Temp	-5°C ~ 85°C	
Protocol	RS485 Asynchronous Serial	
Module Limit	254 valid addresses	
Com Speed	7343bps ~ 1Mbps	
Position Feedback	Yes	
Temp Feedback	Yes	
Load Voltage Feedback	Yes	
Input Voltage Feedback	Yes	
Compliance/PID	Yes	
Material	Metal Gears & Engineering Plastic Body	
Motor	Maxon RE-MAX	
Manual Download	EX-106 manual (PDF)	
Controller List	USB2Dynamixel CM2+	



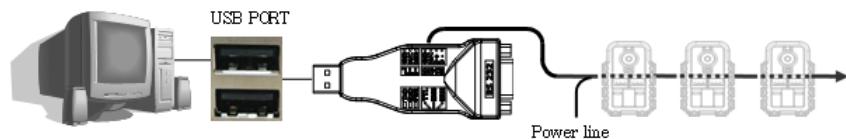
รูปที่ 2.4: แสดงประสิทธิภาพของมอเตอร์ EX-106+

⁴Robot Actuator [http://support.robotis.com/en/product/actuator/dynamixel/ex_series/ex-106.htm]

⁵EX-106+ Mode [<http://www.trossenrobotics.com/dynamixel-ex-106-robot-actuator.aspx>]

USB2Dynamixel

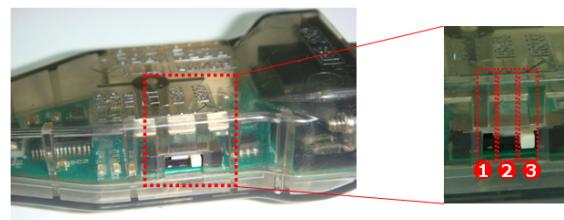
USB2Dynamixel เป็นอุปกรณ์สำหรับเชื่อมต่อดิจิตอลเซอร์โว กับหน่วยประมวลผลระดับสูง (Odroid) โดยจะเชื่อมต่อผ่านพอร์ท USB ที่อยู่บน Odroid และแปลงให้ส่งข้อมูลไปยังดิจิตอลเซอร์โวผ่านสาย 2 เส้น คือ D+ และ D- ตั้งรูปที่ 2.5 เป็นการเชื่อมต่อแบบ RS-485⁶ ทำให้สามารถส่งข้อมูลไปยังหลายๆ อุปกรณ์บนสายเส้นเดียวได้ และสามารถส่งในระยะทางไกลๆ⁷



รูปที่ 2.5: ภาพแสดงการติดต่อสื่อสารระหว่างคอมพิวเตอร์กับดิจิตอลเซอร์โว

ในการใช้งาน ผู้ใช้งานจำเป็นต้องเลือกรูปแบบการติดต่อสื่อสารซึ่งแต่ละรูปแบบก็จะมีลักษณะการเชื่อมต่อที่แตกต่างกันไป USB2Dynamixel ได้แบ่งการติดต่อสื่อสารออกเป็น 3 รูปแบบ⁸ คือ ดังรูปที่ 2.6

- 1 TTL Communication : สำหรับดิจิตอลเซอร์โวที่ใช้พอร์ทชนิด 3-pin ในตระกูล AX Series
- 2 RS485 Communication : สำหรับดิจิตอลเซอร์โวที่ใช้พอร์ทชนิด 4-pin ในตระกูล DX Series
- 3 RS232 Communication : ใช้สำหรับติดต่อสื่อสารกับคอนโทรลเลอร์ผ่านสายเคเบิล



รูปที่ 2.6: ภาพแสดงการเลือกโหมดใช้งานของ USB2Dynamixel

แต่จากการทดลองนำมาใช้ ผู้วิจัยพบว่าดิจิตอลที่ใช้ในการทำงานวิจัยครั้งนี้เป็นชนิด 4-pin ซึ่งใช้ RS485 ในการติดต่อสื่อสาร ด้วยขนาดของตัว USB2Dynamixel มีขนาดที่ใหญ่ทำให้การทำงานมีความลำบากในการติดตั้งลงบนตัวของหุ่นยนต์ชีวนมอยด์อุทัย จึงได้ทำการเปลี่ยนเป็น USB2RS485⁹



รูปที่ 2.7: USB2RS485 Module

⁶USB2Dynamixel [http://support.robotis.com/en/product/auxdevice/interface/usb2dxl_manual.html]

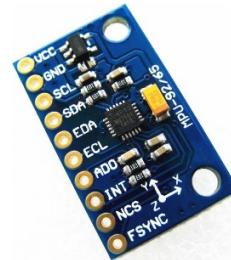
⁷<http://support.robotis.com/en/images/product/auxdevice/interface/>

⁸http://support.robotis.com/en/product/auxdevice/interface/usb2dxl_manual.htm

⁹<https://softgenie.dk/diverse/280-usb2rs485.html>

Inertial Measurement Unit (IMU)

ผู้วิจัยได้เลือกใช้เซนเซอร์หน่วยความเรื้อรังเป็น MPU-9250 ดังรูปที่ 2.8 มาใช้ในการอ่านหาค่ามุมเอียงของฐานทุนยนต์ข้อมานอยู่ต่อท้าย เพื่อใช้ในการคุณเสถียรภาพของหุนยนต์ โดยเซนเซอร์ตัวนี้สามารถวัดค่าได้ 9 แกนคือ วัดค่าความเร็วเชิงมุม (gyroscope) 3 แกน วัดค่าความเร่งเชิงเส้น (accelerometer) 3 แกน และวัดค่าสนามแม่เหล็กโลก (magnetometer) 3 แกน ซึ่งเซนเซอร์จะติดตั้งบริเวณส่วนของลำตัวหุนยนต์ข้อมานอยู่ต่อท้าย เนื่องจากว่าจะเป็นจุดที่สามารถบ่งบอกได้ถึงการเคลื่อนที่และมุมเอียงของหุนยนต์ในขณะนั้นได้¹⁰



รูปที่ 2.8: แสดงเซนเซอร์ IMU MPU9250

Wi-Fi Adapter

เนื่องจากหน่วยประมวลผลขั้นสูงของหุนยนต์ข้อมานอยู่ต่อท้ายนั้น ไม่สามารถเชื่อมต่อผ่านทาง WiFi ได้ จึงมีตัวรับสัญญาณ WiFi ดังรูปที่ 2.9 ติดตั้งเพิ่มขึ้นมา เพื่อใช้ในการติดต่อสื่อสารระหว่างหน่วยประมวลผลระดับสูงที่ติดตั้งอยู่บนตัวของหุนยนต์ และคอมพิวเตอร์ที่เป็นตัวสั่งการซึ่งอยู่นอกตัวของหุนยนต์ ซึ่งในงานวิจัยนี้ จะใช้ส่งข้อมูลที่ได้หลังจากการประมวลผลบนคอมพิวเตอร์ไปยังตัวหุนยนต์ เช่น การวางแผนการเดิน การคำนวนพลศาสตร์ของหุนยนต์ และอื่นๆ โดยการส่งข้อมูลไปยังหน่วยประมวลผลระดับสูงจะมีตัวกลางในการรับส่งสัญญาณคือ ตัวกระจายสัญญาณ (Wifi router)¹¹



รูปที่ 2.9: ตัวรับสัญญาณ WiFi ของ RaspberryPi



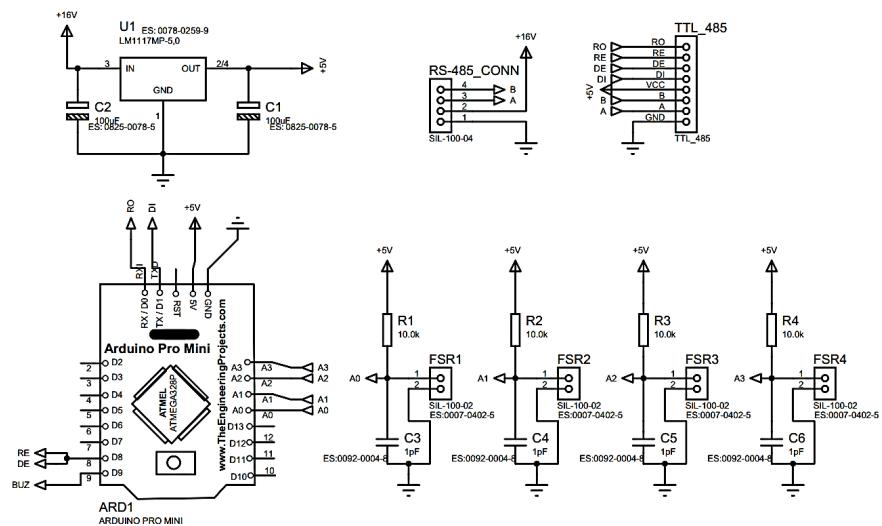
รูปที่ 2.10: ตัวกระจายและรับส่งสัญญาณ WiFi

¹⁰MPU-9250 [http://www.arduino.com/en/gy-series-axis-accelerometers/6924-gy9255-mpu9255-sensor-module-alternative-mpu9150-mpu9250-3809200640200.html]

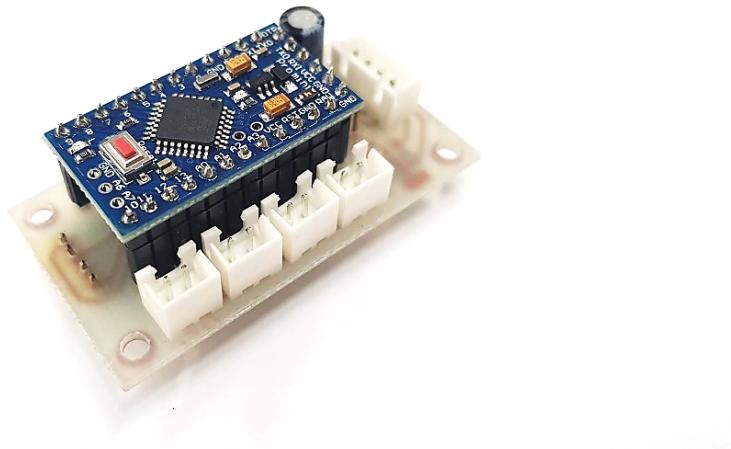
¹¹<https://www.alzashop.com/tp-link-archer-c7-d470129.htm>

Ground contact sensor

เซนเซอร์ตรวจหน้าสัมผัสที่พื้นเป็นเซนเซอร์ที่ถูกติดตั้งบริเวณฝ่าเท้า เพื่อตรวจสอบการเดินของหุ่นยนต์ ขีวามโนยด้วnxะนีมีการสัมผัของฝ่าเท้าของหุ่นยนต์กับพื้นหรือไม่ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ใช้หลักการตัวตรวจจับแรงกดแบบค่าความต้านทานหรือ Force Sensing Resistor (FSR) แนวคิดการออกแบบหลัก คือการออกแบบให้สามารถติดตั้งกับตัวหุ่นยนต์ได้โดยใช้ Arduino การพัฒนาซึ่งให้สามารถอ่านค่าได้ทั้งอนาล็อกและดิจิตอลได้อีก ทั้งรองรับการต่อเซนเซอร์จำนวน 4 ตัว โดยมีลักษณะรูปที่ 2.11 และตัวอย่างของเซนเซอร์ตรวจจับหน้าสัมผัส ดังรูป 2.12



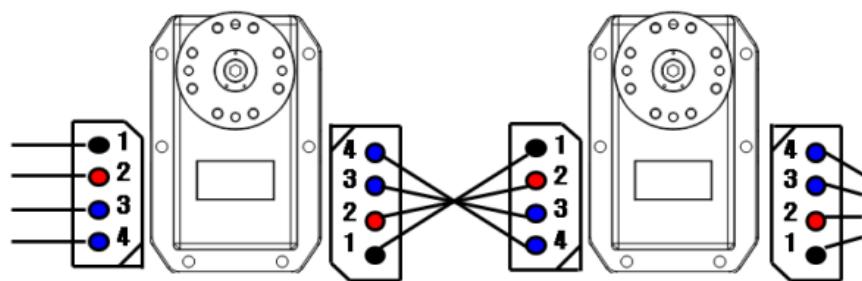
รูปที่ 2.11: Schematic ของวงจร Ground Contact Sensor



