



การพัฒนาต้นแบบหุ่นยนต์สี่ขาที่มีความคล่องตัว
An Agile Quadruped Robot

จัดทำโดย

กลุ่ม ME 02

สุเจตน์	โพดาพล	5930537921
ญาณิศา	พิบูลวรังกูร	5930131721
ชนวีร์	จรรยาขันติกุล	5930092921

ที่ปรึกษา

ศ.ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ

รายงานวิชา Mechanical Engineering Project (2103499)
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ภาคการศึกษาปลาย ปีการศึกษา 2562

กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือของศ.ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำและข้อเสนอแนะอันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งในการดำเนินโครงการ นอกจากนี้โครงการนี้ยังได้รับการสนับสนุนจากศูนย์วิจัย Regional Center of Robotic Technology ทางด้านเครื่องมือ อุปกรณ์ในการขึ้นรูปหุ่นยนต์ และสถานที่ในการทดสอบหุ่นยนต์ ทั้งยังได้รับการสนับสนุนจากชมรม Engineering Innovator Club ในการใช้เครื่องมือและสถานที่เพื่อขึ้นรูปต้นแบบหุ่นยนต์

สุดท้ายนี้คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ภาควิชาเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้เปิดโอกาสให้ได้ทำโครงการในครั้งนี้

คณะผู้จัดทำ

คำนำ

รายงานนี้เป็นส่วนหนึ่งของวิชา MECHANICAL ENGINEERING PROJECT (2103499) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่ออธิบายความสำคัญของโครงการ หลักการออกแบบและการทำงาน รวมถึงอภิปรายผลการทดสอบของการพัฒนาต้นแบบหุ่นยนต์สี่ขาที่มีความคล่องตัว โดยรายงานฉบับนี้ประกอบด้วย 5 ส่วนคือ บทนำ ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง การออกแบบหุ่นยนต์ การทดสอบระบบ และสรุปผลโครงการ

ทางคณะผู้จัดทำได้ทำการพัฒนาต้นแบบหุ่นยนต์สี่ขาที่มีความคล่องตัว เพื่อทดสอบแนวคิดในการออกแบบและความถูกต้องทั้งทางทฤษฎีและการทดลองจริง ในโครงการนี้ได้มีการนำความรู้ทางวิศวกรรมมาเพื่อใช้ในการออกแบบหุ่นยนต์และระบบควบคุมเพื่อให้มีความเสถียรภาพ คณะผู้จัดทำคาดหวังว่าโครงการนี้จะเป็นตัวอย่างหนึ่งในการศึกษาการออกแบบและควบคุมหุ่นยนต์สี่ขา และช่วยให้ผู้อ่านมีความเข้าใจในการพัฒนาต้นแบบหุ่นยนต์มากขึ้นไม่มากก็น้อย

คณะผู้จัดทำ

วันที่ 20 เมษายน พ.ศ. 2563

บทคัดย่อ

โครงการนี้ทำการออกแบบพัฒนาหุ่นยนต์สี่ขาต้นแบบที่มีความคล่องตัว คือสามารถเคลื่อนไหวได้ว่องไวในสภาพแวดล้อมแตกต่างกันไป เพื่อที่จะเป็นต้นแบบหรือพื้นฐานสำหรับนำไปพัฒนาหุ่นยนต์ที่มีความซับซ้อนมากขึ้นในอนาคต หุ่นยนต์ที่พัฒนามี 8 องศาอิสระ โครงการนี้จะเน้นในการพัฒนาขาของหุ่นยนต์ ซึ่งเป็นหัวใจของการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ ชุดขับเคลื่อนที่แต่ละขาของหุ่นยนต์จะเป็นตัวขับเคลื่อนที่มี ความยืดหยุ่น โดยขนาดและโครงสร้างได้ถูกกำหนดและคำนวณเบื้องต้นเพื่อนำไปเลือกส่วนประกอบสำคัญของขาหุ่นยนต์ เช่น มอเตอร์, สายพาน และสปริง จะมีการออกแบบหุ่นยนต์ในรูปแบบของสามมิติโดยใช้โปรแกรมที่เป็นมาตรฐานอุตสาหกรรมและสามารถนำข้อมูลการออกแบบไปใช้ในกระบวนการผลิตได้ ในส่วนของ การควบคุมจะมีการควบคุมแบบป้อนกลับ โดยการออกแบบจะคำนึงถึงเสถียรภาพของการทำงานของระบบ ควบคุมเป็นหลัก

คำหลัก หุ่นยนต์สี่ขา ระบบขับเคลื่อนที่มีความยืดหยุ่น ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ เสถียรภาพ

Abstract

This project is to develop a prototype of an agile quadruped robot. The knowledge outcomes of this project can be applied to the further development of an advantage agile quadruped robot. The quadruped robot has 8 degrees of freedom. The main concentration of this project is to design and develop the legs of the robot. Each joint of each leg will consist of series elastic actuators to form 2 degrees of freedom. The structure of the agile quadruped robot will be carefully design so that joint components such a motor, belt spring are suitable to form the robot as small as possible. 3D solid modelling, CAD/CAM, using an industrial standard CAD, is used to develop this robot. In the control of dynamic part, a robot uses feedback control. This dynamic stability of the robot is our main concentration.

Keywords Quadruped robot, Series elastic actuator, Feedback control, Stability

สารบัญ

บทที่ 1 บทนำ.....	11
1.1 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	11
1.2 ทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	12
1.2.1 ระบบและกลไกขับเคลื่อนหุ่นยนต์สี่ขา.....	12
1.2.2 ระบบควบคุมการเดินของหุ่นยนต์สี่ขา.....	15
1.3 ขอบเขตและขั้นตอนการดำเนินโครงการ	17
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	18
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในการออกแบบระบบทางกล.....	18
2.1.1 แรงบิดที่ข้อ และ FBD.....	18
2.1.2 สปริงอัด	19
2.1.3 การเลือกสายพานและพูลเลย์.....	21
2.1.4 การออกแบบเพลลา	23
2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในการออกแบบระบบควบคุม	25
2.2.1 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ.....	25
2.2.2 ระบบพลศาสตร์เชิงกล.....	26
2.2.3 ระบบควบคุมรูปแบบการเดิน	27
บทที่ 3 การออกแบบหุ่นยนต์.....	28
3.1 แนวคิดในการออกแบบ	29
3.2 การออกแบบระบบทางกล.....	29
3.2.1 การออกแบบขา	29
3.2.3 การออกแบบระบบขับเคลื่อนและมอเตอร์	36
3.3 การออกแบบระบบไฟฟ้าและสื่อสาร.....	43
3.3.1 ระบบไฟฟ้า	45

3.3.1 ระบบสื่อสาร	45
3.4.1 การหาระบบพลศาสตร์	47
3.4.2 ระบบควบคุมมอเตอร์	51
3.4.3 รูปแบบวิธีในการเดินของหุ่นยนต์.....	54
บทที่ 4 การทดสอบระบบ	58
4.1 การทดสอบหนึ่งขา	58
4.1.1 การทดสอบการยืน.....	58
4.1.2 การทดสอบการขยับ	58
4.1.2 การทดสอบการกระโดด.....	59
4.2 การทดสอบทั้งระบบ.....	60
4.2.1 การทดสอบการยืน.....	60
4.2.2 การทดสอบการเดิน	60
บทที่ 5 สรุปผลโครงงาน.....	63
เอกสารอ้างอิง.....	64
ภาคผนวก	65
ภาคผนวก ก. รายละเอียดชิ้นส่วนที่สำคัญของหุ่นยนต์.....	65
ภาคผนวก ข. ตารางและกราฟแสดงค่าในการคำนวณ	70
ภาคผนวก ค. Drawing	79

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 1 หุ่นยนต์ HyQ หุ่นยนต์สี่ขาที่ขับเคลื่อนด้วยระบบไฮดรอลิก [1]	12
รูปที่ 2 หุ่นยนต์ Ken หุ่นยนต์สี่ขาที่ขับเคลื่อนด้วยระบบนิวเมติกส์ [2]	12
รูปที่ 3 หุ่นยนต์ MIT Cheetah 3 หุ่นยนต์ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า	13
รูปที่ 4 ตัวขับเคลื่อนที่มีความยืดหยุ่น (SEA: Series elastic actuator).....	13
รูปที่ 5 หุ่นยนต์ StarETH หุ่นยนต์สี่ขาที่ขับเคลื่อนด้วย SEA	14
รูปที่ 6 MIT mini cheetah's Modular Actuator	14
รูปที่ 7 MIT mini cheetah	14
รูปที่ 8 รูปแบบการควบคุมขาจากวงจรกำเนิดสัญญาณ.....	15
รูปที่ 9 รูปแบบการเดินของขาที่ได้จากสัญญาณที่ปรับแต่งแล้ว.....	15
รูปที่ 10 สัญญาณท่าทางการเดินที่มีเฟสต่างกันไปในแต่ละขา.....	16
รูปที่ 11 ตัวอย่างท่าทางการเดินของหุ่นยนต์สี่ขา.....	16
รูปที่ 12 แผนภาพอิสระของวัตถุ.....	18
รูปที่ 13 กลไกของขาอย่างง่าย.....	19
รูปที่ 14 แผนภาพอิสระของวัตถุของการกลไกของขาอย่างง่าย	19
รูปที่ 15 รูปแบบปลายของสปริงกด	20
รูปที่ 16 parameter ที่สำคัญต่าง ๆ ของสปริง	20
รูปที่ 17 ขนาดของเพลลาที่ตำแหน่งข้อต่อล่างในหน่วยมิลลิเมตร.....	24
รูปที่ 18 ขนาดของเพลลาที่ตำแหน่งข้อต่อบนในหน่วยมิลลิเมตร	24
รูปที่ 19 รูปแบบของตัวขับเคลื่อนที่มีความยืดหยุ่น	25
รูปที่ 20 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ.....	26
รูปที่ 21 แสดงแบบจำลองของขาหุ่นยนต์	27
รูปที่ 22 ขนาดของหุ่นยนต์.....	28
รูปที่ 23 ตำแหน่งการวางมอเตอร์	30
รูปที่ 24 ลักษณะการวางตัวของขา	30
รูปที่ 25 แสดงกลไกในขาส่วนล่าง.....	31
รูปที่ 26 แสดงแบบจำลองของกลไก	31
รูปที่ 27 แสดงตัวยึดท่อ.....	32
รูปที่ 28 แสดงเพลลาข้อต่อ	32
รูปที่ 29 แสดงขาส่วนล่างที่ทำจากอะลูมิเนียม.....	32
รูปที่ 30 แสดงโมเดลสามมิติจากโปรแกรม CATIA	33
รูปที่ 31 แสดงแบบจำลองโครงขาส่วนบน	33

รูปที่ 32 ลักษณะการต่อมอเตอร์และโครงมอเตอร์เข้ากับส่วนขาและลำตัว.....	34
รูปที่ 33 แสดงโมเดลสามมิติจากโปรแกรม CATIA	34
รูปที่ 34 แสดงแบบจำลองของขา.....	35
รูปที่ 35 ขาหุ่นยนต์ที่เสร็จสมบูรณ์.....	35
รูปที่ 36 โมเดลสามมิติจากโปรแกรม CATIA แสดงลำตัวของหุ่นยนต์.....	36
รูปที่ 37 แบบจำลองแรกของตัวขับเคลื่อนที่มีความยืดหยุ่น.....	36
รูปที่ 38 โมเดลที่ 1 ของตัวขับเคลื่อนที่มีความยืดหยุ่นของข้อต่อล่าง ที่ถูกออกแบบด้วยโปรแกรม CATIA....	37
รูปที่ 39 ต้นแบบที่ 1 ของการตัวขับเคลื่อนที่มีความยืดหยุ่นที่ข้อต่อล่าง.....	37
รูปที่ 40 โมเดลที่ 2 ของตัวขับเคลื่อนที่มีความยืดหยุ่นของข้อต่อล่าง ที่ถูกออกแบบด้วยโปรแกรม CATIA....	37
รูปที่ 41 ต้นแบบที่ 2 ของตัวขับเคลื่อนที่มีความยืดหยุ่นของข้อต่อล่าง	38
รูปที่ 42 โมเดลที่ 1 ของตัวขับเคลื่อนที่มีความยืดหยุ่นของข้อต่อบน ที่ถูกออกแบบด้วยโปรแกรม CATIA....	38
รูปที่ 43 โมเดลที่ 2 ของตัวขับเคลื่อนที่มีความยืดหยุ่นของข้อต่อบน ที่ถูกออกแบบด้วยโปรแกรม CATIA....	38
รูปที่ 44 ต้นแบบที่ 2 ของตัวขับเคลื่อนที่มีความยืดหยุ่นของข้อต่อบน	39
รูปที่ 45 แสดงการต่อมอเตอร์กับระบบทดกำลัง.....	39
รูปที่ 46 X8308 Brushless motor	40
รูปที่ 47 Sun gear module 0.635.....	41
รูปที่ 48 Ring gear และ Planet gear module 0.635.....	41
รูปที่ 49 Brushless motor เมื่อประกอบ planetary gear, case และ เพลา.....	42
รูปที่ 50 Brushless motor เมื่อประกอบ planetary gear, case และ เพลา (ด้านข้าง).....	42
รูปที่ 51 บอร์ด Raspberry Pi 4.....	43
รูปที่ 52 บอร์ด NUCLEO-G431	43
รูปที่ 53 บอร์ดควบคุมมอเตอร์ (ESC).....	43
รูปที่ 54 บอร์ดสื่อสารแบบ CAN.....	44
รูปที่ 55 แบตเตอรี่.....	44
รูปที่ 56 แผ่นกระจายไฟ	44
รูปที่ 57 บอร์ดสื่อสารแบบ CAN.....	44
รูปที่ 58 แสดงแผนภาพวงจรไฟฟ้าของหุ่นยนต์.....	45
รูปที่ 59 ชิ้นส่วนทั้งหมดของหุ่นยนต์.....	46
รูปที่ 60 หุ่นยนต์เมื่อประกอบทั้งระบบ	46
รูปที่ 61 แผนภาพบล็อกของตัวควบคุมเมื่อใส่เฉพาะค่าเกน P.....	47
รูปที่ 62 step response ของ Outer Motor.....	48
รูปที่ 63 step response ของ Inner Motor.....	49

รูปที่ 64 เปรียบเทียบ step response ของ Outer Motor ระหว่างค่าที่วัดได้จริง (สีฟ้า) และ ค่าที่ได้จากแบบจำลอง (สีเทา)	50
รูปที่ 65 เปรียบเทียบ step response ของ Inner Motor ระหว่างค่าที่วัดได้จริง (สีฟ้า) และ ค่าที่ได้จากแบบจำลอง (สีส้ม)	50
รูปที่ 66 แผนภาพบล็อคของตัวควบคุม	51
รูปที่ 67 root locus ของ Speed-current-Plant loop ของ Outer Motor	52
รูปที่ 68 root locus ของ Speed-current-Plant loop ของ Outer Motor	52
รูปที่ 69 Step Response ของ Outer Motor	53
รูปที่ 70 Step Response ของ Inner Motor	53
รูปที่ 71 แสดงสัญญาณรูปฟันเลื่อย.....	54
รูปที่ 72 รูปแบบการเดินของขาหุ่นยนต์แบบที่ 1.....	55
รูปที่ 73 รูปแบบการเดินของขาหุ่นยนต์แบบที่ 2.....	56
รูปที่ 74 ลำดับขาของหุ่นยนต์	56
รูปที่ 75 สัญญาณรูปแบบการเดิน	57
รูปที่ 76 แทนทดสอบหนึ่งขา.....	58
รูปที่ 77 การทดสอบการขยับขาของหุ่นยนต์	59
รูปที่ 78 การทดสอบการยืน	60
รูปที่ 79 การทดสอบการเดินแบบที่ 1.....	61
รูปที่ 80 การทดสอบการเดินแบบที่ 2.....	62
รูปที่ 81 ขนาดของเพลลาที่ข้อต่อล่าง	72
รูปที่ 82 แรง, โมเมนต์, ทอร์ก และโมเมนต์รวมที่เกิดขึ้นบนเพลลา	73

สารบัญตาราง

ตารางที่ 1 ค่าที่สำคัญของหุ่นยนต์.....	28
ตารางที่ 2 รายละเอียดของมอเตอร์.....	40
ตารางที่ 3 รายละเอียดของ planetary gear.....	41
ตารางที่ 4 ค่าเกณฑ์ของระบบควบคุมสำหรับการหา Dynamics model.....	48
ตารางที่ 5 ค่าของ ξ และ ω_n	49
ตารางที่ 6 ค่าของ k และ b_e	50
ตารางที่ 7 ค่าเกณฑ์ของระบบควบคุม.....	53
ตารางที่ 8 ค่าเกณฑ์ของระบบควบคุม.....	54
ตารางที่ 9 ค่าของตัวแปรในการทำแผนที่.....	55
ตารางที่ 10 น้ำหนักของหุ่นยนต์แยกตามองค์ประกอบ.....	69
ตารางที่ 11 ค่าของตัวแปรในสมการหาแรงบิดที่เกิดขึ้น.....	70
ตารางที่ 12 ค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นที่ขา.....	70
ตารางที่ 13 ค่าของตัวแปรในสมการหาแรงอัดที่เกิดที่สปริงสำหรับขาส่วนล่าง (tibia).....	70
ตารางที่ 14 ค่าของตัวแปรในสมการหาแรงอัดที่เกิดที่สปริงสำหรับขาส่วนบน (femur).....	71
ตารางที่ 15 ลักษณะของสปริงที่ต้องการสำหรับขาส่วนล่าง.....	71
ตารางที่ 16 ลักษณะของสปริงที่ต้องการสำหรับขาส่วนบน.....	71
ตารางที่ 17 ลักษณะของสายพานและพลูที่ต้องการ.....	72
ตารางที่ 18 แรงที่เกิดขึ้นบนเพลลาของข้อต่อล่าง.....	72
ตารางที่ 19 ค่าตัวแปรและสัมประสิทธิ์ในการคำนวณขนาดเพลลาข้อต่อล่างที่ตำแหน่ง C ตามรูปที่ 35.....	74
ตารางที่ 20 ค่าตัวแปรและสัมประสิทธิ์ในการคำนวณขนาดเพลลา ข้อต่อล่างที่ตำแหน่ง C ตามรูปที่ 35 ใน ขั้นตอนของการทำซ้ำ.....	75
ตารางที่ 21 ค่าตัวแปรและสัมประสิทธิ์ในการคำนวณ ขนาดเพลลาข้อต่อล่างที่ตำแหน่ง F ตามรูปที่ 35.....	76
ตารางที่ 22 ค่าตัวแปรและสัมประสิทธิ์ในการคำนวณขนาดเพลลา ข้อต่อล่างที่ตำแหน่ง F ตามรูปที่ 35 ใน ขั้นตอนของการทำซ้ำ.....	77
ตารางที่ 23 ค่าตัวแปรและสัมประสิทธิ์ในการคำนวณขนาดเพลลาข้อต่อล่างที่ตำแหน่ง D ตามรูปที่ 35.....	78

บทที่ 1 บทนำ

ในปัจจุบันหุ่นยนต์เป็นเทคโนโลยีหนึ่งที่มีการใช้อย่างแพร่หลายมากขึ้น ในอดีตนั้นหุ่นยนต์ส่วนมากถูกใช้ในโรงงานหรือใช้ในสิ่งแวดล้อมที่มีการควบคุมสถานะต่าง ๆ ไว้ เช่น หุ่นยนต์อุตสาหกรรม (industrial robot) ซึ่งแตกต่างกับในปัจจุบันที่มีการนำหุ่นยนต์มาใช้ในพื้นที่เปิดที่มีพื้นที่ทำงาน (workspace) และบริเวณที่ไม่ได้มีการควบคุมไว้มากขึ้น คือ มีการนำหุ่นยนต์เคลื่อนที่ (mobile robot) มาใช้ในชีวิตประจำวัน ตัวอย่างเช่น มีการนำหุ่นยนต์ดูแลผู้สูงอายุมาใช้ที่พักอาศัย หรือหุ่นยนต์พยาบาลมาใช้ในโรงพยาบาล ซึ่งการนำหุ่นยนต์มาทำงานในสิ่งแวดล้อมที่ไม่ได้ควบคุมไว้ส่งผลการออกแบบหุ่นยนต์ในปัจจุบันมีความท้าทายมากกว่าในอดีต

ทั้งนี้ในการออกแบบหุ่นยนต์เพื่อทำงานในสภาพแวดล้อมที่ไม่ได้มีการควบคุม และใช้งานในพื้นที่ร่วมกับมนุษย์นั้น มีปัจจัยหลายประการที่ผู้ออกแบบจะต้องคำนึงถึง ประการแรกคือ การนำหุ่นยนต์มาใช้งานบนพื้นผิวที่ไม่สม่ำเสมอ หรือต่างระดับกัน หุ่นยนต์แบบที่มีขาสามารถรับมือกับปัญหาเหล่านี้ได้ดีกว่าหุ่นยนต์ที่ขับเคลื่อนด้วยล้อ นอกจากนี้ข้อจำกัดเป็นจำนวนขาที่น้อยที่สุดที่ทำให้หุ่นยนต์มีเสถียรภาพในการเคลื่อนที่ ประการถัดมา คือการที่หุ่นยนต์ต้องเผชิญกับสิ่งรบกวนภายนอกที่ไม่สามารถควบคุมได้ ส่งผลให้หุ่นยนต์ที่มีโครงสร้างแข็งเกิดความเสียหายได้ง่าย ดังนั้นจึงต้องมีการออกแบบให้ข้อต่อมีความยืดหยุ่นเพื่อรับมือกับสิ่งรบกวนเหล่านี้

จากปัญหาที่ต้องคำนึงในการออกแบบข้างต้น จึงมีการออกแบบหุ่นยนต์สี่ขาที่มีลักษณะเลียนแบบโครงร่างของสิ่งมีชีวิตที่มีทั้งความแข็งแรงและความยืดหยุ่น เพื่อให้หุ่นยนต์สามารถทำงานได้ในสิ่งแวดล้อมที่ไม่ได้มีการควบคุม สามารถเดินหรือวิ่งบนทางที่ไม่ราบเรียบ และสามารถสมดุลตัวเองได้หากมีแรงภายนอกมากระทำ ซึ่งในโครงงานนี้มีจุดประสงค์เพื่อที่จะออกแบบและพัฒนาต้นแบบหุ่นยนต์สี่ขาที่มีความคล่องตัวและสามารถใช้งานได้ในสภาพแวดล้อมดังที่กล่าวมาข้างต้น

1.1 วัตถุประสงค์ของโครงงาน

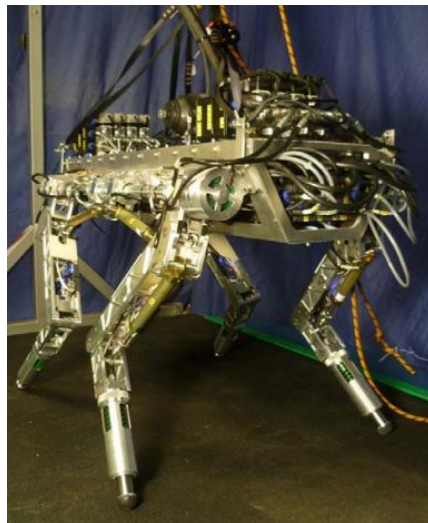
วัตถุประสงค์ของโครงงานคือ การพัฒนาหุ่นยนต์สี่ขาต้นแบบที่มีลักษณะ คือมีความคล่องตัวของการเคลื่อนที่ในสภาพแวดล้อมที่มีความแตกต่างกันในระดับหนึ่ง สามารถนำความรู้ทางวิศวกรรมทั้งทางทฤษฎีและทางปฏิบัติมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบได้อย่างเหมาะสม

1.2 ทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

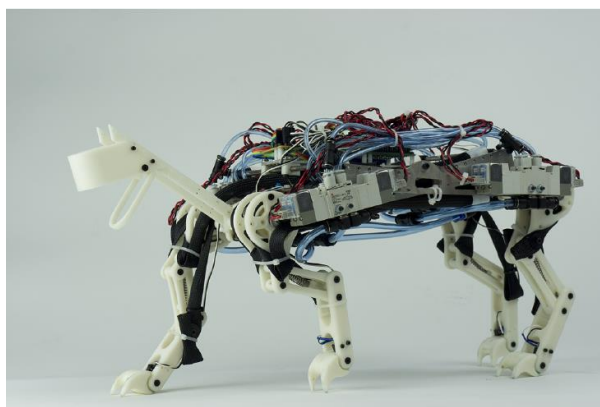
1.2.1 ระบบและกลไกขับเคลื่อนหุ่นยนต์สี่ขา

a. การขับเคลื่อนด้วยระบบไฮดรอลิก (hydraulics) หรือ นิวเมติกส์ (pneumatic)

หุ่นยนต์สี่ขาแบบแรกที่ถูกพัฒนามามากขับเคลื่อนด้วยระบบไฮดรอลิก หรือระบบนิวเมติกส์ โดยจะมีลักษณะเป็นกระบอกสูบอยู่ที่ระหว่างข้อพับ ซึ่งข้อดีของการขับเคลื่อนแบบนี้คือมีแรงขับที่มากเมื่อเทียบกับตัวขับเคลื่อน (actuator) อื่น ในช่วงเวลานั้น แต่ข้อเสียก็คือระบบไฮดรอลิก หรือระบบนิวเมติกส์นั้นมีราคาแพง และส่งผลให้การออกแบบของตัวหุ่นยนต์มีแนวโน้มที่จะนั้นมีขนาดใหญ่เนื่องจากขนาดของกระบอกสูบ และในการใช้พลังงานนั้นถือว่ามีประสิทธิภาพต่ำ และระบบขับเคลื่อนทั้งสองประเภทนี้ยังทำการควบคุมให้แม่นยำได้ยาก ซึ่งหุ่นยนต์ที่ใช้ระบบขับเคลื่อนประเภทนี้มีลักษณะดังรูปที่ 1 และ 2



รูปที่ 1 หุ่นยนต์ HyQ หุ่นยนต์สี่ขาที่ขับเคลื่อนด้วยระบบไฮดรอลิก [1]



รูปที่ 2 หุ่นยนต์ Ken หุ่นยนต์สี่ขาที่ขับเคลื่อนด้วยระบบนิวเมติกส์ [2]

b. การขับเคลื่อนด้วยระบบมอเตอร์ไฟฟ้า (electric motor)

หุ่นยนต์สี่ขาแบบที่มีการพัฒนาต่อมาเป็นหุ่นยนต์ที่ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า เนื่องด้วยมอเตอร์มีการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพที่มากขึ้น กล่าวคือ มีแรงบิดมากขึ้นแต่น้ำหนักร้อยลง ทำให้มอเตอร์สามารถ

นำมาใช้ขับเคลื่อนหุ่นยนต์ขาที่ต้องการแรงบิดสูง ถึงแม้ว่ามอเตอร์จะยังมีแรงบิดที่น้อยกว่าตัวขับเคลื่อนระบบไฮดรอลิกหรือระบบนิวเมติกส์ แต่มอเตอร์มีข้อดีที่สามารถทำการควบคุมได้อย่างแม่นยำกว่า และมีประสิทธิภาพมากกว่า โดยตัวอย่างหุ่นยนต์ที่ใช้ระบบขับเคลื่อนประเภทนี้คือ หุ่นยนต์ MIT Cheetah 3 [3] ของ MIT ดังแสดงในรูปที่ 3

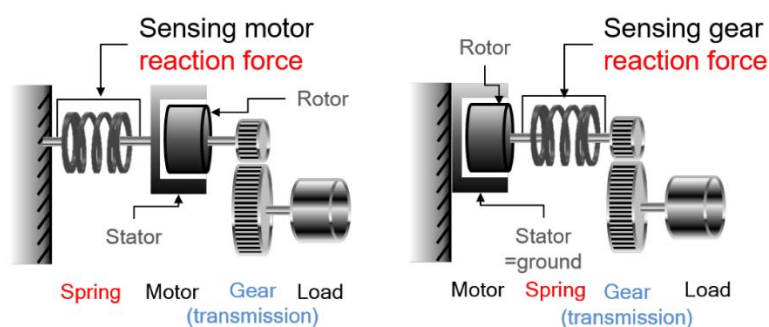


รูปที่ 3 หุ่นยนต์ MIT Cheetah 3 หุ่นยนต์ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า

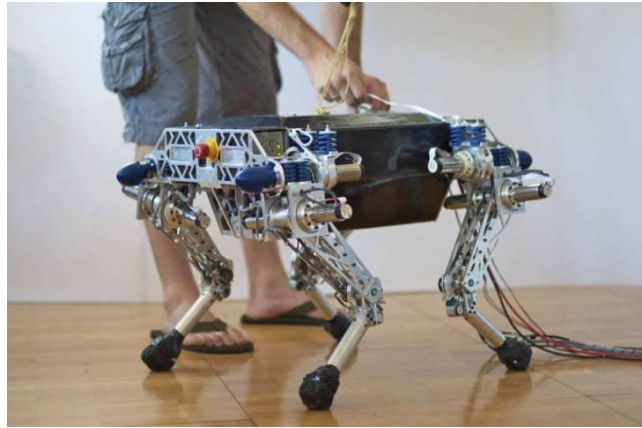
c. การขับเคลื่อนด้วยตัวขับเคลื่อนที่มีความยืดหยุ่น (SEA: Series elastic actuator)

ในการศึกษาโครงสร้างของสิ่งมีชีวิต ซึ่งพบว่ามีส่วนที่เป็นโครงสร้างแข็งอย่างกระดูก และโครงสร้างที่ยืดหยุ่นอย่างกล้ามเนื้อ ทั้งสองส่วนนี้ทำให้สิ่งมีชีวิตสามารถเคลื่อนที่บนพื้นผิวที่แตกต่างกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในการออกแบบขา จะออกแบบให้สามารถประพัตตัวได้คล้ายคลึงกับขาสัตว์ โดยให้โครงสร้างด้านนอกของหุ่นยนต์ที่ทำจากโลหะแทนโครงสร้างแข็ง และใช้สปริงแทนโครงสร้างที่ยืดหยุ่น และเมื่อรวมการออกแบบนี้กับ gear box, มอเตอร์ไฟฟ้าแรงบิดสูง (high torque electric motor) และ อุปกรณ์วัดระยะที่เปลี่ยนไปของสปริงแล้ว ก็จะเรียกสิ่งนี้ว่า ตัวขับเคลื่อนที่มีความยืดหยุ่น (SEA: Series elastic actuator) [4] ดังแสดงในรูปที่ 4

โดยข้อดีของกลไกการขับเคลื่อนแบบนี้คือทำให้สามารถออกแบบหุ่นยนต์สี่ขาที่มีขนาดเล็กและเบาลงได้ เนื่องจากมอเตอร์ไฟฟ้าโดยเฉพาะมอเตอร์แบบไร้แปรงถ่าน (brushless DC motor) มีขนาดเล็กแต่แรงบิดมากขึ้น และในแง่ของการรักษาลังงาน วิธีขับเคลื่อนนี้ก็มีประสิทธิภาพกว่าแบบที่ใช้ระบบไฮดรอลิกและนิวเมติกส์ โดยตัวอย่างของหุ่นยนต์สี่ขาที่ขับเคลื่อนด้วยตัวขับเคลื่อนที่มีความยืดหยุ่นคือหุ่นยนต์ StarLETH ของ ETH [5] ดังแสดงในรูปที่ 5



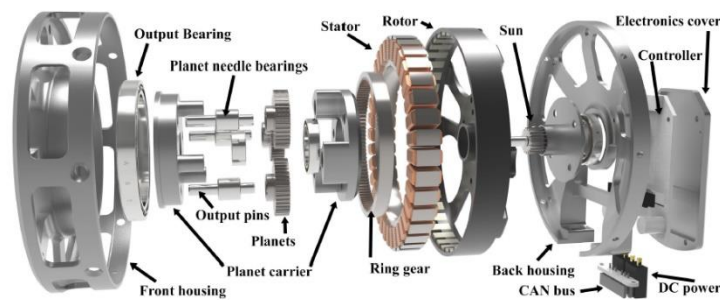
รูปที่ 4 ตัวขับเคลื่อนที่มีความยืดหยุ่น (SEA: Series elastic actuator)



