

มือเทียมหลายท่าจับโดยใช้ตัวขับเคลื่อนเดี่ยว

นายปณิภัทร วัฒนศิริ



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาคณะหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล  
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2558

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A MULTI-GRIP PATTERNS PROSTHETIC HAND WITH A SINGLE ACTUATOR

Mr. Panipat Wattanasiri



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

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2015

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	มือเทียมหลายท่าจับโดยใช้ตัวขับเคลื่อนเดี่ยว
โดย	นายปณิภัทร วัฒนศิริ
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยญาพันธ์ วิรุฬห์ศรี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ไพรัช ตั้งพรประเสริฐ

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ  
(ศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชัยญาพันธ์ วิรุฬห์ศรี)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ไพรัช ตั้งพรประเสริฐ)

.....กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร. รัชทิน จันท์เจริญ)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ ดร. ไชยณรงค์ จักรธรานนท์)

ปณิภัทร วัฒนศิริ : มือเทียมหลายท่าจับโดยใช้ตัวขับเคลื่อนเดี่ยว (A MULTI-GRIP PATTERNS PROSTHETIC HAND WITH A SINGLE ACTUATOR) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์  
 หลัก: ผศ. ดร. ชัญญาพันธ์ วิรุฬห์ศรี, อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ผศ. ดร. ไพรัช ตั้งพร  
 ประเสริฐ, 134 หน้า.

การออกแบบมือเทียมในปัจจุบันถูกจำกัดด้วยขนาดของมือเทียมที่ต้องใกล้เคียงกับมนุษย์ มือเทียมจึงจำเป็นต้องเลือกระหว่างรูปแบบการเคลื่อนที่และแรงจับจากจำนวนและขนาดของตัวขับเคลื่อน งานวิจัยนี้มีแนวคิดในการใช้ตัวขับเคลื่อนน้อยที่สุดเพื่อให้มือเทียมมีรูปแบบการเคลื่อนที่ที่พอเพียงต่อการใช้งานในชีวิตประจำวันและมีแรงจับสูงเนื่องจากสามารถใช้ตัวขับเคลื่อนขนาดใหญ่ ใช้หลักการของกลไกหน่วงทำให้นิ้วมือเคลื่อนที่แตกต่างกันเมื่อกลไกเคลื่อนไปในทิศทางที่แตกต่างกัน ส่งผลให้มือเทียมสามารถเคลื่อนที่เป็นท่าต่างๆสำหรับใช้งานในชีวิตประจำวันได้ มือเทียมในงานวิจัยสามารถเคลื่อนที่เป็นท่าแบมือ, ท่าจับแบบแม่นยำ, และท่าจับแบบกำมือซึ่งมีการใช้งานประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์ของการทำงานในชีวิตประจำวัน ใช้เวลาในการปิดมือเทียมเพื่อจับวัตถุได้ภายใน 1.5 วินาที และมีแรงจับถึง 34.5 นิวตันในท่าจับแบบแม่นยำซึ่งเพียงพอต่อการใช้งานในชีวิตประจำวัน สามารถจับวัตถุที่สำคัญในชีวิตประจำวันได้ประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์ แสดงถึงความสามารถของมือเทียมที่มีความสามารถในการใช้งานจริงและมีลักษณะเป็นธรรมชาติคล้ายมือมนุษย์ การใช้ตัวขับเคลื่อนเพียงหนึ่งตัวส่งผลให้มีความซับซ้อนน้อยลง ช่วยให้การออกแบบ, ผลิต, และประกอบมีความง่าย มือเทียมนี้จึงมีความเป็นไปได้ในการนำไปใช้งานจริงและก่อให้เกิดประโยชน์ต่อผู้พิการต่อไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
 CHULALONGKORN UNIVERSITY

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ปีการศึกษา 2558

ลายมือชื่อนิสิต .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก .....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาร่วม .....



# # 5570271021 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING

KEYWORDS: DWELL MECHANISM / GRIPPING / PROSTHETIC HAND / SINGLE ACTUATOR / TERMINAL DEVICE / UPPER LIMB PROSTHESIS / กลไกหน่วง / มือเทียม / ตัวขับเคลื่อน / ทำจับ / ผู้พิการ

PANIPAT WATTANASIRI: A MULTI-GRIP PATTERNS PROSTHETIC HAND WITH A SINGLE ACTUATOR. ADVISOR: ASST. PROF. CHANYAPHAN VIRULSRI, CO-ADVISOR: ASST. PROF. PAIRAT TANGPORNPRASERT, 134 pp.

In prosthesis design, the topics that usually trade-off with each other are function, appearance, and complexity which are constraint by prosthesis size. This research present a design of multiple grip patterns prosthetic hand with used of only single actuator to increase grip force and reduce complexity while still retain satisfy functionality. The prosthetic hand is designed to performed different movement through set of rigid linkages which give delayed motion to thumb. The prosthetic hand could perform open hand position, precision grip, and power grip which is used for 70% of activities in daily life. Hand closing time and pinch force could reach 1.5 second and 34.5 N respectively. Prosthetic hand could grip on around 90 percent of important object in daily life activities. All of these function could be achieved with single actuator fitted inside hand which greatly reduced complexity in both design and manufacture aspects. Thus, This prosthetic hand have potential to be developed for practical use and increase livelihood of amputees further.

Department: Mechanical Engineering Student's Signature .....

Field of Study: Mechanical Engineering Advisor's Signature .....

Academic Year: 2015 Co-Advisor's Signature .....

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณผศ.ดร.ชัยญาพันธ์ วิรุฬห์ศรี และผศ.ดร.ไพรัช ตั้งพรประเสริฐ อาจารย์ที่  
ปรีชาวิทยานิพนธ์ทั้งสองท่าน ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์และสนับสนุนการทำงานวิจัยจนสำเร็จ  
ด้วยดี ขอขอบพระคุณในความเมตตาและกรุณาที่อาจารย์มีต่อข้าพเจ้า ทั้งในด้านวิชาการและ  
จริยธรรมอันดีงาม ซึ่งเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อการทำงานและการดำเนินชีวิตในอนาคต  
ขอขอบคุณครูอาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ข้าพเจ้า อบรมสั่งสอน  
ข้าพเจ้าให้อยู่ในกรอบและมีระเบียบวินัยเสมอมา ขอขอบคุณเพื่อนๆ รุ่นพี่ รุ่นน้องทุกคน ทั้งที่ได้  
มีส่วนร่วมและมิได้มีส่วนร่วมในงานวิจัยนี้ เพราะทุกคนคือกำลังใจอันดีในการทำงานของข้าพเจ้า  
และสุดท้ายขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์  
มหาวิทยาลัย ที่ให้การสนับสนุนการศึกษา เป็นแหล่งข้อมูลและสถานที่การทำงานให้งานวิจัยครั้ง  
นี้สำเร็จลุล่วงได้เป็นอย่างดี ข้าพเจ้าหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยชิ้นนี้จะเป็นก้าวหนึ่งของการพัฒนา  
สังคมไทยทั้งด้านวิชาการและด้านการช่วยเหลือผู้ขาดแคลน

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญรูป .....	ฎ
สารบัญตาราง.....	ท
บทที่ 1 บทนำ (Introduction) .....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย .....	2
1.4 ขั้นตอนดำเนินงานโดยสรุป.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ปรีทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง (Literature Review and related theory) 3	
2.1 กายวิภาคศาสตร์และชีวกลศาสตร์ของมือ.....	3
2.1.1 โครงสร้างและข้อต่อของมือ.....	3
2.1.2 ขอบเขตการเคลื่อนไหวของข้อต่อนิ้วมือ .....	4
2.1.3 ความเร็ว, แรง, และรูปแบบการเคลื่อนไหวของมือ.....	5
2.2 ผู้พิการแขนขาด.....	8
2.2.1 รูปแบบของความพิการ .....	8
2.2.2 ความสำเร็จของการใช้มือเทียม .....	9
2.3 มือเทียมสำหรับผู้พิการ.....	10
2.3.1 มือเทียมแบบใช้การเคลื่อนไหวร่างกาย (Body-powered) .....	10

2.3.2	มือเทียมแบบใช้แรงขับเคลื่อนภายนอก (Externally powered).....	14
2.3.3	มือเทียมแบบใช้ไฟฟ้าในท้องตลาดปัจจุบัน .....	15
2.3.4	แรงจับของมือเทียมในท้องตลาดและในงานวิจัยอื่น .....	17
2.4	กลไกนิ้วมือเทียมในปัจจุบัน .....	18
2.5	กลไก Four-bar mechanism และคุณลักษณะที่สำคัญ.....	19
2.5.1	เส้นคัปเปิลอร์ (Coupler curve).....	20
2.5.2	กลไกหน่วง (Dwell mechanism).....	22
บทที่ 3 แนวคิดหลักและขั้นตอนในการออกแบบเบื้องต้น (Conceptual design and Elementary design).....		23
3.1	แนวคิดในการออกแบบมือเทียม (Conceptual design).....	23
3.1.1	ชนิดของมือเทียมที่เลือกออกแบบ .....	23
3.1.2	แนวคิดหลักในการออกแบบกลไกมือเทียม .....	23
3.1.3	คุณลักษณะในการออกแบบ (Design specifications) .....	27
3.2	การออกแบบและสังเคราะห์กลไกเบื้องต้น (Elementary design) .....	29
3.2.1	การสังเคราะห์กลไกนิ้วมือโดยใช้แผนภาพจลนศาสตร์ .....	29
3.2.2	การสังเคราะห์กลไกข้อมือเทียมโดยใช้แผนภาพจลนศาสตร์ .....	31
3.2.3	การสร้างแบบจำลองสามมิติเบื้องต้น .....	37
3.3	กลไกมือเทียมต้นแบบ.....	41
3.4	ผลการออกแบบและผลิตมือเทียมต้นแบบ .....	43
3.5	สรุปผลการออกแบบมือเทียมต้นแบบ .....	47
บทที่ 4 การออกแบบและผลิตมือเทียม (Design and Manufacturing).....		48
4.1	การแก้ไขปรับปรุงปัญหาจากมือเทียมต้นแบบ .....	48
4.2	การสังเคราะห์กลไกข้อมือเทียม.....	52

4.2.1 การสังเคราะห์กลไกนิ้วมือ .....	52
4.2.2 การสังเคราะห์กลไกขับเคลื่อนนิ้วมือทั้งสิ้น.....	56
4.2.3 การสังเคราะห์กลไกขับเคลื่อนนิ้วโป้งด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ .....	59
4.2.4 ผลการสังเคราะห์กลไกด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ .....	67
4.3 การคำนวณแรงภายในกลไกและการเลือกมอเตอร์ไฟฟ้าและเกียร์ทด .....	74
4.3.1 แรงภายในนิ้วมือและแรงดึงกลไกนิ้วมือ.....	74
4.3.2 แรงภายในกลไกขับเคลื่อนและแรงบิดที่ตำแหน่งท่าต่างๆ.....	76
4.3.3 มอเตอร์ไฟฟ้าและเกียร์ทดสำหรับสร้างแรงบิด .....	78
4.4 การออกแบบและผลิตโครงสร้างมือเทียม.....	79
4.4.1 การออกแบบและผลิตห้องเกียร์ทด.....	79
4.4.2 การออกแบบและผลิตโครงสร้างหลัก .....	80
4.4.3 การออกแบบและผลิตกลไกขับเคลื่อนมือเทียม .....	82
4.4.4 การออกแบบและผลิตชิ้นส่วนปลายนิ้วมือ.....	83
4.4.5 การออกแบบและผลิตด้ามจับมือเทียม .....	85
4.4.6 ภาพรวมของการออกแบบและผลิตมือเทียม.....	86
4.5 ผลการออกแบบและผลิตมือเทียม .....	87
บทที่ 5 การทดสอบสมรรถนะของมือเทียม (Performance Test) .....	89
5.1 การทดลองวัดความเร็วในการจับของมือเทียม .....	90
5.1.1 การวัดเวลาในการจับและกระแสไฟฟ้าของมือเทียม .....	90
5.1.2 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	92
5.2 การทดลองวัดแรงจับของมือเทียม .....	95
5.2.1 อุปกรณ์การทดลอง .....	95
5.2.2 การทดลองวัดแรงจับ.....	97

5.2.3 ผลการทดลองวัดแรงจับและการวิเคราะห์ผลการทดลอง .....	98
5.2.4 การปรับปรุงเพื่อเพิ่มแรงจับของมือเทียม.....	101
5.3 การทดสอบความสามารถในการจับวัตถุขนาดต่างๆ .....	103
5.3.1 อุปกรณ์การทดลองจับวัตถุขนาดต่างๆ .....	103
5.3.2 การทดลองจับวัตถุ .....	105
5.3.3 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	109
5.4 การทดสอบการจับวัตถุในชีวิตประจำวัน.....	116
5.4.1 วัตถุชนิดต่างๆที่สำคัญในชีวิตประจำวัน.....	116
5.4.2 การทดลองหยิบจับวัตถุที่สำคัญในชีวิตประจำวัน .....	116
5.4.3 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	117
5.4.4 การปรับปรุงการจับวัตถุลักษณะแข็งเกร็งของมือเทียม .....	119
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ (Conclusion and Future Work) .....	121
6.1 สรุปผลการวิจัย.....	121
6.2 ข้อเสนอแนะ.....	122
รายการอ้างอิง .....	124
ภาคผนวก ก คุณสมบัติทางกลของวัสดุ .....	128
ภาคผนวก ข อุปกรณ์ภายในมือเทียม.....	131
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	134

## สารบัญรูป

รูปที่ 2.1 กระจุกนิ้วมือจำแนกตามกลุ่มของกระจุก .....	3
รูปที่ 2.2 ข้อต่อและกระจุกของมือ[4] .....	4
รูปที่ 2.3 รูปแบบการใช้งานของมือ (a) ทำสามจับ (Tripod grip), (b) ทำจับปลายนิ้ว (Tip), (c) ทำจับด้านข้าง (Lateral grip), (d) ทำตะขอ (Hook), (e) ทำจับทรงกลม (Spherical grip), (f) ทำจับทรงกระบอก (Cylindrical grip).....	6
รูปที่ 2.4 การแบ่งทำจับแบบ Iberall [7] (a) ทำจับแบบแม่นยำ (Precision grip), (b) ทำจับแบบกำมือ (Power grip), (c) ทำจับด้านข้าง (Lateral grip) .....	7
รูปที่ 2.5 รูปแบบของความพิการแขนขา.....	9
รูปที่ 2.6 ระบบควบคุมมือเทียมด้วยเส้นลวด Bowden cable control system [5].....	11
รูปที่ 2.7 การเคลื่อนไหวเพื่อควบคุมมือเทียมสำหรับผู้พิการแขนขาเหนือศอกและใต้ศอก(a) การหมุนแขนท่อนบนไปข้างหน้าพร้อมกับข้อศอกสำหรับผู้พิการแขนขาใต้ศอก (b) การหมุนแขนท่อนบนไปข้างหน้าสำหรับผู้พิการแขนขาเหนือศอก (c) การหมุนกระดูกสะบักไปด้านหน้า มักใช้ร่วมกับการหมุนแขนท่อนบน (d) การลดหัวไหล่และหมุนแขนท่อนบน ใช้สำหรับควบคุมข้อศอกเทียมสำหรับผู้พิการแขนขาเหนือศอก [5] .....	11
รูปที่ 2.8 มือเทียมรูปร่างตะขาคู่ (Split hook) .....	12
รูปที่ 2.9 การดึงเส้นลวดเพื่อควบคุมมือเทียม [5] .....	12
รูปที่ 2.10 การใช้งานของมือเทียมแบบตะขาคู่แทนรูปแบบการจับของมือ [5].....	13
รูปที่ 2.11 อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณไฟฟ้าจากการเกร็งกล้ามเนื้อ (Myoelectrode).....	14
รูปที่ 2.12 มือเทียมแบบใช้ไฟฟ้าสั่งการด้วยตัวจับสัญญาณ (Myoelectrode) ที่ติดอยู่กับกล้ามเนื้อของผู้พิการภายในเบ้ามือเทียม .....	14
รูปที่ 2.13 มือเทียม Otto Bock MyoHand VariPlus Speed® (Otto Bock Orthopedic Industry, Inc., Duderstadt, Germany). .....	15
รูปที่ 2.14 มือเทียม i-Limb hand (Touch bionics, Inc., Edinburgh, United Kingdom) ..	16
รูปที่ 2.15 มือเทียม Bebionic hand (RSLSteeper, Leeds, United Kingdom).....	16

รูปที่ 2.16 มือเทียม Michelangelo hand (Otto Bock Orthopedic Industry, Inc., Duderstadt, Germany).....	16
รูปที่ 2.17 กราฟเปรียบเทียบแรงจับและจำนวนตัวขับเคลื่อนของมือเทียมในงานวิจัยอื่นและในท้องตลาด [14].....	17
รูปที่ 2.18 กลไกนิ้วมือของมือเทียมในท้องตลาด [14] (a) i-Limb hand (b) Bebionic hand (c) Michelangelo hand.....	18
รูปที่ 2.19 แผนภาพจลนศาสตร์ของกลไกนิ้วมือแบบ Four-bar mechanism .....	19
รูปที่ 2.20 กลไก Four-bar mechanism.....	19
รูปที่ 2.21 จุดคัปเปิลอร์ซึ่งสามารถเป็นจุดใดๆในระนาบเดียวกับชิ้นส่วนคัปเปิลอร์ [19].....	20
รูปที่ 2.22 เส้นคัปเปิลอร์ของกลไก Four-bar mechanism .....	20
รูปที่ 2.23 รูปแบบต่างๆของเส้นคัปเปิลอร์ [19].....	21
รูปที่ 2.24 การสร้างกลไกห่วง (a) เส้นคัปเปิลอร์จากกลไก Four-bar mechanism สำหรับสร้างกลไกห่วง .....	22
รูปที่ 3.1 การเคลื่อนที่ของนิ้วมือในท่าจับต่างๆ (a) ท่าจับแบบแม่นยำ (Precision grip) เกิดจากการงอนิ้วมือพร้อมกับนิ้วโป้ง (b) ท่ากำมือ (Power grip) เกิดจากการงอนิ้วมือโดยห้วงนิ้วโป้งไว้.....	24
รูปที่ 3.2 เป้าหมายในการออกแบบมือเทียม (a) ท่าแบมือ (Open hand), (b) ท่าจับแบบแม่นยำ (Precision grip), (c) ท่าจับแบบกำมือ (Power grip).....	24
รูปที่ 3.3 แนวคิดการออกแบบโดยใช้ทิศทางการหมุนของตัวขับเคลื่อนกำหนดลักษณะการเคลื่อนไหวไปยังตำแหน่งเป้าหมายทั้งสามตำแหน่ง.....	25
รูปที่ 3.4 นิ้วโป้งมีระนาบของการเคลื่อนที่งอนิ้วนานกว่าระนาบการเคลื่อนที่งอนิ้วทั้งสี่ (a) มุมมองจากทิศตั้งฉากกับระนาบฝ่ามือ, (b) มุมมองจากทิศตั้งฉากกับด้านข้างของฝ่ามือ .....	26
รูปที่ 3.5 รูปแบบการเคลื่อนไหวและการใช้งานมือเทียมที่เป็นเป้าหมายการออกแบบ (a) ท่าแบมือ, (b) ท่าจับแบบแม่นยำ, (c) ท่าจับแบบกำมือ .....	27



รูปที่ 3.6 ตำแหน่งการวัดขนาดมือของชายไทย [20] (a) ขนาดของนิ้วมือ, ฝ่ามือ, และเส้นรอบมือ, (b) ขนาดความยาวจากข้อมือไปยังปลายนิ้ว, (c) ขนาดความกว้างฝ่ามือ.....	28
รูปที่ 3.7 กลไกนิ้วมือที่ออกแบบด้วยกลไก Four-bar mechanism (a) ตำแหน่งท่าแบมือ, (b) ตำแหน่งท่าจับแบบแมนย่ำ, (c) ตำแหน่งท่าจับแบบกำมือ.....	29
รูปที่ 3.8 กลไกนิ้วมือขับเคลื่อนแบบเส้นตรงด้วยข้อต่อแบบเลื่อน (Prismatic Joint) (a) ตำแหน่งท่าแบมือ, (b) ตำแหน่งท่าจับแบบแมนย่ำ, (c) ตำแหน่งท่าจับแบบกำมือ.....	30
รูปที่ 3.9 การวาดตำแหน่งของข้อต่อแบบเลื่อนในท่าเป้าหมายต่าง ๆ ลงบนระนาบฝ่ามือเพื่อออกแบบกลไกมือเทียม .....	31
รูปที่ 3.10 ตำแหน่งและเส้นทางการเคลื่อนที่ของข้อต่อแบบเลื่อนในระนาบฝ่ามือของกลไกนิ้วมือทั้งสี่และนิ้วโป้ง.....	32
รูปที่ 3.11 กลไก Crank-slider .....	33
รูปที่ 3.12 กลไกขับเคลื่อนนิ้วมือทั้งสี่ในการออกแบบเบื้องต้น .....	33
รูปที่ 3.13 กลไกขับเคลื่อนนิ้วโป้งในการออกแบบเบื้องต้น .....	34
รูปที่ 3.14 กลไกขับเคลื่อนมือเทียมเบื้องต้น ณ ตำแหน่งท่าแบมือ (ตำแหน่งเริ่มต้น).....	35
รูปที่ 3.15 กลไกขับเคลื่อนมือเทียมเบื้องต้น ณ ตำแหน่งท่าจับแบบแมนย่ำ ชิ้นส่วนขับเคลื่อนหมุนทิศทวนเข็มนาฬิกา .....	36
รูปที่ 3.16 กลไกขับเคลื่อนมือเทียมเบื้องต้น ณ ตำแหน่งท่าจับแบบกำมือ ชิ้นส่วนขับเคลื่อนหมุนทิศตามเข็มนาฬิกา .....	36
รูปที่ 3.17 แบบจำลองกลไกนิ้วมือทั้งสี่ (a) มุมมองด้านข้าง, (b) มุมมองสามมิติ .....	38
รูปที่ 3.18 แบบจำลองกลไกนิ้วโป้ง (a) มุมมองด้านข้าง, (b) มุมมองสามมิติ.....	38
รูปที่ 3.19 แบบจำลองกลไกนิ้วมือทั้งสี่และนิ้วโป้ง (a) ท่าแบมือ, (b) ท่าจับแบบแมนย่ำ, (c) ท่าจับแบบกำมือ .....	39
รูปที่ 3.20 แบบจำลองกลไกมือเทียมและนิ้วมือเบื้องต้นในท่าแบมือ (a) มุมมองสามมิติ, (b) มุมมองด้านข้าง .....	40
รูปที่ 3.21 มือเทียมต้นแบบในท่าแบมือ .....	41
รูปที่ 3.22 ชิ้นส่วนของกลไกมือเทียมต้นแบบ .....	42

รูปที่ 3.23 มือเทียมต้นแบบในท่าแบมือ .....	43
รูปที่ 3.24 ภาพตัดของมือเทียมต้นแบบในท่าแบมือ (a) มุมมองสามมิติ, (b) มุมมองด้านข้างฝ่ามือ .....	44
รูปที่ 3.25 ภาพตัดของมือเทียมต้นแบบในท่าจับแบบแน่นยำ (a) มุมมองสามมิติ, (b) มุมมองด้านข้างฝ่ามือ .....	44
รูปที่ 3.26 ภาพตัดของมือเทียมต้นแบบในท่าจับแบบกำมือ (a) มุมมองสามมิติ, (b) มุมมองด้านข้างฝ่ามือ .....	45
รูปที่ 3.27 มือเทียมต้นแบบในท่าจับแบบกำมือ (a) จับเพลาทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร, (b) จับวัตถุทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 มิลลิเมตร .....	45
รูปที่ 3.28 กลไกนิ้วมือของมือเทียมต้นแบบเกิดการงอไม่พร้อมกัน .....	46
รูปที่ 3.29 เพลาชับภายในมือเทียมต้นแบบ (a) เพลาชับสองอันภายในร่องเส้นตรง, (b) เพลาชับถูกหมุนเมื่อแรงดึงจากตัวขับเคลื่อนมีตำแหน่งเยื้องจากจุดกึ่งกลางเพล่า .....	47
รูปที่ 4.1 รางเลื่อนเส้นตรง (Linear Guide) สำหรับควบคุมการหมุนของเพลาชับ .....	48
รูปที่ 4.2 การยึดรางเลื่อนเส้นตรงเข้ากับเพลาชับนิ้วมือ .....	49
รูปที่ 4.3 กลไกนิ้วมือ (a) ท่าแบมือ, (b) ท่าจับแบบแน่นยำ, (c) ท่าจับแบบกำมือ .....	50
รูปที่ 4.4 กลไกนิ้วมือเมื่อปรับปรุงให้มีลักษณะกลมมนที่ปลายนิ้ว (a) กลไกนิ้วโป้ง, (b) กลไกนิ้วมือทั้งสี่ .....	50
รูปที่ 4.5 กลไกนิ้วมือถูกออกแบบให้สามารถทำท่าจับแบบแน่นยำได้ โดยนิ้วโป้งอยู่ตรงกลางระหว่างนิ้วชี้และนิ้วกลาง .....	51
รูปที่ 4.6 กลไกนิ้วมือสำหรับวิเคราะห์ท่าจับตำแหน่งต่างๆ (a) ท่าแบมือ, (b) ท่าจับแบบแน่นยำ, (c) ท่าจับแบบกำมือ .....	51
รูปที่ 4.7 ชิ้นส่วนเชื่อมต่อกลไกนิ้วมือยึดเข้ากับข้อต่อแบบเลื่อน (Prismatic joint) .....	53
รูปที่ 4.8 ตำแหน่งข้อต่อแบบเลื่อน (Prismatic Joint) อยู่ห่างจากจุดอ้างอิงของมือเทียมในแกน X ออกมา 13 มิลลิเมตร .....	53

รูปที่ 4.9	ชิ้นส่วนเชื่อมต่อกลไกนิ้วมือและนิ้วโป้งเคลื่อนที่เข้ามาชิดกันที่ท่าจับแบบกำมือ.....	54
รูปที่ 4.10	ความยาวของชิ้นส่วนเชื่อมต่อนิ้วมือทั้งสี่และนิ้วโป้งมีค่า 14 และ 31 มิลลิเมตรตามลำดับ.....	55
รูปที่ 4.11	ตำแหน่งของข้อต่อแบบเลื่อน (Prismatic joints) (a) ท่าแบมือ, (b) ท่าจับแบบแม่นยำ, (c) ท่าจับแบบกำมือ .....	55
รูปที่ 4.12	ตำแหน่งของข้อต่อแบบเลื่อน (Prismatic Joint) ของท่าจับต่างๆในระนาบฝ่ามือ....	56
รูปที่ 4.13	ขนาดของกลไกขับเคลื่อนนิ้วทั้งสี่ .....	57
รูปที่ 4.14	มุมการหมุนของกลไกขับเคลื่อนนิ้วทั้งสี่มายังตำแหน่งท่าต่างๆ.....	58
รูปที่ 4.15	ตัวแปรในการออกแบบกลไกขับเคลื่อนนิ้วโป้ง.....	60
รูปที่ 4.16	ค่าความผิดพลาดของตำแหน่งข้อต่อแบบเลื่อน (Position error) .....	61
รูปที่ 4.17	ตัวแปรสำหรับคำนวณค่าความหน่วงของกลไกนิ้วโป้ง .....	62
รูปที่ 4.18	กลไกนิ้วมือที่ค่าความหน่วงนิ้วโป้ง (Thumb delay) ต่างๆ (a) ค่าความหน่วง = 1.0, (b) ค่าความหน่วง = 0.6 .....	63
รูปที่ 4.19	เส้นคัปเปิลเลอร์และจุดศูนย์กลางควรอยู่ต่ำกว่าข้อต่อแบบเลื่อนเพื่อให้ชิ้นส่วน เชื่อมต่อทำมุมกับข้อต่อน้อยที่สุด.....	64
รูปที่ 4.20	เส้นทางคัปเปิลเลอร์มีตำแหน่งเริ่มต้นอยู่ด้านล่างสุดและเคลื่อนที่ขึ้นทั้งสองทิศการหมุนกลไก .....	65
รูปที่ 4.21	กลไกและเส้นคัปเปิลเลอร์อยู่ในพื้นที่จำกัดของมือเทียม.....	66
รูปที่ 4.22	ผลการสังเคราะห์กลไกครั้งที่หนึ่ง .....	68
รูปที่ 4.23	ภาพขยายของผลการสังเคราะห์กลไกครั้งที่หนึ่ง.....	68
รูปที่ 4.24	ผลการสังเคราะห์กลไกครั้งที่สอง .....	69
รูปที่ 4.25	ภาพขยายของการสังเคราะห์กลไกครั้งที่สองและกลไกคำตอบที่เลือกใช้งาน .....	70
รูปที่ 4.26	ขนาดกลไกขับเคลื่อนนิ้วโป้งจากการสังเคราะห์กลไกด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	71
รูปที่ 4.27	กลไกขับเคลื่อนมือเทียม (Transmission mechanism) ในท่าแบมือ (a) กลไกในระนาบฝ่ามือ, (b) กลไกนิ้วมือจากมุมมองด้านข้างฝ่ามือ .....	72

รูปที่ 4.28 กลไกขับเคลื่อน (Transmission mechanism) ในท่าจับแบบแมนย่ำ (a) กลไกใน ระนาบฝ่ามือ, (b) กลไกนิ้วมือจากมุมมองด้านข้างฝ่ามือ.....	73
รูปที่ 4.29 กลไกขับเคลื่อน (Transmission mechanism) ในท่าจับแบบกำมือ (a) กลไกใน ระนาบฝ่ามือ, (b) กลไกนิ้วมือจากมุมมองด้านข้างฝ่ามือ.....	74
รูปที่ 4.30 การคำนวณหาแรงดึงกลไกนิ้วมือที่แรงกดปลายนิ้ว 30 N.....	75
รูปที่ 4.31 แรงดึงกลไกนิ้วมือและนิ้วโป้งเมื่อใช้แรงกดปลายนิ้ว 30 N .....	76
รูปที่ 4.32 การคำนวณหาแรงบิดกลไกมือเทียมจากแรงดึงกลไกนิ้วมือ .....	77
รูปที่ 4.33 แรงบิดของกลไกมือเทียมในการเคลื่อนที่นิ้วมือจากท่าแบมือไปยังท่าจับแบบ แมนย่ำ .....	77
รูปที่ 4.34 มอเตอร์ไฟฟ้าชนิด Brushless DC Motor, MAXON™ : EC-45 Flat 30 W .....	78
รูปที่ 4.35 เกียร์ทดชนิด Strain Wave Gear, Harmonic Drive™ : CSD-14-100-2A-R.....	78
รูปที่ 4.36 ห้องเกียร์ทดสำหรับประกอบภายในมือเทียม .....	79
รูปที่ 4.37 ชิ้นส่วนห้องเกียร์ทดที่ถูกผลิตขึ้น .....	80
รูปที่ 4.38 โครงสร้างหลักของมือเทียม มีช่องว่างภายในสำหรับประกอบระบบขับเคลื่อน (a) มุมมองสามมิติ, (b) มุมมองระนาบฝ่ามือ, (c) มุมมองด้านข้างฝ่ามือ.....	80
รูปที่ 4.39 นิ้วมือสามารถประกอบเข้ากับโครงสร้างหลักของมือเทียมด้วยเพลากลมขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร .....	81
รูปที่ 4.40 โครงสร้างหลักของมือเทียม ผลิตด้วยการกัด (Milling) เป็นหลัก.....	81
รูปที่ 4.41 กลไกขับเคลื่อนมือเทียมเชื่อมต่อไปยังนิ้วมือทั้งสี่และนิ้วโป้ง ในตำแหน่งท่าแบมือ .....	82
รูปที่ 4.42 กลไกขับเคลื่อน (a) ท่าจับแบบแมนย่ำ, (b) ท่าจับแบบกำมือ .....	83
รูปที่ 4.43 ชิ้นส่วนกลไกขับเคลื่อนมือเทียม ผลิตด้วยการกัด (Milling) เป็นหลัก.....	83
รูปที่ 4.44 ชิ้นส่วนปลายนิ้วมือสำหรับประกอบเข้ากับกลไกนิ้วมือ.....	84
รูปที่ 4.45 ชิ้นส่วนปลายนิ้วมือและโครงนิ้วมือ (a) ชิ้นส่วนปลายนิ้วมือสำหรับสวมเข้ากับโครงนิ้ว มือ, (b) กลไกนิ้วมือเมื่อประกอบปลายนิ้วเข้ากับโครงสร้าง .....	84
รูปที่ 4.46 ด้ามจับมือเทียมสำหรับรับสัญญาณจากผู้ทดสอบการใช้งาน .....	85

รูปที่ 4.47 แบบจำลองมือเทียมเมื่อประกอบชิ้นส่วนต่างๆเข้าด้วยกัน (a) มุมมองสามมิติจากด้านหลังมือ, (b) มุมมองสามมิติจากด้านฝ่ามือ.....	86
รูปที่ 4.48 มือเทียมเมื่อประกอบชิ้นส่วนต่างๆเข้าด้วยกัน (a) มุมมองด้านข้างฝ่ามือ, (b) มุมมองด้านฝ่ามือ.....	87
รูปที่ 4.49 ขนาดของมือเทียม (a) ความกว้างและความยาว, (b) ความหนา.....	88
รูปที่ 4.50 มือเทียมมีขนาดและรูปร่างใกล้เคียงกับมือชายไทย.....	88
รูปที่ 5.1 การวัดเวลาในการเคลื่อนที่และกระแสไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้า.....	91
รูปที่ 5.2 การวัดเวลาในการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ไฟฟ้า.....	91
รูปที่ 5.3 การวัดกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของมอเตอร์ไฟฟ้า.....	92
รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและกระแสไฟฟ้าในท่าจับแบบแน่นยำ.....	93
รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและกระแสไฟฟ้าในท่าจับแบบกำมือ.....	93
รูปที่ 5.6 เวลาในการเคลื่อนที่ของท่าจับแบบกำมือมีค่ามากกว่าท่าจับแบบแน่นยำประมาณ 15 – 25 เปอร์เซ็นต์.....	94
รูปที่ 5.7 (a) โหลดเซลล์สำหรับวัดแรงกด (Compression Load Cell) Kyowa™ รุ่น LMB-A-200N, (b) ขนาดของโหลดเซลล์.....	95
รูปที่ 5.8 อุปกรณ์อ่านสัญญาณ : Kyowa™ รุ่น PCD-300A.....	95
รูปที่ 5.9 โหลดเซลล์ถูกออกแบบให้รับแรงกดผ่านแนวแกนขึ้นงานเท่านั้น ไม่สามารถรับแรงบิดในแกนอื่นได้.....	96
รูปที่ 5.10 ชิ้นส่วนจับยึดโหลดเซลล์เพื่อป้องกันความเสียหายจากแรงบิด.....	96
รูปที่ 5.11 รูปตัดของโหลดเซลล์และตัวรองรับแรงบิด (a) ขณะที่โหลดเซลล์ยังไม่ถูกกด, (b) ขณะที่โหลดเซลล์รับแรงกด.....	97
รูปที่ 5.12 การทดลองวัดแรงจับของมือเทียมโดยใช้อุปกรณ์วัดแรงกดในท่าจับแบบแน่นยำ (a) มุมมองด้านข้าง, (b) มุมมองสามมิติ.....	98
รูปที่ 5.13 ตัวอย่างการวัดสัญญาณแรงจับของมือเทียมบนโปรแกรมคอมพิวเตอร์.....	98

รูปที่ 5.14 ผลการทดลองวัดแรงจับของมือเทียม .....	99
รูปที่ 5.15 เพลาชับนิ้วมือขณะทำการทดลองวัดแรงจับ (a) กระแสไฟฟ้าต่ำกว่า 2,000 mA, (b) กระแสไฟฟ้าสูงกว่า 2,000 mA.....	100
รูปที่ 5.16 กราฟเปรียบเทียบแรงจับและจำนวนตัวขับเคลื่อนระหว่างมือเทียมในงานวิจัยนี้, มือเทียมในท้องตลาด, และมือเทียมในงานวิจัยอื่น .....	101
รูปที่ 5.17 แรงดึงจากนิ้วชี้ส่งผลให้เกิดแรงบิดที่วางบังคับเส้นตรงขึ้นที่มีระยะห่างที่สุด ส่งผลให้วางบังคับขึ้นนี้เสียหายเป็นชิ้นแรก.....	102
รูปที่ 5.18 วัตถุทรงกลมสำหรับทดสอบ เส้นผ่านศูนย์กลาง 10, 15, 20, 25, 30, 35, 45, 64, และ 71 มิลลิเมตร.....	103
รูปที่ 5.19 วัตถุทรงกระบอกสำหรับทดสอบ เส้นผ่านศูนย์กลาง 35, 45, 53, 66 และ 96 มิลลิเมตร.....	104
รูปที่ 5.20 วัตถุทรงกระบอกสำหรับทดสอบ เส้นผ่านศูนย์กลาง 117, 125, และ 132 มิลลิเมตร.....	104
รูปที่ 5.21 วัตถุทรงกระบอกประเภทขวดน้ำสำหรับการทดสอบ เส้นผ่านศูนย์กลาง 65 และ 85 มิลลิเมตร มีน้ำหนัก 770 กรัมและ 1,500 กรัม .....	104
รูปที่ 5.22 การทดสอบจับวัตถุทรงกลมในท่าจับแบบแมนย่ำ.....	106
รูปที่ 5.23 การทดสอบจับวัตถุทรงกระบอกในท่าจับแบบแมนย่ำ .....	106
รูปที่ 5.24 การทดสอบจับวัตถุทรงกลมในท่าจับแบบกำมือ .....	107
รูปที่ 5.25 การทดสอบจับวัตถุทรงกระบอกในท่าจับแบบกำมือ .....	107
รูปที่ 5.26 การทดสอบจับวัตถุทรงกลมด้วยท่าจับแบบแมนย่ำ .....	107
รูปที่ 5.27 การทดสอบจับวัตถุทรงกระบอกด้วยท่าจับแบบกำมือ .....	108
รูปที่ 5.28 การทดสอบจับวัตถุขวดน้ำทรงกระบอก (น้ำหนัก 770 และ 1500 กรัมจากด้านซ้าย) ด้วยท่าจับแบบกำมือ .....	108
รูปที่ 5.29 มือเทียมไม่สามารถจับวัตถุขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 117 มิลลิเมตรขึ้นไปในท่าจับแบบแมนย่ำ .....	111

รูปที่ 5.30 การจับวัตถุทรงกระบอกด้วยท่าจับแบบแมนยามีจุดศูนย์กลางของมวลอยู่ไกลจากมือ เทียมทำให้เกิดแรงบิดขึ้นงานหลุดออกจากนิ้วมือ ส่งผลให้การจับไม่มั่นคง .....	111
รูปที่ 5.31 มือเทียมไม่สามารถจับวัตถุขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 117 มิลลิเมตรขึ้นไปในท่าจับแบบ กำมือ.....	111
รูปที่ 5.32 ขอบเขตของขนาดวัตถุที่มือเทียมจับได้ในท่าจับแบบแมนย่าและท่าจับแบบกำมือ	113
รูปที่ 5.33 กลไกมือเทียมขณะทำท่าจับแบบแมนย่าตามการออกแบบในโปรแกรม CAD (a) , มอเตอร์ไฟฟ้าหมุนไปยังท่าจับแบบแมนย่า, (b) ปลายนิ้วมือเคลื่อนที่มาสัมผัสกัน .....	113
รูปที่ 5.34 กลไกมือเทียมจริงขณะทำท่าจับแบบแมนย่า (a) มอเตอร์ไฟฟ้าหมุนไปยังท่าจับแบบ แมนย่า, (b) ปลายนิ้วมือไม่สามารถเคลื่อนที่มาสัมผัสกัน.....	114
รูปที่ 5.35 แรงดึงนิ้วมือเมื่อจับชิ้นงานขนาดใหญ่ (a) เส้นผ่านศูนย์กลาง 71 มิลลิเมตร, (b) เส้น ผ่านศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร .....	114
รูปที่ 5.36 มือเทียมไม่สามารถจับวัตถุขนาดเล็กกว่า 35 มิลลิเมตรในท่ากำมือได้ .....	115
รูปที่ 5.37 วัตถุสำคัญในชีวิตประจำวัน.....	116
รูปที่ 5.38 การทดลองหยิบวัตถุในชีวิตประจำวัน .....	117
รูปที่ 5.39 การเข้าจับวัตถุลักษณะแบนของมือเทียมทำได้ยากเนื่องจากจะทำให้วัตถุบิดหลุดออก จากนิ้วมือ.....	119
รูปที่ 5.40 ปลายนิ้วมือเทียมผลิตจากพลาสติก ABS-M30i.....	120
รูปที่ 5.41 ถู่มือช่วยเพิ่มแรงเสียดทาน สำหรับใช้กับมือเทียมในท้องตลาด.....	120

## สารบัญตาราง

ตารางที่ 3.1 ขนาดมือของชายไทยอายุ 17 – 49 ปี.....	28
ตารางที่ 4.1 ขอบเขตเริ่มต้นของตัวแปรในการสังเคราะห์กลไกข้อนิ้วโป้ง.....	60
ตารางที่ 5.1 ผลการทดลองจับวัตถุทรงกลมและทรงกระบอกขนาดต่างๆในท่าจับแบบแม่นยำ และท่าจับแบบกำมือ.....	110
ตารางที่ 5.2 ผลการทดลองจับวัตถุในชีวิตประจำวันเรียงตามความสำคัญของวัตถุ.....	118



# บทที่ 1

## บทนำ

### (Introduction)

#### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในปัจจุบันประเทศไทยมีผู้พิการมือขาดและแขนขาดประมาณ 15,000 คน [1] แต่ผู้ใช้แขนเทียมมีเพียงประมาณ 1,000 คน [2] ผู้พิการเหล่านี้ต้องประสบความลำบากในการดำเนินชีวิตประจำวันและการเข้าสังคมเนื่องจากขาดมือในการช่วยหยิบจับและเกิดความรู้สึกแปลกแยกจากผู้อื่น จากการสอบถามข้อมูลจากโรงเรียนกายอุปกรณ์สิรินธร ผู้พิการแขนขาดได้รับความช่วยเหลือให้ใช้เพียงแขนเทียมชนิดเพื่อความสวยงามเท่านั้นซึ่งไม่สามารถใช้เคลื่อนไหวและใช้งานในชีวิตประจำวันได้ เนื่องจากแขนเทียมที่เคลื่อนไหวได้มีราคาสูงและถูกนำเข้ามาจากต่างประเทศ โดยแขนเทียมที่เคลื่อนไหวได้แบบปกติมีราคาตั้งแต่ 4,000 ถึง 8,000 เหรียญสหรัฐ และแบบใช้ไฟฟ้ามีราคาตั้งแต่ 25,000 ถึง 50,000 เหรียญสหรัฐ [3] อุปกรณ์ส่วนที่สำคัญและมีราคาสูงที่สุดในแขนเทียมคือส่วนมือเทียม งานวิจัยนี้จึงเกิดขึ้นเพื่อแก้ไขปัญหาและช่วยเหลือผู้พิการดังกล่าว

การออกแบบมือเทียมในปัจจุบันถูกจำกัดด้วยขนาดของมือเทียมที่ต้องใกล้เคียงกับมนุษย์ มือเทียมที่มีการเคลื่อนไหวที่หลากหลายมักจะมีราคาแพงสูง ส่งผลให้ตัวขับเคลื่อนและกลไกมีแรงจذبน้อยลง งานวิจัยนี้จึงมีเป้าหมายในการพัฒนามือเทียมซึ่งมีความสามารถในการเคลื่อนไหวที่เป็นท่าจับต่างๆที่เพียงพอต่อการใช้งานในชีวิตประจำวันโดยใช้กลไกที่ไม่ซับซ้อนและใช้ตัวขับเคลื่อนเพียงตัวเดียว ออกแบบให้มือเทียมมีการเคลื่อนไหวใกล้เคียงมือมนุษย์, น้ำหนักเบา, มีอายุการใช้งานนาน, และมีต้นทุนการผลิตที่ต่ำกว่ามือเทียมจากต่างประเทศ เพื่อให้มือเทียมมีความสามารถสูงและอยู่ในระดับที่ผู้พิการสามารถเข้าถึงและนำไปใช้งานได้ไปพร้อมๆกัน

#### 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

ออกแบบกลไกมือเทียมสำหรับผู้พิการแขนขาด ให้สามารถเคลื่อนไหวท่าต่างๆที่จำเป็นสำหรับการใช้งานในชีวิตประจำวันได้และมีการเคลื่อนไหวที่ดูเป็นธรรมชาติโดยใช้มอเตอร์ตัวเดียว

### 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ออกแบบกลไกมือเทียมตั้งแต่นิ้วมือถึงฝ่ามือ ไม่รวมส่วนข้อมือ
2. ออกแบบระบบขับเคลื่อน (Actuator, Controller, Transmission) ไม่รวมส่วนรับสัญญาณจากผู้พิการและอุปกรณ์ตรวจวัดแรง (Force sensor)
3. สามารถเคลื่อนไหวท่าต่างๆที่จำเป็นในการใช้งานได้ หมายถึง ท่าแม่นยำ (Precision Grip) และท่ากำมือ (Power grip)

### 1.4 ขั้นตอนดำเนินงานโดยสรุป

1. ศึกษาลักษณะการเคลื่อนไหวและการจับสิ่งของด้วยมือมนุษย์
2. ศึกษากลไกมือเทียมในปัจจุบัน เพื่อเป็นพื้นฐานการออกแบบ
3. กำหนดท่าที่จำเป็นสำหรับมือเทียมใช้ในชีวิตประจำวันและแรงที่ใช้จับสิ่งของ
4. ออกแบบกลไกมือเทียมเพื่อให้มีขนาดกลไกที่เหมาะสม โดยพิจารณาจาก แรง ท่าทางต่างๆ และขนาดมือคนไทย
5. ผลิตชิ้นงาน ทดสอบแรงจับและการเคลื่อนไหวเพื่อจับวัตถุต่างๆ
6. ปรับปรุงและแก้ไขให้มือเทียมมีแรงจับและการเคลื่อนไหวที่เหมาะสม

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถผลิตมือเทียมที่มีคุณภาพและต้นทุนต่ำเพื่อนำไปให้ผู้พิการแขนขาที่ขาดแคลนใช้ในชีวิตประจำวัน
2. ลดการนำเข้ามือเทียมจากต่างประเทศซึ่งมีราคาสูง เป็นการลดภาระค่าใช้จ่ายให้แก่ผู้พิการและโรงพยาบาล
3. มือเทียมเป็นส่วนหนึ่งของระบบแขนเทียม หากมีการพัฒนาส่วนอื่นๆเช่น ส่วนรับสัญญาณจากผู้พิการ ส่วนข้อมือเทียมหรือข้อศอกเทียม จะสามารถผลิตแขนเทียมทั้งหมดได้เองในประเทศไทย

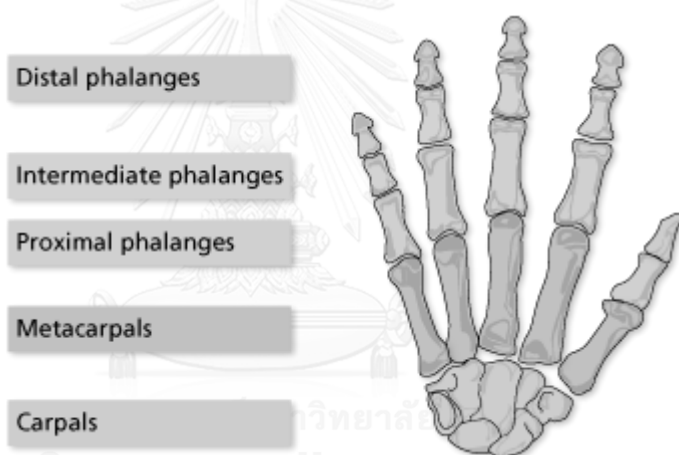
## บทที่ 2

### ปริทัศน์วรรณกรรมและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง (Literature Review and related theory)

#### 2.1 กายวิภาคศาสตร์และชีวกลศาสตร์ของมือ

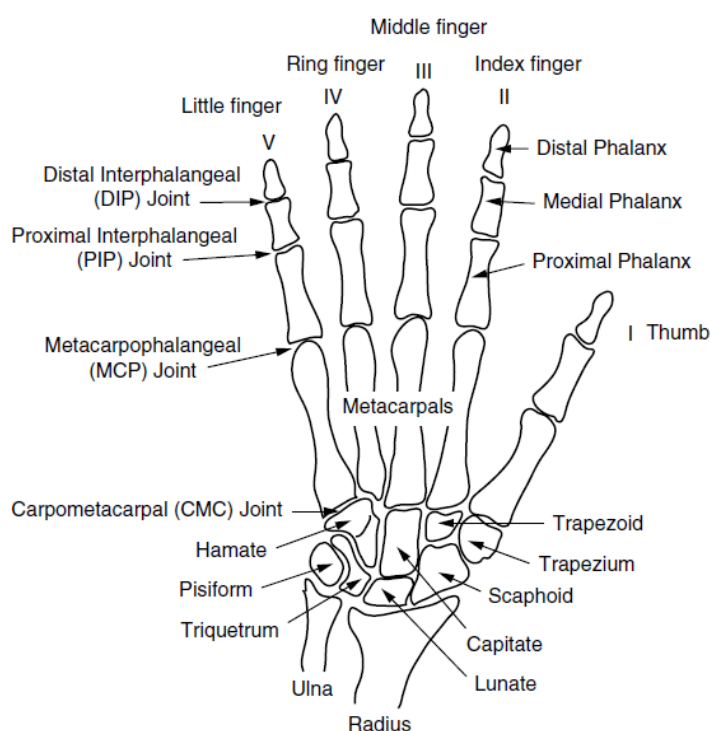
##### 2.1.1 โครงสร้างและข้อต่อของมือ

โครงกระดูกในมือมนุษย์มีทั้งหมด 27 ชิ้น โดยแบ่งเป็นสามส่วน คือ กระดูกข้อมือ (Carpal) 8 ชิ้น, กระดูกฝ่ามือ (Metacarpal) 5 ชิ้น, และกระดูกนิ้วมือ (Phalanges) 14 ชิ้น กระดูกนิ้วมือสามารถแบ่งออกเป็น กระดูกนิ้วมือท่อนต้น (Proximal phalanges), กระดูกนิ้วมือท่อนกลาง (Intermediate phalanges), และกระดูกนิ้วมือท่อนปลาย (Distal phalanges) ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 กระดูกนิ้วมือจำแนกตามกลุ่มของกระดูก

มือมนุษย์มี 4 ข้อต่อในแต่ละนิ้วมือเรียงจากฝ่ามือไปยังปลายนิ้ว คือ CMC (Carpometacarpal joint) เป็นข้อต่อระหว่างกระดูกข้อมือและกระดูกฝ่ามือ, MCP (Metacarpophalangeal joint) อยู่ระหว่างกระดูกฝ่ามือและกระดูกนิ้วมือท่อนต้น, PIP (Proximal interphalangeal) อยู่ระหว่างกระดูกนิ้วมือท่อนต้นและกระดูกนิ้วมือท่อนกลาง, และ DIP (Distal interphalangeal) อยู่ระหว่างกระดูกนิ้วมือท่อนกลางและกระดูกนิ้วมือท่อนปลายดังรูปที่ 2.2 โดยนิ้วโป้งจะมีข้อต่อ IP (PIP และ DIP) นี้เพียงข้อต่อเดียวเนื่องจากไม่มีกระดูกมือนิ้วมือท่อนกลาง [4]



รูปที่ 2.2 ข้อต่อและกระดูกของมือ[4]

### 2.1.2 ขอบเขตการเคลื่อนไหวของข้อต่อนิ้วมือ

ข้อต่อ CMC นั้นถูกยึดไว้ด้วยเส้นเอ็นและสามารถขยับได้เพียงเล็กน้อย หน้าที่หลักของข้อต่อ CMC คือการสร้างหลุมบนฝ่ามือขณะที่นิ้วมือเคลื่อนไหวเพื่อแนบกับวัตถุและเพิ่มความมั่นคงในการจับวัตถุ

ข้อต่อ MCP สามารถงอ (Flexion) ได้ประมาณ 90 องศา และเหยียด (Extension) ได้ 20 ถึง 30 องศาจากตำแหน่งปกติ โดยขอบเขตของการงอจะแตกต่างกันตามนิ้วและบุคคล นิ้วชี้สามารถงอได้น้อยที่สุดและนิ้วก้อยสามารถงอได้มากที่สุด ข้อต่อ MCP ยังเป็นข้อต่อเดียวที่สามารถหมุนในระนาบฝ่ามือ (Frontal plane) ได้ ทำให้เกิดการกางออก (Abduction) และหุบเข้า (Adduction) ของนิ้วมือ มีขอบเขตการหมุนประมาณ 45 ถึง 60 องศา

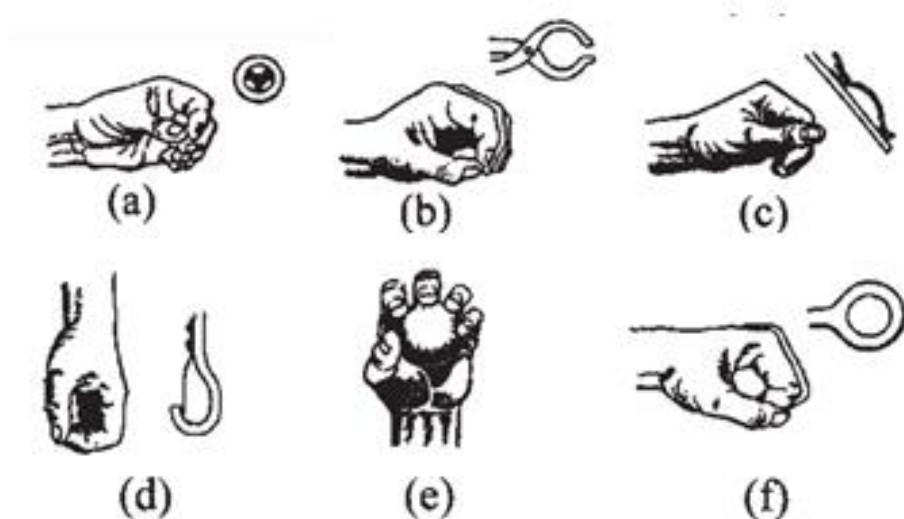
ข้อต่อ IP (PIP และ DIP) มีลักษณะเหมือนบานพับ สามารถงอและเหยียดได้เท่านั้น ไม่สามารถกางออกและหุบเข้าได้ ข้อต่อ PIP สามารถงอได้ถึง 110 องศา และ DIP สามารถงอได้ถึง 70 องศา [4]