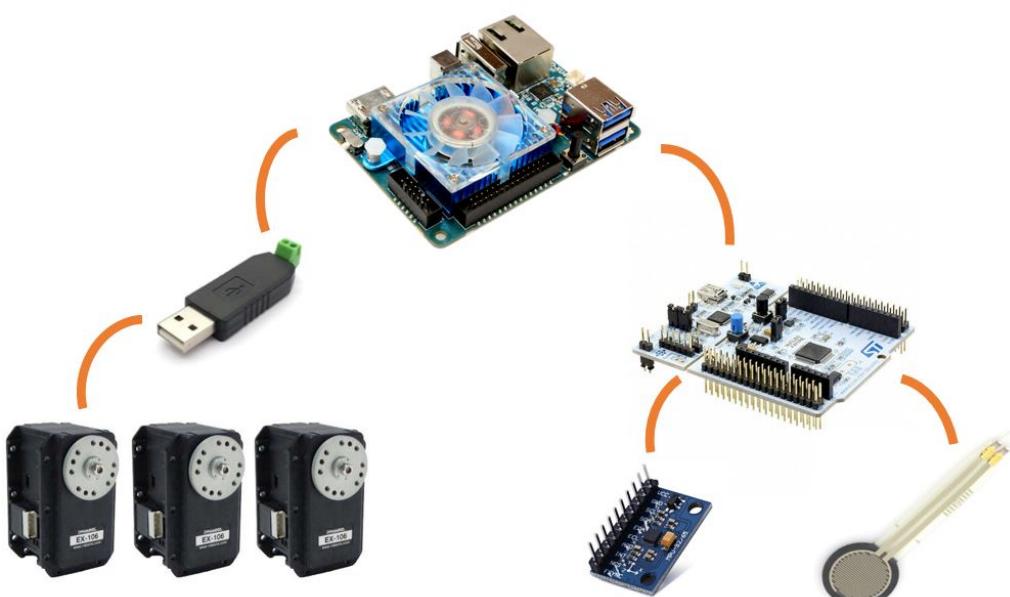
รูปที่ 2.12: แองเจร์ Ground Contact Sensor ที่ประกอบเสร็จแล้ว

2.3.4 การเชื่อมต่อดิจิตอลเซอร์โวและเซนเซอร์

โครงสร้างของหุ่นยนต์ขีวามโนยด์ UTHAI มีขาสองข้างทำให้เกิดองศาอิสระ 12 องศาอิสระ ผู้วิจัยจึงใช้ดิจิตอลเซอร์โวทั้งหมด 12 ตัว ดิจิตอลเซอร์โวทุกตัวเชื่อมต่อกันแบบสายโซลีเดช (daisy chain) ดังรูปที่ 2.13 ข้างหนึ่งของมอเตอร์ตัวแรกเชื่อมต่อกับแบตเตอรี่ 12V และอีกข้างต่อ กับ USB2RS485 เพื่อต่อไปยังตัวประมวลผลระดับสูง (Odroid) และเซนเซอร์ที่มีอยู่กับเซอร์โวที่จะจับหน้าสัมผัสที่พื้น เชื่อมต่อกับตัวประมวลผลระดับต่ำ (Nucleo F411RE) ดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.13: การเชื่อมต่อ กันระหว่างดิจิตอลเซอร์โว



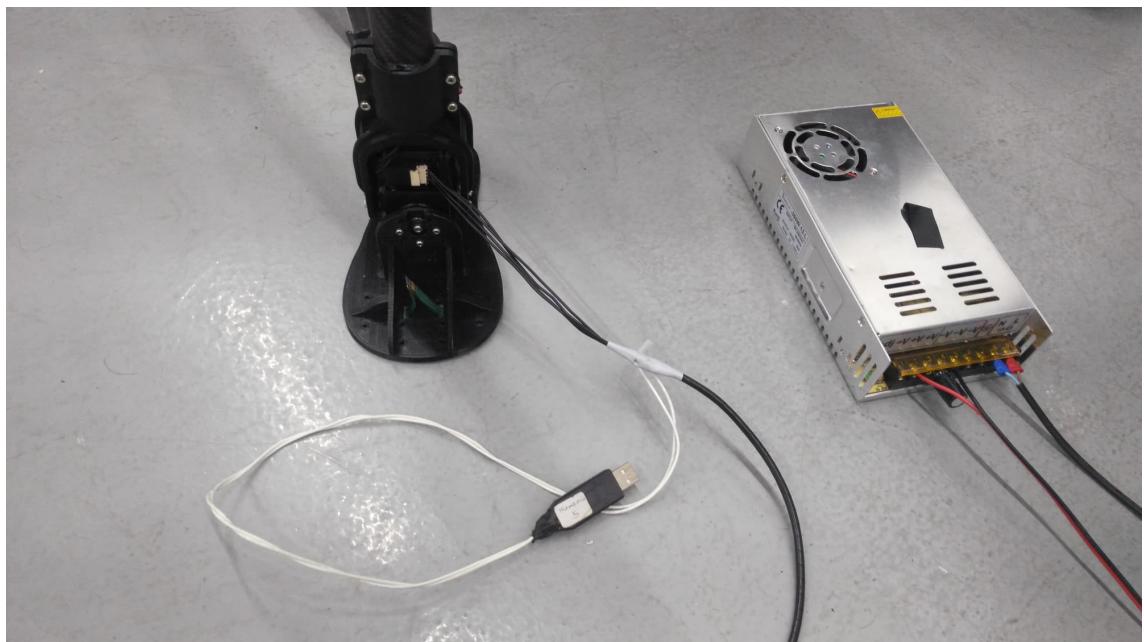
รูปที่ 2.14: การเชื่อมต่อระหว่างตัวรับสัญญาณ ตัวประมวลผล และตัวจับเคลื่อน

2.3.5 การตั้งค่าดิจิตอลเซอร์วอ



Roboplus 1.0

ก่อนที่จะเชื่อมต่อดิจิตอลเซอร์วอเข้ากับระบบประมวลผล จำเป็นที่จะต้องมีการตั้งค่า ID, Baudrate, Joint limited ของดิจิตอลเซอร์วอ โดยการตั้งค่าพารามิเตอร์ของดิจิตอลเซอร์วนั้น ผู้ใช้จะใช้โปรแกรมที่มีชื่อว่า Roboplus 1.0 ซึ่งเป็นเครื่องมือจากบริษัท Robotis ที่จำหน่ายดิจิตอลเซอร์วนี้ โดยจะช่วยให้สามารถติดต่อกับดิจิตอลเซอร์วอ ตั้งค่าพารามิเตอร์ได้ แต่โปรแกรม Roboplus 1.0 นี้ใช้ได้เฉพาะใน Windows OS เท่านั้น ซึ่งสามารถดาวน์โหลดโปรแกรมได้จากหน้าเว็บไซต์ Robotis¹² เมื่อดาวน์โหลดโปรแกรมและติดตั้งเรียบร้อยแล้ว ให้เชื่อมต่อดิจิตอลเซอร์วอกับคอมพิวเตอร์ด้วย USB2RS485 และตั้งค่าพารามิเตอร์โดยทำการขั้นตอน ดังรูปต่อไปนี้

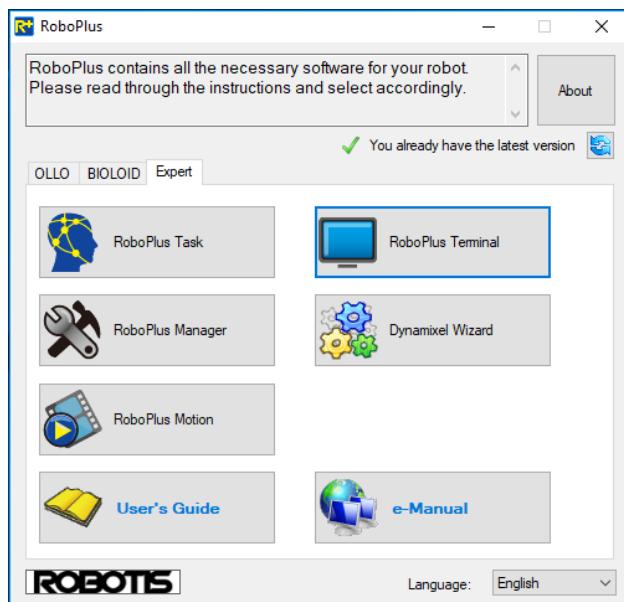


เชื่อมต่อดิจิตอลเซอร์วอเข้ากับคอมพิวเตอร์ด้วย USB2RS485

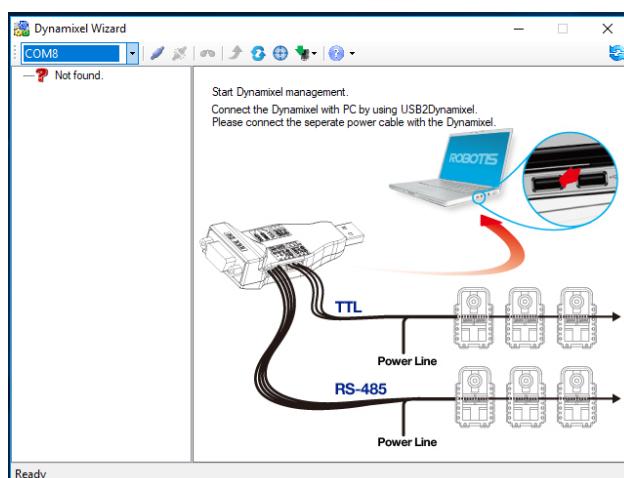


เปิดโปรแกรม Roboplus 1.0

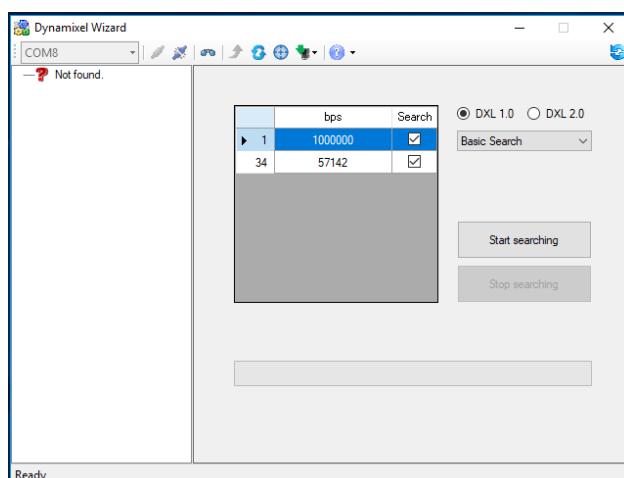
¹²<http://www.robotis.us/roboplus1/>



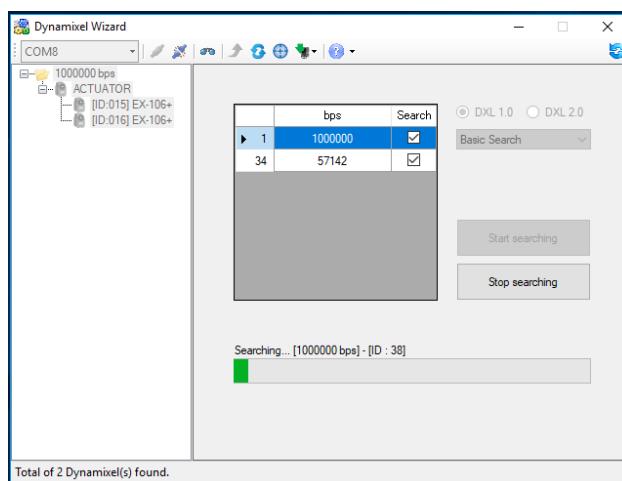
กดเข้าไปที่ Dynamixel Wizard



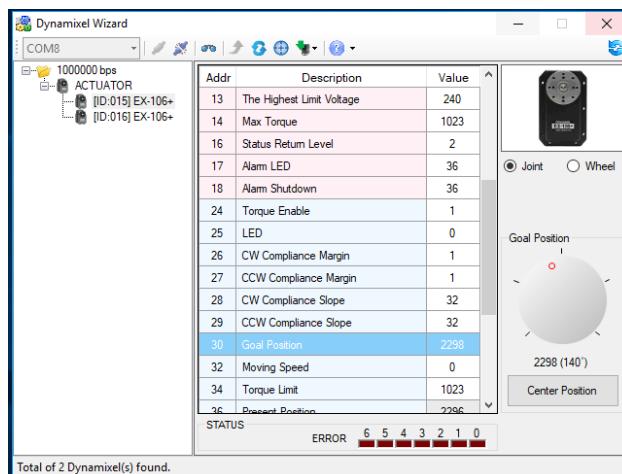
เลือก COM Port ให้ตรงกับ USB2RS485 จากนั้นกด Connect