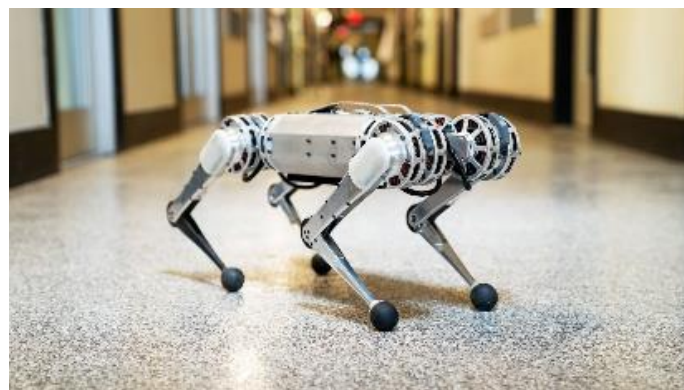
รูปที่ 5 หุ่นยนต์ StarETH หุ่นยนต์สี่ขาที่ขับเคลื่อนด้วย SEA

d. การขับเคลื่อนด้วย High torque brushless (compliance with virtual spring)

เมื่อมอเตอร์ไฟฟ้าถูกพัฒนาถึงจุดที่ให้แรงบิดเยอะและขนาดเล็กแล้ว เมื่อทำเป็น modular actuator ที่มีประสิทธิภาพและมีความเร็วในการตอบสนองมากพอ ดังเช่น MIT mini cheetah's Modular Actuator [6] ดังในรูป 6 ก็จะใช้ modular actuator ขับเคลื่อนแต่ละข้อของหุ่นยนต์สี่ขาโดยตรงโดยไม่มีการติดสปริง เนื่องจากระบบขับเคลื่อนได้สร้างแรงต้านเสมือนหรือสปริงเสมือน (virtual spring) ทำหน้าที่ในส่วนของสปริงแทนแล้ว ข้อดีของการใช้กลไกขับเคลื่อนแบบนี้คือ ช่วยลดความซับซ้อนในการออกแบบทางกลของหุ่นยนต์ลง เนื่องจากไม่ต้องติดสปริง แต่ก็มีข้อเสียคือ modular actuator ลักษณะนี้มีราคาสูงมาก อย่างไรก็ตามการพัฒนาหุ่นยนต์สี่ขาช่วงหลัง ๆ มีแนวโน้มจะใช้กลไกแบบนี้ในการขับเคลื่อน ตัวอย่างหุ่นยนต์ประเภทนี้ได้แก่ หุ่นยนต์ MIT mini cheetah ดังแสดงในรูปที่ 7



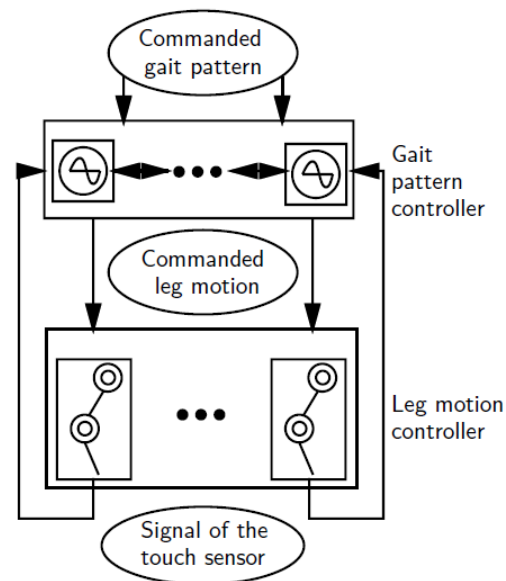
รูปที่ 6 MIT mini cheetah's Modular Actuator



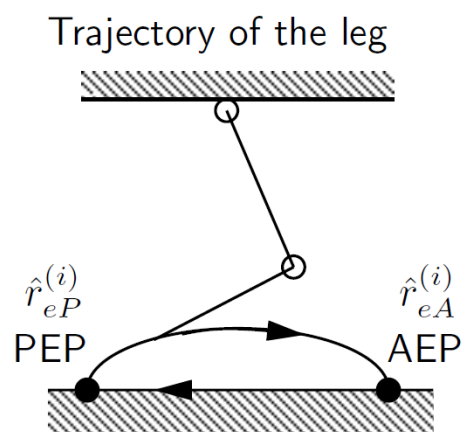
รูปที่ 7 MIT mini cheetah

1.2.2 ระบบควบคุมการเดินของหุ่นยนต์สี่ขา

ในการควบคุมรูปแบบการเดินหุ่นยนต์สี่ขานั้นมีสองส่วนหลักที่ต้องพิจารณาและออกแบบ ในส่วนแรกคือการออกแบบการเคลื่อนที่ของขาแต่ละข้างของหุ่นยนต์ โดยจะมีการสร้างสัญญาณเป็นรอบจากวงจรกำเนิดสัญญาณ (oscillator) [7] แล้วส่งไปควบคุมจลนศาสตร์ของขาแต่ละข้าง (leg kinematic) โดยสัญญาณที่สร้างขึ้นมานั้นจะมีการปรับแต่งภายหลัง (post processing) เพื่อให้ได้สัญญาณที่เหมาะสมในการควบคุมต่อหุ่นยนต์แต่ละชนิด โดยมีรูปแบบการส่งสัญญาณดังแสดงในรูปที่ 8 และมีรูปแบบการเดินที่ผ่านการปรับแต่งแล้วดังแสดงในรูปที่ 9

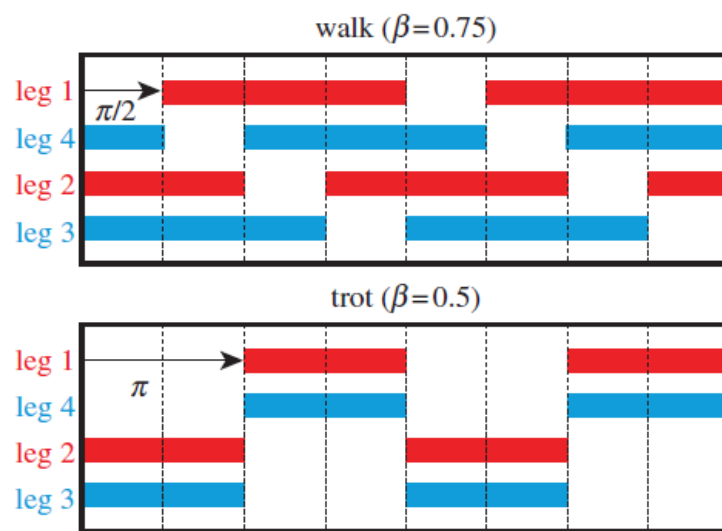


รูปที่ 8 รูปแบบการควบคุมขาจากวงจรกำเนิดสัญญาณ

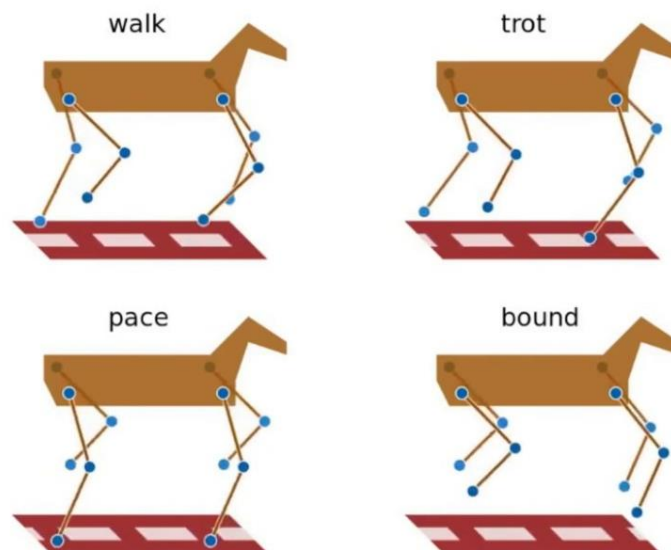


รูปที่ 9 รูปแบบการเดินของขาที่ได้จากสัญญาณที่ปรับแต่งแล้ว

อีกส่วนหนึ่งที่สำคัญเป็นการควบคุมท่าทางการเดิน (gait) ซึ่งเป็นการควบคุมความสัมพันธ์ในการเคลื่อนไหวของขาทั้งสี่ข้างของหุ่นยนต์ กล่าวคือ ขาแต่ละข้างจะมีเฟส (phase) หรือจังหวะในการเดินที่แตกต่างกัน โดยที่อาจจะมียุทธศาสตร์การเดินที่เหมือนหรือแตกต่างกันก็ได้ ดังนั้นการกำหนดเฟสหรือจังหวะให้เหมาะสมจึงเป็นปัจจัยสำคัญในการควบคุมให้ได้อาการเดินต่าง ๆ โดยตัวอย่างสัญญาณท่าทางการเดินที่มีเฟสต่างกันในแต่ละขาเป็นดังแสดงในรูปที่ 10 [8] โดยตัวอย่างท่าทางการเดินโดยทั่วไปสำหรับหุ่นยนต์สี่ขา มีตัวอย่างท่าทางเช่น การเดิน (walk), การวิ่งเหยาะ ๆ (trot), การวิ่ง (pace) และ การเดินแบบกระโดด (bound) ดังแสดงในรูปที่ 11 [9]



รูปที่ 10 สัญญาณท่าทางการเดินที่มีเฟสต่างกันไปในแต่ละขา



รูปที่ 11 ตัวอย่างท่าทางการเดินของหุ่นยนต์สี่ขา

1.3 ขอบเขตและขั้นตอนการดำเนินโครงการ

โครงการนี้มีระยะเวลาในการดำเนินโครงการโดยประมาณ 8 เดือน คือ ตั้งแต่เดือนกันยายน พ.ศ. 2562 จนถึงเดือนเมษายน พ.ศ. 2563 โดยแบ่งขั้นตอนการดำเนินโครงการเป็น 4 ส่วนหลัก โดยมีขั้นตอนการดำเนินโครงการโดยละเอียดแสดงในภาคผนวก ก.

1. สืบค้นงานวิจัยและพิจารณาแนวคิดในการออกแบบ

โครงสร้างของหุ่นยนต์สี่ขาที่จะทำการออกแบบแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลักได้แก่ ลำตัว (body) ขาส่วนบน (femur) และขาส่วนล่าง (tibia) ในขั้นตอนแรกของการดำเนินโครงการเป็นการสืบค้นและทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบจุดเด่น จุดด้อยของการออกแบบหุ่นยนต์สี่ขาแบบต่าง ๆ จากนั้นนำข้อดีและข้อเสียที่ได้มาพิจารณาบนข้อจำกัดทางด้านเวลาและความรู้เพื่อนำมาประมาณขนาด น้ำหนัก และรูปร่างของหุ่นยนต์ ต่อมาได้ทำการเสนอแนวคิดในการออกแบบส่วนต่าง ๆ ของหุ่นยนต์ และปรับแก้ก่อนที่จะไปทำการออกแบบโดยละเอียดต่อไป

2. การออกแบบทางกล

เป็นขั้นตอนที่ถือว่ามีความสำคัญมากที่สุดในโครงการนี้ การออกแบบทางกลจะให้ความสำคัญในการพัฒนาส่วนขาและข้อต่อให้มีความยืดหยุ่น ในส่วนนี้เป็นการออกแบบโดยละเอียด คือ มีการคำนวณแรงที่เกิดขึ้นในสภาวะต่าง ๆ เพื่อกำหนดขนาดของชิ้นส่วนต่าง ๆ ที่มีความสำคัญ เช่น ขนาดเพลาและขนาดสายพาน เลือกชิ้นส่วนมาตรฐาน มีการกำหนดขนาดและเลือกมอเตอร์กระแสตรงที่จะนำมาใช้ในการขับเคลื่อนทั้งสองส่วน โดยเริ่มต้นจากการออกแบบโมเดลสามมิติด้วยโปรแกรมมาตรฐานอุตสาหกรรม จากนั้นนำไปขึ้นรูปต้นแบบด้วยเทคโนโลยีการสร้างต้นแบบรวดเร็ว (rapid prototyping) ด้วยเครื่องพิมพ์สามมิติ และเครื่องตัดเลเซอร์เพื่อทดสอบแนวคิด และทำการปรับปรุงแบบ ท้ายที่สุดคือการนำแบบที่ผ่านการแก้ไขแล้วไปผลิตชิ้นส่วนต่าง ๆ รวมถึงส่วนขาและลำตัวด้วยเครื่องมืออุตสาหกรรมดังเช่น เครื่องซีเอ็นซี (CNC) และทำการประกอบเป็นหุ่นยนต์และติดตั้งอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ ต่อไป

3. การออกแบบระบบควบคุม

การพัฒนาในส่วนนี้จะใช้ระบบควบคุมแบบป้อนกลับในการควบคุมมอเตอร์กระแสตรง และควบคุมการเดินของหุ่นยนต์โดยกำหนดตำแหน่งข้อต่อและปลายขาของขาแต่ละข้าง นอกจากนี้ราคามุมเอียงของหุ่นยนต์มาคำนวณและควบคุมตำแหน่งลำตัวของหุ่นยนต์เทียบกับพื้นเพื่อให้หุ่นยนต์สามารถทรงตัว เดินหน้าถอยหลัง หรือเคลื่อนที่ในแบบต่าง ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

4. การทดสอบและประเมินผล

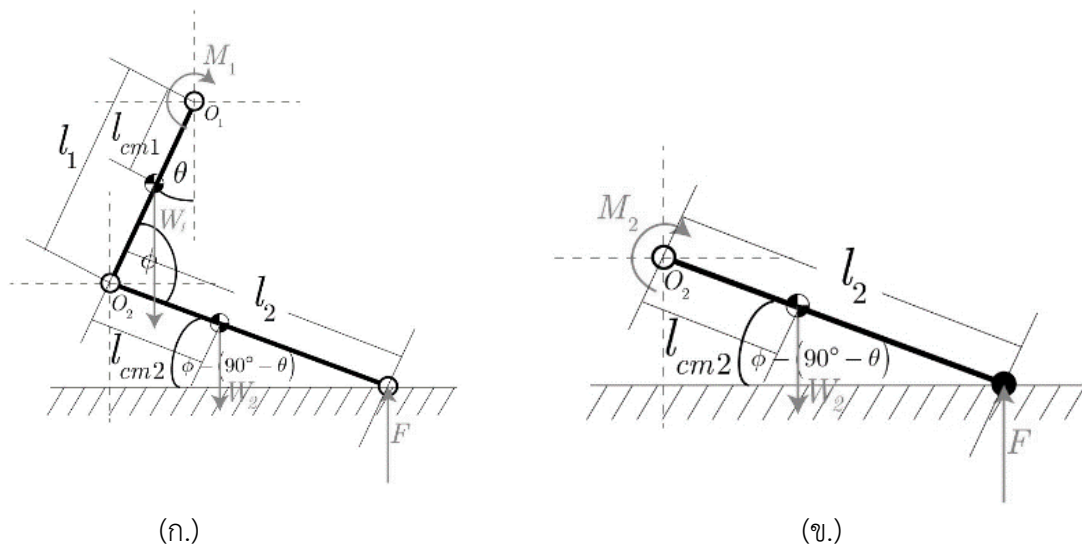
การทดสอบหุ่นยนต์สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก คือ การทดสอบการเดิน (walking gait) ในท่าทางต่าง ๆ ที่กำหนด และการทดสอบการทรงตัวให้มีเสถียรภาพ (stabilizing) จากนั้นประเมินผลที่ได้จากการทดสอบ

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในการออกแบบระบบทางกล

2.1.1 แรงบิดที่ข้อ และ FBD

การออกแบบหุ่นยนต์สี่ขาเริ่มพัฒนาจากส่วนขา โดยมีการคำนวณแรงเบื้องต้นในท่าที่เกิดวิกฤต และสามารถเขียนแผนภาพอิสระของวัตถุ (free body diagram) ได้ดังแสดงในรูป 12



รูปที่ 12 แผนภาพอิสระของวัตถุ

(ก.) ขาส่วนบน (ข.) ขาส่วนล่าง

จากแผนภาพอิสระของวัตถุข้างต้น และจาก $\sum \vec{M} = \vec{0}$ และ $\vec{M} = \vec{r} \times \vec{F}$ จะสามารถตั้งสมการเพื่อหาแรงบิดได้ดังนี้

สมการ 2.1

$$M_1 = W_1 \cdot l_{cm1} \sin(\theta) + W_2 \cdot l_1 \sin \theta - l_{cm2} \cos \phi - 90^\circ - \theta + F \cdot l_2 \cos \phi - 90^\circ - \theta - l_1 \sin \theta$$

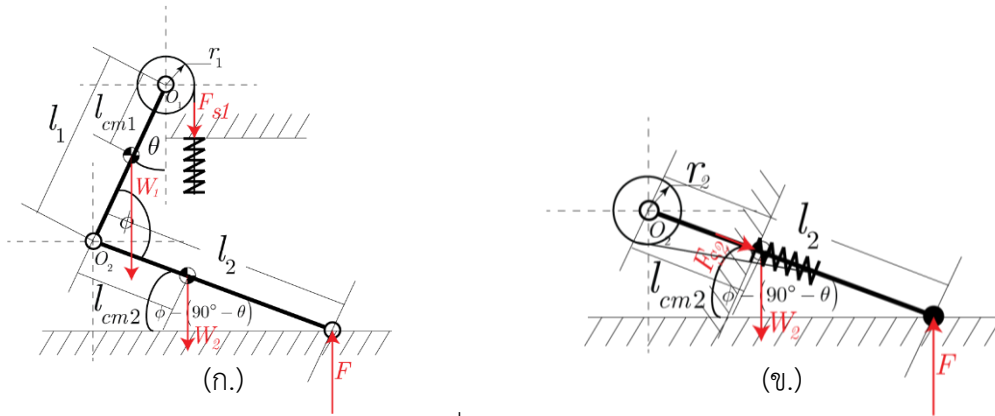
สมการ 2.2

$$M_2 = F \cdot l_2 \cos \phi - 90^\circ - \theta - W_2 \cdot l_{cm2} \cos \phi - 90^\circ - \theta$$

โดยจะนำแต่ละตัวแปร ซึ่งค่าของแต่ละตัวแปรเป็นไปตาม ตารางที่ 9 ภาคผนวก ข. และแรงบิดในแต่ละข้อจากการคำนวณตามสมการที่ 2.1 และ 2.2 ดังแสดงในตารางที่ 10 ภาคผนวก ข. จะนำไปใช้ในการออกแบบในบทที่ 3 ต่อไป

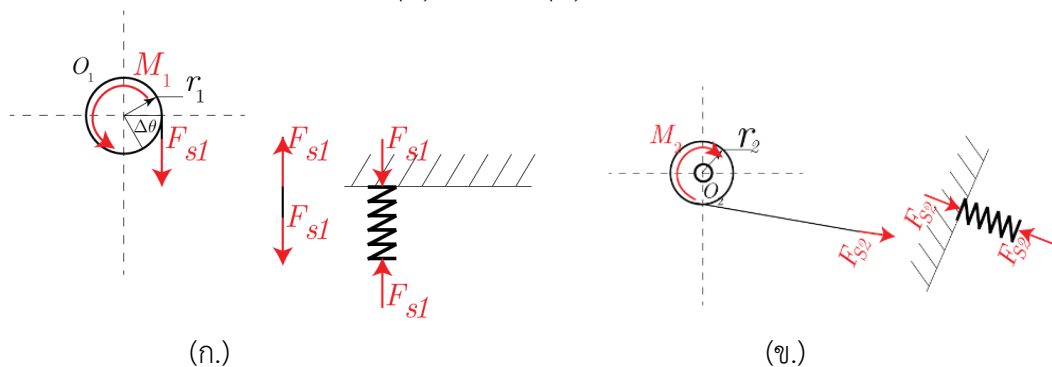
2.1.2 สปริงอัด

จากหัวข้อที่ 2.1.1 จะได้ค่าแรงบิดของแต่ละข้อซึ่งจะทำมาคำนวณเพื่อหาสปริงอัดที่เหมาะสมตามการออกแบบอย่างง่ายดังในรูปที่ 13 และสามารถเขียนแผนภาพอิสระของวัตถุ (free body diagram) ได้ดังแสดงในรูปที่ 14



รูปที่ 13 กลไกของขาอย่างง่าย

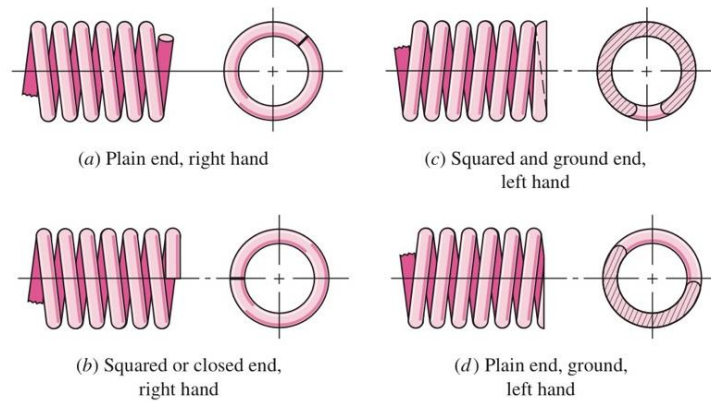
(ก.) ขาส้นบน (ข.) ขาส้นล่าง



รูปที่ 14 แผนภาพอิสระของวัตถุของการกลไกของขาอย่างง่าย

(ก.) ขาส้นบน (ข.) ขาส้นล่าง

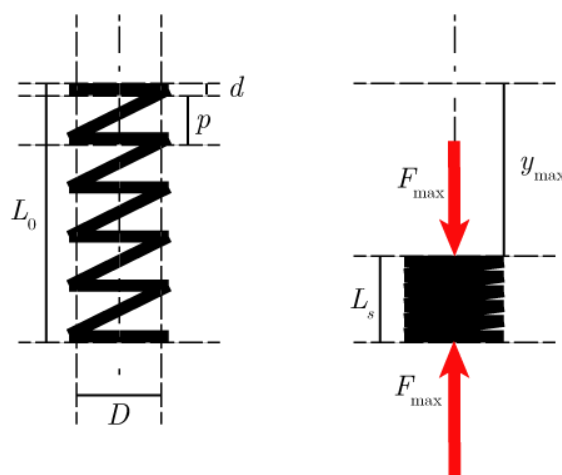
โดยนิยามและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับสปริงอัด (mechanical compression spring) ตามหนังสือ Shigley's Mechanical Engineering Design [10] โดยสังเขปมีดังนี้ สปริงเป็นอุปกรณ์ที่ใช้เพิ่มความยืดหยุ่น (flexibility) ให้แก่ระบบ ซึ่งยอมให้เกิดระยะเปลี่ยนไปได้ (deflection) ที่เกิดจากแรงหรือแรงบิดกระทำตัวสปริง โดยพลังงานที่เกิดขึ้นจะถูกเก็บในตัวสปริงที่ระยะเปลี่ยนไปและถูกปล่อยออกมาเมื่อกลับสู่สภาวะเดิม และสปริงกด เป็นอุปกรณ์ที่เมื่อรับแรงกด จะเก็บสะสมพลังงานจากแรงนั้น และมีระยะเปลี่ยนไป โดยปกติปลายสปริงกดจะมี 4 รูปแบบดังแสดงในรูปที่ 15 ซึ่งในโครงการนี้ ได้เลือกใช้สปริงกดแบบ Squared and ground end



รูปที่ 15 รูปแบบปลายของสปริงกด

และมี parameter ที่เกี่ยวข้องดังนี้

- d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของขดลวดสปริง [mm] ดังแสดงในรูปที่ 16
- D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของสปริง [mm] ดังแสดงในรูปที่ 16
- S_{sy} คือ tensile strength [Mpa] มีค่าตามวัสดุที่ใช้ทำขดลวดสปริง
- F_{max} คือ แรงสูงสุด [N] ที่สปริงรับได้ ดังแสดงในรูปที่ 16
- y_{max} คือ ระยะที่สปริงเปลี่ยนไปสูงสุด [mm] หรือ deflection ซึ่งเกิดจากแรงสูงสุดที่สปริงรับได้ ดังแสดงในรูปที่ 16
- G คือ shear modulus [Mpa] มีค่าตามวัสดุที่ใช้ทำขดลวดสปริง
- N_t คือ จำนวนขดลวดทั้งหมด
- N_a คือ จำนวนขดลวดที่ส่งผล ขึ้นอยู่กับลักษณะปลายของสปริงกด
- L_o คือ ความยาวของสปริงเมื่อยังไม่ถูกกระทำ [mm] หรือ free length ดังแสดงในรูปที่ 16
- L_s คือ ความยาวของสปริงเมื่อหดสูงสุด หรือถูกแรงสูงสุดที่สปริงรับได้กระทำ [mm] หรือ solid length ดังแสดงในรูปที่ 11



รูปที่ 16 parameter ที่สำคัญต่าง ๆ ของสปริง

โดยมีสมการที่เกี่ยวข้องคือ

สมการ 2.3

$$S_{sy} = 0.65 \cdot \frac{A}{d^m}$$

สมการ 2.4

$$D = \frac{S_{sy} \cdot \pi \cdot d^3}{8 \cdot n_s \cdot (1 + \xi) \cdot F_{\max}}$$

สมการ 2.5

$$N_a = \frac{G \cdot d^4 \cdot y_{\max}}{8 \cdot D^3 \cdot F_{\max}}$$

สมการ 2.6

$$N_t = N_a + 2$$

สมการ 2.7

$$L_s = d \cdot N_t$$

สมการ 2.8

$$L_o = L_s + (1 + \xi) \cdot y_{\max}$$

และจะสามารถหาแรงอัดสูงสุดที่เกิดที่สปริงสำหรับขาส่วนล่าง ($F_{s2_{\max}}$) ได้ตามสมการดังต่อไปนี้

สมการ 2.9

$$F_{s2_{\max}} = \frac{M_{2_{\max}}}{r_2}$$

สำหรับขาส่วนบน (femur) จะหาแรงอัดที่เกิดที่สปริงสูงสุด ($F_{s1_{\max}}$) ได้ตามสมการดังต่อไปนี้

สมการ 2.10

$$F_{s1_{\max}} = \frac{M_{1_{\max}}}{r_1}$$

ซึ่งจะได้แรงอัดของแต่ละข้อ ค่าพารามิเตอร์ และ ลักษณะของสปริงตามลักษณะสปริงที่ได้จากสมการข้างต้น ดังแสดงในตารางที่ 11, 12, 13 และ 14 ภาคผนวก ข. ตามลำดับ และจะนำไปใช้การออกแบบในบทที่ 3 ต่อไป

2.1.3 การเลือกสายพานและพูลเล่

ในการคำนวณหาสายพานและพูลเล่ที่เหมาะสมนั้นได้ทำตามขั้นตอนในการคำนวณและตารางของแคตตาล็อกของผู้จำหน่ายนั้น ๆ โดยมีการกำหนดตัวแปรและเงื่อนไขดังนี้

1. มีอัตราทด
2. ระยะห่างระหว่างพูลเล่ทั้ง 2 โดยประมาณ

3. ชนิดของสายพาน

และมีสมการที่เกี่ยวข้องคือ

สมการ 2.11

$$K_s = K_o + K_r + K_i$$

สมการ 2.12

$$T_q = T \times K_s$$

สมการ 2.13

$$P_d = \frac{T_q \times \omega}{9550}$$

สมการ 2.14

$$n = \frac{teeth_{large}}{teeth_{small}}$$

สมการ 2.15

$$L_p' = 2 \cdot C' + \frac{\pi \cdot D_p + d_p}{2} - \frac{(D_p - d_p)^2}{4 \cdot C'}$$

สมการ 2.16

$$C = \frac{b + \sqrt{b^2 - 8 \cdot (D_p - d_p)^2}}{8} \quad \text{โดย } b = 2 \cdot L_p - \pi \cdot D_p + d_p$$

สมการ 2.17

$$B_w' = \frac{P_d}{P_s \cdot K_m} \times W_p$$

โดย

K คือ correction factor

T คือ แรงบิดที่ต้องการส่งผ่าน $[N \cdot m]$

T_q คือ แรงบิดที่ต้องการ $[N \cdot m]$

P_d คือ กำลังที่ต้องการ $[kW]$

ω คือ ความเร็วรอบ $[rpm]$

n คือ อัตราทด

L_p' คือ ความยาวของสายพานชั่วคราว $[mm]$

L_p คือ ความยาวของสายพานจริง $[mm]$

C' คือ ระยะห่างระหว่างพูลเล่ชั่วคราว $[mm]$

C คือ ระยะห่างระหว่างพูลเล่จริง $[mm]$

D_p คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง pitch พูลเล่ใหญ่ $[mm]$

d_p คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง pitch พูลเล่เล็ก [mm]

P_s คือ กำลังที่สามารถส่งผ่านอ้างอิง

W_p คือ ความกว้างของพูลเล่อ้างอิง [mm]

B_w' คือ ความกว้างของพูลเล่ [mm]

จากสมการข้างต้น ข้อกำหนดและเงื่อนไขต่าง ๆ จะทำให้ได้ลักษณะของสายพานและพูลล์ที่ต้องการ โดยมีลักษณะดังแสดงใน ตารางที่ 15 ภาคผนวก ข. ซึ่งนำค่าที่ได้ไปคำนวณเพลลาและออกแบบขาส่วนบนใน บทที่ 3 ต่อไป

2.1.4 การออกแบบเพลลา

ในการออกแบบเพลลาที่เหมาะสมนั้นได้ออกแบบอ้างอิงตามหนังสือ Shigley's Machine Design [10] โดยกำหนดตัวแปรและเงื่อนไขต่าง ๆ ดังนี้

1. พิจารณาการทำงานที่ตำแหน่งวิกฤต (critical location) ซึ่งก็คือตำแหน่งที่ขากำลังจะก้าวไปข้างหน้า
2. วัสดุของเพลลาเป็นสแตนเลส
3. พิจารณาการทำ key way ร่วมด้วย

และมีสมการที่เกี่ยวข้องคือ

สมการ 2.18

$$\sigma_a = K_f \frac{32M_a}{\pi d^3} \quad \sigma_m = K_f \frac{32M_m}{\pi d^3}$$

สมการ 2.19

$$\tau_a = K_{fs} \frac{16T_a}{\pi d^3} \quad \tau_m = K_{fs} \frac{16T_m}{\pi d^3}$$

สมการ 2.20

$$\sigma'_a = \left[\left(\frac{32K_f M_a}{\pi d^3} \right)^2 + 3 \left(\frac{16K_{fs} T_a}{\pi d^3} \right)^2 \right]^{1/2}$$

สมการ 2.21

$$\sigma'_m = \left[\left(\frac{32K_f M_m}{\pi d^3} \right)^2 + 3 \left(\frac{16K_{fs} T_m}{\pi d^3} \right)^2 \right]^{1/2}$$

สมการ 2.22

$$\frac{\sigma'_a}{S_e} + \frac{\sigma'_m}{S_{ut}} = \frac{1}{n}$$

สมการ 2.23

$$\sigma'_{\max} = \left[\left(\frac{32K_f (M_m + M_a)}{\pi d^3} \right)^2 + 3 \left(\frac{16K_{fs} (T_m + T_a)}{\pi d^3} \right)^2 \right]^{1/2}$$

สมการ 2.24

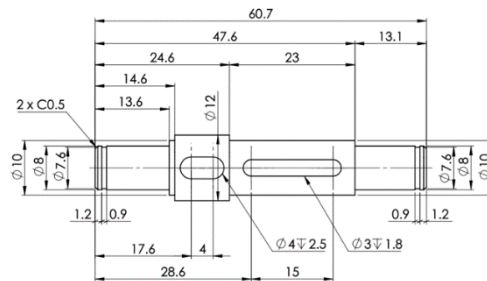
$$n_y = \frac{S_y}{\sigma'_{\max}}$$

สมการ 2.25

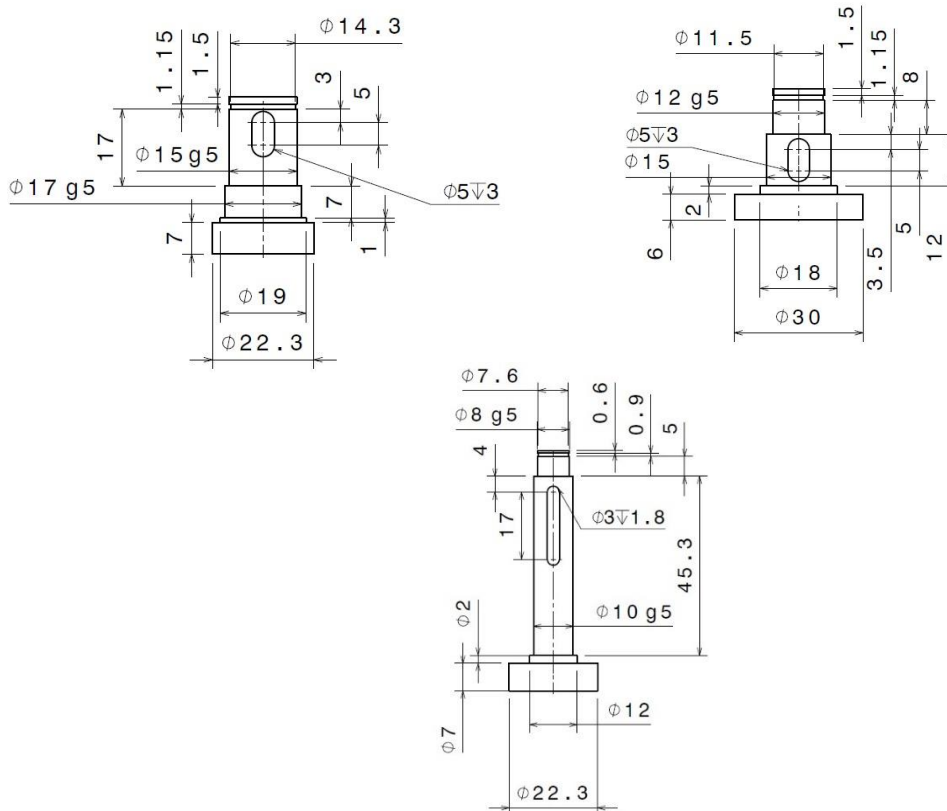
$$S_e = k_a k_b k_c k_d k_e k_f S'_e$$

โดยที่ $k_a = 2.7 S_{ut}^{-0.265}$, $k_b = 0.9$, $k_c = k_d = k_e = 1$ และ $k_f = 1.7$

จากสมการข้างต้น ข้อกำหนดและเงื่อนไขต่าง ๆ จะทำให้ได้ลักษณะของเพลาคู่ที่ตำแหน่งข้อต่อ และเพลาคู่ที่ตำแหน่งข้อต่อแสดงในรูปที่ 17 และ 18 ตามลำดับ โดยวิธีการคำนวณแสดงใน ตารางที่ 18, 19, 20, 21, 22 และ 23 ภาคผนวก ข.