### 2.1.3 ความเร็ว, แรง, และรูปแบบการเคลื่อนไหวของมือ

มนุษย์สามารถกำมือโดยมีความเร็วของการงอนิ้วมือสูงสุดถึง 2,290 องศาต่อวินาทีและสามารถออกแรงจากทุกนิ้วมือรวมกันได้ถึง 400 นิวตัน แต่สำหรับการใช้งานชีวิตประจำวัน ความเร็วในการงอนิ้วมือมีค่า 172 ถึง 200 องศาต่อวินาที และแรงสูงสุด 68 นิวตันก็เพียงพอต่อการใช้จับสิ่งของในชีวิตประจำวัน [5] แรงในการจับข้างต้นเป็นแรงที่มีมนุษย์ใช้จับวัตถุซึ่งมีความเสียดทานค่าหนึ่ง หากมือเทียมใช้วัสดุที่มีความเสียดทานแตกต่างกันแรงที่ต้องใช้ก็จะเปลี่ยนแปลงไปด้วย

มือมนุษย์มีรูปแบบการเคลื่อนไหวเพื่อจับวัตถุจำนวนมากเนื่องจากทุกนิ้วสามารถเคลื่อนไหวได้อย่างอิสระ รูปแบบการใช้งานของมือสามารถแบ่งได้หลายแบบ Keller et al [5] ได้แบ่งตามการใช้งานของมือโดยมีทั้งหมด 6 แบบ คือ ทำสามจับ (Tripod grip), ทำจิกปลายนิ้ว (Tip), ทำจับด้านข้าง (Lateral grip), ทำตะขอ (Hook), ทำจับทรงกลม (Spherical grip), และทำจับทรงกระบอก (Cylindrical grip) ดังรูปที่ 2.3 ทำต่างๆมีวัตถุประสงค์การใช้งานต่างกันดังนี้

1. ทำสามจับ (Tripod grip) คือการเคลื่อนไหวนิ้วโป้งเข้ามาชนกับนิ้วชี้หรือนิ้วชี้และนิ้วกลาง ใช้สำหรับจับวัตถุขนาดเล็กถึงขนาดกลางที่ต้องการความมั่นคง เช่น ปากกาหรือดินสอ
2. ทำจับปลายนิ้ว (Tip) คือการเคลื่อนไหวปลายนิ้วชี้มาชนกับปลายนิ้วโป้ง ใช้สำหรับจับวัตถุขนาดเล็ก เช่น เข็มหรือลูกบิด
3. ทำจับด้านข้าง (Lateral grip) คือการเคลื่อนไหวนิ้วโป้งมาชนกับด้านข้างของนิ้วชี้เพื่อจับวัตถุ ใช้สำหรับจับวัตถุที่มีลักษณะแบน เช่น กุญแจหรือนามบัตร
4. ทำตะขอ (Hook) คือการงอนิ้วชี้ถึงนิ้วก้อยเข้ามาเพื่อใช้เกี่ยววัตถุ เช่น การถือกระเป๋าหรือการโหนรถประจำทาง
5. ทำจับทรงกลม (Spherical grip) คือการเคลื่อนไหวทุกนิ้วเข้ามาเพื่อจับวัตถุทรงกลม
6. ทำจับทรงกระบอก (Cylindrical grip) คือการเคลื่อนไหวทุกนิ้วเข้ามาเพื่อจับวัตถุทรงกระบอก

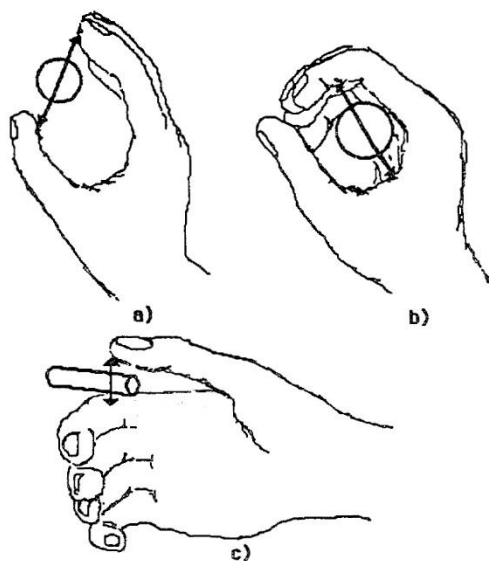


รูปที่ 2.3 รูปแบบการใช้งานของมือ (a) ทำสามจับ (Tripod grip), (b) ทำจับปลายนิ้ว (Tip), (c) ทำจับด้านข้าง (Lateral grip), (d) ทำตะขอ (Hook), (e) ทำจับทรงกลม (Spherical grip), (f) ทำจับทรงกระบอก (Cylindrical grip)

รูปแบบการใช้งานทั้ง 6 แบบข้างต้นถูกนำมาจัดกลุ่มเพิ่มเติมตามรูปแบบการเคลื่อนไหวของนิ้วมือดังนี้

Napier [6] ได้จัดกลุ่มให้ทำสามจับ, ทำจับปลายนิ้ว, และทำจับด้านข้าง เป็นทำจับแบบแม่นยำ (Precision Grip) จัดกลุ่มให้ทำจับทรงกลมและทำจับทรงกระบอกเป็นทำจับแบบกำมือ (Power Grip) โดยแยกทำตะขอไว้จากทั้งสองกลุ่มข้างต้น

Iberall [7] แบ่งกลุ่มทำจับตามการทิศการทำมุมระหว่างนิ้วมือและส่วนต่างๆของมือนัดรูปที่ 2.4 โดยทำจับแบบแม่นยำ (Precision Grip) เป็นทำที่ปลายนิ้วโป่งมีทิศตรงข้ามกับปลายนิ้วชี้และนิ้วกลาง ประกอบด้วยทำสามจับและทำจับปลายนิ้ว ทำจับแบบกำมือ (Power Grips) เป็นทำที่ปลายนิ้วหรือส่วนท้องของนิ้วชี้และนิ้วกลางมีทิศตรงข้ามกับฝ่ามือ ประกอบด้วยทำจับทรงกลม, ทำจับทรงกระบอก, และทำตะขอ ทำจับแบบด้านข้าง (Lateral Grip) เป็นทำที่ปลายนิ้วโป่งสัมผัสกับด้านข้างของนิ้วชี้ การแบ่งแบบ Iberall นี้แตกต่างจากแบบ Napier ที่ทำจับด้านข้างถูกแยกออกมาจากทำจับแบบแม่นยำเนื่องจากมีลักษณะการเคลื่อนที่ที่แตกต่างจากทำอื่น



รูปที่ 2.4 การแบ่งท่าจับแบบ Iberall [7] (a) ท่าจับแบบแม่นยำ (Precision grip), (b) ท่าจับแบบกำมือ (Power grip), (c) ท่าจับด้านข้าง (Lateral grip)

งานวิจัยนี้เลือกใช้การแบ่งท่าจับแบบ Iberall [7] เนื่องจากเป็นการแบ่งกลุ่มตามการเคลื่อนที่ของนิ้วมือ จึงสามารถนำมาออกแบบกลไกที่ตอบโจทยกับท่าจับที่ต้องการได้ง่าย จากการศึกษาพบว่าท่าที่จำเป็นและใช้บ่อยในชีวิตประจำวันตามลำดับคือ ท่าจับแบบกำมือถูกใช้งานประมาณ 35 % (ท่าจับทรงกลม 10 % ท่าจับทรงกระบอก 25 %), ท่าจับแบบแม่นยำถูกใช้งานประมาณ 35 % (ท่าสามจับ 15 % ท่าจับปลายนิ้ว 20 %), และท่าจับด้านข้างถูกใช้งานประมาณ 20% [8, 9] มือเทียมส่วนใหญ่จึงถูกออกแบบให้สามารถใช้งานในท่าจับแบบกำมือและท่าจับแบบแม่นยำได้เพื่อให้ครอบคลุมการใช้งานส่วนใหญ่ (ประมาณ 70%) ในชีวิตประจำวัน

## 2.2 ผู้พิการแขนขาด

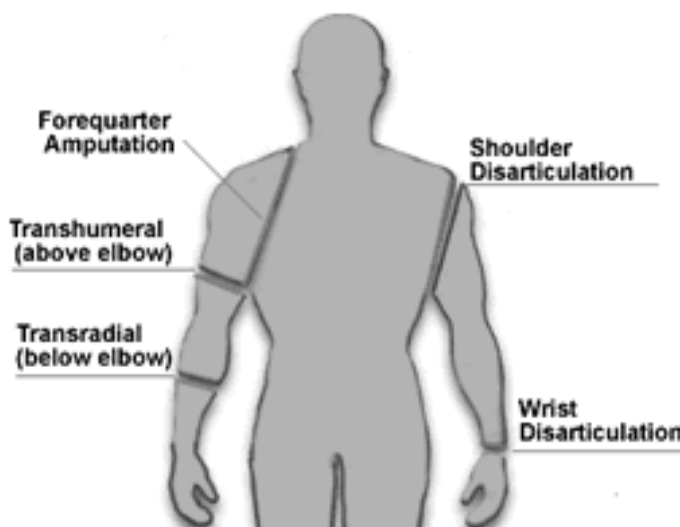
ผู้พิการแขนขาดในประเทศไทยมีประมาณ 15,000 คน [1] ผู้พิการแขนขาดนับเป็นส่วนน้อย ในจำนวนผู้พิการทั้งหมดแต่การพิการแขนขาดสามารถเกิดขึ้นได้กับคนทุกวัย สาเหตุหลักของความพิการแขนขาดคือ อุบัติเหตุ การติดเชื้อ เจ็บป่วยเป็นโรค หรือมีความพิการมาแต่กำเนิด ซึ่งการตัดแขนมักพยายามให้มีแขนเหลือมากที่สุดเพื่อให้สามารถใช้แขนเทียมได้มีประสิทธิภาพสูงสุด

### 2.2.1 รูปแบบของความพิการ

ผู้พิการแขนขาดสามารถจำแนกได้ด้วยระดับการตัดแขนเนื่องจากมีความจำเป็นในการใช้แขนเทียมที่ต่างกัน โดยผู้พิการแขนขาดสามารถแบ่งได้ดังรูปที่ 2.5 มีรายละเอียดดังนี้

1. มือขาดบางส่วน (Hand & Partial-hand amputation) คือ การสูญเสียนิ้วมือ นิ้วโป้ง หรือมือบางส่วนที่อยู่ต่ำกว่าข้อมือ ผู้พิการมือขาดบางส่วนมักจะใช้เพียงนิ้วมือเทียมที่ทำเฉพาะนิ้วมือหรือมือส่วนที่ขาดหายไปเท่านั้น
2. ข้อมือขาด (Wrist disarticulation) คือ การสูญเสียมือไปจนถึงข้อมือ มักเหลือปลายแขนเป็นลักษณะกระเปาะกลม เพื่อให้สามารถใส่มือเทียมได้ง่าย
3. แขนขาดใต้ศอก (Transradial amputation) คือ การสูญเสียมือจนถึงท่อนแขนด้านล่าง แต่ยังเหลือข้อศอกอยู่ ผู้พิการสามารถใช้มือเทียมและข้อมือเทียมได้
4. แขนขาดเหนือศอก (Transhumeral amputation) คือ การสูญเสียมือจนถึงท่อนแขนด้านบน ผู้พิการต้องใช้แขนเทียมที่มีกลไกข้อศอกอยู่ด้วย
5. แขนขาดถึงหัวไหล่ (Shoulder disarticulation) คือ การสูญเสียมือจนถึงใต้หัวไหล่ เหลือกระดูกสะบักอยู่ ผู้พิการมักใช้แขนเทียมชนิดเดียวกับผู้พิการแขนขาดเหนือศอก แต่ต้องใช้เบ้าแขนเทียมสำหรับหัวไหล่โดยเฉพาะ
6. แขนขาดเหนือหัวไหล่ (Forequarter amputation) คือ การสูญเสียมือจนถึงหัวไหล่ กระดูกสะบัก และไหปลาร้า





รูปที่ 2.5 รูปแบบของความพิการแขนขาด

## 2.2.2 ความสำเร็จของการใช้มือเทียม

ในปัจจุบันมือเทียมสำหรับผู้พิการถูกใช้งานเป็นเพียงเครื่องมือสำหรับช่วยทำกิจกรรมในชีวิตประจำวัน ยังไม่มีประสิทธิภาพเทียบเคียงกับมือมนุษย์ได้ คุณสมบัติที่สำคัญของมือเทียมมีสองส่วนคือ การใช้งานและความสวยงาม ซึ่งมักแปรผกผันกัน ทำให้ผู้พิการแขนขาดส่วนใหญ่มีมือเทียม 2 อัน แบบใช้งานสำหรับใช้ในชีวิตประจำวันและแบบสวยงามสำหรับการเข้าสังคม

ผู้พิการแขนขาดบางส่วนปฏิเสธหรือเลิกใช้มือเทียมหลังจากใช้ไประยะหนึ่งเนื่องจากหลายเหตุผล เช่น ความไม่สบายจากการสวมใส่, น้ำหนัก, ความไม่เป็นธรรมชาติ, ความยากลำบากในการฝึกใช้, และค่าบำรุงรักษา การปฏิเสธมือเทียมเกิดขึ้นน้อยที่สุดในผู้พิการแขนขาดได้ศอก (6%), ผู้พิการแขนขาดเหนือศอก (57%), และผู้พิการแขนขาดถึงหัวไหล่ (60%) ตามลำดับ ชนิดของมือเทียมที่ถูกปฏิเสธน้อยที่สุดคือมือเทียมแบบใช้ไฟฟ้า (39%), มือเทียมแบบใช้การเคลื่อนไหวร่างกาย(50%), และมือเทียมเพื่อความสวยงาม (53%) ตามลำดับ [3] นอกจากนี้สาเหตุทางด้านจิตใจก็เป็นส่วนหนึ่งในการปฏิเสธการใช้มือเทียม เช่น ความไม่มั่นใจในตนเอง, การไม่เป็นที่ยอมรับจากผู้อื่น, ความคาดหวังต่อมือเทียมที่มากเกินไป, หรือประสบการณ์ที่ไม่ดีต่อการใช้มือเทียมในครั้งแรก ถึงแม้จะมีผู้พิการที่ปฏิเสธการใช้มือเทียมเป็นจำนวนหนึ่ง มือเทียมก็มีประโยชน์ต่อการใช้ชีวิตประจำวันในด้าน การช่วยหยิบจับวัตถุ, การแต่งกาย, และสร้างความมั่นใจให้ผู้พิการ หากเทคโนโลยีมือเทียมสำหรับผู้พิการแขนขาดก้าวหน้าขึ้น ย่อมทำให้เกิดการยอมรับการใช้งานมือเทียมสูงขึ้นในอนาคต

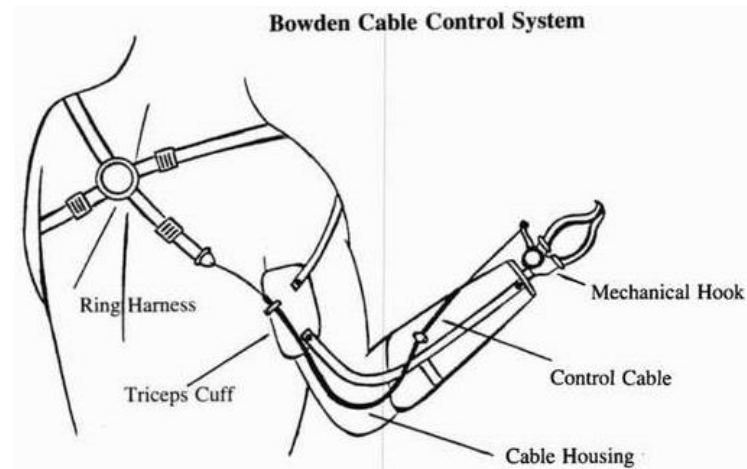
## 2.3 มือเทียมสำหรับผู้พิการ

มือเทียมสำหรับผู้พิการแขนขาในปัจจุบันแบ่งออกเป็น 2 ชนิดตามจุดประสงค์การใช้งาน คือ มือเทียมเพื่อความสวยงาม ใช้สำหรับสวมใส่เพื่อให้ดูเหมือนมือมนุษย์ไม่สามารถใช้จับวัตถุได้ และมือเทียมแบบใช้งาน ใช้สำหรับใช้จับวัตถุในชีวิตประจำวัน มือเทียมแบบใช้งานแบ่งออกเป็น 2 ชนิดตามพลังงานที่ใช้ คือ มือเทียมแบบใช้การเคลื่อนไหวร่างกาย (Body-powered) และมือเทียมแบบใช้แรงขับเคลื่อนภายนอก (Externally powered) ซึ่งมือเทียมแบบใช้แรงขับเคลื่อนภายนอกที่มีในท้องตลาดปัจจุบันเป็นแบบใช้ไฟฟ้าทั้งหมด

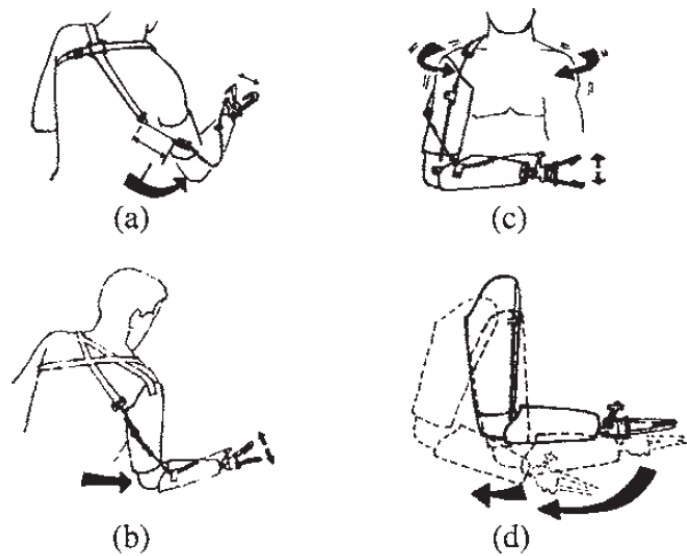
ในปัจจุบันมือเทียมแบบใช้งานสามารถตกแต่งให้มีความสวยงามคล้ายกับมือมนุษย์ได้แล้วแต่มีราคาสูงมาก ผู้พิการแขนขาในไทยได้รับความช่วยเหลือเพียงมือเทียมแบบความสวยงามที่เคลื่อนไหวไม่ได้เท่านั้น การพัฒนามือเทียมสำหรับการใช้งานจึงมีผลกระทบต่อคุณภาพชีวิตของผู้พิการเป็นอย่างมาก

### 2.3.1 มือเทียมแบบใช้การเคลื่อนไหวร่างกาย (Body-powered)

มือเทียมแบบใช้การเคลื่อนไหวร่างกาย ใช้การเคลื่อนไหวของผู้พิการเช่น การงอ/เหยียดข้อศอก การงอ/เหยียดหัวไหล่ ในการดึงเส้นลวดที่ติดอยู่ที่เท้าแขนเทียมเพื่อเปิด/ปิดปลายมือเทียมสำหรับจับวัตถุ ระบบเส้นลวดสำหรับมือเทียมนี้นี้มีชื่อว่า Bowden cable control system [5] ดังรูปที่ 2.6 ซึ่งถูกพัฒนาตั้งแต่หลังสงครามโลกครั้งที่สองและใช้อย่างแพร่หลายในเวลาถัดมา ลักษณะการเคลื่อนไหวที่ผู้พิการใช้ในการควบคุมมือเทียมจะแตกต่างกันไปตามระดับความพิการดังรูปที่ 2.7 เห็นได้ว่าผู้พิการต้องเคลื่อนไหวร่างกายและออกแรงตลอดเวลา จึงเกิดความเหนื่อยล้าในการใช้งาน รวมถึงผู้พิการต้องรับการฝึกฝนเพื่อใช้มือเทียมอย่างถูกต้อง ทำให้ผู้พิการส่วนใหญ่เกิดการปฏิเสธการใช้มือเทียม ค่าใช้จ่ายของมือเทียมแบบใช้การเคลื่อนไหวของร่างกายสำหรับผู้พิการแขนขาได้ศอกมีค่าประมาณ 4,000 – 8,000 เหรียญสหรัฐ [3] ซึ่งต่ำกว่ามือเทียมแบบใช้ไฟฟ้าแต่ยังสูงมากสำหรับผู้พิการในประเทศไทย



รูปที่ 2.6 ระบบควบคุมมือเทียมด้วยเส้นลวด Bowden cable control system [5]



รูปที่ 2.7 การเคลื่อนไหวเพื่อควบคุมมือเทียมสำหรับผู้พิการแขนขาดเหนือศอกและใต้ศอก

(a) การหมุนแขนท่อนบนไปข้างหน้าพร้อมกับงอข้อศอกสำหรับผู้พิการแขนขาดใต้ศอก

(b) การหมุนแขนท่อนบนไปข้างหน้าสำหรับผู้พิการแขนขาดเหนือศอก

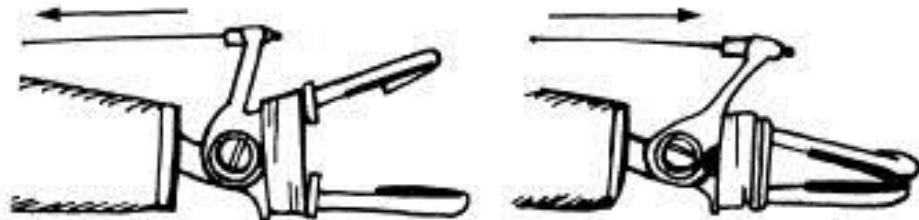
(c) การหมุนกระดูกสะบักไปด้านหน้า มักใช้ร่วมกับการหมุนแขนท่อนบน

(d) การลดหัวไหล่และหมุนแขนท่อนบน ใช้สำหรับควบคุมข้อศอกเทียมสำหรับผู้พิการแขนขาดเหนือศอก [5]

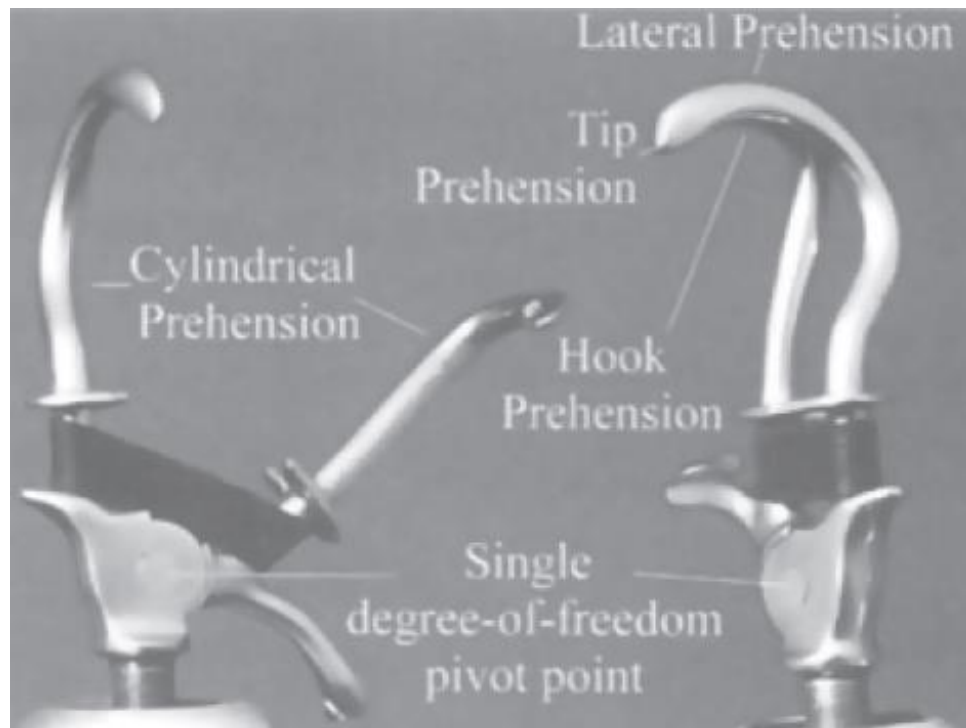
มือเทียมแบบใช้การเคลื่อนไหวของร่างกาย มักมีรูปร่างแบบตะขอคู่ (Split hook) ดังรูปที่ 2.8 ซึ่งทำงานด้วยการดึงเส้นลวดเส้นเดียวดังรูปที่ 2.9 เนื่องจากมือเทียมแบบตะขอคู่นี้สามารถใช้งานแทนการจับของมือได้หลากหลาย เช่น ทำจับด้านข้าง (Lateral), ทำจับปลายนิ้ว (Tip), ทำจับทรงกระบอก (Cylindrical) และทำตะขอ (Hook) ดังรูปที่ 2.10 มือเทียมชนิดนี้จึงเป็นที่นิยมแม้จะขาดความสวยงามก็ตาม



รูปที่ 2.8 มือเทียมรูปร่างตะขอคู่ (Split hook)



รูปที่ 2.9 การดึงเส้นลวดเพื่อควบคุมมือเทียม [5]



รูปที่ 2.10 การใช้งานของมือเทียมแบบตะขอคู่แทนรูปแบบการจับของมือ [5]

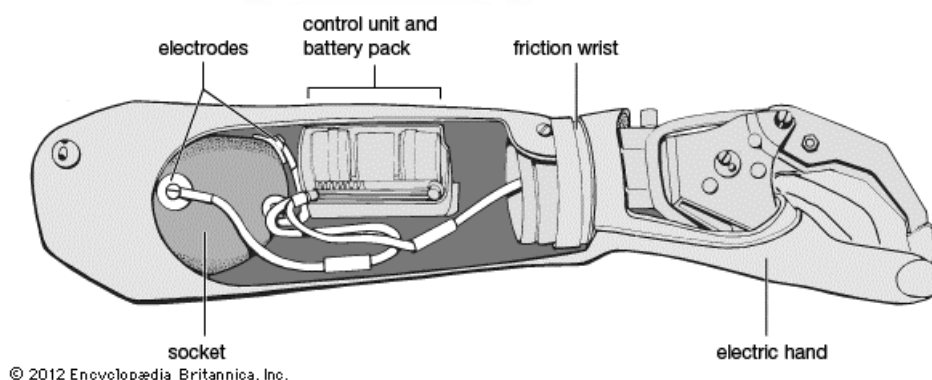
### 2.3.2 มือเทียมแบบใช้แรงขับเคลื่อนภายนอก (Externally powered)

มือเทียมแบบใช้แรงขับเคลื่อนภายนอก คือ มือเทียมที่ใช้พลังงานจากภายนอกร่างกายผู้พิการในการทำงาน ปัจจุบันมือเทียมในตลาดทั้งหมดใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ไฟฟ้าและขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าซึ่งมีประสิทธิภาพสูง แต่ก็มีมือเทียมในงานวิจัยต่างๆ ที่พยายามใช้การขับเคลื่อนแบบอื่น เช่น แรงแต้นลม [10] ไฮดรอลิก [11] และโลหะผสมจำรูป (shape memory alloy) [12, 13] ซึ่งมีความเป็นไปได้ที่จะมาทดแทนมอเตอร์ไฟฟ้าในอนาคต ค่าใช้จ่ายของมือเทียมแบบใช้ไฟฟ้าสำหรับผู้พิการแขนขาดใต้ออกมีค่าประมาณ 25,000 – 50,000 เหรียญสหรัฐ [3] ซึ่งแพงกว่ามือเทียมแบบใช้การเคลื่อนไหวร่างกายถึงประมาณหกเท่าตัว

การควบคุมมือเทียมส่วนใหญ่ใช้การสั่งการด้วยการเกร็งกล้ามเนื้อของผู้พิการเพื่อส่งสัญญาณไฟฟ้าผ่านอุปกรณ์ตรวจจับ (Myoelectrode) ที่สัมผัสกับแขนผู้พิการภายในเบ้าแขนเทียม ดังรูปที่ 2.11 และรูปที่ 2.12 วิธีการส่งสัญญาณนี้เรียกว่าวิธีการบันทึกคลื่นไฟฟ้ากล้ามเนื้อ (Electromyogram - EMG)



รูปที่ 2.11 อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณไฟฟ้าจากการเกร็งกล้ามเนื้อ (Myoelectrode)

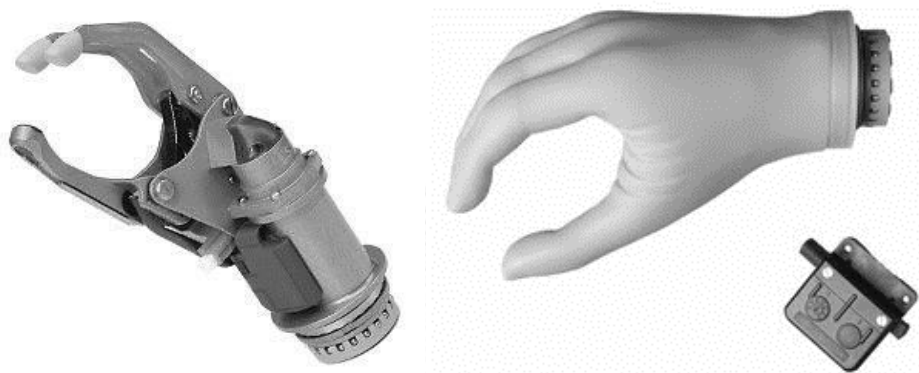


© 2012 Encyclopædia Britannica, Inc.

รูปที่ 2.12 มือเทียมแบบใช้ไฟฟ้าสั่งการด้วยตัวจับสัญญาณ (Myoelectrode) ที่ติดอยู่กับกล้ามเนื้อของผู้พิการภายในเบ้ามือเทียม

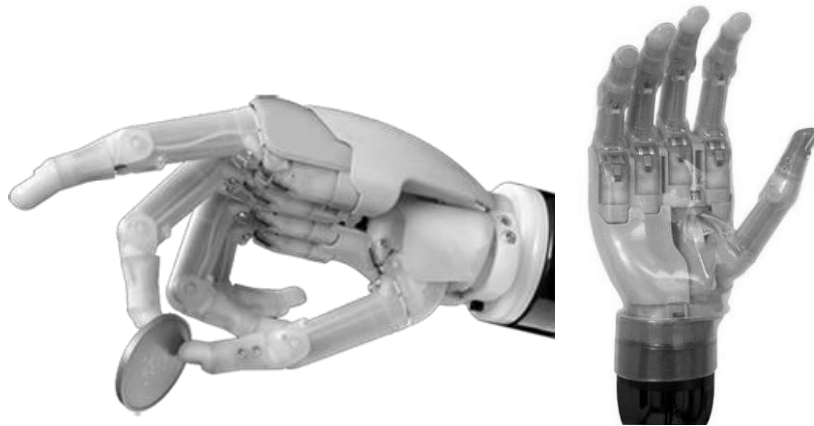
### 2.3.3 มือเทียมแบบใช้ไฟฟ้าในท้องตลาดปัจจุบัน

มือเทียมแบบใช้ไฟฟ้าในท้องตลาดมีหลายชนิดตั้งแต่ความซับซ้อนน้อยจนถึงซับซ้อนมาก มือเทียมแบบพื้นฐานที่ใช้กันทั่วไปจะสามารถเคลื่อนที่ได้เพียง 1 องศาอิสระคือการเปิดและปิดมือเทียม ทำให้มีการใช้งานที่จำกัด และมักจะมีเพียงสามนิ้ว คือ นิ้วชี้ นิ้วกลาง และนิ้วโป้ง ดังรูปที่ 2.13 โดยนิ้วโป้งอยู่ระหว่างนิ้วทั้งสอง มือเทียมนี้สามารถนำไปใส่กับถุงมือที่รูปร่างเหมือนมือมนุษย์เพื่อความสวยงามได้



รูปที่ 2.13 มือเทียม Otto Bock MyoHand VariPlus Speed® (Otto Bock Orthopedic Industry, Inc., Duderstadt, Germany).

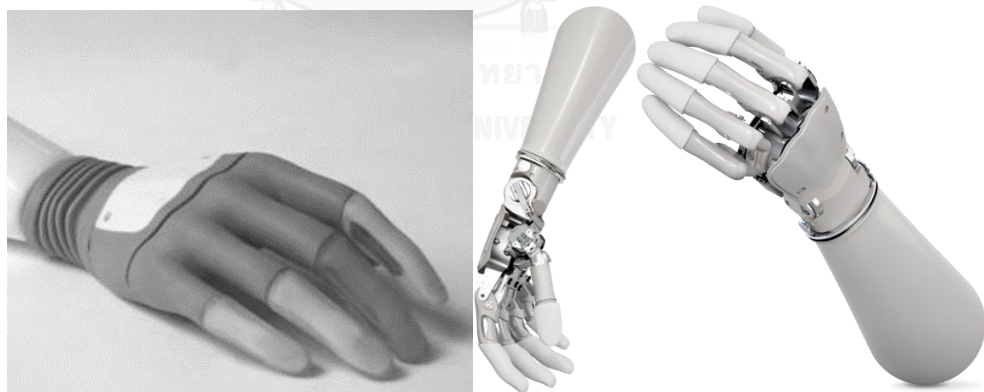
มือเทียมที่มีความซับซ้อนมากขึ้นถูกพัฒนาและเริ่มใช้งานในช่วงเวลาหลายปีที่ผ่านมา เช่น i-Limb hand (Touch bionics, Inc.) ดังรูปที่ 2.14 มีมอเตอร์ไฟฟ้าทั้งหมด 5 อัน ใช้มอเตอร์ไฟฟ้า 1 อันสำหรับขับเคลื่อนแต่ละนิ้วมือ [14], Bebionic hand (RSLSteeper) ดังรูปที่ 2.15 มีการออกแบบคล้ายกับ i-Limb hand คือ มีมอเตอร์ไฟฟ้าทั้งหมด 5 อัน ใช้มอเตอร์ไฟฟ้า 1 อันสำหรับขับเคลื่อนแต่ละนิ้วมือ [15], และ Michelangelo hand (Otto Bock Orthopedic Industry, Inc.) ดังรูปที่ 2.16 มีมอเตอร์ไฟฟ้าทั้งหมด 2 อัน ใช้มอเตอร์หลัก 1 อันในฝ่ามือสำหรับขับเคลื่อนนิ้วมือทั้งห้า และใช้มอเตอร์รองสำหรับปรับมุมที่นิ้วโป้งกระทำกับฝ่ามือ [14] มือเทียม i-Limb hand และ Bebionic hand ทั้งสองแบบข้างต้นมี 6 องศาอิสระในขณะที่มีมอเตอร์ในการขับเคลื่อนทั้งหมด 5 อัน เนื่องจากไม่ใช้มอเตอร์ไฟฟ้าควบคุมการหมุนนิ้วโป้งเพื่อเปลี่ยนมุมที่กระทำกับฝ่ามือโดยให้ผู้ใช้งานหมุนด้วยตนเอง [14]



รูปที่ 2.14 มือเทียม i-Limb hand (Touch bionics, Inc., Edinburgh, United Kingdom)



รูปที่ 2.15 มือเทียม Bebionic hand (RSLSteeper, Leeds, United Kingdom)

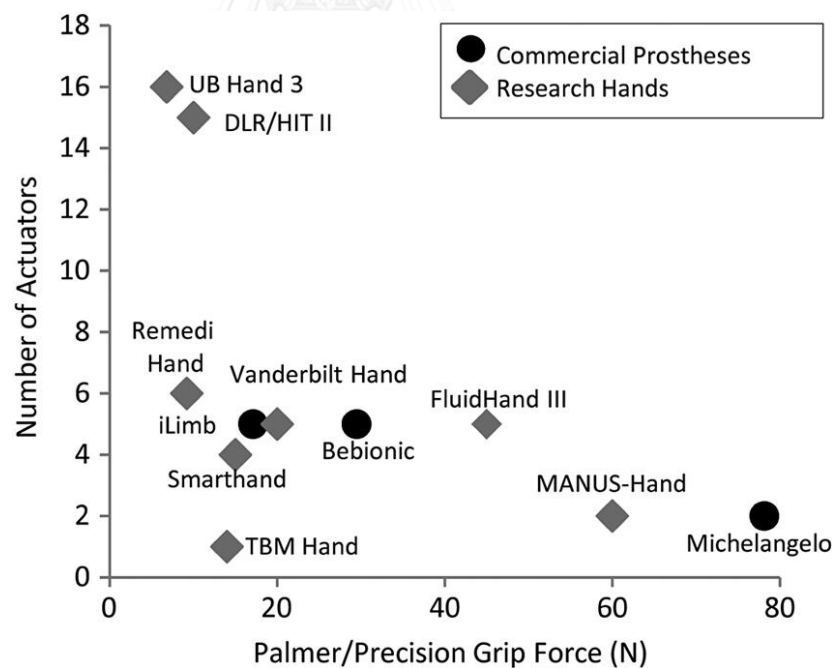


รูปที่ 2.16 มือเทียม Michelangelo hand (Otto Bock Orthopedic Industry, Inc., Duderstadt, Germany)



### 2.3.4 แรงจับของมือเทียมในท้องตลาดและในงานวิจัยอื่น

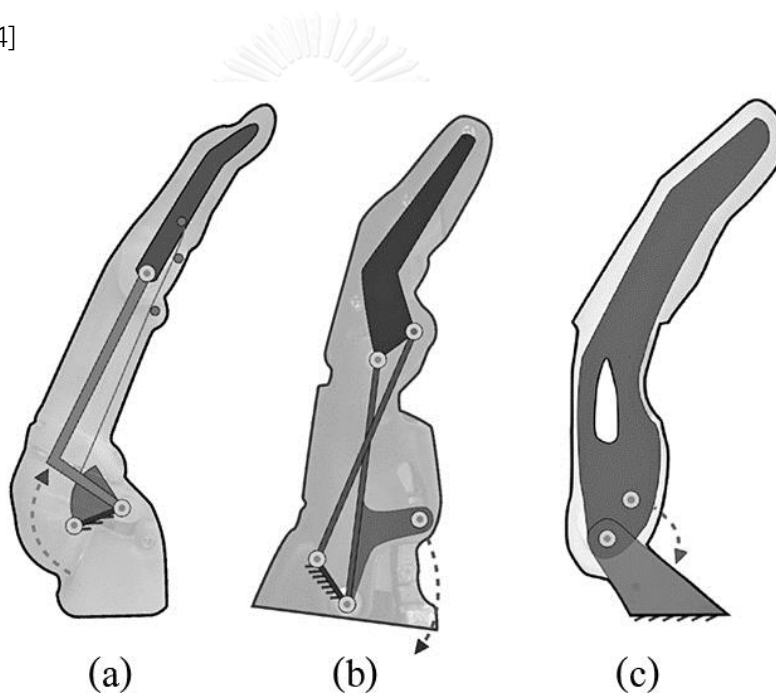
การออกแบบมือเทียมมีข้อจำกัดสำคัญคือขนาดของมือเทียมซึ่งต้องมีความใกล้เคียงกับมือมนุษย์ ทำให้ต้องเลือกใช้ตัวขับเคลื่อนและกลไกอย่างมีประสิทธิภาพและเหมาะสม จากการศึกษาพบว่า มือเทียมส่วนใหญ่เมื่อมีตัวขับเคลื่อนจำนวนมากขึ้นมักจะมีแรงจับน้อยลง [14] เนื่องจากตัวขับเคลื่อนจำเป็นต้องมีขนาดเล็กลงตามพื้นที่ที่มีจำกัดส่งผลกำลังขับเคลื่อนมีค่าน้อยลง ในขณะเดียวกัน การใช้ตัวขับเคลื่อนจำนวนมากจะส่งผลให้มือเทียมสามารถเคลื่อนที่ได้หลายองศาอิสระมากขึ้นและใช้งานได้หลายรูปแบบมากขึ้น จากรูปที่ 2.17 มือเทียมในท้องตลาดมีแรงจับในท่าจับแบบแม่นยำ (Precision grip) ตั้งแต่ 19 ถึง 79 นิวตันและใช้ตัวขับเคลื่อนตั้งแต่ 2 ถึง 5 ตัว ส่วนมือเทียมในงานวิจัยอื่นมีแรงจับและจำนวนตัวขับเคลื่อนแตกต่างกันไปตามการออกแบบและเป้าหมายของงานวิจัย เช่น DLR/HIT II [16] และ UB Hand 3 [17] ใช้ตัวขับเคลื่อนจำนวน 15-16 ตัวมีแรงจับน้อยกว่ามือเทียมอื่นเนื่องจากกลไกสำหรับตัวขับเคลื่อนเหล่านี้มีความซับซ้อนและถูกจำกัดด้วยพื้นที่ของมือเทียม ในขณะที่มือเทียมที่กลไกมีความซับซ้อนน้อยและใช้ตัวขับเคลื่อนขนาดใหญ่กว่าเช่น FluidHand III [11] และ MANUS-Hand [18] สามารถให้แรงจับได้มากกว่ามือเทียมส่วนใหญ่ แรงจับของมือเทียมในงานวิจัยอื่นและมือเทียมในท้องตลาดดังรูปที่ 2.17 มีค่าเฉลี่ยประมาณ 28.9 นิวตัน



รูปที่ 2.17 กราฟเปรียบเทียบแรงจับและจำนวนตัวขับเคลื่อนของมือเทียมในงานวิจัยอื่นและในท้องตลาด [14]

## 2.4 กลไกนิ้วมือเทียมในปัจจุบัน

มือเทียมในปัจจุบันมีการออกแบบที่แตกต่างกันในหลายด้านเช่น ตัวขับเคลื่อน, แหล่งพลังงาน, ระบบส่งกำลัง, วัสดุ, และรูปร่าง แต่ส่วนที่มีความคล้ายคลึงกันในมือเทียมส่วนใหญ่คือรูปแบบการเคลื่อนไหวของนิ้วมือ กลไกนิ้วมือของมือเทียมในท้องตลาดใช้กลไกพื้นฐานเป็นส่วนใหญ่ ดังรูปที่ 2.18 i-Limb hand มีกลไกนิ้วมือเป็น Linkage จำนวน 2 ชั้นเชื่อมต่อกันด้วยข้อต่อแบบหมุน (Revolute joint) ใช้การดึงเส้นลวดภายในนิ้วมือผ่านเพลลาภายในเพื่อให้นิ้วมืองอมาจับวัตถุ, Bebionic hand มีกลไกนิ้วมือเป็น 4-Bar linkage เชื่อมต่อกันด้วยข้อต่อแบบหมุน ใช้สกรู (Lead screw) ในการดึงนิ้วมือ, และ Michelangelo hand มีกลไกนิ้วมือเป็น Linkage จำนวน 1 ชั้นเชื่อมต่อกับโครงสร้างมือด้วยข้อต่อแบบหมุน ใช้การขับเคลื่อนผ่านกลไกภายในมือเพื่อดึงนิ้วมือให้งอเข้ามาจับวัตถุ [14]

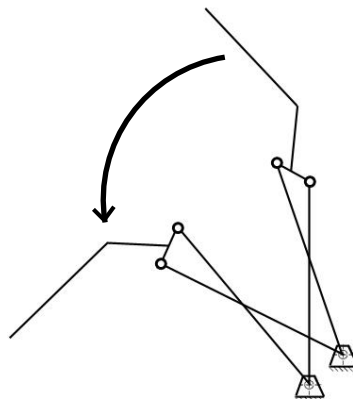


รูปที่ 2.18 กลไกนิ้วมือของมือเทียมในท้องตลาด [14]

(a) i-Limb hand (b) Bebionic hand (c) Michelangelo hand

เนื่องจากเป้าหมายหลักในการออกแบบมือเทียมคือ “มือเทียมควรมีความสามารถในการจับวัตถุได้ด้วยกลไกที่ง่ายและให้การเคลื่อนไหวที่ดูเป็นธรรมชาติ” การเคลื่อนไหวของนิ้วมือโดยการหมุนรอบจุดหมุนเพียงจุดเดียว (Hinge joint) ดังรูปที่ 2.18 (c) จึงไม่เป็นที่นิยมเนื่องจากดูไม่เป็นธรรมชาติ เพื่อให้เกิดการเคลื่อนที่ของนิ้วมือที่ไม่ซับซ้อนและดูเป็นธรรมชาติผู้ออกแบบมักใช้กลไก Four-bar mechanism ดังรูปที่ 2.18 (b) ซึ่งเป็นกลไกที่ไม่ซับซ้อนมากและมีใช้ทั่วไปแต่สามารถให้การเคลื่อนไหวทั้งการเลื่อน (Translation) และการหมุน (Rotation) ได้ กลไกนิ้วมือแบบ Four-bar

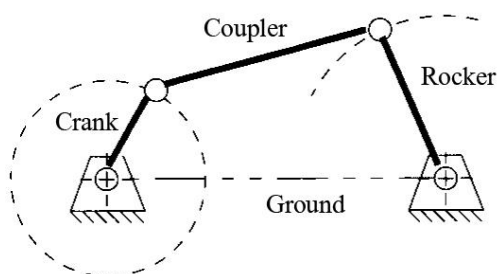
mechanism มีแผนภาพจลนศาสตร์ (Kinematic diagram) ดังรูปที่ 2.19 ปลายนิ้วมือเป็นชิ้นส่วนคัปเปิลเลอร์ (Coupler) ของกลไกจึงสามารถหมุนและเลื่อนได้พร้อมๆกัน



รูปที่ 2.19 แผนภาพจลนศาสตร์ของกลไกนิ้วมือแบบ Four-bar mechanism

## 2.5 กลไก Four-bar mechanism และคุณลักษณะที่สำคัญ

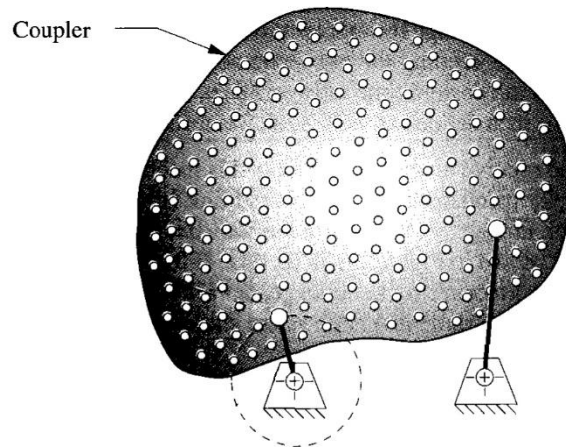
กลไก Four-bar mechanism เป็นกลไกพื้นฐานที่ถูกนำมาใช้ในเครื่องจักรหรืออุปกรณ์ทางกลมาเป็นเวลานาน เนื่องจากสามารถนำมาสร้างการเคลื่อนที่หลายรูปแบบจากการเคลื่อนที่แบบหมุนได้ กลไก Four-bar mechanism มีลักษณะดังรูปที่ 2.20 ประกอบด้วยชิ้นส่วน 4 ชิ้นคือ ชิ้นส่วนข้อเหวี่ยง (Crank Link) มีการเคลื่อนที่แบบหมุนรอบจุดหมุน มักใช้รับการเคลื่อนที่ขาเข้า (Input motion) สำหรับขับเคลื่อนกลไก, ชิ้นส่วนคัปเปิลเลอร์ (Coupler link) มีการเคลื่อนที่ทั้งแบบเลื่อนและแบบหมุน มักใช้สำหรับการสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่รูปร่างต่างๆ, ชิ้นส่วนรอกเกอร์ (Rocker link) มีการเคลื่อนที่แบบหมุนรอบจุดหมุน [19] มักใช้สร้างการเคลื่อนที่แบบไปกลับ, และชิ้นส่วนพื้น (Ground link) เป็นชิ้นส่วนที่อยู่นิ่งเทียบกับระบบของกลไก กลไก Four-bar mechanism มีคุณลักษณะต่างๆที่สำคัญและสามารถนำมาใช้สร้างกลไกที่ซับซ้อนขึ้นไปได้



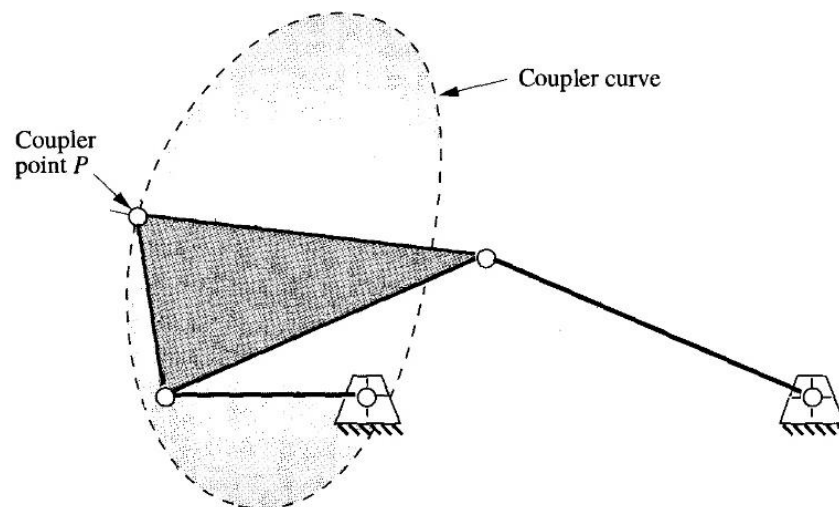
รูปที่ 2.20 กลไก Four-bar mechanism

### 2.5.1 เส้นคัปเปิลเลอร์ (Coupler curve)

ชิ้นส่วนคัปเปิลเลอร์ (Coupler link) เป็นชิ้นส่วนใน Four-bar mechanism ดังรูปที่ 2.20 ที่สามารถเคลื่อนที่ได้ทั้งแบบเลื่อนและหมุนจึงเป็นชิ้นส่วนที่น่าสนใจและถูกนำมาใช้งานมากที่สุด จุดคัปเปิลเลอร์ (Coupler point) สามารถนำมาสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่ที่มีความซับซ้อนได้ โดยจุดคัปเปิลเลอร์นี้สามารถเป็นจุดใดๆบนชิ้นส่วนคัปเปิลเลอร์ซึ่งสามารถขยายไปอย่างไม่จำกัดในระนาบของชิ้นส่วนคัปเปิลเลอร์ดังรูปที่ 2.21 จุดคัปเปิลเลอร์เหล่านี้สามารถนำมาสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่ได้ เรียกว่าเส้นคัปเปิลเลอร์ (Coupler curve) ซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 2.22 โดยเส้นคัปเปิลเลอร์ของกลไก Four-bar mechanism ที่มีข้อต่อแบบจุดหมุนทั้งหมดสามารถมีอันดับสูงสุดได้ถึงสมการยกกำลังหก [19]

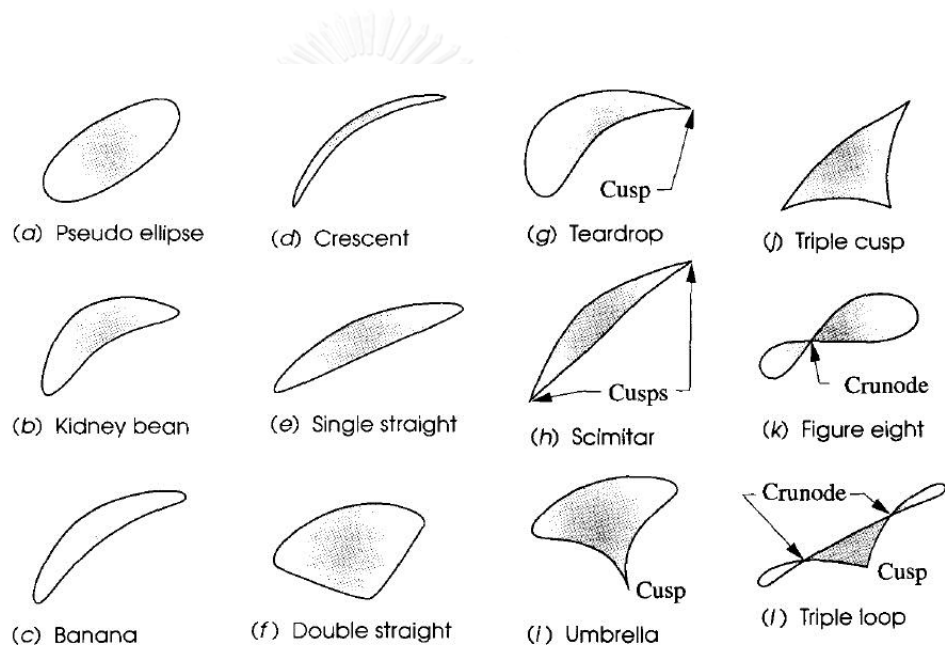


รูปที่ 2.21 จุดคัปเปิลเลอร์ซึ่งสามารถเป็นจุดใดๆในระนาบเดียวกับชิ้นส่วนคัปเปิลเลอร์ [19]