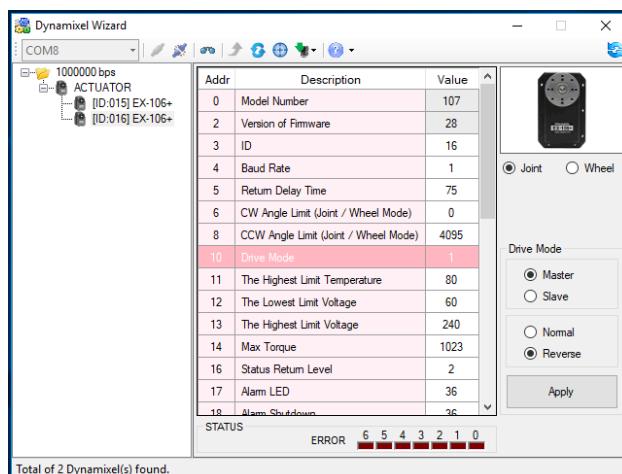
กดเลือกที่ช่อง 1Mbps และกด Start searching



เมื่อเทินทางด้านซ้ายมือผลลัพธ์ ID ของเตอร์ขึ้นมา หากขึ้นแล้วก็สามารถกด Stop Searching ได้



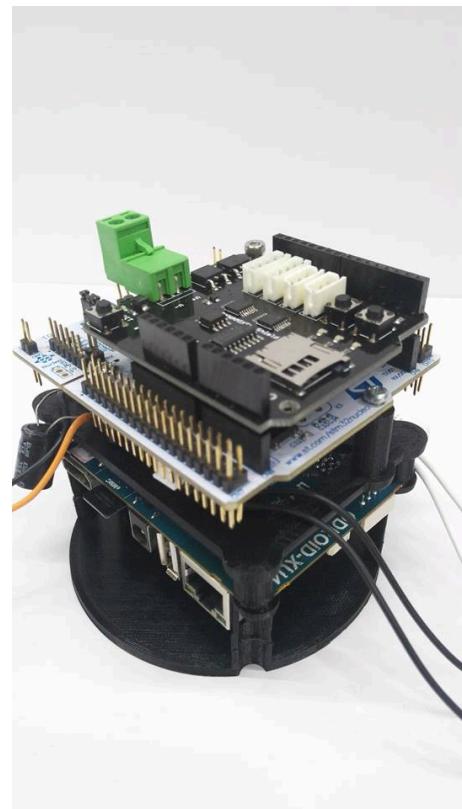
ทดสอบสั่งการมอเตอร์ที่ Addr 30 Goal position ว่าทิศทางถูกต้องหรือไม่



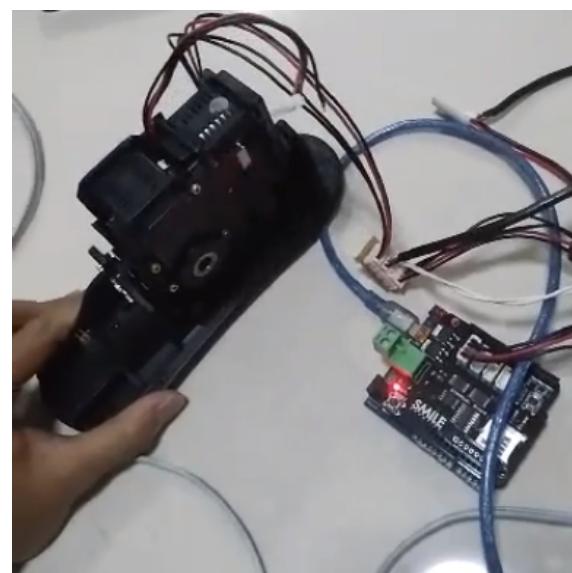
ถ้าทิศทางไม่ถูกต้องสามารถที่จะปรับได้ที่ Addr 10 Drive mode

2.3.6 การเชื่อมต่อหน่วยประมวลผลระดับสูงและระดับต่ำ

การเชื่อมต่อระหว่างหน่วยประมวลผล นั้นจะเชื่อมต่อกันผ่านสาย USB ชนิด Mini และส่งข้อมูลหากันผ่าน Serial โดยใช้ rosserial นอกจากจะมีหน่วยประมวลผลแล้วยังมีบอร์ดที่เอาไว้สำหรับควบคุม ดิจิตอลเซอร์วิโอ เพื่อเพื่อเอาไว้สำหรับควบคุมการเคลื่อนไหวของแขนหุ่นยนต์ขีวนอยด์อุทัย ด้วยรูปที่ 2.15 และทดสอบการสั่งการดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.15: การเชื่อมต่อกันระหว่างตัวประมวลผล



รูปที่ 2.16: ตัวอย่างการใช้งานบอร์ดสั่งการดิจิตอลเซอร์วิโอ

2.4 การออกแบบโปรแกรมด้วย ROS

การออกแบบแบบโปรแกรมด้วย ROS ของหุ่นยนต์ชีวามโนยด์ UTHAI นั้น ผู้วิจัยได้วางการทำงานโดย เริ่มจาก การสร้างแบบจำลองเพื่อใช้ในการจำลองการทำงานของหุ่นยนต์ชีวามโนยด์ UTHAI โดยการจัดสร้างไฟล์ URDF ขึ้น ทดสอบการเคลื่อนไหวของหุ่นยนต์ในการแสดงผลด้วยภาพผ่านโปรแกรม RViz ทดสอบการสั่งการดิจิตอล เชอร์โว ทดสอบการอ่านตำแหน่งจากดิจิตอลเชอร์โว ทดสอบการส่งค่าตำแหน่งจากดิจิตอลเชอร์โวไปประมวลผล หากดศูนย์กลางมวลในโปรแกรม MATLAB และเขียนโปรแกรมอ่านค่าเซนเซอร์ตรวจสอบการสัมผัสพื้น

2.4.1 กำหนดพิกัดเฟรมให้กับหุ่นยนต์ชีวามโนยด์

การกำหนดเฟรมให้กับหุ่นยนต์ชีวามโนยด์ UTHAI นั้น ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยจะใช้หลักตามของ ROS Enhancement Proposals (REPs)¹³ ซึ่งการใช้หลักการนี้จะทำให้ การเขียนเป็นระบบระเบียบสามารถ หยิบเครื่องมือต่างๆ ที่สร้างขึ้นมาใช้งานร่วมกันได้ และช่วยทำให้เกิดความเข้าใจเวลาสื่อสาร

base_link เป็นเฟรมที่ติดอยู่กับฐานของหุ่นยนต์ชีวามโนยด์ โดยจะติดตำแหน่งหรือมุมเอียงได้ โดย ส่วนใหญ่แล้วจะติดเฟรม base_link ไว้ที่สังกะส์ของหุ่นยนต์

base_footprint เป็นเฟรมที่แสดงว่าหุ่นยนต์อยู่ตรงไหนเมื่อเทียบกับโลก โดยจะมีระดับอยู่ที่จุดต่ำสุด ของฝ่าเท้า $z = \min(l_sole_z, r_sole_z)$ โดย l_sole_z และ r_sole_z คือความสูงของฝ่าเท้า

l_wrist, r_wrist เป็นเฟรมที่บอกตำแหน่งและมุมเอียงของแขนซ้ายและขวาของหุ่นยนต์ชีวามโนยด์ โดยไม่ต้องคำนึงถึงการติดตั้งอุปกรณ์ใดๆเข้าไปที่ปลายแขนของหุ่นยนต์ชีวามโนยด์

l_gripper, r_gripper เป็นเฟรมที่บอกตำแหน่งและมุมเอียงของที่ปลายแขน (End effector) ถ้ามีอ จับอุปกรณ์อยู่ เฟรมนี้จะใช้ในการอ้างอิงตำแหน่งของอุปกรณ์นั้นๆ แต่ในวิทยานิพนธ์นี้ ไม่ได้ใช้แขนของหุ่นยนต์ ในการหยิบจับเครื่องมือหรือวัตถุ จึงไม่ได้ใช้เฟรมนี้

l_ankle, r_ankle เป็นเฟรมที่บอกตำแหน่งและมุมเอียงของขาซ้ายและขวาโดยไม่ได้คำนึงว่าจุดรับน้ำ หนักของตัวอยู่ที่ไหน

l_sole, r_sole เป็นเฟรมที่บอกตำแหน่งและมุมเอียงของขาซ้ายและขวาที่รองรับน้ำหนักตัวอยู่ โดยจะ บอกการฉายลงในระนาบของ X, Y ที่สัมผัสพื้นและ Z จะอยู่ระหว่างตัวเดียวกับพื้นสัมผัส

l_toe, r_toe เป็นเฟรมที่บอกตำแหน่งและมุมเอียงของปลายเท้าซ้ายและขวา

gaze เป็นเฟรมที่บอกตำแหน่งและมุมเอียงของหัว โดยการอ้างน้ำหนักของหัว โดยไม่ได้ สนใจเซนเซอร์ว่าจะติดตั้งอย่างไร แต่ในวิทยานิพนธ์นี้ หุ่นยนต์ชีวามโนยด์ UTHAI ไม่มีหัว จึงไม่ได้ใช้เฟรมนี้

torso เป็นเฟรมที่ติดอยู่กับลำตัวซึ่งล่างของหุ่นยนต์ชีวามโนยด์ โดยจะเป็นเฟรมที่ใช้เชื่อม ขา แขน หัว เข้าหากัน

¹³<http://www.ros.org/reps/rep-0000.html>

2.4.2 การแปลงข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบ URDF

เมื่อออคแบบโครงสร้างของหุ่นยนต์ชีวามาโนยด์ UTHAI ด้วยโปรแกรม Solidworks เสร็จแล้ว ต่อไปเป็นการนำเอาไฟล์ STL ออคมาเพื่อใช้ในการทำระบบจำลองการทำงานของหุ่นยนต์ โดยการใช้งานระบบจำลองเนื่องจากทำให้ผู้วิจัยสามารถที่จะเห็นการทำงานของหุ่นยนต์ชีวามาโนยด์ได้ การสร้างแบบจำลองโดยการใช้เครื่องมือที่มาพร้อมกับ ROS ด้วยโมดูล URDF

2.4.2.1 แพกเกจ ROS สำหรับสร้างแบบจำลอง

ROS ได้ให้เครื่องมือที่ช่วยให้ สามารถที่จะสร้างแบบจำลองของหุ่นยนต์ชีวามาโนยด์สามมิติได้ เครื่องมือใน ROS ที่ชื่อว่า `robot_model` ภายในมีแพกเกจต่างๆที่ใช้สำหรับสร้างแบบจำลองของหุ่นยนต์สามมิติอยู่อย่างครบถ้วน ทำให้เราสามารถทำงานได้สะดวก และรวดเร็วมากขึ้น

`urdf` เป็นหนึ่งในหลายแพกเกจที่อยู่ใน `robot_model`, URDF เป็นไฟล์ XML ที่เอาไว้ใช้บอกลักษณะทางกายภาพของหุ่นยนต์ ซึ่งย่อมาจาก Unified Robot Description Format (URDF) การบอกโครงสร้างของหุ่นยนต์ด้วย URDF จะใช้การบอกเป็นโครงสร้างต้นไม้ของก้านต่อต่างๆในตัวหุ่นยนต์

`joint_state_publisher` เครื่องมือนี้มีประโยชน์มากในการสร้างแบบจำลองหุ่นยนต์ด้วย URDF เนื่องจากสามารถนำตำแหน่งของข้อต่อ มาแสดงเป็น GUI ได้ ทำให้เราสามารถเลื่อนๆหมุนๆไปมาได้ อีกทั้งยังสามารถใช้งานร่วมกับโปรแกรมแสดงผลภาพ RViz ได้