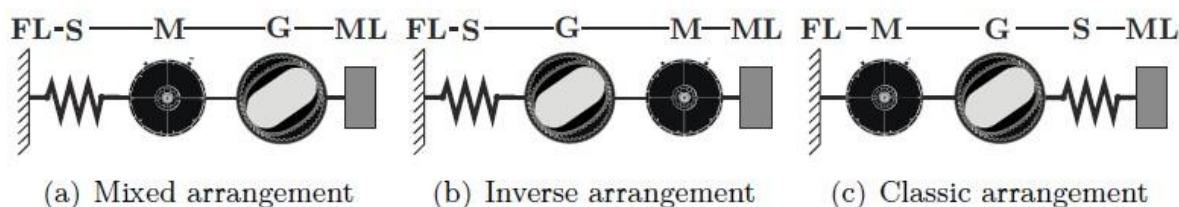
รูปที่ 17 ขนาดของเพลาคู่ที่ตำแหน่งข้อต่อในหน่วยมิลลิเมตร



รูปที่ 18 ขนาดของเพลาคู่ที่ตำแหน่งข้อต่อในหน่วยมิลลิเมตร

2.1.5 การออกแบบตัวขับเคลื่อนที่มีความยืดหยุ่น

การที่จะออกแบบหุ่นยนต์ให้มีประสิทธิภาพสูงและสามารถทำงานได้ในพื้นที่ไม่สม่ำเสมอ นั้น เป็นเรื่องยากที่จะใช้เพียงแค่ตัวขับเคลื่อน และระบบควบคุมในการจัดการ เนื่องจากตัวขับเคลื่อนหรือมอเตอร์นั้นต้องมีประสิทธิภาพในการสร้างแรงบิด (torque) ที่สูง และสามารถตรวจจับตำแหน่งได้ ซึ่งการที่มอเตอร์ที่สามารถสร้างแรงบิดได้สูงนั้นมักมีค่าแบนด์วิธ (bandwidth) และค่าเกน (gain) ที่สูงทำให้ให้มอเตอร์จะเกิดการสั่นและไม่สามารถเข้าสู่ภาวะสมดุลได้ตามที่ต้องการ อีกทั้งยังมีโอกาสเกิดความเสียหายต่อมอเตอร์ได้ง่าย อันเกิดจากแรงกระแทกภายนอกที่ส่งผ่านมาสู่มอเตอร์ ดังนั้นการประยุกต์ใช้การออกแบบตัวขับเคลื่อนที่มีความยืดหยุ่น โดยการต่อสปริงเข้ากับระบบเดิมที่มีเพียงมอเตอร์ และเกียร์ทดกำลังนั้น จะเข้ามามีส่วนสำคัญในการลดปัญหาดังกล่าว เพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุม, ป้องกันความเสียหายจากแรงกระแทก, เพิ่มกำลังในการทำงาน และเพิ่มศักยภาพในการกักเก็บพลังงาน ซึ่งการออกแบบตัวขับเคลื่อนที่มีความยืดหยุ่นนั้นประกอบไปด้วย 3 รูปแบบได้แก่ a. Mixed arrangement b. Inverse arrangement และ c. Classical arrangement ดังแสดงในรูปที่ 19 โดยที่ตัวขับเคลื่อนแบบ Classic arrangement นั้นมีประสิทธิภาพในการกักเก็บพลังงาน และส่งผลให้ระบบนั้นมีการตอบสนองที่ดีที่สุด แต่เนื่องด้วยการออกแบบหุ่นยนต์นั้นมีข้อจำกัดทางด้านขนาดของตัวหุ่นยนต์และพื้นที่ในการติดตั้ง ตัวขับเคลื่อนแบบ Mixed arrangement และ Inverse arrangement จึงถูกออกแบบมาเพื่อใช้ในข้อจำกัดดังกล่าว โดยโปรเจกต์นี้มีการประยุกต์ใช้ตัวขับเคลื่อนที่มีความยืดหยุ่น 2 รูปแบบได้แก่ Classic arrangement ที่ข้อต่อล่าง และ Mixed arrangement ที่ข้อต่อบน

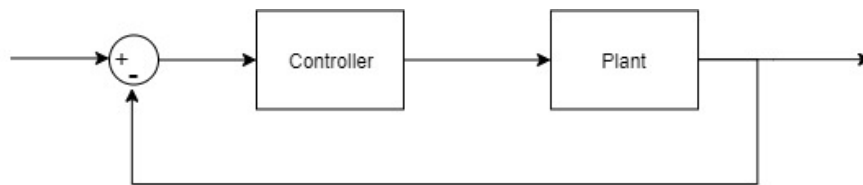


รูปที่ 19 รูปแบบของตัวขับเคลื่อนที่มีความยืดหยุ่น

2.2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องในการออกแบบระบบควบคุม

2.2.1 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ

ในการควบคุมหุ่นยนต์ให้เป็นไปตามที่ต้องการจำเป็นต้องใช้ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ (feedback control system) เพื่อควบคุมตำแหน่งของขาหุ่นยนต์ให้เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการ โดยระบบควบคุมแบบป้อนกลับจะทำให้ระบบสามารถทนต่อสิ่งรบกวนที่เข้ามาได้ ในการแบบป้อนกลับนั้นสามารถออกแบบตัวควบคุม (controller) และเขียนแผนภาพบล็อก (block diagram) ได้ดังแสดงในรูปที่ 20 โดยระบบควบคุมมีส่วนประกอบที่สำคัญสองส่วนคือ ตัวควบคุม (controller) ที่ต้องทำการออกแบบต่อไป และส่วนของระบบ (plant) ซึ่งในระบบนี้คือมอเตอร์ที่ใช้ในการขับเคลื่อนหุ่นยนต์และขาของหุ่นยนต์



รูปที่ 20 ระบบควบคุมแบบป้อนกลับ

2.2.2 ระบบพลศาสตร์เชิงกล

การหา Dynamics model หรือ การหาแบบจำลองของระบบพลวัตทำให้สามารถเข้าใจธรรมชาติของระบบที่สนใจยิ่งขึ้น(ทั้งทางกลและทางไฟฟ้า) ซึ่งจะสามารถทำให้เลือกและออกแบบวิธีการควบคุมระบบดังกล่าวได้ดียิ่งขึ้นไปด้วย โดยในโครงการนี้ สิ่งที่เราผู้จัดทำต้องการควบคุมคือมอเตอร์ที่ใช้ในการขับเคลื่อนหุ่นยนต์และขาของหุ่นยนต์ ซึ่งสามารถอธิบายโดยสมการดังต่อไปนี้

สมการ 2.26

$$T_m - \frac{T_n}{eff \cdot N} = J_e \ddot{\theta} + b_e \dot{\theta}$$

สมการ 2.27

$$J_e = J_m \cdot N + \frac{J_L}{eff \cdot N}$$

สมการ 2.28

$$b_e = b_m \cdot N + \frac{b_L}{eff \cdot N}$$

สมการ 2.29

$$T_m = k \cdot I$$

โดย

T_m คือ torque ของมอเตอร์ [N-m]

T_n คือ torque ของ disturbance ที่เข้ามาในระบบ[N-m]

eff คือ ค่าประสิทธิภาพของอัตราทด [%]

N คือ อัตราทด

J_m คือ moment of inertia ของมอเตอร์ [kg-m²]

J_L คือ moment of inertia ของ load [kg-m²]

b_m คือ ตัวหน่วงบิดของมอเตอร์

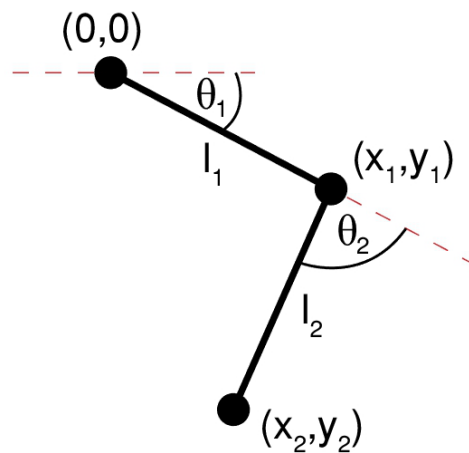
b_L คือ ตัวหน่วงบิดของ load

k คือ ค่าเกนของมอเตอร์ [N-m/amp]

I คือ กระแสไฟฟ้าที่เข้าสู่มอเตอร์ [amp]

2.2.3 ระบบควบคุมรูปแบบการเดิน

ในการควบคุมรูปแบบการเดินของหุ่นยนต์จำเป็นที่จะต้องรู้ตำแหน่งของปลายเท้าและเข่า และมุมของมอเตอร์แต่ละตัว โดยตำแหน่งของปลายเท้าและเข่าสามารถหาได้จากจลนศาสตร์ทางตรง (forward kinematics) และมุมของมอเตอร์จะสามารถหาได้จากจลนศาสตร์ผกผัน (inverse kinematics) ขาแต่ละข้างของหุ่นยนต์สามารถจำลองได้เป็น แขนกล (manipulator) ที่มี 2 องศาอิสระ (degree of freedom) ซึ่งจะสามารถวาดแบบจำลองได้ดังแสดงในรูปที่ 21



รูปที่ 21 แสดงแบบจำลองของขาหุ่นยนต์

จากรูปที่ 21 จะสามารถหาตำแหน่งของปลายเท้า (x_2, y_2) และเข่า (x_1, y_1) เมื่อทราบความยาวขาของหุ่นยนต์จากจลนศาสตร์ทางตรงได้ดังนี้

$$x_1 = l_1 \cos(\theta_1)$$

$$y_1 = -l_1 \sin(\theta_1)$$

$$x_2 = l_1 \cos(\theta_1) + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2)$$

$$y_2 = -l_1 \sin(\theta_1) - l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2)$$

และสามารถหาขนาดมุมของมอเตอร์ θ_1 และ θ_2 เมื่อทราบตำแหน่งของปลายเท้าและเข่าได้จากจลนศาสตร์ผกผันได้ดังนี้

$$\theta_2 = \cos^{-1}\left(\frac{x^2 + y^2 - l_1^2 - l_2^2}{2l_1l_2}\right)$$

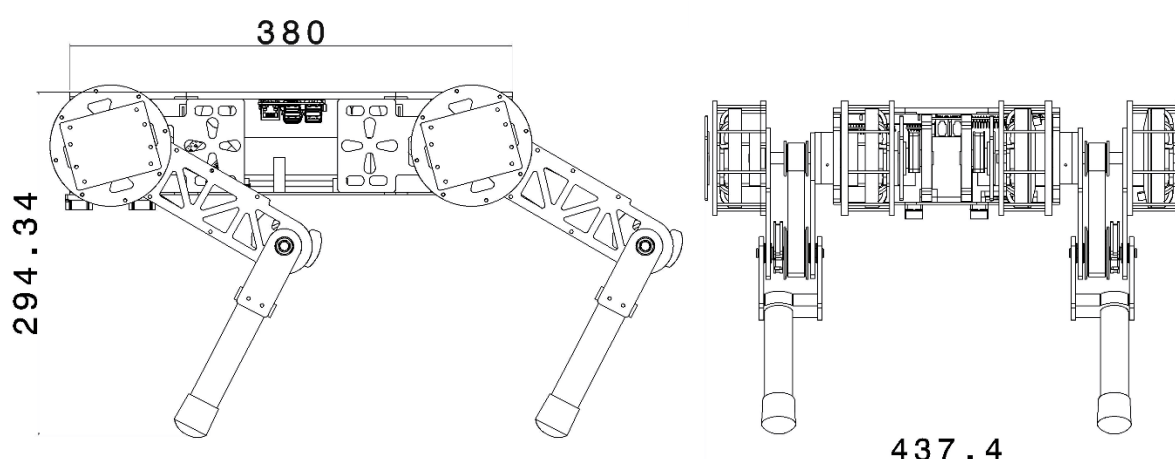
$$\theta_1 = -\tan^{-1}\left(\frac{y}{x}\right) + \sin^{-1}\left(\frac{l_2 \sin(\theta_2)}{\sqrt{x^2 + y^2}}\right)$$

บทที่ 3 การออกแบบหุ่นยนต์

หุ่นยนต์สี่ขาที่สามารถทำงานร่วมกับมนุษย์นั้น จำเป็นจะต้องมีการออกแบบโดยคำนึงถึงปัจจัยสำคัญหลาย ๆ อย่างที่หุ่นยนต์จะต้องเผชิญ ทั้งการที่พื้นผิวมีความไม่สม่ำเสมอ ปัจจัยภายนอกที่ไม่อาจควบคุมได้ อย่างเช่น แรงกระแทก หรือการที่หุ่นยนต์ต้องรับน้ำหนักอันเกิดจากอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ติดตั้งบนตัวหุ่นยนต์ เพื่อให้หุ่นยนต์มีความสามารถในการทำงานที่หลากหลาย และสามารถเคลื่อนที่หรือรักษาสมดุลได้ด้วยตัวมันเองโดยปราศจากสายไฟโยงออกมา ดังนั้นการจะออกแบบหุ่นยนต์ให้มีประสิทธิภาพที่สูง ด้วยค่าใช้จ่ายที่จำกัดขึ้นส่วนต่าง ๆ ของหุ่นยนต์จึงจำเป็นต้องมีการออกแบบอย่างระมัดระวังและต้องมีการทดสอบต้นแบบก่อนนำไปผลิตจริง โดยหุ่นยนต์มีขนาดและค่าที่สำคัญต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 1 และรูปที่ 22

ตารางที่ 1 ค่าที่สำคัญของหุ่นยนต์

Parameter [unit]	value
ความกว้างของหุ่นยนต์ [m]	0.4374
ความยาวของหุ่นยนต์ [m]	0.380
ความสูงของหุ่นยนต์ [m]	0.2943
ความยาวของขาบน (Femur) [m]	0.1723
น้ำหนักของขาบน (Femur) [kg]	0.775
ความยาวของขาล่าง (Tibia) [m]	0.175
น้ำหนักของขาล่าง (Tibia) [kg]	0.398
น้ำหนักรวมของหุ่นยนต์ [kg]	11.5



รูปที่ 22 ขนาดของหุ่นยนต์

3.1 แนวคิดในการออกแบบ

แนวคิดเบื้องต้นในการออกแบบนั้นได้มาจากการศึกษาโครงร่างของสิ่งมีชีวิต ซึ่งพบว่ามีส่วนที่เป็นโครงสร้างแข็งอย่างกระดูก และโครงสร้างที่ยืดหยุ่นอย่างกล้ามเนื้อ ทั้งสองส่วนนี้ทำให้สิ่งมีชีวิตสามารถเคลื่อนที่บนพื้นผิวที่แตกต่างกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนั้นยังทำการศึกษาจากหุ่นยนต์สี่ขาที่ถูกพัฒนามาอย่างยาวนานโดยมหาวิทยาลัยชั้นนำของโลก พบว่าการจะออกแบบให้หุ่นยนต์มีประสิทธิภาพที่สูงนั้น สิ่งสำคัญที่สุดคือการออกแบบขา โดยควรออกแบบขาให้สามารถประพาดตัวได้คล้ายคลึงกับขาสัตว์ มีน้ำหนักที่เบา มีโครงสร้างแข็งแรง และมีการใช้ตัวขับเคลื่อนเป็นตัวขับเคลื่อนที่มีความยืดหยุ่น (series elastic actuator) เพื่อให้ขาแข็งแรงและสามารถรับแรงกระแทกอันอาจเกิดขึ้นได้จากสภาวะภายนอก (robustness) สามารถเคลื่อนที่ได้อย่างว่องไว (speed) และมีประสิทธิภาพที่สูง (efficiency) ในส่วนของการควบคุมนั้นจะใช้ระบบควบคุมแบบป้อนกลับในการควบคุมมอเตอร์กระแสดตรง และควบคุมการเดินของหุ่นยนต์โดยกำหนดตำแหน่งข้อต่อและปลายขาของขาแต่ละข้าง นอกจากนั้นนำค่ามุมเอียงของหุ่นยนต์มาคำนวณและควบคุมตำแหน่งลำตัวของหุ่นยนต์เทียบกับพื้นเพื่อให้หุ่นยนต์สามารถทรงตัว เดินหน้า ถอยหลัง หรือเคลื่อนที่ในแบบต่าง ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

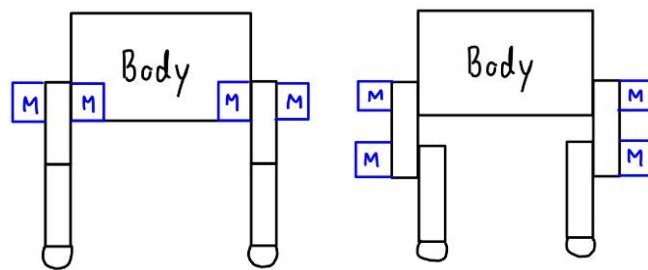
3.2 การออกแบบระบบทางกล

ในการออกแบบระบบทางกลจะให้ความสำคัญกับการออกแบบในส่วนขา และส่วนลำตัว โดยการออกแบบจะต้องคำนึงถึงปัจจัยหลาย ๆ อย่าง อันได้แก่ หุ่นยนต์ต้องสามารถทำงานได้ในสภาพแวดล้อมที่หลากหลาย สามารถรับแรงกระแทกจากภายนอกโดยที่ตัวมอเตอร์และเกียร์ไม่เสียหาย ทำให้การออกแบบในส่วนขาต้องมีการใช้ตัวขับเคลื่อนที่มีความยืดหยุ่น ประกอบกับน้ำหนักที่ค่อนข้างเยอะจากการที่มีเซนเซอร์, แผงวงจร และแบตเตอรี่ติดตั้งอยู่ที่ลำตัวเพื่อให้หุ่นยนต์สามารถทำงานได้ด้วยตัวมันเองโดยไม่ต้องมีสายไฟต่อออกมา ทำให้มอเตอร์ที่เป็นตัวขับเคลื่อนต้องมีแรงบิดที่สูงและมีขนาดที่เหมาะสม ทางผู้จัดทำจึงเลือกใช้มอเตอร์แบบไร้แปรงถ่าน (brushless motor) ติดกับชุดเกียร์ดาวเคราะห์ (planetary gear) จากปัจจัยต่าง ๆ ที่ได้กล่าวมาข้างต้น ยังมีปัจจัยอื่นอันได้แก่การทำให้หุ่นยนต์มีน้ำหนักเบา และมีประสิทธิภาพสูง จึงจำเป็นต้องออกแบบชิ้นส่วนและข้อต่อต่าง ๆ อย่างเหมาะสม ทุก ๆ ข้อต่อต้องแข็งแรงและถอดประกอบได้สะดวก

3.2.1 การออกแบบขา

ขาของหุ่นยนต์ประกอบไปด้วยสองส่วนคือ ขาส่วนล่าง (tibia) และ ขาส่วนบน (femur) โดยมีการส่งกำลังไปยังขาล่างโดยใช้สายพาน และส่งกำลังไปยังส่วนบนโดยใช้แรงโดยตรงจากเกียร์ที่ต่อกับมอเตอร์ และมีการทำให้ข้อต่อของขานั้นมีความยืดหยุ่นเพื่อป้องกันแรงกระแทกที่อาจเกิดขึ้น ทำให้การออกแบบที่บริเวณข้อต่อของขานั้นมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง เพราะต้องรับแรงที่เยอะ และแรงมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ทำให้การออกแบบชิ้นส่วนต่าง ๆ ควรทำให้มีน้ำหนักเบาที่สุด เพื่อลดภาระที่อาจส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อข้อต่อต่าง ๆ

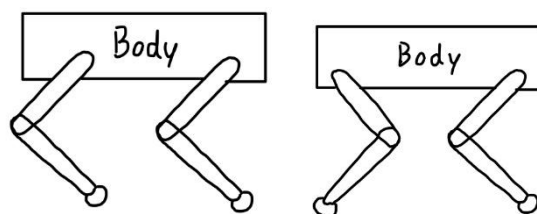
การออกแบบขานั้นมีเรื่องที่ต้องพิจารณาอยู่สองประเด็นหลัก ประเด็นแรกก็คือ 1. ตำแหน่งการวางมอเตอร์ ซึ่งแบ่งย่อยเป็นสองแบบได้แก่ การติดตั้งมอเตอร์ที่ข้อบนเพียงข้อเดียวและส่งกำลังผ่านเกียร์หรือสายพานไปยังข้อต่อล่าง ซึ่งจะทำให้โมเมนต์ความเฉื่อยในการเคลื่อนที่ของขานั้นน้อย แต่จะทำให้มีองค์ประกอบมากขึ้นอันเกิดจากระบบส่งกำลัง ซึ่งยากต่อการออกแบบ ดังแสดงในรูปที่ 23 ก) และการติดตั้งมอเตอร์ที่ข้อต่อบนและข้อต่อล่าง ซึ่งส่งผลให้โมเมนต์ความเฉื่อยมีค่ามาก และอาจส่งผลให้มอเตอร์ต้องมีประสิทธิภาพสูงมากขึ้น แต่ง่ายต่อการออกแบบ ดังแสดงในรูปที่ 23 ข) และอีกประเด็นที่ต้องพิจารณาก็คือ 2. ลักษณะการวางตัวของขา แบ่งย่อยได้เป็นสองแบบได้แก่ ขาหันไปทางเดียวกัน ซึ่งเป็นลักษณะที่คล้ายคลึงกับสิ่งมีชีวิต และง่ายต่อการออกแบบระบบควบคุม และ ขาหันเข้าหากัน ดังแสดงในรูปที่ 24 ก) และ 24 ข) ตามลำดับ โดยทางผู้จัดออกแบบให้มีการติดตั้งมอเตอร์ที่ข้อต่อบนเพียงข้อต่อเดียวและขาหันไปทางเดียวกันเพื่อเป็นการลดโมเมนต์ความเฉื่อยและทำให้การออกแบบระบบควบคุมสามารถทำได้โดยง่าย



(ก.) ติดตั้งมอเตอร์ที่ข้อต่อเดียว

(ข.) ติดตั้งมอเตอร์ที่สองข้อต่อ

รูปที่ 23 ตำแหน่งการวางมอเตอร์



(ก.) ขาหันไปทางเดียวกัน

(ข.) ขาหันเข้าหากัน

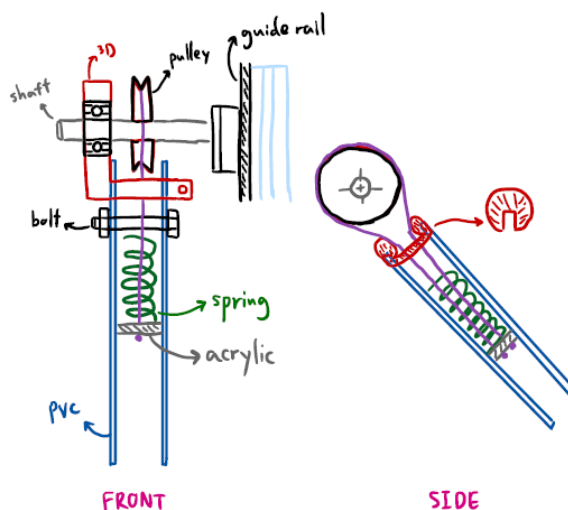
รูปที่ 24 ลักษณะการวางตัวของขา

3.2.1.1 การออกแบบขาส่วนล่าง

ในการออกแบบขาส่วนล่าง (tibia) นั้น ส่วนที่สำคัญที่สุดคือ การออกแบบข้อต่อ (joint) ให้มีความยืดหยุ่น (elastic) เพื่อรับโมเมนต์ (torque) จากแรงภายนอก ซึ่งวิธีหนึ่งที่สามารถทำได้คือการนำ สปริงดีดมาใช้เชื่อมต่อระหว่างมอเตอร์และขาส่วนล่าง แต่เนื่องด้วยสปริงดีดหาได้ยาก, มีรูปแบบให้เลือกใช้น้อย และมีราคาสูง เมื่อเทียบกับสปริงกด (compression spring) และสปริงดึง (extension spring) ที่มีขนาดให้เลือกมากกว่า ดังนั้นจึงออกแบบกลไกเพื่อให้สปริงดันทำงานในรูปแบบเดียวกับสปริงดีด คือนำสปริงดันมาต่อเข้ากับสายสลิง เพื่อรับแรงที่ส่งมาจากพูลเลย์ (pulley) เมื่อมีแรงภายนอกกระทำที่ขาส่วนล่าง จะเกิดแรงบิดทำให้

พูลเลย์หมุนไปและจะส่งผลให้เชือกฝั่งหนึ่งตึงและเกิดแรงดึงแผ่นรอง (acrylic) ให้เคลื่อนที่ขึ้น ทำให้เกิดแรงกดในสปริง เมื่อเกิดแรงบิดภายนอกขึ้นในทิศตรงกันข้าม จะทำให้เชือกอีกเส้นตึง และเส้นแรกหย่อน ส่งผลให้สปริงถูกกดเช่นเดียวกัน ด้วยกลไกดังนี้จะทำให้สามารถนำสปริงต้นมารับแรงบิดจากภายนอกได้ โดยมีกลไกดังแสดงในรูปที่ 25

ในการพิสูจน์แนวคิดนั้น การทำแบบจำลอง (prototype) ดังแสดงในรูปที่ 26 ขึ้นมานั้นเป็นสิ่งที่สำคัญ จึงได้มีการสร้างแบบจำลองขึ้นมาเพื่อทดสอบ และได้ผลดังที่วางแผนไว้



รูปที่ 25 แสดงกลไกในบางส่วนล่าง



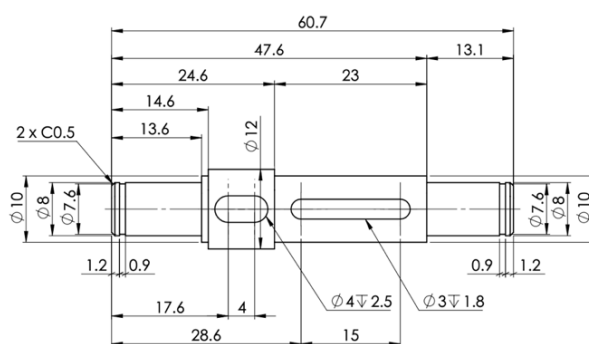
รูปที่ 26 แสดงแบบจำลองของกลไก

หลังจากที่พบว่าแบบจำลองได้ผลตามที่คำนวณไว้ จากนั้นจึงพัฒนาบางส่วนล่างให้แข็งแรงขึ้นเพื่อนำไปใช้จริง โดยได้พัฒนาโครงบางส่วนล่างจากท่อพีวีซี เป็นท่ออะลูมิเนียมซึ่งมีความเบาและแข็งแรง โดยใส่จุกยางไว้ที่ปลายขาเพื่อให้มีแรงเสียดทาน และป้องกันความเสียหายต่อขา ต่อมาในส่วนของตัวยึดท่อดังแสดงใน

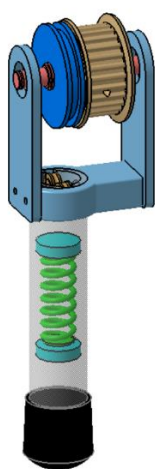
รูปที่ 27 ซึ่งพัฒนามาจากอะลูมิเนียม และต่อเข้ากับเพลาคือต่อดังแสดงในรูปที่ 28 ต่อมาในส่วนของตัวยึดสลึงได้มีการพัฒนาให้มีความกว้างที่น้อยลง เพื่อเป็นการลดขนาดของข้อเข้าให้แคบลง จากนั้นจึงนำมาประกอบรวมกัน ดังแสดงในรูปที่ 29 และนำไปทดสอบการเคลื่อนไหวเพื่อตรวจสอบความแข็งแรงของชิ้นส่วนต่าง ๆ



รูปที่ 27 แสดงตัวยึดท่อ



รูปที่ 28 แสดงเพลาคือต่อ



รูปที่ 29 แสดงขาส่วนล่างที่ทำจากอะลูมิเนียม

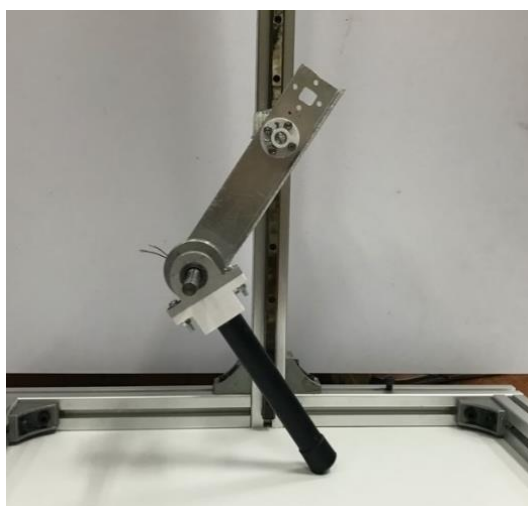
3.2.1.2 การออกแบบขาส่วนบน

การออกแบบขาส่วนบนนั้นประกอบไปด้วยการออกแบบโครงขา และการออกแบบข้อต่อที่ติดกับตัว ซึ่งประกอบไปด้วยเพลา (shaft), พูลเลย์ (pulley) และโครงมอเตอร์ (motor housing) โดยที่พูลเลย์ที่ข้อต่อบนจะรับทอร์คจากมอเตอร์แล้วส่งกำลังผ่านสายพาน (belt) ไปยังพูลเลย์ที่ข้อต่อล่างเพื่อทำการหมุนขาส่วนล่าง (tibia)

แบบจำลองของขาส่วนบน (prototype) เริ่มจากการทำโมเดลสามมิติจากโปรแกรม CATIA ดังแสดงในรูปที่ 30 หลังจากนั้น จึงเริ่มทำโครงขาจำลองจากแผ่นอะลูมิเนียมพับ ยึดกับข้อต่อด้านบนด้วยเพลาคู่ที่ต่อกับรางเลื่อน (guide rail) และข้อต่อล่างต่อกับเพลาคู่ที่ยึดกับขาล่าง โดยยังไม่ใส่พูลเลย์ (pulley) และสายพาน (belt) ดังแสดงในรูปที่ 31 เพื่อทำการทดสอบระบบสปริงที่ข้อต่อล่าง พบว่าการทดแบบจำลองได้ผลตามที่วางแผนไว้