รูปที่ 2.22 เส้นคัปเปิลเลอร์ของกลไก Four-bar mechanism

เส้นคัปเปิลเลอร์สามารถมีรูปร่างหลากหลายตามขนาดของกลไก โดยจุดที่สำคัญของเส้นคัปเปิลเลอร์มี 2 ชนิดคือจุด Cusp และ Crunode ซึ่งเป็นจุดที่ถูกนำมาใช้งานบ่อยเนื่องจากเป็นจุดตัดระหว่างเส้นสองเส้น รูปร่างต่างๆของเส้นคัปเปิลเลอร์มีตัวอย่างดังรูปที่ 2.23 โดยรูปที่ 2.23 (a) – รูปที่ 2.23 (f) เป็นเส้นคัปเปิลเลอร์ที่ไม่มีจุด Cusp และ Crunode มีการเปลี่ยนแปลงทิศทางการเคลื่อนที่อย่างราบรื่น รูปที่ 2.23 (g) – รูปที่ 2.23 (j) เป็นเส้นคัปเปิลเลอร์ที่มีจุด Cusp คือจุดที่เกิดการเปลี่ยนแปลงทิศทางการเคลื่อนที่อย่างกะทันหันทำให้เกิดจังหวะที่ความเร็วเป็นศูนย์ มักใช้ในกลไกสำหรับการขนส่ง, การแสดมภ์, หรือสายพาน รูปที่ 2.23 (k) เป็นเส้นคัปเปิลเลอร์ที่มีจุด Crunode คือจุดที่เกิดการรวมมาตัดกันของเส้นคัปเปิลเลอร์ทำให้เกิดจุดที่มีตำแหน่งเดียวกันแต่มีความเร็วต่างกันและความเร็วไม่เป็นศูนย์ และรูปที่ 2.23 (l) เป็นเส้นคัปเปิลเลอร์ที่มีทั้งจุด Cusp และ Crunode ภายในเส้นเดียว

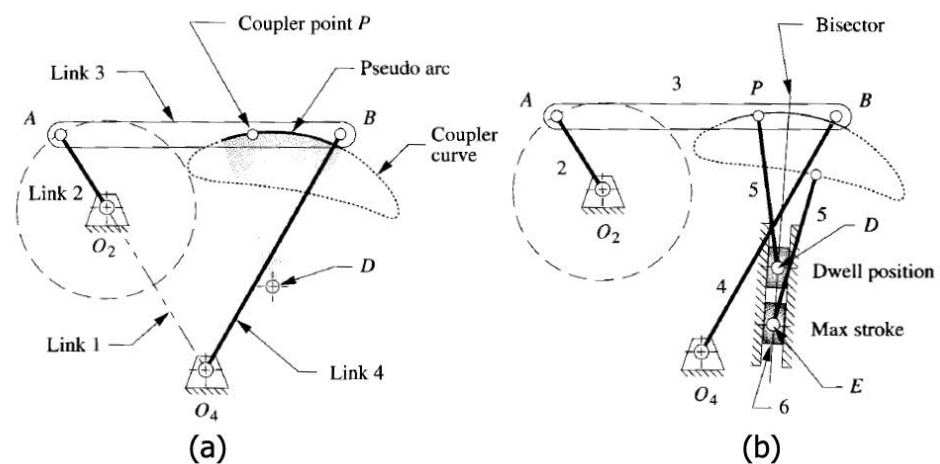


รูปที่ 2.23 รูปแบบต่างๆของเส้นคัปเปิลเลอร์ [19]

รูปร่างของเส้นคัปเปิลเลอร์จะเปลี่ยนแปลงไปตามลักษณะของกลไก การออกแบบกลไกสำหรับนำเส้นคัปเปิลเลอร์ไปใช้งานจึงต้องคำนึงถึงตัวแปรต่างๆของกลไกเช่นขนาดและมุมของชิ้นส่วนต่างๆสำหรับกลไก Four-bar mechanism ที่มีข้อต่อแบบหมุนทั้งหมดดังรูปที่ 2.22 จะมีตัวแปรห้าค่าที่ส่งผลต่อลักษณะของเส้นคัปเปิลเลอร์ คือ อัตราส่วนความยาวของแต่ละชิ้นส่วนและตำแหน่งจุดที่ใช้สร้างเส้นคัปเปิลเลอร์ [19]

### 2.5.2 กลไกหน่วง (Dwell mechanism)

กลไกหน่วงเป็นกลไกที่มีพื้นฐานจากกลไก Four-bar mechanism ใช้สำหรับสร้างรูปแบบการเคลื่อนที่ที่มีการหยุดนิ่งในช่วงเวลาหนึ่ง กล่าวคือ เป็นกลไกที่สามารถทำให้การเคลื่อนที่ขาออก (Output motion) เป็นศูนย์ในช่วงเวลาหนึ่งในขณะที่การเคลื่อนที่ขาเข้า (Input motion) ยังคงมีค่าใดๆอยู่ มักใช้ในกลไกที่ต้องใช้การรอ เช่น การลำเลียงวัตถุเข้าไปยังเครื่องจักรแล้วรอให้เครื่องจักรทำงานเสร็จจึงลำเลียงวัตถุออกมา การออกแบบกลไกหน่วงมีหลักการดังรูปที่ 2.24 (a) ทำการสร้างกลไก Four-bar mechanism ที่มีเส้นคัมป์เพลอร์ลักษณะโค้งโดยกำหนดให้ส่วนของเส้นโค้ง (Pseudo arc) มีจุดศูนย์กลางความโค้งของที่ตำแหน่ง D ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ต้องการให้กลไกเกิดการหน่วง ทำการสร้างกลไกเพิ่มเติมดังรูปที่ 2.24 (b) โดยเชื่อมต่อจุดคัมป์เพลอร์เข้ากับชิ้นส่วนที่อยู่บนข้อต่อแบบเลื่อน (Prismatic joint) เมื่อกลไกเคลื่อนที่ผ่านส่วนของเส้นโค้งนี้ ข้อต่อแบบเลื่อนจะหยุดอยู่ที่ตำแหน่ง D และเริ่มเคลื่อนที่อีกครั้งเมื่อกลไกผ่านส่วนของเส้นโค้งไป



รูปที่ 2.24 การสร้างกลไกหน่วง (a) เส้นคัมป์เพลอร์จากกลไก Four-bar mechanism สำหรับสร้างกลไกหน่วง (b) กลไกหน่วง (Dwell mechanism) ในกลไกแบบ Slider crank [19]

กลไกหน่วงมีลักษณะคล้ายการใช้ลูกเบี้ยว (Cam) ซึ่งลูกเบี้ยวมีข้อดีคือสามารถออกแบบได้ง่ายแต่เกิดการสึกหรอง่ายและค่าใช้จ่ายสูง กลไกหน่วงแบบใช้เพียงชิ้นส่วนเชื่อมต่อ (Linkage) และข้อต่อ (Joint) นั้นออกแบบยากกว่ามากแต่ผลิตง่ายและแข็งแรงจึงมีความคุ้มค่าในการออกแบบ

เนื่องจากการออกแบบมือเทียมนี้ต้องการให้มือเทียมผลิตได้ง่าย ใช้ตัวขับเคลื่อนน้อยแต่มีรูปแบบการเคลื่อนไหวพอเพียงในการใช้งาน กลไกหน่วงซึ่งสามารถทำให้การเคลื่อนที่หยุดขงหนึ่ง จึงถูกนำมาใช้ออกแบบมือเทียมของงานวิจัยนี้

### บทที่ 3

## แนวคิดหลักและขั้นตอนในการออกแบบเบื้องต้น (Conceptual design and Elementary design)

### 3.1 แนวคิดในการออกแบบมือเทียม (Conceptual design)

#### 3.1.1 ชนิดของมือเทียมที่เลือกออกแบบ

เลือกออกแบบและผลิตมือเทียมแบบใช้ไฟฟ้า สาเหตุที่เลือกคือ ผู้พิการสามารถควบคุมมือเทียมแบบใช้ไฟฟ้าได้โดยไม่ต้องออกแรงมาก มือเทียมแบบใช้ไฟฟ้าสามารถเคลื่อนไหวได้ใกล้เคียงมือมนุษย์มากกว่ามือเทียมแบบใช้การเคลื่อนไหวร่างกายเนื่องจากมีหลายองศาอิสระและมือเทียมแบบใช้ไฟฟ้าสามารถควบคุมการเคลื่อนไหวได้ด้วยระบบควบคุม (Controller) เลือกซื้อมอเตอร์ไฟฟ้า, ระบบทดกำลัง, และระบบควบคุมจากท้องตลาดเนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่มีอยู่ทั่วไปและมีประสิทธิภาพสูง ไม่ออกแบบกลไกข้อมือและอุปกรณ์ตรวจจับคลื่นไฟฟ้ากล้ามเนื้อ (EMG) เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่แยกส่วนออกจากกลไกมือเทียม จึงสามารถออกแบบในภายหลังต่อไป

#### 3.1.2 แนวคิดหลักในการออกแบบกลไกมือเทียม

แนวคิดหลักในการออกแบบมือเทียมแบ่งออกเป็นหัวข้อต่างๆดังนี้

1. ออกแบบโดยใช้กลไกที่ง่ายและมีประสิทธิภาพ
2. มีรูปแบบการเคลื่อนไหวเพียงพอต่อการใช้งานในชีวิตประจำวันโดยใช้ตัวขับเคลื่อนน้อยที่สุด
3. มีแรงจذبวัตถุเพียงพอต่อการใช้งานในชีวิตประจำวัน
4. กลไกมือเทียมควรจะง่ายต่อการผลิต บำรุงรักษา และมีอายุการใช้งานนาน

จากการศึกษาการเคลื่อนไหวของมือในหัวข้อ 2.1.3 พบว่าการเคลื่อนไหวทำจับแบบแม่นยำ (Precision grip) และทำจับแบบกำมือ (Power grip) นั้นมีลักษณะคล้ายกัน โดยแตกต่างกันที่ความเร็วในการงอของนิ้วโป้ง หากนิ้วมือ (นิ้วชี้ถึงนิ้วก้อย) งอเข้ามาพร้อมกับนิ้วโป้งจะทำให้เกิดทำจับแบบแม่นยำดังรูปที่ 3.1 (a) และหากนิ้วโป้งเกิดการหมุนงอเพื่อรอให้นิ้วมืองอเข้ามาก่อนจะทำให้เกิดทำจับแบบกำมือนั้นดังรูปที่ 3.1 (b) โดยทำจับแบบแม่นยำสามารถนำไปใช้งานได้สองแบบ (ทำสามจับและทำจิกปลายนิ้ว) ทำจับแบบกำมือสามารถนำไปใช้งานได้สามแบบ (ทำตะขอ, ทำจับทรงกลม, และทำจับทรงกระบอก)



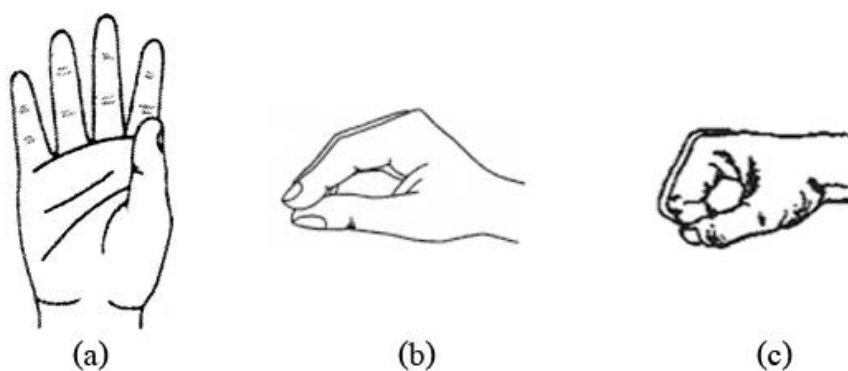
รูปที่ 3.1 การเคลื่อนที่ของนิ้วมือในท่าจับต่างๆ

(a) ท่าจับแบบแม่นยำ (Precision grip) เกิดจากการงอนิ้วมือพร้อมกับนิ้วโป้ง

(b) ท่ากำมือ (Power grip) เกิดจากการงอนิ้วมือโดยห้วงนิ้วโป้งไว้

มือเทียมโดยปกติมีท่าในตำแหน่งเริ่มต้นคือท่าแบมือ (Open hand) ซึ่งใช้ในการถือวัตถุ ลักษณะแบนเช่นจานหรือชามได้ และหากทำการหมุนนิ้วโป้งไปยังด้านข้างของนิ้วมือจากท่าแบมือ มือเทียมจะสามารถทำท่าจับแบบด้านข้างได้ท่าแบมือจึงเป็นอีกท่าที่สำคัญทั้งในด้านการใช้งานและการนำไปพัฒนามือเทียมต่อไปในอนาคต

การออกแบบมือเทียมจึงเลือกออกแบบมือเทียมให้สามารถเคลื่อนไหวท่าจับได้ทั้งหมดสามตำแหน่งคือ ท่าแบมือ, ท่าจับแบบแม่นยำ, และท่าจับแบบกำมืองดรูปที่ 3.2 หากมือเทียมสามารถเคลื่อนไหวท่าจับแบบแม่นยำดังรูปที่ 3.2 (b) และท่าจับแบบกำมืองดรูปที่ 3.2 (c) ได้จะครอบคลุมการใช้งานในชีวิตประจำวันได้ประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์ดังหัวข้อ 2.1.3 [8, 9] โดยท่าจับด้านข้างซึ่งใช้สำหรับจับวัตถุแผ่นบางนั้นมีความจำเป็นในการใช้งานน้อยกว่าท่าจับแบบแม่นยำซึ่งใช้งานบ่อยที่สุด และท่ากำมือซึ่งใช้สำหรับจับวัตถุให้มั่นคง ท่าจับด้านข้างจึงไม่ถูกนำมาเป็นเป้าหมายในการออกแบบเพื่อลดความซับซ้อนของกลไก

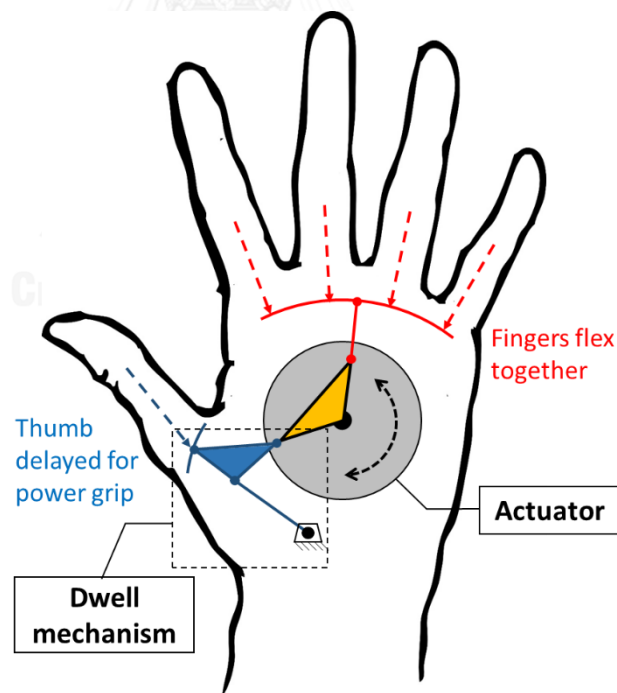


รูปที่ 3.2 เป้าหมายในการออกแบบมือเทียม (a) ท่าแบมือ (Open hand), (b) ท่าจับแบบแม่นยำ (Precision grip), (c) ท่าจับแบบกำมือ (Power grip)



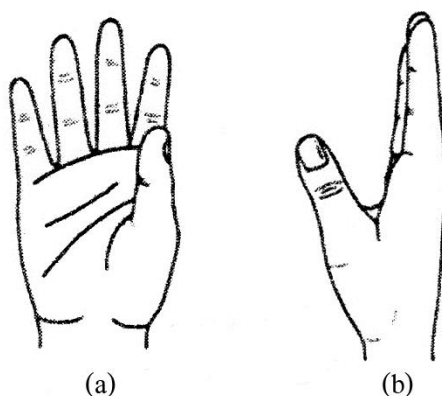
เพื่อให้มือเทียมมีแรงจับสูง จากหัวข้อ 2.3.4 แรงจับของมือเทียมมักแปรผกผันกับจำนวนตัวขับเคลื่อน (Actuator) ในมือเทียมเนื่องจากตัวขับเคลื่อนต้องมีขนาดเล็กลงเมื่อใช้จำนวนมากขึ้น เพื่อให้ประกอบภายในพื้นที่จำกัดของมือเทียมได้ ส่งผลให้ตัวขับเคลื่อนมีกำลังขับน้อยลง หากสามารถใช้ตัวขับเคลื่อนจำนวนน้อยที่สุดในการเคลื่อนที่มือเทียมไปยังตำแหน่งทั้ง 3 ได้ มือเทียมจะมีแนวโน้มให้แรงจับได้สูงขึ้นและยังคงความสามารถในการทำงานที่พอเพียง

การออกแบบกลไกโดยใช้ตัวขับเคลื่อนน้อยที่สุดในการควบคุมการเคลื่อนไหวทั้ง 3 ตำแหน่งนี้มีแนวคิดที่ว่า หากสามารถใช้ทิศทางการหมุนของตัวขับเคลื่อนในการกำหนดท่าของมือเทียมได้ มือเทียมจะสามารถเคลื่อนที่เป็นท่าที่ต้องการได้โดยใช้ตัวขับเคลื่อนหนึ่งตัว กล่าวคือ เมื่อตัวขับเคลื่อนอยู่ในตำแหน่งเริ่มต้น มือเทียมจะอยู่ในตำแหน่งท่าแบ่มือ, เมื่อตัวขับเคลื่อนหมุนทิศทวนเข็มนาฬิกา มือเทียมจะเคลื่อนไหวเป็นท่าจับแบบแน่นยำ, และเมื่อตัวขับเคลื่อนหมุนทิศตามเข็มนาฬิกา มือเทียมจะเคลื่อนที่เป็นท่าจับแบบกำมือโดยการหมุนวงให้นิ้วโป้งงอข้างลง ดังรูปที่ 3.3 กลไกนิ้วมือทั้งสี่ถูกออกแบบให้เคลื่อนที่ไปด้วยกันเพื่อลดความซับซ้อน กลไกนิ้วโป้งถูกแยกจากกลไกนิ้วมือทั้งสี่และขับเคลื่อนด้วยกลไกทวนวงเพื่อให้เคลื่อนที่เป็นท่าจับแบบกำมือได้ ซึ่งกลไกการทวนวงนี้สามารถออกแบบได้ด้วยหลักการกลไกทวนวงและเส้นคัปเปิลอร์ดังหัวข้อ 2.5.1 และ 2.5.2



รูปที่ 3.3 แนวคิดการออกแบบโดยใช้ทิศทางการหมุนของตัวขับเคลื่อนกำหนดลักษณะการเคลื่อนไหวไปยังตำแหน่งเป้าหมายทั้งสามตำแหน่ง

สำหรับนิ้วโป้งซึ่งมีการเคลื่อนไหวแตกต่างจากนิ้วมือทั้งสี่ หากกำหนดให้นิ้วโป้งมีระนาบของการเคลื่อนที่อนันต์ขนานกับระนาบการเคลื่อนที่อนันต์ทั้งสี่ และกำหนดตำแหน่งของระนาบอยู่กึ่งกลางระหว่างนิ้วชี้และนิ้วกลางดังรูปที่ 3.4 จะสามารถลดความซับซ้อนของกลไกให้เหลือสองระนาบที่ตั้งฉากกัน คือ ระนาบตั้งฉากกับฝ่ามือดังรูปที่ 3.4 (a) ใช้สำหรับออกแบบกลไกขับเคลื่อนนิ้วมือ และระนาบตั้งฉากกับด้านข้างของฝ่ามือดังรูปที่ 3.4 (b) ใช้สำหรับออกแบบกลไกนิ้วมือ การกำหนดตำแหน่งและทิศของระนาบนิ้วโป้งนี้ มือเทียมยังสามารถเคลื่อนไหวเป็นท่าจับแบบแม่นยำและท่าจับแบบกำมือได้ตามเป้าหมายการออกแบบ

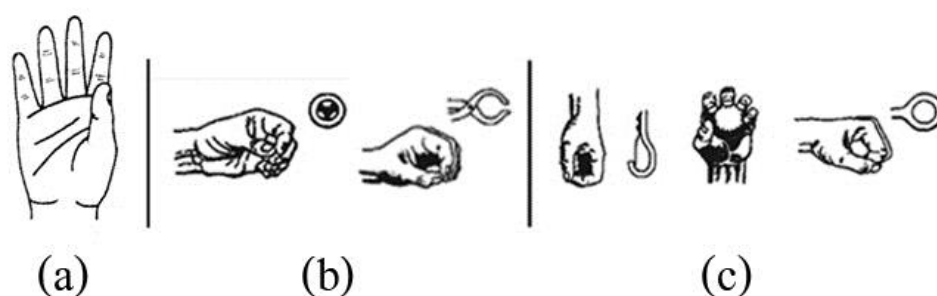


รูปที่ 3.4 นิ้วโป้งมีระนาบของการเคลื่อนที่อนันต์ขนานกับระนาบการเคลื่อนที่อนันต์ทั้งสี่ (a) มุมมองจากทิศตั้งฉากกับระนาบฝ่ามือ, (b) มุมมองจากทิศตั้งฉากกับด้านข้างของฝ่ามือ

### 3.1.3 คุณลักษณะในการออกแบบ (Design specifications)

#### 1. รูปแบบการเคลื่อนไหวของมือ

กำหนดให้มือเทียมมีรูปแบบการเคลื่อนไหว 3 แบบคือ ท่าแบมือดังรูปที่ 3.5 (a) สำหรับใช้เป็นตำแหน่งเริ่มต้น, ท่าจับแบบแม่นยำดังรูปที่ 3.5 (b) สำหรับใช้งานเป็นท่าสามจับและท่าจับปลายนิ้ว, และท่าจับแบบกำมืองดังรูปที่ 3.5 (c) สำหรับใช้งานเป็นท่าตะขอ, ท่าจับทรงกลม, และท่าจับทรงกระบอก รูปแบบการเคลื่อนไหวทั้ง 3 รูปแบบนี้ครอบคลุมการใช้งานในชีวิตประจำวันได้ประมาณ 70 %



รูปที่ 3.5 รูปแบบการเคลื่อนไหวและการใช้งานมือเทียมที่เป็นเป้าหมายการออกแบบ  
(a) ท่าแบมือ, (b) ท่าจับแบบแม่นยำ, (c) ท่าจับแบบกำมือ

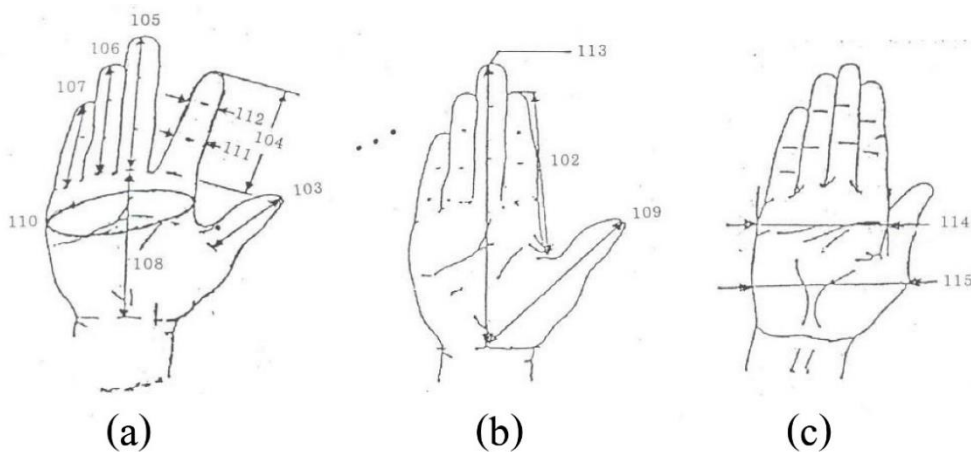
#### 2. แรงจับวัตถุ

เนื่องจากความสามารถในการจับยึดวัตถุขึ้นอยู่กับแรงจับและสัมประสิทธิ์ความเสียดทานระหว่างนิ้วมือและวัตถุ แรงที่เหมาะสมจึงแตกต่างกันไปตามวัตถุแต่ละชนิด งานวิจัยนี้มีเป้าหมายการออกแบบให้มือเทียมสามารถออกแรงจับวัตถุในท่าจับแบบแม่นยำและออกแรงยกวัตถุในท่าจับแบบกำมือได้เพียงพอต่อการใช้งานในชีวิตประจำวัน โดยทำการอ้างอิงและเปรียบเทียบกับมือเทียมในงานวิจัยอื่นและในท้องตลาด

#### 3. ขนาดของมือเทียม

มือเทียมมักจะทำให้ความรู้สึกมีขนาดใหญ่กว่าความเป็นจริง เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่มีกลไกและไม่ใช่วางกายของผู้พิการ งานวิจัยนี้เลือกออกแบบมือเทียมสำหรับคนไทยโดยใช้ข้อมูลอ้างอิงจากการสำรวจขนาดโครงสร้างร่างกายคนไทยปีพ.ศ.2543 [20] โดยใช้การวัดขนาดมือของชายไทยดังรูปที่ 3.6 มีค่าสัดส่วนต่างๆดังตารางที่ 3.1 มาเป็นแนวทางในการกำหนดขนาดมือเทียมเบื้องต้น โดยค่าสัดส่วนที่สำคัญสำหรับนำมาใช้ออกแบบคือ ความยาวนิ้วมือ (สัดส่วนลำดับที่ 103 - 107) ดังรูปที่ 3.6 (a) โดยใช้ความยาวของนิ้วกลางเป็นหลัก มีค่า 8.5 เซนติเมตร กำหนดให้นิ้วมือทั้งสี่ของมือเทียมมีขนาดเท่ากันเพื่อความสะดวกในการออกแบบ, ความยาวฝ่ามือ (สัดส่วนลำดับที่ 113) มีค่า

19.5 เซนติเมตรดังรูปที่ 3.6 (b), และความกว้างมือ (สัดส่วนลำดับที่ 115) มีค่า 9.8 เซนติเมตรดังรูปที่ 3.6 (c)



รูปที่ 3.6 ตำแหน่งการวัดขนาดมือของชายไทย [20]

- (a) ขนาดของนิ้วมือ, ฝ่ามือ, และเส้นรอบมือ, (b) ขนาดความยาวจากข้อมือไปยังปลายนิ้ว,  
(c) ขนาดความกว้างฝ่ามือ

ตารางที่ 3.1 ขนาดมือของชายไทยอายุ 17 - 49 ปี

หมายเลข	รายละเอียด	ค่าเฉลี่ย (เซนติเมตร)
102	ระยะห่างปลายนิ้วชี้-ง่ามนิ้วหัวแม่มือ	12.3
103	ความยาวนิ้วหัวแม่มือ	7.1
104	ความยาวนิ้วชี้	7.6
105	ความยาวนิ้วกลาง	8.5
106	ความยาวนิ้วนาง	7.9
107	ความยาวนิ้วก้อย	6.3
108	ระยะโคนนิ้วกลาง - กึ่งกลางโคนฝ่ามือ	11.2
109	ระยะห่างปลายนิ้วหัวแม่มือ-กึ่งกลางโคนฝ่า	14.7
110	ความยาวรอบฝ่ามือ	20.7
111	ความกว้างนิ้วชี้ (ข้อนิ้วที่ 2)	1.8
112	ความยาวนิ้วชี้ (ข้อนิ้วที่ 3)	1.6
113	ความยาวฝ่ามือ	19.5
114	ความกว้างฝ่ามือ	8.4
115	ความกว้างมือ	9.8

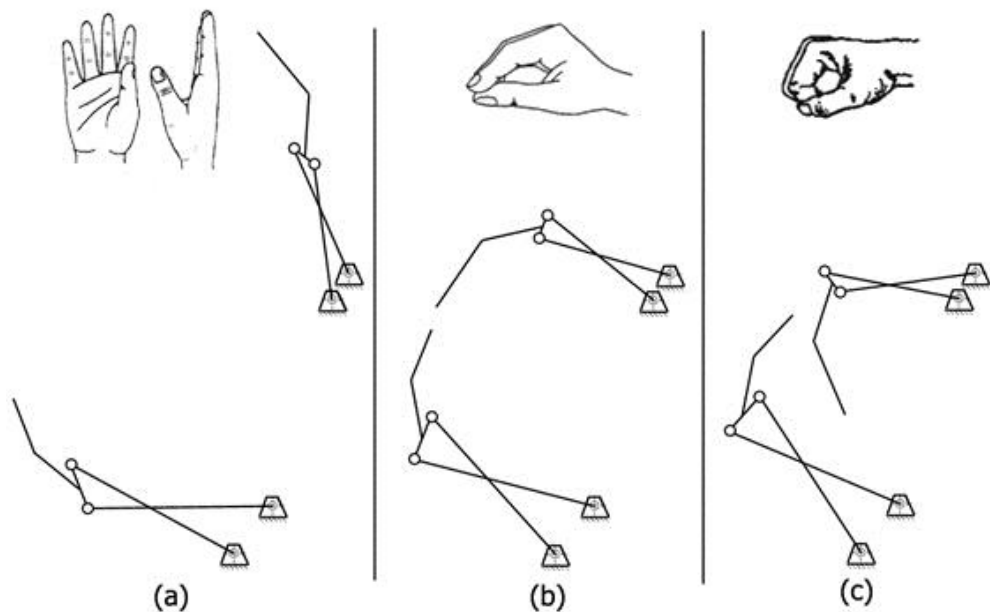
#### 4. การออกแบบเพื่อความแข็งแรง

ออกแบบให้กลไกมือเทียมมีความแข็งแรงเพียงพอกับภาระการใช้งาน ความแข็งแรงของมือเทียมขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ในการผลิต, ขนาดของกลไก, และแรงที่ส่งผ่านกลไกเพื่อใช้จับชิ้นงาน การออกแบบเพื่อความแข็งแรงจึงต้องคำนึงถึงความเค้นที่เกิดขึ้นในแต่ละชิ้นส่วนและแรงกระทำที่อาจเกิดขึ้นจากกิจกรรมในชีวิตประจำวัน

### 3.2 การออกแบบและสังเคราะห์กลไกเบื้องต้น (Elementary design)

#### 3.2.1 การสังเคราะห์กลไกนิ้วมือโดยใช้แผนภาพจลนศาสตร์

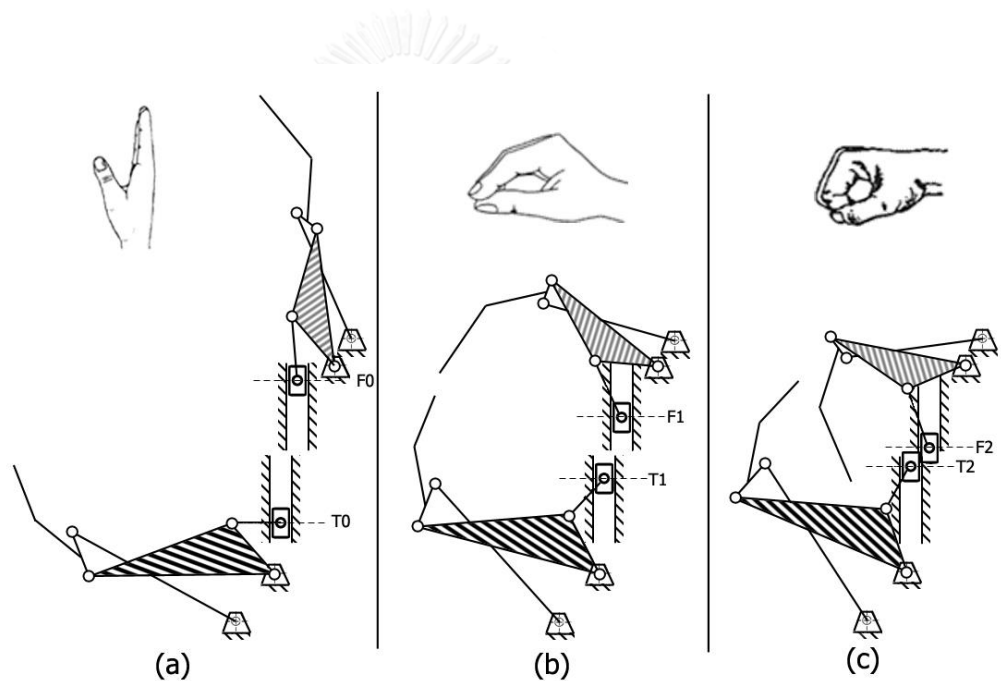
การออกแบบกลไกนิ้วมือในเบื้องต้น ใช้กลไก Four-bar mechanism อย่างง่ายดังรูปที่ 2.19 ขนาดของนิ้วมือเบื้องต้นกำหนดจากขนาดนิ้วมือของคนไทยดังหัวข้อ 3.1.3 [20] โดยกำหนดให้นิ้วชี้, นิ้วกลาง, นิ้วนาง, และนิ้วก้อยมีขนาดเท่ากันเพื่อความง่ายในการออกแบบ จากนั้นจึงออกแบบขนาดของกลไกเพื่อให้ปลายนิ้วชี้และนิ้วโป้งสามารถงอจากท่าแบมือดังรูปที่ 3.7 (a) ซึ่งเป็นตำแหน่งเริ่มต้นเข้ามาสัมผัสกันเป็นท่าจับแบบแมนยาดังรูปที่ 3.7 (b) และท่าจับแบบกำมือนำได้ดังรูปที่ 3.7 (c)



รูปที่ 3.7 กลไกนิ้วมือที่ออกแบบด้วยกลไก Four-bar mechanism

(a) ตำแหน่งท่าแบมือ, (b) ตำแหน่งท่าจับแบบแมนย้า, (c) ตำแหน่งท่าจับแบบกำมือนำ

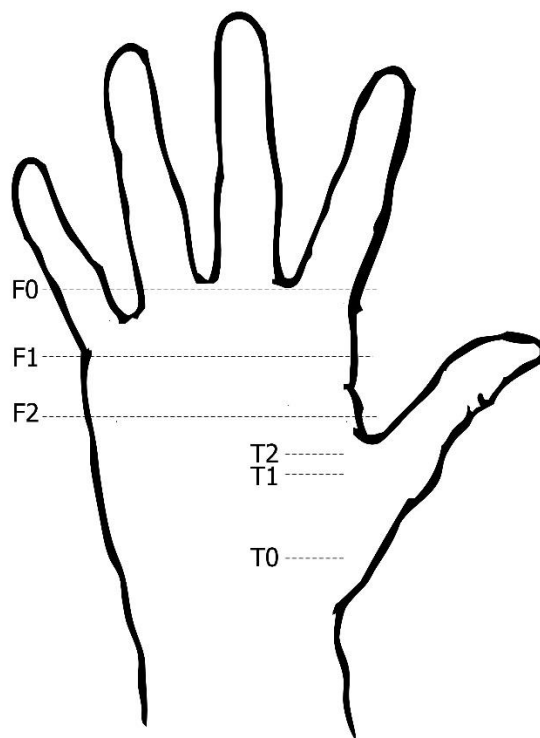
ในการออกแบบกลไกเพื่อควบคุมนิ้วมือทั้งหมดพร้อมๆกัน กลไกนิ้วมืองดรูปที่ 3.7 ใช้การขับเคลื่อนด้วยการหมุนซึ่งจะมีความยากในการออกแบบ จึงเพิ่มข้อต่อแบบเลื่อน (Prismatic joint) และรางเส้นตรง (Linear Slot) ลงบนนิ้วมือเพื่อเชื่อมต่อเข้ากับส่วนขับเคลื่อน เพื่อเปลี่ยนรูปแบบการขับเคลื่อนเป็นเส้นตรงดังรูปที่ 3.8 โดยใช้ตำแหน่งในแนวตั้งของข้อต่อแบบเลื่อนเป็นตำแหน่งเป้าหมายในการเคลื่อนที่คือ ตำแหน่ง T0 และ F0 เป็นตำแหน่งของข้อต่อแบบเลื่อนของนิ้วโป้งและนิ้วมือทั้งสองที่ตามลำดับในท่าแบมือดังรูปที่ 3.8 (a), ตำแหน่ง T1 และ F1 เป็นตำแหน่งของข้อต่อแบบเลื่อนของนิ้วโป้งและนิ้วมือทั้งสองที่ตามลำดับในท่าจับแบบแมนยาดังรูปที่ 3.8 (b), และตำแหน่ง T2 และ F2 เป็นตำแหน่งของข้อต่อแบบเลื่อนของนิ้วโป้งและนิ้วมือทั้งสองที่ตามลำดับในท่าจับแบบกำมืองดรูปที่ 3.8 (c) ตำแหน่งของข้อต่อแบบเลื่อนข้างต้นนี้ถูกนำไปใช้ในการออกแบบกลไกส่วนขับเคลื่อนมือเทียมต่อไป



รูปที่ 3.8 กลไกนิ้วมือขับเคลื่อนแบบเส้นตรงด้วยข้อต่อแบบเลื่อน (Prismatic Joint)  
 (a) ตำแหน่งท่าแบมือ, (b) ตำแหน่งท่าจับแบบแมนย้า, (c) ตำแหน่งท่าจับแบบกำมือง

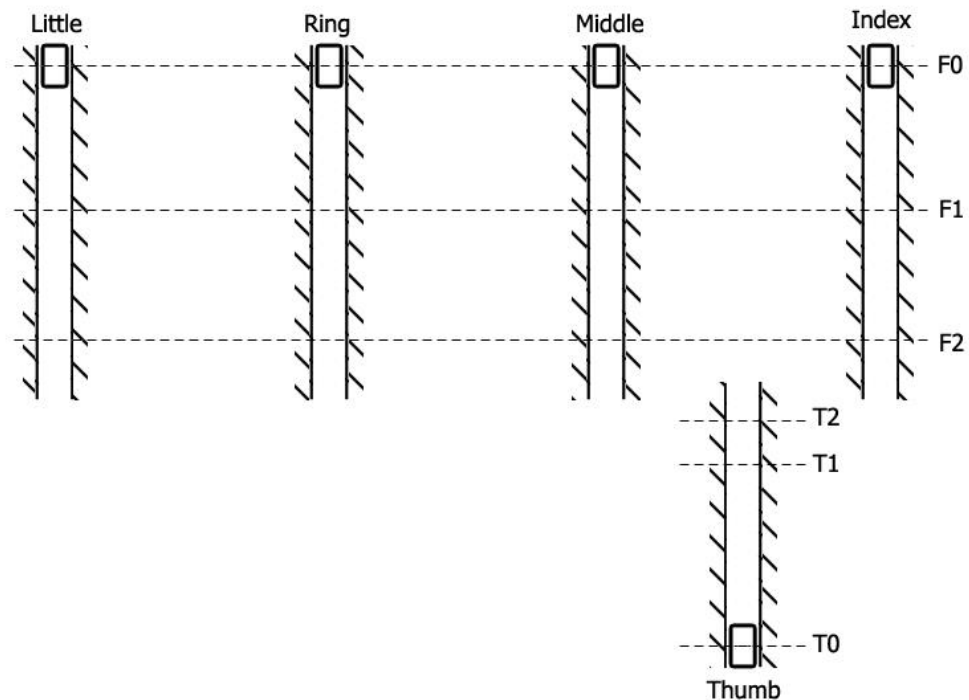
### 3.2.2 การสังเคราะห์กลไกขั้วมือเทียมโดยใช้แผนภาพจลนศาสตร์

การออกแบบกลไกขั้วมือเทียม (Transmission mechanism) นี้ มีเป้าหมายให้นิ้วชี้ถึง นิ้วก้อยมีการเคลื่อนที่เหมือนเดิมเมื่อกลไกกลับทิศทางการหมุน นิ้วโป้งมีการเคลื่อนที่เป็นปกติเมื่อ กลไกหมุนทิศทางหนึ่งและเคลื่อนที่แบบหว่งเมื่อกลไกหมุนอีกทิศทางหนึ่ง การสังเคราะห์กลไกเริ่ม จากการนำเส้นตำแหน่งของข้อต่อแบบเลื่อนในท่าต่างๆดังรูปที่ 3.8 (T0, T1, T2, F0, F1 และ F2) มา วาดลงบนระนาบฝ่ามือดังรูปที่ 3.9 โดยให้ตำแหน่ง F0, F1, และ F2 อยู่ในส่วนบนของฝ่ามือติดกับ โคนนิ้วมือทั้งสิ้น ตำแหน่ง T0, T1, และ T2 อยู่ในส่วนล่างของฝ่ามือติดกับโคนนิ้วโป้ง



รูปที่ 3.9 การวาดตำแหน่งของข้อต่อแบบเลื่อนในท่าเป้าหมายต่างๆลงบนระนาบฝ่ามือเพื่อ ออกแบบกลไกมือเทียม

เมื่อได้ตำแหน่งของข้อต่อแบบเลื่อนบนระนาบฝ่ามือแล้วจึงทำสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่ของ ข้อต่อแบบเลื่อนโดยกำหนดให้ข้อต่อของแต่ละนิ้วมีตำแหน่งตรงกับระนาบการเคลื่อนที่ของนิ้วมือนั้น ดังรูปที่ 3.10 ตำแหน่งของข้อต่อแบบเลื่อนของนิ้วโป้งอยู่กึ่งกลางระหว่างนิ้วชี้และนิ้วกลาง

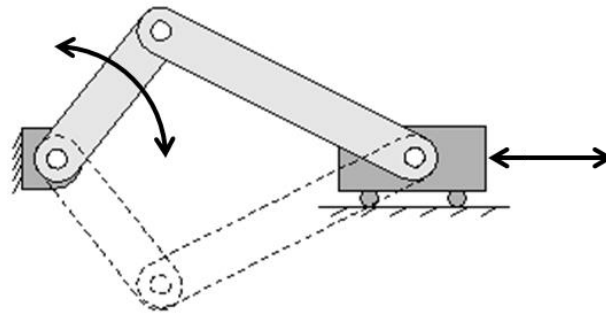


รูปที่ 3.10 ตำแหน่งและเส้นทางการเคลื่อนที่ของข้อต่อแบบเลื่อนในระนาบฝ่ามือของกลไกนิ้วมือทั้งสี่และนิ้วโป้ง

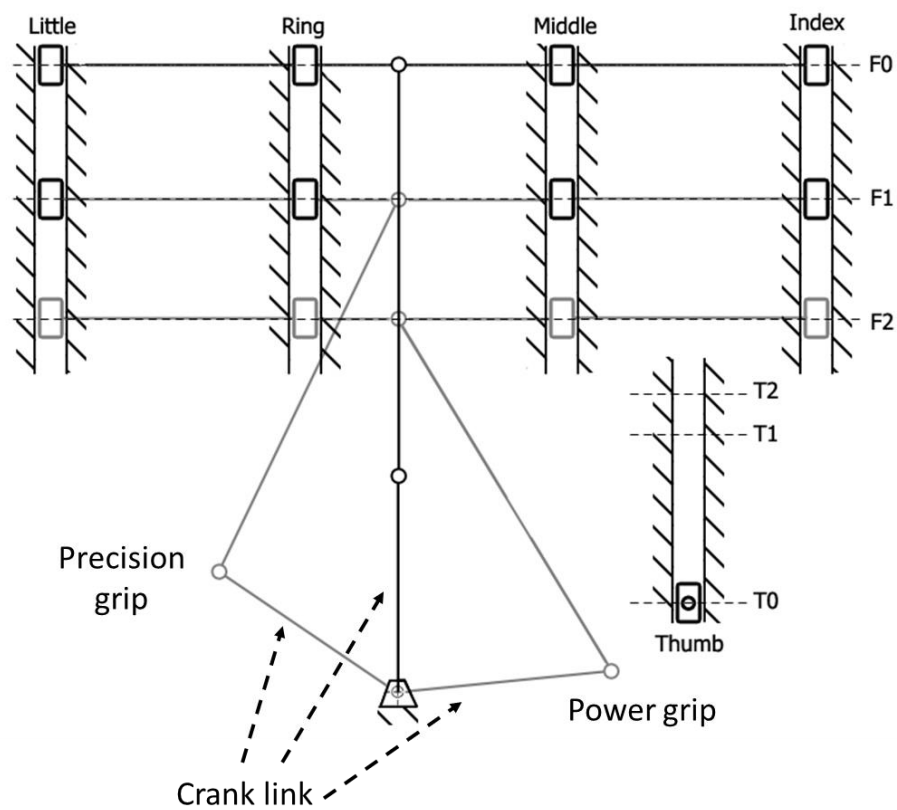
ตำแหน่งและเส้นทางการเคลื่อนที่ของข้อต่อแบบเลื่อนดังรูปที่ 3.10 สามารถนำมาสร้างกลไกขับมือเทียม (Transmission mechanism) ซึ่งใช้เชื่อมต่อระหว่างตัวขับเคลื่อนและนิ้วมือทั้งหมดได้ กลไกขับมือเทียมแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ กลไกขับเคลื่อนนิ้วมือทั้งสี่และกลไกขับเคลื่อนนิ้วโป้ง

กลไกขับเคลื่อนนิ้วมือทั้งสี่มีเป้าหมายให้มีการเคลื่อนที่ที่เหมือนกันทั้งสองทิศทางการหมุนของกลไกเพื่อให้นิ้วมือเคลื่อนที่เข้ามาด้วยความเร็วเท่ากันในทั้งท่าจับแบบแมนย่าและท่าจับแบบกำมือ กลไก Crank-slider ดังรูปที่ 3.11 ซึ่งเป็นกลไกพื้นฐานที่มีการเคลื่อนที่แบบเส้นตรงเหมือนกันทั้งสองทิศการหมุนจึงถูกนำมาใช้ในการออกแบบ กลไกขับเคลื่อนนิ้วมือมีลักษณะดังรูปที่ 3.12 มีชิ้นส่วนข้อเหวี่ยง (Crank link) อยู่ในฝ่ามือ สามารถขับเคลื่อนข้อต่อแบบเลื่อนจากตำแหน่งเริ่มต้น F0 ในท่าแบมือไปยังตำแหน่ง F1 ในท่าจับแบบแมนย่าและตำแหน่ง F2 ในท่าจับแบบกำมือได้โดยการหมุนชิ้นส่วนข้อเหวี่ยงไปในคนละทิศทาง





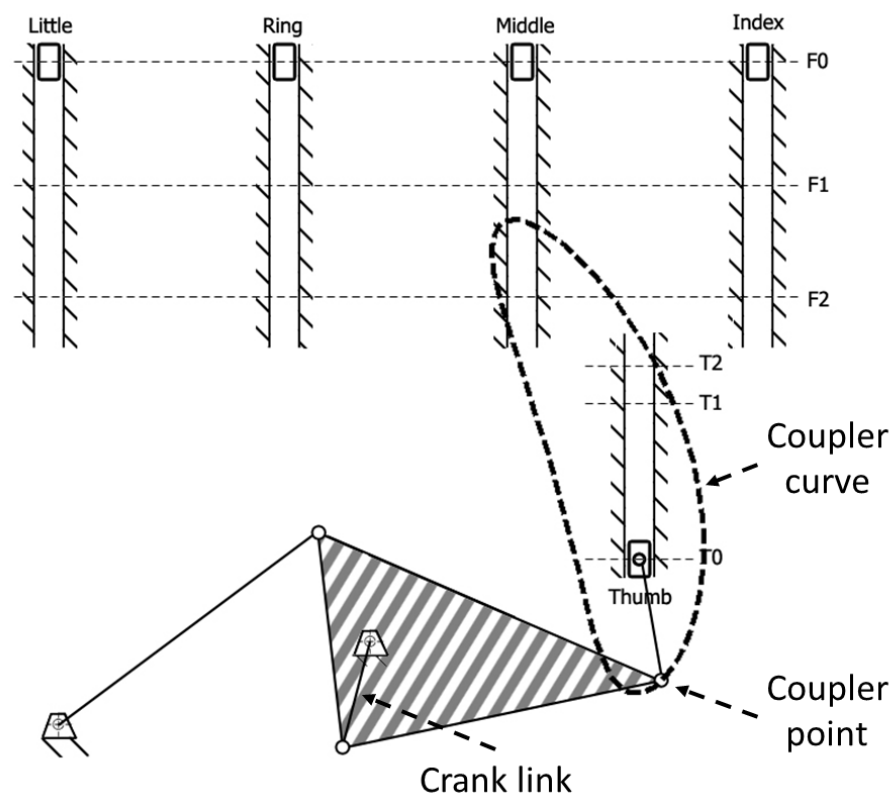
รูปที่ 3.11 กลไก Crank-slider



รูปที่ 3.12 กลไกขับเคลื่อนนิ้วมือทั้งสี่ในการออกแบบเบื้องต้น

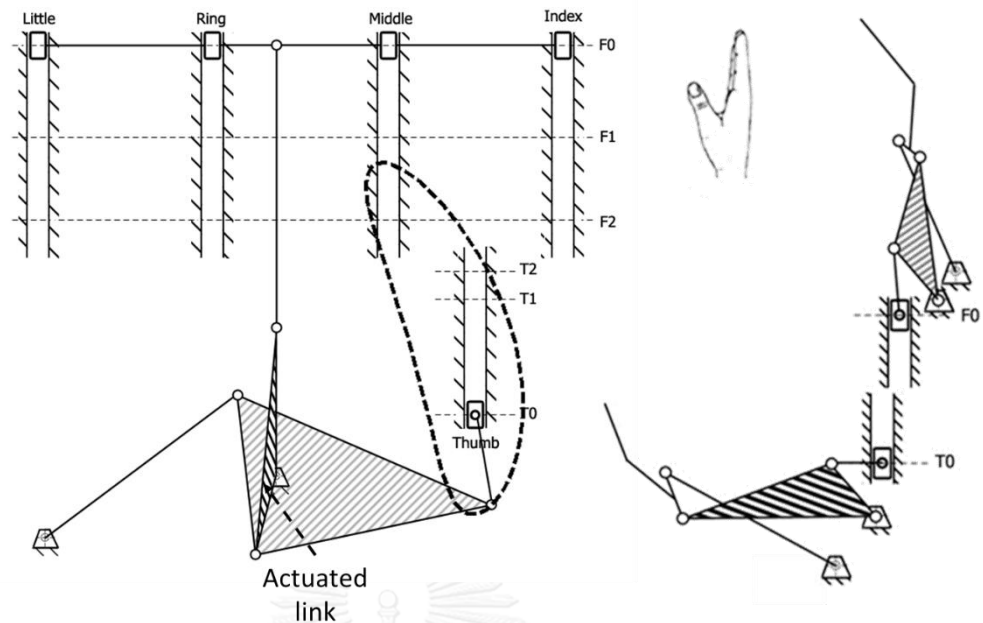
สำหรับกลไกขับเคลื่อนนิ้วโป้งมีเป้าหมายให้มีการเคลื่อนที่ต่างกันทั้งสองทิศทางการหมุนของกลไก เพื่อให้นิ้วโป้งเคลื่อนที่เข้ามาด้วยความเร็วพร้อมกับนิ้วมือทั้งสี่ในท่าจับแบบแม่นยำและเคลื่อนที่แบบมีความหน่วงเพื่อให้นิ้วมือทั้งสี่เคลื่อนที่เข้ามาก่อนในท่าจับแบบกำมือ กลไกหน่วง (Dwell mechanism) ดังหัวข้อ 2.5.2 จึงถูกนำมาใช้ในการออกแบบกลไก กลไกขับเคลื่อนนิ้วโป้งมีลักษณะดังรูปที่ 3.13 มีชิ้นส่วนข้อเหวี่ยง (Crank link) อยู่ภายในฝ่ามือซึ่งมีจุดหมุนเดียวกันกับกลไกขับเคลื่อนนิ้วมือ ข้อต่อแบบเลื่อนถูกเชื่อมต่อกับจุดคัปเปิลเลอร์ (Coupler point) ของกลไกและมีการ

เคลื่อนที่จากตำแหน่งเริ่มต้น  $T_0$  ในท่าแบมือไปยังตำแหน่ง  $T_1$  ในท่าจับแบบแมนย่ำและเคลื่อนที่แบบมีความหน่วงไปยังตำแหน่ง  $T_2$  ในท่าจับแบบกำมือได้ การสังเคราะห์กลไกขับเคลื่อนนิ้วมือและนิ้วโป่งในหัวข้อนี้จะถูกนำไปสร้างกลไกต้นแบบเพื่อดูความเป็นไปได้ของการออกแบบและปัญหาที่จะเกิดขึ้นในการออกแบบและสร้างกลไกมือเทียมจริง การกำหนดขนาดจึงทำอย่างคร่าวๆ เพื่อให้ได้การเคลื่อนที่รูปแบบที่ต้องการโดยยังไม่คำนึงถึงข้อจำกัด (Constraint) ในด้านอื่นเช่น ขนาดของตัวขับเคลื่อน, แรงบิดที่ต้องใช้, หรือพื้นที่ใช้งานของกลไก โดยกลไกมือเทียมจริงจะถูกสังเคราะห์อย่างละเอียดในบทที่ 4 ถัดไป



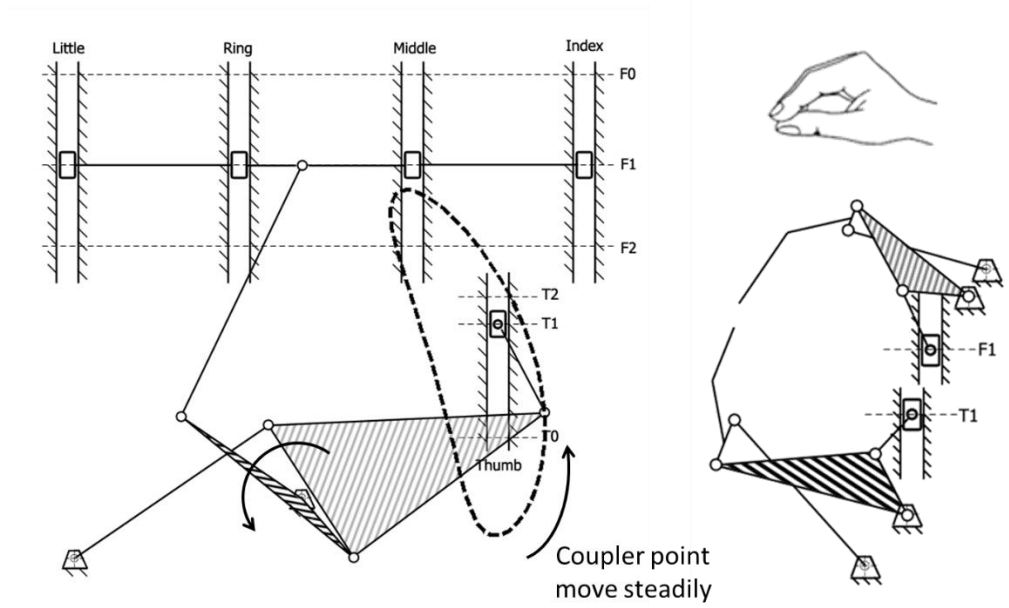
รูปที่ 3.13 กลไกขับเคลื่อนนิ้วโป่งในการออกแบบเบื้องต้น