`robot_state_publisher` เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการ publish ตำแหน่งของก้านต่อต่างๆในแบบจำลองของหุ่นยนต์ชีวามาโนยด์ออกมายัง TF อีกทั้งยังให้ความสัมพันธ์ระหว่างเฟรมของหุ่นยนต์ได้ด้วย

`xacro` ย่อมาจาก XML Macros หรือเราสามารถเรียกว่าอย่างว่าเครื่องมือเสริมสำหรับ URDF ซึ่งลักษณะการเขียนเหมือนกับไฟล์ URDF แต่การเขียนนั้นจะสั้นกว่า อ่านง่ายกว่า และสามารถใช้เพื่อทำให้สร้างหุ่นยนต์ที่มีความซับซ้อนง่ายขึ้น สามารถแปลงไฟล์ xacro เป็น urdf ได้ถ้าต้องการ

2.4.2.2 URDF

ในส่วนนี้จะเป็นการอธิบายระบบทางกลของหุ่นยนต์ชีวามาโนยด์เป็นไฟล์ที่ใช้ร่วมกับ ROS เพื่อที่จะสามารถนำไปใช้กับระบบจำลองการทำงานของหุ่นยนต์ในอนาคตได้ ในการอธิบายระบบทางกลนั้นผู้วิจัยได้ใช้ไฟล์ URDF ซึ่งใช้ภาษาการเขียนเป็น XML ในการบอกส่วนประกอบแต่ละส่วนของหุ่นยนต์

Link

ไฟล์ URDF แต่ละชิ้นส่วนของหุ่นยนต์เราจะเรียกว่า link และใน link จะประกอบไปด้วยส่วนย่อยๆ 3 ส่วนคือ `<inertia>` ที่เอาไว้บอกถึงค่าตัวแปรทางฟิสิกส์, `<visual>` ที่เอาไว้แสดงผลให้เราเห็น, `<collision>` ที่เอาไว้ตรวจสอบว่าหุ่นยนต์มีการชนกันกับสิ่งแวดล้อมใหม่ ดังรูปที่ 2.17

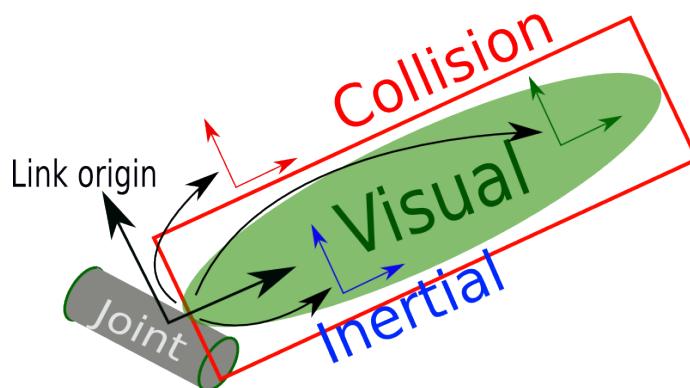
```

<link name="my_link">
  <inertia>
    <origin xyz="0 0 0.5" rpy="0 0 0"/>
    <mass value="1"/>
    <inertia ixx="100" ixy="0" ixz="0" iyy="100" iyz="0" izz="100"/>
  </inertia>
  <visual>
    <origin xyz="0 0 0" rpy="0 0 0"/>
    <geometry>
      <box size="1 1 1" />
    </geometry>
    <material name="Cyan">
      <color rgba="0 1.0 1.0 1.0"/>
    </material>
  </visual>
  <collision>
    <origin xyz="0 0 0" rpy="0 0 0"/>
    <geometry>
      <cylinder radius="1" length="0.5"/>
    </geometry>
  </collision>
</link>

```

รูปที่ 2.17: ตัวอย่าง link ใน urdf

ยังมีอีกหลายตัวที่ใช้ในการอธิบายแต่ละชิ้นส่วนของหุ่นยนต์ แต่ตัวอย่างเป็นเพียงแค่ส่วนหนึ่งเท่านั้น ในความเป็นจริงแล้วเราจะเขียน tags ต่างๆ ก็ตามที่เราต้องการ โดยใน URDF ไฟล์นั้นจะเอาไว้เก็บข้อมูลลักษณะเฉพาะของหุ่นยนต์เอาไว้ และยังสามารถใช้กับซอฟแวร์ตัวอื่นๆ อีกด้วย¹⁴



รูปที่ 2.18: การอธิบาย link ใน URDF ไฟล์

¹⁴<http://wiki.ros.org/urdf>

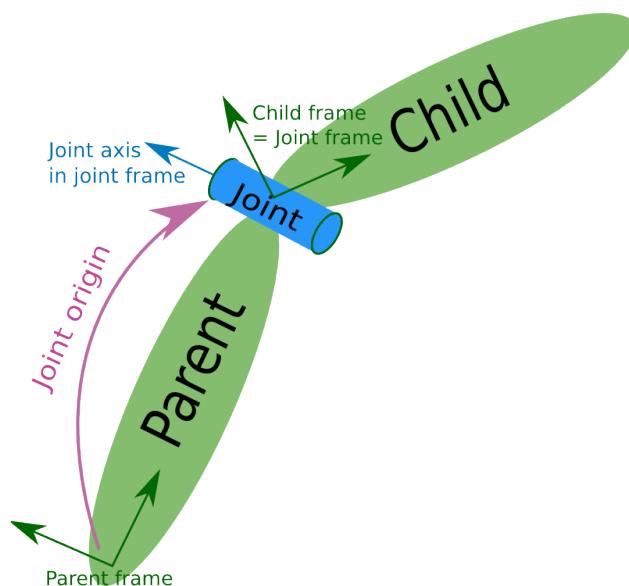
Joint

อีกส่วนที่สำคัญสำหรับการสร้างไฟล์หุ่นยนต์ด้วย URDF ก็คือ Joint tag โดย tag นี้จะอธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่างก้านต่อสองอัน ส่วนนี้ไม่ได้มีเพียงแค่ทำข้อต่อให้เป็นแบบหมุนได้อย่างเดียว ยังมี Fix, Revolution, Linear และ Planar นอกเหนือจากนี้ เรายังสามารถที่จะเพิ่มองศาสูงสุดต่ำสุดของข้อต่อ รวมไปถึง dynamic properties ต่างๆ ตามที่เห็นดังรูปที่ 2.19

```
<joint name="my_joint" type="floating">
    <origin xyz="0 0 1" rpy="0 0 3.1416"/>
    <parent link="link1"/>
    <child link="link2"/>
    <calibration rising="0.0"/>
    <dynamics damping="0.0" friction="0.0"/>
    <limit effort="30" velocity="1.0" lower="-2.2" upper="0.7"/>
    <safety_controller k_velocity="10" k_position="15"
        soft_lower_limit="-2.0" soft_upper_limit="0.5"/>
</joint>
```

รูปที่ 2.19: ตัวอย่าง joint ใน urdf

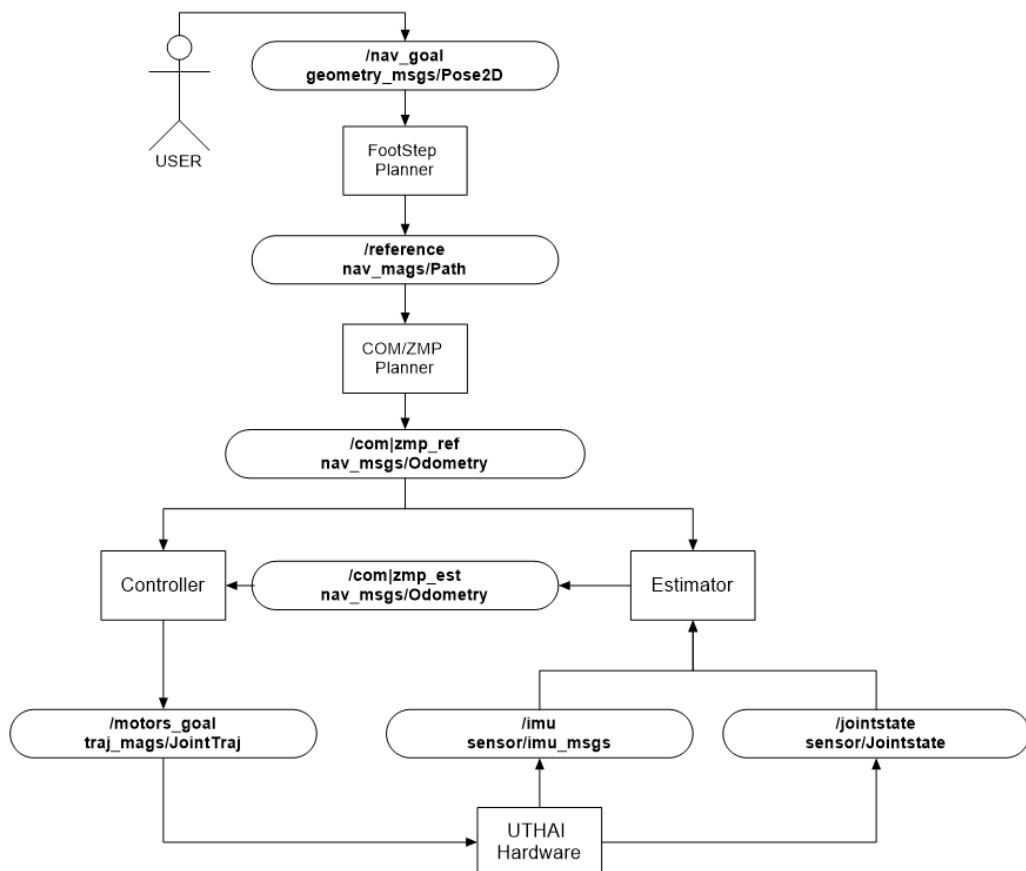
เมื่อเราเขียน Joint และ Link มารวมกันเราจะต้องพิจารณาว่ามี wang รูปแบบเป็นไปตามรูปที่ 2.20 โดยจะมีระยะระหว่างแกนของแต่ละข้อต่อ กับ ก้านต่อ ซึ่งส่วนแรกของการสร้างไฟล์ URDF จะมีชื่อว่า base_link และเฟรม origin จะเป็นเฟรมอ้างอิง เมื่อเราต่อ Joint เข้ากับ Link จะเรียกว่า ก้านต่อที่นำมาติดว่า parent โดยเฟรม origin ของข้อต่อจะอยู่จุดเดียวกับเฟรม origin ของก้านต่อ ในสถานะเดียวกัน ก้านต่อที่นำมาต่อจากข้อต่อ เราจะเรียกว่า child และเฟรม origin ของก้านต่อ child จะอยู่ที่จุดเดียวกับเฟรม origin ของข้อต่อ



รูปที่ 2.20: การอธิบาย Joint ใน URDF ไฟล์

2.4.3 โครงสร้างการติดต่อสื่อสารระหว่าง Node ใน ROS

การติดต่อสื่อสารกันภายใน ROS นั้นจะใช้การส่ง message หากัน ซึ่ง message แต่ละตัวก็จะใช้ในงานที่ต่างกัน ตามระบบที่ต้องการส่ง จากรูปที่ 2.21 เป็นโครงสร้างการส่งข้อมูลหากันของหุ่นยนต์อิวามานอยด์ ที่ผู้วิจัยได้ออกแบบไว้ โดยเริ่มจากผู้ใช้งานส่งตำแหน่งที่หุ่นยนต์จะต้องเดินไปเป็น Node ที่ทำการคำนวณและสร้างตำแหน่งการวางเท้าของหุ่นยนต์ และหลังจากนั้นจะส่งข้อมูลออกไปเป็น Path เส้นทางไปยัง Node ที่ทำการค้นหาตำแหน่งของ com, zmp ของหุ่นยนต์ เพื่อทำการควบคุมและส่งการหุ่นยนต์ต่อไป