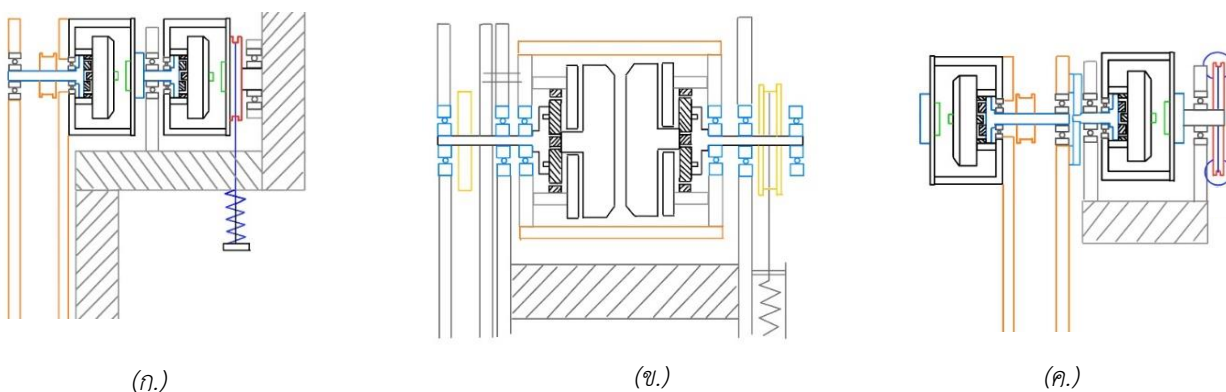


รูปที่ 30 แสดงโมเดลสามมิติจากโปรแกรม CATIA



รูปที่ 31 แสดงแบบจำลองโครงขาส่วนบน

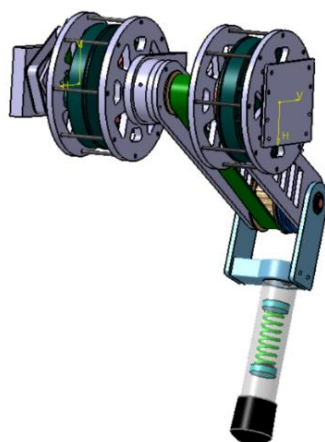
ขั้นต่อมาคือการออกแบบลักษณะการต่อมอเตอร์และโครงมอเตอร์เข้ากับส่วนขาและลำตัว โดยได้มีการออกแบบทั้งหมด 3 รูปแบบ ได้แก่แบบ ก. มอเตอร์ทั้งสองตัวอยู่ฝั่งเดียวกัน และหันไปทางเดียวกัน ข. มอเตอร์ทั้งสองตัวอยู่ฝั่งเดียวกันและหันไปคนละด้าน ค. มอเตอร์ทั้งสองตัวอยู่คนละฝั่งของขา ดังแสดงในรูปที่ 31 ก) 31 ข) และ 31 ค) ตามลำดับ จากทั้ง 3 รูปแบบจะพบว่าแบบ ก. นั้นจะมีโมเมนต์ความเฉื่อยของขาที่น้อยที่สุด แต่จะทำให้ตัวมีความกว้างอันเนื่องมาจากโครงมอเตอร์อยู่ชิดลำตัวทั้งสองอัน แบบ ข. นั้นจะมีโมเมนต์ความเฉื่อยของขาน้อย แต่การออกแบบโครงมอเตอร์ทำได้ยาก และแกนเพลลาของมอเตอร์ต้องมีขนาดใหญ่เพื่อที่จะสามารถรองรับน้ำหนักของทั้งตัวหุ่นยนต์ให้ได้ และแบบ ค. เป็นแบบที่โมเมนต์ความเฉื่อยของขา มากกว่าทั้งแบบ ก. และแบบ ข. แต่ออกแบบง่าย โครงมอเตอร์ตัวนอกสามารถถูกยึดกับขาได้ และเพลามีตำแหน่งยึดกับลำตัวที่แข็งแรงกว่า ซึ่งแบบ ค. เป็นแบบที่ถูกเลือกในการสร้างหุ่นยนต์



รูปที่ 32 ลักษณะการต่อมอเตอร์และโครงมอเตอร์เข้ากับส่วนขาและลำตัว

ก. มอเตอร์ทั้งสองตัวอยู่ฝั่งเดียวกัน และหันไปทางเดียวกัน ข. มอเตอร์ทั้งสองตัวอยู่ฝั่งเดียวกันและหันไปคนละด้าน
ค. มอเตอร์ทั้งสองตัวอยู่คนละฝั่งของขา

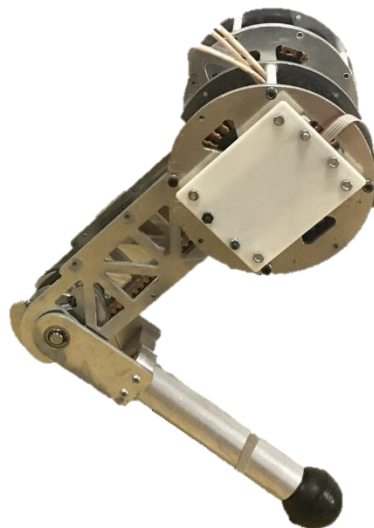
ต่อมาจึงทำการออกแบบโมเดลสามมิติจากโปรแกรมคาเทีย (CATIA) และทำการสร้างแบบจำลองของขาออกมาดังแสดงในรูปที่ 33 และ 34 ตามลำดับ และได้ขาที่เสร็จสมบูรณ์ดังแสดงในรูปที่ 35



รูปที่ 33 แสดงโมเดลสามมิติจากโปรแกรม CATIA



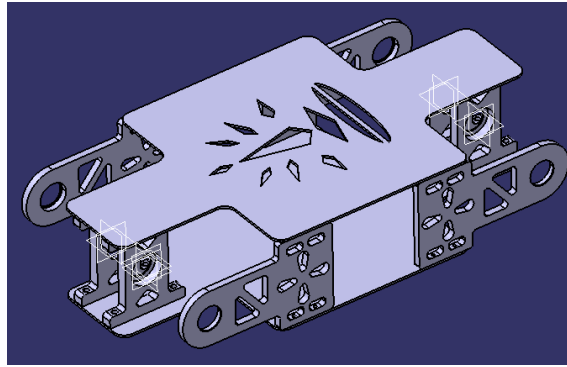
รูปที่ 34 แสดงแบบจำลองของขา



รูปที่ 35 ขาหุ่นยนต์ที่เสร็จสมบูรณ์

3.2.2 การออกแบบลำตัว

หลังจากออกแบบในส่วนของขาเสร็จ ขั้นตอนถัดมาเป็นการออกแบบในส่วนของลำตัวซึ่งเป็นส่วนที่จะบรรจุอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทั้งหมดรวมไปถึงแบตเตอรี่และยัดขาของหุ่นยนต์ทั้งสี่เข้าด้วยกัน โดยการออกแบบลำตัวจะคำนึงถึงความแข็งแรงและความเบาของหุ่นยนต์เป็นหลัก จากนั้นจึงออกแบบโมเดลสามมิติด้วยโปรแกรม CATIA ได้ดังแสดงในรูปที่ 36 โดยมีการออกแบบให้เป็นโครงสร้างปิดโดยใช้ลูมิเนียม มีส่วนประกอบหลักคือ โครงสร้างรับตั้บลูกปืน (housing) ที่ใช้สำหรับรับน้ำหนักของหุ่นยนต์ และแผ่นลำตัวที่ใช้สำหรับยึดอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ภายใน



รูปที่ 36 โมเดลสามมิติจากโปรแกรม CATIA แสดงลำตัวของหุ่นยนต์

3.2.3 การออกแบบระบบขับเคลื่อนและมอเตอร์

3.2.3.1 การออกแบบตัวขับเคลื่อนที่มีความยืดหยุ่น

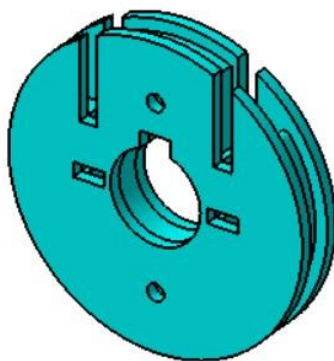
ตัวขับเคลื่อนที่มีความยืดหยุ่นเป็นองค์ประกอบที่สำคัญที่จะช่วยลดแรงกระแทกอันอาจส่งผลให้เกิดความเสียหายต่อ gear box และมอเตอร์ และยังช่วยกักเก็บพลังงานไว้ในตัวสปริง โดยจะมีตัวขับเคลื่อนที่มีความยืดหยุ่นติดตั้งอยู่ในทุกข้อต่อได้แก่ ข้อต่อล่าง ซึ่งเป็นแบบ Classical arrangement และข้อต่อบนซึ่งเป็นแบบ Mixed arrangement

เริ่มทำแบบจำลองแรกโดยใช้ ท่อ PVC ขนาด 6 นิ้วที่มีความยาว 15 cm, แบริ่ง, pulley, เฟลา, สปริง ที่มีค่า $K_{spring} = 2.6487 [N / mm]$, นัทและโบลท์, แผ่นอะคริลิก ตัวยึดที่ทำจาก 3D print และเส้นเอ็น โดยมีลูมิเนียมโปรไฟล์เป็นโครงสร้างไว้ยึดขา จากการทดสอบแบบจำลองก็ดังแสดงในรูปที่ 37 ได้ผลเป็นไปตาม Conceptual design ซึ่งมีแรงต้านรอบ Knee ที่เกิดจากสปริงที่เวลามีแรงมากกระทำที่ปลายเท้า แต่เนื่องจากสปริงที่อ่อนไปอย่างทีกล่าวไว้ข้างต้นทำให้มุมที่บิดไปมากกว่าที่ได้คำนวณไว้ ซึ่งเมื่อใช้สปริงที่ค่า K_{spring} สูงขึ้น มุมที่บิดไปก็จะน้อยลง



รูปที่ 37 แบบจำลองแรกของตัวขับเคลื่อนที่มีความยืดหยุ่น

หลังจากที่พบว่าต้นแบบแรกสามารถทำงานได้จริงตามแนวคิด ก็เริ่มออกแบบโมเดลที่ 2 ในโปรแกรม CATIA แสดงดังรูปที่ 38 และนำไปสร้างเป็นต้นแบบที่สองด้วยแผ่นอะคริลิกสามแผ่นประกบกันดังแสดงในรูปที่ 39 และร้อยด้วยสลิง แต่พบว่าแผ่นอะคริลิกไม่สามารถรับแรงกระแทกจากการทดสอบได้

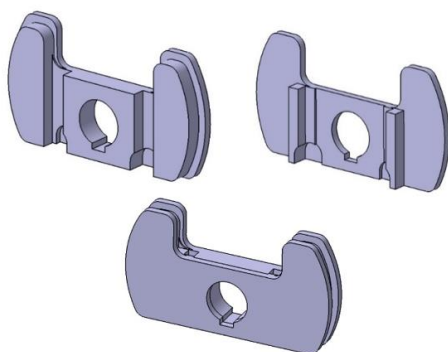


รูปที่ 38 โมเดลที่ 1 ของตัวจับอนุกรมที่มีความยืดหยุ่น
ของข้อต่อล่าง ที่ถูกออกแบบด้วยโปรแกรม CATIA



รูปที่ 39 ต้นแบบที่ 1 ของการตัวจับอนุกรมที่มีความ
ยืดหยุ่นที่ข้อต่อล่าง

จากนั้นจึงพัฒนามาเป็นโมเดลที่สามโดยใช้วัสดุเป็นอะลูมิเนียม โดยการออกแบบมีข้อจำกัดคือ ตัวยึดสลึงต้องมีความกว้าง 8 มิลลิเมตร และสามารถสร้างจากเครื่องกลึง CNC สองแกน ทำให้ตัวยึดสลึงที่ถูกออกแบบนั้น ประกอบไปด้วยแผ่นอะลูมิเนียมสองแผ่นประกบกัน ดังแสดงในรูปที่ 40 จากนั้นจึงนำการออกแบบนี้ไปสร้างเป็นชิ้นงานจริงด้วยเครื่องกลึง CNC ดังแสดงในรูปที่ 41

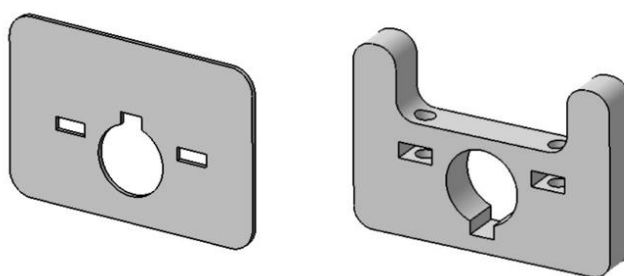


รูปที่ 40 โมเดลที่ 2 ของตัวจับอนุกรมที่มีความยืดหยุ่น
ของข้อต่อล่าง ที่ถูกออกแบบด้วยโปรแกรม CATIA



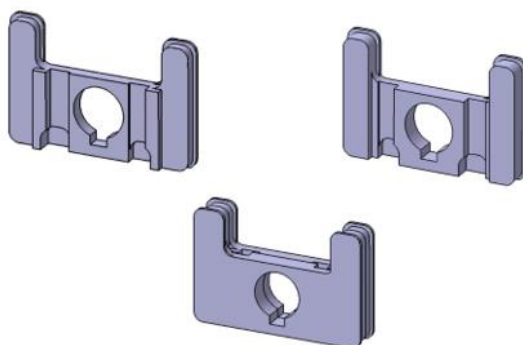
รูปที่ 41 ดันแบบที่ 2 ของตัวขันนุกรมที่มีความยืดหยุ่น
ของข้อต่อล่าง

ต่อมาในส่วนของการออกแบบตัวขันนุกรมที่มีความยืดหยุ่นที่ข้อต่อบน เริ่มทำการออกแบบในทำนองเดียวกับข้อต่อล่างคือ ออกแบบด้วยโปรแกรม CATIA ได้โมเดลดังแสดงในรูปที่ 42 และสร้างขึ้นมาโดยใช้วัสดุเป็น แผ่นอะคริลิกขนาด 8 มิลลิเมตร ประกับติดกับแผ่นอะคริลิกขนาด 1 มิลลิเมตร จากนั้นนำไปเจาะรูด้วยเครื่องกลึงเพื่อใช้สำหรับใส่โบลต์ในการยึดสลิง แต่เมื่อนำไปทดสอบพบว่าไม่สามารถรับแรงในการกระแทกได้

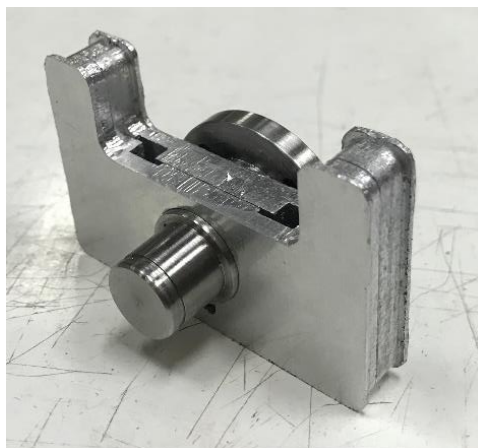


รูปที่ 42 โมเดลที่ 1 ของตัวขันนุกรมที่มีความยืดหยุ่น
ของข้อต่อบน ที่ถูกออกแบบด้วยโปรแกรม CATIA

จากนั้นจึงพัฒนาต้นแบบแรกโดยการออกแบบมีข้อจำกัดคือ ตัวยึดสลิงต้องมีความกว้าง 10 มิลลิเมตร และสามารถสร้างจากเครื่องกลึง CNC สองแกน ทำให้ตัวยึดสลิงที่ถูกออกแบบนั้น ประกอบไปด้วยแผ่นอะลูมิเนียมสองแผ่นประกบกัน ดังแสดงในรูปที่ 43 จากนั้นจึงนำการออกแบบนี้ไปสร้างเป็นชิ้นงานจริงด้วยเครื่องกลึง CNC ดังแสดงในรูปที่ 44



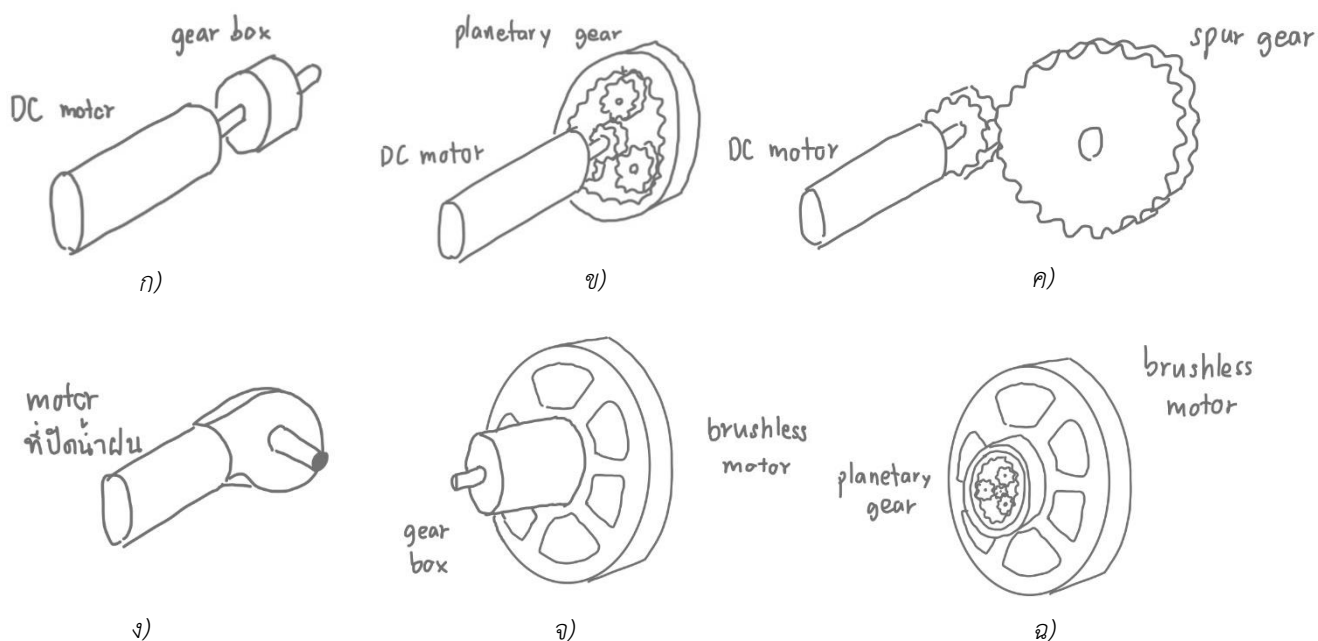
รูปที่ 43 โมเดลที่ 2 ของตัวขันนุกรมที่มีความยืดหยุ่นของข้อ
ต่อบน ที่ถูกออกแบบด้วยโปรแกรม CATIA



รูปที่ 44 ต้นแบบที่ 2 ของตัวขับเคลื่อนที่มี
ความยืดหยุ่นของข้อต่อ

3.2.3.2 การออกแบบมอเตอร์และระบบเกียร์

การออกแบบมอเตอร์และระบบทดกำลังนั้นมีข้อจำกัดต่าง ๆ อันได้แก่ น้ำหนัก, ทอร์ค, ขนาด และ ตำแหน่งในการติดตั้ง ทางผู้จัดทำได้ทำการศึกษาและออกแบบโดยใช้อุปกรณ์ที่สามารถหาซื้อได้ในราคาถูก ได้ ออกมาเป็น 6 โมเดลได้แก่ ก. DC Motor ต่อกับ gear box ข. DC motor ต่อกับ planetary gear ค. DC motor ต่อกับ spur gear ง. DC motor (ที่ปิดน้ำฝน) จ. Brushless motor ต่อกับ gear box และ ฉ. Brushless motor ต่อกับ planetary gear ดังแสดงในรูปที่ 45 ก), 45 ข), 45 ค), 45 ง), 45 จ) และ 45 ฉ) ตามลำดับ



รูปที่ 45 แสดงการต่อมอเตอร์กับระบบทดกำลัง

- ก. DC Motor ต่อกับ gear box ข. DC motor ต่อกับ planetary gear ค. DC motor ต่อกับ spur gear ง. DC motor (ที่ปิดน้ำฝน)
จ. Brushless motor ต่อกับ gear box และ ฉ. Brushless motor ต่อกับ planetary gear

จากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพและราคา พบว่ามอเตอร์แบบ ฉ. เป็นตัวเลือกที่ดีที่สุดที่สามารถสร้างทอร์คได้สูงอันเนื่องมาจาก brushless motor ต่อเข้ากับ planetary gear มีขนาดเล็ก และมีราคาถูก โดย brushless motor ที่ใช้คือ X8308 Brushless motor KV135 ดังรูปที่ 46 โดยมีรายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 2 ดังนี้



รูปที่ 46 X8308 Brushless motor

ตารางที่ 2 รายละเอียดของมอเตอร์

Parameter of X8308 Brushless motor KV135	Value
Iron Core Size[mm]	8308
Motor Size[mm x mm]	90x26.5
Weight[g]	279
Voltage[V]	24
Idle Current[A]	0.9
Support Lithium Battery	6 – 12 S LiPo
Max Continuous Current[A]	31
Max Continuous Power[W]	940
Internal Resistance[ohms]	0.151
Toque [N m]	2.193



รูปที่ 47 Sun gear module 0.635

โดยระบบเกียร์ที่ใช้คือ planetary gear ดังแสดงในรูปที่ 47 และ 48 ซึ่งมีรายละเอียด และ อัตราทด ดังแสดงในตารางที่ 3

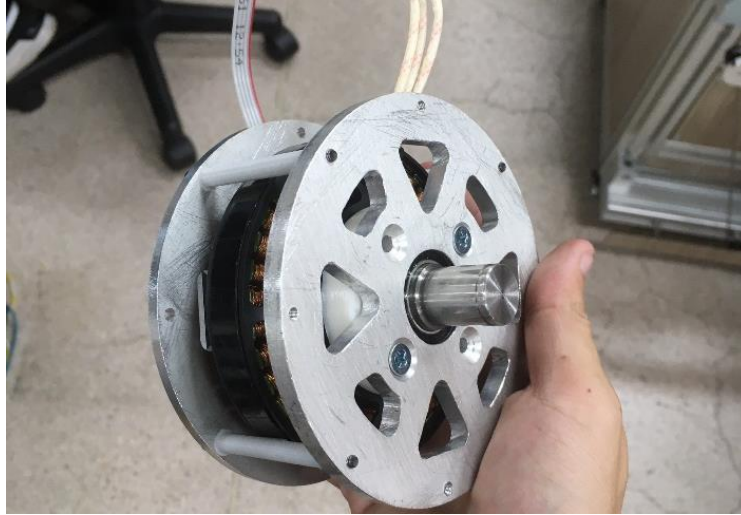


รูปที่ 48 Ring gear และ Planet gear module 0.635

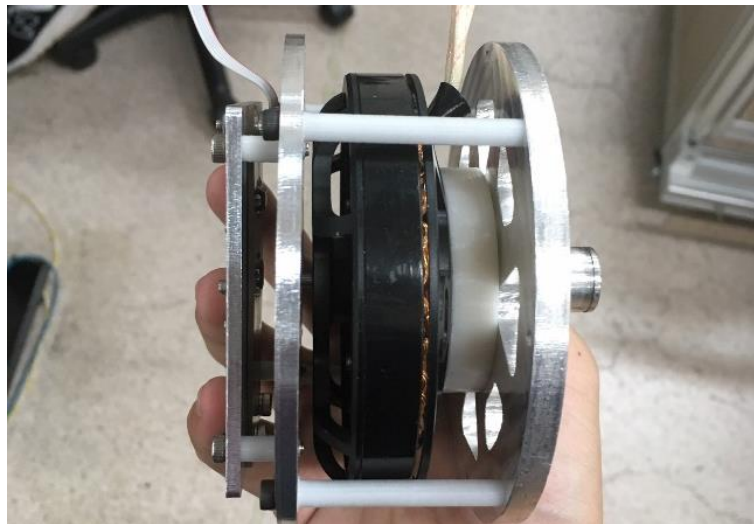
ตารางที่ 3 รายละเอียดของ planetary gear

Parameter of planetary gear	Value
Material	Brass
Module	0.635
Number of teeth of Sun gear	12
Number of teeth of Planet gear	15
Number of teeth of Ring gear	42
Ratio (Fixed Ring gear)	4.5

ซึ่งเมื่อรวมค่าแรงบิดที่ได้จากระบบขับเคลื่อนคือรวมทั้ง X8308 Brushless motor KV135 และ planetary gear แล้ว ก็ได้ค่าที่มากพอกับที่ต้องการ และเมื่อประกอบสองส่วนนี้เข้าด้วยกัน พร้อม case และ เฟลา จะได้ดังแสดงในรูปที่ 49 และ 50



รูปที่ 49 Brushless motor เมื่อประกอบ planetary gear, case และ เฟลา



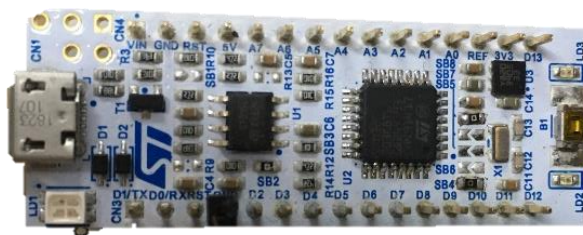
รูปที่ 50 Brushless motor เมื่อประกอบ planetary gear, case และ เฟลา (ด้านข้าง)

3.3 การออกแบบระบบไฟฟ้าและสื่อสาร

ในการออกแบบและควบคุมหุ่นยนต์นั้น ส่วนสำคัญส่วนถัดมาคือระบบไฟฟ้า ระบบนี้เป็นส่วนที่ทำให้หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนไหวได้ตามที่ต้องการ ในการออกแบบนั้นต้องคำนึงถึงแรงดันไฟฟ้าที่ใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ กระแสไฟฟ้าที่ใช้ ขนาดความจุของแบตเตอรี่ และรูปแบบการสื่อสาร (communication) โดยระบบไฟฟ้านี้จะอุปกรณ์หลักดังนี้ บอร์ด Raspberry Pi 4, บอร์ด NUCLEO-G431, บอร์ดควบคุมมอเตอร์ (ESC), บอร์ดแปลงความดัน (stepdown), แบตเตอรี่, แผ่นกระจายไฟ (busbar), บอร์ดสื่อสารแบบ CAN (CAN transceiver) ดังแสดงในรูปที่ 51, 52, 53, 54, 55, 56 และ 57 ตามลำดับ และมอเตอร์ที่ไม่มีแปลงถ่าน (brushless motor) โดยใช้การสื่อสารแบบการควบคุมพื้นที่เครือข่าย (controller area network, CAN) ในการส่งข้อมูลคำสั่งระหว่างบอร์ด Raspberry Pi 4 และบอร์ดควบคุมมอเตอร์ และสามารถวาดแผนภาพวงจรไฟฟ้าได้ดังแสดงในรูปที่ 58



รูปที่ 51 บอร์ด Raspberry Pi 4



รูปที่ 52 บอร์ด NUCLEO-G431



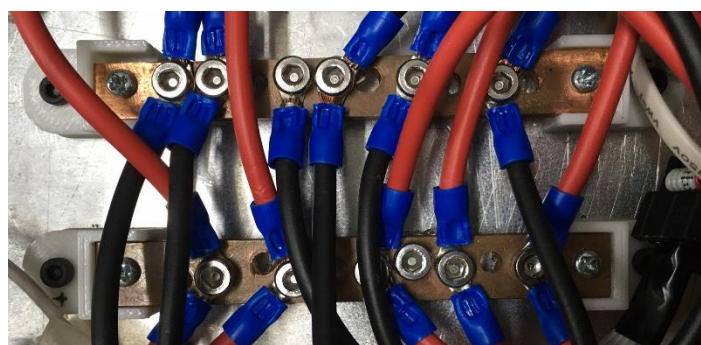
รูปที่ 53 บอร์ดควบคุมมอเตอร์ (ESC)



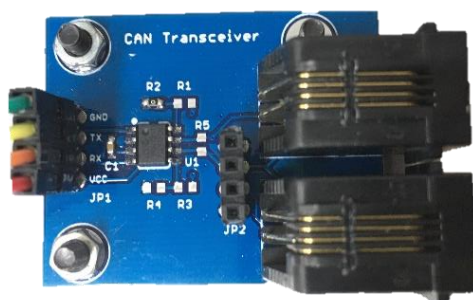
รูปที่ 54 บอร์ดสื่อสารแบบ CAN



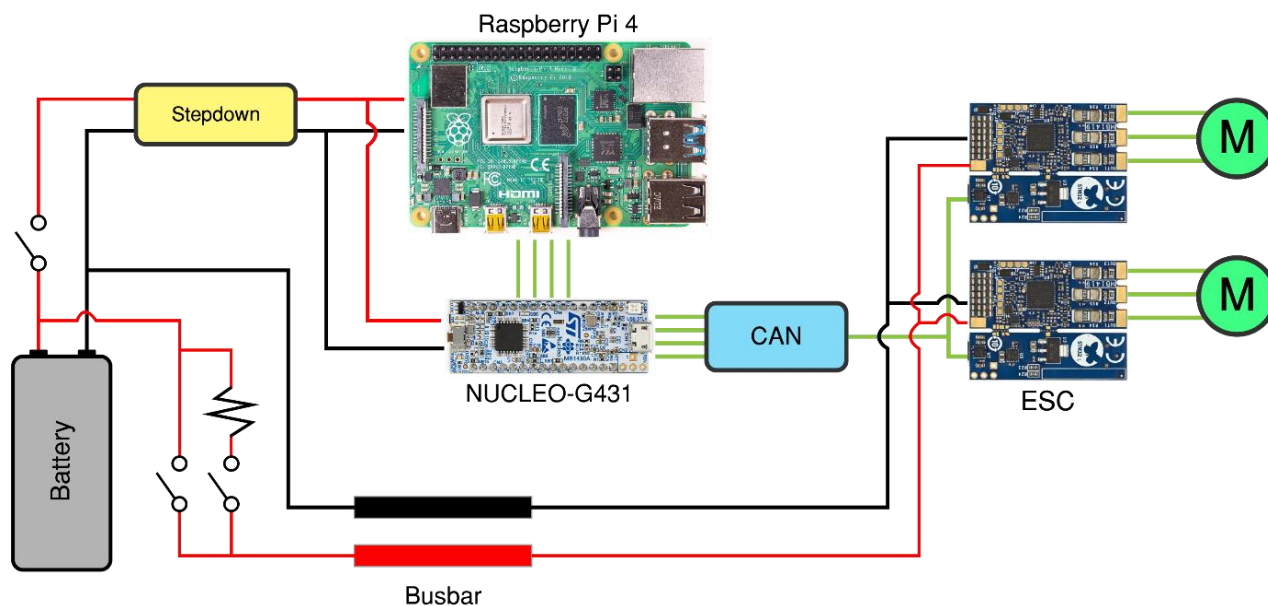
รูปที่ 55 แบตเตอรี่



รูปที่ 56 แผ่นกระจายไฟ



รูปที่ 57 บอร์ดสื่อสารแบบ CAN



รูปที่ 58 แสดงแผนภาพวงจรไฟฟ้าของหุ่นยนต์

3.3.1 ระบบไฟฟ้า

หุ่นยนต์ทำงานโดยมีแบตเตอรี่ที่ใช้ในการขับเคลื่อนหุ่นยนต์จะเป็นการต่อขนานกันของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน 3 cell 3300 mAh จำนวน 2 ก้อน จากนั้นจะมีแยกการจ่ายไฟฟ้าออกเป็นสองส่วน โดยส่วนแรกจะเป็นการแปลงความดันไฟฟ้าด้วยบอร์ดแปลงความดันเป็นความดันไฟฟ้า 5 V เพื่อจ่ายให้กับบอร์ด Raspberry Pi 4 และ บอร์ด NUCLEO-G431 โดยที่อีกส่วนหนึ่งจะเป็นการจ่ายไฟฟ้าไปยังแผ่นกระจายไฟเพื่อใช้ในการกระจายไฟฟ้าให้กับบอร์ดควบคุมมอเตอร์ และบอร์ดควบคุมก็จะจ่ายกระแสไฟฟ้าตามที่ได้รับคำสั่งมาเพื่อควบคุมมอเตอร์ต่อไป