กลไกขับเคลื่อนมือเทียมเบื้องต้นประกอบด้วยกลไกขับเคลื่อนนิ้วมือและกลไกขับเคลื่อนนิ้วโป่ง โดยชิ้นส่วนข้อเหวี่ยง (Crank link) ของทั้งสองกลไกมีจุดหมุนร่วมกันดังรูปที่ 3.14 ชิ้นส่วนข้อเหวี่ยงเชื่อมติดเป็นชิ้นเดียวกันและทำมุมกันเพื่อให้ข้อต่อแบบเลื่อนของนิ้วมือและนิ้วโป่งอยู่ในตำแหน่ง  $F_0$  และ  $T_0$  พอดีในท่าแบมือ เรียกชิ้นส่วนที่เกิดจากการรวมกันของชิ้นส่วนข้อเหวี่ยงทั้งสองนี้ว่า ชิ้นส่วนขับเคลื่อน (Actuated link) เส้นคัปเปิลเลอร์ของกลไกขับเคลื่อนนิ้วโป่งมีลักษณะโค้งออกจากข้อต่อแบบเลื่อนเพื่อให้เกิดการเคลื่อนที่ที่ต่างๆเมื่อกลไกเปลี่ยนทิศการหมุน

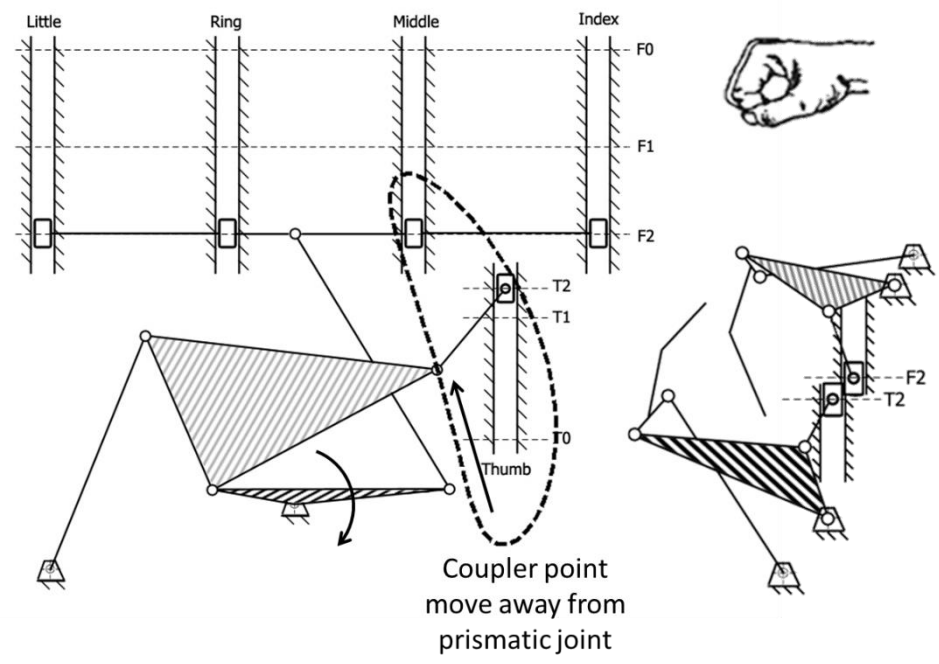


รูปที่ 3.14 กลไกขับเคลื่อนมือเทียมเบื้องต้น ณ ตำแหน่งท่าแบมือ (ตำแหน่งเริ่มต้น)

เมื่อขึ้นส่วนขับเคลื่อนของกลไกขับเคลื่อนมือเทียมหมุนทวนเข็มนาฬิกาเพื่อทำท่าจับแบบแม่นยำดังรูปที่ 3.15 ข้อต่อแบบเลื่อนของนิ้วมือทั้งสี่จะเคลื่อนที่มายู่บนตำแหน่ง F1 ข้อต่อแบบเลื่อนของนิ้วโป้งจะถูกขับเคลื่อนด้วยจุดค้ำแปลอร์ให้เคลื่อนที่มายู่บนตำแหน่ง T1 และเมื่อขึ้นส่วนขับเคลื่อนหมุนตามเข็มนาฬิกาเพื่อทำท่าจับแบบกำมืองดรูปที่ 3.16 ข้อต่อแบบเลื่อนของนิ้วมือทั้งสี่จะเคลื่อนที่มายู่บนตำแหน่ง F2 ข้อต่อแบบเลื่อนของนิ้วโป้งจะถูกขับเคลื่อนด้วยจุดค้ำแปลอร์ให้เคลื่อนที่มายู่บนตำแหน่ง T2 เส้นทางการเคลื่อนที่ของจุดค้ำแปลอร์ในท่าจับแบบกำมือนี้อาจจะห่างออกจากข้อต่อแบบเลื่อนเพื่อให้ข้อต่อเคลื่อนที่ช้ากว่าท่าจับแบบแม่นยำและทำให้เกิดความหน่วงของนิ้วโป้ง ส่งผลให้นิ้วมือทั้งสี่สามารถงอเข้ามาก่อนได้ กลไกขับเคลื่อนมือเทียมนี้จึงเป็นกลไกที่มีรูปแบบการเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งเป้าหมายสามตำแหน่งโดยใช้ตัวขับเคลื่อนเพียงหนึ่งตัว ซึ่งเป็นไปตามแนวคิดการออกแบบกลไกให้มีความสามารถในการใช้งานเพียงพอและไม่ซับซ้อน



รูปที่ 3.15 กลไกข้อมือเทียมเบื้องต้น ณ ตำแหน่งทำจับแบบแมนย่า ชิ้นส่วนขับเคลื่อนหมุนทิศทวนเข็มนาฬิกา



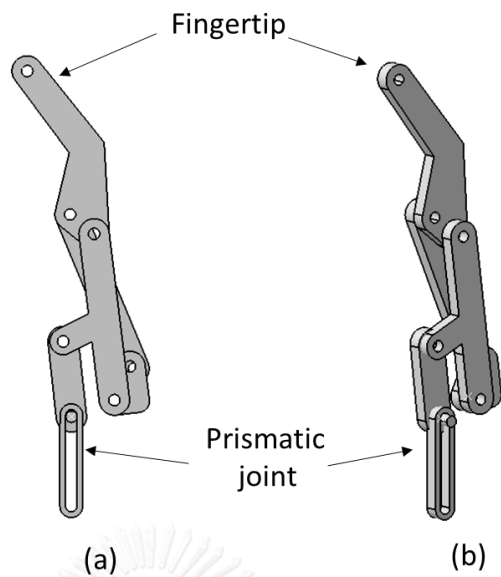
รูปที่ 3.16 กลไกข้อมือเทียมเบื้องต้น ณ ตำแหน่งทำจับแบบกำมือ ชิ้นส่วนขับเคลื่อนหมุนทิศตามเข็มนาฬิกา

### 3.2.3 การสร้างแบบจำลองสามมิติเบื้องต้น

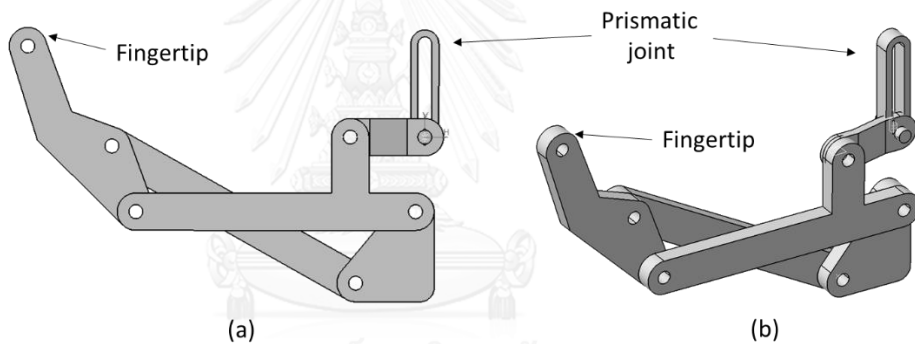
หลักการการทำงานของกลไกนิ้วมือและกลไกข้อมือเทียมดังหัวข้อ 3.2.1 และ 3.2.2 เป็นกลไกที่ถูกสังเคราะห์โดยการวิเคราะห์ด้วยแผนภาพจลนศาสตร์ (Kinematic Diagram) เท่านั้น การสร้างกลไกจริงยังต้องคำนึงถึงปัญหาต่างๆของกลไกทั้งด้านความแข็งแรง, ขนาด, การผลิต, และการประกอบกลไก จึงทำการออกแบบมือเทียมต้นแบบสำหรับนำมาวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการนำกลไกมาใช้งานจริงและวิเคราะห์ปัญหาของกลไกที่อาจเกิดขึ้นได้ในอนาคต ทำการสร้างแบบจำลองสามมิติของกลไกมือเทียมโดยออกแบบรูปร่างชิ้นส่วนให้ง่ายต่อการผลิตและประกอบ โดยแบ่งเป็นแบบจำลองส่วนนิ้วมือและส่วนกลไกข้อมือเทียม

ในการสร้างแบบจำลองกลไกนิ้วมือ ความยาวของชิ้นส่วนกลไกนิ้วมือแต่ละชิ้นเป็นไปตามแผนภาพจลนศาสตร์ดังรูปที่ 3.8 โดยแบบจำลองนิ้วมือเบื้องต้นมีลักษณะเป็นแผ่นแบนราบซึ่งง่ายต่อการผลิตและประกอบ ความหนาของกลไกนิ้วมือโดยรวมคือ 18 มิลลิเมตรซึ่งใกล้เคียงค่าเฉลี่ยความหนาของนิ้วมือคนไทย [20] แบบจำลองกลไกนิ้วมือทั้งสี่มีลักษณะดังรูปที่ 3.17 (a) กลไกนิ้วมือถูกขับเคลื่อนด้วยข้อต่อแบบเลื่อนด้านล่างของกลไก ชิ้นส่วนปลายนิ้วมือมีการหักงอเพื่อให้สัมผัสกับวัตถุขนาดต่างๆได้ดี ชิ้นส่วนมีลักษณะเป็นแผ่นแบนนำมาซ้อนกันโดยชิ้นส่วนปลายนิ้วอยู่ในระนาบกึ่งกลางระหว่างชิ้นส่วนอื่นดังรูปที่ 3.17 (b) สำหรับแบบจำลองกลไกนิ้วโป้งมีลักษณะดังรูปที่ 3.18 (a) กลไกถูกขับเคลื่อนด้วยข้อต่อแบบเลื่อนด้านบนของกลไก ชิ้นส่วนปลายนิ้วมือมีการหักงอ, มีขนาดสั้นกว่ากลไกนิ้วมือทั้งสี่, และอยู่กึ่งกลางนิ้วดังรูปที่ 3.18 (b) เช่นเดียวกับนิ้วมือทั้งสี่

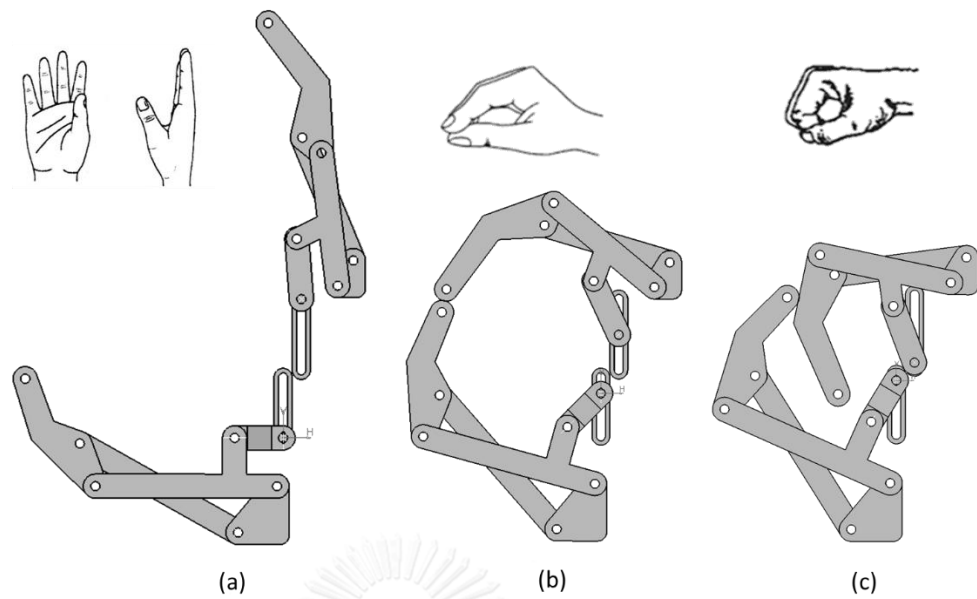
กลไกนิ้วมือทั้งสี่และกลไกนิ้วโป้งในตำแหน่งท่าแบมือมีลักษณะดังรูปที่ 3.19 (a) สามารถเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งท่าจับแบบแม่นยำและท่าจับแบบกำมือมีลักษณะดังรูปที่ 3.19 (b) และรูปที่ 3.19 (c) ตามลำดับ



รูปที่ 3.17 แบบจำลองกลไกนิ้วมือทั้งสี่ (a) มุมมองด้านข้าง, (b) มุมมองสามมิติ

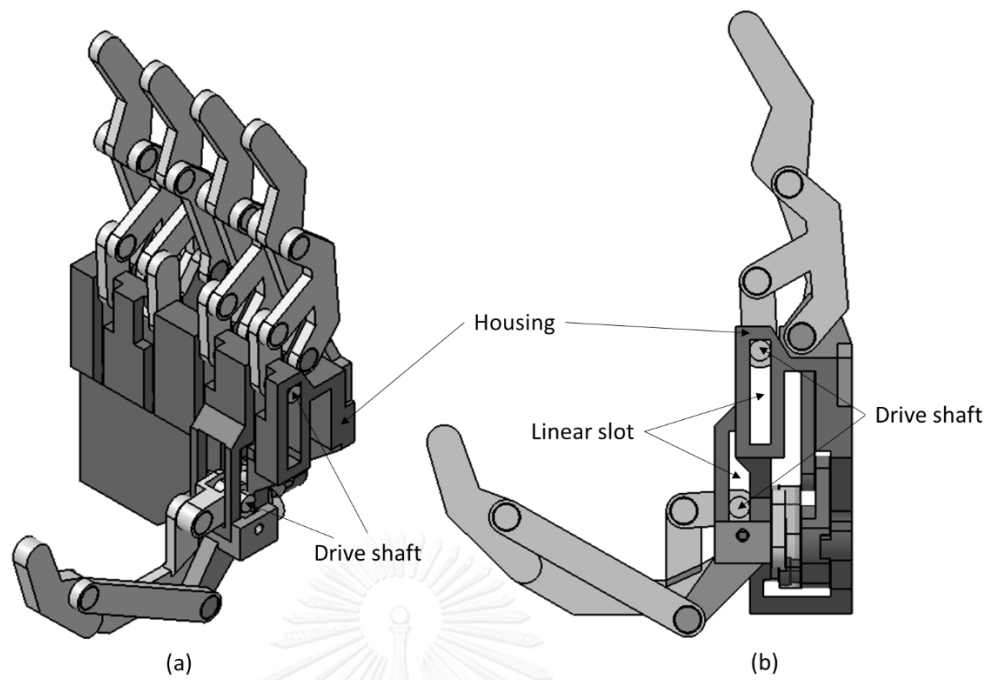


รูปที่ 3.18 แบบจำลองกลไกนิ้วโป้ง (a) มุมมองด้านข้าง, (b) มุมมองสามมิติ



รูปที่ 3.19 แบบจำลองกลไกนิ้วมือทั้งสี่และนิ้วโป้ง (a) ทำแบมือ, (b) ทำจับแบบแน่นยำ, (c) ทำจับแบบกำมือ

ในการสร้างแบบจำลองกลไกข้อมือเทียม ความยาวของชิ้นส่วนกลไกมือแต่ละชิ้นเป็นไปตามแผนภาพจลนศาสตร์ดังรูปที่ 3.14 โดยแบบจำลองกลไกเบื้องต้นมีลักษณะเป็นแผ่นบนระนาบ เช่นเดียวกับกลไกนิ้วมือและจำเป็นต้องออกแบบกลไกเพื่อให้ใช้พื้นที่น้อยที่สุดและไม่เกิดการชนกัน แบบจำลองกลไกมือเทียมและกลไกนิ้วมือเบื้องต้นมีลักษณะดังรูปที่ 3.20 (a) นิ้วมือทั้งสี่และนิ้วโป้งถูกประกอบอยู่บนโครงสร้างหลัก (Housing) ภายในโครงสร้างหลักมีร่องเส้นตรง (Linear slot) จำนวน 2 ร่องสำหรับใช้แทนข้อต่อแบบเลื่อนของกลไกนิ้วมือและกลไกนิ้วโป้ง ภายในร่องมีเพลาขับ (Drive shaft) ซึ่งเชื่อมต่อระหว่างกลไกนิ้วมือและกลไกภายในโครงสร้างหลัก เพลาขับจะถูกดึงเคลื่อนที่ขึ้นลงตามร่องเส้นตรงดังรูปที่ 3.20 (b) เพื่อให้เกิดการเคลื่อนที่แบบต่างๆ

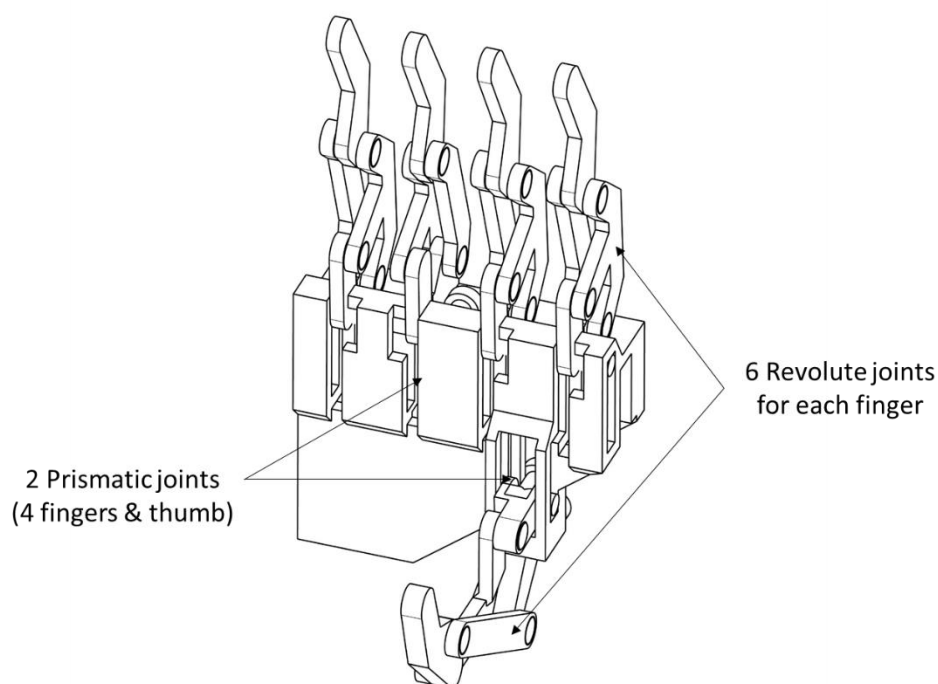


รูปที่ 3.20 แบบจำลองกลไกมือเทียมและนิ้วมือเบื้องต้นในท่าแบมือ (a) มุมมองสามมิติ,  
(b) มุมมองด้านข้าง



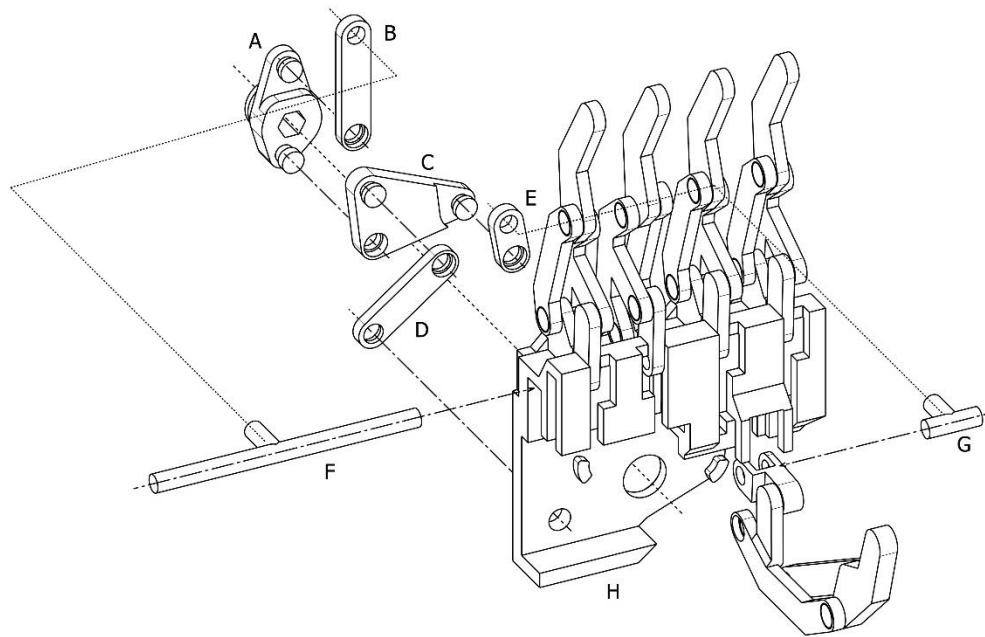
### 3.3 กลไกมือเทียมต้นแบบ

มือเทียมต้นแบบใช้สำหรับวิเคราะห์การทำงานและความเป็นไปได้ในการใช้กลไกนี้ในมือเทียมจริง มือเทียมต้นแบบดังรูปที่ 3.21 มีข้อต่อแบบหมุน (Revolute Joint) 38 ข้อต่อ โดยกลไกนิ้วมือทั้งห้ามีจำนวนนิ้วละ 6 ข้อต่อและกลไกข้อมือเทียมภายในโครงสร้างหลักมีจำนวน 8 ข้อต่อ มีข้อต่อแบบเลื่อนทั้งหมด 2 ข้อต่อคือข้อต่อแบบเลื่อนของนิ้วโป้งและนิ้วมือทั้งสี่ โดยนิ้วมือทั้งสี่ใช้ข้อต่อแบบเลื่อนร่วมกันเนื่องจากมีรูปแบบการเคลื่อนที่ไปพร้อมกัน



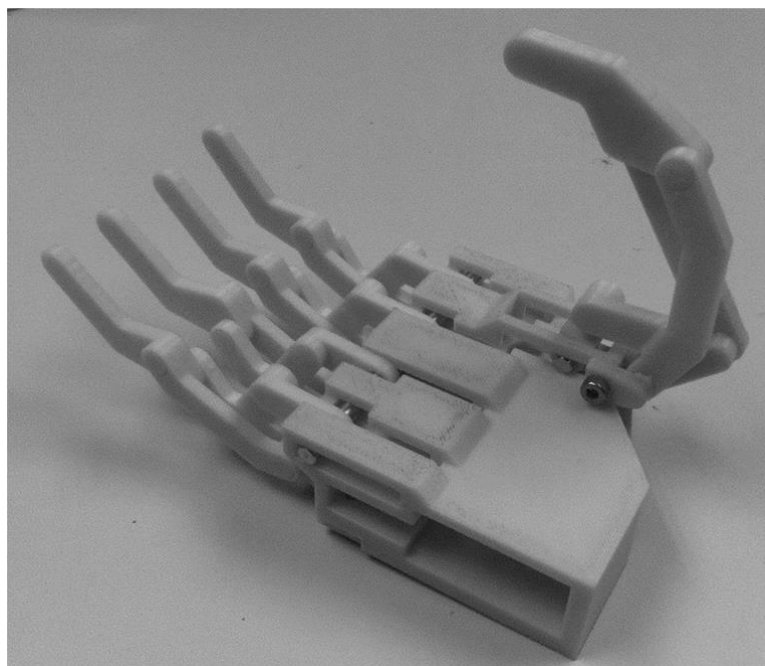
รูปที่ 3.21 มือเทียมต้นแบบในท่าแบ่มือ

มือเทียมต้นแบบนี้มีเป้าหมายสำหรับการวิเคราะห์ลักษณะทางจลนศาสตร์โดยไม่จำเป็นต้องใช้ตัวขับเคลื่อน (Actuator) ของจริงเช่นมอเตอร์ไฟฟ้า กลไกจึงถูกออกแบบให้ขับเคลื่อนด้วยการหมุนชิ้นส่วนขับเคลื่อนด้วยมือผู้ใช้งาน กลไกมือเทียมมีลักษณะดังรูปที่ 3.22 ชิ้นส่วน A เป็นชิ้นส่วนขับเคลื่อนมีรูหกเหลี่ยมอยู่ภายในสำหรับถูกบิดเพื่อขับเคลื่อนกลไก ชิ้นส่วน B เป็นชิ้นส่วนคัปเปิลเลอร์ของกลไกขับเคลื่อนนิ้วมือทั้งสี่ ชิ้นส่วน C,D, และ E เป็นชิ้นส่วนคัปเปิลเลอร์, รอคเกอร์, และชิ้นส่วนเชื่อมต่อกับข้อต่อแบบเลื่อนตามลำดับ กลไกขับเคลื่อนนิ้วมือทั้งสี่และนิ้วโป้งเชื่อมต่อกับนิ้วมือผ่านเพลลาขับ F และ G ตามลำดับ กลไกทั้งหมดนี้ยึดติดเข้าด้วยกันด้วยโครงสร้างหลัก H กลไกมือเทียมมีหนึ่งองศาอิสระโดยนิ้วมือทั้งสี่และนิ้วโป้งสามารถเคลื่อนที่เข้ามาทำท่าต่างๆจากการบิดชิ้นส่วนขับเคลื่อน



รูปที่ 3.22 ชิ้นส่วนของกลไกมือเทียมต้นแบบ

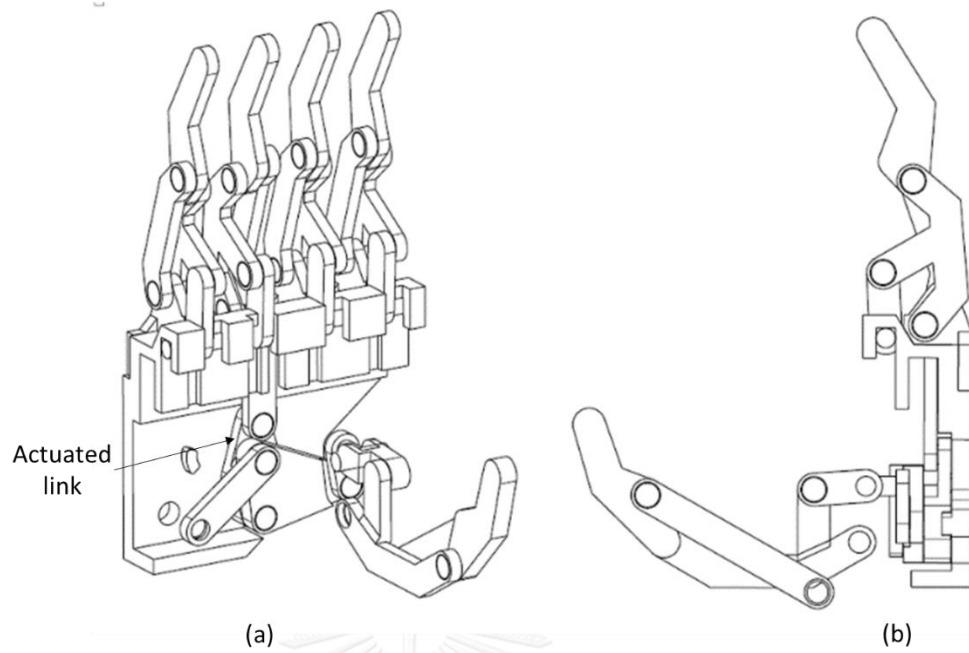
แบบจำลองสามมิติของมือเทียมต้นแบบดังรูปที่ 3.20 ถูกนำมาใช้สร้างชิ้นงานต้นแบบดังรูปที่ 3.23 มือเทียมต้นแบบผลิตด้วยด้วยกระบวนการ FDM (Fuse Deposition Modeling) และใช้วัสดุพลาสติกชนิด Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS-M30i) (รายละเอียดเพิ่มเติมในภาคผนวก ก) มุมของนิ้วโป้งมีทิศตรงข้ามกับฝ่ามือเพื่อความสะดวกในการออกแบบโดยยังสามารถทำท่าจับแบบแมนย่ำและท่าจับกำมือได้ ตำแหน่งของนิ้วโป้งอยู่ตรงกลางระหว่างนิ้วชี้และนิ้วกลางเพื่อให้สามารถทำท่าจับแบบแมนย่ำได้



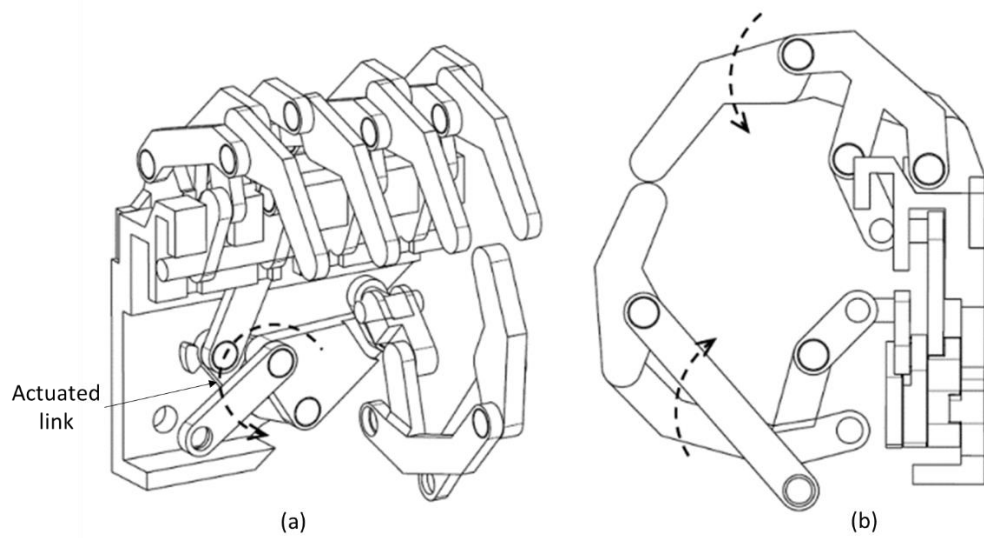
รูปที่ 3.23 มือเทียมต้นแบบในท่าแบมือ

### 3.4 ผลการออกแบบและผลมือเทียมต้นแบบ

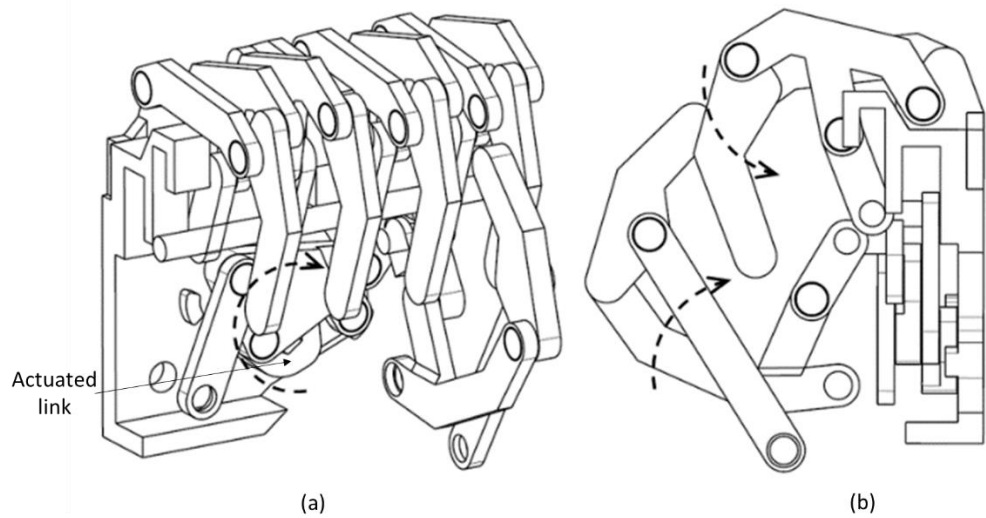
กลไกมือเทียมต้นแบบสามารถเคลื่อนที่ได้ทั้งหมด 3 ตำแหน่งคือ ท่าแบมือ, ท่าจับแบบแมนย่า, และท่าจับแบบกำมือ โดยใช้การหมุนกลไกไปยังตำแหน่งต่างๆ ดังรูปที่ 3.24 (a) กลไกมือเทียมอยู่ในตำแหน่งแบมือซึ่งเป็นตำแหน่งเริ่มต้น ชิ้นส่วนขับเคลื่อน (Actuated link) มีทิศอยู่ในแนวตั้งเมื่อมองจากระนาบฝ่ามือ ปลายนิ้วมือทั้งสี่และนิ้วโป้งอยู่ในตำแหน่งเริ่มต้นดังรูปที่ 3.24 (b) ตำแหน่งแบมือนี้เป็นตำแหน่งระหว่างท่าจับแบบแมนย่าและท่าจับแบบกำมือ กลไกมือเทียมต้นแบบสามารถเคลื่อนที่ไปยังท่าจับแบบแมนย่าได้ดังรูปที่ 3.25 (a) ชิ้นส่วนขับเคลื่อนถูกหมุนไปในทิศทางเข็มนาฬิกาส่งผลให้กลไกนิ้วทั้งสี่และนิ้วโป้งงอเข้ามาพร้อมกัน ปลายนิ้วทั้งสี่และนิ้วโป้งสัมผัสกันเมื่อมองจากด้านข้างฝ่ามือดังรูปที่ 3.25 (b) กลไกมือเทียมต้นแบบสามารถเคลื่อนที่ไปยังท่าจับแบบกำมือได้ดังรูปที่ 3.26 (a) ชิ้นส่วนขับเคลื่อนถูกหมุนไปในทิศตามเข็มนาฬิกาส่งผลให้กลไกนิ้วทั้งสี่งอเข้ามา ก่อนแล้วนิ้วโป้งจึงงอตามเข้ามา ปลายนิ้วโป้งสัมผัสกับด้านหลังของนิ้วมือทั้งสี่เมื่อมองจากด้านข้างฝ่ามือดังรูปที่ 3.26 (b)



รูปที่ 3.24 ภาพตัดของมือเทียมต้นแบบในท่าแบมือ  
(a) มุมมองสามมิติ, (b) มุมมองด้านข้างฝ่ามือ



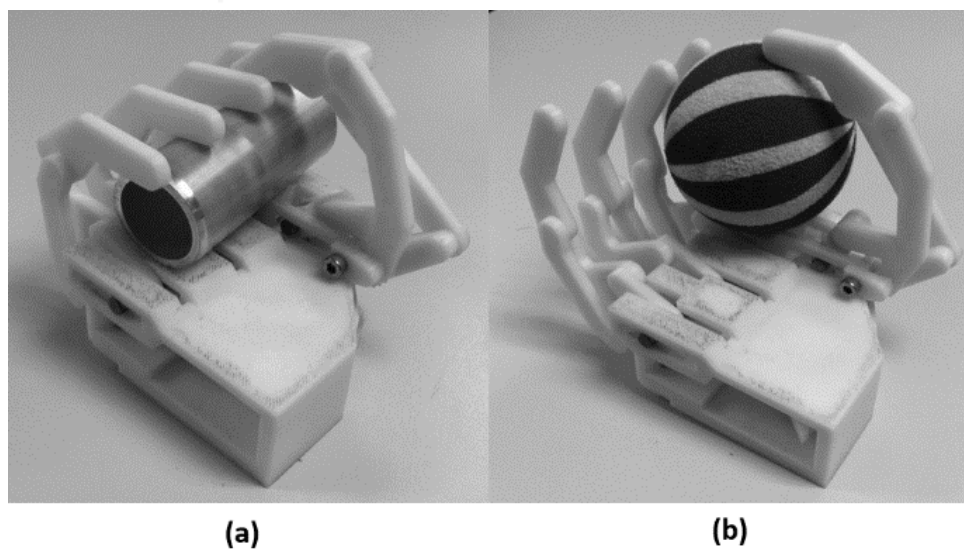
รูปที่ 3.25 ภาพตัดของมือเทียมต้นแบบในท่าจับแบบแมนยำ  
(a) มุมมองสามมิติ, (b) มุมมองด้านข้างฝ่ามือ



รูปที่ 3.26 ภาพตัดของมือเทียมต้นแบบในท่าจับแบบกำมือ

(a) มุมมองสามมิติ, (b) มุมมองด้านข้างฝ่ามือ

มือเทียมต้นแบบนี้สามารถเคลื่อนที่เป็นท่าจับแบบกำมือเพื่อใช้จับวัตถุทรงกระบอกดังรูปที่ 3.27 (a) และวัตถุทรงกลมดังรูปที่ 3.27 (b) มือเทียมต้นแบบสามารถเคลื่อนที่เป็นท่าจับแบบแน่นยำได้แต่มีปัญหาในการจับวัตถุขนาดเล็กเช่นปากกาหรือกระดุม เนื่องจากนิ้วมือมีลักษณะเป็นแผ่นราบทำให้มีช่องว่างระหว่างนิ้วมือ มือเทียมต้นแบบนี้ยังมีลักษณะไม่เหมือนมือมนุษย์เนื่องจากลักษณะแบนของนิ้วมือ หากสามารถปรับปรุงให้นิ้วมือมีลักษณะโค้งมนคล้ายมือมนุษย์เพื่อให้ปลายนิ้วชี้ นิ้วกลาง และนิ้วโป้งสามารถงอมาสัมผัสกันได้ มือเทียมจะมีความสามารถในการจับวัตถุขนาดเล็กได้มั่นคงขึ้น และเป็นการเพิ่มความสวยงามของมือเทียมอีกทางหนึ่ง

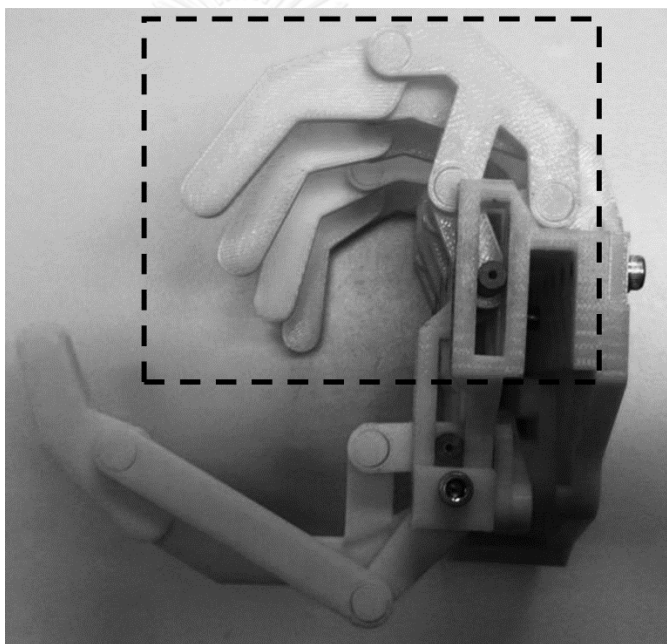


(a)

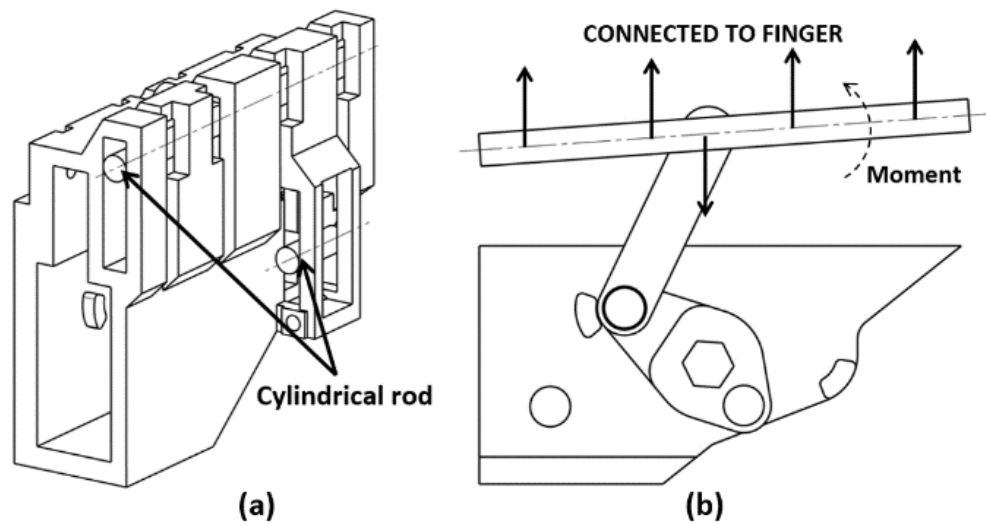
(b)

รูปที่ 3.27 มือเทียมต้นแบบในท่าจับแบบกำมือ (a) จับเพลาทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร, (b) จับวัตถุทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 60 มิลลิเมตร

นอกจากปัญหาด้านความสวยงามของมือเทียมต้นแบบแล้ว ปัญหาสำคัญอีกเรื่องหนึ่งคือการเคลื่อนไหวของกลไกนิ้วมือทั้งสองซึ่งมีการงอเข้ามาไม่พร้อมกันแต่มีลักษณะการงอแบบเรียงกันดังรูปที่ 3.28 ซึ่งไม่เป็นไปตามเป้าหมายการออกแบบ ปัญหานี้เกิดจากเพลลาขับเคลื่อนมือเทียมสองอันดังรูปที่ 3.29 (a) ซึ่งทำหน้าที่เป็นข้อต่อแบบเลื่อนควรจะมีการเคลื่อนไหวหนึ่งองศาอิสระคือการเลื่อนขึ้นลง แต่กลับเกิดการหมุนเอียงไปมาได้ภายในร่องเส้นตรงของมือเทียมทำให้มีการเคลื่อนที่สององศาอิสระเมื่อเกิดแรงดึงจากการบิดขึ้นส่วนขับเคลื่อนซึ่งมีตำแหน่งเยื้องจากกึ่งกลางเพลลา เพลลาขับเคลื่อนทั้งสองจึงถูกหมุนและดึงไปพร้อมๆ กันดังรูปที่ 3.29 (b) ปัญหานี้สามารถแก้ไขได้โดยการเพิ่มขึ้นส่วนสำหรับบังคับการเคลื่อนที่ของเพลลาไม่ให้เกิดการหมุนภายในร่อง เช่น รางบังคับเส้นตรง (Linear guide) หรือบอลสกรู (Ball screw) จะสามารถทำให้เพลลาทำหน้าที่เป็นข้อต่อแบบเลื่อนเป็นเส้นตรงอย่างแท้จริงและมีการเคลื่อนที่หนึ่งองศาอิสระเท่านั้น



รูปที่ 3.28 กลไกนิ้วมือของมือเทียมต้นแบบเกิดการงอไม่พร้อมกัน



รูปที่ 3.29 เฟลาขับภายในมือเทียมต้นแบบ (a) เฟลาขับสองอันภายในร่องเส้นตรง, (b) เฟลาขับถูกหมุนเมื่อแรงดึงจากตัวขับเคลื่อนมีตำแหน่งเยื้องจากจุดกึ่งกลางเฟลา

### 3.5 สรุปผลการออกแบบมือเทียมต้นแบบ

กลไกมือเทียมต้นแบบถูกออกแบบและผลิตเพื่อนำมาวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการใช้งานจริงของกลไกและวิเคราะห์ปัญหาที่จะเกิดขึ้นในอนาคต มือเทียมต้นแบบสามารถเคลื่อนที่เป็นท่าแบมือ, ทำจับแบบแม่นยำ, และทำจับแบบกำมือได้ด้วยการหมุนชิ้นส่วนขับเคลื่อนหนึ่งอันไปในทิศทางต่างๆ แสดงถึงความเป็นไปได้ของมือเทียมตามจุดประสงค์ให้สามารถใช้งานในท่าต่างๆที่จำเป็นในชีวิตประจำวันได้

มือเทียมต้นแบบมีขนาดใกล้เคียงกับมือมนุษย์และมือเทียมอื่นในท้องตลาดในขณะที่ชิ้นส่วนขับเคลื่อนภายในสามารถมีขนาดใหญ่กว่ามือเทียมส่วนใหญ่ แสดงถึงความเป็นไปได้ในการสร้างมือเทียมให้มีแรงจับสูงเนื่องจากมีพื้นที่เพียงพอสำหรับมอเตอร์ไฟฟ้าและระบบทดกำลังที่เหมาะสม มือเทียมต้นแบบนี้ต้องมีการปรับปรุงในด้านความสวยงาม, แรงจับของกลไก, และการเคลื่อนที่ เพื่อเป็นการตอบจุดประสงค์ให้มีความเป็นธรรมชาติคล้ายมือมนุษย์ หัวข้อในการปรับปรุงนี้จะถูกนำมาวิเคราะห์ในขั้นตอนการออกแบบและขั้นตอนการสร้างมือเทียมจริงดังบทที่ 4

## บทที่ 4

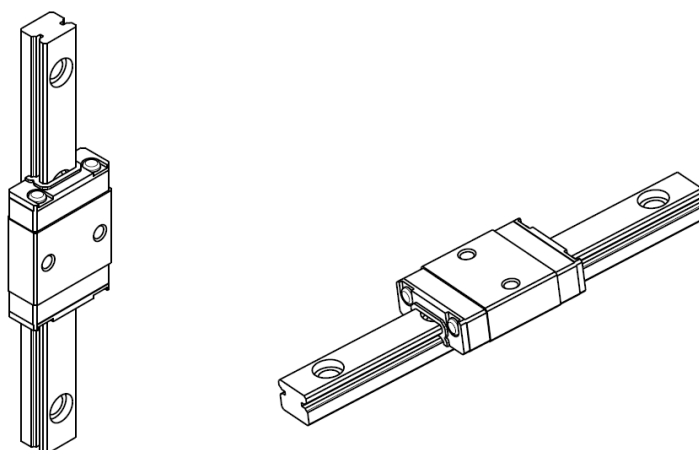
### การออกแบบและผลิตมือเทียม

#### (Design and Manufacturing)

จากการออกแบบและผลิตมือเทียมต้นแบบในบทที่ 3 มีปัญหาที่เกิดขึ้นหลายประการเช่น การเคลื่อนที่ของกลไก, ความสามารถในการจับของมือเทียมต้นแบบ, และความสวยงาม มือเทียมที่จะออกแบบสำหรับใช้งานจริงจึงต้องทำการวิเคราะห์และปรับปรุงหัวข้อต่างๆ เหล่านี้ โดยมีขั้นตอนแบ่งเป็น การแก้ไขปัญหาดังกล่าว, การสังเคราะห์กลไกใหม่, การออกแบบโครงสร้าง, การผลิตและประกอบมือเทียม มีรายละเอียดดังนี้

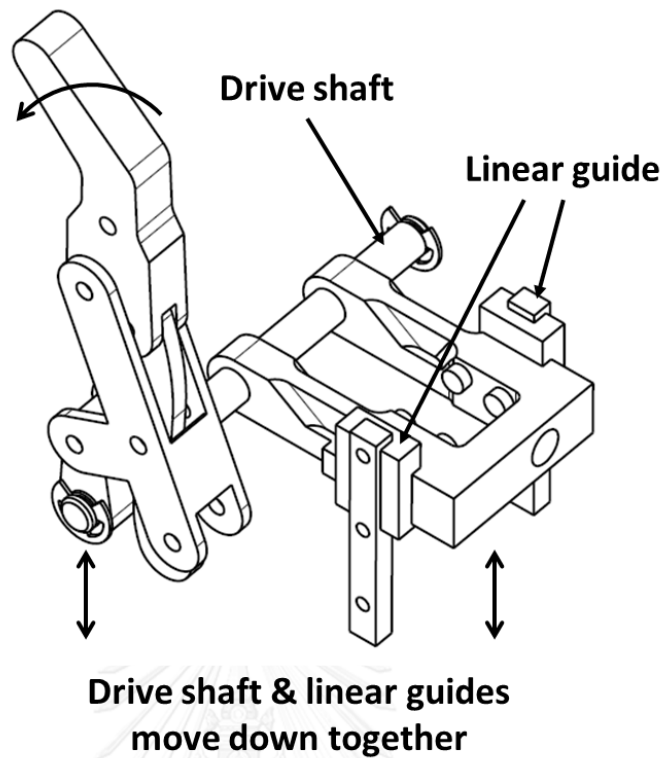
#### 4.1 การแก้ไขปรับปรุงปัญหาจากมือเทียมต้นแบบ

มือเทียมต้นแบบได้ถูกผลิตและทดสอบการเคลื่อนที่ มีหัวข้อต้องปรับปรุงในด้านการเคลื่อนที่ของเพลาขับซึ่งเชื่อมต่อกับกลไกนิ้วมือ เพลาขับทั้งสองชิ้นเกิดการหมุนได้ง่ายเมื่อถูกเคลื่อนที่ภายในร่องเส้นตรงดังรูปที่ 3.29 (b) เนื่องจากไม่มีการบังคับการหมุนของเพลาขับ ปัญหานี้มีการปรับปรุงโดยใช้รางเลื่อนเส้นตรง (Linear Guide) ดังรูปที่ 4.1 ซึ่งสามารถรับแรงบิดได้สามแกนและมีทิศทางการเคลื่อนที่หนึ่งแกน ทำให้เพลาขับสามารถเคลื่อนที่ได้หนึ่งองศาอิสระและส่งผลให้ข้อต่อแบบเลื่อนของกลไกนิ้วมือมีการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงพร้อมๆ กันดังรูปที่ 4.2 เมื่อชิ้นส่วนที่ยึดรางเลื่อนเส้นตรงและเพลาขับเข้าด้วยกันเคลื่อนที่ขึ้นลงเป็นเส้นตรง เพลาขับจะเคลื่อนที่ขึ้นลงได้โดยไม่เกิดการหมุน ส่งผลให้นิ้วมือทั้งสองสามารถงอเข้ามาพร้อมกันได้



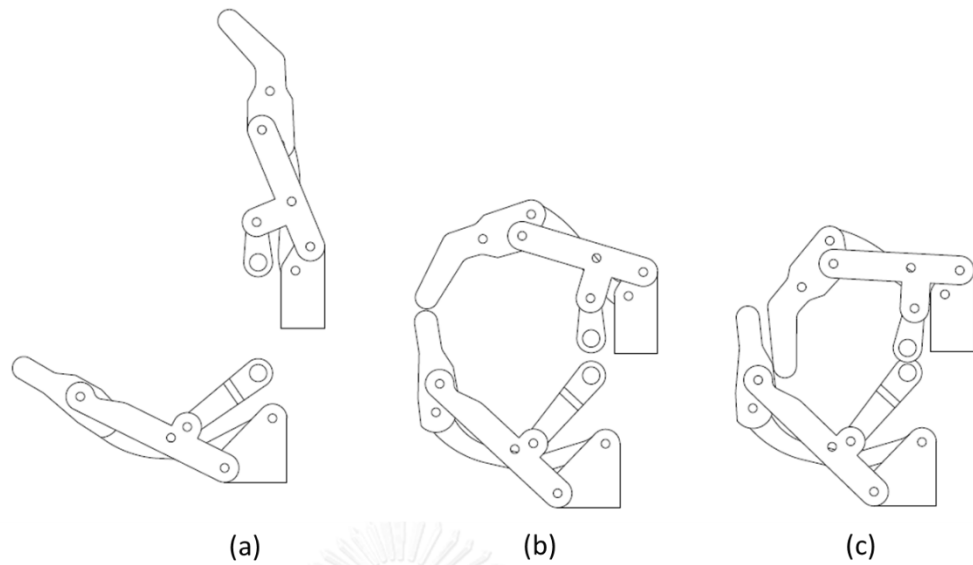
รูปที่ 4.1 รางเลื่อนเส้นตรง (Linear Guide) สำหรับควบคุมการหมุนของเพลาขับ



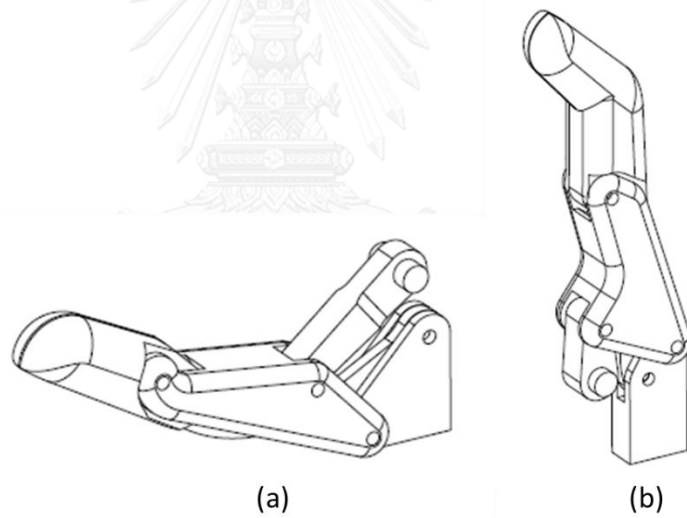


รูปที่ 4.2 การยึดรางเลื่อนเส้นตรงเข้ากับเพลาชับนิ้วมือ

กลไกนิ้วมือและนิ้วโป้งเป็นกลไก Four-bar linkage ซึ่งมีหนึ่งองศาอิสระต่อหนึ่งนิ้วแตกต่างจากนิ้วมือมนุษย์ตามธรรมชาติซึ่งมี 3 – 4 องศาอิสระ [4] กลไกนิ้วมือถูกออกแบบโดยเริ่มต้นกำหนดขนาดกลไกนิ้วมือจากข้อมูลการวัดขนาดมือของชายไทย [20] แล้วจึงถูกปรับเปลี่ยนเพิ่มเติมเพื่อให้กลไกสามารถเคลื่อนที่เป็นท่าทั้ง 3 ท่าแห่งคือ ท่าแบ่มือ, ท่าจับแบบแม่นยำ, และท่าจับแบบกำมือ ได้ดังรูปที่ 4.3 โดยปลายนิ้วชี้และนิ้วโป้งสัมผัสกันที่ท่าจับแบบแม่นยำดังรูปที่ 4.3 (b) และปลายนิ้วโป้งงอเข้ามาสัมผัสกับหลังนิ้วชี้ที่งอเต็มที่ในท่าจับแบบกำมือดังรูปที่ 4.3 (c) จากนั้นจึงออกแบบให้นิ้วมือมีความกลมที่นิ้วและปลายนิ้วเพื่อความสวยงามและสะดวกต่อการหยิบจับวัตถุ กลไกนิ้วโป้งมีลักษณะดังรูปที่ 4.4 (a) และกลไกนิ้วมือทั้งสี่มีลักษณะดังรูปที่ 4.4 (b)