รูปที่ 2.21: การติดต่อสื่อสารระหว่าง Node

การบอกตำแหน่งและมุมเอียง

การบอกตำแหน่งใน 3 มิติ Point คือการบอก x, y, z และการบومุมเอียงจะใช้ Quaternion ในการบอกโดยใช้ตัวแปรสีตัว คือ x,y,z,w หากนำทั้งสองมารวมกันเราจะเรียกว่า Pose

geometry_msgs/Point	
float64	x
float64	y
float64	z

ตารางที่ 2.4: Message Geometry Point

geometry_msgs/Quaternion	
float64	x
float64	y
float64	z
float64	w

ตารางที่ 2.5: Message Geometry Quaternion

geometry_msgs/Pose	
geometry_msgs/Point	position
geometry_msgs/Quaternion	orientation

ตารางที่ 2.6: Message Geometry Pose

การบอกรความเร็วเชิงเส้นและเชิงมุม

การบอกรความเร็วเชิงเส้นใน 3 มิติ คือการบอกรความเร็วตามแนวแกน x, y, z และการบอกรความเร็วเชิงมุม คือการบอกรความเร็วการหมุนรอบแกน x, y, z หากนำทั้งสองมาร่วมกันเราจะเรียกว่า Twist

geometry_msgs/Vector3	
float64	x
float64	y
float64	z

ตารางที่ 2.7: Message Geometry Vector3

geometry_msgs/Twist	
geometry_msgs/Vector3	linear
geometry_msgs/Vector3	angular

ตารางที่ 2.8: Message Geometry Twist

การบอกรตำแหน่งและความเร็ว

หากนำทั้งสองมาร่วมกันจะรู้ว่า ตำแหน่ง (Pose) และความเร็ว (Twist) เราจะเรียกว่า Odometry แต่ที่เพิ่มเข้ามาคือ Covariance ซึ่งอาจทำให้เกิดความสับสนได้

nav_msgs/Odometry	
std_msgs/Header	header
geometry_msgs/PoseWithCovariance	pose
geometry_msgs/TwistWithCovariance	twist

ตารางที่ 2.9: Message Navigation Odometry

ตำแหน่งของหุ่นยนต์

การบอกร่องรอยของหุ่นยนต์บนระนาบ 2 มิติ คือการบอก x , y และ θ การบอกนั้นจะบอกว่าตำแหน่งที่หุ่นยนต์อยู่นั้นอยู่ตรงไหนหากเทียบกับแผนที่ รวมไปถึงตำแหน่งของหุ่นยนต์ที่ต้องการจะเดินไปด้วย ซึ่งอ้างอิงมาจากการที่หุ่นยนต์เริ่มต้นของแผนที่

geometry_msgs/Pose2D	
float64	x
float64	y
float64	θ

ตารางที่ 2.10: Message Geometry Pose2D

ตำแหน่งการวางแผนทางของหุ่นยนต์

การจะให้หุ่นยนต์นำทีมไปวางในตำแหน่งที่เราต้องการจากที่ได้จากการคำนวณนั้น จะต้องบอกตำแหน่งและบอกรุ่นเครื่องของจุดที่จะไป จากการสร้างจะได้เป็นรายการของที่้าซ้ายและขวา โดยอิงจาก ตารางที่ 2.6

nav_msgs/Path	
std_msgs/Header	header
geometry_msgs/PoseStamped[]	poses

ตารางที่ 2.11: Message Navigation Path

geometry_msgs/PoseStamped	
std_msgs/Header	header
geometry_msgs/Pose	pose

ตารางที่ 2.12: Message Geometry PoseStamped

ตำแหน่งจุดศูนย์กลางมวลของหุ่นยนต์

ใน Message นี้ใช้อยู่ 2 ที่คือ Message ที่ได้จากการวางแผนของ Node CoM Planner และ Node CoM Estimator โดยทั้งสองจุดใช้ Message เมื่อกันส่งไปยัง Controller เพื่อควบคุมท่าทางต่างๆของหุ่นยนต์ต่อไป Message ที่ใช้คือ Message จากตารางที่ 2.9

nav_msgs/Odometry	
std_msgs/Header	header
geometry_msgs/PoseWithCovariance	pose
geometry_msgs/TwistWithCovariance	twist

Message Navigation Odometry

การควบคุมข้อต่อของหุ่นยนต์

ในการควบคุมข้อต่อแต่ละข้อของหุ่นยนต์ชีวามาโนyd'nนจะใช้ Message trajectory_msgs/JointTrajectory ซึ่งสามารถส่ง ตำแหน่ง ความเร็ว ความเร่ง และ แรงบิด ไปได้ ทำให้หากต้องการเปลี่ยนระบบใหม่สามารถทำได้โดยง่าย

trajectory_msgs/JointTrajectory	
std_msgs/Header	header
string[]	joint_names
trajectory_msgs/JointTrajectoryPoint[]	points

ตารางที่ 2.13: Message Trajectory JointTrajectory

trajectory_msgs/JointTrajectoryPoint	
float64[]	positions
float64[]	velocities
float64[]	accelerations
float64[]	effort
duration	time_from_start

ตารางที่ 2.14: Message Trajectory JointTrajectoryPoint

ค่าเซนเซอร์ข้อต่อของหุ่นยนต์

ที่ข้อต่อของหุ่นยนต์ชีวามาโนyd'mีเซนเซอร์ที่เอาไว้ใช้ในการอ่านค่าตำแหน่ง ความเร็ว และแรง อยู่ด้วย เราสามารถที่จะใช้ Message sensor_msgs/JointState สำหรับอ่านค่าตำแหน่ง ความเร็ว แรง ของตัวขึ้บเคลื่อน แล้วส่งให้ Estimator Node ได้

sensor_msgs/JointState	
std_msgs/Header	header
float64[]	position
float64[]	velocity
float64[]	effort

ตารางที่ 2.15: Message Sensor JointState

ค่าเซนเซอร์ฝ่าเท้าของหุ่นยนต์

ที่ฝ่าเท้าของหุ่นยนต์ชีวามาโนyd'mีเซนเซอร์ที่เอาไว้ใช้ในการอ่าน แรงกดที่ฝ่าเท้า ใช้ในการเอามาบวกกับ เท้าสัมผัสพื้นหรือไม่

geometry_msgs/Wrench	
geometry_msgs/Vector3	force
geometry_msgs/Vector3	torque

ตารางที่ 2.16: Message Geometry Wrench

ค่าเซนเซอร์ IMU ของหุ่นยนต์

เซนเซอร์ IMU เป็นเซนเซอร์ที่เอาไว้ใช้ในการวัด ความเร็วเชิงมุม และ ความเร่งเชิงเส้น หากนำทั้งคู่มารวมกันจะสามารถที่จะแปลงให้วัดมุมอิริยาบถของเซนเซอร์ได้ โดยจะใช้ Message std_msgs/Imu ในการส่งให้ Node Estimator จากตัวหุ่นยนต์

sensor_msgs/Imu	
std_msgs/Header	header
geometry_msgs/Quaternion float64[9]	orientation
geometry_msgs/Vector3 float64[9]	orientation_covariance
geometry_msgs/Vector3 float64[9]	angular_velocity
	angular_velocity_covariance
	linear_acceleration
	linear_acceleration_covariance

ตารางที่ 2.17: Message Sensor Imu

sensor_msgs/MagneticField	
std_msgs/Header	header
geometry_msgs/Vector3 float64[9]	magnetic_field
	magnetic_field_covariance

ตารางที่ 2.18: Message Sensor MagneticField

2.5 การออกแบบระบบพื้นฐาน

2.5.1 วงศ์โครงสร้างของระบบพื้นฐาน

โครงสร้างระบบพื้นฐานของหุ่นยนต์อิวามาโนยด์ UTHAI เป็นการวางแผนให้ผู้ใช้สามารถที่จะช่วยกันพัฒนาได้ และเพื่อทำให้มีความเป็นระบบระเบียบ ง่ายต่อการแก้ไข ปรับปรุง ซึ่งผู้ใช้ได้ออกแบบส่วนการทำงาน ต่างๆออกเป็นสามส่วน ตามหน้าที่การทำงาน คือ

Hardware Devices

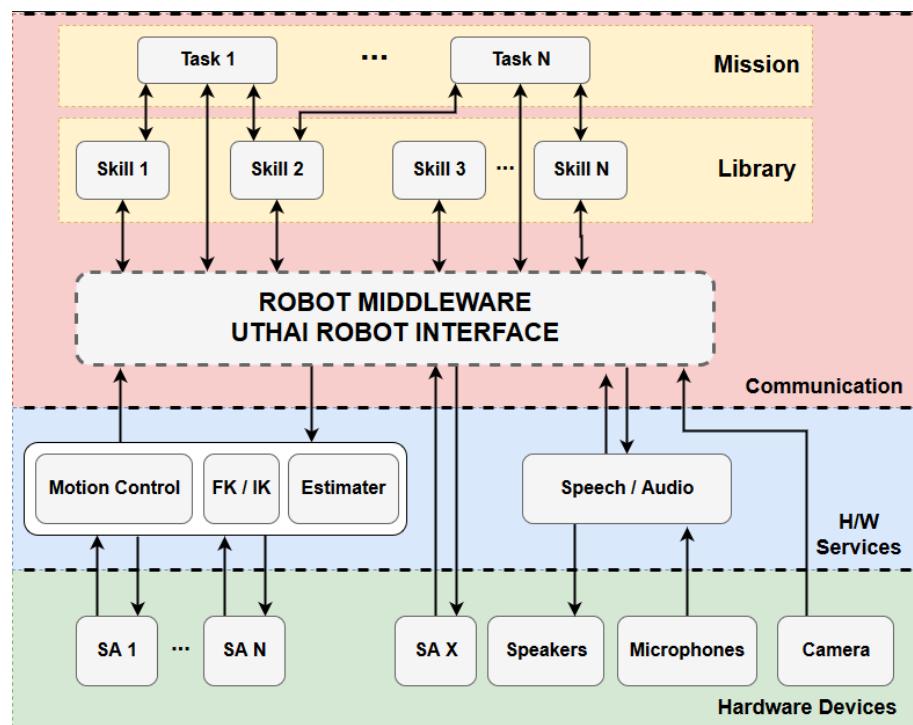
เป็นส่วนของอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ที่ใช้งานกับหุ่นยนต์อิวามาโนยด์ ยกตัวอย่างเช่น ตัวขับเคลื่อน กล้อง ไมโครโฟน ลำโพง หรืออื่นๆ ซึ่งในส่วนนี้สามารถเปลี่ยนฮาร์ดแวร์จริงๆเป็นระบบจำลองได้

Hardware Services

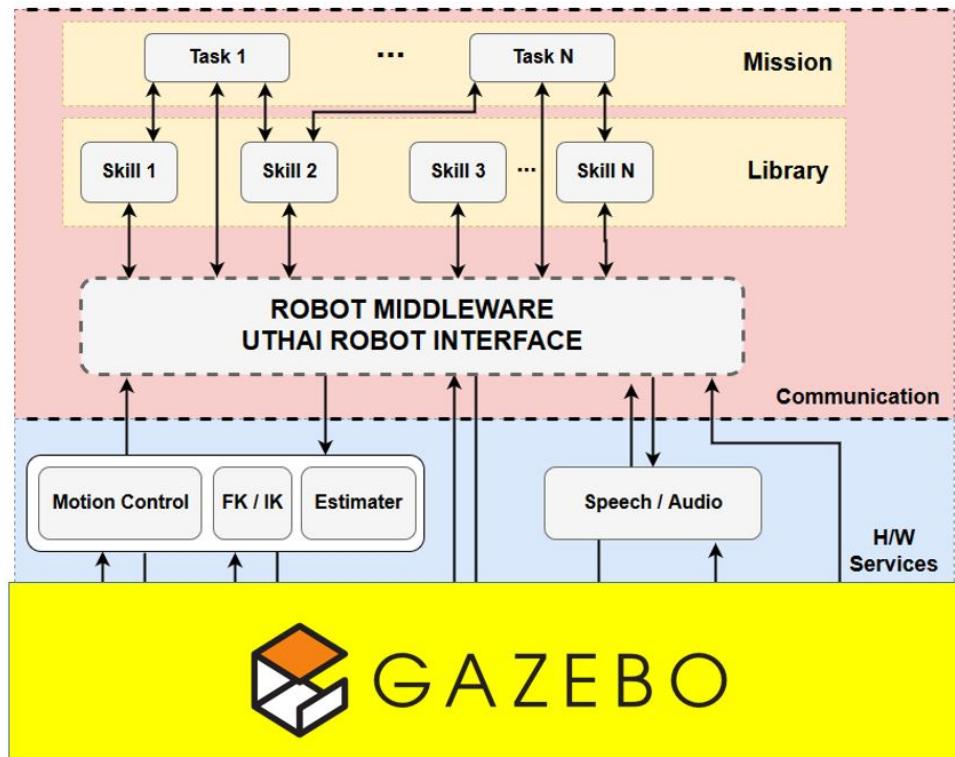
เป็นส่วนของซอฟต์แวร์ที่ช่วยทำให้อุปกรณ์ฮาร์ดแวร์สามารถติดต่อสื่อสารกับระบบพื้นฐานของหุ่นยนต์อิวามาโนยด์ UTHAI ได้ ซึ่งจะช่วยทำให้การส่งข้อมูลเป็นมาตรฐานเดียวกัน