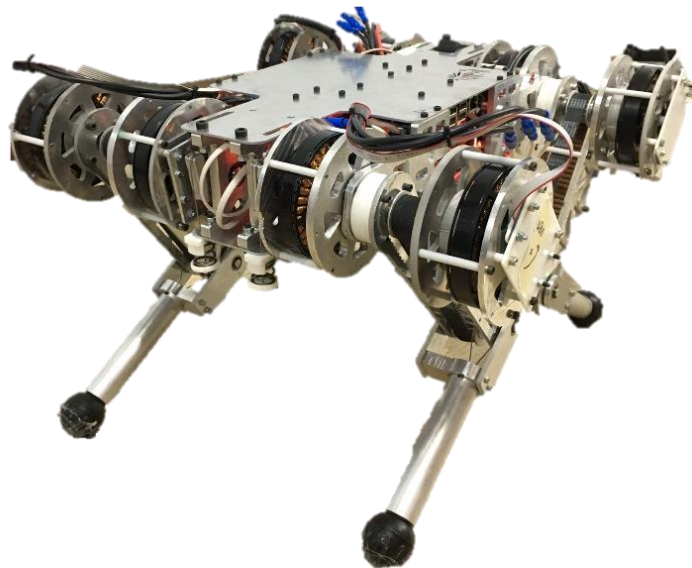
3.3.1 ระบบสื่อสาร

การสื่อสารกันและการส่งข้อมูลจะใช้การสื่อสารแบบการควบคุมพื้นที่เครือข่าย (CAN) โดยข้อมูลของรูปแบบวิธีการเดินจะส่งจากบอร์ด Raspberry Pi 4 ผ่านพอร์ตสื่อสาร UART (Universal Asynchronous Receiver Transmitter) ไปยังบอร์ด NUCLEO-G431 เพื่อทำการแปลงสัญญาณเป็นสัญญาณแบบ CAN เพื่อส่งคำสั่งตำแหน่งที่ต้องการไปยังบอร์ดควบคุมมอเตอร์แต่ละตัวเพื่อทำการขับเคลื่อนมอเตอร์ไปยังตำแหน่งที่กำหนด

หลักจากออกแบบชิ้นส่วนที่สำคัญของหุ่นยนต์ทั้งทางกลและระบบไฟฟ้าเสร็จสิ้น ขั้นตอนถัดมาเป็นการขึ้นรูปและผลิต ซึ่งจะได้ชิ้นส่วนทั้งหมดดังแสดงในรูปที่ 59 จากนั้นสามารถประกอบหุ่นยนต์ทั้งระบบได้ดังแสดงในรูปที่ 60



รูปที่ 59 ชิ้นส่วนทั้งหมดของหุ่นยนต์



รูปที่ 60 หุ่นยนต์เมื่อประกอบทั้งระบบ

3.4 การออกแบบระบบควบคุม

การออกแบบระบบควบคุมนับเป็นส่วนหนึ่งที่มีความสำคัญในการควบคุมหุ่นยนต์ให้สามารถเคลื่อนไหวไปตามตำแหน่งที่ต้องการ โดยสามารถแบ่งการควบคุมออกเป็นสองส่วนหลักคือ ระบบควบคุมมอเตอร์ และรูปแบบวิธีในการเดินของหุ่นยนต์

3.4.1 การหาระบบพลศาสตร์

จากสมการ 2.26 ในหัวข้อระบบพลศาสตร์เชิงกลถ้าละส่วนของ disturbance และนำสมการ 2.29 มาพิจารณาจะได้ว่า

สมการ 3.1

$$k \cdot I = J_e \ddot{\theta} + b_e \dot{\theta}$$

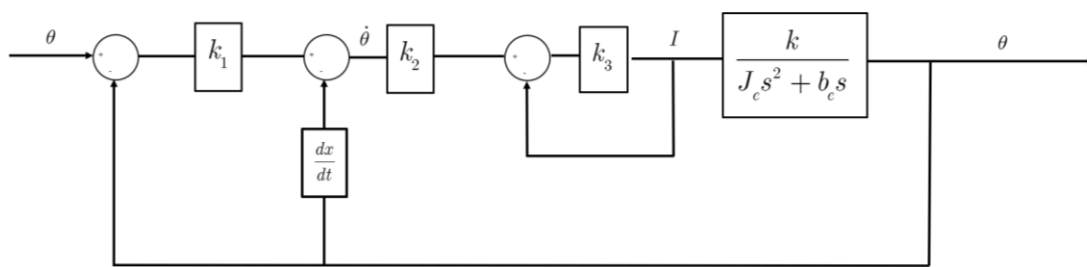
และเมื่อนำสมการดังกล่าวไปแปลงลาปลาซจะได้ดังนี้

$$L \quad k \cdot I = J_e \ddot{\theta} + b_e \dot{\theta}$$

สมการ 3.2

$$\frac{\theta}{I} \frac{s}{s} = \frac{k}{J_e s^2 + b_e s}$$

จากระบบควบคุมดังรูปที่ 66 ในหัวข้อ 3.4.2 หรือ speed position control เมื่อใส่ค่าเกนเฉพาะ P จะสามารถจำลองระบบ ได้ดังในรูปที่ 61



รูปที่ 61 แผนภาพบล็อกของตัวควบคุมเมื่อใส่เฉพาะค่าเกน P

และจะได้ $G(s)$ ดังนี้

$$\begin{aligned} G(s) &= \frac{\frac{k k_3 k_2}{1 + k_3} \cdot k_1}{J_e s^2 + \left(b_e + \frac{k k_3 k_2}{1 + k_3} \right) s} \\ &= \frac{\frac{k k_3 k_2 k_1}{1 + k_3}}{J_e s^2 + \left(b_e + \frac{k k_3 k_2}{1 + k_3} \right) s + \frac{k k_3 k_2 k_1}{1 + k_3}} \end{aligned}$$

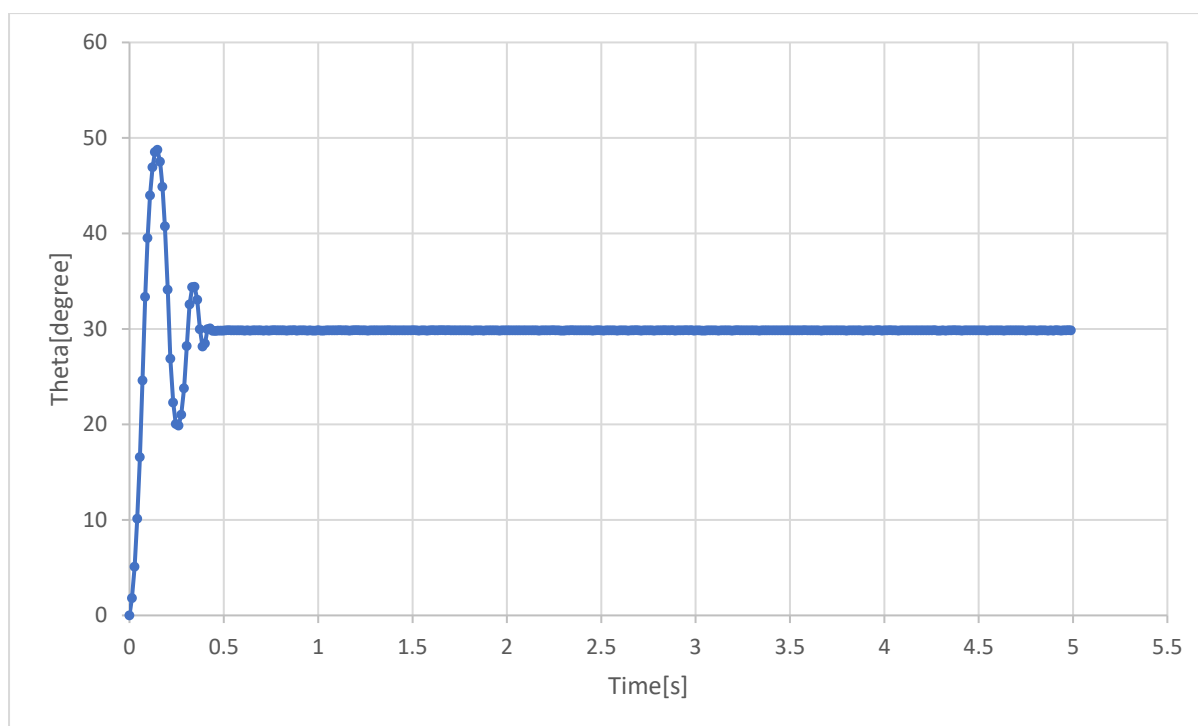
ซึ่งสามารถเขียนในรูปสมการอันดับที่ 2 ได้ดังนี้

$$G s = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}$$

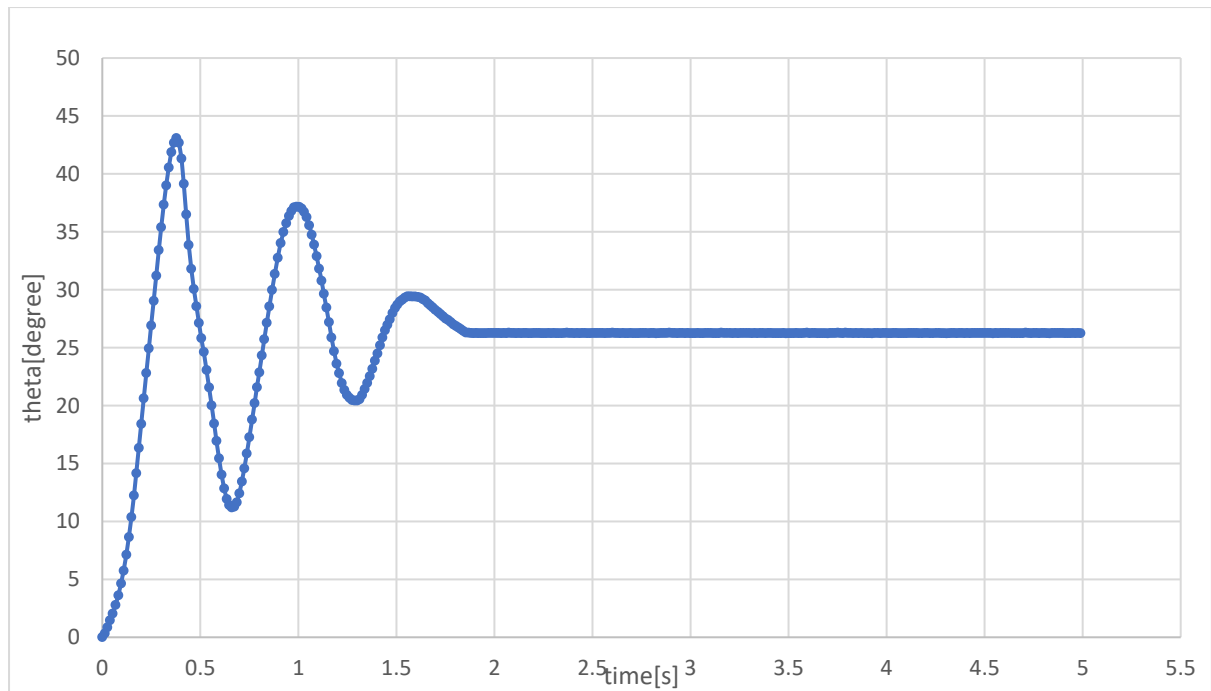
เพื่อจะหาค่า k และ b_e ใส่ค่าเกน P ที่เหมาะสมสำหรับหาระบบพลศาสตร์ ดังแสดงในตารางที่ 4 จะได้ step response ของมอเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 62 สำหรับ Outer Motor และ รูปที่ 63 สำหรับ Inner Motor

ตารางที่ 4 ค่าเกนของระบบควบคุมสำหรับการหา Dynamics model

Gain	Value (Outer Motor)	Value (Inner Motor)
POSITION_KP	2000	200
POSITION_KI	0	0
SPPED_KP	5000	2000
SPEED_KI	0	0
TORQUE_KP	266	266
TORQUE_KI	0	0



รูปที่ 62 step response ของ Outer Motor



รูปที่ 63 step response ของ Inner Motor

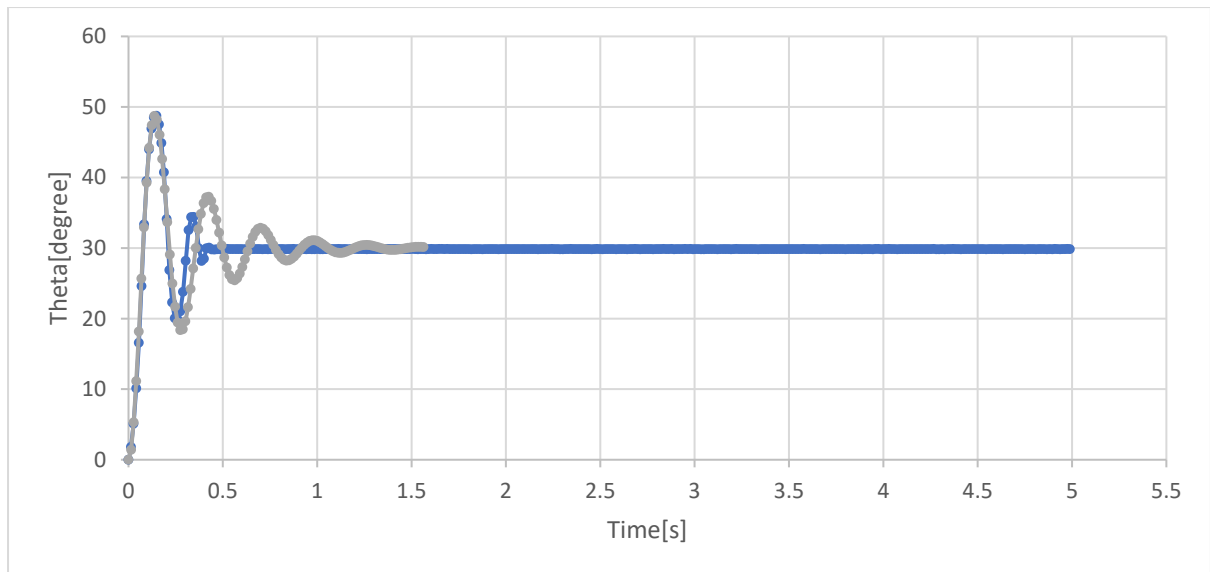
ซึ่งสามารถหา ξ และ ω_n จากกราฟในรูปที่ 62 ได้ค่าดังแสดงในตารางที่ 5 สำหรับ Outer Motor และจากกราฟรูปที่ 63 สำหรับ Inner Motor โดยใช้สมการ

$$M_p = e^{-\frac{\xi\pi}{\sqrt{1-\xi^2}}} \text{ และ } \omega_n = \frac{\pi}{t_p \sqrt{1-\xi^2}}$$

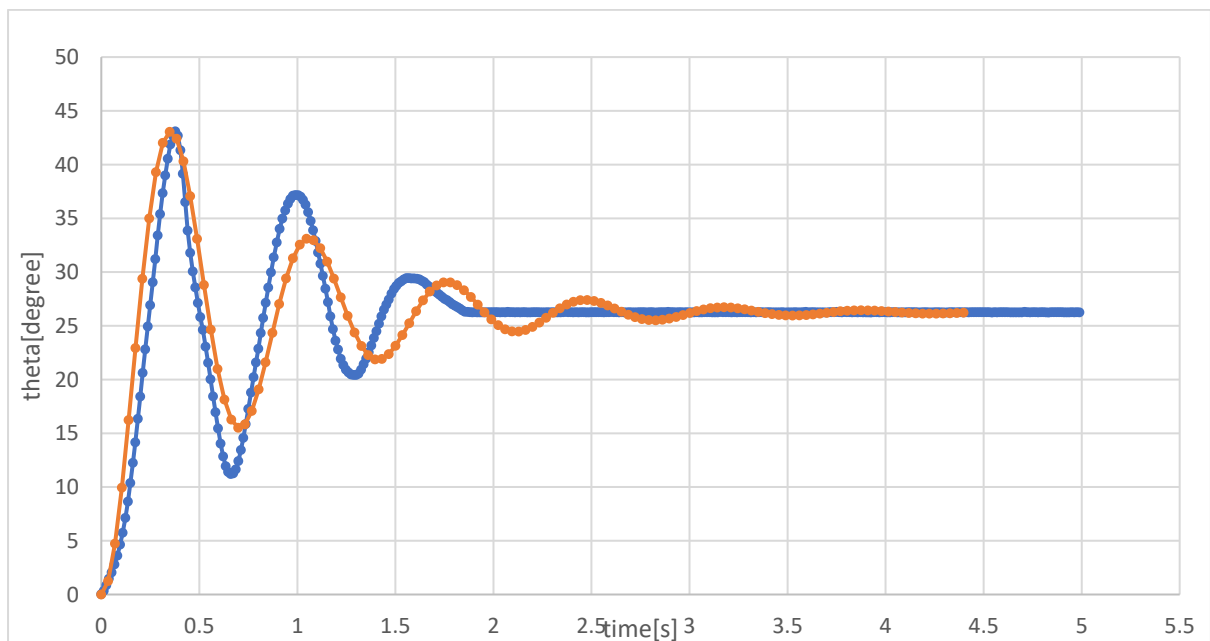
ตารางที่ 5 ค่าของ ξ และ ω_n

Parameter	Value (Outer Motor)	Value (Inner Motor)
ξ	0.14796	0.1406
ω_n	22.689	9

และเมื่อนำ ξ และ ω_n ที่ได้ มาหา step response จะได้ดังแสดงในรูปที่ 64 และ 65



รูปที่ 64 เปรียบเทียบ step response ของ Outer Motor ระหว่างค่าที่วัดได้จริง (สีฟ้า) และ ค่าที่ได้จากแบบจำลอง (สีเทา)



รูปที่ 65 เปรียบเทียบ step response ของ Inner Motor ระหว่างค่าที่วัดได้จริง (สีฟ้า) และ ค่าที่ได้จากแบบจำลอง (สีส้ม)

สามารถหาค่า k และ b_e ได้จากสมการดังนี้ ซึ่งมีค่าดังแสดงในตารางที่ 6

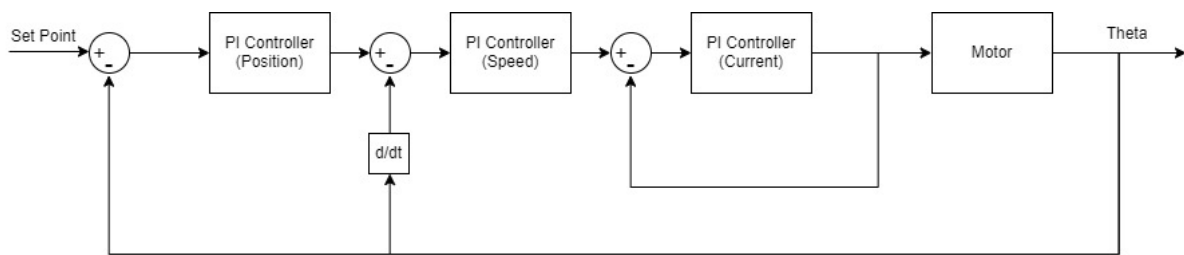
$$\omega_n^2 = \frac{kk_3k_2k_1}{1 + k_3 \cdot J_e}, 2\xi\omega_n = \frac{\left(b_e + \frac{kk_3k_2}{1 + k_3}\right)}{J_e}$$

ตารางที่ 6 ค่าของ k และ b_e

Parameter	Value (Outer Motor)	Value (Inner Motor)
k	1.2067E-06	4.173E-06
b_e	0.150781	0.04359

3.4.2 ระบบควบคุมมอเตอร์

ในการควบคุมหุ่นยนต์นั้นมีความจำเป็นที่จะต้องควบคุมตำแหน่งและความเร็วของมอเตอร์ให้เป็นไปตามที่ต้องการ โดยใช้ระบบควบคุมแบบป้อนกลับในการควบคุมให้เป็นไปตามที่ต้องการ โดยสามารถออกแบบตัวควบคุมได้ดังแสดงในรูปที่ 66 โดยตัวควบคุมประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลักคือ ตัวควบคุมแบบพีไอสำหรับตำแหน่ง (PI controller for position) ตัวควบคุมแบบพีไอสำหรับความเร็ว (PI controller for speed) และตัวควบคุมแบบพีไอสำหรับกระแส (PI controller for current) จากนั้นนำมุมหรือตำแหน่งของมอเตอร์ที่วัดได้จากเอ็นโค้ดเดอร์แบบแม่เหล็ก (magnetic encoder) มาป้อนกลับเพื่อควบคุมระบบให้ได้ตามที่ต้องการ



รูปที่ 66 แผนภาพบล็อกของตัวควบคุม

จากการหา Dynamics model ในหัวข้อ 3.4.1 จะได้ Dynamics model ดังนี้

$$G_{s_{outer}} = \frac{1.2067E-06}{0.0233525 \cdot s^2 + 0.150781 \cdot s}$$

และจะได้

$$G_{s_{inner}} = \frac{4.17304E-06}{0.020505079 \cdot s^2 + 0.043589698 \cdot s}$$

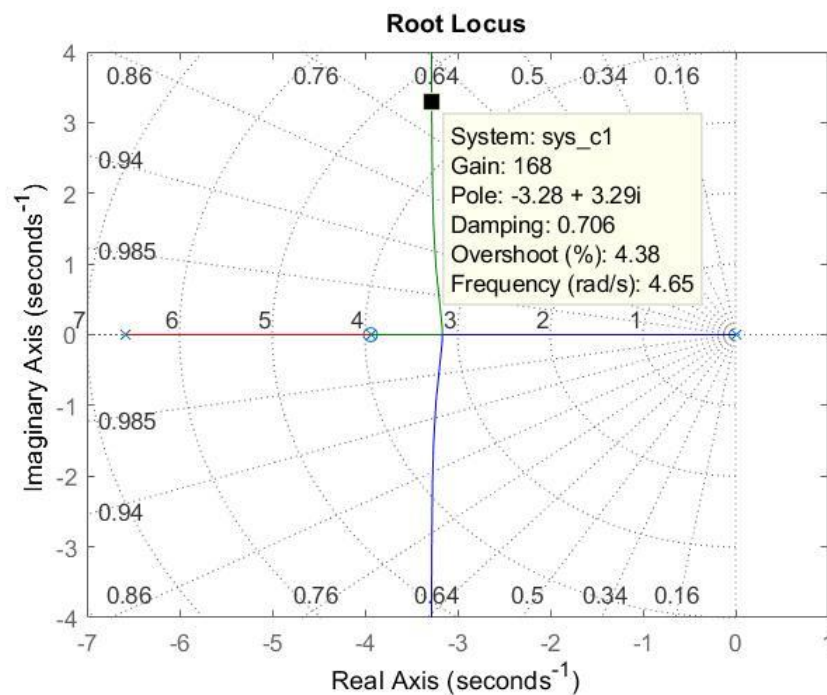
ต้องการออกแบบให้ Overshoot ของมอเตอร์ไม่เกิน 20% และ settling time ไม่เกิน 1 sec จะได้

$$\xi = 0.7$$

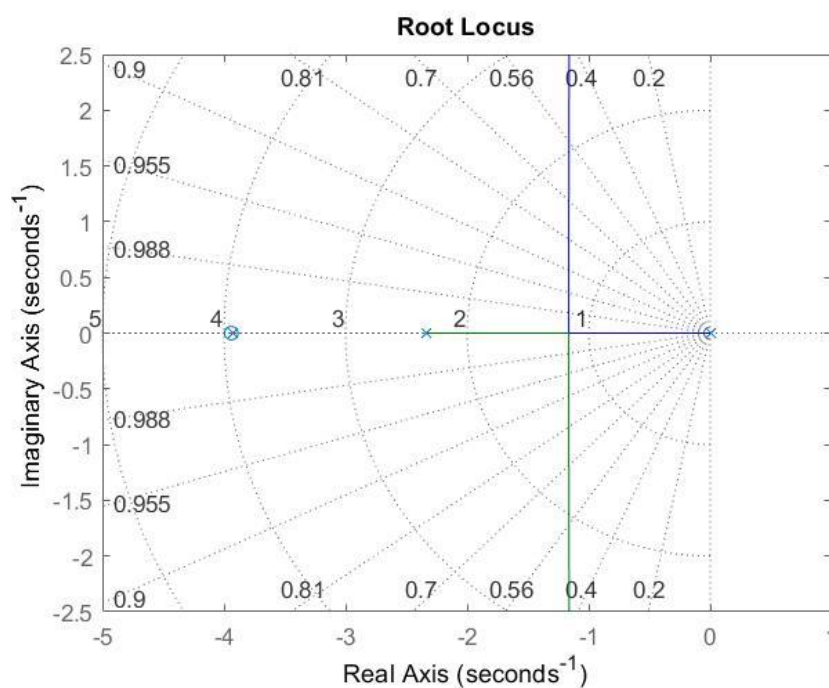
$$t_s = \frac{4}{\xi \omega_n} = 1$$

$$\xi \omega_n > 4$$

เริ่มพิจารณาจาก PI Controller position จากรูปที่ 66 โดยกำหนดค่าเกณฑ์ภายใน Inner loop (speed-current-Plant loop) ขึ้นมาค่าหนึ่ง จากการหา root locus ของ loop นี้ ไม่ว่าจะเปลี่ยนค่าอย่างไร จะได้ dominant pole ใกล้เคียงกัน นั่นก็คือ $\xi \omega_n \approx 3.2$ สำหรับ Outer Motor และ $\xi \omega_n \approx 1.3$ สำหรับ Inner Motor ดังแสดงในรูปที่ 67 และ 68

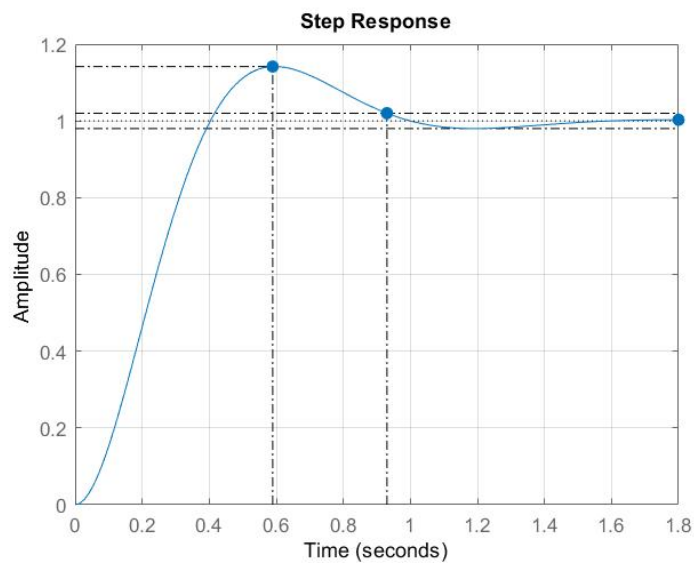


รูปที่ 67 root locus ของ Speed-current-Plant loop ของ Outer Motor

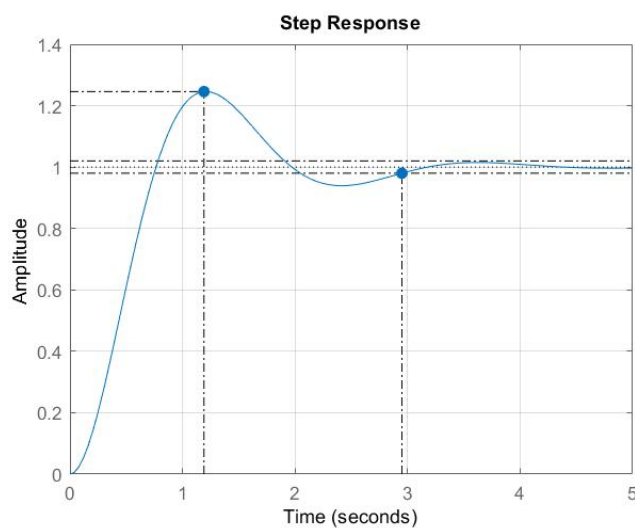


รูปที่ 68 root locus ของ Speed-current-Plant loop ของ Outer Motor

ซึ่ง $\xi\omega_n$ มีค่าน้อยกว่าค่าที่คำนวณได้ จึงลด Damping ratio เพื่อเพิ่มค่า Kp และ ให้ค่า Ki เป็น 0 เนื่องจาก Ki ทำให้ระบบช้าลง และ Unstable มากขึ้น เพื่อให้ได้ settling time ที่น้อยที่สุด และจะได้ Step Response ดังแสดงในรูปที่ 69 และ 70 โดยมีค่าเกณฑ์ทั้งหมด ดังที่แสดงในตารางที่ 7



รูปที่ 69 Step Response ของ Outer Motor



รูปที่ 70 Step Response ของ Inner Motor

ตารางที่ 7 ค่าเกนของระบบควบคุม

Gain	Value (Outer Motor)	Value (Inner Motor)
POSITION_KP	300	40
POSITION_KI	0	0
SPPED_KP	2500	1000
SPEED_KI	0	0
TORQUE_KP	266	266
TORQUE_KI	1048	1048

จากนั้นทำการปรับค่าเกน (gain) ให้ได้ผลตอบสนอง (response) จากขาจริง ตามที่ต้องการ หลังจากปรับค่าเกนแล้วจะได้ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 8 จากนั้นนำไปสร้างตัวควบคุมแบบดิจิทัล (digital controller) ต่อไป

ตารางที่ 8 ค่าเกนของระบบควบคุม

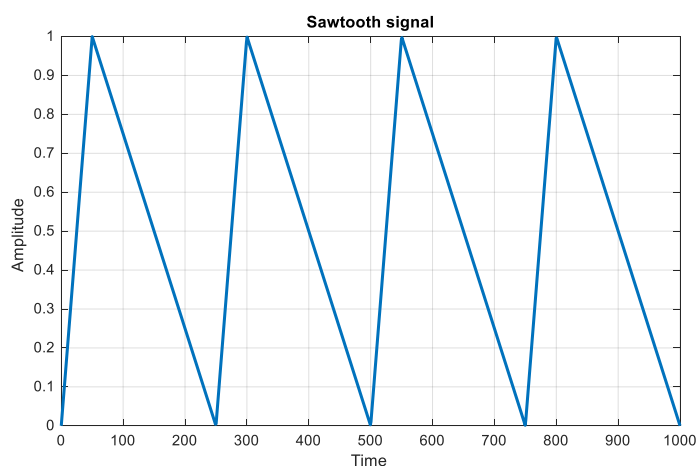
Gain	Value (Outer Motor)	Value (Inner Motor)
POSITION_KP	200	100
POSITION_KI	0	0
SPEED_KP	2500	1000
SPEED_KI	750	750
TORQUE_KP	266	266
TORQUE_KI	394	394

3.4.3 รูปแบบวิธีในการเดินของหุ่นยนต์

ในการควบคุมให้หุ่นยนต์เดินด้วยท่าทางการเดิน (gait) ที่ต้องการ จำเป็นจะต้องมีการกำหนดเส้นทางการเดิน (trajectory) เพื่อควบคุมตำแหน่งของขาเคลื่อนไปตามตำแหน่งที่ต้องการ โดยส่งคำสั่งที่ระบุตำแหน่งไปที่มอเตอร์แต่ละตัว

3.4.3.1 การสร้างรูปแบบการเดินของหุ่นยนต์โดยการสร้างสัญญาณในการควบคุม

ในการควบคุมหุ่นยนต์ในการเดินนั้นจะมีจังหวะที่สำคัญอยู่สองส่วนคือ จังหวะยกขา (swing phase) และจังหวะแตะพื้น (stance phase) ซึ่งในการควบคุมนั้นจะใช้สัญญาณรูปฟันเลื่อย (sawtooth waveform) ในการกำหนดตำแหน่งมุมของมอเตอร์ โดยจังหวะที่สัญญาณมีความชันเป็นบวกคือจังหวะยกขา และในทางกลับกันเมื่อความชันของสัญญาณเป็นลบคือจังหวะแตะพื้น โดยจะสร้างสัญญาณที่มีขนาดอยู่ระหว่าง 0 และ 1 ดังแสดงในรูปที่ 71 เพื่อให้หุ่นยนต์สามารถเดินได้อย่างรวดเร็วจึงกำหนดให้จังหวะยกขามีระยะเวลาสั้นกว่าจังหวะแตะพื้นด้วยอัตราส่วน 1:5