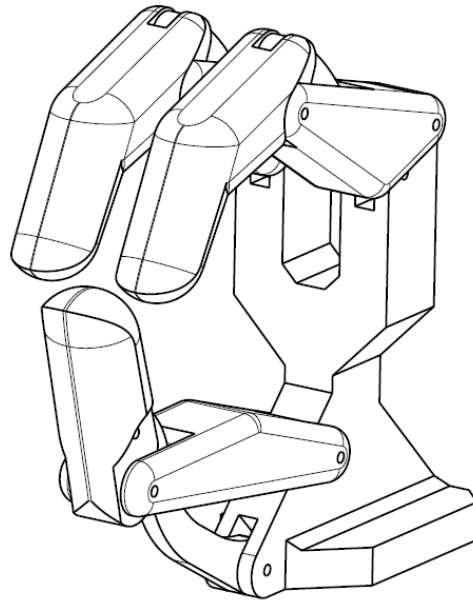
รูปที่ 4.3 กลไกนิ้วมือ (a) ทำแบ่มือ, (b) ทำจับแบบแมนย่ำ, (c) ทำจับแบบกำมือ



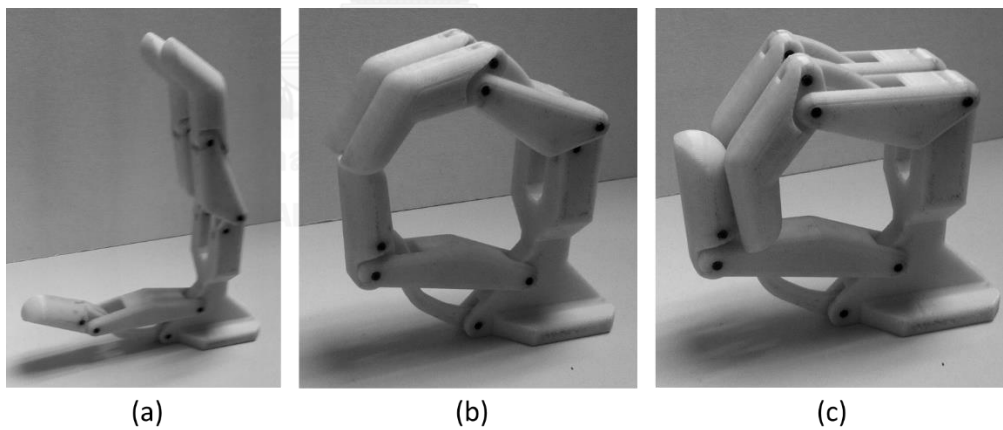
รูปที่ 4.4 กลไกนิ้วมือเมื่อปรับปรุงให้มีลักษณะกลมมนที่ปลายนิ้ว  
(a) กลไกนิ้วโป้ง, (b) กลไกนิ้วมือทั้งสี่

มือเทียมที่ออกแบบประกอบด้วยกลไกนิ้วมือทั้งห้าและมอเตอร์ไฟฟ้าหนึ่งตัว โดยนิ้วทั้งสี่ (นิ้วชี้, นิ้วกลาง, นิ้วนาง, และนิ้วก้อย) มีขนาดเท่ากันเพื่อความง่ายในการออกแบบ ตำแหน่งนิ้วโป้งอยู่ตรงกลางระหว่างนิ้วชี้และนิ้วกลางเพื่อให้สามารถทำท่าจับแบบแมนย่ำได้ ดังรูปที่ 4.5 กลไกนิ้วชี้, นิ้วกลาง, และนิ้วโป้งนี้มีการทำชิ้นงานต้นแบบด้วยวัสดุพลาสติกชนิด ABS-M30i เพื่อใช้วิเคราะห์การเคลื่อนที่เป็นท่าจับต่างๆ กลไกนิ้วมือในท่าแบ่มือมีลักษณะดังรูปที่ 4.6 (a) นิ้วมือสามารถเคลื่อนที่เข้า

มาให้ปลายนิ้วทั้งสามสัมผัสกันเป็นท่าจับแบบแม่นยำดังรูปที่ 4.6 (b) และนิ้วโป้งสามารถเคลื่อนที่เข้ามาสัมผัสกับด้านหลังของนิ้วชี้และนิ้วกลางเพื่อให้เกิดท่าจับแบบกำมือนั่งรูปที่ 4.6 (c)



รูปที่ 4.5 กลไกนิ้วมือถูกออกแบบให้สามารถทำท่าจับแบบแม่นยำได้ โดยนิ้วโป้งอยู่ตรงกลางระหว่างนิ้วชี้และนิ้วกลาง



รูปที่ 4.6 กลไกนิ้วมือสำหรับวิเคราะห์ท่าจับตำแหน่งต่างๆ (a) ท่าแบมือ, (b) ท่าจับแบบแม่นยำ, (c) ท่าจับแบบกำมือ

## 4.2 การสังเคราะห์กลไกข้อมือเทียม

กลไกข้อมือเทียมแบ่งเป็นสองส่วนคือ กลไกขับเคลื่อนนิ้วทั้งสี่และกลไกขับเคลื่อนนิ้วโป้งดังหัวข้อ 3.2.2 กลไกขับเคลื่อนนิ้วทั้งสี่ใช้หลักการของกลไก Crank-slider เพื่อให้การเคลื่อนไหวแบบเส้นตรงของข้อต่อแบบเลื่อนมีตำแหน่งเหมือนกันทั้งสองทิศการหมุน ส่วนกลไกขับเคลื่อนนิ้วโป้งใช้หลักการของกลไกหน่วง (Dwell-Mechanism) ดังหัวข้อ 2.5.2 เพื่อให้การเคลื่อนไหวของข้อต่อแบบเลื่อนมีความแตกต่างกันตามทิศทางการหมุนกลไก ส่งผลให้กลไกข้อมือเทียมสามารถเคลื่อนไหวจากตำแหน่งเริ่มต้นท่าข้อมือเป็นท่าจับแบบแม่นยำและท่าจับแบบกำมือได้เมื่อเปลี่ยนทิศการหมุนของตัวขับเคลื่อน

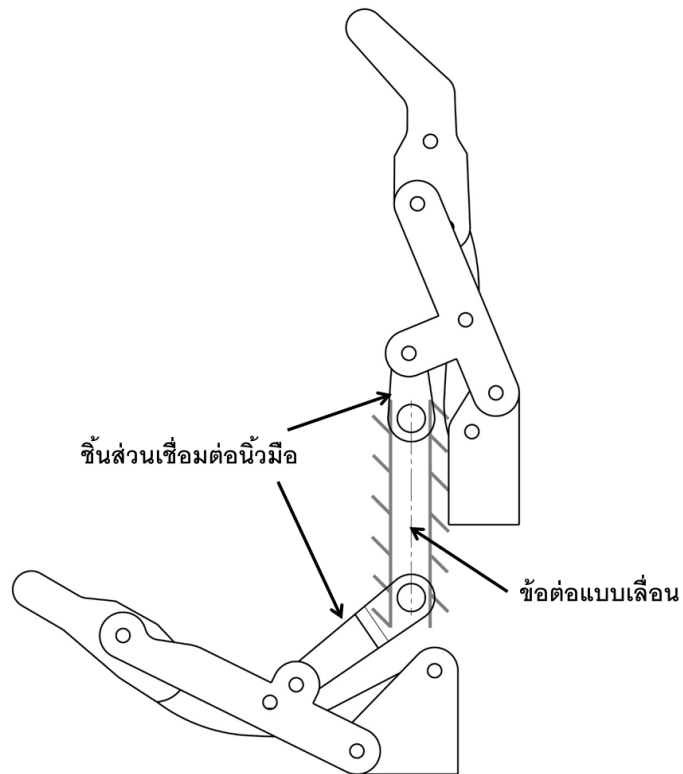
เนื่องจากตัวแปรในการออกแบบสังเคราะห์กลไกเช่นความยาวของชิ้นส่วนต่างๆและตำแหน่งของข้อต่อมีจำนวนมาก การออกแบบตัวแปรทุกตัวพร้อมกันจึงเป็นการยึดเยื่อและเสียเวลาเกินจำเป็น การออกแบบจึงใช้วิธีการกำหนดค่าตัวแปรที่สำคัญเบื้องต้นก่อน แล้วจึงออกแบบตัวแปรอื่นๆภายใต้ข้อบังคับ (Constraint) ที่กำหนดขึ้น จากนั้นจึงวนกลับมาปรับปรุงตัวแปรเบื้องต้นอีกครั้งหนึ่งและทำซ้ำจนได้กลไกที่พอใจ ขั้นตอนการสังเคราะห์กลไกในส่วนต่างๆของมือเทียมมีรายละเอียดดังนี้

### 4.2.1 การสังเคราะห์กลไกนิ้วมือ

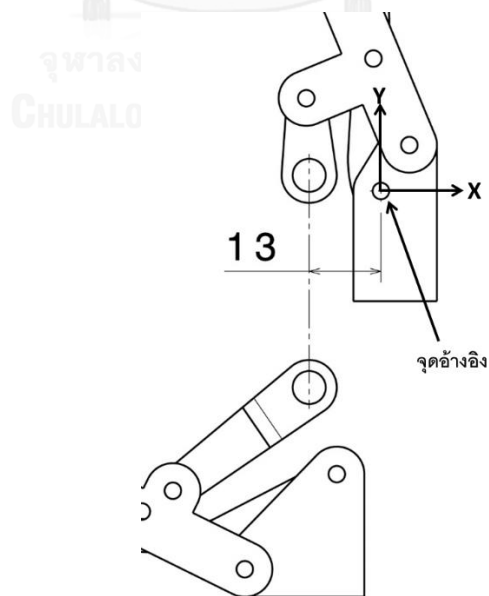
กลไกนิ้วมือ (นิ้วชี้, นิ้วกลาง, นิ้วนาง, และนิ้วก้อย) เป็นกลไก Four-bar linkage ซึ่งเชื่อมต่อกับกลไกขับเคลื่อนนิ้วมือภายในมือด้วยชิ้นส่วนเชื่อมต่อ ชิ้นส่วนเชื่อมต่อนี้ยึดอยู่กับข้อต่อแบบเลื่อน (Prismatic joint) ทำให้มีการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงดังรูปที่ 4.7 การออกแบบความยาวและตำแหน่งของชิ้นส่วนเชื่อมต่อนี้ส่งผลถึงความเร็วในการเคลื่อนที่ของนิ้วมือ, แรงทอร์ควางตัวขับเคลื่อนกับปลายนิ้ว, และขนาดของมือเทียม

ผู้ออกแบบกำหนดค่าให้ข้อต่อแบบเลื่อน (Prismatic joint) ของนิ้วทั้งสี่และนิ้วโป้งมีตำแหน่งห่างจากจุดอ้างอิงในแนวแกน X ของมือเทียม 13 มิลลิเมตรดังรูปที่ 4.8 ซึ่งเป็นระยะที่ไม่ยื่นออกมาจากฝ่ามือมากเกินไปและใกล้เคียงกับขนาดมือคนไทย เนื่องจากท่ากำมือเป็นท่าที่กลไกนิ้วมือและนิ้วโป้งจะเคลื่อนที่เข้ามาใกล้ที่สุดจากทั้งสามท่า จึงออกแบบให้ชิ้นส่วนเชื่อมต่อนิ้วมือและนิ้วโป้งสามารถเคลื่อนที่มาชิดกันในท่าจับแบบกำมือได้ดังรูปที่ 4.9 เนื่องจากการออกแบบกลไกโดยทั่วไปหากกลไกมีระยะการเคลื่อนที่ขาออก (output motion) คงที่แต่มีระยะการเคลื่อนที่ขาเข้า (Input motion) น้อยลง กลไกจะใช้แรงขับเคลื่อนมากขึ้น [19] กลไกมือเทียมนี้ใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเป็นตัวขับเคลื่อนซึ่งมอเตอร์ไฟฟ้ามักมีความเร็วสูงและมีแรงบิดน้อย การออกแบบให้กลไกให้ใช้ระยะทางการเคลื่อนที่สูงสุดเท่าที่มีพื้นที่ว่างช่วยให้กลไกมีแรงทอร์ควางมากขึ้นแล้กับระยะทางในการหมุนมอเตอร์ไฟฟ้า

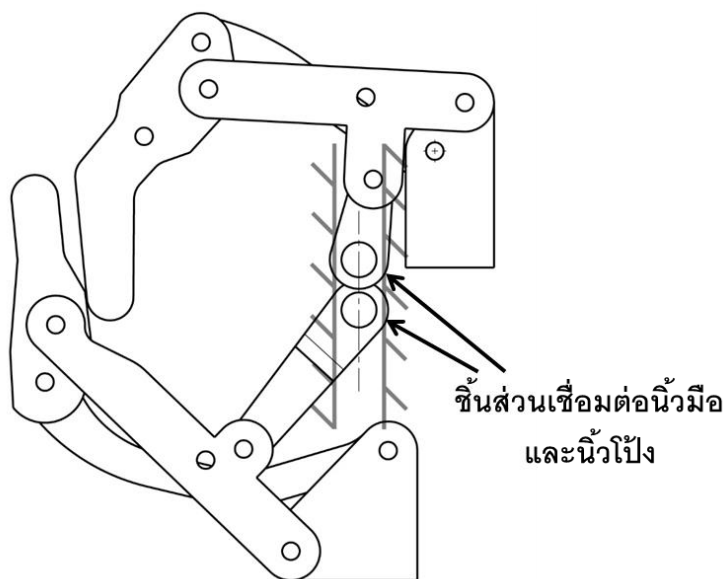
ที่มากขึ้น ช่วยให้สามารถเลือกเกียร์ทดที่มีกำลังทดน้อยลงซึ่งมักมีประสิทธิภาพสูงขึ้นและมีขนาดเล็ก  
ลงได้



รูปที่ 4.7 ชั้นส่วนเชื่อมต่อกลไกนิ้วมียึดเข้ากับข้อต่อแบบเลื่อน (Prismatic joint)

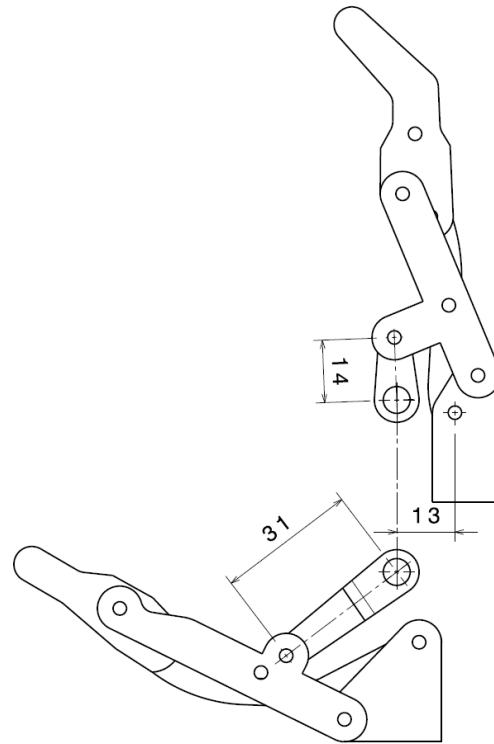


รูปที่ 4.8 ตำแหน่งข้อต่อแบบเลื่อน (Prismatic Joint) อยู่ห่างจากจุดอ้างอิงของมือเทียมใน  
แกน X ออกมา 13 มิลลิเมตร

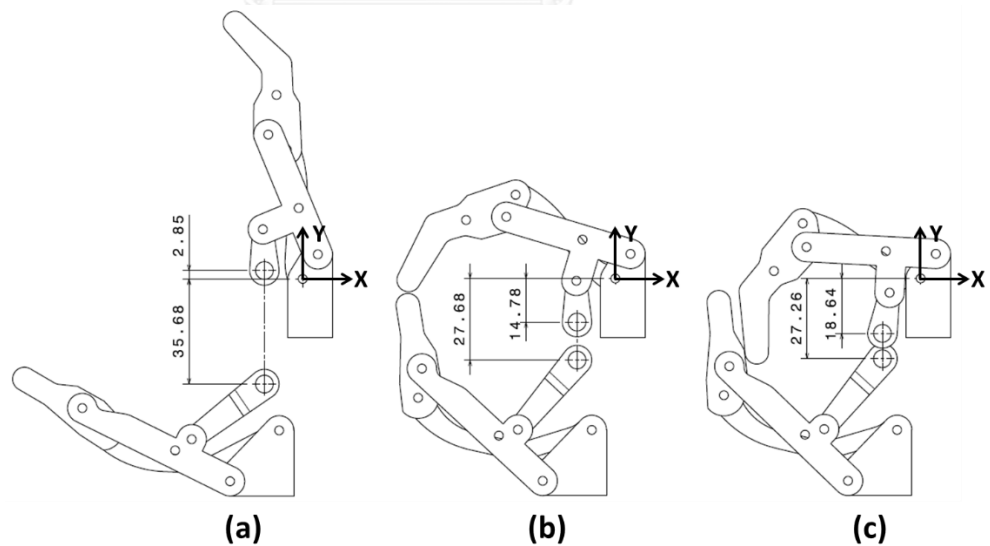


รูปที่ 4.9 ชิ้นส่วนเชื่อมต่อกลไกนิ้วมือและนิ้วโป้งเคลื่อนที่เข้ามาชิดกันที่ท่าจับแบบกำมือ

ความยาวของชิ้นส่วนเชื่อมต่อนิ้วมือและนิ้วโป้งจากการสังเคราะห์ทกลไกมีค่า 14 มิลลิเมตร และ 31 มิลลิเมตรตามลำดับดังรูปที่ 4.10 เมื่อนิ้วมือเคลื่อนที่เป็นท่าแบมือ, ท่าจับแบบแม่นยำ, และท่าจับแบบกำมือ ตำแหน่งของข้อต่อแบบเลื่อนในแกน Y นับจากจุดอ้างอิงมีค่าดังรูปที่ 4.11 ตำแหน่งของข้อต่อแบบเลื่อนของนิ้วมือทั้งสี่และนิ้วโป้งในท่าแบมือมีค่า 2.85 และ -35.68 มิลลิเมตรตามลำดับดังรูปที่ 4.11 (a), ในท่าจับแบบแม่นยำมีค่า -14.78 และ -27.68 มิลลิเมตรตามลำดับดังรูปที่ 4.11 (b), และในท่าจับแบบกำมือมีค่า -18.64 และ -27.26 มิลลิเมตรตามลำดับดังรูปที่ 4.11 (c) ตำแหน่งของข้อต่อแบบเลื่อนเหล่านี้จะถูกนำไปใช้ในการออกแบบกลไกขั้วมือเทียมในหัวข้อ 4.2.2 และ 4.2.3 ต่อไป



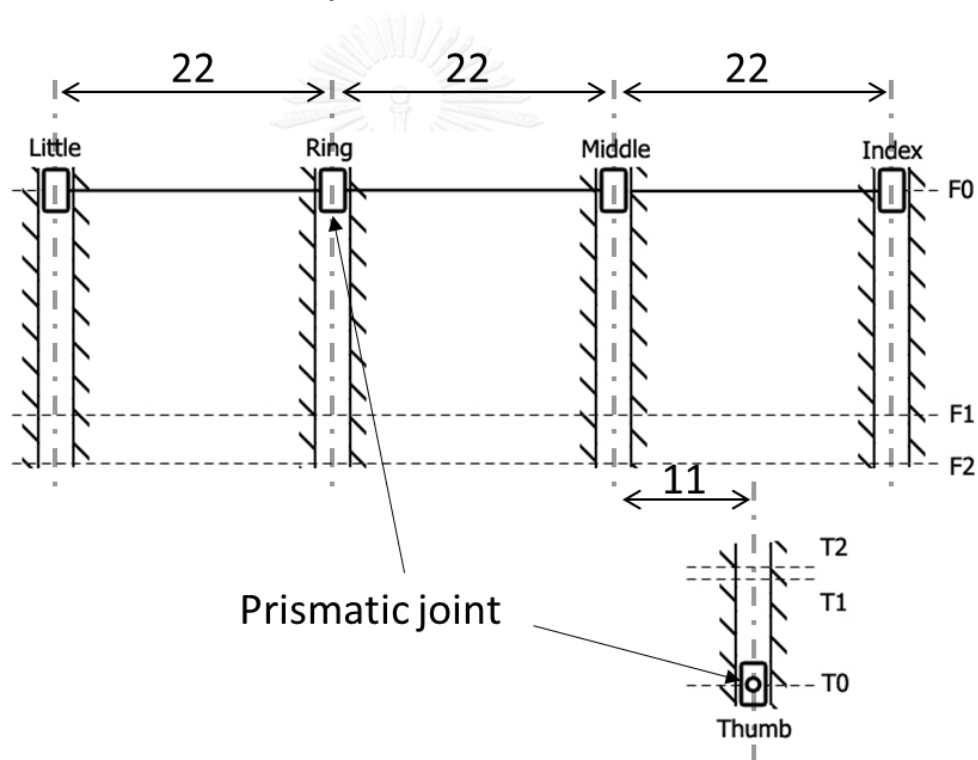
รูปที่ 4.10 ความยาวของชิ้นส่วนเชื่อมต่อนิ้วมือทั้งสี่และนิ้วโป้งมีค่า 14 และ 31 มิลลิเมตรตามลำดับ



รูปที่ 4.11 ตำแหน่งของข้อต่อแบบเลื่อน (Prismatic joints) (a) ทำแม่มือ, (b) ทำจับแบบแม่นยำ, (c) ทำจับแบบกำมือ

#### 4.2.2 การสังเคราะห์กลไกขับเคลื่อนนิ้วมือทั้งสี่

กลไกขับเคลื่อนนิ้วมือและนิ้วโป้งสามารถออกแบบได้โดยใช้ตำแหน่งของข้อต่อแบบเลื่อน (Prismatic joint) ในท่าจับต่างๆดังหัวข้อ 4.2.1 กลไกขับเคลื่อนต้องสามารถขยับข้อต่อแบบเลื่อนไปยังตำแหน่งที่ต้องการได้โดยชิ้นส่วนไม่ติดขัดกัน ตำแหน่งของข้อต่อแบบเลื่อนในท่าต่างๆถูกนำมาวาดในระนาบฝ่ามือดังรูปที่ 4.12 ตำแหน่งที่เป็นเป้าหมายในการออกแบบคือตำแหน่ง F0, F1, และ F2 เป็นตำแหน่งข้อต่อแบบเลื่อนของนิ้วมือทั้งสี่ในท่าแบมือ, ท่าจับแบบแม่นยำ, และท่าจับแบบกำมือ ตามลำดับ ตำแหน่ง T0, T1, และ T2 เป็นตำแหน่งข้อต่อแบบเลื่อนของนิ้วโป้งในท่าแบมือ, ท่าจับแบบแม่นยำ, และท่าจับแบบกำมือตามลำดับ ข้อต่อแบบเลื่อนของนิ้วมือทั้งสี่มีระยะห่างกัน 22 มิลลิเมตร ข้อต่อแบบเลื่อนของนิ้วโป้งอยู่กึ่งกลางระหว่างนิ้วชี้และนิ้วกลางมีระยะห่าง 11 มิลลิเมตร

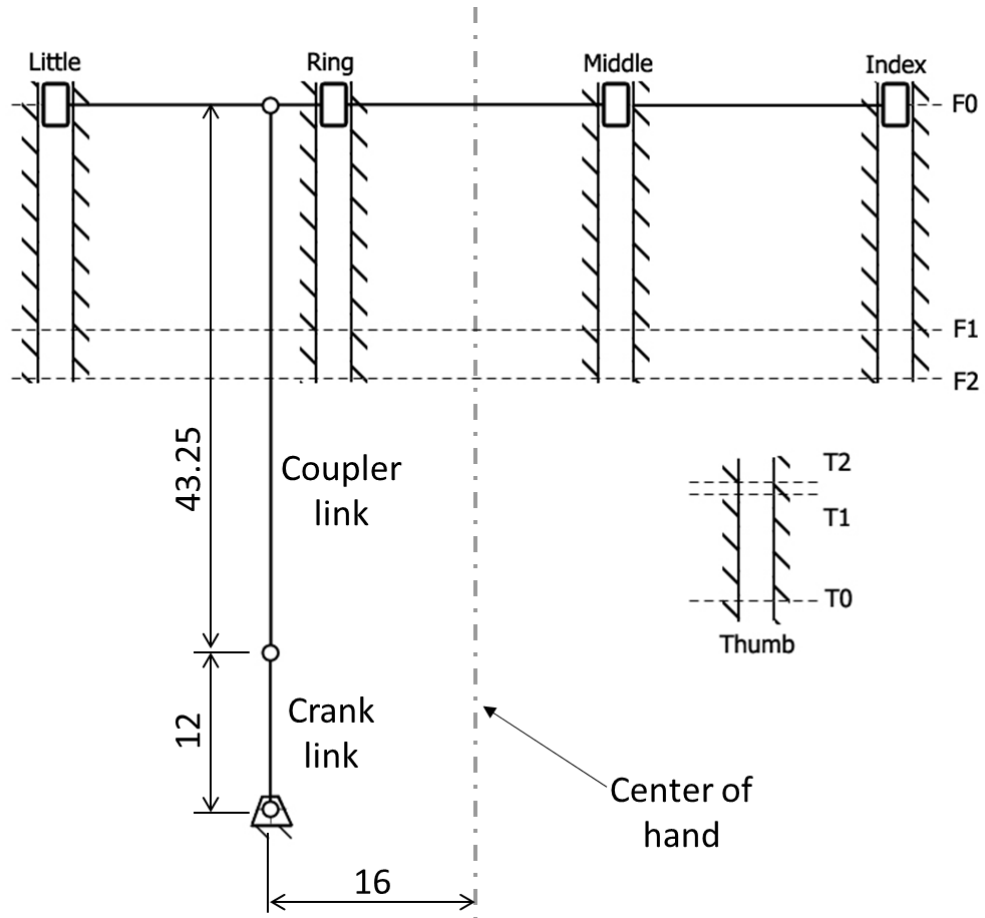


รูปที่ 4.12 ตำแหน่งของข้อต่อแบบเลื่อน (Prismatic Joint) ของท่าจับต่างๆในระนาบฝ่ามือ

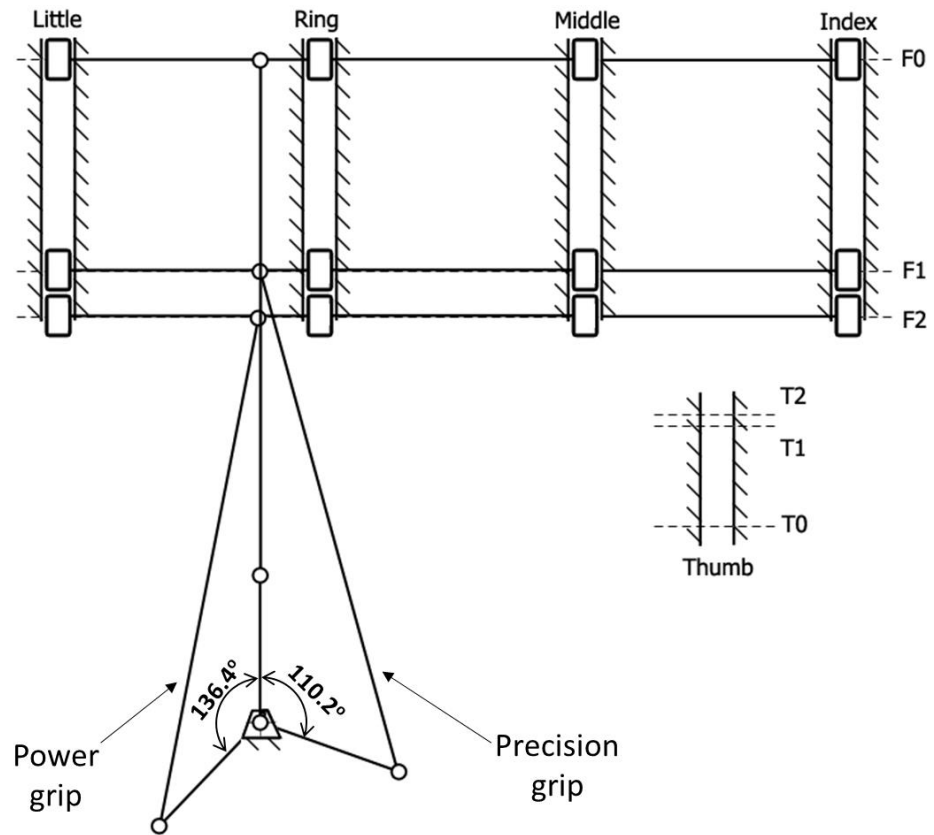
การสังเคราะห์กลไกขับเคลื่อนนิ้วทั้งสี่มีขั้นตอนคล้ายการสังเคราะห์กลไกของมือเทียมต้นแบบดังหัวข้อ 3.2.2 เริ่มจากกำหนดขนาดเบื้องต้นของกลไกโดยใช้ข้อมูลจากมือเทียมต้นแบบ กลไกขับเคลื่อนนิ้วทั้งสี่มีลักษณะเป็นกลไก Crank-slider มีลักษณะการเคลื่อนที่เหมือนกันทั้งสองทิศ การหมุน ความยาวของชิ้นส่วนส่งผลต่อมุมในการหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้า มุมการหมุนนี้ต้องมีค่าไม่เกิน 180 องศาเพื่อไม่ให้ข้อต่อแบบเลื่อนเคลื่อนที่ย้อนกลับ แรงดึงข้อต่อแบบเลื่อนของกลไกนี้ขึ้นอยู่กับขนาดและมุมการหมุนของชิ้นส่วนขับเคลื่อน ทำการออกแบบโดยเลือกขนาดของกลไกที่ให้แรงดึง



ได้สูงและมีขนาดที่เหมาะสมกับพื้นที่ภายในมือเทียม ขนาดเบื้องต้นของชิ้นส่วนกลไกนิ้วทั้งสี่มีค่าดังรูปที่ 4.13 ชิ้นส่วนข้อเหวี่ยงมีความยาว 12 มิลลิเมตร ชิ้นส่วนคัปเปิลอร์มีความยาว 43.25 มิลลิเมตร และจุดหมุนของกลไกมีระยะห่างจากกึ่งกลางมือ(เส้นกึ่งกลางระหว่างนิ้วกลางและนิ้วนาง) 16 มิลลิเมตร มุมการหมุนของกลไกไปยังตำแหน่งท่าต่างๆมีค่าดังรูปที่ 4.14 มีค่า 110.2 องศาและ 136.4 องศาในท่าจับแบบแม่นยำและท่าจับแบบกำมือตามลำดับ



รูปที่ 4.13 ขนาดของกลไกขับเคลื่อนนิ้วทั้งสี่



รูปที่ 4.14 มุมการหมุนของกลไกขับเคลื่อนนิ้วทั้งสี่มายังตำแหน่งท่าต่างๆ

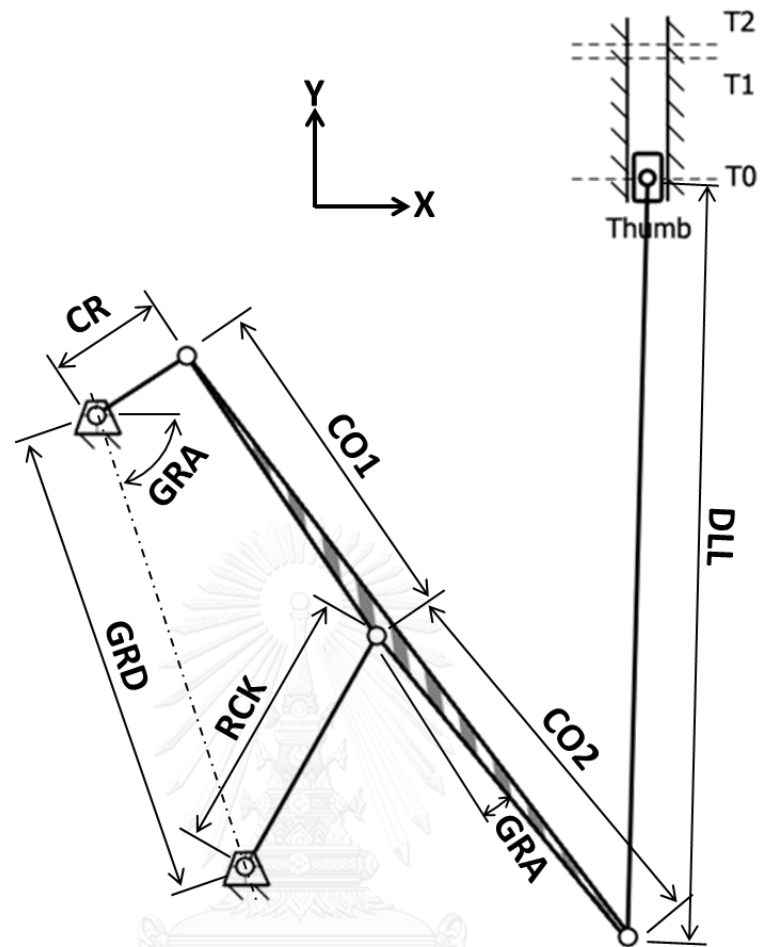
#### 4.2.3 การสังเคราะห์กลไกขับเคลื่อนนิวโป่งด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

จากการสร้างมือเทียมต้นแบบดังหัวข้อ 3.4 กลไกขับเคลื่อนนิวโป่งของมือเทียมต้นแบบไม่สามารถเคลื่อนที่มายังตำแหน่งเป้าหมายที่ต้องการพอดีได้เนื่องจากใช้วิธีการกำหนดขนาดของชิ้นส่วนของกลไกอย่างคร่าวๆ กลไกของมือเทียมสำหรับใช้งานจริงนี้จึงจำเป็นต้องทำการหาขนาดของชิ้นส่วนต่างๆอย่างละเอียดเพื่อให้กลไกสามารถเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการในท่าต่างๆได้โดยมีความผิดพลาดน้อยที่สุด การใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการช่วยหาขนาดกลไกจึงถูกนำมาใช้เพื่อสังเคราะห์กลไกขับเคลื่อนนิวโป่งของมือเทียม

กลไกขับเคลื่อนนิวโป่งสามารถสังเคราะห์ได้โดยใช้ตำแหน่งของข้อต่อแบบเลื่อนและมุมการหมุนของกลไกขับเคลื่อนนิวโป่งทั้งสี่ดังหัวข้อ 4.2.1 และ 4.2.2 การสังเคราะห์กลไกนี้ใช้ค่าเริ่มต้นจากกลไกมือเทียมต้นแบบที่ได้ออกแบบไว้ในหัวข้อ 3.2.2 โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ทำการปรับเปลี่ยนขนาดกลไกโดยเปลี่ยนตัวแปรต่างๆที่สำคัญภายใต้ข้อบังคับ (Constraint) ต่างๆ คำนวณความผิดพลาดของตำแหน่งที่เกิดจากการขับเคลื่อนกลไกแล้ววนกลับไปปรับเปลี่ยนกลไก ทำซ้ำการสังเคราะห์กลไกจนได้กลไกที่มีความผิดพลาดจากตำแหน่งที่ต้องการน้อยที่สุดและมีรูปแบบความหน่วงของนิวโป่งที่ใช้งานได้

กลไกขับเคลื่อนนิวโป่งถูกสังเคราะห์โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB (Matrix Laboratory) หาขนาดของกลไก โดยกำหนดตัวแปรต่างๆซึ่งส่งผลต่อขนาดและการเคลื่อนที่ของกลไกดังรูปที่ 4.15 ตัวแปร CR, CO1, RCK, และ GRD คือขนาดของชิ้นส่วนข้อเหวี่ยง (Crank), คัปเปิลเลอร์ (Coupler), รอคเกอร์ (Rocker), และกราวด์ (Ground) ตามลำดับ ตัวแปร CO2 คือระยะจากข้อต่อระหว่างชิ้นส่วนคัปเปิลเลอร์และรอคเกอร์ไปยังจุดคัปเปิลเลอร์ ตัวแปร GRA และ COA คือมุมที่ชิ้นส่วนกราวด์กระทำกับแกนอ้างอิง X และมุมที่จุดคัปเปิลเลอร์กระทำกับชิ้นส่วนคัปเปิลเลอร์ตามลำดับ ตัวแปรข้างต้นถูกกำหนดขอบเขตเริ่มต้นสำหรับใช้คำนวณด้วยโปรแกรมสังเคราะห์กลไกดัง

ตารางที่ 4.1 ค่าเบื้องต้นนี้ได้มาจากการสร้างกลไกขนาดต่างๆอย่างคร่าวๆเพื่อดูกลไกที่มีความเป็นไปได้ในการนำมาใช้งาน โดยดูจากขนาดของกลไก, ตำแหน่งและรูปร่างของเส้นคัปเปิลเลอร์ของกลไก, และตำแหน่งของข้อต่อต่างๆ สำหรับตัวแปร DLL นั้นไม่ถูกกำหนดขอบเขตเนื่องจากเป็นตัวแปรตามของกลไกซึ่งหากกำหนดให้จุดคัปเปิลเลอร์ในตำแหน่งเริ่มต้น(ท่าแบ่มือ) ของกลไกอยู่ในตำแหน่งต่ำสุด ตัวแปร DLL จะมีค่าเพียงค่าเดียว



รูปที่ 4.15 ตัวแปรในการออกแบบกลไกขับเคลื่อนนิ้วโป้ง

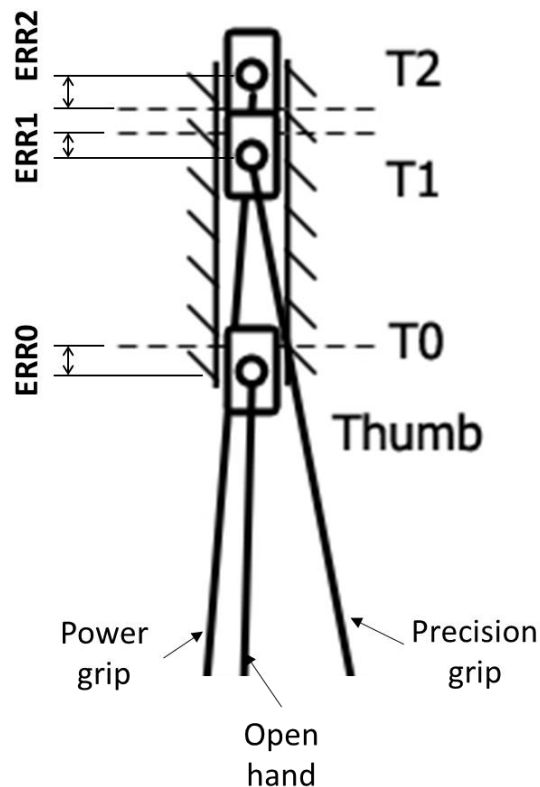
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ตารางที่ 4.1 ขอบเขตเริ่มต้นของตัวแปรในการสังเคราะห์กลไกขับเคลื่อนนิ้วโป้ง

Name (Unit)	Lower Limit	Upper Limit
CR (mm)	7	9
CO1 (mm)	15.4	27
RCK (mm)	18.2	30.6
GRD (mm)	25.2	39.6
CO2 (mm)	19.6	32.4
GRA (deg)	60	72
COA (deg)	-15	15

การสังเคราะห์หลักเกณฑ์การกำหนดตัวแปรเป้าหมายทั้งหมดสองตัวแปรคือ ความผิดพลาดของตำแหน่งข้อต่อแบบเลื่อนและค่าความหน่วงของกลไกนี้ไว้มีรายละเอียดดังนี้

ค่าความผิดพลาดของตำแหน่งข้อต่อแบบเลื่อน (Position error) คือ ระยะห่างระหว่างข้อต่อแบบเลื่อนกับตำแหน่งเป้าหมายในการออกแบบเมื่อกลไกหมุนไปยังท่าต่างๆดังรูปที่ 4.16 ระยะห่างระหว่างข้อต่อแบบเลื่อนเมื่อกลไกอยู่ในตำแหน่งท่าแบ่มือ, ท่าจับแบบแม่นยำ, และท่าจับแบบกำมือ กับตำแหน่งเป้าหมาย T0, T1, และ T2 มีค่าเท่ากับ ERR0, ERR1, และ ERR2 ตามลำดับ ค่าความผิดพลาดทั้งสามตำแหน่งนี้ถูกนำมาคำนวณเป็นตัวแปรค่าเดียวคือค่าความผิดพลาดของข้อต่อแบบเลื่อน (Position error) ด้วยวิธีการหารากของผลรวมยกกำลังสอง (Root of Sum Squared) ดังสมการที่ 4.1

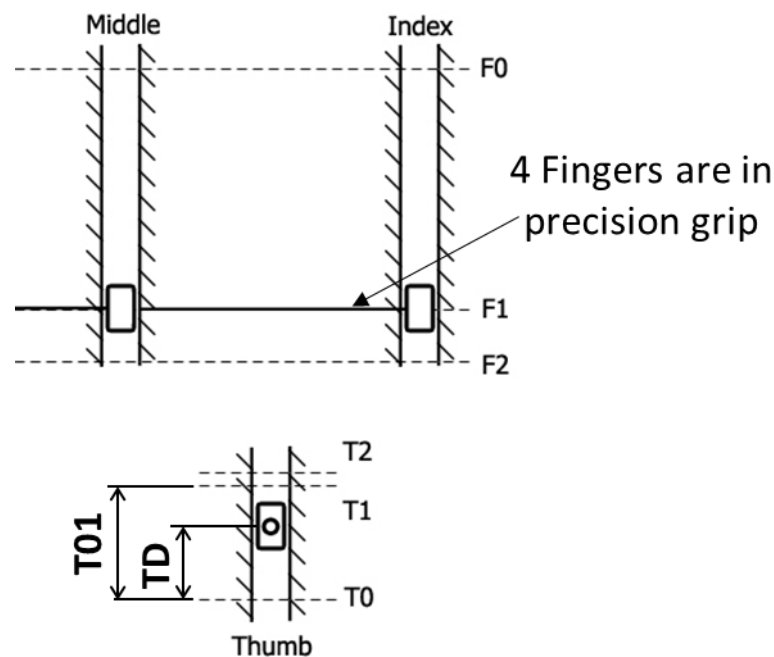


รูปที่ 4.16 ค่าความผิดพลาดของตำแหน่งข้อต่อแบบเลื่อน (Position error)

$$Position\ error = \sqrt{(ERR0)^2 + (ERR1)^2 + (ERR2)^2}$$

สมการที่ 4.1

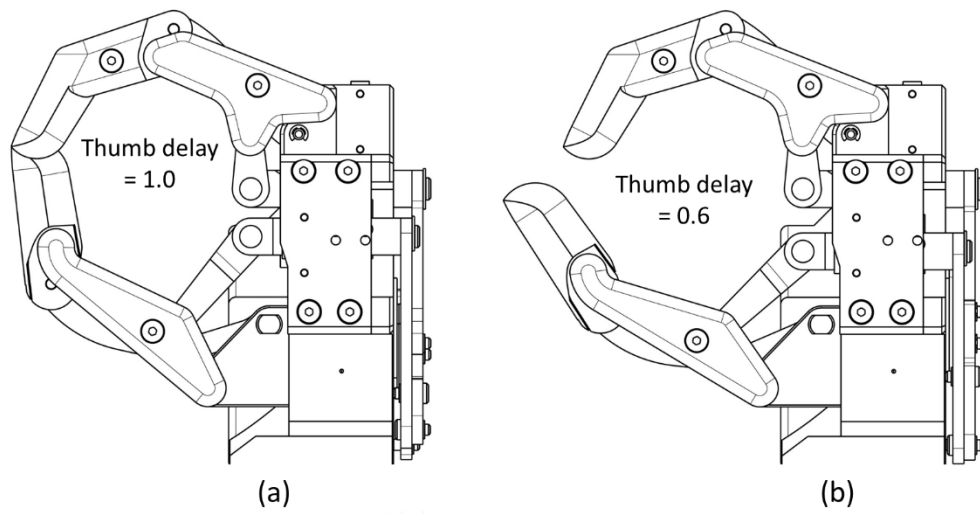
ค่าความหน่วงของกลไกนิ้วโป้ง คือ ตัวแปรแสดงถึงความหน่วงของกลไกนิ้วโป้งเมื่อเคลื่อนที่ไปยังท่ากำมือซึ่งต้องออกแบบให้กลไกนิ้วมือทั้งสองสามารถงอเข้ามาได้ก่อนโดยไม่ชนกับนิ้วโป้ง แล้วนิ้วโป้งจึงงอตามเข้ามาเพื่อสัมผัสกับด้านหลังของนิ้วชี้และนิ้วกลาง ค่าความหน่วงนี้เป็นค่าที่กำหนดขึ้นโดยใช้ตำแหน่งของข้อต่อแบบเลื่อนของนิ้วโป้งในขณะที่กลไกเคลื่อนที่ไปยังท่าจับแบบกำมือแต่หยุดเมื่อตำแหน่งกลไกนิ้วทั้งสองอยู่ในท่าจับแบบแม่นยำ ดังรูปที่ 4.17 ข้อต่อแบบเลื่อนของนิ้วมือทั้งสองอยู่ในตำแหน่ง F1 ระหว่างการเคลื่อนที่จากตำแหน่ง F0 ไปยัง F2 ตัวแปร TD คือระยะจากข้อต่อแบบเลื่อนของนิ้วโป้งไปยังตำแหน่ง T0 ตัวแปร T01 คือระยะจากตำแหน่ง T0 ไปยังตำแหน่ง T1 การคำนวณค่าความหน่วงนิ้วโป้ง (Thumb delay) มีรายละเอียดดังสมการที่ 4.2 หากค่าความหน่วงมีค่า 1.0 ปลายนิ้วโป้งจะสัมผัสกับปลายนิ้วชี้และนิ้วกลางพอดีดังรูปที่ 4.18 (a) หากค่าความหน่วงมีค่าน้อยกว่า 1.0 กลไกนิ้วโป้งจะงอช้ากว่านิ้วทั้งสองดังรูปที่ 4.18 (b) กลไกนิ้วมือมีค่าความหน่วงนิ้วโป้ง 0.6 จึงมีช่องว่างให้นิ้วทั้งสองเคลื่อนที่ผ่านไปก่อนได้



รูปที่ 4.17 ตัวแปรสำหรับคำนวณค่าความหน่วงของกลไกนิ้วโป้ง

$$\text{Thumb delay} = \frac{TD}{T01}$$

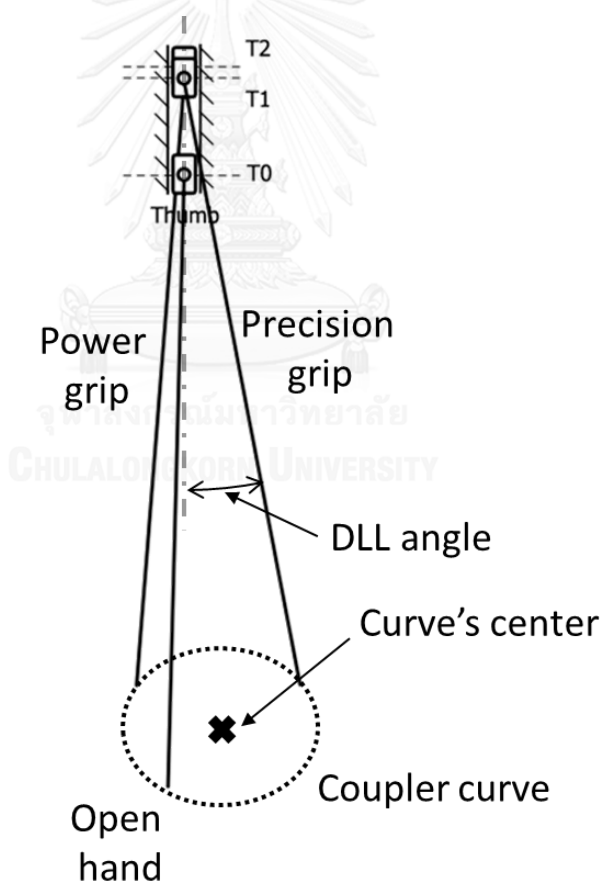
สมการที่ 4.2



รูปที่ 4.18 กลไกนิ้วที่มีค่าความหน่วงนิ้วโป้ง (Thumb delay) ต่างๆ (a) ค่าความหน่วง = 1.0, (b) ค่าความหน่วง = 0.6

นอกจากนี้การสังเคราะห์กลไกยังมีเงื่อนไขอื่น ๆ (Constraints) ที่ต้องกำหนดในโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อตัดกลไกที่ไม่ผ่านเงื่อนไขเหล่านี้ออกไป เช่น ตำแหน่งที่ไกลสุดของจุดคัปเปิลอร์และเส้นคัปเปิลอร์ควรอยู่ในพื้นที่ของมือ, ชิ้นส่วนเชื่อมต่อกับข้อต่อแบบเลื่อนควรทำมุมกับเส้นทางการเลื่อนให้น้อยที่สุด, และกลไกต้องสามารถเคลื่อนที่ได้โดยไม่เกิดการขัดกัน เป็นต้น ข้อบังคับต่างๆ มีรายละเอียดดังนี้

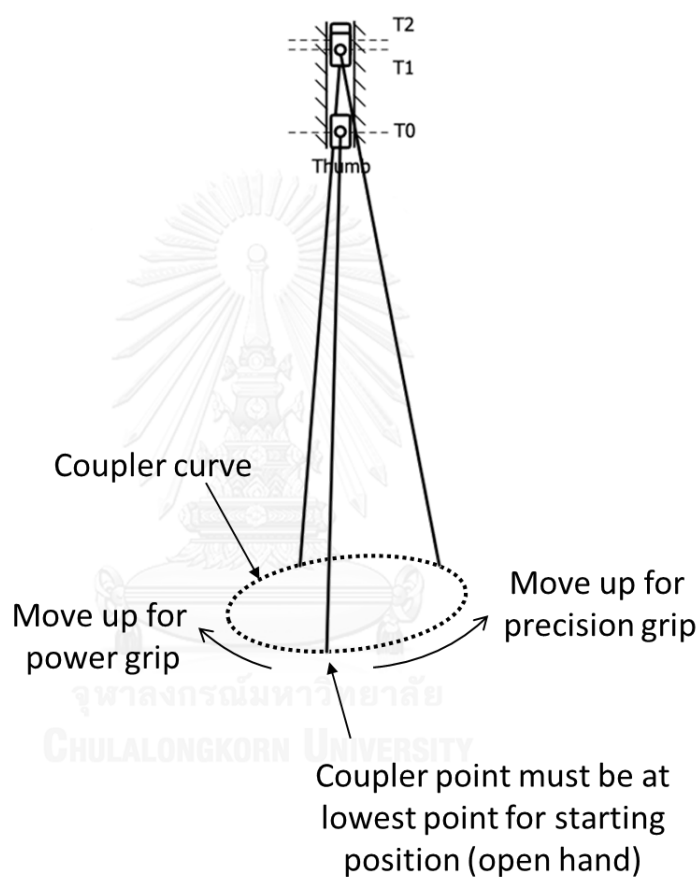
เส้นคัปเปิลอร์ (Coupler curve) ควรจะมีตำแหน่งอยู่ต่ำกว่าข้อต่อแบบเลื่อน (Prismatic joint) ของนิ้วโป้ง เนื่องจากกลไกหนึ่งวงใช้เส้นทางการเดินของจุดคัปเปิลอร์ในการสร้างรูปแบบการเคลื่อนที่ หากชิ้นส่วนที่เชื่อมต่อกับข้อต่อแบบเลื่อนมีทิศไม่ขนานกับทิศทางการเคลื่อนที่ของข้อต่อจะทำให้ส่งแรงผ่านไปยังนิ้วมือได้น้อยลง จึงกำหนดให้เส้นทางการเดินของจุดคัปเปิลอร์มีจุดศูนย์กลางต่ำกว่าข้อต่อแบบเลื่อนของนิ้วโป้งดังรูปที่ 4.19 เพื่อให้มุมระหว่างชิ้นส่วนเชื่อมต่อกับเส้นทางการเคลื่อนที่ของข้อต่อแบบเลื่อน (DLL Angle) มีค่าน้อยกว่า 30 องศา



รูปที่ 4.19 เส้นคัปเปิลอร์และจุดศูนย์กลางควรอยู่ต่ำกว่าข้อต่อแบบเลื่อนเพื่อให้ชิ้นส่วนเชื่อมต่อกับข้อต่อน้อยที่สุด