Communication

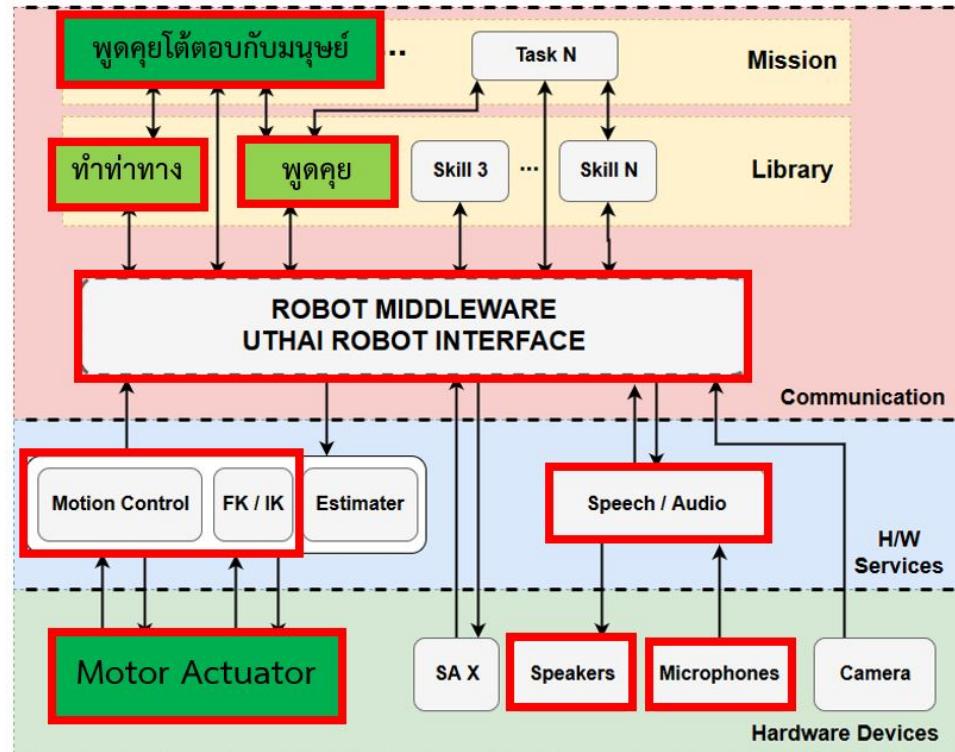
เป็นส่วนของการติดต่อสื่อสารระหว่างซอฟต์แวร์กับฮาร์ดแวร์ผ่านระบบพื้นฐานของหุ่นยนต์อิวามาโนยด์ ซึ่งจะอยู่ภายใต้ข้อมูลทุกอย่างสามารถเชื่อมต่อกันได้



รูปที่ 2.22: โครงสร้างพื้นฐานของหุ่นยนต์อิวามาโนยด์ UTHAI



รูปที่ 2.23: ภาพการเปลี่ยนส่วนของชาร์ดแวร์เป็นระบบจำลอง

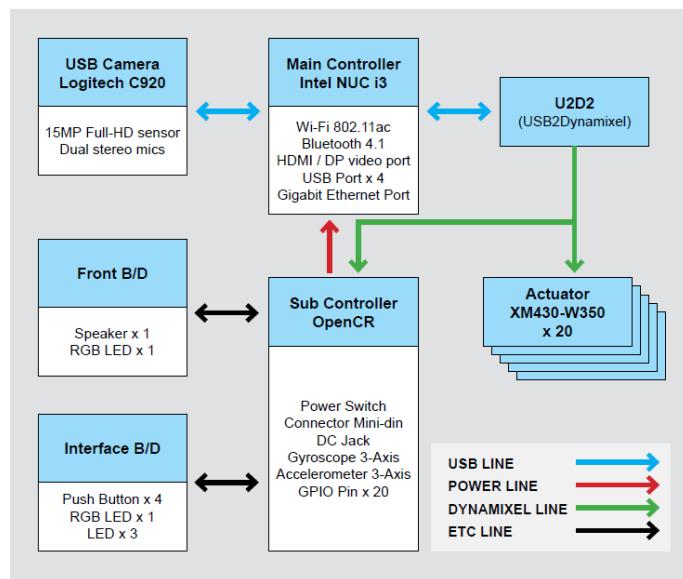


รูปที่ 2.24: ตัวอย่างการนำโครงสร้างพื้นฐานไปประยุกต์ใช้ ในแอปพลิเคชันการพูดคุยก็ต้องกับมนุษย์

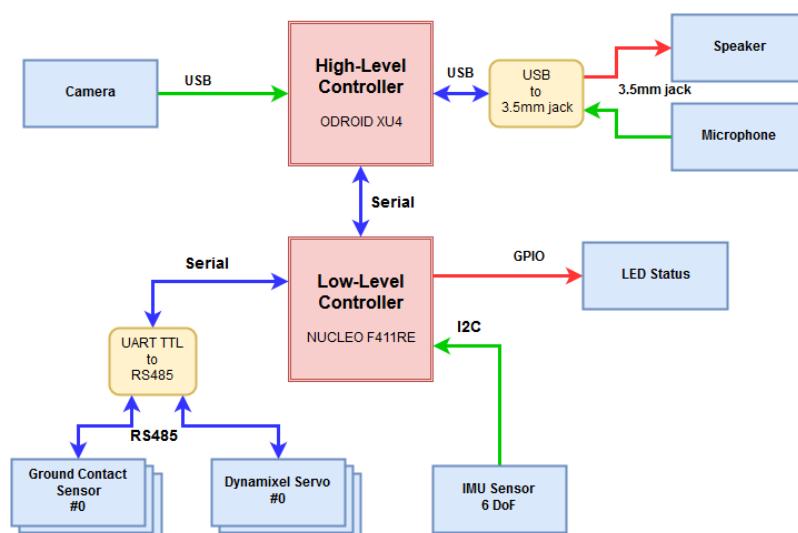
2.5.2 ออกแบบสถาปัตยกรรมของหุ่นยนต์

หลักการออกแบบสถาปัตยกรรมของหุ่นยนต์ชีวามโนยด์ UTHAI จะออกแบบระบบให้อยู่บนระบบพื้นฐาน ROS เนื่องจากการใช้กรอบการทำงานที่มีประสิทธิภาพ และความยืดหยุ่นสูง จะช่วยทำให้สามารถปรับเปลี่ยนระบบการควบคุมของหุ่นยนต์ชีวามโนยด์ได้ง่ายและรวดเร็ว การออกแบบหน่วยประมวลผลนั้นมีลักษณะรูปแบบ ดังที่กล่าวไว้ในบทที่ 2 สำหรับในงานวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้ศึกษาและพอกกว่าสถาปัตยกรรมที่เหมาะสมกับหุ่นยนต์ชีวามโนยด์ UTHAI จะมีลักษณะใกล้เคียงกับหุ่นยนต์ชีวามโนยด์ Robotis OP3 ดังรูปที่ 2.25 ดังนั้นแล้วผู้วิจัยจึงได้แบ่งการประมวลผลออกเป็น 2 ส่วนคือ

- 1 หน่วยประมวลผลควบคุมระดับสูง (High Level Controller)
- 2 หน่วยประมวลผลควบคุมระดับต่ำ (Low Level Controller)



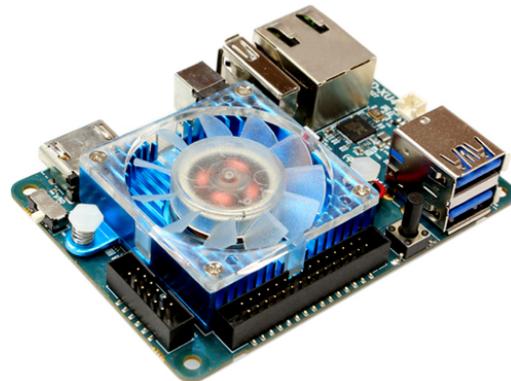
รูปที่ 2.25: สถาปัตยกรรมของหุ่นยนต์ Robotis OP3



รูปที่ 2.26: สถาปัตยกรรมของหุ่นยนต์ชีวามโนยด์ UTHAI

2.5.2.1 หน่วยประมวลผลควบคุมระดับสูง (High level controller)

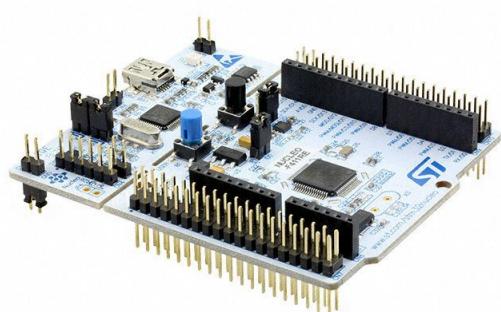
ระบบควบคุมหลักของหุ่นยนต์ชีวามโนยด์ UTHAI เน้นจะอยู่ที่หน่วยประมวลผลขั้นสูง ใช้เป็นบอร์ดคอมพิวเตอร์ ODROID-XU4 ตัวประมวลผลหลักนี้ ทำหน้าที่ในการคำนวณเส้นทางการเดิน ทำให้หุ่นยนต์มีเสถียรภาพในการเดิน ตรวจการขัดกันของโครงสร้างของหุ่นยนต์ รวมไปถึงรับค่าข้อมูลตำแหน่ง ความเร็วจากข้อต่อ หลังจากนั้นจะทำการนำค่าทั้งหมดที่ได้จากการคำนวณ มาแปลงให้อยู่ในรูปของชุดข้อมูล แล้วส่งออกไปให้ระบบกลาง (ROS) ในการส่งต่อไปให้อุปกรณ์อื่นต่อไป



รูปที่ 2.27: บอร์ดคอมโตรลเลอร์ Odroid XU4

2.5.2.2 หน่วยประมวลผลควบคุมระดับต่ำ (Low level controller)

ระบบควบคุมขั้นต่ำเป็นหน่วยประมวลผลที่รองรับมาจาก บอร์ดคอมพิวเตอร์ โดยใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Nucleo F411RE เป็นหน่วยประมวลผลขั้นต่ำ สำหรับในการติดต่อกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ที่อยู่ภายนอกตัวของหุ่นยนต์ เช่น ค่าเซนเซอร์ที่ฝาเท้าซึ่งสามารถบอกได้ว่าควรใช้สมการไหนในการคำนวณพลวัต หรือค่าของเซนเซอร์หน่วยวัดความเร็วym ความสำคัญมาก ในการทำให้หุ่นยนต์ชีวามโนยด์เดินได้อย่างมีเสถียรภาพ เมื่ออ่านค่าเซนเซอร์ต่างๆได้แล้ว หน่วยประมวลผลขั้นต่ำจะนำค่าที่ได้จากการอ่านเซนเซอร์เหล่านี้แปลงให้อยู่ในลักษณะของชุดข้อมูล แล้วส่งออกไปในระบบกลาง (ROS) นอกจากนี้หน่วยประมวลผลขั้นต่ำยังทำหน้าที่รับค่าคำสั่งมาจากระบบกลาง ในการสั่งงานให้หุ่นยนต์มีท่าทางต่างๆได้