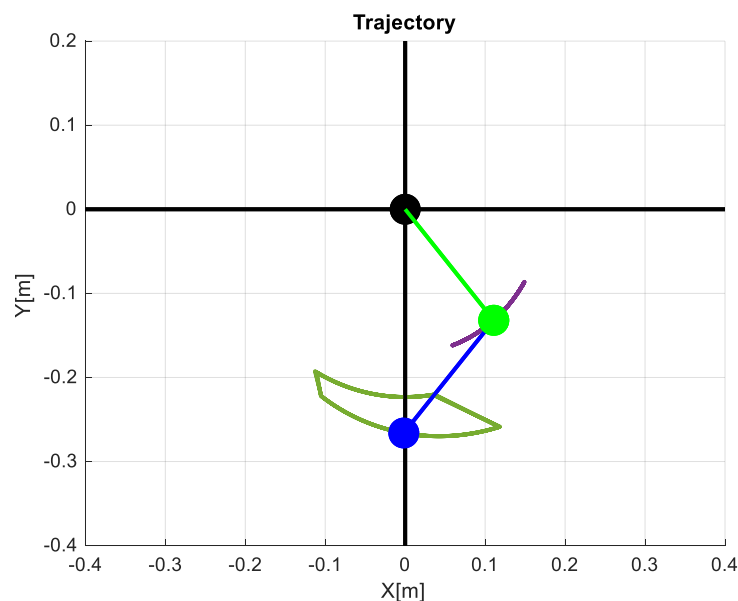


รูปที่ 71 แสดงสัญญาณรูปฟันเลื่อย

จากนั้นทำการทำแผนที่ (mapping) ระหว่างขนาดสัญญาณที่ได้จากสัญญาณรูปฟันเลื่อยและขนาดมุมของมอเตอร์แต่ละตัว โดยใช้สมการเส้นตรง (linear regression) และขนาดมุมที่มากที่สุด (maximum angle) และน้อยที่สุด (minimum angle) ของมอเตอร์แต่ละตัวดังแสดงในตารางที่ 9 ในการทำแผนที่ ซึ่งจะสามารถสร้างรูปแบบการเดินแบบที่ 1 ได้ดังแสดงในรูปที่ 72

ตารางที่ 9 ค่าของตัวแปรในการทำแผนที่

Parameter	Value
theta1_max	70
theta1_min	30
theta2_max_swing	100
theta2_min_swing	100
theta1_max_stance	90
theta1_min_stance	70

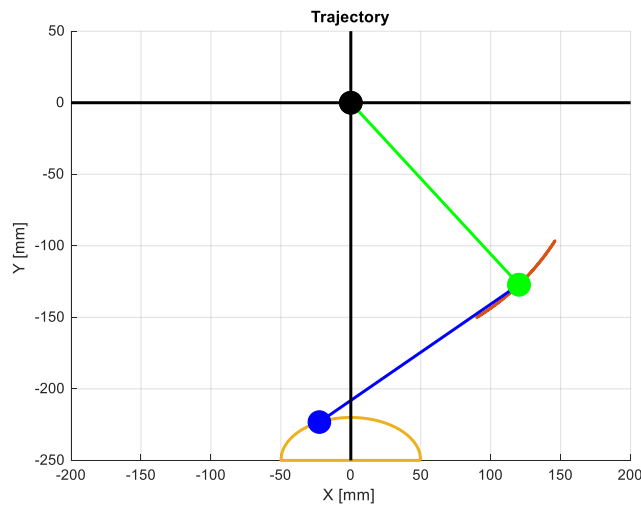


รูปที่ 72 รูปแบบการเดินของขาหุ่นยนต์แบบที่ 1

3.4.3.2 การสร้างรูปแบบการเดินของหุ่นยนต์โดยใช้จลนศาสตร์ผกผัน

จากการทดสอบพบว่ารูปแบบการเดินของขาหุ่นยนต์แบบที่ 1 ไม่เหมาะสมต่อการนำไปใช้ทำการเดินของหุ่นยนต์ จึงได้ทำการออกแบบรูปแบบการเดินใหม่อีกครั้งโดยใช้จลนศาสตร์ผกผัน ซึ่งวิธีนี้มีข้อด้อยที่ไม่สามารถปรับแต่งรูปแบบการเดินได้โดยง่ายเหมือนวิธีแรก แต่มีข้อดีที่สามารถกำหนดรูปแบบการเดินโดยชัดเจนได้ วิธีเริ่มจากการกำหนดรูปแบบการเดินที่เหมาะสม จากนั้นจึงใช้จลนศาสตร์ผกผันในการหามุมของ

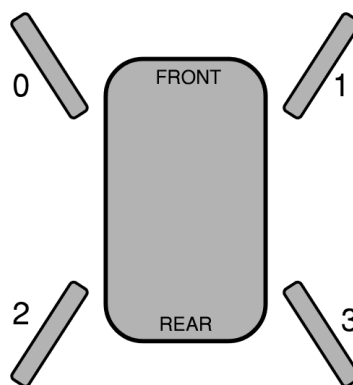
มอเตอร์แต่ละตัวเมื่อกำหนดตำแหน่งปลายขาของหุ่นยนต์ โดยได้ทำในการหามุมที่ของมอเตอร์แต่ละตัวเมื่อกำหนดตำแหน่งปลายขาของหุ่นยนต์ โดยได้ทำการออกแบบรูปแบบการเดินของหุ่นยนต์เป็นแบบที่ 2 คือ มีลักษณะของจังหวะยกขาเป็นรูปครึ่งวงรี และมีจังหวะแตะพื้นเป็นเส้นตรง ดังแสดงในรูปที่ 73



รูปที่ 73 รูปแบบการเดินของขาหุ่นยนต์แบบที่ 2

3.4.3.3 รูปแบบท่าทางในการเดิน

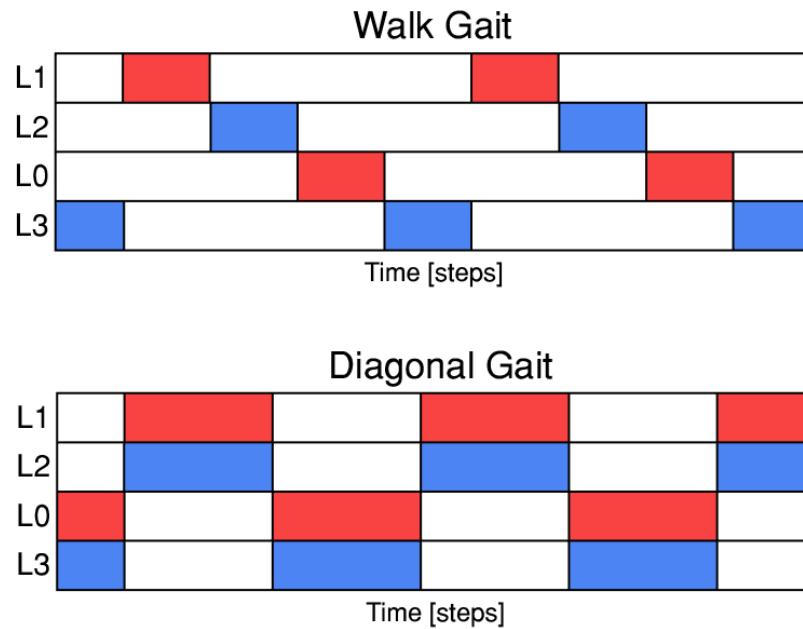
หลังจากที่ได้สัญญาณและตำแหน่งของมอเตอร์สำหรับแต่ละขาของหุ่นยนต์แล้ว ขั้นตอนถัดไปเป็นการกำหนดเฟส (phase) ที่ต่างกันในการส่งสัญญาณให้แก่ขาแต่ละข้างของหุ่นยนต์ ซึ่งเฟสที่ต่างกันจะทำให้เกิดท่าทางในการเดิน (gait) ที่แตกต่างกัน โดยกำหนดลำดับขาตามรูปที่ 74



รูปที่ 74 ลำดับขาของหุ่นยนต์

จากนั้นนำสัญญาณคำสั่งที่ได้มาส่งให้กับขาแต่ละข้าง โดยจะทำการเดินสองรูปแบบ คือการเดินแบบคลื่น (wave gait) และการเดินแบบทแยงมุม (diagonal gait) ซึ่งการเดินแบบคลื่นแบบซ้ำเป็นการที่ขาแต่ละข้างจะได้รับสัญญาณต่อเนื่องกันไปดังแสดงในรูปที่ 75 กล่าวคือขาแต่ละข้างของหุ่นยนต์จะเข้าสู่จังหวะยกขึ้น

เมื่อขาของหุ่นยนต์ลำดับก่อนหน้าเข้าสู่จังหวะเตะพื้น และการเดินแบบทแยงมุม เป็นการที่ขาของหุ่นยนต์จะเคลื่อนไหวพร้อมกันเป็นคู่ คือขาลำดับที่ 1 และ 2 และ ขาลำดับที่ 0 และ 3 จะเคลื่อนไหวพร้อมกัน โดยมีลักษณะสัญญาณดังแสดงในรูปที่ 75



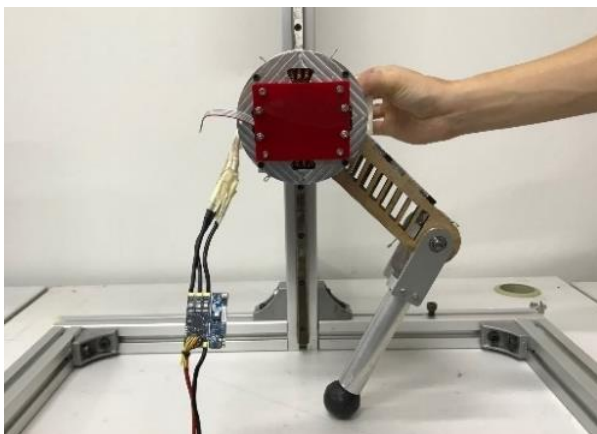
รูปที่ 75 สัญญาณรูปแบบการเดิน

บทที่ 4 การทดสอบระบบ

เมื่อทำการออกแบบระบบทางกลและทำการขึ้นรูปเสร็จสิ้นได้มีการทดสอบหุ่นยนต์ที่ได้พัฒนาขึ้นเพื่อนำผลที่ได้จากการทดสอบมาปรับปรุงแก้ไขหุ่นยนต์ให้ดีขึ้น ในการทดสอบนั้นแบ่งออกเป็น การทดสอบหนึ่งขา และการทดสอบทั้งระบบ

4.1 การทดสอบหนึ่งขา

ในส่วนแรกของการทดสอบจะเป็นการทดสอบหนึ่งขา ซึ่งเป็นส่วนสำคัญที่ใช้ในการทดสอบปรับค่าเกนของระบบควบคุมที่ใช้ในการควบคุมมอเตอร์แต่ละตัว โดยมีการออกแบบทำแท่นทดสอบขึ้นดังแสดงในรูปที่ 76 เพื่อใช้ในการทดสอบระบบ โดยออกแบบให้ขาสามารถเคลื่อนที่ขึ้นลงตามแนวราง (guide rail) ได้หลังจากที่ประกอบแท่นทดสอบและขาหุ่นยนต์เสร็จจึงทำการทดสอบโดยการส่งคำสั่งตำแหน่งให้มอเตอร์ทั้งสองตัวขยับไปตามตำแหน่งที่กำหนด โดยแบ่งเป็นการทดสอบย่อย คือการทดสอบการยืน การทดสอบการขยับ และการทดสอบการกระโดด



รูปที่ 76 แท่นทดสอบหนึ่งขา

4.1.1 การทดสอบการยืน

การทดสอบการยืนเป็นการส่งคำสั่งตำแหน่งให้กับมอเตอร์ทั้งสองในท่าทางพักหรือทำยืนปกติของขาหุ่นยนต์ เพื่อทดสอบว่าแรงบิดของมอเตอร์มีมากพอที่จะรับน้ำหนักของหุ่นยนต์หรือไม่ และปรับค่าเกนของระบบควบคุมให้เหมาะสม คือสามารถรับน้ำหนักที่ต้องการได้โดยไม่เกิดการสั่น ซึ่งได้ผลทดสอบออกมาตามที่คาดหวังไว้

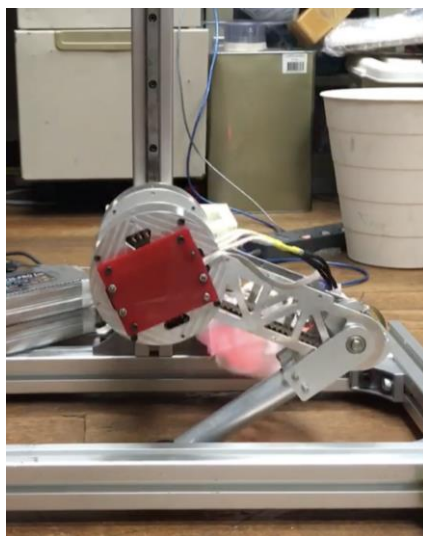
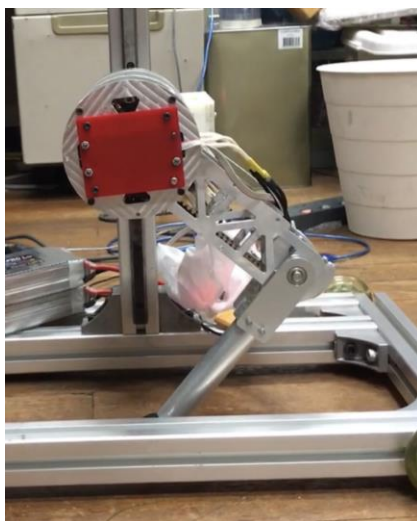
4.1.2 การทดสอบการขยับ

การทดสอบการขยับ คือการส่งคำสั่งให้ขาหุ่นยนต์ขยับขึ้นลงตามที่ต้องการ โดยการกำหนดตำแหน่งของมอเตอร์สองตำแหน่งคือ ตำแหน่งเริ่มต้นและตำแหน่งสิ้นสุดเพื่อให้ขาเคลื่อนจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง

จากนั้นพิจารณาความเร็วในการตอบสนองของมอเตอร์เพื่อนำไปทำการปรับค่าเกนของระบบควบคุมให้ระบบสามารถตอบสนองได้ดังที่ต้องการ ซึ่งได้ผลทดสอบออกมาตามที่คาดหวังไว้ดังแสดงในรูปที่ 77

4.1.2 การทดสอบการกระโดด

การทดสอบการกระโดดเป็นการทดสอบที่มีลักษณะใกล้เคียงกับการทดสอบการขยับคือ มีการกำหนดตำแหน่งเริ่มต้นและตำแหน่งสิ้นสุด แต่มีส่วนที่ต่างกันคือมีการลดระยะเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ระหว่างสองตำแหน่งให้สั้นลงจนขาหุ่นยนต์ขยับเร็วมากจนสามารถยกปลายเท้าให้ลอยขึ้นจากพื้นได้ ซึ่งได้ผลทดสอบออกมาตามที่คาดหวังไว้



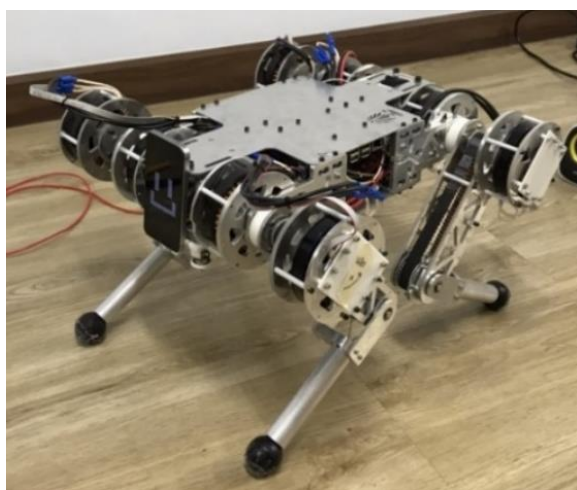
รูปที่ 77 การทดสอบการขยับขาของหุ่นยนต์

4.2 การทดสอบทั้งระบบ

หลังจากทำการทดสอบหนึ่งขาและปรับค่าระบบควบคุมให้เป็นไปตามที่ต้องการแล้ว จึงทำการประกอบส่วนประกอบที่สำคัญของหุ่นยนต์เข้าด้วยกัน คือประกอบลำตัวเข้ากับขาทั้งสองข้าง และการติดตั้งระบบไฟฟ้าในหุ่นยนต์ และนำหุ่นยนต์ที่สมบูรณ์มาทำการทดสอบทั้งระบบ โดยแบ่งเป็นการทดสอบย่อย คือ การทดสอบการยืน และการทดสอบการเดิน

4.2.1 การทดสอบการยืน

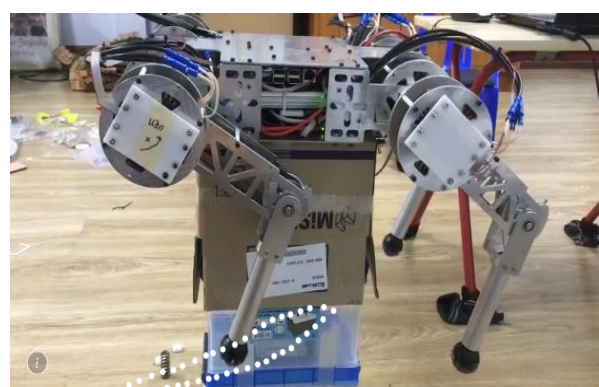
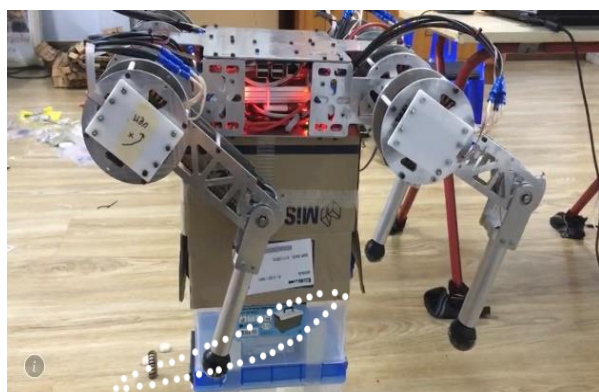
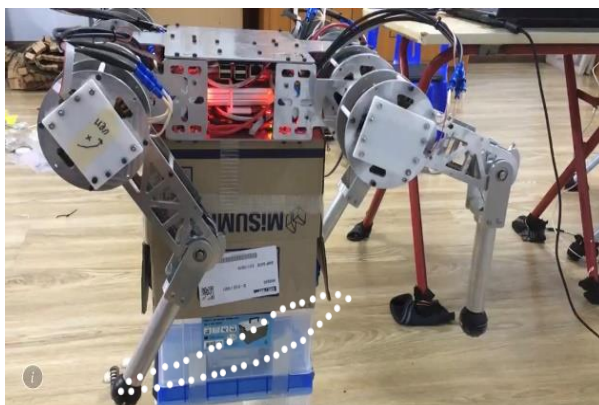
การทดสอบการยืนเป็นการทดสอบโดยการส่งตำแหน่งให้กับมอเตอร์ทั้งสองในท่าทางพักหรือท่ายืนปกติของขาหุ่นยนต์ เพื่อทดสอบว่าหุ่นยนต์สามารถรับน้ำหนักของตัวเองได้โดยไม่ล้มหรือไม่ และทดสอบว่าหุ่นยนต์เอียงหรือไม่ ซึ่งผลการทดสอบพบว่าจุดศูนย์กลางมวลของหุ่นยนต์มีตำแหน่งค่อยๆ ไปทางด้านหลังของหุ่นยนต์ และพบว่าเมื่อหุ่นยนต์ยืนด้วยท่าทางการยืนของหุ่นยนต์ (configuration) ที่หันขาไปทางเดียวกันจะส่งผลทำให้หุ่นยนต์ล้ม จึงทำการเปลี่ยนท่าทางการยืนของหุ่นยนต์ให้ขาหันตรงข้ามกัน โดยการยืนด้วยท่าทางนี้จะทำให้หุ่นยนต์มีเสถียรภาพ (stable) มากกว่า และมีความสมมาตร (symmetry) ซึ่งท่าทางนี้ส่งผลให้ได้ผลทดสอบออกมาตามที่คาดหวังไว้ คือหุ่นยนต์สามารถยืนได้ดังแสดงในรูปที่ 78



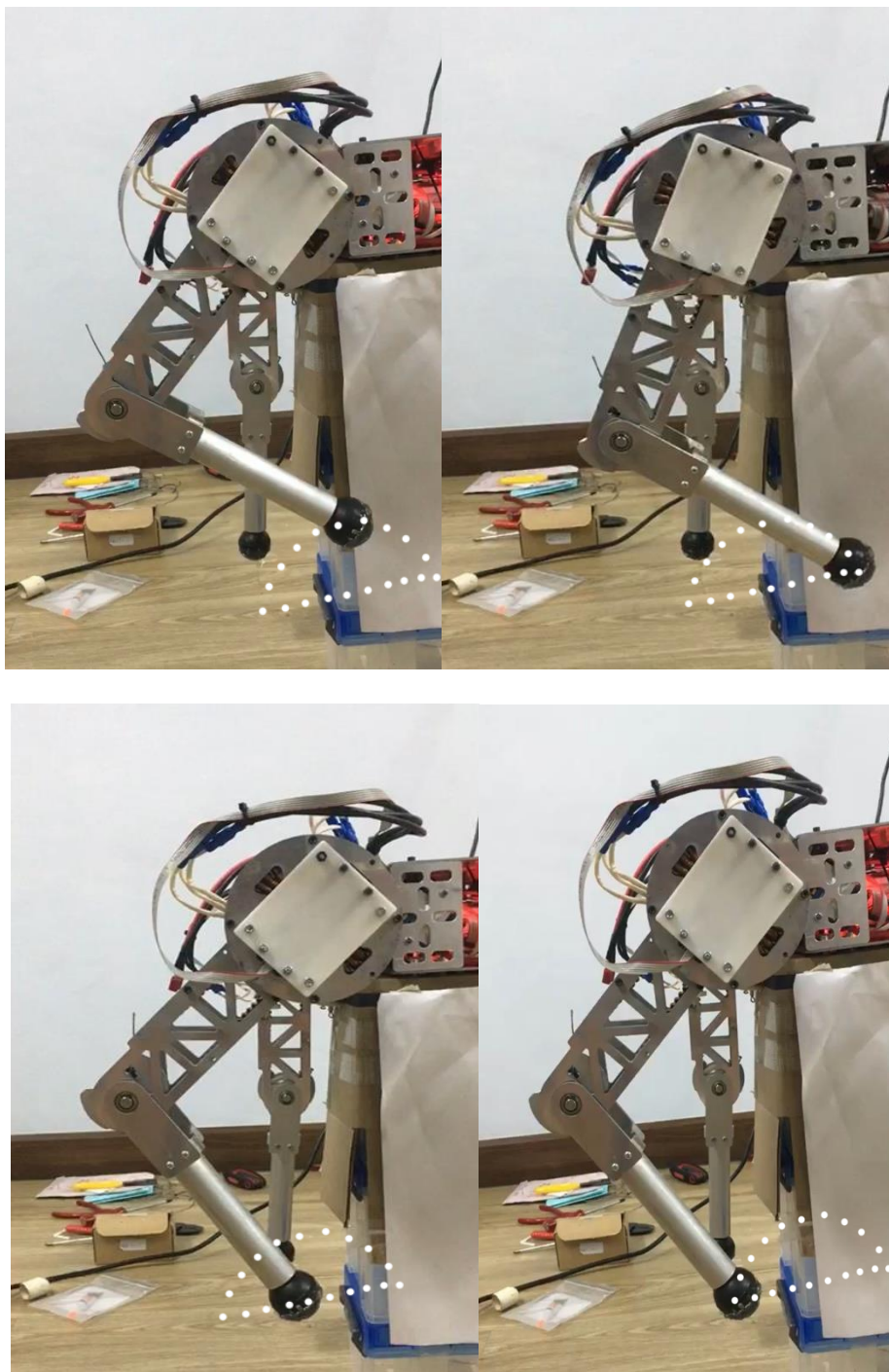
รูปที่ 78 การทดสอบการยืน

4.2.2 การทดสอบการเดิน

หลังจากที่หุ่นยนต์สามารถยืนได้อย่างที่ต้องการแล้วจึงทำการทดสอบการเดิน โดยการนำสัญญาณรูปแบบวิธีการเดินที่ออกแบบไว้มาส่งคำสั่งให้แก่มอเตอร์ของขาแต่ละข้างให้เกิดรูปแบบการเดินต่าง ๆ คือ การเดิน (walk gait) และการวิ่งเหยาะ (trot gait) โดยใช้รูปแบบการเดินสองแบบก็คือ 1. การใช้สัญญาณรูปฟันเลื่อย และ 2. การยกขาเป็นรูปครึ่งวงรี ซึ่งทำให้ได้รูปแบบการเดินดังแสดงในรูปที่ 79 และ 80 ตามลำดับ แต่เนื่องด้วยข้อจำกัดทางด้านเวลาจึงไม่สามารถทำการทดสอบบนพื้นจริงได้ตามแผนที่ตั้งไว้



รูปที่ 79 การทดสอบการเดินแบบที่ 1



รูปที่ 80 การทดสอบการเดินแบบที่ 2

บทที่ 5 สรุปผลโครงการ

โครงการนี้นำเสนอการออกแบบ การผลิต และการควบคุมในการพัฒนาต้นแบบหุ่นยนต์สี่ขาที่มีความคล่องตัว โดยมีจุดประสงค์การออกแบบหุ่นยนต์ให้มีความยืดหยุ่นเพื่อให้สามารถรองรับกับการทำงานในสิ่งแวดล้อมที่ไม่ได้ควบคุมซึ่งมีสิ่งรบกวนที่ไม่สามารถคาดเดาและทำงานในพื้นที่ที่มีความต่างระดับได้ ส่วนสำคัญของโครงการมุ่งเน้นไปที่การออกแบบทางกล หุ่นยนต์ต้นแบบที่พัฒนาขึ้นมาเป็นหุ่นยนต์สี่ขาที่มี 8 องศาอิสระ มีน้ำหนัก 10 กิโลกรัม ใช้การควบคุมแบบพีไอ สามารถทำการยืน ในการออกแบบจะมุ่งเน้นไปที่การออกแบบขาให้มีน้ำหนักเบา มีความยืดหยุ่น และมีความแข็งแรงสามารถทำการทดสอบตามที่กำหนดไว้ได้ และการเลือกใช้อุปกรณ์ขับเคลื่อนและระบบเกียร์ให้สามารถสร้างแรงบิดได้เพียงพอตามที่ต้องการ โดยที่ยังมีขนาดเล็กและน้ำหนักเบา จากการทดสอบพบว่าในการทดสอบหนึ่งขา ขาของหุ่นยนต์สามารถทำการทดสอบที่กำหนดไว้ได้ตามที่ต้องการ แต่ในการทดสอบทั้งระบบพบปัญหาที่จุดศูนย์กลางมวลของหุ่นยนต์มีตำแหน่งค่อนข้างทางด้านหลังของหุ่นยนต์ทำให้ต้องเปลี่ยนแปลงท่าทางการยืนและการเดิน ซึ่งหลังจากเปลี่ยนท่าทางการยืนหุ่นยนต์สามารถทำการทดสอบที่กำหนดไว้ได้ตามที่ต้องการ ทั้งนี้ในการทดสอบการเดิน เนื่องด้วยเวลาที่จำกัดจึงไม่สามารถทำการทดสอบตามแผนที่ตั้งไว้ได้

แนวทางในการปรับปรุงเพื่อให้หุ่นยนต์มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นสามารถทำได้โดย การออกแบบหุ่นยนต์ให้มีขนาดเล็กลง การเปลี่ยนระบบขับเคลื่อนหรือมอเตอร์ให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ออกแบบแท่นหรืออุปกรณ์ทดสอบให้เหมาะสมมากขึ้น ซึ่งจะทำให้สามารถทำการทดสอบการควบคุมแบบต่าง ๆ โดยที่ไม่ส่งผลเสียต่อตัวหุ่นยนต์หรือสามารถทดสอบได้อย่างปลอดภัยและมีมาตรฐานมากยิ่งขึ้น ทำการวางระบบไฟให้มีความซับซ้อนน้อยลงเพื่อที่จะสามารถหาส่วนที่มีปัญหาและสามารถแก้ไขได้ง่าย

ในอนาคตสามารถพัฒนาเพิ่มเติมต่อยอดได้โดยการเปลี่ยนความยืดหยุ่นของสปริงให้มีความเหมาะสมมากยิ่งขึ้น หรืออาจเปลี่ยนไปใช้ระบบขับเคลื่อนที่มีลักษณะเป็นสปริงเสมือนแทนสปริงทางกล เพิ่มจำนวนองศาอิสระซึ่งจะทำให้หุ่นยนต์สามารถทำการเคลื่อนไหวได้หลากหลายรูปแบบมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถพัฒนาการออกแบบทางกลเพื่อให้หุ่นยนต์มีขนาดเล็กลง มีน้ำหนักที่น้อยลง สามารถเคลื่อนไหวได้รวดเร็วขึ้น และการพัฒนาและเพิ่มรูปแบบการควบคุมและการเดินให้มีความหลากหลายมากขึ้นเพื่อใช้ในการเคลื่อนไหวในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกันออกไป นอกจากนี้ถ้าจะมีการติดตั้งเซนเซอร์เพิ่มเพื่อวัดแรงที่เท้าของหุ่นยนต์ วัดมุมที่เปลี่ยนไปจากการกดของสปริง และเซนเซอร์เพื่อวัดองศาของลำตัว ซึ่งจะทำให้สามารถทำการควบคุมหุ่นยนต์ได้ดียิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] Claudio Semini*, Nikos G. Tsagarakis, Emanuele Guglielmino, Michele Focchi, Ferdinando Cannella and Darwin G. Caldwell, “Design of HyQ – a Hydraulically and Electrically Actuated Quadruped Robot”, Department of Advanced Robotics, Italian Institute of Technology
- [2] Kenichi Narioka, Andre Rosendo, Alexander Sproewitz, Koh Hosoda, “Development of a minimalistic pneumatic quadruped robot for fast locomotion”, IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), 2012
- [3] Gerardo Bledt, Matthew J. Powell, Benjamin Katz, Jared Di Carlo, Patrick M. Wensing and Sangbae Kim, “MIT Cheetah 3: Design and Control of a Robust, Dynamic Quadruped Robot” 2018 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), 2018
- [4] Felix Ruppert and Alexander Badri-Spröwitz, “Series Elastic Behavior of Biarticular Muscle-Tendon Structure in a Robotic Leg”, Front. Neurobot. 29 August 2019
- [5] Hutter, Marco. StarLETH & Co, “Design and control of robots with compliant actuation”, Doctoral Thesis of Department of Mechanical and Process Engineering ETH Zurich, 2013
- [6] Katz, Benjamin G, “A Low Cost Modular Actuator for Dynamic Robots”, Master thesis of Department of Mechanical MIT, June 2018
- [7] Shinya Aoi, Daiki Katayama¹, Soichiro Fujiki, Nozomi Tomita, Tetsuro Funato, Tsuyoshi Yamashita, Kei Senda and Kazuo Tsuchiya, “A stability-based mechanism for hysteresis in the walk–trot transition in quadruped locomotion”, journal of the royal society interface, 2013
- [8] Katsuyoshi Tsujita, Kazuo Tsuchiya† and Ahmet Onat, “Adaptive Gait Pattern Control of a Quadruped Locomotion Robot”, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2001
- [9] Luciano Buono, Martin Golubitsky, “Models of central pattern generators for quadruped locomotion I. Primary gaits”, Journal of Mathematical Biology, 2011
- [10] Shigley’s mechanical engineering design.—Tenth edition, Richard G. Budynas, professor emeritus, 2015

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก. รายละเอียดชิ้นส่วนที่สำคัญของหุ่นยนต์

1) 511-B-G431B-ESC1



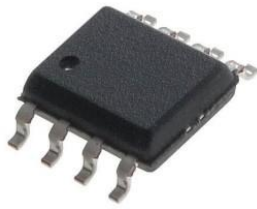
ชุดการค้นพบ B-G431B-ESC1 ของ STMicroelectronics อยู่บนพื้นฐานของไมโครคอนโทรลเลอร์ STM32G431CB ตัวขับ L6387 และ MOSFET พลังงาน STL180N6F7 ชุดดังกล่าวประกอบด้วยบอร์ดพลังงานหลักและบอร์ดย่อยที่มี LINK/V2-1 แบบฝังตัว ชุดนี้เป็นตัวควบคุมความเร็วอิเล็กทรอนิกส์ (ESC) ที่ได้รับการออกแบบมาเพื่อขับเคลื่อนมอเตอร์เดี่ยว 3 เฟสแบบไร้แปรงถ่าน (BLDC/PMSM) ทำงานด้วยอัลกอริทึม FOC แบบไร้เซ็นเซอร์และการควบคุม 6 ชั้นพร้อมการควบคุมความเร็วและอัลกอริทึมฟังก์ชันเบรกแบบแอคทีฟ อัลกอริทึม FOC แบบไร้เซ็นเซอร์ช่วยรับรองเวลาของการบินที่ยาวนานขึ้นและสมรรถนะแบบไดนามิกที่มีประสิทธิภาพสูงสุด อุปกรณ์นี้รับสัญญาณคำสั่งจากอุปกรณ์ภายนอกเพื่อการติดตามและตรวจสอบ เช่น บอร์ดควบคุมการบิน หรือเทียบเท่า ด้วยจุดประสงค์ดังกล่าว บอร์ดนี้จึงมาพร้อมอินเทอร์เฟซการสื่อสารหลากหลาย (แชนเนล UART, CAN, PWM) มีโพเทนชิโอมิเตอร์และปุ่มสั่งการโดยผู้ใช้สำหรับการใช้งานของผู้ใช้ บอร์ดย่อยรวมวงจรตัวจัดแบตเตอรี่ (BEC) 5V และบอร์ดหลักมีวงจรป้องกันกระแสไฟเกิน/แรงดันไฟเกินและความร้อน รูปแบบที่ทำให้เหมาะสำหรับยานพาหนะ R/C ขนาดเล็กและเบา (โดรนที่มีชุด FPV) และความสามารถของกระแสไฟมอเตอร์ที่เหมาะสมกับข้อกำหนดของยานพาหนะขนาดใหญ่ เช่น โดรนระดับมืออาชีพ

2) 511-NUCLEO-G431KB



บอร์ด NUCLEO-G431KB STM32G4 Nucleo-32 ของ STMicroelectronics นำเสนอวิธีที่ประหยัดและยืดหยุ่นสำหรับผู้ใช้ในการทดลองแนวคิดและสร้างต้นแบบใหม่ๆ ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ (MCU) STM32G4 มาพร้อมกับตัวเลือกที่หลากหลายสำหรับการผสมผสานกันในด้านประสิทธิภาพ การใช้พลังงาน และคุณสมบัติต่างๆ ที่ MCU เหล่านี้มอบให้ ความสามารถด้านการเชื่อมต่อของ Nano V3 ของ Arduino™ นำเสนอวิธีการเชื่อมต่อที่ช่วยเพิ่มฟังก์ชันการทำงานของแพลตฟอร์มการพัฒนาแบบเปิด Nucleo ด้วยตัวเลือกชุดป้องกันพิเศษที่หลากหลาย NUCLEO-G431KB ไม่จำเป็นต้องมีอุปกรณ์ตรวจสอบแยกต่างหากเนื่องจากได้รวมเอาดีบั๊กเกอร์/โปรแกรมเมอร์ STLINK-V3E เข้าไว้ด้วยแล้ว NUCLEO-G431KB มาพร้อมกับไลบรารีซอฟต์แวร์ฟรีที่ครอบคลุมและตัวอย่างที่มาพร้อมกับแพ็คเกจ MCU STM32CubeG4

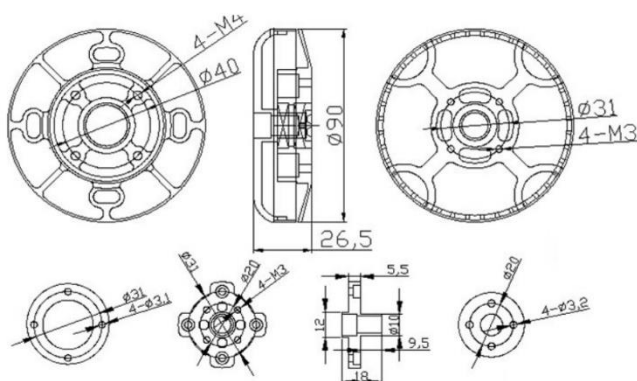
3) 579-ATA6561-GAQW-N



Microchip Technology ATA6560/ATA6561 High-Speed Controller Area Network (CAN) Transceivers provide an interface between a CAN protocol controller and the physical two-wire CAN bus. These high-speed CAN transceivers offer communication speed up to 5Mbps. The ATA6560/ATA6561 transceivers offer improved Electro-magnetic Compatibility (EMC) and Electro-static Discharge (ESD) performance. These high-speed CAN transceivers feature differential receiver with wide common-mode range, remote wake-up capability via CAN bus, and functional behavior predictability under all supply conditions. The ATA6560/ATA6561 transceivers protect bus pins against transients in automotive environments.