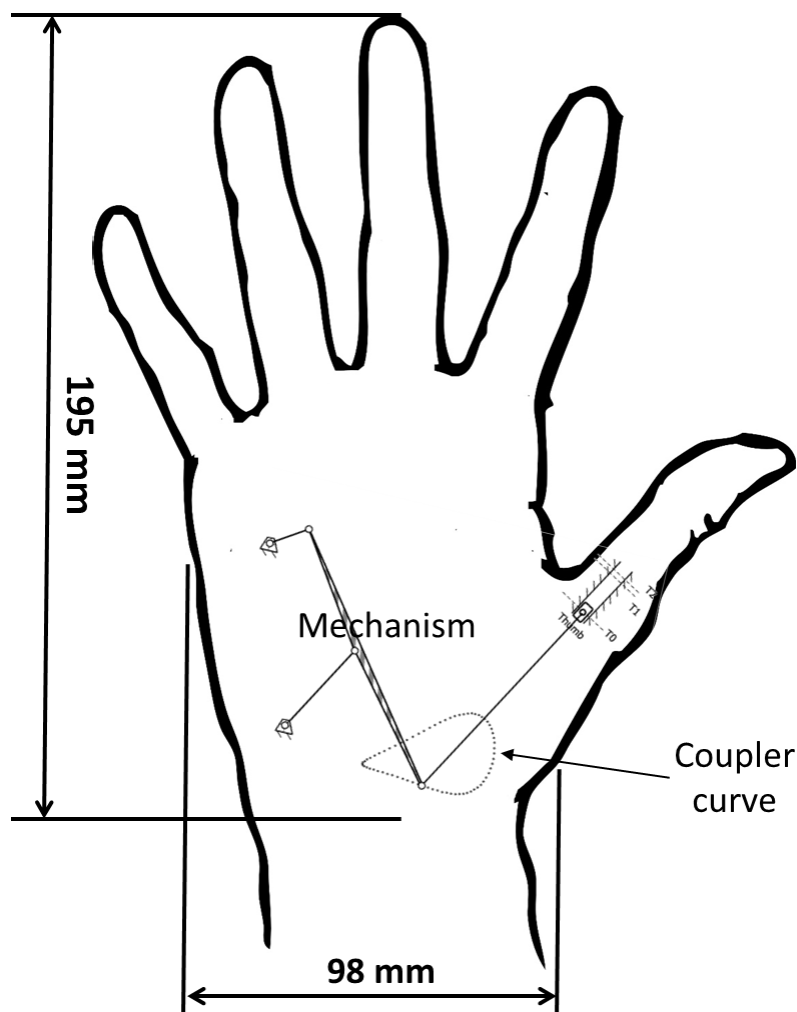


เส้นคัปเปิลอร์ (Coupler curve) ทำให้การเคลื่อนที่ของข้อต่อแบบเลื่อนมีทิศขึ้นทั้งสองทิศทางการหมุนกลไก เพื่อให้ข้อต่อแบบเลื่อนของกลไกเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการ ชิ้นส่วนเชื่อมต่อจากจุดคัปเปิลอร์จำเป็นต้องเคลื่อนที่ขึ้นด้านบนเมื่อกลไกหมุนไปทั้งสองทิศจากตำแหน่งเริ่มต้นดังรูปที่ 4.20 จุดคัปเปิลอร์มีตำแหน่งด้านล่างสุดในท่าแบมือซึ่งเป็นท่าเริ่มต้นและเลื่อนขึ้นเมื่อกลไกหมุนไปยังท่าจับแบบแม่นยำและท่าจับแบบกำมือเพื่อให้ข้อต่อแบบเลื่อนเคลื่อนที่จากตำแหน่ง T0 ขึ้นไปยังตำแหน่ง T1 และ T2 ได้



รูปที่ 4.20 เส้นทางคัปเปิลอร์มีตำแหน่งเริ่มต้นอยู่ด้านล่างสุดและเคลื่อนที่ขึ้นทั้งสองทิศการหมุนกลไก

กลไกและเส้นคัปเปิลอร์ (Coupler curve) มีตำแหน่งอยู่ภายในพื้นที่ของมือเทียม เนื่องจากการออกแบบมือเทียมจำเป็นต้องออกแบบให้กลไกมือเทียมทั้งหมดสามารถประกอบอยู่ในพื้นที่จำกัดของมือเทียมได้ จึงกำหนดให้กลไกทั้งหมดรวมถึงเส้นคัปเปิลอร์อยู่ภายในพื้นที่ฝ่ามืองดรูปที่ 4.21 โดยใช้ข้อมูลจากขนาดมือของคนไทย มีความยาวจากปลายนิ้วถึงข้อมือ 195 มิลลิเมตรและมีความกว้างฝ่ามือ 98 มิลลิเมตร

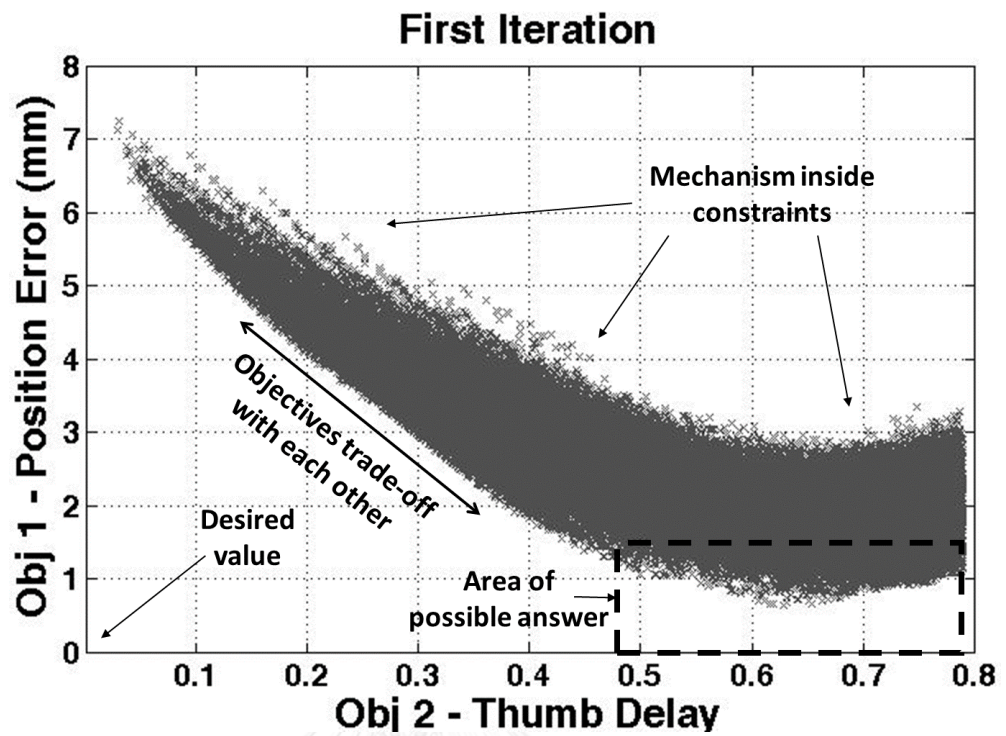


รูปที่ 4.21 กลไกและเส้นคัปเปิลอร์อยู่ภายในพื้นที่จำกัดของมือเทียม

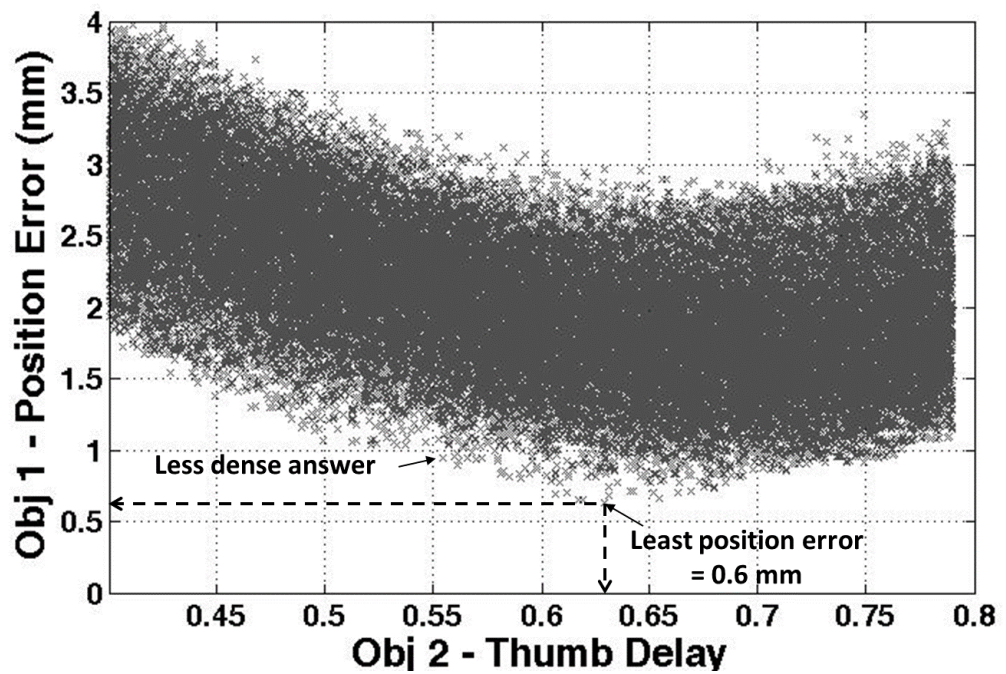
จากการกำหนดตัวแปรเริ่มต้น (Starting parameter), ตัวแปรเป้าหมาย (Objective), และข้อบังคับต่างๆ (Constraints) ข้างต้นแล้ว จึงทำการสังเคราะห์กลไกด้วยการวนทำซ้ำค่าขนาดชิ้นส่วนต่างๆของกลไกขับเคลื่อนนิ้วโป้ง โดยหากกลไกที่มีค่าตัวแปรเป้าหมายคือค่าความผิดพลาดของข้อต่อแบบเลื่อนและค่าความหน่วงของกลไกนิ้วโป้งให้มีค่าน้อยที่สุดและสอดคล้องกับเงื่อนไขข้างต้น

#### 4.2.4 ผลการสังเคราะห์กลไกด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ MATLAB (Matrix Laboratory) ถูกนำมาใช้สร้างกลไกจากค่าเริ่มต้นของขนาดชิ้นส่วนต่างๆ, คำนวณหากลไกที่ผ่านข้อบังคับต่างๆ, และคำนวณหาค่าตัวแปรเป้าหมายของกลไกนั้นๆดังหัวข้อ 4.2.3 การสังเคราะห์กลไกครั้งที่หนึ่งทำการแบ่งค่าตัวแปรขนาดของชิ้นส่วนดังรูปที่ 4.15 ให้อยู่ภายในขอบเขตที่กำหนดดังตารางที่ 4.1 แล้วนำมาสร้างกลไกที่เป็นไปได้ทั้งหมดประมาณ 20 ล้านกลไก ตัดกลไกที่ไม่ผ่านข้อบังคับต่างๆออกแล้วนำมาคำนวณหาค่าตัวแปรเป้าหมายได้ผลการคำนวณดังรูปที่ 4.22 เป้าหมายของการออกแบบคือหากลไกที่มีค่าตัวแปรเป้าหมายทั้งสองค่าเข้าใกล้ค่าศูนย์ที่สุด พบว่าค่าตัวแปรเป้าหมายของกลไกมีลักษณะแปรผกผันกัน การเลือกกลไกจึงต้องเลือกกลไกที่ให้คำตอบทั้งสองค่าที่เหมาะสม เนื่องจากค่าความคลาดเคลื่อนของข้อต่อแบบเลื่อน (Position error) เป็นค่าที่ส่งผลต่อตำแหน่งของนิ้วมือโดยตรง จึงกำหนดให้กลไกที่ใช้งานได้ควรจะมีค่าความคลาดเคลื่อนนี้น้อยกว่า 1.5 มิลลิเมตรนับเป็น 10 เปอร์เซ็นต์จากระยะการเคลื่อนที่ของข้อต่อแบบเลื่อนทั้งหมดประมาณ 15 มิลลิเมตร ทำการขยายรูปในบริเวณของคำตอบที่เป็นไปได้ (Area of possible answer) เพื่อพิจารณาการคำนวณครั้งถัดไปดังรูปที่ 4.23 กลไกที่มีค่าความคลาดเคลื่อนของข้อต่อน้อยที่สุดมีค่าประมาณ 0.6 มิลลิเมตรและมีค่าความหน่วงนิ้วโป้งประมาณ 0.63 แต่คำตอบในบริเวณนี้มีลักษณะกระจายและเบาบางกว่าบริเวณอื่น ทำให้สันนิษฐานได้ว่าควรจะมีคำตอบอื่นในบริเวณนี้มากกว่าที่เห็น จึงกำหนดตัวแปรขนาดของชิ้นส่วนต่างๆใหม่โดยใช้กลไกที่มีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุดข้างต้นเป็นค่ากึ่งกลางของขอบเขตกลไกและแบ่งค่าให้มีความละเอียดยิ่งขึ้นในการสังเคราะห์กลไกครั้งที่สอง

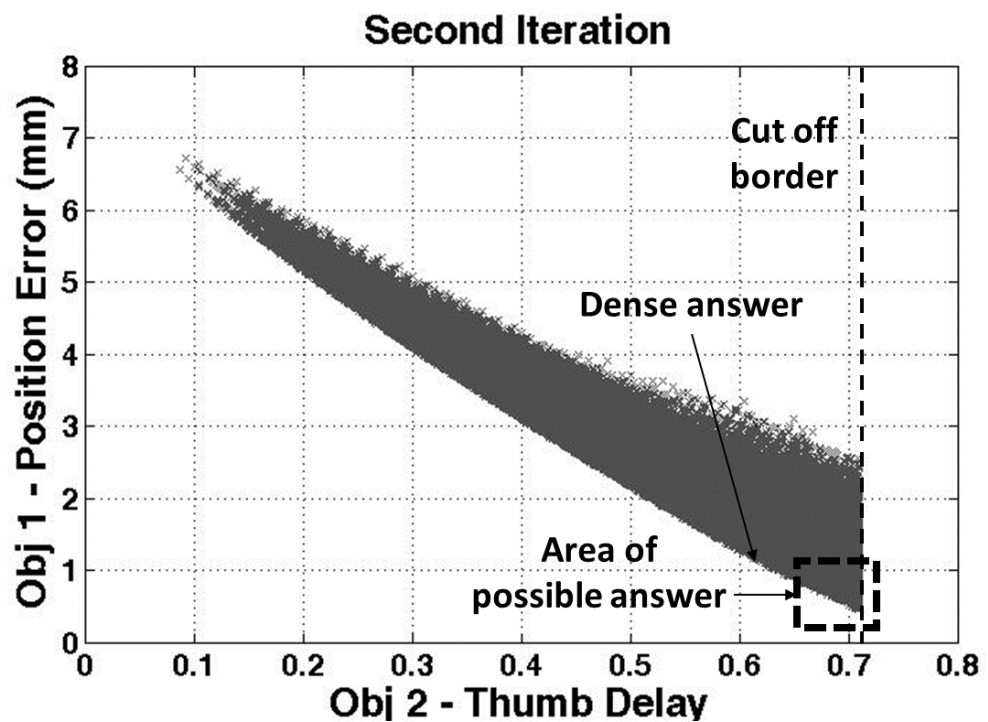


รูปที่ 4.22 ผลการสังเคราะห์กลไกครั้งที่หนึ่ง

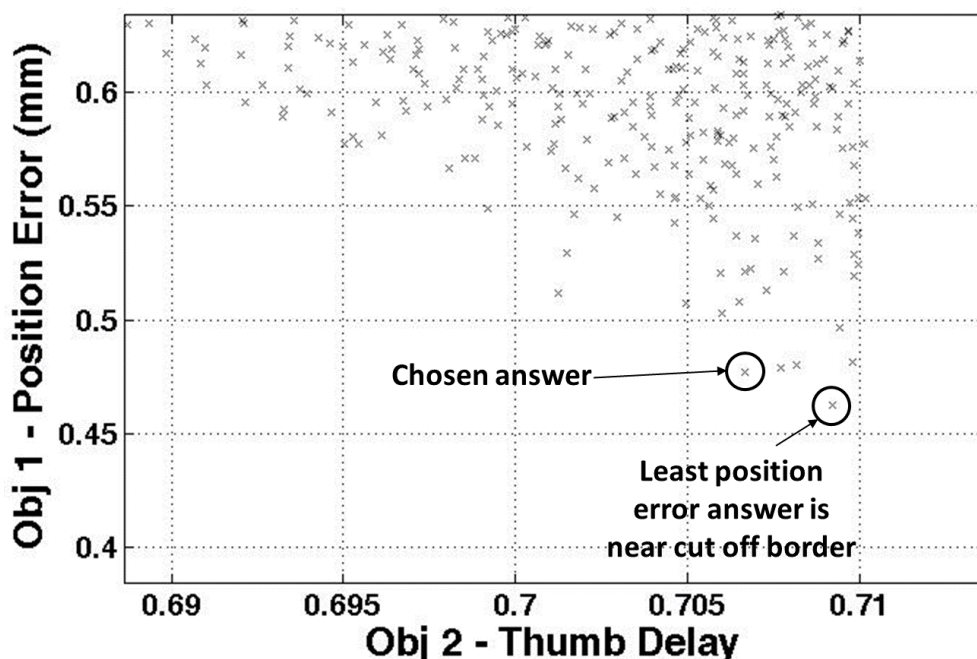


รูปที่ 4.23 ภาพขยายของผลการสังเคราะห์กลไกครั้งที่หนึ่ง

การสังเคราะห์กลไกครั้งที่สองมีผลดังรูปที่ 4.24 พบว่าค่าตัวแปรเป้าหมายของกลไกมีความหนาแน่นมากขึ้นและมีกลไกที่มีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยลงเกิดขึ้น กลไกที่มีค่าความหน่วงของนิ้วโป้งน้อยกว่า 0.71 ถูกตัดออกไปเนื่องจากเป็นค่าที่สูงที่สุดที่นิ้วมือทั้งสองจะสามารถเคลื่อนที่ผ่านนิ้วโป้งได้ โดยไม่เกิดการชนกัน ทำการขยายภาพในบริเวณที่กลไกมีค่าความคลาดเคลื่อน (Position error) น้อยที่สุดดังรูปที่ 4.25 พบว่ากลไกที่มีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดมีค่าความหน่วงติดกับขอบที่ถูกตัดออกไป เพื่อเป็นการเผื่อให้ค่าความหน่วงของนิ้วโป้งมีค่าน้อยกว่าขอบเขตที่ถูกตัดออกไปมากกว่านี้จึงทำการเลือกใช้กลไกที่มีค่าความหน่วงน้อยลงและมีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำเป็นอันดับสองจากกลไกทั้งหมด กลไกที่เลือกมีค่าความคลาดเคลื่อนของข้อต่อแบบเลื่อนเท่ากับ 0.52 มิลลิเมตรและมีค่าความหน่วงนิ้วโป้งเท่ากับ 0.701

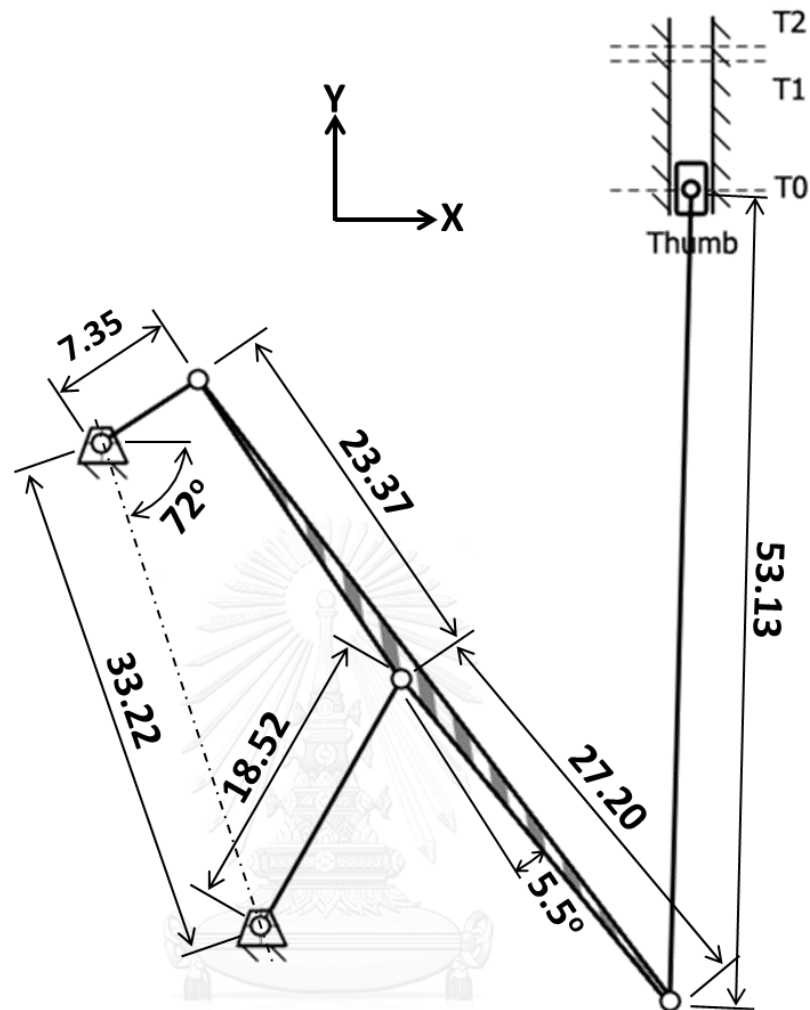


รูปที่ 4.24 ผลการสังเคราะห์กลไกครั้งที่สอง



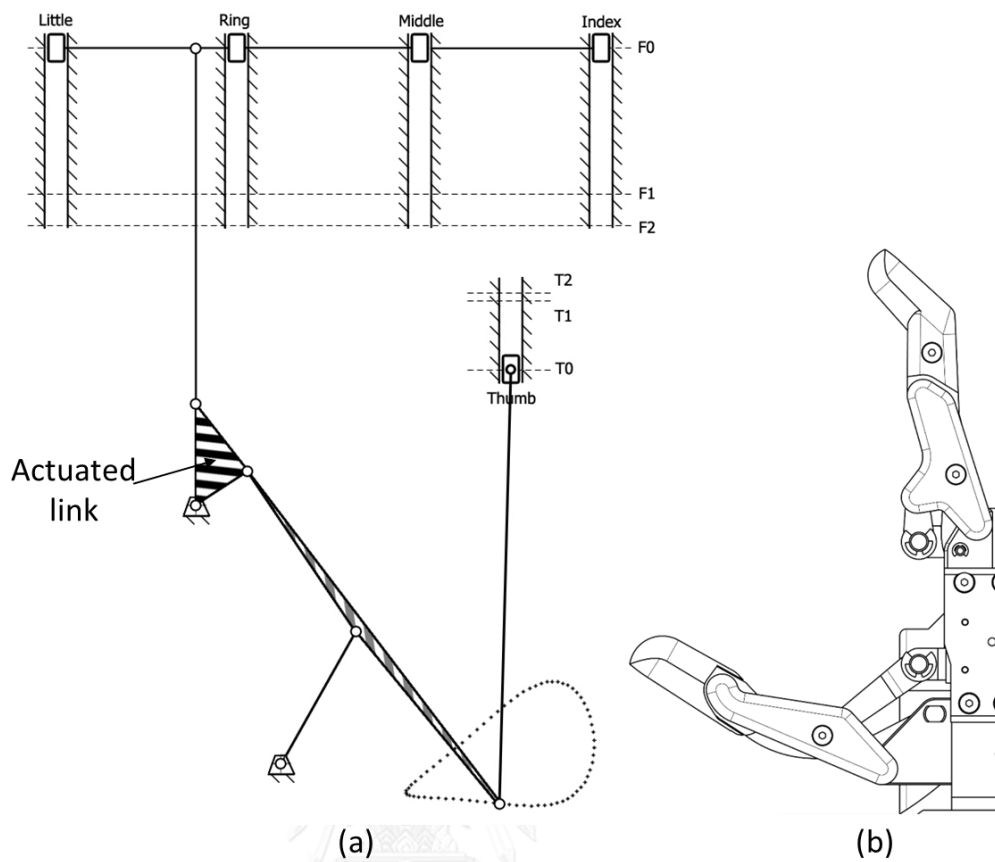
รูปที่ 4.25 ภาพขยายของการสังเคราะห์กลไกครั้งที่สองและกลไกคำตอบที่เลือกใช้งาน

กลไกขับเคลื่อนนิ้วโป้งที่ได้จากการสังเคราะห์ข้างต้นมีลักษณะการเคลื่อนที่ที่ทำให้นิ้วมือสามารถเคลื่อนที่เป็นท่าแบมือ, ท่าจับแบบแม่นยำ, และท่าจับแบบกำมือได้โดยไม่ติดขัด กลไกดังกล่าวมีขนาดและลักษณะดังรูปที่ 4.26 ความยาวของชิ้นส่วนข้อเหวี่ยง, คัปเปิลอร์, รอคเกอร์, และกราวด์มีค่า 7.35, 23.37, 18.52, และ 33.22 มิลลิเมตรตามลำดับ ระยะจากข้อต่อระหว่างชิ้นส่วนคัปเปิลอร์และรอคเกอร์ไปยังจุดคัปเปิลอร์มีค่า 27.20 มิลลิเมตร ชิ้นส่วนเชื่อมต่อมีความยาว 53.13 มิลลิเมตร มุมที่ชิ้นส่วนกราวด์กระทำกับแกนอ้างอิง X และมุมที่จุดคัปเปิลอร์กระทำกับชิ้นส่วนคัปเปิลอร์มีค่า 72 และ 5.5 องศาตามลำดับ



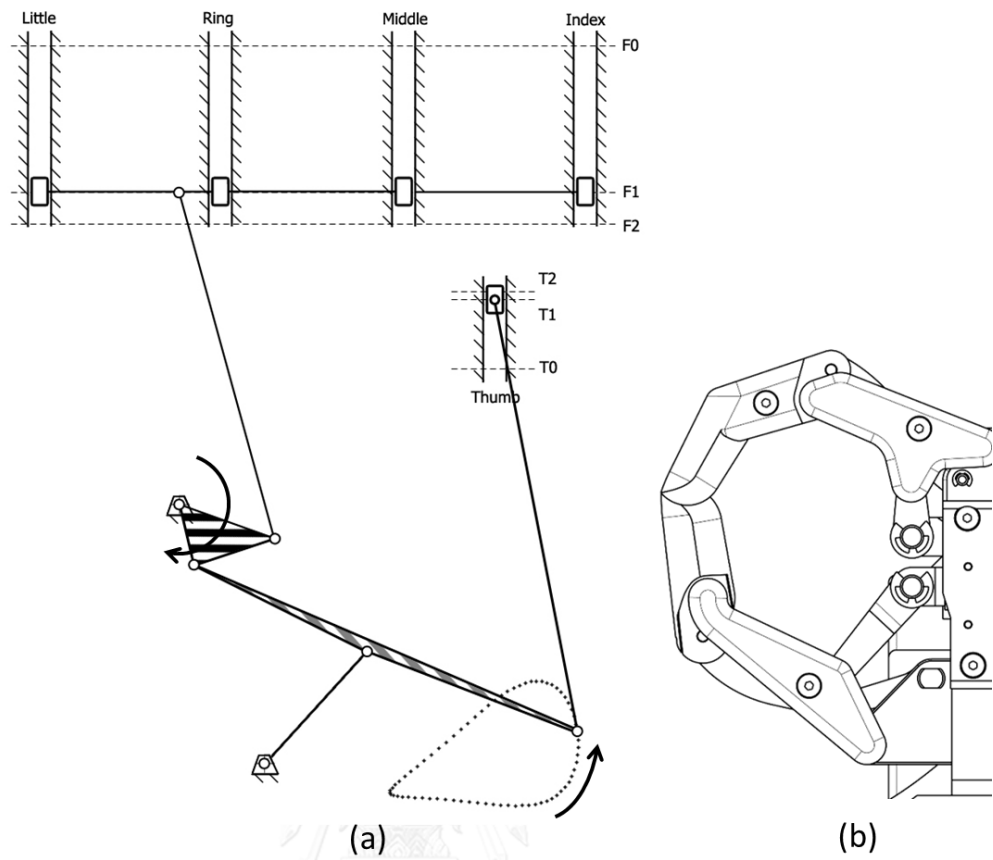
รูปที่ 4.26 ขนาดกลไกขับเคลื่อนนิ้วโป้งจากการสังเคราะห์กลไกด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

กลไกขับเคลื่อนนิ้วโป้งและกลไกขับเคลื่อนนิ้วมือทั้งสี่จากการสังเคราะห์ถูกนำมาประกอบรวมกันเป็นกลไกขับเคลื่อนมือเทียม (Transmission mechanism) ดังรูปที่ 4.27 (a) โดยมีจุดหมุนของชิ้นส่วนข้อเหวี่ยงร่วมกัน ชิ้นส่วนข้อเหวี่ยงทำมุมกันเพื่อให้ข้อต่อแบบเลื่อนของนิ้วมือและนิ้วโป้งอยู่ในตำแหน่ง F0 และ T0 พอดีในท่าแบ่มือและเชื่อมติดเป็นชิ้นเดียวกัน เรียกชิ้นส่วนนี้ว่าชิ้นส่วนขับเคลื่อน (Actuated link) กลไกนิ้วมือในท่าแบ่มือมีลักษณะดังรูปที่ 4.27 (b) เมื่อชิ้นส่วนขับเคลื่อนหมุนทิศตามเข็มนาฬิกาดังรูปที่ 4.28 (a) เพื่อเคลื่อนที่เป็นท่าจับแบบแมนย่า ข้อต่อแบบเลื่อนของนิ้วมือทั้งสี่และนิ้วโป้งจะเคลื่อนที่มายังตำแหน่ง F1 และ T1 ตามลำดับส่งผลให้กลไกนิ้วมือเคลื่อนที่ปลายนิ้วมาสัมผัสกันดังรูปที่ 4.28 (b) และเมื่อชิ้นส่วนขับเคลื่อนหมุนทิศทวนเข็มนาฬิกาดังรูปที่ 4.29 (a) เพื่อเคลื่อนที่เป็นท่าจับแบบกำมือ ข้อต่อแบบเลื่อนของนิ้วมือทั้งสี่และนิ้วโป้งจะเคลื่อนที่มายังตำแหน่ง F2 และ T2 ตามลำดับโดยนิ้วโป้งจะเกิดความหน่วงเนื่องจากเส้นทางการเคลื่อนที่ของเส้นคัปเปิลอร์ ส่งผลให้นิ้วมือทั้งสี่สามารถงอเข้ามาก่อนได้โดยไม่เกิดการชนกันดังรูปที่ 4.29 (b)

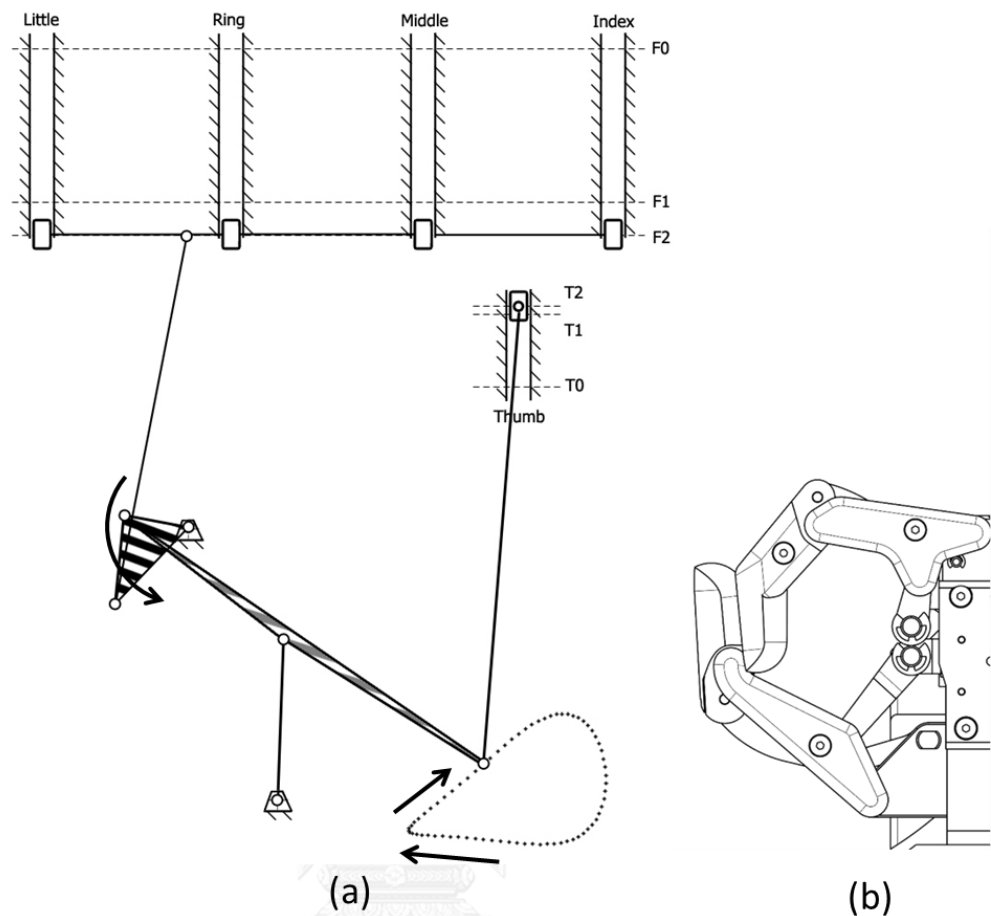


รูปที่ 4.27 กลไกข้อมือเทียม (Transmission mechanism) ในท่าแบมือ  
 (a) กลไกในระนาบฝ่ามือ, (b) กลไกนิ้วมือจากมุมมองด้านข้างฝ่ามือ





รูปที่ 4.28 กลไกขั้บมือเทียม (Transmission mechanism) ในท่าจับแบบแมนยำ  
 (a) กลไกในระนาบฝ่ามือ, (b) กลไกนิ้วมือจากมุมมองด้านข้างฝ่ามือ



รูปที่ 4.29 กลไกข้อมือเทียม (Transmission mechanism) ในท่าจับแบบกำมือ (a) กลไกในระนาบฝ่ามือ, (b) กลไกนิ้วมือจากมุมมองด้านข้างฝ่ามือ

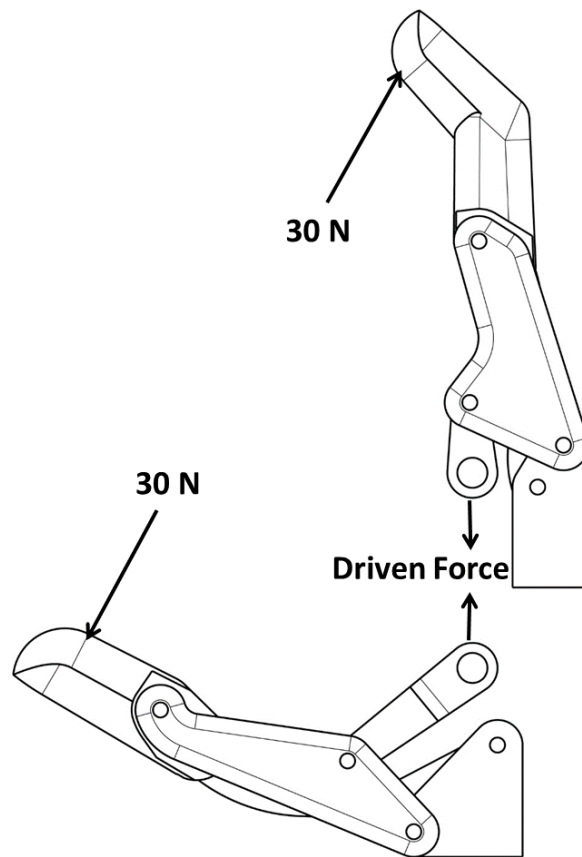
#### 4.3 การคำนวณแรงภายในกลไกและการเลือกมอเตอร์ไฟฟ้าและเกียร์ทด

จากการสังเคราะห์กลไกข้อมือเทียมในหัวข้อ 4.2 กลไกมีลักษณะการเคลื่อนที่ตามต้องการ แต่จำเป็นต้องมีการวิเคราะห์แรงภายในกลไกเพื่อใช้ออกแบบความแข็งแรงของชิ้นส่วนและออกแบบตัวขับเคลื่อนนิ้วมือสำหรับแรงจับที่ต้องการ ขั้นตอนการคำนวณแรงบิดกลไกและออกแบบตัวขับเคลื่อนกลไกมีรายละเอียดดังนี้

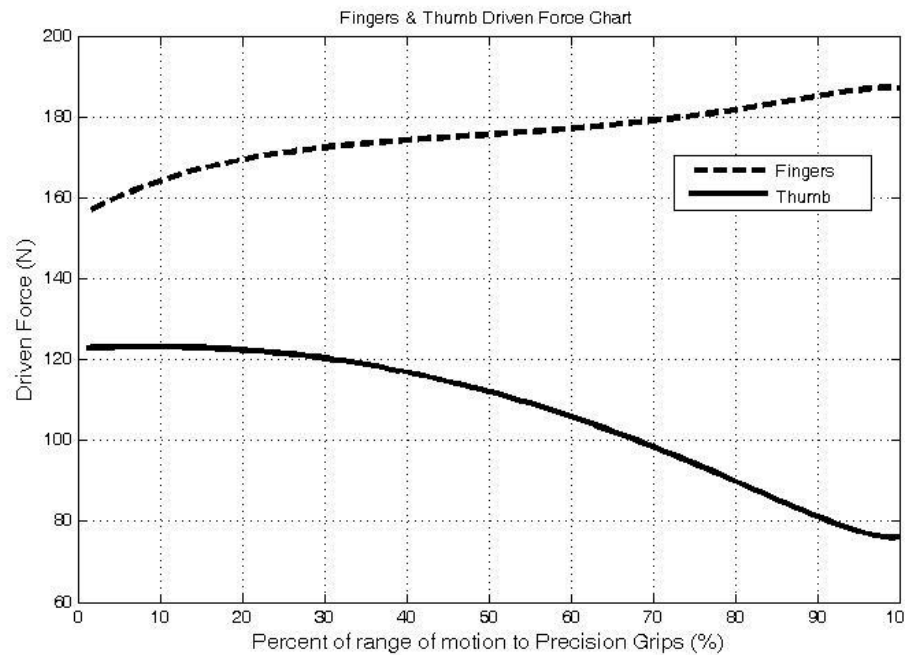
##### 4.3.1 แรงภายในนิ้วมือและแรงดึงกลไกนิ้วมือ

การคำนวณแรงภายในของกลไกมือเทียมใช้วิธีการคำนวณในขณะหยุดนิ่ง (Static force) เมื่อกลไกนิ้วมืออยู่ในตำแหน่งท่าแบมือจนถึงตำแหน่งท่าจับแบบแน่นยำ แรงกดที่ปลายนิ้วและแรงดึงกลไกเป็นดังรูปที่ 4.30 กำหนดให้แรงมีทิศตั้งฉากกับปลายนิ้วและมีค่า 30 นิวตันซึ่งเป็นค่าสูงกว่าค่าเฉลี่ยของมือเทียมในงานวิจัยอื่นและในท้องตลาด แรงดึงมีทิศแนวตั้งตามทิศทางของข้อต่อแบบเลื่อน ผลการคำนวณแรงดึงเป็นดังรูปที่ 4.31 แสดงถึงแรงดึงที่ใช้เมื่อกลไกนิ้วมือค่อยๆเปลี่ยน

ตำแหน่งจากท่าแบมือไปยังท่าจับแบบแม่นยำ เนื่องจากมุมการหมุนของกลไกนิ้วมือทั้งสี่และกลไกนิ้วโป้งมีค่าแตกต่างกัน จึงใช้เปอร์เซ็นต์ของมุมการหมุนกลไกมีค่าเริ่มจาก 0 เปอร์เซ็นต์ในตำแหน่งท่าแบมือไปยัง 100 เปอร์เซ็นต์ในตำแหน่งท่าจับแบบแม่นยำแทนการบอกองศา แรงดึงกลไกนิ้วมือทั้งสี่มีค่า 160 นิวตันที่ตำแหน่งท่าแบมือและเพิ่มขึ้นจนมีค่า 180 นิวตันที่ท่าจับแบบแม่นยำ ส่วนแรงดึงกลไกนิ้วโป้งมีค่า 120 นิวตันที่ตำแหน่งท่าแบมือและลดลงจนมีค่า 80 นิวตันที่ท่าจับแบบแม่นยำ แรงดึงนี้จะถูกนำไปใช้คำนวณแรงบิดที่จำเป็นต้องใช้ในการขับเคลื่อนกลไกมือเทียมทั้งหมด



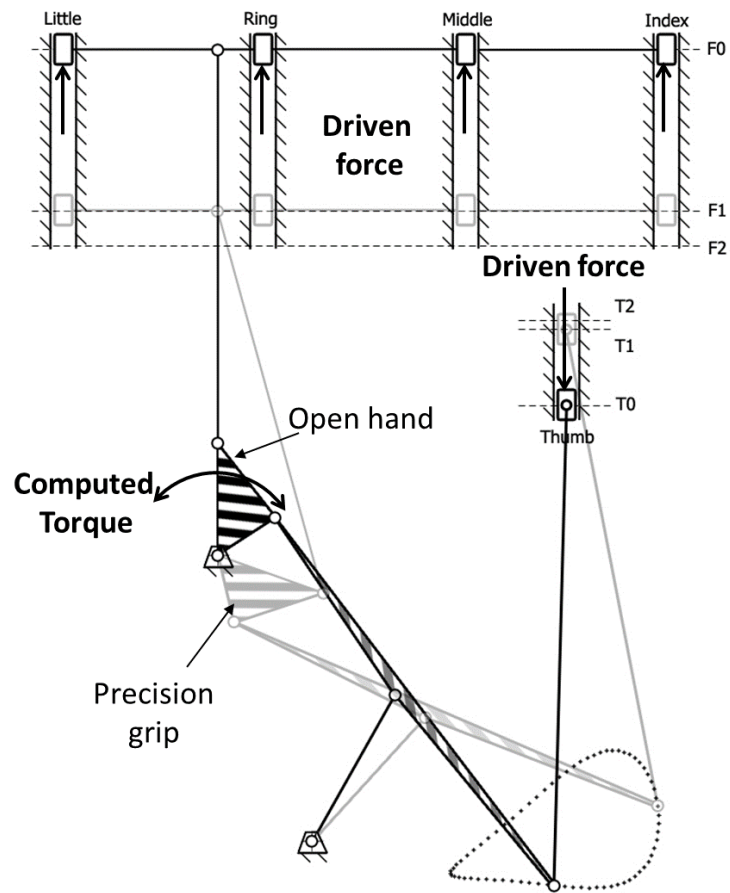
รูปที่ 4.30 การคำนวณหาแรงดึงกลไกนิ้วมือที่แรงกดปลายนิ้ว 30 N



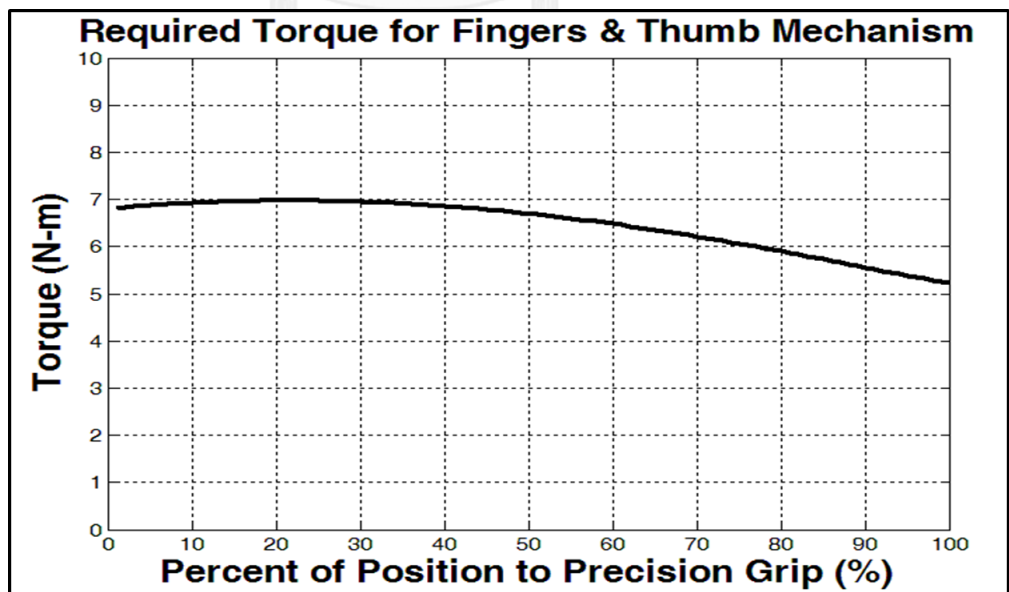
รูปที่ 4.31 แรงดึงกลไกนิ้วมือและนิ้วโป้งเมื่อใช้แรงกดปลายนิ้ว 30 N

#### 4.3.2 แรงภายในกลไกขับเคลื่อนและแรงบิดที่ตำแหน่งท่าต่างๆ

แรงสำหรับการดึงกลไกนิ้วมืองัดหัวข้อ 4.3.1 ถูกนำไปคำนวณหาแรงบิดที่ขึ้นส่วนขับเคลื่อน ต้องใช้ในตำแหน่งท่าแบมือเคลื่อนที่ไปยังท่าจับแบบแม่นยำดังรูปที่ 4.32 ขึ้นส่วนขับเคลื่อนต้องออกแรงบิดผ่านกลไกขับเคลื่อนไปยังข้อต่อแบบเลื่อนของนิ้วมือทั้งสี่และนิ้วโป้ง แรงบิดที่ใช้ในการขับเคลื่อนกลไกนี้มีค่าดังรูปที่ 4.33 ใช้เปอร์เซ็นต์ของมุมการหมุนขึ้นส่วนขับเคลื่อนมีค่าเริ่มต้น 0 เปอร์เซ็นต์ในตำแหน่งท่าแบมือไปยังค่า 100 เปอร์เซ็นต์ในตำแหน่งท่าจับแบบแม่นยำแทนการบอกองศา เช่นเดียวกับหัวข้อ 4.3.1 แรงบิดที่ได้มีค่าสูงสุด 7 N-m (นิวตัน-เมตร) และลดลงจนมีค่าประมาณ 5.3 N-m ที่ท่าจับแบบแม่นยำ สามารถวิเคราะห์ได้ว่า ความความสามารถในการจับวัตถุของมือเทียมจะเพิ่มขึ้นเมื่อเคลื่อนที่เข้ามาใกล้ท่าจับแบบแม่นยำหรือเมื่อจับวัตถุขนาดเล็กลงเนื่องจากใช้แรงบิดในการจับขึ้นงานน้อยลง การออกแบบกลไกมือเทียมมีเป้าหมายให้สามารถออกแรงจับวัตถุตั้งแต่เริ่มเคลื่อนที่จากท่าแบมือได้ แรงบิดอย่างน้อย 7 N-m จึงเป็นค่าต่ำสุดที่ตัวขับเคลื่อนกลไกควรจะทำให้ได้ ค่าแรงบิดนี้ถูกนำไปใช้ในการเลือกตัวขับเคลื่อนและระบบเกียร์ทดในหัวข้อ 4.3.3



รูปที่ 4.32 การคำนวณหาแรงบิดกลไกมือเทียบจากแรงดึงกลไกนิ้วมือ

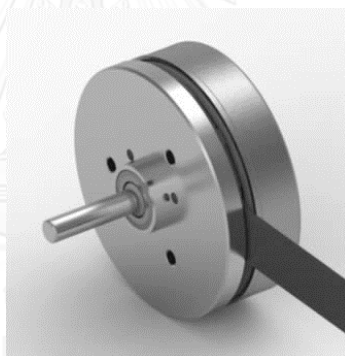


รูปที่ 4.33 แรงบิดของกลไกมือเทียบในการเคลื่อนที่นิ้วมือจากท่าแบ่มือไปยังท่าจับแบบ

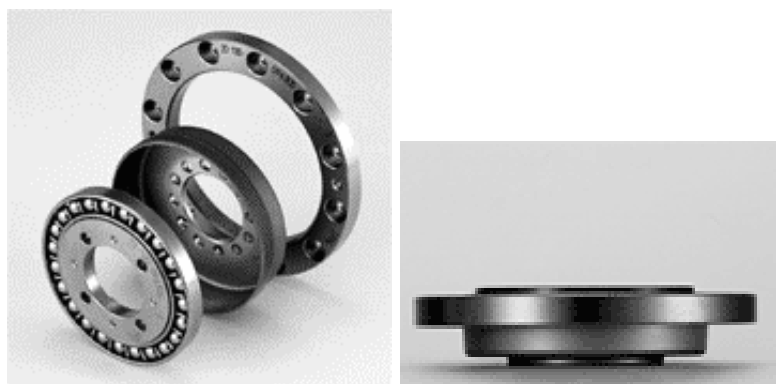
แม่นยำ

### 4.3.3 มอเตอร์ไฟฟ้าและเกียร์ทดสำหรับสร้างแรงบิด

จากหัวข้อ 4.3.2 แรงบิดขั้นต่ำที่ต้องการของระบบขับเคลื่อนกลไกมือเทียมคือ 7 นิวตัน-เมตร และจากหัวข้อ 4.2.2 กลไกมีระยะการหมุนของตัวขับเคลื่อน 110.2 และ 136.4 องศาในท่าจับแบบแม่นยำและท่าจับแบบกำมือตามลำดับ หากต้องการให้กลไกสามารถเคลื่อนที่เข้ามาถึงท่าจับแบบกำมือได้ภายใน 1.5 วินาทีซึ่งเป็นค่าเป้าหมายในการออกแบบดังหัวข้อ 3.1.3 กำลังที่กลไกมือเทียมต้องใช้สามารถคำนวณจากความเร็วของกลไก (136.4 องศา/1.5 วินาที) คูณกับแรงบิดที่ต้องการ (7 นิวตัน-เมตร) มีค่าประมาณ 11 วัตต์ นำมาเลือกมอเตอร์ไฟฟ้าและเกียร์ทดที่สามารถให้แรงได้เพียงพอและมีขนาดไม่เกินพื้นที่ที่ต้องการ เลือกใช้มอเตอร์ชนิด Brushless DC Motor (BLDC) ยี่ห้อ MAXON รุ่น EC-45 Flat 30 W ดังรูปที่ 4.34 มีกำลัง 30 วัตต์ซึ่งมากกว่ากำลังที่คำนวณได้ประมาณ 3 เท่า และมีแรงบิดสูงสุด (Stall Torque) 239 N-mm (นิวตัน-มิลลิเมตร) เลือกใช้เกียร์ทดชนิด Strain Wave Gear ยี่ห้อ Harmonic Drive รุ่น CSD-14-100-2A-R ดังรูปที่ 4.35 มีอัตราทด 1 ต่อ 100, สามารถรับแรงบิดเฉลี่ยได้ 7.7 นิวตัน-เมตรซึ่งสอดคล้องกับแรงบิดของกลไกที่คำนวณได้, และมีประสิทธิภาพ 60 - 70 % ที่อุณหภูมิห้อง (รายละเอียดเพิ่มเติมในภาคผนวก ข)



รูปที่ 4.34 มอเตอร์ไฟฟ้าชนิด Brushless DC Motor, MAXON™ : EC-45 Flat 30 W



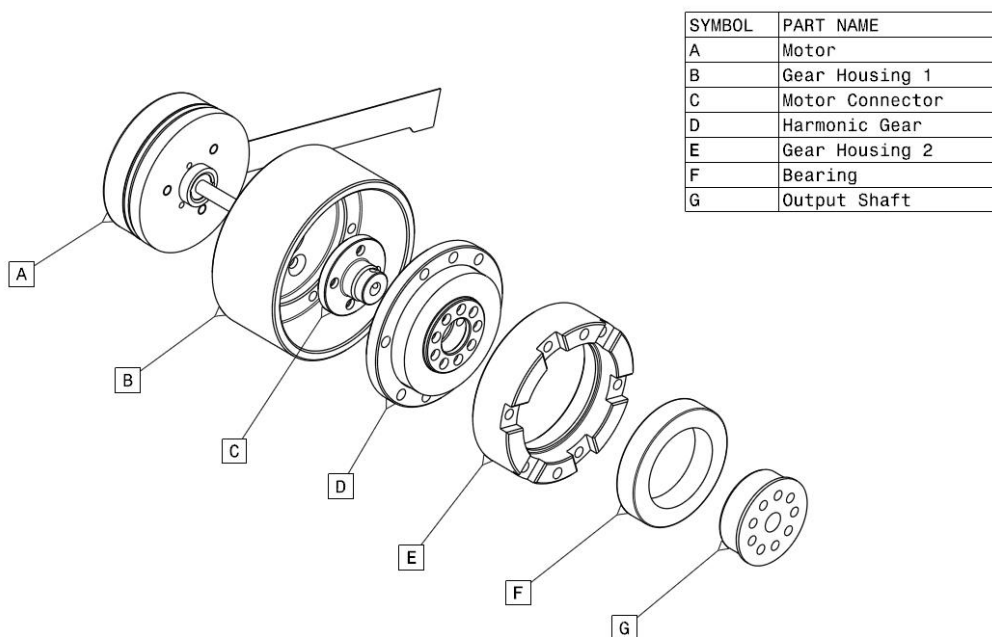
รูปที่ 4.35 เกียร์ทดชนิด Strain Wave Gear, Harmonic Drive™ : CSD-14-100-2A-R

#### 4.4 การออกแบบและผลิตโครงสร้างมือเทียม

การออกแบบโครงสร้างและกลไกส่วนต่างๆของมือเทียมมีเป้าหมายให้มีความแข็งแรงเพียงพอต่อการใช้งานในขณะที่ควบคุมให้น้ำหนักเบาเนื่องจากน้ำหนักเป็นปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งของมือเทียม กลไกส่วนต่างๆถูกออกแบบให้สามารถประกอบและเคลื่อนที่ด้วยกันได้โดยไม่เกิดการติดขัด ส่วนต่างๆของมือเทียมที่ออกแบบมีรายละเอียดดังนี้