รูปที่ 2.28: บอร์ดคอมโตรลเลอร์ Nucleo F411RE

2.5.3 จัดทำคู่มือและเอกสารการใช้งาน

คู่มือจะเป็นส่วนที่ผู้มาพัฒนาต่อยอดสามารถที่จะอ่านทำความเข้าใจได้ โดยจะเขียนให้อยู่ในรูปของไฟล์ Markdown (.md) และเก็บเอาไว้ในเว็บไซต์ GitHub ซึ่งเป็นแหล่งรวม Source code ออนไลน์ สามารถเข้าไปดาวน์โหลดไฟล์ลงเครื่องผู้ใช้ แล้วทำการติดตั้งใช้งานได้เลย อีกทั้งผู้ใช้งานสามารถส่ง Code ของตัวเองเข้าระบบ เพื่อช่วยพัฒนาและเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของซอฟต์แวร์ของหุ่นยนต์ได้

2.5.3.1 รายการวัสดุที่ใช้ในการทำหุ่นยนต์ชีวามานอยด์ UTHAI

รายการ	จำนวน (หน่วย)	บาท/หน่วย	ราคารวม(บาท)
===== Processing Unit	-	-	-
Odroid XU4 Embedded Computer	1	3800	3800
Shifter Shield for Odroid XU4	1	1000	1000
===== Sensor	-	-	-
Force sensitive Resistor	8	300	2400
Electronic Component	1	2000	2000
MPU9255 9 Axis IMU Module	1	500	500
===== Structure	-	-	-
อุปกรณ์ส่งกำลัง	1	3000	3000
ค่าวัสดุ เช่น Filament 3D printer , Carbon Fiber	1	8000	8000
สปริง	14	50	700
อุปกรณ์สิ้นเปลือง เช่น กระดาษทราย ฯลฯ	1	1000	1000
===== อุปกรณ์เสริม Motor Dynamixel	-	-	-
Frame สำหรับต่อพ่วงมอเตอร์	4	2000	8000
Horn Bearing	4	1400	5600
อุปกรณ์จ่ายพลังงาน	-	-	-
Power Supply	1	2000	2000
Battery Li-Po 4 cell	1	3000	3000
===== รวม	-	-	48000

ตารางที่ 2.19: ตารางแสดงรายการของวัสดุต่าง ๆ

ใช้สำหรับแจกแจงค่าใช้จ่ายเบื้องต้นเท่านั้น ไม่สามารถใช้อ้างอิงบประมาณแบบละเอียดได้

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

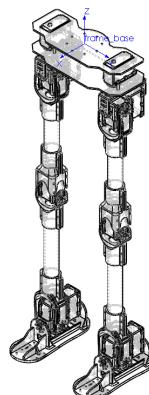
ข้อมูลเบื้องต้นของหุ่นยนต์อิวามานอยด์ UTHAI

ก.1 ค่าคุณสมบัติทางพลศาสตร์

ข้อมูลพลศาสตร์ของหุ่นยนต์อิวามานอยด์ UTHAI ซึ่งจะนำไปใช้ในการทำระบบจำลองด้วยโปรแกรม Gazebo ใน ROS และใช้ในการคำนวณทางคณิตศาสตร์เพื่อทำให้การเดินมีเสถียรภาพ โดยข้อมูลชุดนี้ได้มาจากการคำนวณ Mass Properties ในโปรแกรม SolidWorks และปรับมีค่าใกล้เคียงกับของจริงโดยการเทียบกับเครื่องซึ่งน้ำหนัก

ข้อมูลชุดนี้ประกอบไปด้วย มวล จุดศูนย์กลางมวล และโมเมนต์ความเฉื่อย อีกทั้งข้อมูลยังบอกในมาตรฐาน URDF กับ DH-Parameter ซึ่งทำให้ใช้งานในระบบการคำนวณที่ต่างกันได้

Overall Humanoid

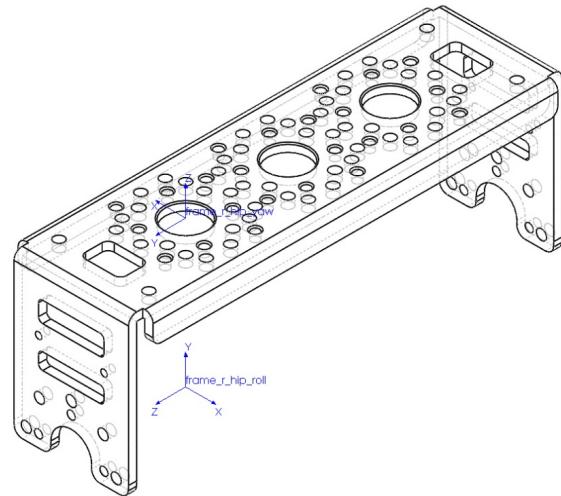


รูปที่ ก.1: ภาพแสดงช่วงล่างทั้งตัว

Link	All Link
Mass (kg)	3.31477475
CoM X (m)	-0.00855772
CoM Y (m)	0.00000000
CoM Z (m)	-0.33375492
Inertia Ixx	0.28641029
Inertia Ixy	-0.00000302
Inertia Ixz	-0.00048106
Inertia Iyy	0.26207601
Inertia Iyz	-0.00061103
Inertia Izz	0.02925799

ตารางที่ ก.1: ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ทั้งตัว

Right Hip Yaw



รูปที่ ก.2: ภาพแสดงก้านต่อ Right Hip Yaw

Link	r_hip_yaw
Mass (kg)	0.09100000
CoM X (m)	0.00000000
CoM Y (m)	0.02864983
CoM Z (m)	-0.02500000
Inertia Ixx	0.00014158
Inertia Ixy	0.00000000
Inertia Ixz	0.00000000
Inertia Iyy	0.00014316
Inertia Iyz	0.00000000
Inertia Izz	0.00002022

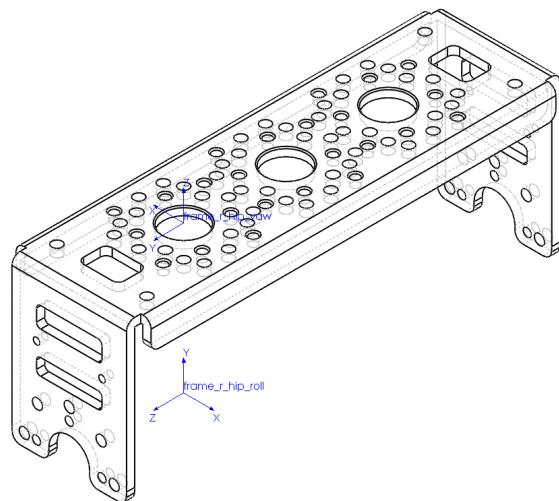
(ก) DH Parameter

Link	r_hip_yaw
Mass (kg)	0.09100000
CoM X (m)	0.00000000
CoM Y (m)	-0.02500000
CoM Z (m)	-0.00735017
Inertia Ixx	0.00014158
Inertia Ixy	0.00000000
Inertia Ixz	0.00000000
Inertia Iyy	0.00002022
Inertia Iyz	0.00000000
Inertia Izz	0.00014316

(ข) URDF

ตารางที่ ก.2: ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ Right Hip Yaw

Left Hip Yaw



รูปที่ ก.3: ภาพแสดงก้านต่อ Left Hip Yaw

Link	l_hip_yaw
Mass (kg)	0.09100000
CoM X (m)	0.00000000
CoM Y (m)	0.02864983
CoM Z (m)	-0.02500000
Inertia Ixx	0.00014158
Inertia Ixy	0.00000000
Inertia Ixz	0.00000000
Inertia Iyy	0.00014316
Inertia Iyz	0.00000000
Inertia Izz	0.00002022

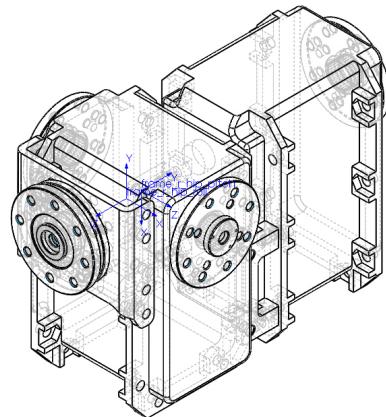
(ก) DH Parameter

Link	l_hip_yaw
Mass (kg)	0.09100000
CoM X (m)	0.00000000
CoM Y (m)	0.02500000
CoM Z (m)	-0.00735017
Inertia Ixx	0.00014158
Inertia Ixy	0.00000000
Inertia Ixz	0.00000000
Inertia Iyy	0.00002022
Inertia Iyz	0.00000000
Inertia Izz	0.00014316

(ข) URDF

ตารางที่ ก.3: ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ Left Hip Yaw

Right Hip Roll



รูปที่ ก.4: ภาพแสดงก้านต่อ Right Hip Roll

Link	r_hip_roll
Mass (kg)	0.34300000
CoM X (m)	0.01526237
CoM Y (m)	0.02152630
CoM Z (m)	0.00000000
Inertia Ixx	0.00026846
Inertia Ixy	0.00000219
Inertia Ixz	-0.00000081
Inertia Iyy	0.00014760
Inertia Iyz	0.00000000
Inertia Izz	0.00032448

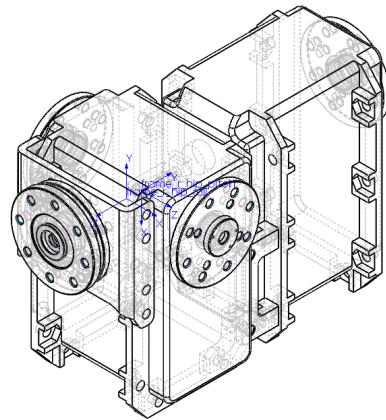
(ก) DH Parameter

Link	r_hip_roll
Mass (kg)	0.34300000
CoM X (m)	0.00000000
CoM Y (m)	-0.01526237
CoM Z (m)	-0.02652630
Inertia Ixx	0.00032448
Inertia Ixy	0.00000081
Inertia Ixz	0.00000000
Inertia Iyy	0.00026846
Inertia Iyz	0.00000219
Inertia Izz	0.00014760

(ข) URDF

ตารางที่ ก.4: ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ Right Hip Roll

Left Hip Roll



รูปที่ ก.5: ภาพแสดงก้านต่อ Left Hip Roll

Link	l_hip_roll
Mass (kg)	0.34300000
CoM X (m)	0.01526237
CoM Y (m)	0.02152630
CoM Z (m)	0.00000000
Inertia Ixx	0.00026846
Inertia Ixy	0.00000219
Inertia Ixz	-0.00000081
Inertia Iyy	0.00014760
Inertia Iyz	0.00000000
Inertia Izz	0.00032448

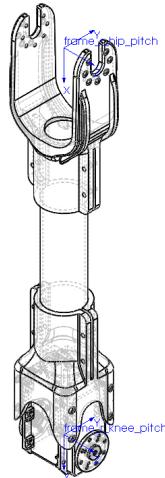
(ก) DH Parameter

Link	l_hip_roll
Mass (kg)	0.34300000
CoM X (m)	0.00000000
CoM Y (m)	-0.01526237
CoM Z (m)	-0.02652630
Inertia Ixx	0.00032448
Inertia Ixy	0.00000081
Inertia Ixz	0.00000000
Inertia Iyy	0.00026846
Inertia Iyz	0.00000219
Inertia Izz	0.00014760

(ข) URDF

ตารางที่ ก.5: ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ Left Hip Roll

Right Hip Pitch



รูปที่ ก.6: ภาพแสดงก้านต่อ Right Hip Pitch

Link	r_hip_pitch
Mass (kg)	0.31800000
CoM X (m)	-0.07862011
CoM Y (m)	0.00000000
CoM Z (m)	0.00000000
Inertia Ixx	0.00011525
Inertia Ixy	0.00000000
Inertia Ixz	0.00000078
Inertia Iyy	0.00254669
Inertia Iyz	0.00000000
Inertia Izz	0.00250848