แอตทริบิวต์ผลิตภัณฑ์	ค่าแอตทริบิวต์
ผู้ผลิต:	Microchip
ประเภทสินค้า:	อินเทอร์เฟซ CAN ของวงจรรวม
มาตรฐาน RoHS:	 รายละเอียด
รูปแบบการติด:	SMD/SMT
หีบห่อ/บรรจุภัณฑ์:	SOIC-8
ระดับ:	ATA6561
ประเภท:	High Speed
อัตราข้อมูล:	5 Mb/s
จำนวนไดรฟ์เวอร์:	1 Driver
จำนวนตัวรับสัญญาณ:	1 Receiver
การจ่ายแรงดัน (สูงสุด):	5.5 V
การจ่ายแรงดัน (ต่ำสุด):	4.5 V
กระแสไฟฟ้าที่จ่ายใช้งาน:	50 mA
ค่าต่ำสุดของอุณหภูมิในการใช้งาน:	- 40 C
ค่าสูงสุดของอุณหภูมิในการใช้งาน:	+ 150 C
การบรรจุ:	Cut Tape
การบรรจุ:	Reel
สินค้า:	CAN Transceivers
เครื่องหมายการค้า:	Microchip Technology
ประเภทอินเทอร์เฟซ:	CAN
อ่อนไหวต่อความชื้น:	Yes
การจ่ายแรงดันที่ใช้งาน:	4.5 V to 5.5 V
ประเภทสินค้า:	CAN Interface IC
ระยะเวลาที่ล่าช้าในการกระจายไฟฟ้า:	300 ns

4) X8308 Brushless motor kv135 Power



电机型号Motor Type	锂电池Lithium Battery	螺旋桨Propeller	适合起飞重量Appropriate Take-off Weight		
			4轴 (axle)	6轴 (axle)	8轴 (axle)
X8308 KV135	6S	T3095	8.5-9.5KG	12-14.5KG	18-19KG

拉力Pulling Force(g)	电流Current(A)	转速/RPM	功率Power(W)	力效Efficiency(g/W)	备注note
550	1.1	897	26.4	20.8333	
1050	2.55	1257	61.2	17.1569	
1520	4.35	1495	104.4	14.5594	
2080	6.85	1738	164.4	12.6521	3分钟43℃
2570	9.35	1927	224.4	11.4528	3分钟49℃
3050	12.75	2120	306	9.9673	
3550	26.25	2300	630	5.6349	
4050	18.95	2394	454.8	8.9050	
4600	22.85	2550	548.4	8.3880	100%油门



珠海枭鹰模型 X8308 36N40P多旋翼无刷电机

型号(Motor Type)	X8308 KV100	X8308 KV135	X8308 KV170
铁芯尺寸Iron Core Size (mm)	8308		
电机尺寸Motor Size (mm)	Ø90*26.5		
重量Weight	279g		
空载电流Idle Current (24V)	0.6A	0.9A	1.1A
支持锂电Support Lithium Battery	12S LiPo	6-12S LiPo	6S LiPo
最大电流Max Continuous Current (A)	25	31	33
最大功率Max Continuous Power (W)	750	940	1300
内阻Internal Resistance	0.246Ω	0.151Ω	0.096Ω

5) AS5047P-ATSM TSSOP14 AS5047P AS5047

**Product parameters**

Resolution [bit]	14 or 12
Interfaces	SPI
Output	SPI, ABI, UWW, PWM
Max. Speed [rpm]	28000
Overvoltage Protection	
Redundant	
Supply Voltage [V]	3.3 or 5.0
Temperature Range [°C]	-40 to +125
Package	TSSOP-14
Automotive Qualified	

6) Wire diameter 2.5mm small pressure spring spool compression force spring



ตารางที่ 10 น้ำหนักของหุ่นยนต์แยกตามองค์ประกอบ

no	component	weight (g)	จำนวน/ขา	น้ำหนักรวม1ชั้น	น้ำหนักรวม4ชั้น	รวม	ส่วน
1	ท่อ	95	1	95	248	992	ขาล่าง
2	แผ่นข้างท่อ+แบริ่ง	25	2	50			
3	บอลขา+โบลต์	75	1	75			
4	3d ยึดสลิง	2	2	4			
5	ทองเหลือง	4	2	8			
6	bolt 60mm	2	2	4			
7	สปริง	12	1	12			
8	เพลลา+key+spring	58	1	58	150	600	ข้อต่อล่าง
9	พูลเลล่าง	69	1	69			
10	belt	23	1	23			
11	แผ่นขา	88	2	176	176	704	ขาบน
12	เพลลา+key	41	1	41	63	252	ข้อต่อบน
13	พูลเลย์บน	22	1	22			
14	housingหน้านอก	92	1	92	536	2144	มอเตอร์นอก
15	housingหลังนอก	68	1	68			
16	มอเตอร์+เพลลา+เกียร์กลาง	305	1	305			
17	แผ่นpcb+แผ่นนอก+โบลต์4ตัว	24	1	24			
18	housing9mm+1mm+ring gear+3gear	47	1	47			
19	coupling+space ring	15	1	15	551	2204	มอเตอร์ใน
20	สัมน้ำใน	92	1	92			
21	สัมหลังใน	68	1	68			
22	มอเตอร์+เพลลา+เกียร์กลาง	305	1	305			
23	แผ่นpcb+แผ่นนอก+โบลต์4ตัว	24	1	24			
24	housing9mm+1mm+ring gear+3gear	47	1	47			
25	เพลลาใน+spring+แผ่นรองpcb alu+pcb	130	1	130	3015	3015	เพลลาใน
26	แผ่นตัวล่าง	248	1	248			
27	แผ่นตัวบน	248	1	248			
28	แผ่นรองสปริงใต้ตัว+bolt+nut	12	4	48			
29	inner housing+bearing+bolt+nut	90	4	360			
30	ที่ตั้งสวิตซ์+สวิตซ์3ตัว	35	1	35			
31	raspi	42	1	42			
32	lan	11	2	22			
33	board+nano	44	1	44			
34	esc+alu+สายไฟ	48	8	384			
35	battery	272	2	544			
36	busbar	42	1	42			
37	spring ตัว	5	8	40			
38	สายไฟ bolt และอื่นๆ	800	1	800			
39	ที่รองแบตเตอรี่	7	4	28			
				รวม	9911		

ภาคผนวก ข. ตารางและกราฟแสดงค่าในการคำนวณ

ตารางที่ 11 ค่าของตัวแปรในสมการหาแรงบิดที่เกิดขึ้น

ตัวแปร	ค่า	หน่วย
W_1	3.924	N
W_2	1.962	N
l_1	0.17232	m
l_2	0.175	m
l_{cm1}	0.0862	m
l_{cm2}	0.0583	m
θ	25	deg
ϕ	90	deg
$\phi - 90^\circ - \theta$	25	deg
F	29.43	N

ตารางที่ 12 ค่าแรงบิดที่เกิดขึ้นที่ขา

แรงบิดที่ข้อ	ค่า	หน่วย
M_1	2.7065	$N \cdot m$
M_2	4.5640	$N \cdot m$

ตารางที่ 13 ค่าของตัวแปรในสมการหาแรงอัดที่เกิดที่สปริงสำหรับขาส่วนล่าง (tibia)

ตัวแปร	ค่า	หน่วย
$M_{2_{\max}}$	4.5640	$N \cdot m$
r_2	0.026	m
$F_{2_{\max}}$	175.538	N

ตารางที่ 14 ค่าของตัวแปรในสมการหาแรงอัดที่เกิดที่สปริงสำหรับขาส่วนบน (femur)

ตัวแปร	ค่า	หน่วย
$M_{1_{\max}}$	2.7065	$N \cdot m$
r_1	0.027	m
$F_{1_{\max}}$	100.2405	N

ตารางที่ 15 ลักษณะของสปริงที่ต้องการสำหรับขาส่วนล่าง

สปริงสำหรับขาส่วนล่าง(tibia)	
ตัวแปร	ค่า
$D [mm]$	14
$d [mm]$	2.5
N_t	5
$L_o [mm]$	20
End Type	Squared and ground end
Material	Hard drawn wire ASTM A227

ตารางที่ 16 ลักษณะของสปริงที่ต้องการสำหรับขาส่วนบน

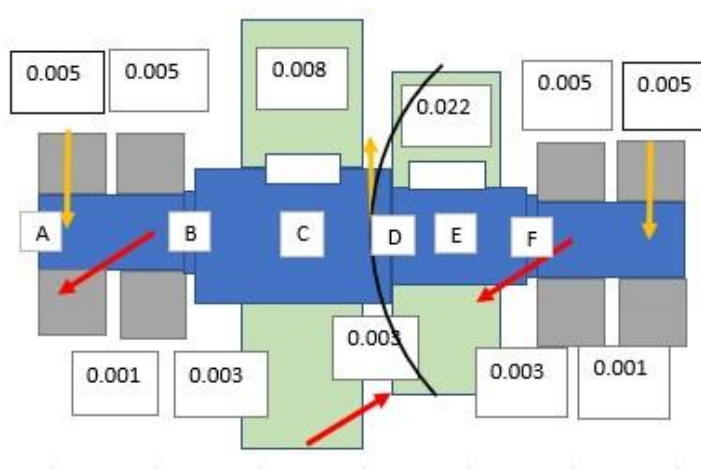
สปริงสำหรับขาส่วนบน(femur)	
ตัวแปร	ค่า
$D [mm]$	14
$d [mm]$	2.5
N_t	5
$L_o [mm]$	20
End Type	Squared and ground end
Material	Hard drawn wire ASTM A227

ตารางที่ 17 ลักษณะของสายพานและพู่ที่ต้องการ

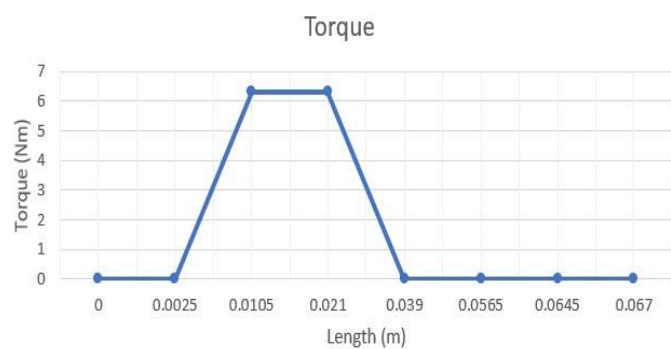
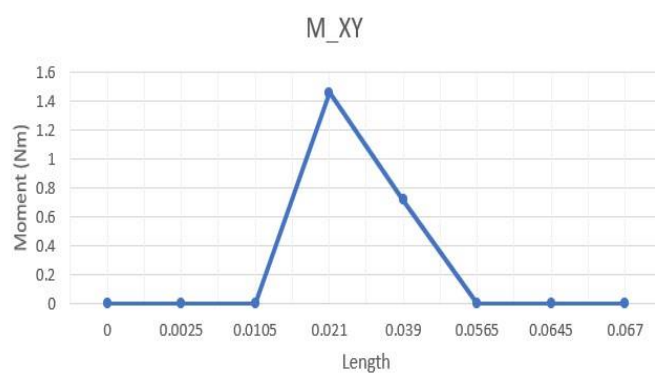
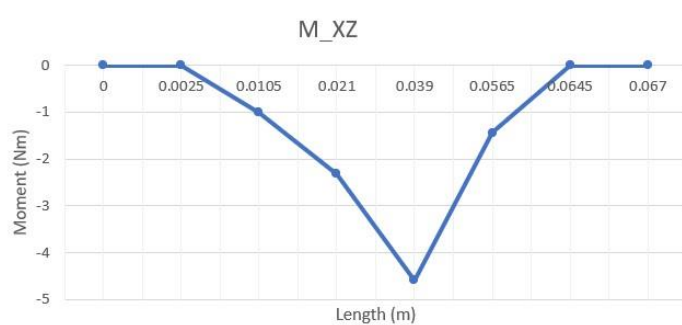
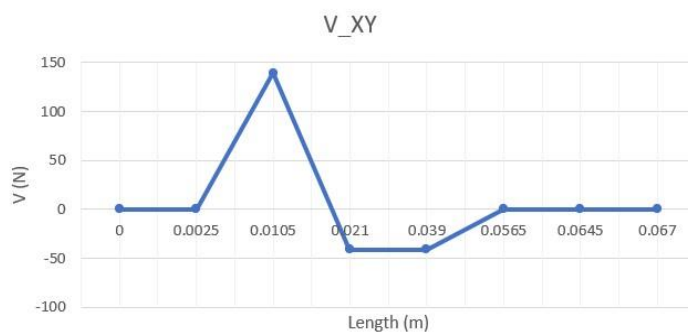
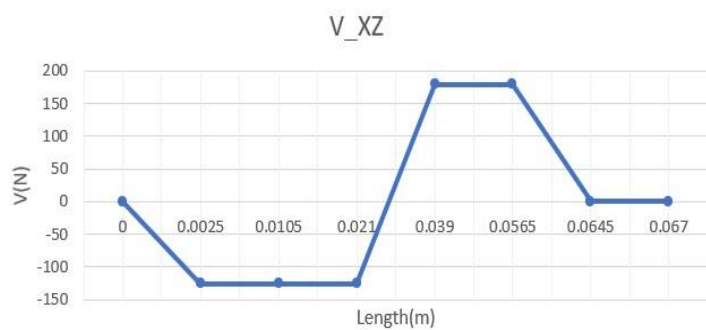
ตัวแปร	ค่า
ชนิด หรือ Type	S5M
ความหนาของสายพาน หรือ $B_w [mm]$	15
ความยาวของสายพาน หรือ $L_p [mm]$	450
จำนวนซี่ของพู่เล่ขนาดเล็ก	16
จำนวนซี่ของพู่เล่ขนาดใหญ่	26
ระยะระหว่างพู่เล่ หรือ $C [mm]$	172.3201

ตารางที่ 18 แรงที่เกิดขึ้นบนเพลลาของข้อต่อล่าง

Type	Parameter (m)			Force (N)			Keyway (mm)			Key (mm)	
	Width	Shaft Diameter	Outer Diameter	Force X	Force Y	Force Z	Keyway Width(W)	Keyway Depth(h)	Height	Key Width(W)	Key Depth(T)
Bearing1	0.01	0.008	0.019	97.71429 30.85714	-94.4392	-123.057	Metric Standard Parallel Keyway and Key Sizes Shaft Diameter (mm) Keyway (mm) Key (mm)* From To Width (W) Depth (h) Width (W) Depth (T)				
Bearing2	0.01	0.008	0.019								
Bearing3	0.01	0.008	0.019								
Bearing4	0.01	0.008	0.019								
Space1	0.003	0.008		-128.571		217.4964					
Space2	0.003	0.01									
Space3	0.003	0.012									
Space4	0.003	0.012									
Space5	0.003	0.008									
Pulley	0.008	0.01	0.07				4	1.8	5	2	2
Timing Pulley	0.022	0.012	0.04138				3	1.4	20	3	3
total length+1	0.086										



รูปที่ 81 ขนาดของเพลลาที่ข้อต่อล่าง



รูปที่ 82 แรง, โมเมนต์, ทอร์ค และโมเมนต์รวมที่เกิดขึ้นบนเพลลา

ตารางที่ 19 ค่าตัวแปรและสัมประสิทธิ์ในการคำนวณขนาดเพลาคือต่อล่างที่ตำแหน่ง C ตามรูปที่ 81

Check Diameter Failure ตรงที่เสี่ยงสุด			
At C	position	0.028	m
	moment	3.22773	Nm
	torque	6.318972	Nm
	Mm	0	
	Ta	0	
	Kt	1.7	
	Kts	1.5	
	Kf	1.7	
	Kfs	1.5	
	Sut	0.515	Gpa
		74.7	ksi
	Sy	0.205	Gpa
	a	2.7	
	b	-0.265	
	ka	0.86086	
guess	kb	0.9	
	kc	1	
	kd	1	
	ke	1	
	Se'	37.35	
	Se	28.938	kpsi
		199,382,089.10	pa
	SF (n)	1.5	
	d	0.008724211	m

ตารางที่ 20 ค่าตัวแปรและสัมประสิทธิ์ในการคำนวณขนาดเพลลา
ข้อต่อล่างที่ตำแหน่ง C ตามรูปที่ 81 ในขั้นตอนของการทำซ้ำ

Recal adjust	d	0.008	m
	D/d	1.2	
	D	0.0096	
	D	0.008	
<u>assume</u> <u>fillet</u> <u>radius</u>	r	0.0008	
	q	0.5	
	r/d	0.1	
	Kt	1.9	
	Kts	1.6	
	Kf	1.45	
	Kfs	1.3	
	Sut	0.515	Gpa
		73.2	ksi
	ka	0.861	
	kb	0.995	
	kc	1.000	
	kd	1.000	
	ke	1.000	
	Se'	37.350	
	Se	31.986	kpsi
		220,545,009.33	pa
	StressA'	93,109,789.68	pa
		13,504.46	psi
	StressM'	141,530,669.03	pa
		20,527.33	psi
<u>Using Good</u> <u>check</u> <u>yielding</u>	nf	1.43	
	Sy	205,000,000.00	
	Stress max	169,411,815.44	
	Sy/Stmax	1.210	

ตารางที่ 21 ค่าตัวแปรและสัมประสิทธิ์ในการคำนวณ
ขนาดเพลาคือต่อกลางที่ตำแหน่ง F ตามรูปที่ 81

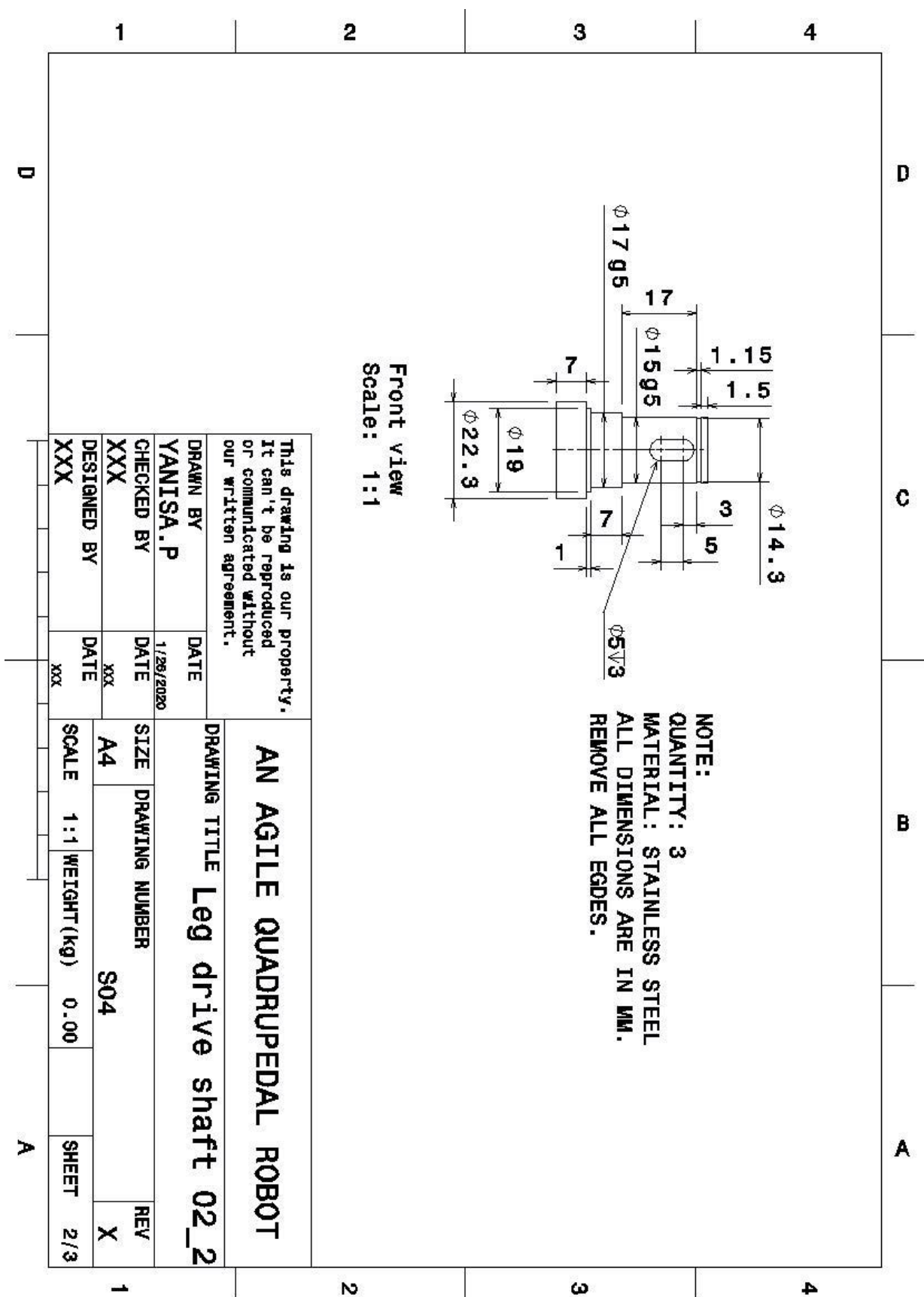
Check Diameter Failure ตรงที่เสี่ยงสุด			
At F	position	0.054	m
	moment	1.89584	Nm
	torque	0	Nm
	Mm	0	
	Ta	0	
	Kt	1.7	
	Kts	1.5	
	Kf	1.7	
	Kfs	1.5	
	Sut	0.515	Gpa
		74.7	ksi
	Sy	0.205	Gpa
	a	2.7	
	b	-0.265	
	ka	0.8609	
	kb	0.9	
	kc	1.0	
	kd	1.0	
	ke	1.0	
	Se'	37.35	
	Se	28.938	kpsi
		199382089.10	pa
	safety factor(n)	1.5	
	d	0.00627411	m

ตารางที่ 22 ค่าตัวแปรและสัมประสิทธิ์ในการคำนวณขนาดเพลลา
ข้อต่อล่างที่ตำแหน่ง F ตามรูปที่ 81 ในขั้นตอนของการทำซ้ำ

Recal	d	0.006	m
	D/d	1.2	
adjust	D	0.0072	
	D	0.008	
assume fillet			
radius	r	0.0006	
	q	0.5	
	r/d	0.1	
	Kt	1.9	
	Kts	1.6	
	Kf	1.45	
	Kfs	1.3	
	Sut	0.515	Gpa
		73.2	ksi
	ka	0.860862529	
	kb	1.02590465	
	kc	1	
	kd	1	
	ke	1	
	Se'	37.35	
	Se	32.98613325	kpsi
		227439388.7	pa
	StressA'	129633139.4	pa
		18801.73128	psi
	StressM'	0	pa
		0	psi
Using Good check yielding	nf	1.754484924	
	Sy	205000000	
	Stress max	129633139.4	
	Sy/Stmax	1.581385754	

ตารางที่ 23 ค่าตัวแปรและสัมประสิทธิ์ในการคำนวณขนาดเพลาคู่ต่อล่างที่ตำแหน่ง D ตามรูปที่ 81

Check Failure ที่ตำแหน่ง keyway			
At D	position	0.029	m
	moment	3.36532	Nm
	torque	6.318972	Nm
	Mm	0	
	Ta	0	
	Kt	2.2	
	Kts	3	
	q	0.6	
	kf	1.72	
	kfs	2.2	
	Stress a'	115155572.3	pa
		16701.9339	psi
	Stress m'	239513439.9	pa
		34738.55029	psi
Using Good	nf	1.012950006	



D

C

B

A

4

4

3

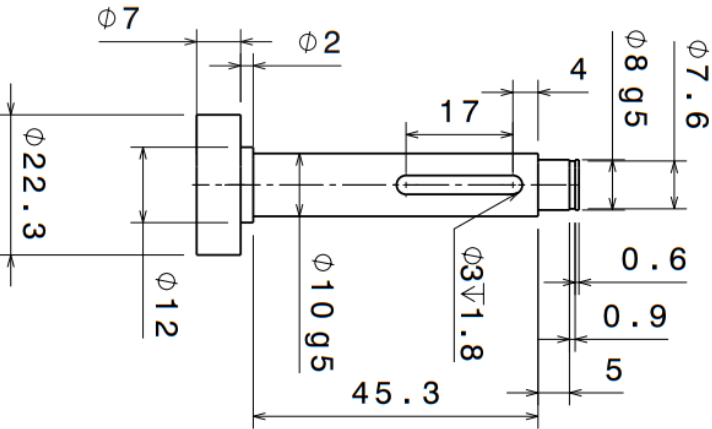
3

2

2

1

1



Front view
Scale: 1:1

NOTE:
QUANTITY: 3
MATERIAL: STAINLESS STEEL
ALL DIMENSIONS ARE IN MM.
REMOVE ALL EGDES.

This drawing is our property.
It can't be reproduced
or communicated without
our written agreement.