##### 4.4.1 การออกแบบและผลิตห้องเกียร์ทด

เกียร์ทด Harmonic Drive ดังรูปที่ 4.35 เป็นชิ้นส่วนเกียร์ทดเพียงอย่างเดียว จำเป็นต้องออกแบบและผลิตห้องเกียร์สำหรับใส่ในมือเทียมนี้ การออกแบบห้องเกียร์จะเน้นให้มีขนาดเล็กแต่แข็งแรงเพียงพอ ห้องเกียร์ทดนี้ใช้วัสดุโลหะ Aluminium 7075 ซึ่งมีความแข็งแรงและน้ำหนักเบา (รายละเอียดเพิ่มเติมในภาคผนวก ก) มีลักษณะดังรูปที่ 4.36 มอเตอร์ไฟฟ้าจะประกอบเข้ากับห้องเกียร์ทดจากทางด้านหลัง และเชื่อมต่อเข้ากับเกียร์ทดเพื่อส่งแรงบิดผ่าน Bearing ไปยังกลไกมือเทียม ชิ้นงานห้องเกียร์ถูกผลิตด้วยเครื่องกลึง MAZAK INTEGREX โดยชิ้นงานมีลักษณะดังรูปที่ 4.37



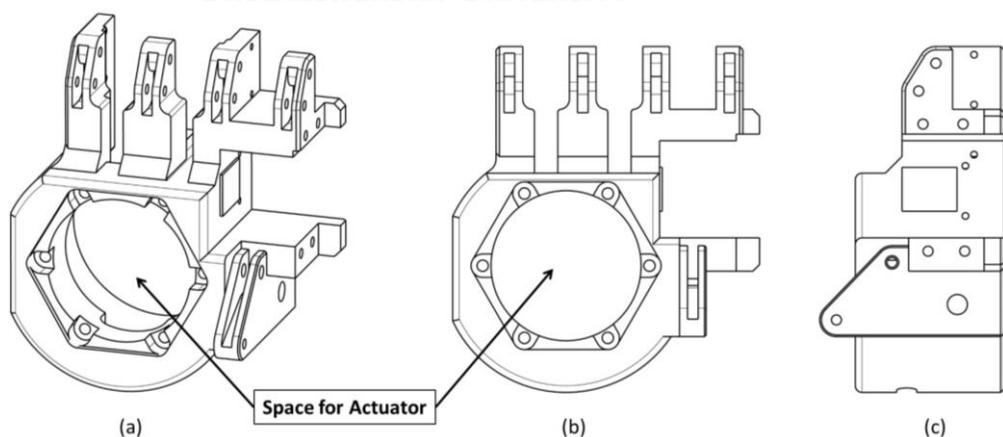
รูปที่ 4.36 ห้องเกียร์ทดสำหรับประกอบภายในมือเทียม



รูปที่ 4.37 ชิ้นส่วนห้องเกียร์ทดที่ถูกผลิตขึ้น

#### 4.4.2 การออกแบบและผลิตโครงสร้างหลัก

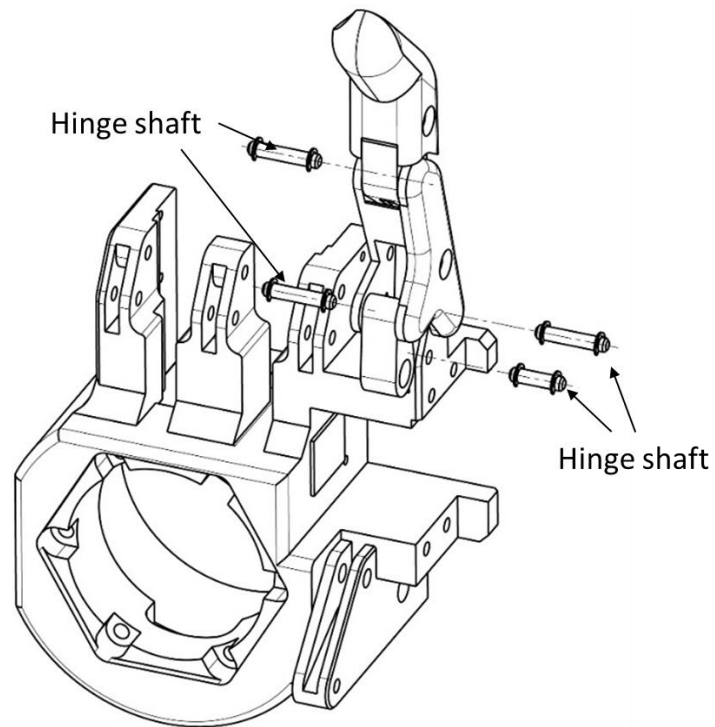
โครงสร้างหลักของมือเทียมใช้สำหรับยึดกับระบบขับเคลื่อนและกลไกนิ้วมือ เลือกใช้วัสดุโลหะ Aluminium 7075 เป็นหลักซึ่งมีความแข็งแรงและมีน้ำหนักเบา โครงสร้างมือเทียมนี้ถูกออกแบบเพื่อการผลิตโดยการกัด (Milling) โดยเฉพาะเนื่องจากผู้วิจัยมีเครื่องจักรสำหรับการผลิตแบบการกัดสำหรับใช้งาน โครงสร้างหลักมือเทียมมีลักษณะดังรูปที่ 4.38 โครงสร้างมือเทียมมีช่องว่างตรงส่วนกลางเพื่อใช้ประกอบมอเตอร์ไฟฟ้าและชุดเกียร์ทดดังรูปที่ 4.38 (a),(b) กลไกนิ้วมือสามารถประกอบเข้ากับโครงสร้างได้โดยใช้เพลานาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตรดังรูปที่ 4.39 โครงสร้างหลักของมือเทียมถูกผลิตด้วยเครื่องกัด MAZAK VARIAXIS ชิ้นงานมีลักษณะดังรูปที่ 4.40



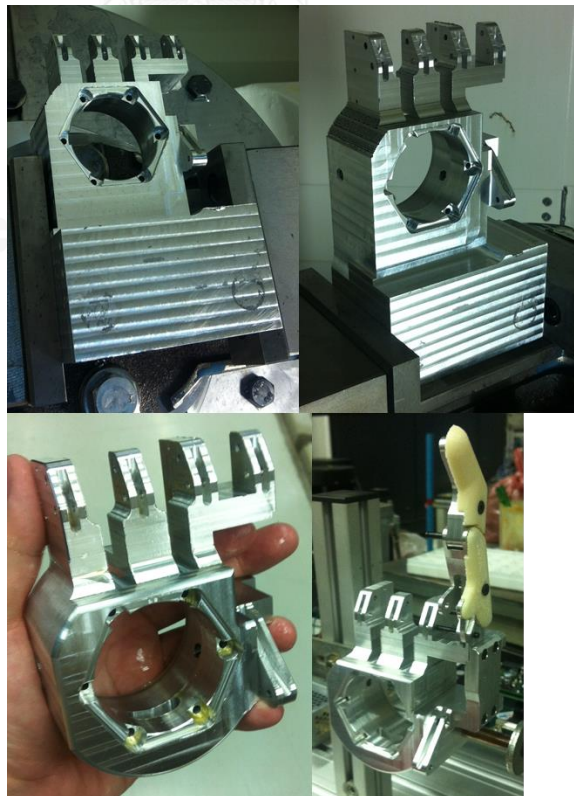
รูปที่ 4.38 โครงสร้างหลักของมือเทียม มีช่องว่างภายในสำหรับประกอบระบบขับเคลื่อน

(a) มุมมองสามมิติ, (b) มุมมองระนาบฝ่ามือ, (c) มุมมองด้านข้างฝ่ามือ





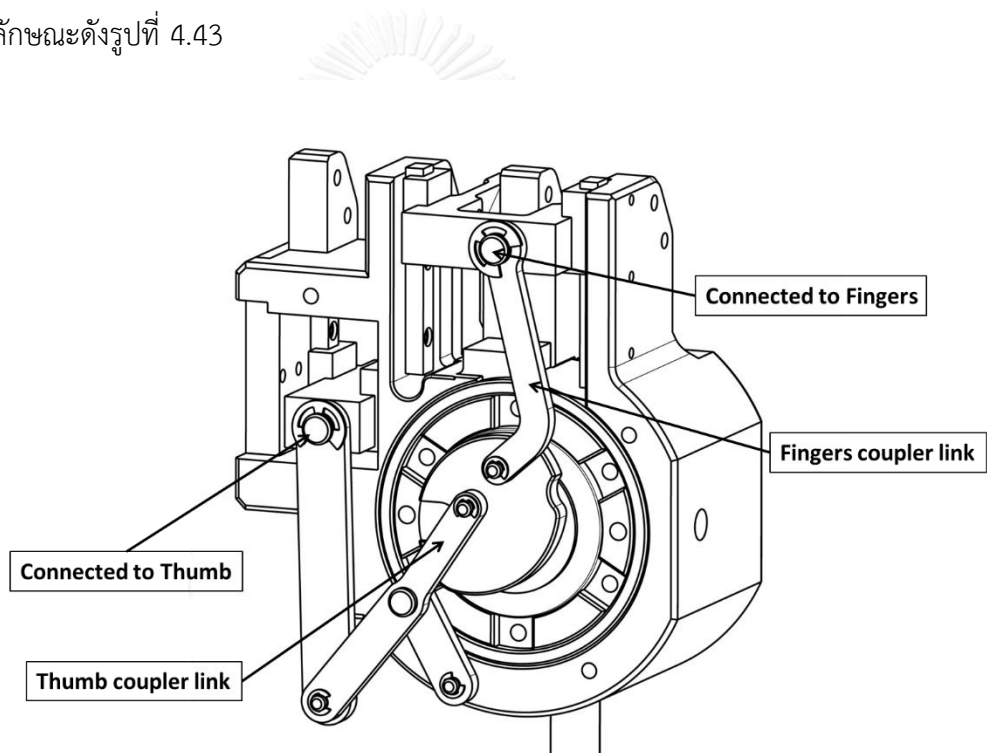
รูปที่ 4.39 นิ้วมือสามารถประกอบเข้ากับโครงสร้างหลักของมือเทียมด้วยเพลากลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร



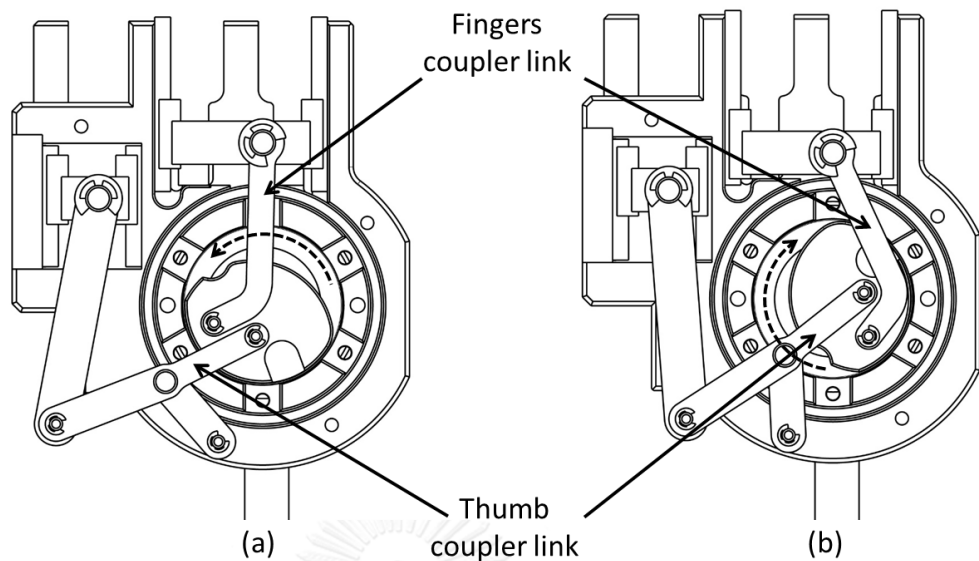
รูปที่ 4.40 โครงสร้างหลักของมือเทียม ผลิตด้วยการกัด (Milling) เป็นหลัก

#### 4.4.3 การออกแบบและผลิตกลไกขั้วมือเทียม

กลไกขั้วมือเทียม (Transmission mechanism) ซึ่งเชื่อมต่อระหว่างมอเตอร์ไฟฟ้าและนิ้วมือใช้วัสดุโลหะ Stainless Steel 304 ซึ่งมีความแข็งแรงสูงกว่า Aluminium และมีน้ำหนักมากกว่า (รายละเอียดเพิ่มเติมในภาคผนวก ก) เนื่องจากชิ้นส่วนมีขนาดเล็กจึงต้องการวัสดุความแข็งแรงสูงเพื่อป้องกันกลไกเสียหายและน้ำหนักของกลไกขั้วเคลื่อนที่นั้นเป็นส่วนน้อยของมือเทียมทั้งหมด กลไกขั้วเคลื่อนที่มือเทียมในตำแหน่งท่าแบ่มือมีลักษณะดังรูปที่ 4.41 ชิ้นส่วนคัปเปิลเลอร์ของกลไกขั้วเคลื่อนที่นิ้วมือทั้งสี่ (Fingers coupler link) มีลักษณะโค้งงอเพื่อหลบชิ้นส่วนคัปเปิลเลอร์ของกลไกขั้วเคลื่อนที่นิ้วโป้ง (Thumb coupler link) ในขณะที่เคลื่อนที่มาเป็นท่าจับแบบแมนย่ำดังรูปที่ 4.42 (a) และท่าจับแบบกำมืองดังรูปที่ 4.42 (b) กลไกขั้วเคลื่อนที่นิ้วมือถูกผลิตด้วยเครื่องกัด MAZAK VARIAXIS ชิ้นงานมีลักษณะดังรูปที่ 4.43



รูปที่ 4.41 กลไกขั้วมือเทียมเชื่อมต่อไปยังนิ้วมือทั้งสี่และนิ้วโป้ง ในตำแหน่งท่าแบ่มือ



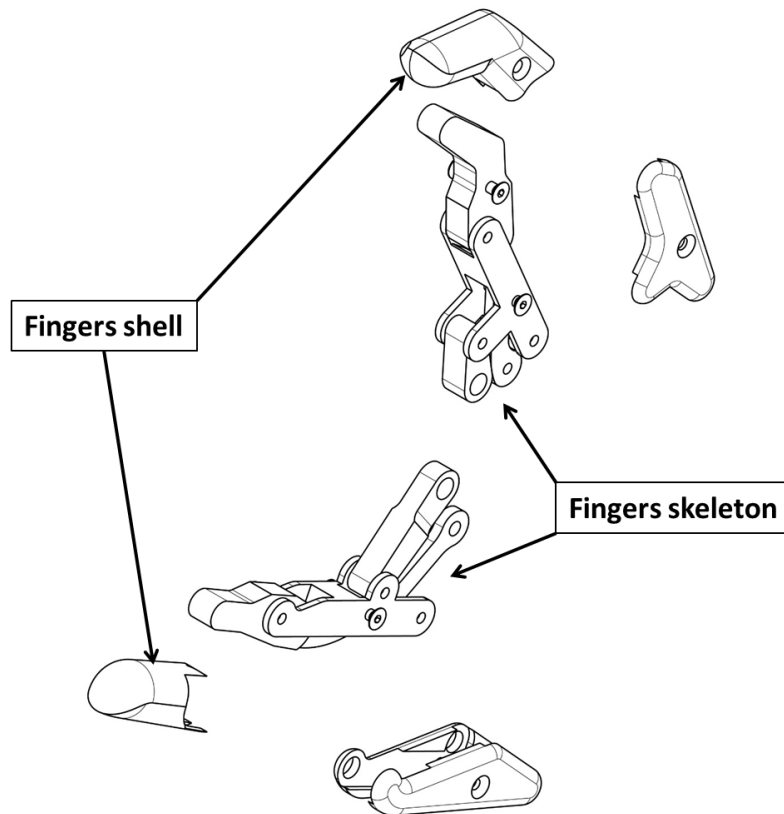
รูปที่ 4.42 กลไกขั้วมือเทียม (a) ทำจับแบบแม่นยำ, (b) ทำจับแบบกำมือ



รูปที่ 4.43 ชิ้นส่วนกลไกขั้วมือเทียม ผลิตด้วยการกัด (Milling) เป็นหลัก

#### 4.4.4 การออกแบบและผลิตชิ้นส่วนปลายนิ้วมือ

เพื่อให้มือเทียมสามารถจับวัตถุได้ดีและมีความสวยงาม ปลายนิ้วมือและด้ามขั้วนิ้วมือถูกออกแบบให้มีลักษณะโค้งมนและใช้เป็นส่วนที่สัมผัสกับวัตถุ ปลายนิ้วมือจึงใช้วัสดุพลาสติก ABS-M30i ขึ้นรูปด้วยวิธีการ FDM (Fuse Deposition Modeling) ซึ่งสามารถขึ้นรูปชิ้นงานรูปร่างโค้งมนได้ง่าย ปลายนิ้วมือมีลักษณะคล้ายปลอกสำหรับประกอบเข้ากับโครงนิ้วมื่อดังรูปที่ 4.44 โครงนิ้วมือใช้วัสดุ Aluminium 7075 เพื่อเป็นการรักษาความแข็งแรงของกลไกให้มีการเคลื่อนที่ตามการออกแบบ ชิ้นส่วนปลายนิ้วมือหลังจากการขึ้นรูปมีลักษณะดังรูปที่ 4.45 (a) และเมื่อนำมาประกอบเข้ากับโครงนิ้วมือมีลักษณะดังรูปที่ 4.45 (b)



รูปที่ 4.44 ชิ้นส่วนปลายนิ้วมือสำหรับประกอบเข้ากับกลไกนิ้วมือ



(a)

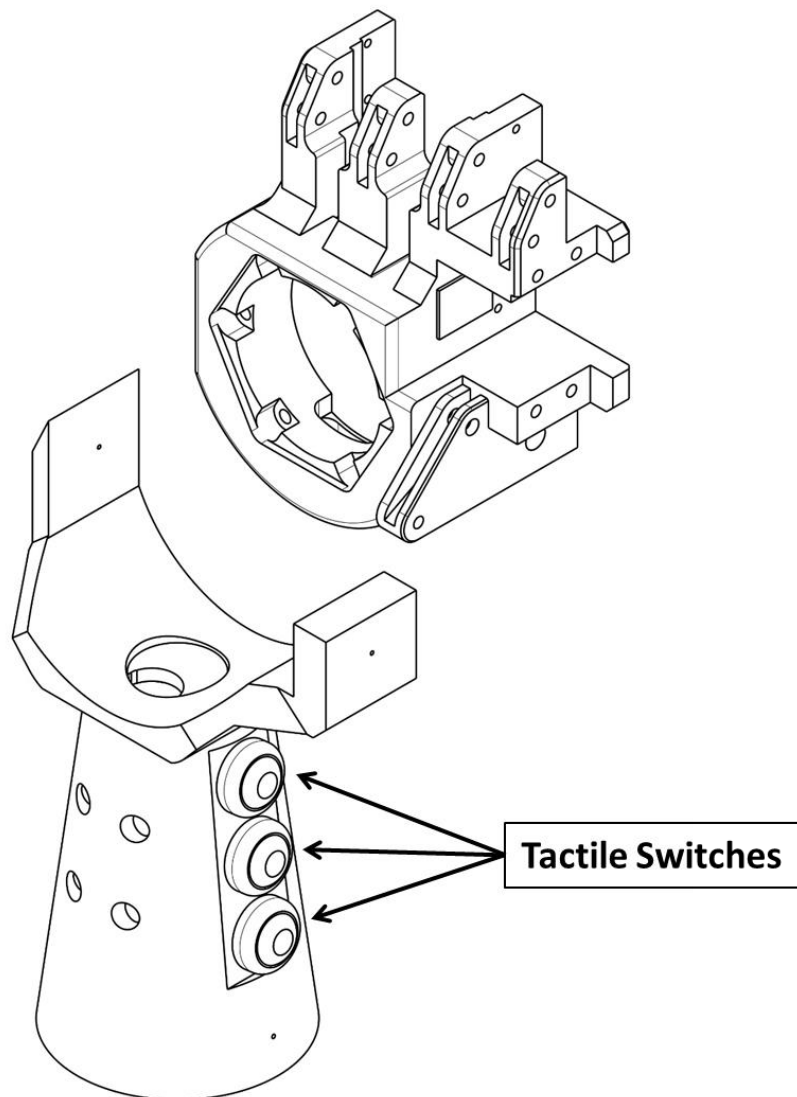


(b)

รูปที่ 4.45 ชิ้นส่วนปลายนิ้วมือและโครงนิ้วมือ (a) ชิ้นส่วนปลายนิ้วมือสำหรับสวมเข้ากับโครงนิ้วมือ, (b) กลไกนิ้วมือเมื่อประกอบปลายนิ้วเข้ากับโครงสร้าง

#### 4.4.5 การออกแบบและผลิตด้ามจับมือเทียม

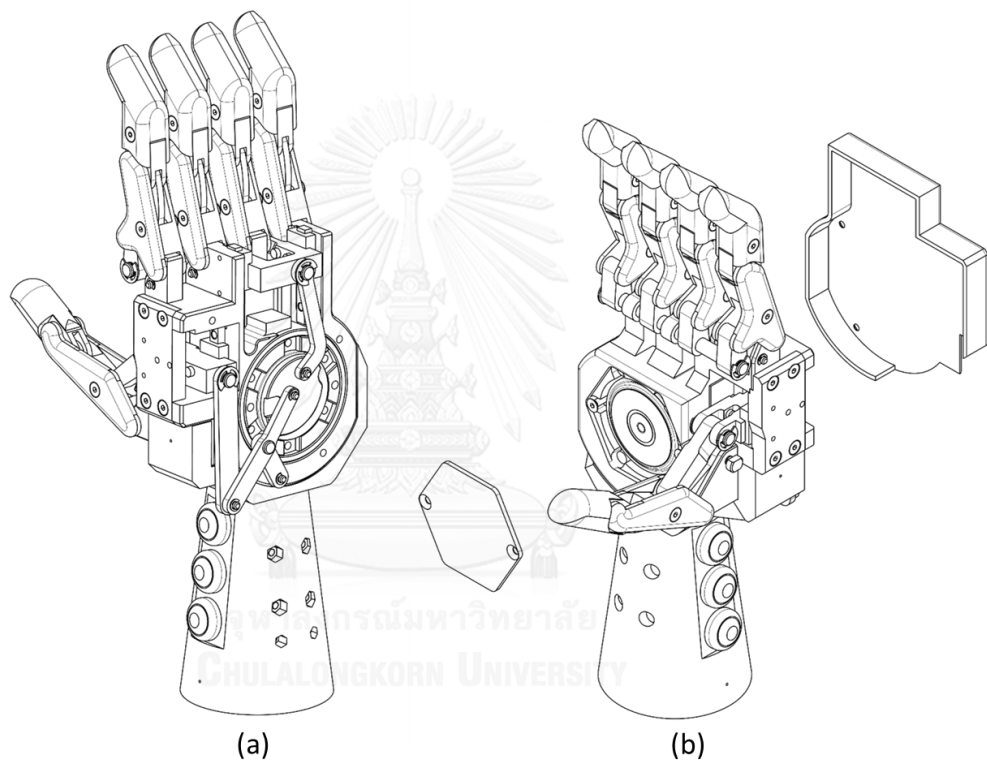
มือเทียมถูกออกแบบให้มีด้ามจับเพื่อใช้สำหรับการทดสอบสมรรถนะต่างๆของมือเทียม หลังจากการผลิต ด้ามจับนี้ประกอบด้วยสวิตช์แบบสัมผัส (Tactile Switch) จำนวนสามอันใช้สำหรับ รับการสั่งการจากผู้ทดสอบโดยแบ่งเป็นคำสั่งเคลื่อนที่เป็นท่าจับแบบแม่นยำ, ท่าจับแบบกำมือ, และ ท่าแบมือตามลำดับ ด้ามจับมีลักษณะดังรูปที่ 4.46 ด้ามจับทำจากวัสดุพลาสติก ABS-M30i เพื่อให้มี น้ำหนักเบาและง่ายต่อการหยิบจับ



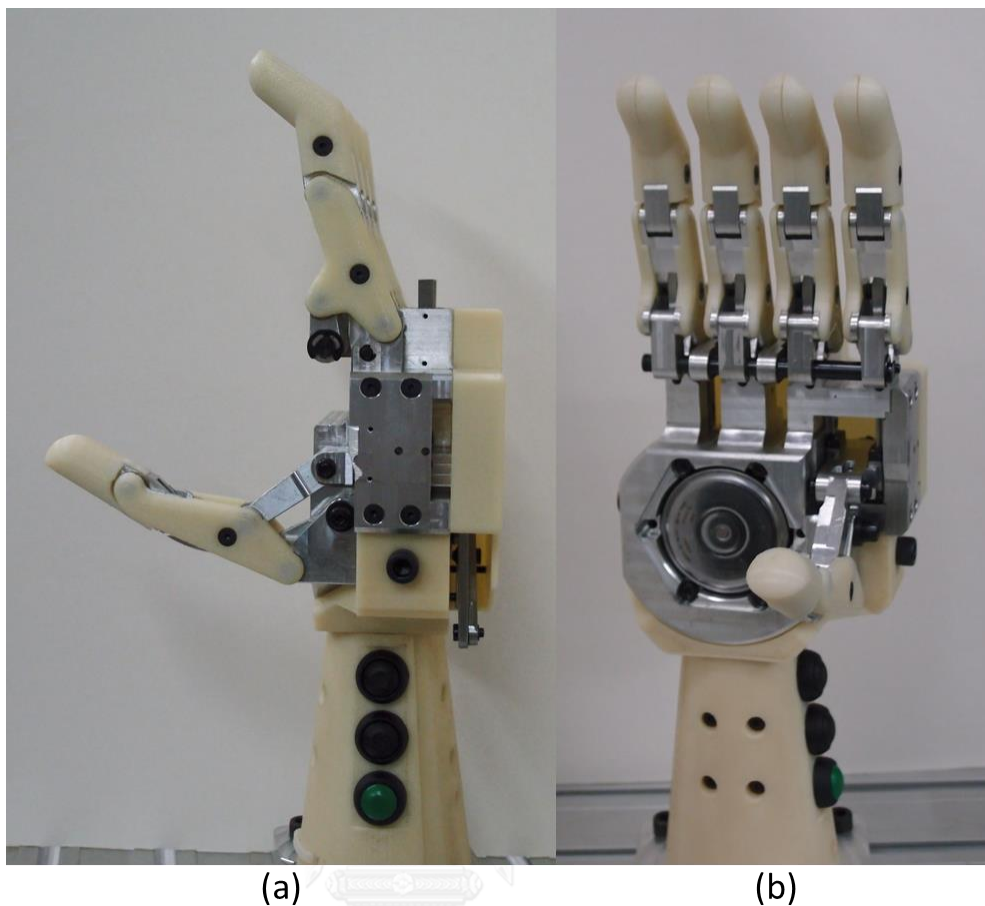
รูปที่ 4.46 ด้ามจับมือเทียมสำหรับรับสัญญาณจากผู้ทดสอบการใช้งาน

#### 4.4.6 ภาพรวมของการออกแบบและผลิตมือเทียม

จากการออกแบบและผลิตชิ้นส่วนต่างๆของมือเทียมดังหัวข้อ 4.4.1 ถึง 4.4.5 ชิ้นส่วนเหล่านี้สามารถนำมาประกอบกันเพื่อให้ได้มือเทียมที่สามารถเคลื่อนที่เป็นท่าที่ต้องการผ่านการสั่งการจากผู้ใช้งานด้วย Tactile Switch จำนวนสามอัน มือเทียมที่ประกอบขึ้นส่วนต่างๆแล้วมีลักษณะดังรูปที่ 4.47 (a) มือเทียมมีฝาปิดด้านฝ่ามือเพื่อป้องกันมอเตอร์ไฟฟ้าสัมผัสวัตถุและฝาปิดด้านหลังเพื่อป้องกันกลไกขับเคลื่อนสัมผัสวัตถุดังรูปที่ 4.47 (b) มือเทียมหลังจากการผลิตและประกอบมีลักษณะดังรูปที่ 4.48



รูปที่ 4.47 แบบจำลองมือเทียมเมื่อประกอบขึ้นส่วนต่างๆเข้าด้วยกัน (a) มุมมองสามมิติจากด้านหลังมือ, (b) มุมมองสามมิติจากด้านฝ่ามือ



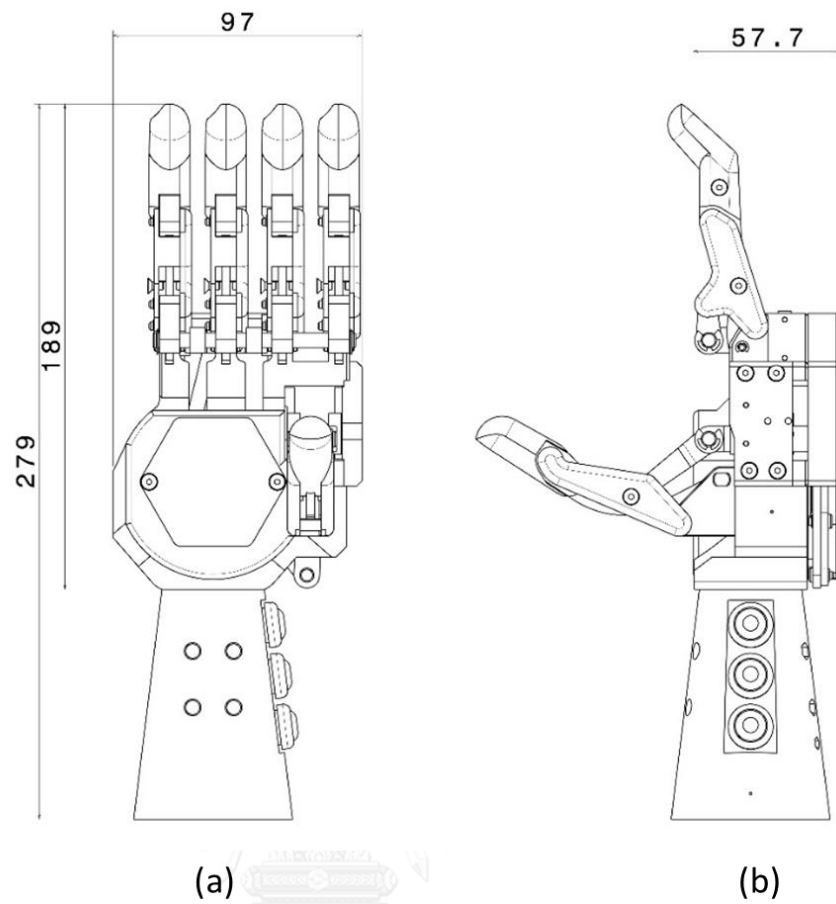
รูปที่ 4.48 มือเทียมเมื่อประกอบชิ้นส่วนต่างๆเข้าด้วยกัน (a) มุมมองด้านข้างฝ่ามือ, (b) มุมมองด้านฝ่ามือ

#### 4.5 ผลการออกแบบและผลิตมือเทียม

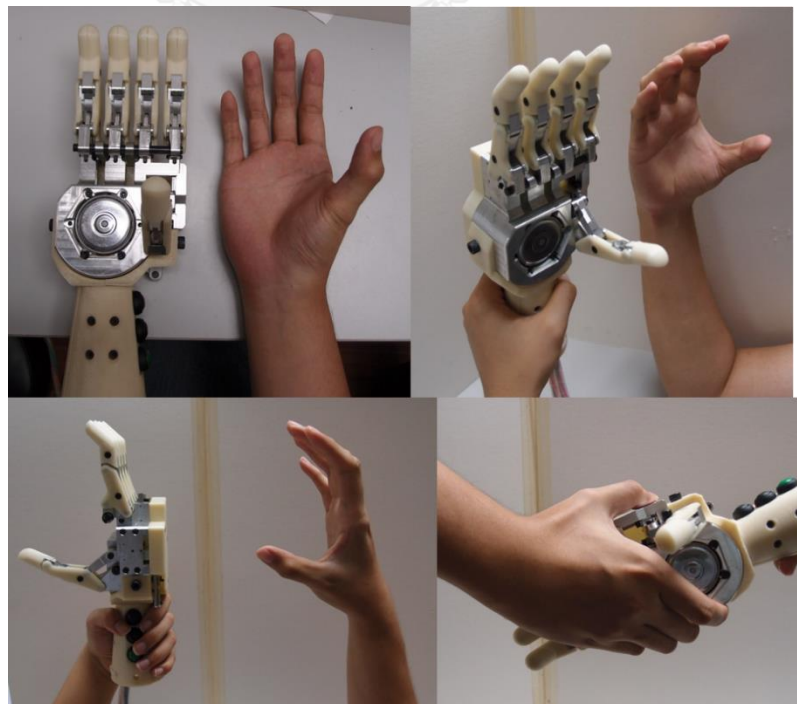
มือเทียมที่ผลิตขึ้นมีน้ำหนัก 980 กรัม นับจากปลายนิ้วจนถึงข้อมือ มีขนาดความยาวจากปลายนิ้วมือถึงข้อมือ 189 มิลลิเมตรและความกว้างฝ่ามือ 97 มิลลิเมตรดังรูปที่ 4.49 (a) มีความหนา 57.7 มิลลิเมตรดังรูปที่ 4.49 (b) ขนาดของมือเทียมนี้มีความใกล้เคียงกับขนาดมือของชายไทยที่นำมาใช้เป็นแนวทางในการออกแบบดังหัวข้อ 3.1.3 ทำการเปรียบเทียบขนาดและรูปร่างของมือเทียมกับมือมนุษย์ พบว่ามีความใกล้เคียงกันอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ ดังรูปที่ 4.50

มือเทียมที่ผลิตขึ้นมีการเคลื่อนที่ 1 องศาอิสระ สามารถเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งเป้าหมายคือ ทำแอมมือ, ทำจับแบบแมนย้า, และทำจับแบบกำมือได้โดยกลไกไม่เกิดการติดขัด แสดงถึงความสามารถในการเคลื่อนที่ของกลไกซึ่งทำได้ตามวัตถุประสงค์ในการออกแบบกลไกมือเทียมข้างต้น





รูปที่ 4.49 ขนาดของมือเทียม (a) ความกว้างและความยาว, (b) ความหนา



รูปที่ 4.50 มือเทียมมีขนาดและรูปร่างใกล้เคียงกับมือชายไทย



## บทที่ 5

### การทดสอบสมรรถนะของมือเทียม

#### (Performance Test)

ความสำเร็จในการใช้งานมือเทียมนั้นขึ้นอยู่กับหลายตัวแปร เช่น ความเร็ว แรงจับ แรงเสียดทาน น้ำหนักของวัตถุ รูปร่างของวัตถุ และท่าจับ เป็นต้น การทดสอบความสามารถของกลไกมือเทียมจึงออกแบบการทดลองแบ่งตามตัวแปรที่สำคัญสี่หัวข้อด้วยกันดังนี้

#### 1. การวัดความเร็วในการจับของมือเทียม

ความเร็วในการจับวัตถุเป็นตัวแปรสำคัญในการใช้งานมือเทียม เมื่อมือเทียมได้รับสัญญาณสั่งการจากผู้พิการหากมือเทียมสามารถเข้ามาจับวัตถุได้โดยใช้เวลาน้อยที่สุดจะทำให้เกิดความคล่องตัวในการใช้งานและทำให้ผู้พิการรู้สึกถึงการใช้งานที่เป็นธรรมชาติ ในขณะที่เดียวกันหากมือเทียมมีความเร็วสูงจะเกิดแรงเสียดทานในกลไกส่งผลให้ใช้กระแสไฟฟ้าในการขับเคลื่อนสูงขึ้น การทดลองจึงตั้งเป้าหมายในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการจับและกระแสไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้า

#### 2. ทดสอบวัดแรงจับของมือเทียม

การจับและยกวัตถุขึ้นจากพื้นนั้นมีตัวแปรหลักคือแรงเสียดทาน ซึ่งมีค่าแปรผันตามแรงจับของมือเทียมและค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน แรงจับของมือเทียมเกิดจากแรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้าในมือเทียมส่งผ่านกลไกไปยังปลายนิ้ว แรงจับของมือเทียมนี้จะมีค่ามากขึ้นขึ้นอยู่กับการออกแบบและผลิตกลไก, การเลือกใช้มอเตอร์ไฟฟ้า, และการเลือกเกียร์ทด แรงจับจึงเป็นตัวแปรที่บ่งบอกถึงผลการออกแบบมือเทียมในงานวิจัยนี้ ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างมือเทียมและวัตถุเป็นค่าที่เปลี่ยนแปลงไปตามวัตถุและสามารถปรับเปลี่ยนได้เมื่อเปลี่ยนผิวของมือเทียมเป็นวัสดุประเภทยางที่มีความเหนียวมากขึ้น การทดลองนี้จึงตั้งเป้าหมายในการวัดแรงจับของมือเทียมเป็นหลัก

#### 3. ทดสอบความสามารถในการจับวัตถุขนาดต่างๆในท่าต่างๆ

มือเทียมควรมีความสามารถจับวัตถุขนาดต่างๆได้หลากหลาย จึงทำการทดสอบโดยใช้วัตถุรูปร่างพื้นฐานคือ ทรงกลมและทรงกระบอกขนาดต่างๆเพื่อทดสอบความสามารถในการจับของมือเทียมในท่าจับแบบแม่นยำและท่าจับแบบกำมือ

#### 4. ทดสอบความสามารถในการจับวัตถุที่สำคัญในชีวิตประจำวัน

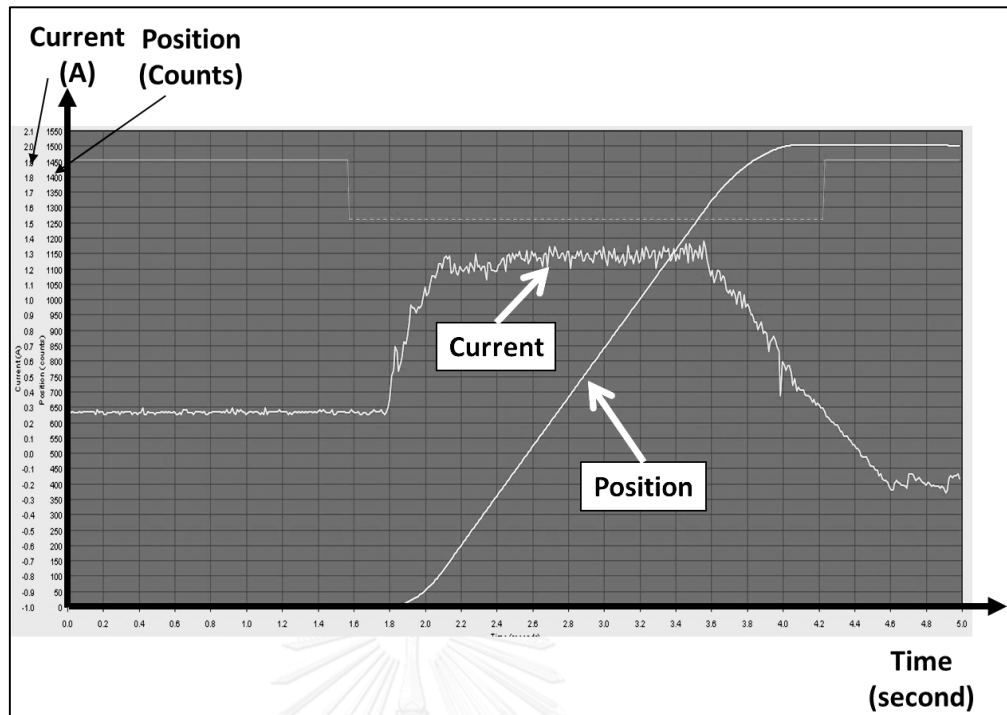
มือเทียมควรมีความสามารถจับวัตถุที่สำคัญในชีวิตประจำวันได้ จึงทำการทดสอบโดยใช้วัตถุในชีวิตประจำวันที่สำคัญสำหรับผู้พิการ เพื่อทดสอบความสามารถในการใช้งานจริงของมือเทียม

##### 5.1 การทดลองวัดความเร็วในการจับของมือเทียม

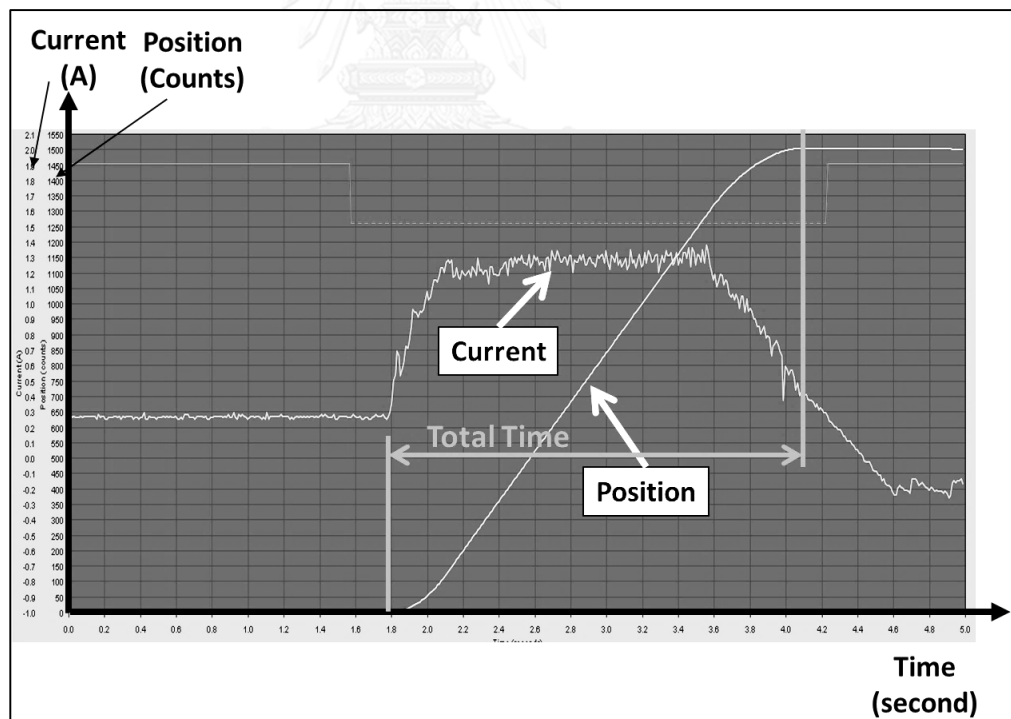
กลไกมือเทียมมีเป้าหมายในการออกแบบให้สามารถเคลื่อนที่เข้ามาจับวัตถุได้ภายในเวลา 1.0 – 1.5 วินาทีซึ่งเพียงพอต่อการใช้งานในชีวิตประจำวัน การทดลองมีรายละเอียดดังนี้

###### 5.1.1 การวัดเวลาในการจับและกระแสไฟฟ้าของมือเทียม

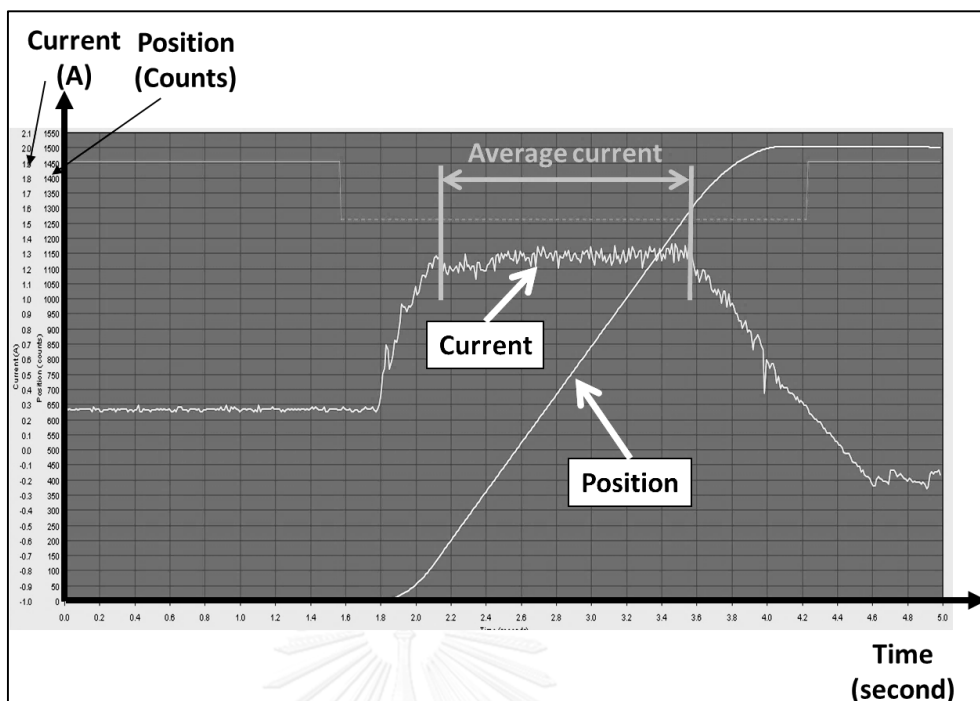
การวัดความเร็วและกระแสไฟฟ้าใช้การอ่านค่าจาก Controller ของมือเทียมซึ่งเชื่อมต่อกับมอเตอร์ไฟฟ้าด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูปของ Controller ทำการวัดเวลาและกระแสไฟฟ้าที่มอเตอร์ไฟฟ้าใช้ในการขับเคลื่อนมือจากท่าแบ่มือไปยังท่าจับแบบแม่นยำและท่าจับแบบกำมืองัดรูปที่ 5.1 ตำแหน่งของมอเตอร์ไฟฟ้ามีหน่วยเป็น Counts ซึ่งเป็นการนับตำแหน่งจาก Hall sensor ของมอเตอร์ไฟฟ้า มีจำนวน 24 Counts/รอบ มอเตอร์ไฟฟ้าขณะอยู่ในท่าแบ่มือมีค่า Counts เป็นศูนย์และมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเริ่มเคลื่อนที่จนมีค่า 1500 Counts ในท่าจับแบบแม่นยำ การวัดเวลาในการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ไฟฟ้าเป็นดังรูปที่ 5.2 เริ่มวัดเมื่อมอเตอร์ไฟฟ้าเริ่มเคลื่อนที่จากตำแหน่งท่าแบ่มือจนหยุดนิ่งที่ท่าจับแบบแม่นยำ การวัดกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยในการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ไฟฟ้าเป็นดังรูปที่ 5.3 เก็บค่ากระแสไฟฟ้าในขณะที่มอเตอร์ไฟฟ้ามีความเร็วคงที่และนำมาหาค่าเฉลี่ย การทดลองทำการเปลี่ยนความเร็วการหมุนมอเตอร์ไฟฟ้าตั้งแต่ 400 รอบต่อนาทีจนถึง 2,000 รอบต่อนาทีซึ่งเป็นความเร็วในการทำงานปกติ (Nominal speed) ของมอเตอร์ไฟฟ้า



รูปที่ 5.1 การวัดเวลาในการเคลื่อนที่และกระแสไฟฟ้าของมอเตอร์ไฟฟ้า



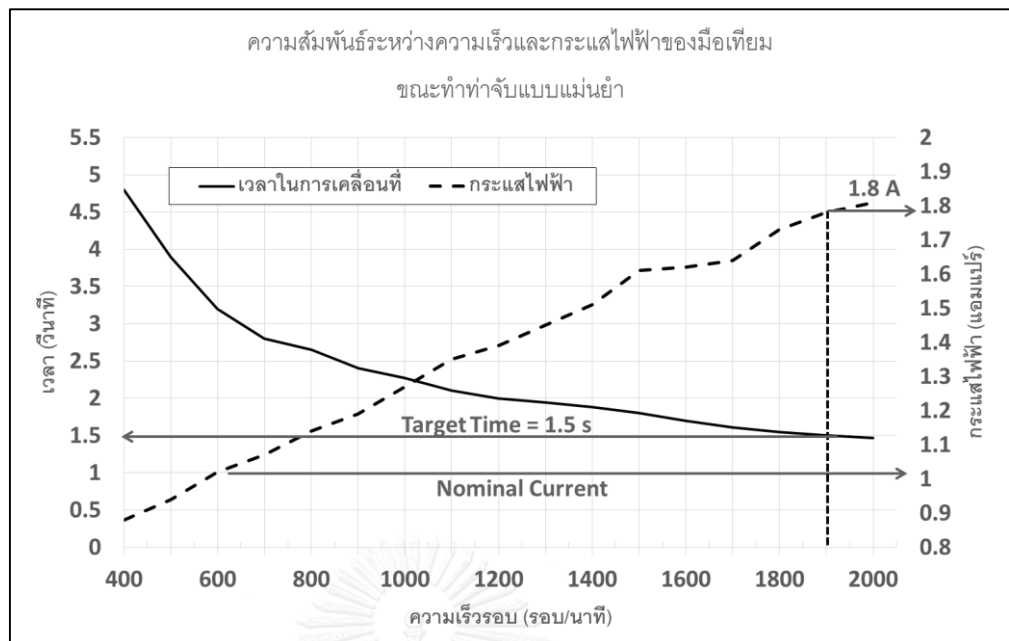
รูปที่ 5.2 การวัดเวลาในการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ไฟฟ้า



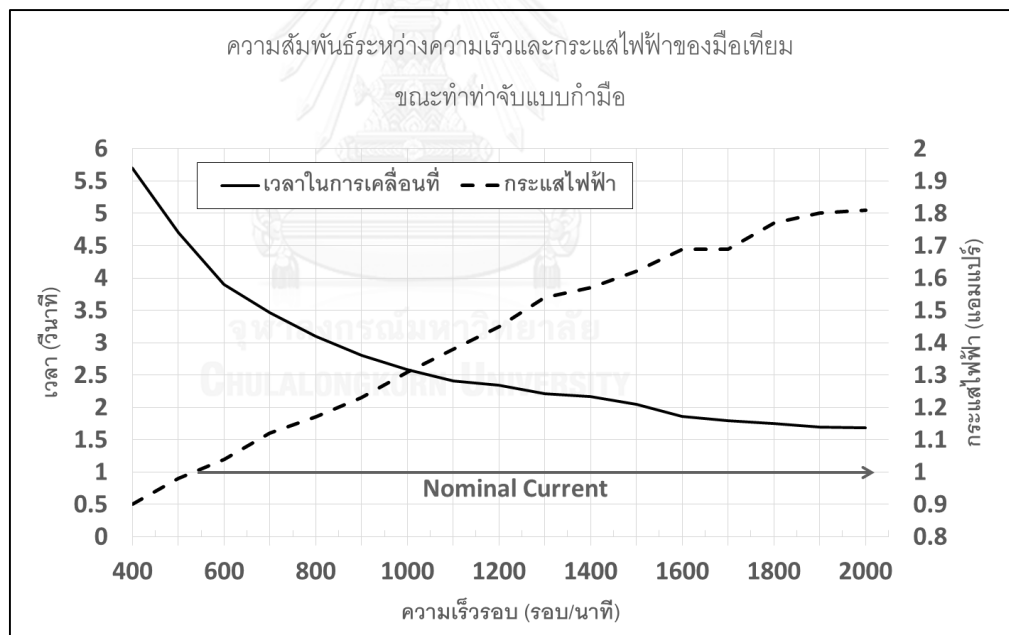
รูปที่ 5.3 การวัดกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของมอเตอร์ไฟฟ้า

### 5.1.2 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการทดลองดังหัวข้อ 5.1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่, ความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้า, และกระแสไฟฟ้าเฉลี่ยของท่าจับแบบแมนยามีค่าดังรูปที่ 5.4 หากต้องการให้มือเทียมใช้เวลา 1.5 วินาทีในการเคลื่อนที่ จะต้องใช้ความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้า 1,900 รอบ/นาที และกระแสไฟฟ้าเฉลี่ย 1.8 A ในขณะที่ค่ากระแสไฟฟ้าปกติของมอเตอร์ไฟฟ้านี้มีค่า 1.0 A สำหรับท่าจับแบบกำมือมีผลการทดลองดังรูปที่ 5.5 มือเทียมจะใช้เวลาในการเคลื่อนที่สูงกว่าท่าจับแบบแมนย่า โดยที่ความเร็วรอบมอเตอร์ไฟฟ้า 2,000 รอบ/นาที มือเทียมจะใช้เวลาเคลื่อนที่ 1.65 วินาที ใช้กระแสไฟฟ้าเฉลี่ย 1.8 A



รูปที่ 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและกระแสไฟฟ้าในท่าจับแบบแม่นยำ



รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วและกระแสไฟฟ้าในท่าจับแบบกำมือ

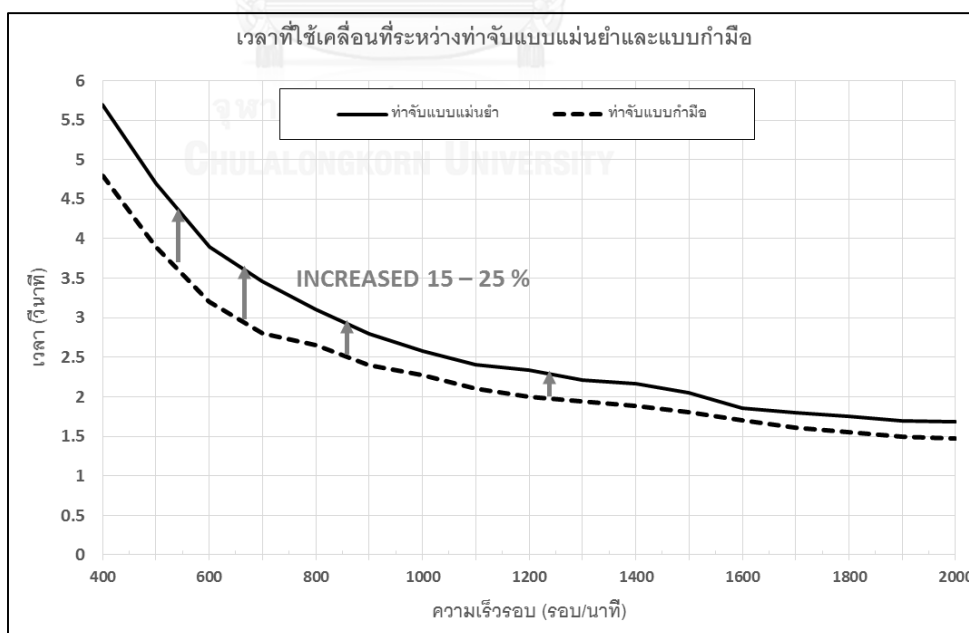
จากการทดลองข้างต้น สามารถวิเคราะห์ผลการทดลองได้ดังนี้