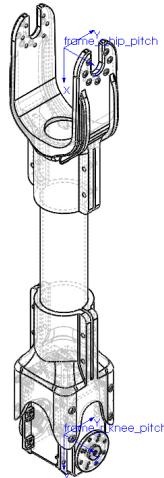
(ก) DH Parameter

Link	r_hip_pitch
Mass (kg)	0.31800000
CoM X (m)	0.22137989
CoM Y (m)	0.00000000
CoM Z (m)	0.00000000
Inertia Ixx	0.00011525
Inertia Ixy	0.00000000
Inertia Ixz	0.00000078
Inertia Iyy	0.00254669
Inertia Iyz	0.00000000
Inertia Izz	0.00250848

(ข) URDF

ตารางที่ ก.6: ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ Right Hip Pitch

Left Hip Pitch



รูปที่ ก.7: ภาพแสดงก้านต่อ Left Hip Pitch

Link	l_hip_pitch
Mass (kg)	0.31800000
CoM X (m)	-0.07862011
CoM Y (m)	0.00000000
CoM Z (m)	0.00000000
Inertia Ixx	0.00011525
Inertia Ixy	0.00000000
Inertia Ixz	0.00000078
Inertia Iyy	0.00254669
Inertia Iyz	0.00000000
Inertia Izz	0.00250848

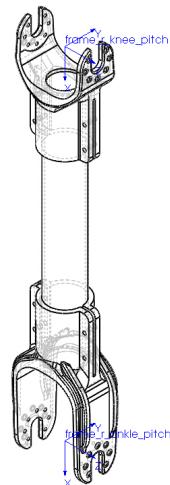
(ก) DH Parameter

Link	l_hip_pitch
Mass (kg)	0.31800000
CoM X (m)	0.22137989
CoM Y (m)	0.00000000
CoM Z (m)	0.00000000
Inertia Ixx	0.00011525
Inertia Ixy	0.00000000
Inertia Ixz	0.00000078
Inertia Iyy	0.00254669
Inertia Iyz	0.00000000
Inertia Izz	0.00250848

(ข) URDF

ตารางที่ ก.7: ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ Left Hip Pitch

Right Knee Pitch



รูปที่ ก.8: ภาพแสดงก้านต่อ Right Knee Pitch

Link	r_knee_pitch
Mass (kg)	0.13800000
CoM X (m)	-0.15211782
CoM Y (m)	0.00000000
CoM Z (m)	0.00000000
Inertia Ixx	0.00011525
Inertia Ixy	0.00000000
Inertia Ixz	0.00000000
Inertia Iyy	0.00127592
Inertia Iyz	0.00000000
Inertia Izz	0.00124960

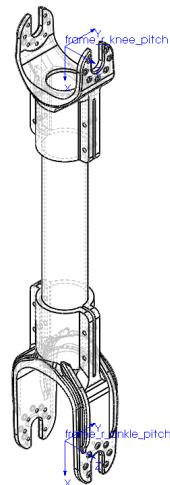
(ก) DH Parameter

Link	r_knee_pitch
Mass (kg)	0.13800000
CoM X (m)	0.16288218
CoM Y (m)	0.00000000
CoM Z (m)	0.00000000
Inertia Ixx	0.00005794
Inertia Ixy	0.00000000
Inertia Ixz	0.00000000
Inertia Iyy	0.00127592
Inertia Iyz	0.00000000
Inertia Izz	0.00124960

(ข) URDF

ตารางที่ ก.8: ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ Right Knee Pitch

Left Knee Pitch



รูปที่ ก.9: ภาพแสดงก้านต่อ Left Knee Pitch

Link	l_knee_pitch
Mass (kg)	0.13800000
CoM X (m)	-0.15211782
CoM Y (m)	0.00000000
CoM Z (m)	0.00000000
Inertia Ixx	0.00011525
Inertia Ixy	0.00000000
Inertia Ixz	0.00000000
Inertia Iyy	0.00127592
Inertia Iyz	0.00000000
Inertia Izz	0.00124960

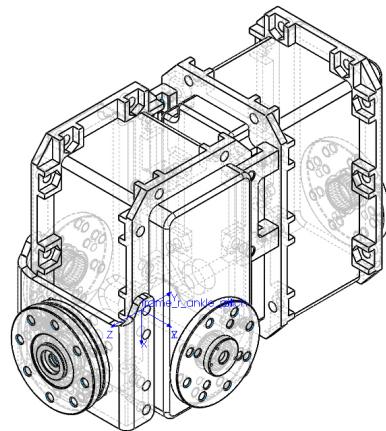
(ก) DH Parameter

Link	l_knee_pitch
Mass (kg)	0.13800000
CoM X (m)	0.16288218
CoM Y (m)	0.00000000
CoM Z (m)	0.00000000
Inertia Ixx	0.00005794
Inertia Ixy	0.00000000
Inertia Ixz	0.00000000
Inertia Iyy	0.00127592
Inertia Iyz	0.00000000
Inertia Izz	0.00124960

(ข) URDF

ตารางที่ ก.9: ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ Left Knee Pitch

Right Ankle Pitch



รูปที่ ก.10: ภาพแสดงก้านต่อ Right Ankle Pitch

Link	r_ankle_pitch
Mass (kg)	0.33138738
CoM X (m)	-0.01526237
CoM Y (m)	0.00000000
CoM Z (m)	-0.02152630
Inertia Ixx	0.00025937
Inertia Ixy	0.00000000
Inertia Ixz	0.00000079
Inertia Iyy	0.00031349
Inertia Iyz	0.00000000
Inertia Izz	0.00014261

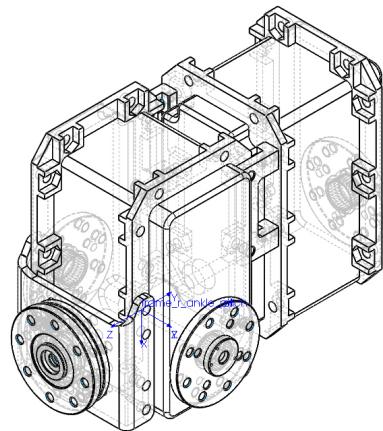
(ก) DH Parameter

Link	r_ankle_pitch
Mass (kg)	0.33138738
CoM X (m)	-0.01526237
CoM Y (m)	0.02152630
CoM Z (m)	0.00000000
Inertia Ixx	0.00025937
Inertia Ixy	0-0.00000212
Inertia Ixz	0.00000079
Inertia Iyy	0.00014261
Inertia Iyz	0.00000000
Inertia Izz	0.00031349

(ข) URDF

ตารางที่ ก.10: ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ Right Ankle Pitch

Left Ankle Pitch



รูปที่ ก.11: ภาพแสดงก้านต่อ Left Ankle Pitch

Link	l_ankle_pitch
Mass (kg)	0.33138738
CoM X (m)	-0.01526237
CoM Y (m)	0.00000000
CoM Z (m)	-0.02152630
Inertia Ixx	0.00025937
Inertia Ixy	0.00000000
Inertia Ixz	0.00000079
Inertia Iyy	0.00031349
Inertia Iyz	0.00000000
Inertia Izz	0.00014261

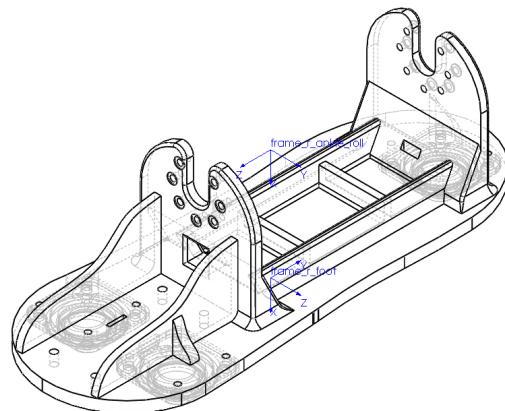
(ก) DH Parameter

Link	l_ankle_pitch
Mass (kg)	0.33138738
CoM X (m)	-0.01526237
CoM Y (m)	0.02152630
CoM Z (m)	0.00000000
Inertia Ixx	0.00025937
Inertia Ixy	0-0.00000212
Inertia Ixz	0.00000079
Inertia Iyy	0.00014261
Inertia Iyz	0.00000000
Inertia Izz	0.00031349

(ข) URDF

ตารางที่ ก.11: ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ Left Ankle Pitch

Right Ankle Roll



รูปที่ ก.12: ภาพแสดงก้านต่อ Right Ankle Roll

Link	r_ankle_roll
Mass (kg)	0.10500000
CoM X (m)	-0.01454118
CoM Y (m)	-0.00034576
CoM Z (m)	-0.00019548
Inertia Ixx	0.00034591
Inertia Ixy	-0.00000857
Inertia Ixz	-0.00000013
Inertia Iyy	0.00004813
Inertia Iyz	-0.00000120
Inertia Izz	0.00032705

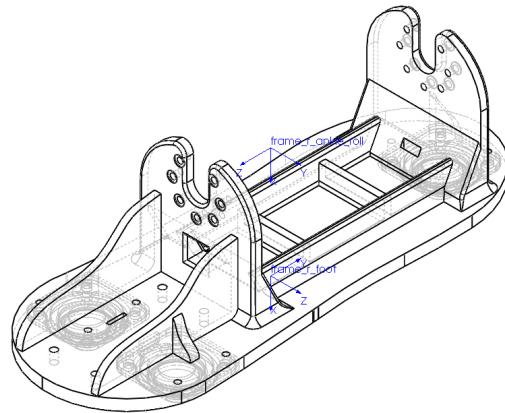
(ก) DH Parameter

Link	r_ankle_roll
Mass (kg)	0.10500000
CoM X (m)	0.03625882
CoM Y (m)	-0.00019548
CoM Z (m)	0.00034576
Inertia Ixx	0.00034591
Inertia Ixy	-0.00000013
Inertia Ixz	0.00000857
Inertia Iyy	0.00032705
Inertia Iyz	0.00000120
Inertia Izz	0.00004813

(ข) URDF

ตารางที่ ก.12: ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ Right Ankle Roll

Left Ankle Roll



รูปที่ ก.13: ภาพแสดงก้านต่อ Left Ankle Roll

Link	l_ankle_roll
Mass (kg)	0.10500000
CoM X (m)	-0.01454118
CoM Y (m)	-0.00034576
CoM Z (m)	-0.00019548
Inertia Ixx	0.00034591
Inertia Ixy	-0.00000857
Inertia Ixz	-0.00000013
Inertia Iyy	0.00004813
Inertia Iyz	-0.00000120
Inertia Izz	0.00032705

(ก) DH Parameter

Link	l_ankle_roll
Mass (kg)	0.10500000
CoM X (m)	0.03625882
CoM Y (m)	-0.00019548
CoM Z (m)	0.00034576
Inertia Ixx	0.00034591
Inertia Ixy	-0.00000013
Inertia Ixz	0.00000857
Inertia Iyy	0.00032705
Inertia Iyz	0.00000120
Inertia Izz	0.00004813

(ข) URDF

ตารางที่ ก.13: ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ Left Ankle Roll

ประวัติผู้เขียน

นายจิรภพ ศรีรัตนอาภรณ์



ชื่อ สกุล	นายจิรภพ ศรีรัตนอาภรณ์
รหัสนักศึกษา	57340500067
วุฒิการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
	วิศวกรรมหุ่นยนต์และระบบอัตโนมัติ
ชื่อสถาบัน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ปีที่สำเร็จการศึกษา	2560

ประวัติผู้เขียน

นายเจษฎากร ท่าไชยวงศ์



ชื่อ สกุล	นายเจษฎากร ท่าไชยวงศ์
รหัสนักศึกษา	57340500067
วุฒิการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
	วิศวกรรมหุ่นยนต์และระบบอัตโนมัติ
ชื่อสถาบัน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ปีที่สำเร็จการศึกษา	2560

ประวัติผู้เขียน

นายวุฒิภัทร โชคอนันตทรัพย์



ชื่อ สกุล	นายวุฒิภัทร โชค_anantraphi
รหัสนักศึกษา	57340500067
วุฒิการศึกษา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ชื่อสถาบัน	วิศวกรรมที่นี่ยนต์และระบบอัตโนมัติ
ปีที่สำเร็จการศึกษา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
	2560