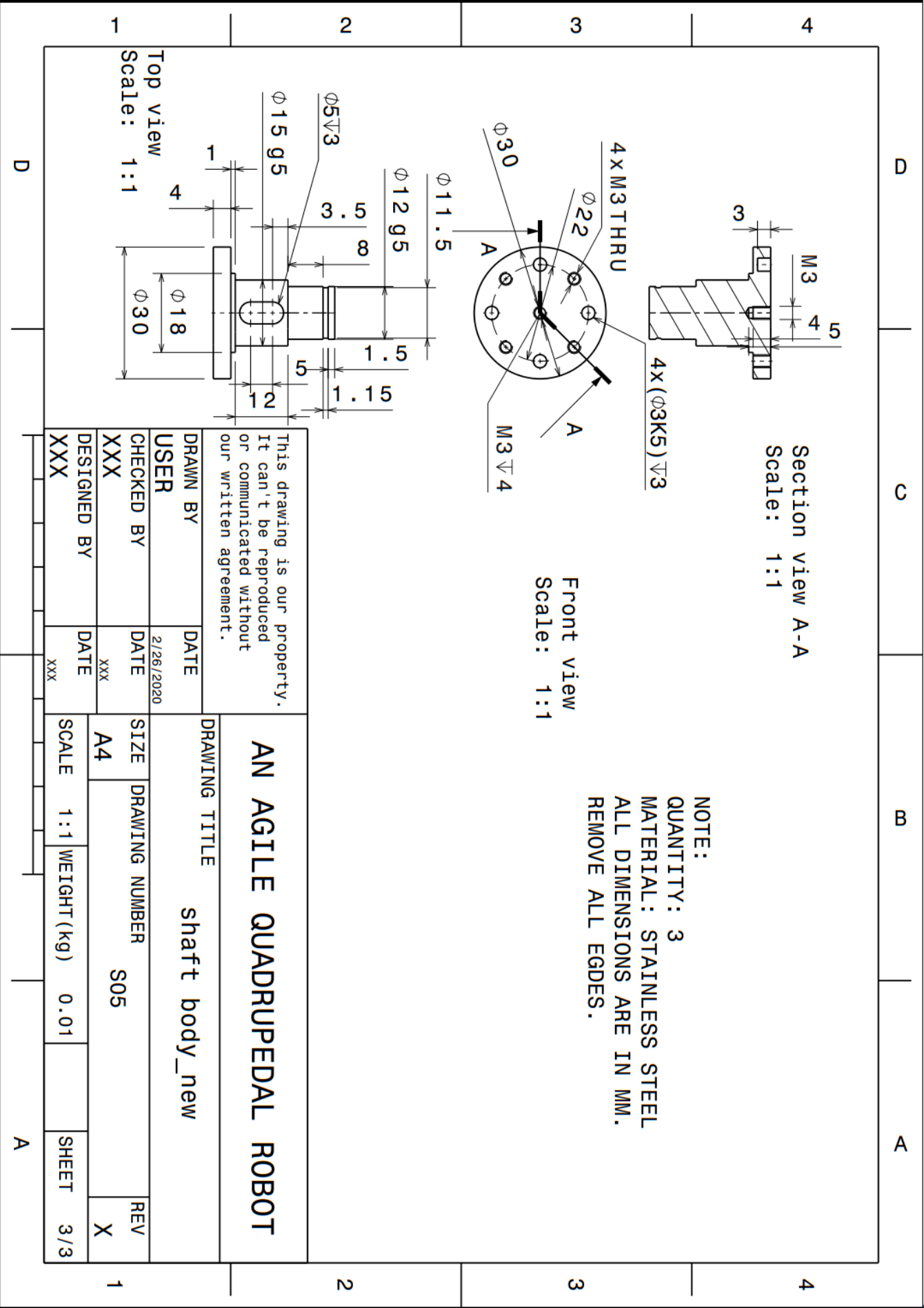
AN AGILE QUADRUPELAL ROBOT

DRAWING TITLE
Lower leg drive shaft

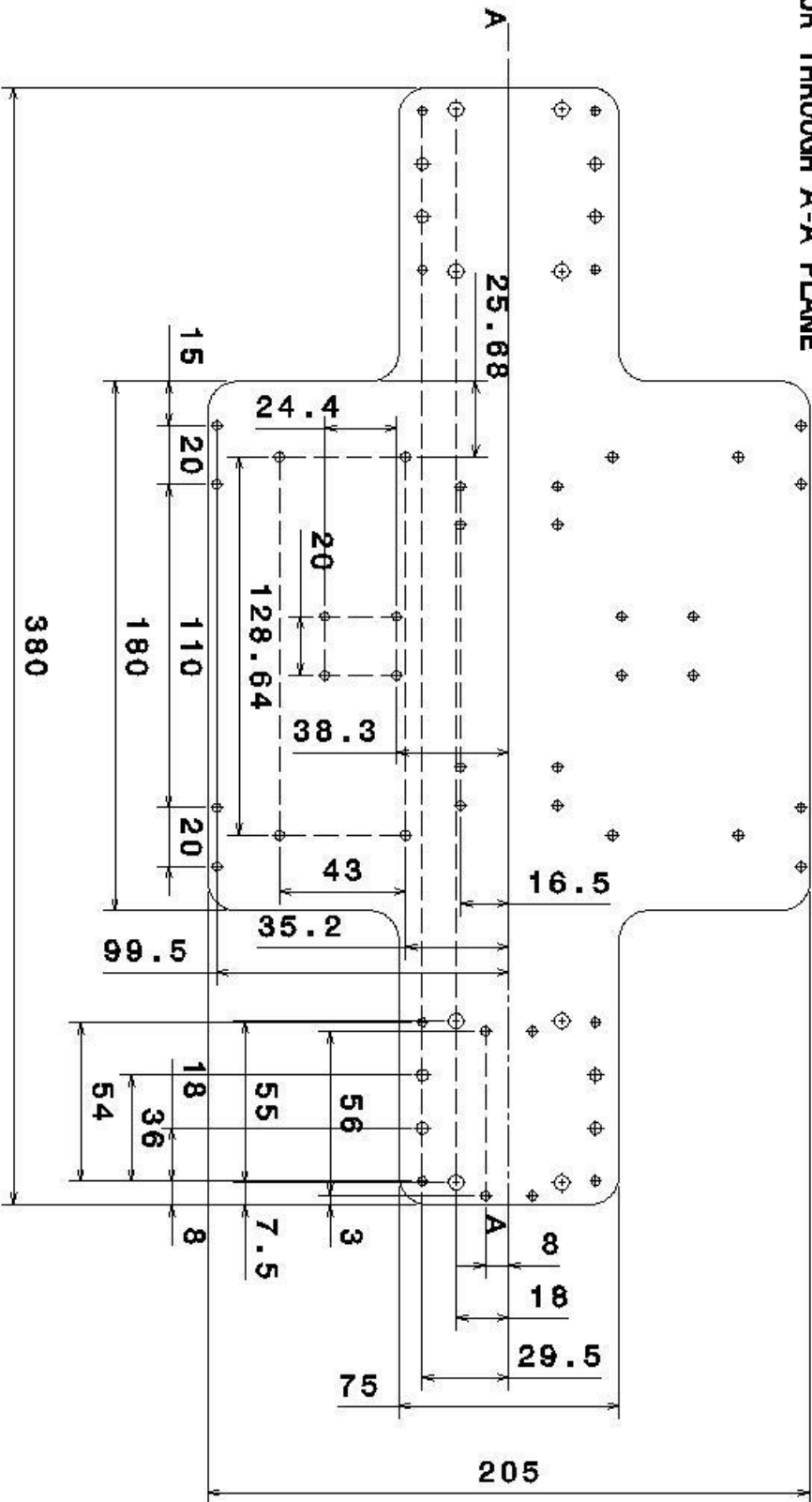
DRAWN BY USER	DATE 21/25/2020	DRAWING TITLE Lower leg drive shaft			
CHECKED BY XXX	DATE xxx				
DESIGNED BY XXX	DATE xxx				
SCALE 1:1	WEIGHT (kg) 0.01				
SIZE A4	DRAWING NUMBER S06	REV X	SHEET 1 / 3		

D

A

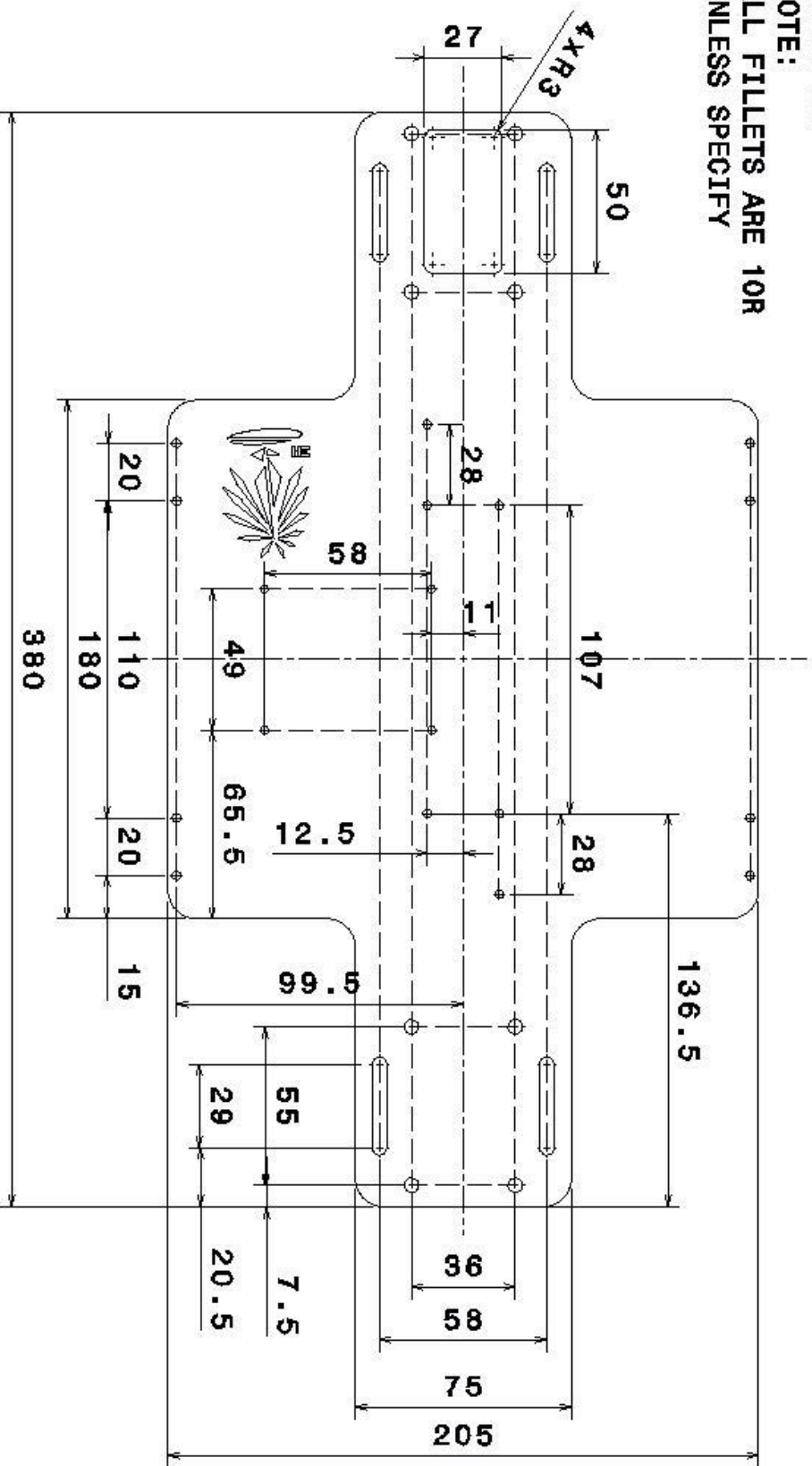


NAME: Body_Bottom_plate
THICKNESS: 2 mm
QUANTITIES: 1
UNIT: mm
NOTE:
ALL FILLETS ARE 10R
MIRROR THROUGH A-A PLANE

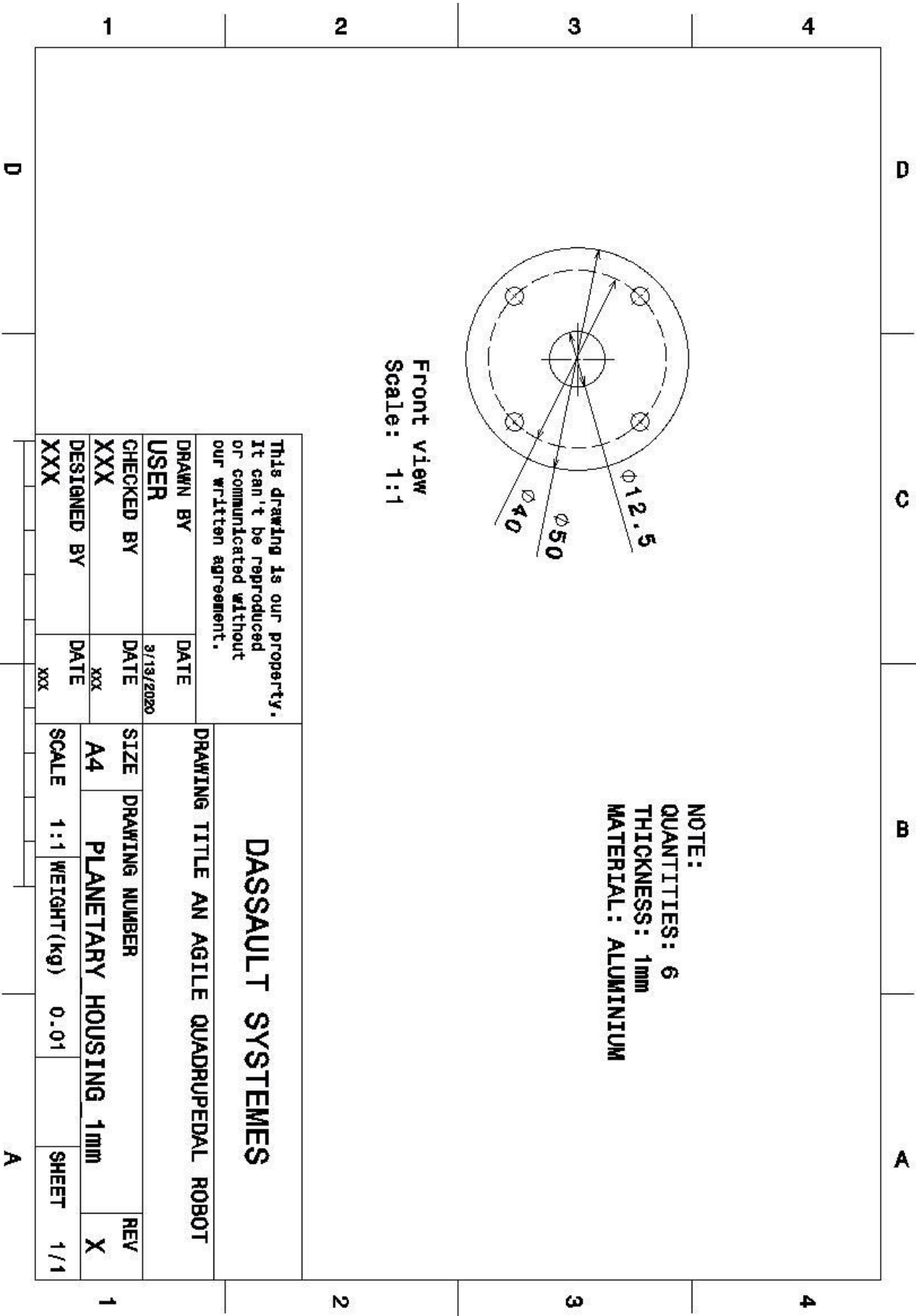


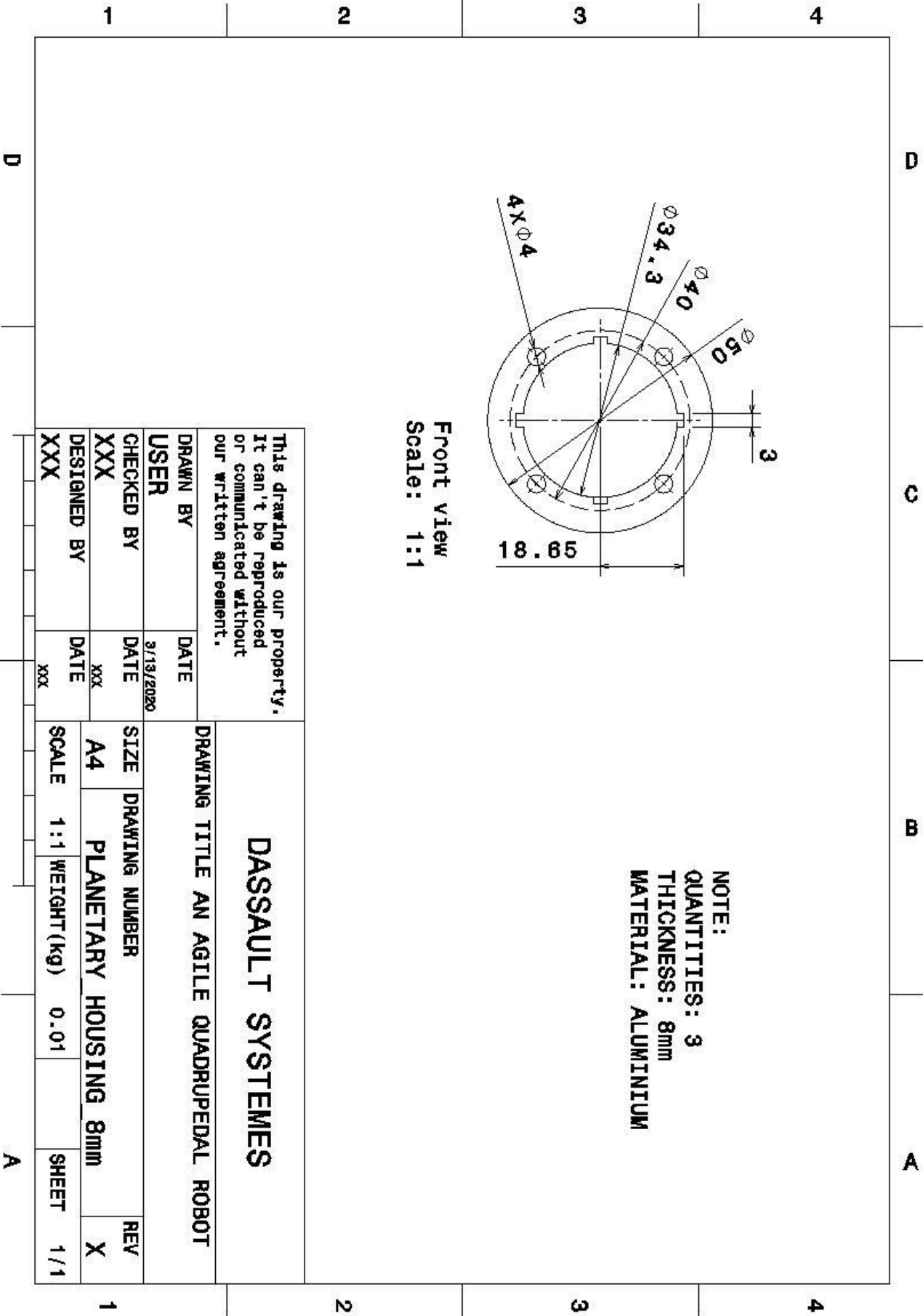
Front view
Scale: 1:2

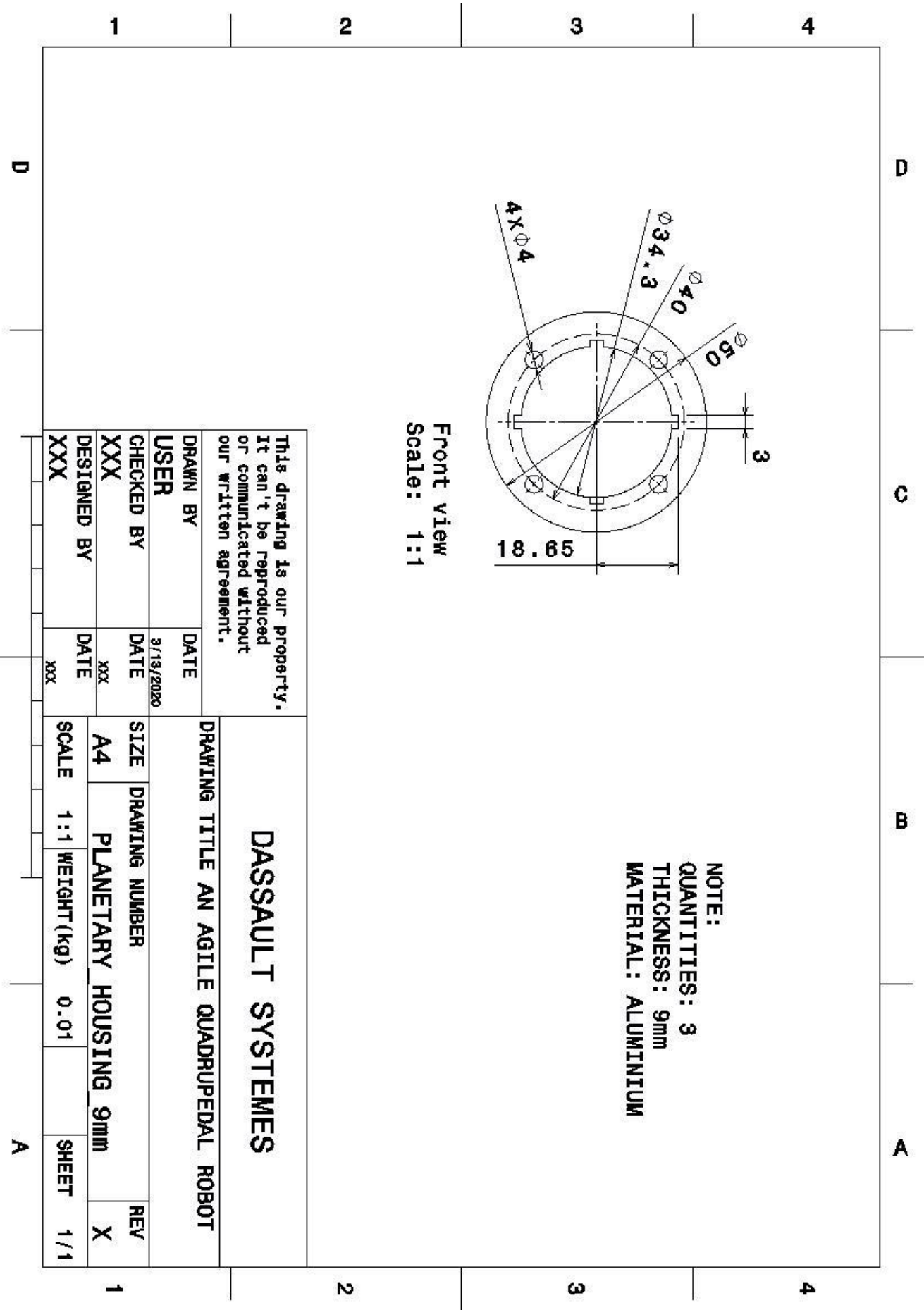
NAME: Body_Top_plate
THICKNESS: 2 mm
QUANTITIES: 1
UNIT: mm
NOTE:
ALL FILLETS ARE 10R
UNLESS SPECIFY

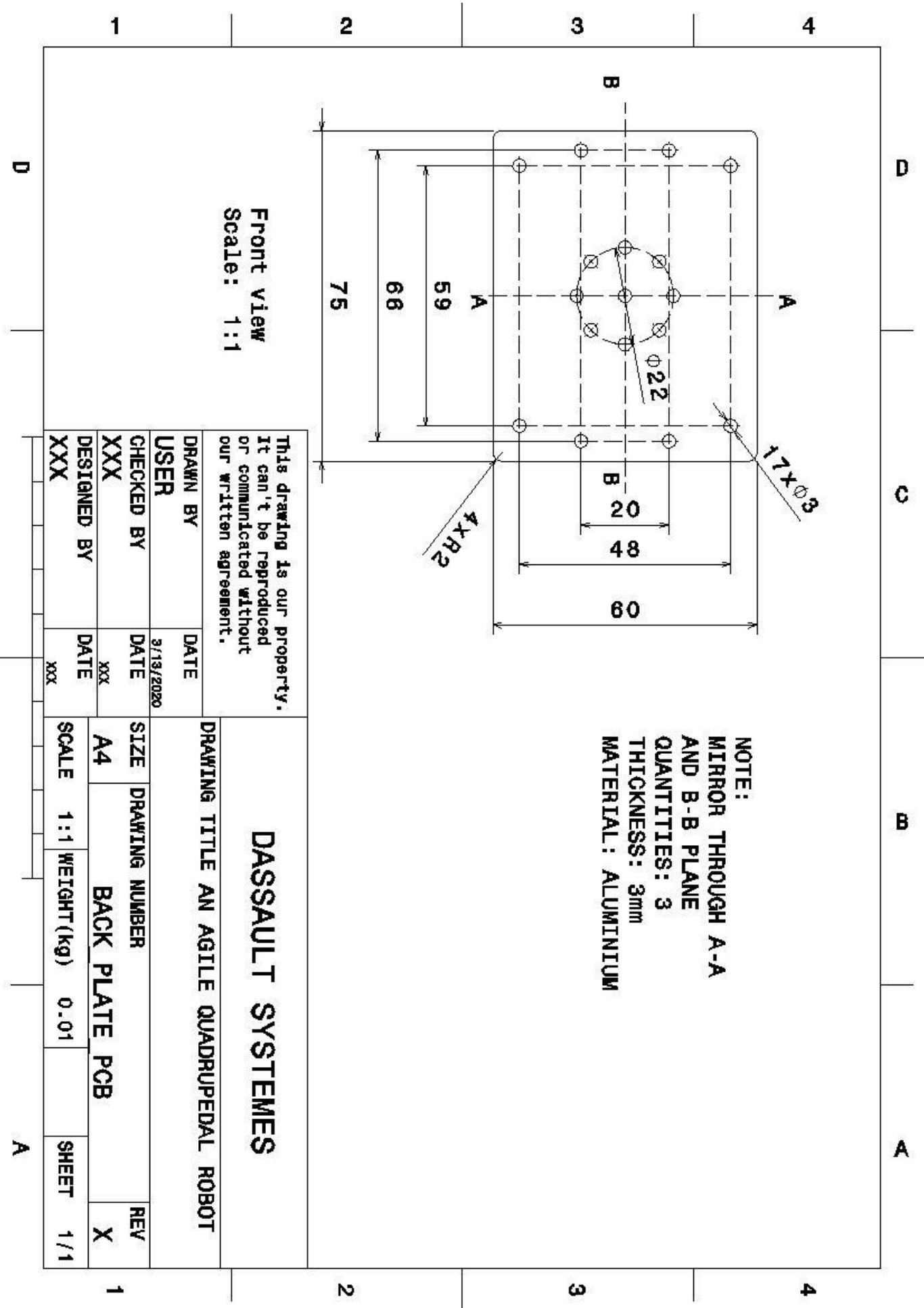


Front view
Scale: 1:2









D

C

B

A

4

4

3

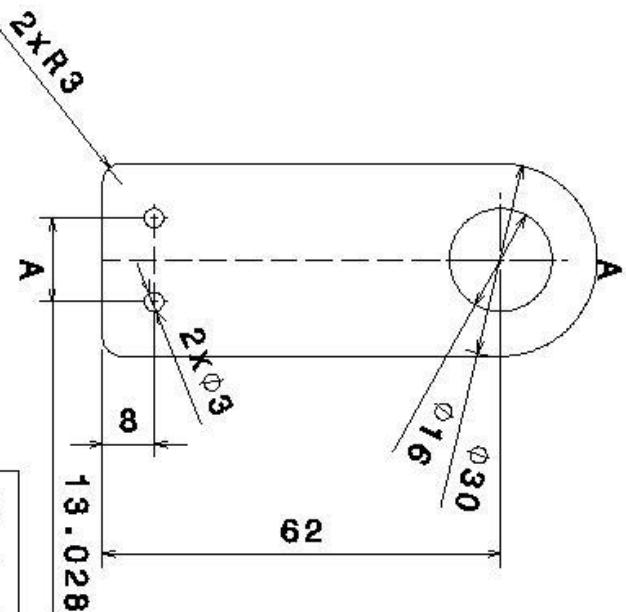
3

2

2

1

1



Front view
Scale: 1:1

NOTE:
MIRROR THROUGH A-A
QUANTITIES: 6
THICKNESS: 4mm
MATERIAL: ALUMINIUM

This drawing is our property.
It can't be reproduced
or communicated without
our written agreement.

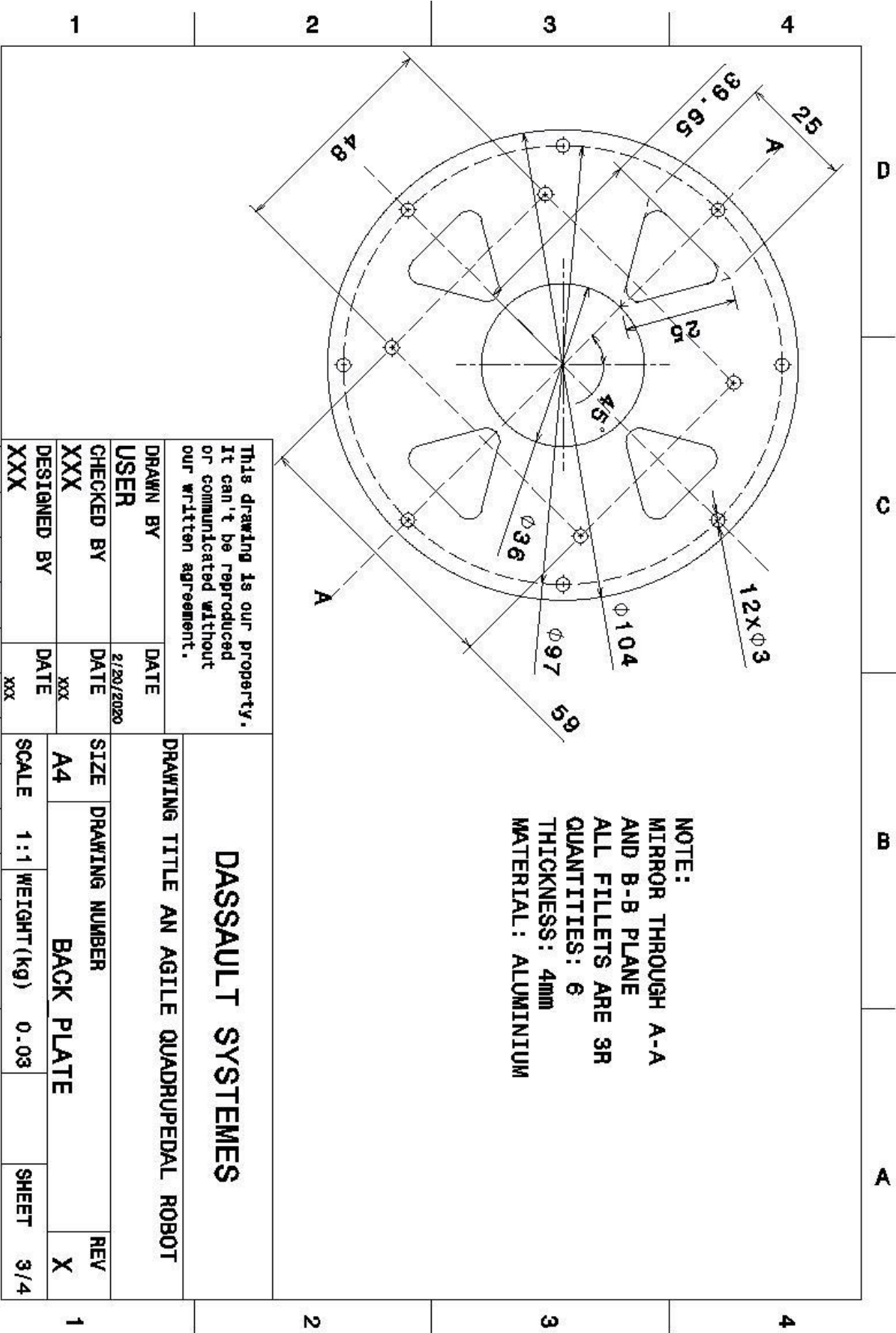
DASSAULT SYSTEMES

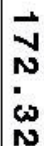
DRAWING TITLE AN AGILE QUADRUPELAL ROBOT

DRAWN BY	DATE				
USER	3/13/2020				
CHECKED BY	DATE	SIZE	DRAWING NUMBER		
XXX	xxx	A4	Ankle	REV	X
DESIGNED BY	DATE	SCALE	1:1 WEIGHT(kg)	0.02	SHEET 1/1
XXX	xxx				

D

A

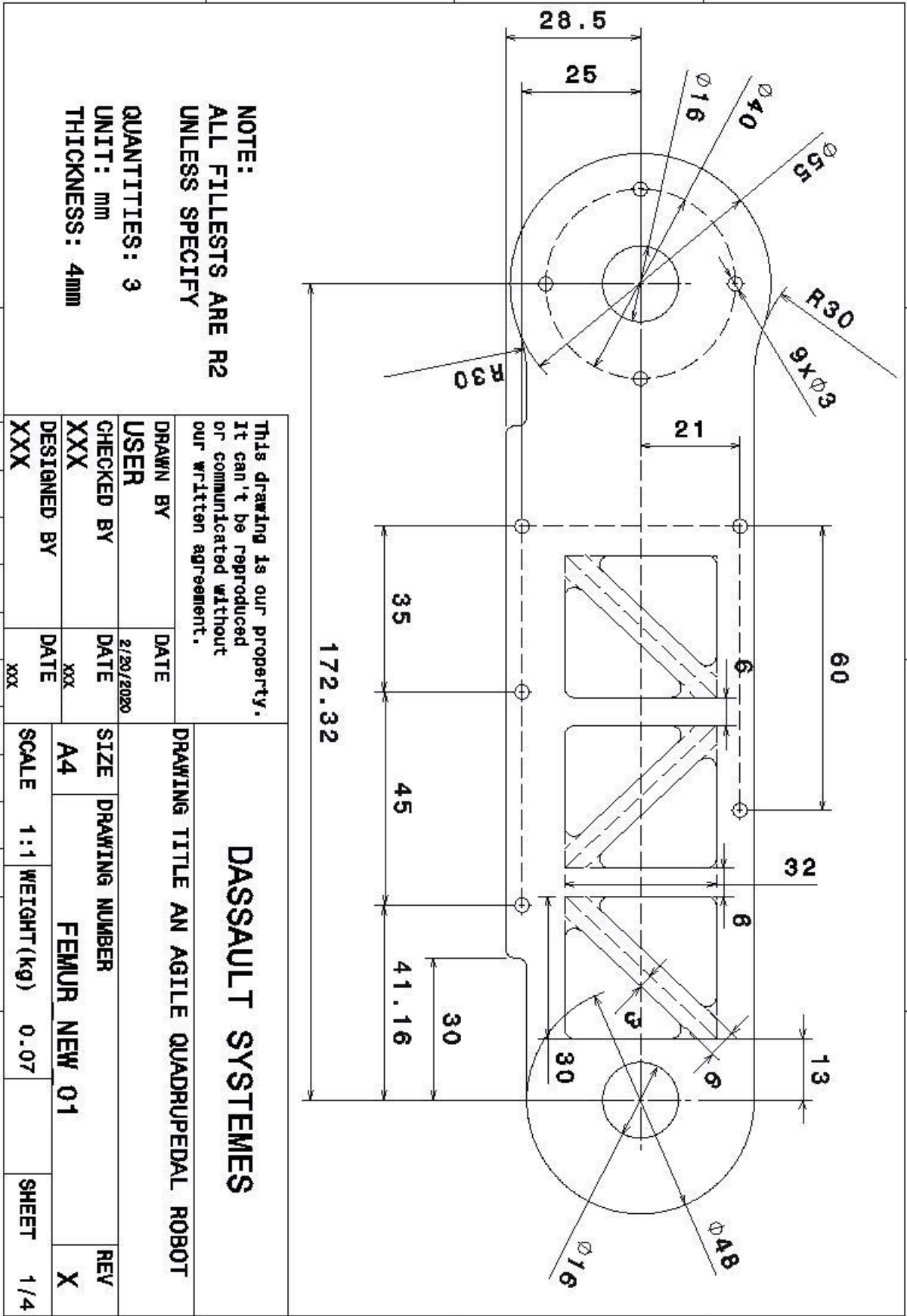




THICKNESS: 4mm

DRAWING TITLE AN AGILE QUADRUPEDAL ROBOT

2/4



D

D

C

B

A

A