ในการใช้งานมอเตอร์ไฟฟ้าทั่วไป ค่ากระแสไฟฟ้าปกติ (Nominal current) นั้นใช้สำหรับจำกัดขอบเขตการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าเพื่อไม่ให้เกิดความร้อนสูงจนมอเตอร์เสียหาย หากต้องการให้มือเทียมเคลื่อนที่ไปยังท่าจับแบบแม่นยำภายในเวลา 1.5 วินาที มอเตอร์ไฟฟ้าจะมีความเร็วรอบ 1900 รอบ/นาที ใช้กระแสไฟฟ้าเฉลี่ย 1.8 A ซึ่งมากกว่าค่ากระแสไฟฟ้าปกติของ

มอเตอร์ แต่เนื่องจากการใช้งานมือเทียมในชีวิตประจำวันนั้นมีลักษณะเป็นจังหวะ (Intermittent) ซึ่งไม่ได้ถูกสั่งการและเคลื่อนที่ตลอดเวลา ทำให้แม้จะใช้กระแสไฟฟ้าสูงกว่าค่าปกติ ความร้อนที่เกิดขึ้นจะไม่สูงเกินไป มือเทียมนี้จึงสามารถใช้งานที่กระแสไฟฟ้าสูงเพื่อให้ได้ความเร็วที่เหมาะสมกับการใช้ในชีวิตประจำวันได้

ที่ความเร็วการหมุนค่าเดียวกัน มือเทียมใช้เวลาในการเคลื่อนที่ไปยังท่าจับแบบกำมือมากกว่าท่าจับแบบแมนยำประมาณ 15 – 25 เปอร์เซ็นต์ดังรูปที่ 5.6 ซึ่งสอดคล้องกับระยะการหมุนของกลไกภายในมือเทียมที่ออกแบบดังหัวข้อ 4.2.2 ท่าจับแบบแมนยำและแบบกำมือใช้ระยะการหมุน 110 และ 136 องศาตามลำดับ ในการใช้งานจริงจึงควรตั้งค่าให้ความเร็วของท่าจับแบบกำมือเร็วกว่าท่าจับแบบแมนยำประมาณ 23 เปอร์เซ็นต์เพื่อให้ใช้เวลาในการเคลื่อนที่ใกล้เคียงกัน

เวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่มีค่าลดลงแบบ Exponential ในขณะที่กระแสไฟฟ้ามี่ค่าเพิ่มขึ้นแบบเป็นเส้นตรงเมื่อความเร็วรอบเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 5.4 การที่กระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นแบบเป็นเส้นตรงนั้นสอดคล้องกับแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นในกลไกซึ่งแปรผันตรงกับความเร็วในการเคลื่อนที่ของกลไก ในขณะที่เวลาที่ใช้มีค่าลดลงแบบ Exponential นั้น มีเหตุมาจากความเร่งในการเริ่มและการหยุดมือเทียมถูกตั้งให้มีค่าคงที่คือ 100 รอบ/วินาทียกกำลังสอง เพื่อเป็นการป้องกันไม่ไห้มือเทียมเคลื่อนที่เข้าไปกระทบวัตถุแรงเกินไป ความเร่งนี้ซึ่งไม่มีการเปลี่ยนแปลงจึงส่งผลต่อเวลาที่ใช้ทำให้ความเร็วรอบมีผลน้อยลงเมื่อเพิ่มความเร็วรอบสูงขึ้นเรื่อยๆ



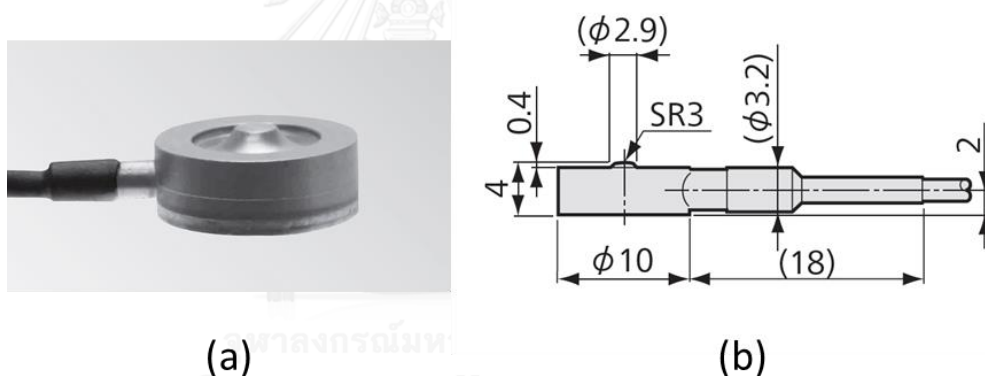
รูปที่ 5.6 เวลาในการเคลื่อนที่ของท่าจับแบบกำมือมีค่ามากกว่าท่าจับแบบแมนยำประมาณ 15 – 25 เปอร์เซ็นต์

## 5.2 การทดลองวัดแรงจับของมือเทียม

กลไกมือเทียมมีเป้าหมายในการออกแบบให้สามารถออกแรงจับในท่าจับแบบแม่นยำได้เพียงพอสำหรับการใช้งานในชีวิตประจำวันโดยเปรียบเทียบกับมือเทียมในงานวิจัยอื่นและมือเทียมในท้องตลาด และสามารถวัดค่าที่มีน้ำหนักมากกว่าหรือเท่ากับน้ำหนักของมือเทียมในท่ากำมือ การทดลองมีรายละเอียดดังนี้

### 5.2.1 อุปกรณ์การทดลอง

การทดสอบแรงจับใช้โหลดเซลล์สำหรับวัดแรงกด (Compression Load Cell) ยี่ห้อ KYOWA รุ่น LMB-A-200N ดังรูปที่ 5.7 (a) สามารถวัดแรงกดสูงสุด 200 นิวตัน และมีค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 2 นิวตันมีขนาดดังรูปที่ 5.7 (b) (รายละเอียดเพิ่มเติมในภาคผนวก ข) ใช้ร่วมกับอุปกรณ์อ่านสัญญาณ (Data Logger) ยี่ห้อ KYOWA รุ่น PCD-300-A ดังรูปที่ 5.8 ใช้สำหรับอ่านแรงกดบนโหลดเซลล์ผ่านไปยังโปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้



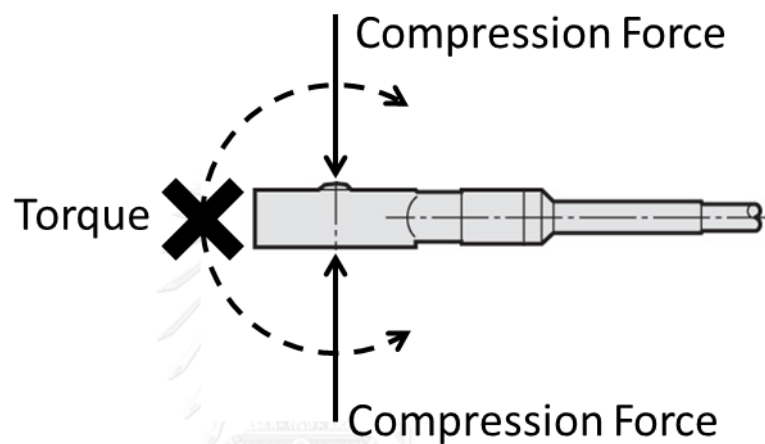
รูปที่ 5.7 (a) โหลดเซลล์สำหรับวัดแรงกด (Compression Load Cell)

Kyowa™ รุ่น LMB-A-200N, (b) ขนาดของโหลดเซลล์

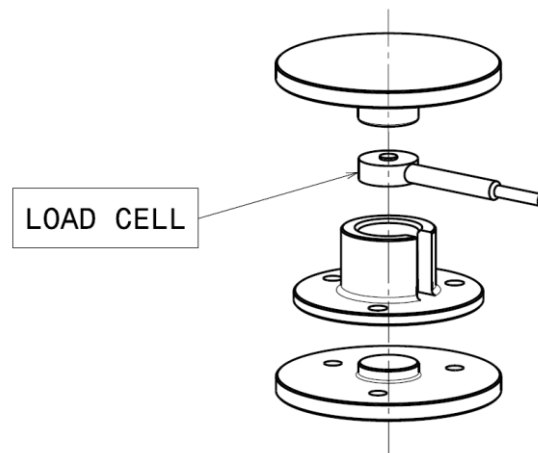


รูปที่ 5.8 อุปกรณ์อ่านสัญญาณ : Kyowa™ รุ่น PCD-300A

เนื่องจากโหลดเซลล์นี้เป็นชนิดสำหรับการรับแรงกดเท่านั้น หากมีแรงบิดเกิดขึ้นบนโหลดเซลล์ดังรูปที่ 5.9 จะก่อให้เกิดความเสียหายได้ จึงต้องออกแบบและผลิตชิ้นส่วนสำหรับยึดและรองรับแรงบิดในแกนต่างๆที่เกิดจากการจับของมือเทียมให้เหลือแรงกดทิศทางเดียวบนโหลดเซลล์ ชิ้นส่วนรองรับแรงบิดนี้มีลักษณะดังรูปที่ 5.10 ประกอบด้วยชิ้นส่วนลักษณะคล้ายเพลากลมทั้งหมด 3 ชิ้น โดยมีโหลดเซลล์ประกอบอยู่ภายใน ชิ้นส่วนนี้สามารถเคลื่อนที่เป็นเส้นตรงตามแกนกลางของโหลดเซลล์ได้ดังรูปที่ 5.11 (a) และไม่สามารถบิดไปมาในแกนอื่นได้ ชิ้นส่วนนี้จะเลื่อนเข้ามาสัมผัสกับโหลดเซลล์ได้เมื่อมีแรงกดดังรูปที่ 5.11 (b)

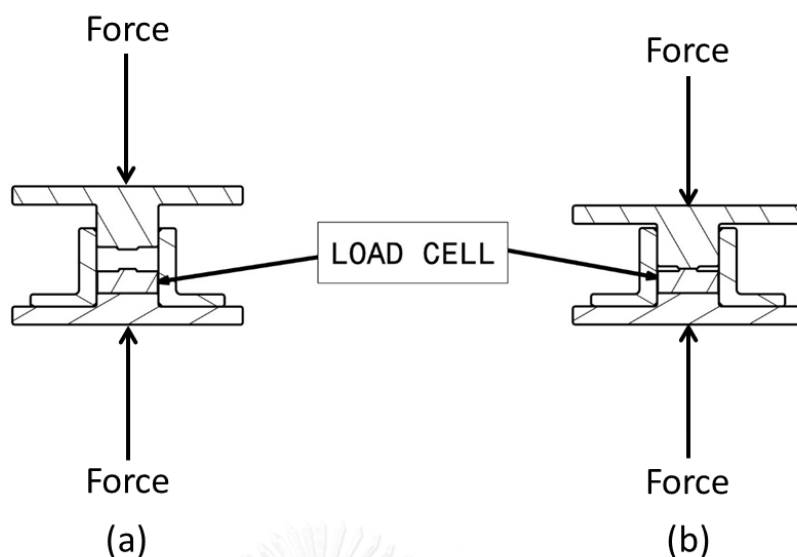


รูปที่ 5.9 โหลดเซลล์ถูกออกแบบให้รับแรงกดผ่านแนวแกนชิ้นงานเท่านั้น ไม่สามารถรับแรงบิดในแกนอื่นได้



รูปที่ 5.10 ชิ้นส่วนจับยึดโหลดเซลล์เพื่อป้องกันความเสียหายจากแรงบิด

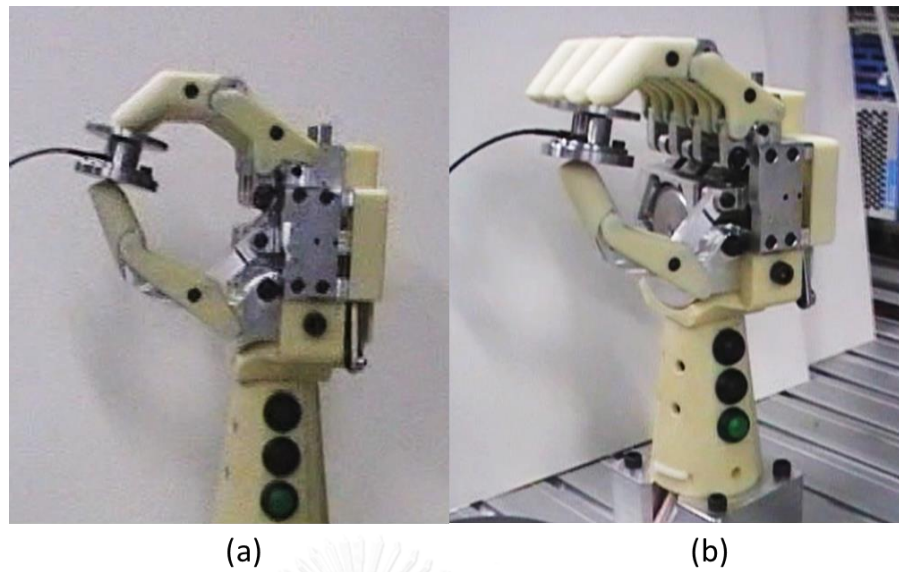




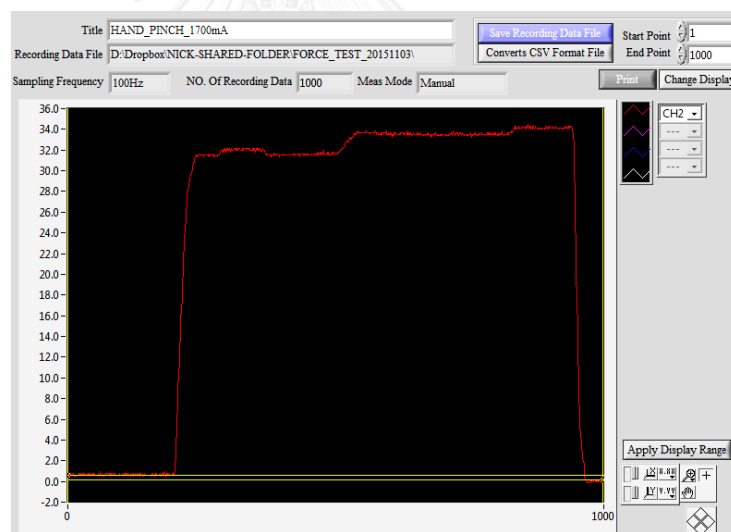
รูปที่ 5.11 รูปตัดของโหลดเซลล์และตัวรองรับแรงบิด (a) ขณะที่โหลดเซลล์ยังไม่ถูกกด, (b) ขณะโหลดเซลล์รับแรงกด

### 5.2.2 การทดลองวัดแรงจับ

การทดลองวัดแรงจับของมือเทียมด้วยโหลดเซลล์นี้ เลือกใช้ท่าจับแบบแม่นยำซึ่งปกติใช้สำหรับจับสิ่งของชิ้นเล็กและเป็นท่าที่ใช้บ่อยในชีวิตประจำวัน จึงเป็นท่าที่เหมาะสมในการใช้ทดสอบแรงจับ การทดลองทำการติดตั้งอุปกรณ์วัดแรงจับไว้ระหว่างนิ้วชี้, นิ้วกลาง, และนิ้วโป้ง ดังรูปที่ 5.12 นิ้วมือทั้งสามจะเคลื่อนที่เข้ามาบีบอุปกรณ์จากนั้นจึงวัดแรงที่เกิดขึ้น การควบคุมการเคลื่อนที่และแรงจับใช้การควบคุมกระแสไฟฟ้าสูงสุดของมอเตอร์ไฟฟ้าในมือเทียม โดยในขณะที่มือเทียมเคลื่อนที่เข้าหาชิ้นงานทดสอบแรง มอเตอร์จะหมุนด้วยความเร็ว 600 รอบต่อนาทีและใช้กระแสไฟฟ้าประมาณ 1,000 mA ซึ่งเป็นค่ากระแสไฟฟ้าปกติของมอเตอร์ (Nominal current) จากนั้นเมื่อมือเทียมเริ่มสัมผัสชิ้นงาน กระแสไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเป็นค่าที่ตั้งไว้ตั้งแต่ 1,200 mA ถึง 2,500 mA แล้วจึงวัดแรงบีบของมือเทียมจากอุปกรณ์อ่านแรงกดดังรูปที่ 5.13 เป็นตัวอย่างการวัดแรงจับที่เกิดขึ้นในการทดลอง



รูปที่ 5.12 การทดลองวัดแรงจับของมือเทียมโดยใช้อุปกรณ์วัดแรงกดในท่าจับแบบแม่นยำ  
(a) มุมมองด้านข้าง, (b) มุมมองสามมิติ

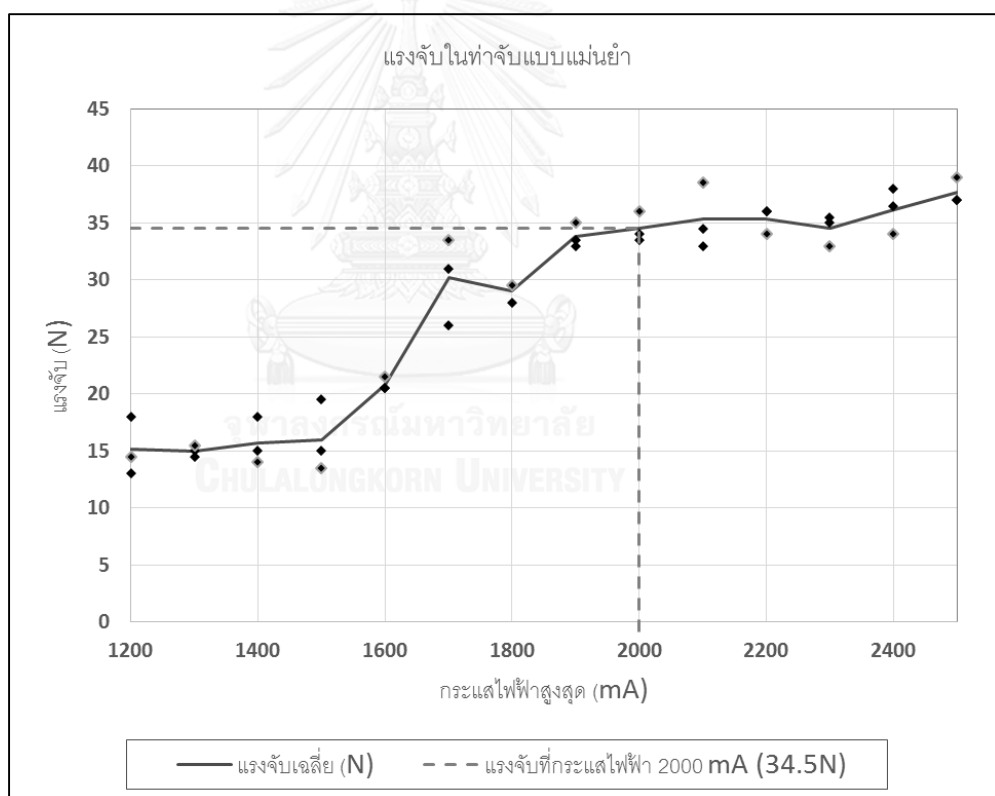


รูปที่ 5.13 ตัวอย่างการวัดสัญญาณแรงจับของมือเทียมบนโปรแกรมคอมพิวเตอร์

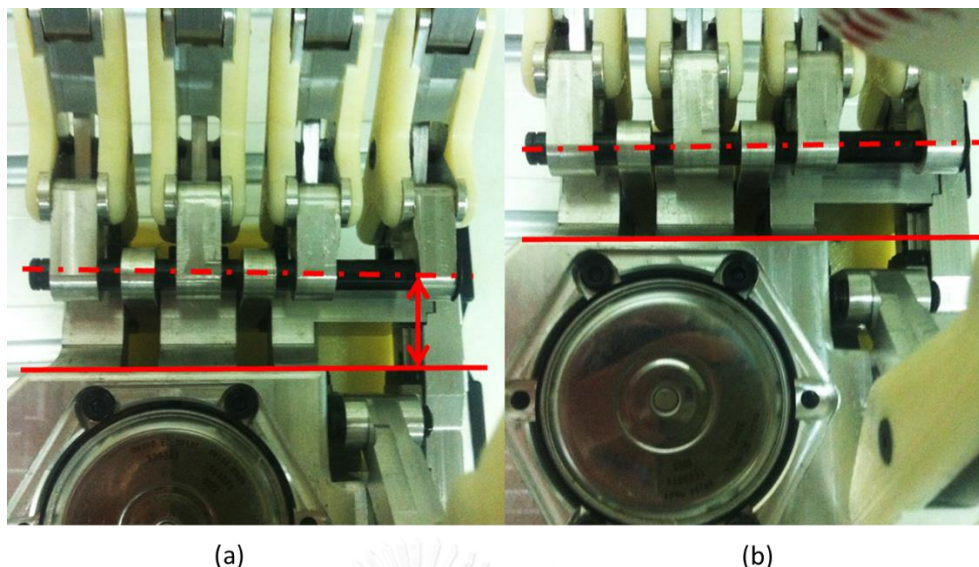
### 5.2.3 ผลการทดลองวัดแรงจับและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

ผลการทดสอบแรงจับมีค่าดังรูปที่ 5.14 พบว่าแรงจับของมือเทียมมีค่าเพิ่มขึ้นตามกระแสกระแสไฟฟ้าสูงสุดโดยมีค่าเฉลี่ยของแรงจับที่ 15 นิวตันสำหรับกระแสไฟฟ้าสูงสุด 1,200 mA และเพิ่มขึ้นจนถึง 37 นิวตันสำหรับกระแสไฟฟ้าสูงสุด 2,500 mA การทดลองทำการเพิ่มกระแสไฟฟ้าจนถึง 2,500 mA แล้วจึงหยุดเนื่องจากกลไกมือเทียมเริ่มเกิดการเสีรูปจนอาจเกิดความเสียหายต่อกลไกได้และแรงที่วัดได้มีค่าในระดับที่น่าพอใจ

จากผลการทดลองดังรูปที่ 5.14 แรงจับเฉลี่ยมีค่าเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกับเส้นตรงที่กระแสไฟฟ้า ตั้งแต่ 1,200 mA ถึง 2,000 mA และค่าไม่เพิ่มขึ้นเมื่อกระแสไฟฟ้ามากกว่า 2,000 mA ทั้งนี้แรงบิดของมอเตอร์ไฟฟ้ากับกระแสไฟฟ้านั้นมีความสัมพันธ์กันเป็นเส้นตรง เหตุการณ์นี้เป็นผลจากความสามารถในการเสียรูป (Deformation) ของกลไกมือเทียมซึ่งมีหลายปัจจัยเช่น ความคลาดเคลื่อนจากการผลิตและการประกอบ, การหมุนของเพลาชัปนิ้วมือ, หรือการเสียรูปแบบยืดหยุ่นของชิ้นส่วนต่างๆ เมื่อกลไกได้รับแรงเพิ่มมากขึ้นปัจจัยเหล่านี้จะส่งผลให้เกิดการเคลื่อนที่นอกเหนือจากการออกแบบส่งผลให้ปลายนิ้วไม่สามารถเคลื่อนที่เข้าไปจับวัตถุให้แรงขึ้นได้เมื่อกลไกหมุนไป การเสียรูปที่เด่นชัดที่สุดจากการทดลองคือ การหมุนของเพลาชัปนิ้วมือ เมื่อใช้กระแสไฟฟ้าต่ำกว่า 2,000 mA เพลาชัปนิ้วมือทั้งสองจะมีทิศขนานกับโครงสร้างหลักของมือเทียมดังรูปที่ 5.15 (a) แต่เมื่อใช้กระแสไฟฟ้าสูงกว่า 2,000 mA เพลาชัปจะเริ่มเกิดการหมุนและเอียงทำมุมกับโครงสร้างหลักดังรูปที่ 5.15 (b) ส่งผลให้เกิดการขัดกันของกลไกและมีแรงเสียดทานเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว



รูปที่ 5.14 ผลการทดลองวัดแรงจับของมือเทียม

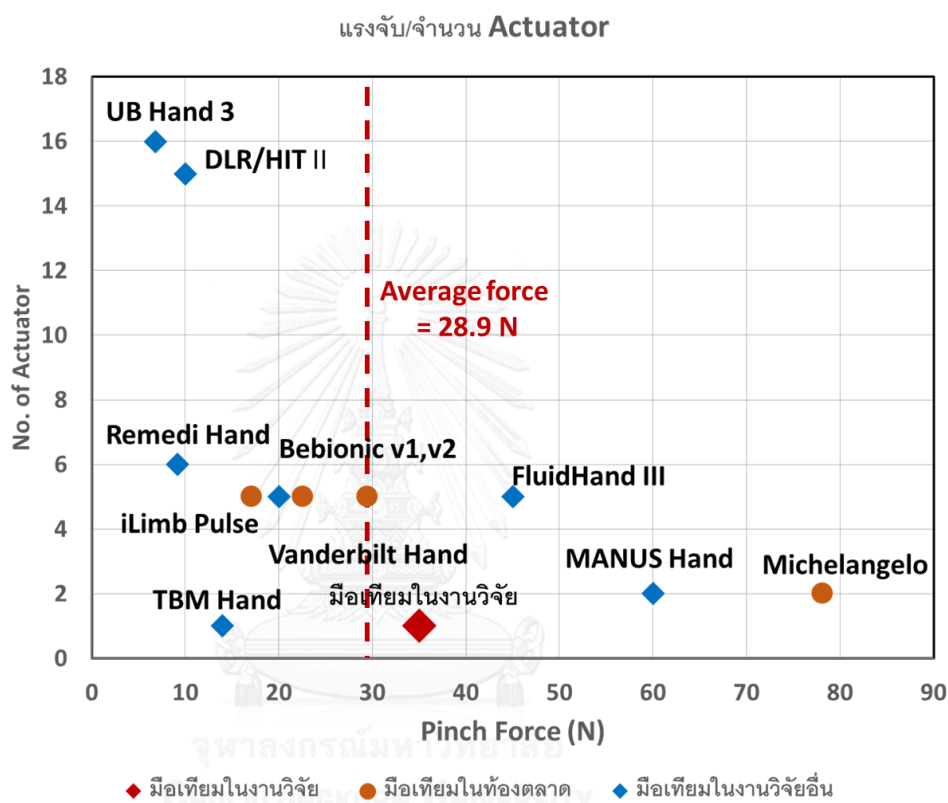


รูปที่ 5.15 เพลาขั้วนิ้วมือขณะทำการทดลองวัดแรงจับ (a) กระแสไฟฟ้าต่ำกว่า 2,000 mA, (b) กระแสไฟฟ้าสูงกว่า 2,000 mA

การออกแบบมือเทียมส่วนมากจะมีปัญหาในการเลือกระหว่างแรงจับและความซับซ้อนของมือเทียม หากใช้จำนวนตัวขับเคลื่อนเพิ่มขึ้นมือเทียมจะมีองศาอิสระเพิ่มขึ้นและสามารถเคลื่อนที่ทำได้หลากหลาย แต่แรงจับจะมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากพื้นที่ภายในมือเทียมมีจำกัดจึงทำให้ตัวขับเคลื่อนมีขนาดเล็กลงและมีกำลังขับน้อยลง ทั้งนี้ความสามารถของมือเทียมที่ใช้จำนวนตัวขับเคลื่อนเท่ากันยังมีความแตกต่างกันไปตามขนาดของตัวขับเคลื่อน, กำลังทด, และแรงเสียดทานในกลไกอีกด้วย

งานวิจัยนี้จึงทำการเปรียบเทียบความสามารถของมือเทียมในงานวิจัยเทียบกับมือเทียมในงานวิจัยอื่นและมือเทียมในท้องตลาด จากผลการทดลองดังรูปที่ 5.14 หากตั้งค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดไว้ที่ 2,000 mA ซึ่งอยู่ภายในขอบเขตการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้าและไม่ทำให้กลไกเสียหาย มือเทียมจะมีแรงจับเฉลี่ย 34.5 นิวตันโดยมีตัวขับเคลื่อน 1 ตัว ทำการเปรียบเทียบแรงจับและจำนวนตัวขับเคลื่อนกับมือเทียมในงานวิจัยอื่นและมือเทียมในท้องตลาดดังรูปที่ 5.16 เห็นได้ว่ามือเทียมในงานวิจัยนี้มีแรงจับสูงกว่าค่าเฉลี่ยของมือเทียมทั้งหมดคือ 28.9 นิวตัน มือเทียมที่มีแรงจับสูงกว่ามือเทียมในงานวิจัยนี้คือ Michelangelo Hand เป็นมือเทียมในท้องตลาดที่ใช้ตัวขับเคลื่อนสองตัวสามารถให้แรงจับได้สูงเนื่องจากการใช้การขับเคลื่อนแบบลูกเบี้ยว [14], MANUS Hand [18] เป็นมือเทียมในงานวิจัยอื่นซึ่งใช้มอเตอร์ไฟฟ้าในการขับเคลื่อน และ Fluid Hand [11] เป็นมือเทียมในงานวิจัยอื่นซึ่งใช้ระบบไฮดรอลิกในการขับเคลื่อน

หากเปรียบเทียบเฉพาะมือเทียมในท้องตลาดแล้ว มือเทียมในงานวิจัยนี้มีแรงจับ 34.5 นิวตัน ซึ่งมีค่าสูงกว่ามือเทียมในท้องตลาดส่วนใหญ่ ในขณะที่ใช้ตัวขับเคลื่อนหนึ่งตัวซึ่งน้อยกว่ามือเทียมอื่น และสามารถทำท่าแบมือ, ทำจับแบบแม่นยำ, และทำจับแบบกำมือได้ ผลการวัดแรงจับนี้แสดงถึงความสามารถของมือเทียมที่อยู่ในระดับที่น่าพอใจและความเป็นไปได้ในการนำไปใช้งานจริงในชีวิตประจำวันได้

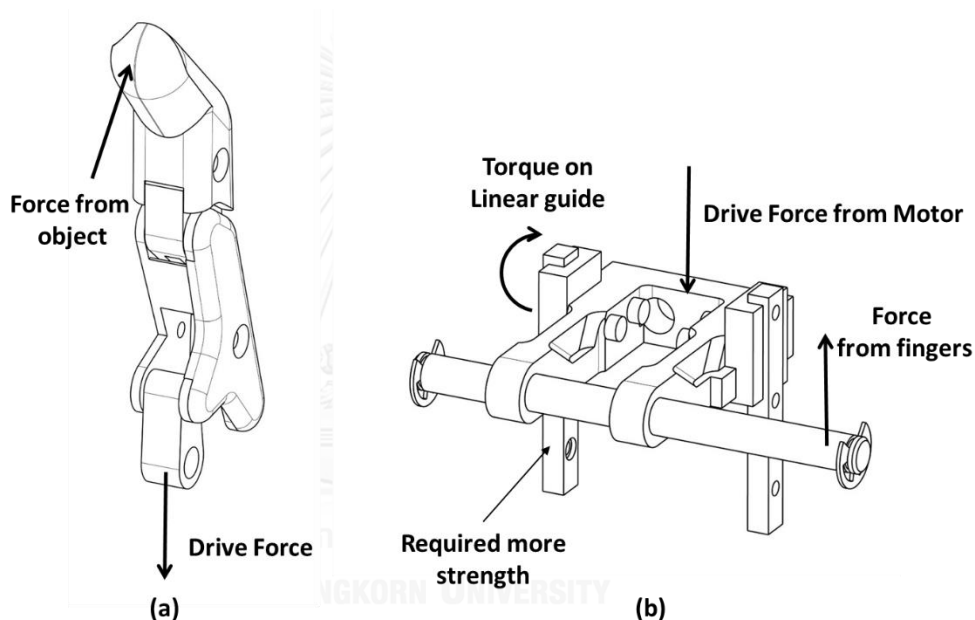


รูปที่ 5.16 กราฟเปรียบเทียบแรงจับและจำนวนตัวขับเคลื่อนระหว่างมือเทียมในงานวิจัยนี้, มือเทียมในท้องตลาด, และมือเทียมในงานวิจัยอื่น

#### 5.2.4 การปรับปรุงเพื่อเพิ่มแรงจับของมือเทียม

มือเทียมในงานวิจัยนี้ถูกนำมาทดสอบดังหัวข้อ 5.2.3 มือเทียมสามารถให้แรงจับถึง 34.5 N ซึ่งมีค่าสูงกว่ามือเทียมส่วนใหญ่ในท้องตลาด แต่แรงจับนี้ยังไม่ใช่แรงจับจากแรงบิดสูงสุดของมอเตอร์ไฟฟ้าเนื่องจากมอเตอร์ไฟฟ้าสามารถรับกระแสไฟฟ้าได้สูงถึง 5,000 mA ในขณะที่การใช้งานของมือเทียมนี้อยู่ที่ 2,000 mA การจำกัดกระแสไฟฟ้านี้มีสาเหตุจากการเริ่มเสีรูปร่างของกลไกมือเทียมที่กระแสไฟฟ้า 2,500 mA จึงจำกัดกระแสไฟฟ้าในการใช้งานไว้เพื่อป้องกันความเสียหายของกลไก หากสามารถปรับปรุงกลไกให้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้นได้ มือเทียมย่อมสามารถให้แรงจับได้สูงขึ้น เนื่องจากสามารถใช้งานมอเตอร์ไฟฟ้าได้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

จากการทดลองในหัวข้อ 5.2.3 พบว่าการเสียรูปที่มีผลมากที่สุดคือการหมุนของเพลาชัชนิ้วมือทั้งสอง มีสาเหตุจากเมื่อมีแรงจากวัตถุกระทำกับปลายนิ้วดังรูปที่ 5.17 (a) แรงดึงจะส่งไปยังเพลาชัชนิ้วดังรูปที่ 5.17 (b) จะเกิดแรงบิดบนรางเลื่อนเส้นตรง (Linear Guide) ซึ่งทำการบังคับการเคลื่อนที่ของกลไกเป็นเส้นตรง รางเลื่อนเส้นตรงส่วนที่อยู่ใกล้นิ้วก้อยซึ่งมีระยะห่างจากนิ้วชี้และนิ้วกลางที่ใช้จับชิ้นงานมากที่สุดจะเกิดความเสียหายเป็นชิ้นส่วนแรกเนื่องจากมีแขนของแรงบิดสูงสุดดังรูปที่ 5.17 (b) ปัญหานี้สามารถแก้ไขได้โดยการเลือกใช้รางเลื่อนเส้นตรงที่มีความแข็งแรงสูงขึ้นซึ่งต้องใช้พื้นที่มากขึ้นเช่นกัน หากทำการวิเคราะห์แรงบิดและความเค้นที่เกิดขึ้นในแต่ละชิ้นส่วนเพิ่มเติม จะสามารถออกแบบและเลือกใช้ชิ้นส่วนต่างๆ ให้พอดีกับแรงที่เกิดขึ้นในจุดต่างๆ เป็นการประหยัดเนื้อที่และทำให้ได้แรงจับสูงขึ้น



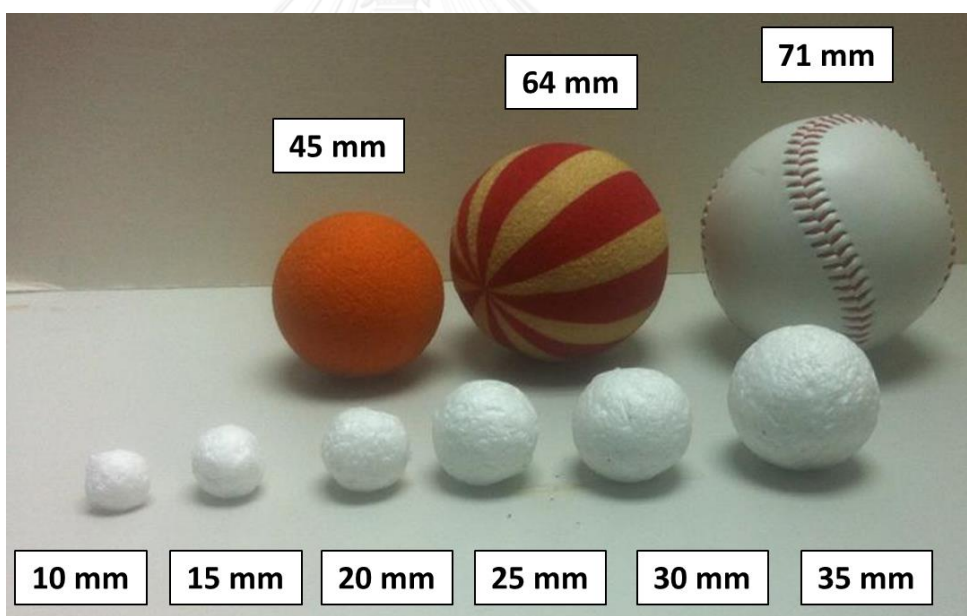
รูปที่ 5.17 แรงดึงจากนิ้วชี้ส่งผลให้เกิดแรงบิดที่รางบังคับเส้นตรงชิ้นที่มีระยะห่างที่สุด ส่งผลให้รางบังคับชิ้นนี้เสียหายเป็นชิ้นแรก

### 5.3 การทดสอบความสามารถในการจับวัตถุขนาดต่างๆ

#### 5.3.1 อุปกรณ์การทดลองจับวัตถุขนาดต่างๆ

วัตถุรูปร่างทรงกลมและทรงกระบอก ถูกนำมาทดสอบความสามารถในการจับของมือเทียม โดยใช้ท่าจับแบบแม่นยำและท่าจับแบบกำมือ วัตถุทรงกลมในการทดลองมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10, 15, 20, 25, 30, 35, 45, 64, และ 71 มิลลิเมตรตามลำดับ ซึ่งทำจากวัสดุประเภทโฟมและพลาสติกดังรูปที่ 5.18 จึงมีความอ่อนนุ่มและง่ายต่อการยึดจับ ทั้งนี้วัตถุขนาด 71 มิลลิเมตรมีลักษณะเป็นลูกเบสบอลซึ่งมีความแข็งและแน่นกว่าวัตถุอื่นเพื่อใช้สำหรับทดสอบการยึดจับวัตถุที่มีความแข็งกว่าปกติด้วย

วัตถุรูปร่างทรงกระบอกแบ่งเป็นสองกลุ่มคือ กลุ่มวัตถุทรงกระบอกที่มีลักษณะแข็งทำจากวัสดุประเภทโลหะ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35, 45, 53, 66, 96, 117, 126, และ 132 มิลลิเมตรตามลำดับดังรูปที่ 5.19 และรูปที่ 5.20 และกลุ่มขวดน้ำดื่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 65 และ 85 มิลลิเมตรซึ่งมีลักษณะนิ่มกว่าโลหะ มีน้ำหนักมากและเป็นวัตถุที่ใช้บ่อยในชีวิตประจำวันดังรูปที่ 5.21

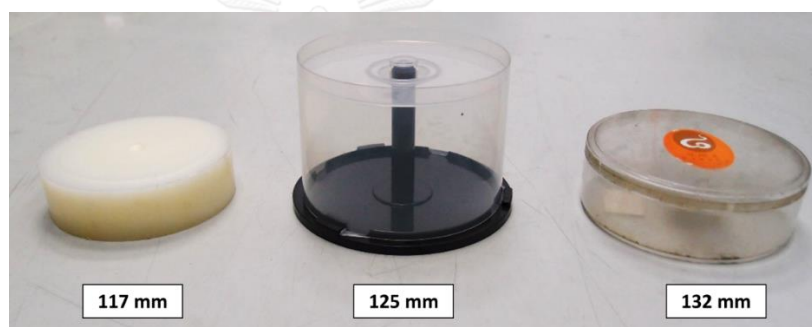


รูปที่ 5.18 วัตถุทรงกลมสำหรับทดสอบ เส้นผ่านศูนย์กลาง 10, 15, 20, 25, 30, 35, 45, 64, และ 71 มิลลิเมตร





รูปที่ 5.19 วัตถุทรงกระบอกสำหรับทดสอบ เส้นผ่านศูนย์กลาง 35, 45, 53, 66 และ 96 มิลลิเมตร



รูปที่ 5.20 วัตถุทรงกระบอกสำหรับทดสอบ เส้นผ่านศูนย์กลาง 117, 125, และ 132 มิลลิเมตร



รูปที่ 5.21 วัตถุทรงกระบอกประเภทขวดน้ำสำหรับการทดสอบ เส้นผ่านศูนย์กลาง 65 และ 85 มิลลิเมตร มีน้ำหนัก 770 กรัมและ 1,500 กรัม



### 5.3.2 การทดลองจับวัตถุ

การทดลองทำการจับวัตถุดังหัวข้อ 5.3.1 โดยแบ่งเป็นท่าจับแบบแมนย่ำและท่าจับแบบกำมือในการจับวัตถุทั้งสองรูปร่างในขนาดต่างๆ การทดลองมีรายละเอียดดังนี้

#### 1. ท่าจับแบบแมนย่ำ

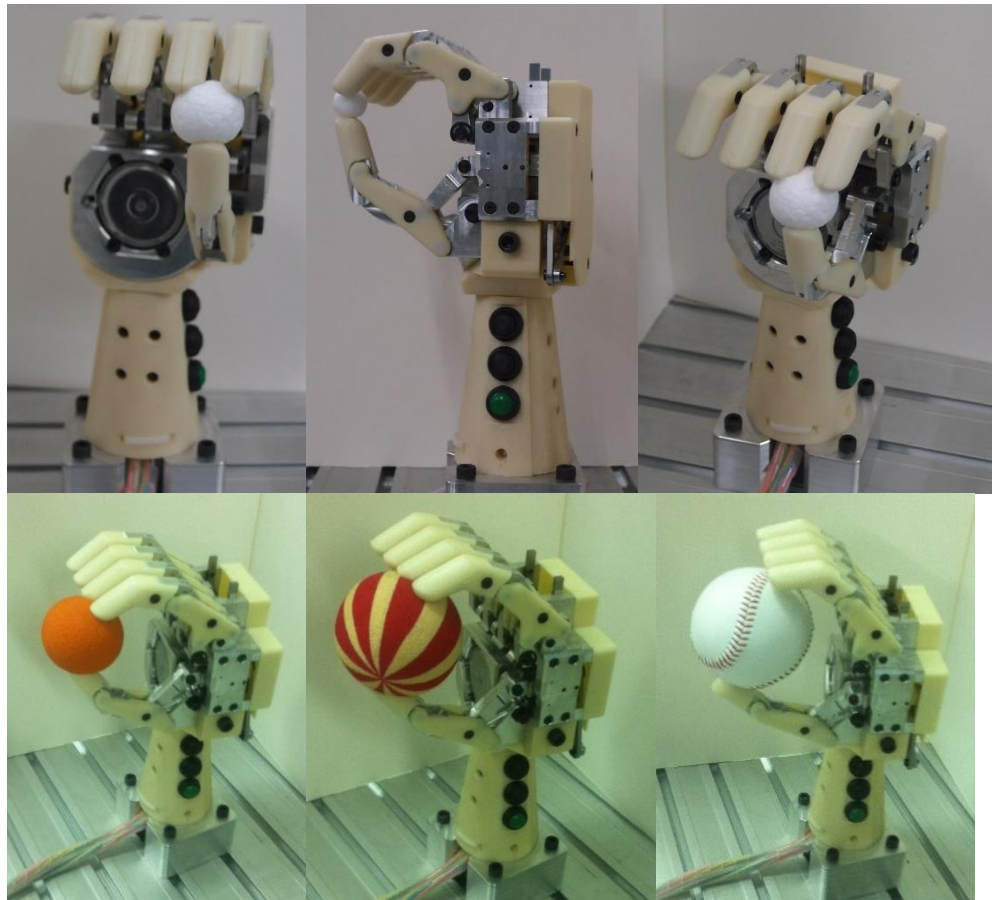
ทดสอบทำการจับวัตถุทรงกลมตั้งแต่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ถึง 71 มิลลิเมตรดังรูปที่ 5.22 โดยให้วัตถุทรงกลมอยู่ระหว่างปลายนิ้วชี้, นิ้วกลาง, และนิ้วโป้งเพื่อให้เกิดการจับที่มั่นคง ทำการจับวัตถุทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 ถึง 132 มิลลิเมตรดังรูปที่ 5.23 โดยให้แกนของทรงกระบอกมีทิศเข้าหาฝ่ามือเพื่อให้เกิดการสัมผัสบนเส้นรอบวงของวัตถุ ไม่จับขวดน้ำในท่าจับแบบแมนย่ำเนื่องจากขวดน้ำมีน้ำหนักมากเกินไปและไม่สามารถจับยกขวดน้ำขึ้นมาได้ในท่าจับแบบแมนย่ำ ทำการเก็บข้อมูลขนาดของวัตถุที่จับได้และไม่ได้

#### 2. ท่าจับแบบกำมือ

ทดสอบทำการจับวัตถุทรงกลมตั้งแต่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ถึง 71 มิลลิเมตรดังรูปที่ 5.24 โดยให้วัตถุทรงกลมสัมผัสกับส่วนท้องของนิ้วชี้, นิ้วกลาง, นิ้วโป้ง, และสัมผัสกับฝ่ามือ ทดสอบทำการจับวัตถุทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 ถึง 132 มิลลิเมตรดังรูปที่ 5.25 โดยให้แกนของทรงกระบอกมีทิศไปทางด้านข้างของฝ่ามือ ใช้นิ้วชี้, นิ้วกลาง, นิ้วโป้ง, และฝ่ามือสัมผัสกับวัตถุ

#### 3. จับยกวัตถุขึ้นมาจากพื้น

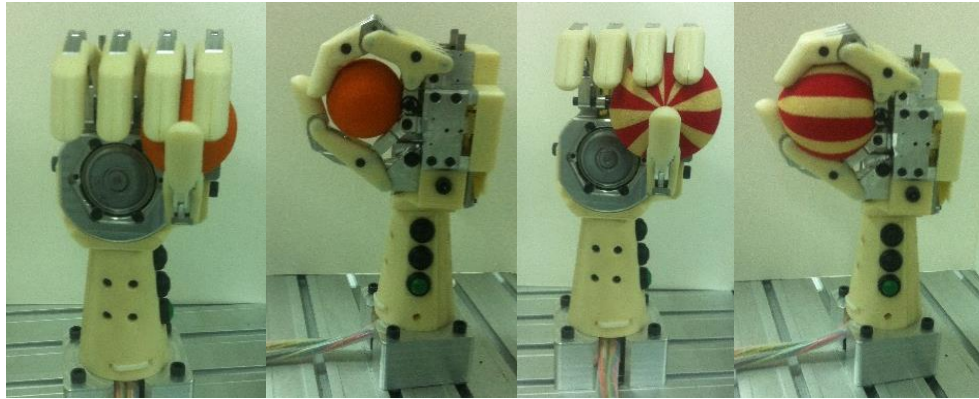
ทดสอบทำการจับยกวัตถุจากพื้นราบ เพื่อดูความสามารถในการยกวัตถุรูปร่างและน้ำหนักต่างๆโดยเลือกใช้ท่าจับที่เหมาะสมกับลักษณะของวัตถุนั้นๆ เลือกใช้วัตถุรูปทรงกลมและทรงกระบอกในการทดสอบ ดังรูปที่ 5.26 ทำการหยิบวัตถุทรงกลมขึ้นมาจากพื้นด้วยท่าจับแบบแมนย่ำ, รูปที่ 5.27 ทำการหยิบวัตถุทรงกระบอกจากพื้นด้วยท่าจับแบบกำมือ, และรูปที่ 5.28 ทดสอบจับยกขวดน้ำน้ำหนัก 770 กรัมและ 1,500 กรัมด้วยท่าจับแบบกำมือ



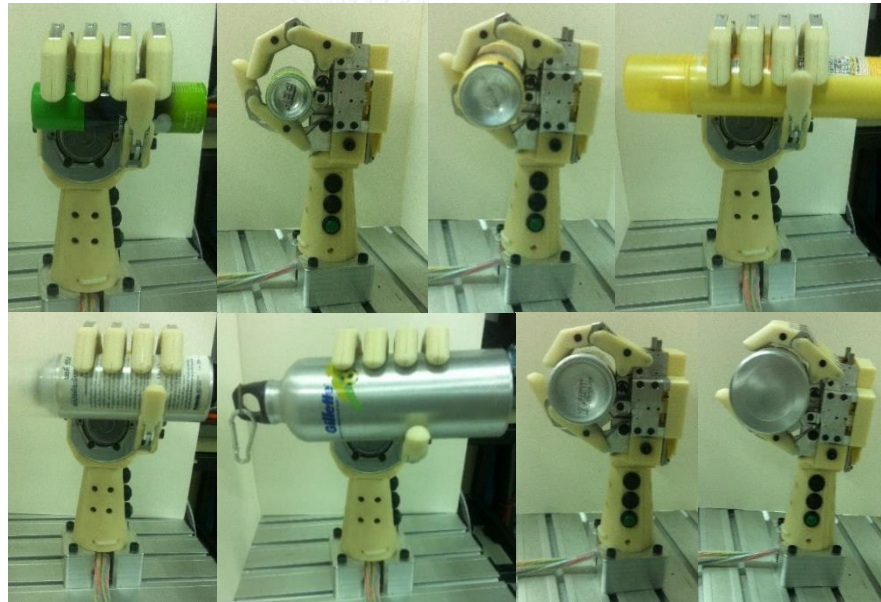
รูปที่ 5.22 การทดสอบจับวัตถุทรงกลมในท่าจับแบบแม่นยำ



รูปที่ 5.23 การทดสอบจับวัตถุทรงกระบอกในท่าจับแบบแม่นยำ



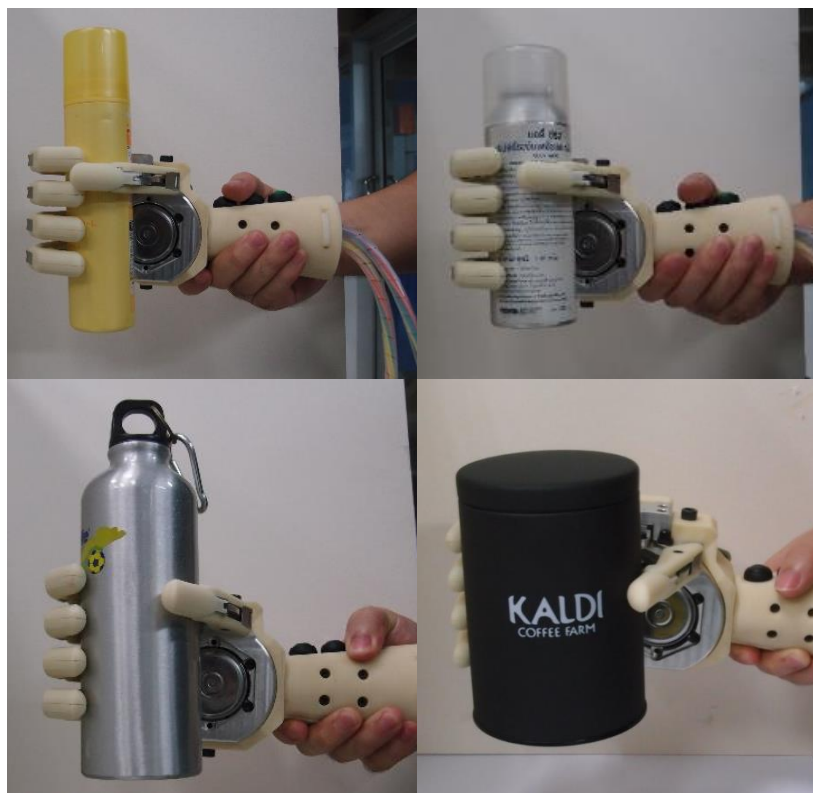
รูปที่ 5.24 การทดสอบจับวัตถุทรงกลมในท่าจับแบบกำมือ



รูปที่ 5.25 การทดสอบจับวัตถุทรงกระบอกในท่าจับแบบกำมือ



รูปที่ 5.26 การทดสอบจับวัตถุทรงกลมด้วยท่าจับแบบแมนยำ



รูปที่ 5.27 การทดสอบจับยกวัตถุทรงกระบอกด้วยท่าจับแบบกำมือ



รูปที่ 5.28 การทดสอบจับยกวัตถุขวดน้ำทรงกระบอก (น้ำหนัก 770 และ 1500 กรัมจากด้านซ้าย) ด้วยท่าจับแบบกำมือ

### 5.3.3 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากการทดลองในหัวข้อ 5.3.2 สามารถสรุปผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 5.1 มีรายละเอียดดังนี้

#### ทำจับแบบแมนย่ำ

1. มือเทียมสามารถจับชิ้นงานทรงกลมได้ตั้งแต่ขนาด 15 มิลลิเมตรถึง 71 มิลลิเมตร แต่ลูกเบสบอลขนาด 71 มิลลิเมตรนั้นจับได้ไม่มั่นคงนักเนื่องจากมีลักษณะแข็งและลื่นทำให้ปลายนิ้วมือเทียมซึ่งเป็นพลาสติกลักษณะแข็งเช่นกันจับชิ้นงานได้ยาก
2. มือเทียมสามารถจับชิ้นงานทรงกระบอกได้ถึงขนาด 96 มิลลิเมตร ชิ้นงานขนาด 117 มิลลิเมตรขึ้นไปจับไม่ได้ดังรูปที่ 5.29 เนื่องจากชิ้นงานมีขนาดใหญ่และนิ้วมือไม่สามารถสัมผัสรอบชิ้นงานได้ ชิ้นงานอื่นจับได้มั่นคงเพียงชิ้นงานทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 มิลลิเมตรเท่านั้น ชิ้นงานทรงกระบอกชิ้นอื่นจับได้ไม่มั่นคงเนื่องจากมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่เกินไปและความยาวของชิ้นงานทำให้เกิดแรงบิดออกจากนิ้วมืองดรูปที่ 5.30 ทำจับแบบแมนย่ำจึงเหมาะสำหรับใช้งานหยิบจับวัตถุขนาดเล็กหรือวัตถุที่มีจุดศูนย์กลางของมวลอยู่ในนิ้วมือของมือเทียมมากกว่า

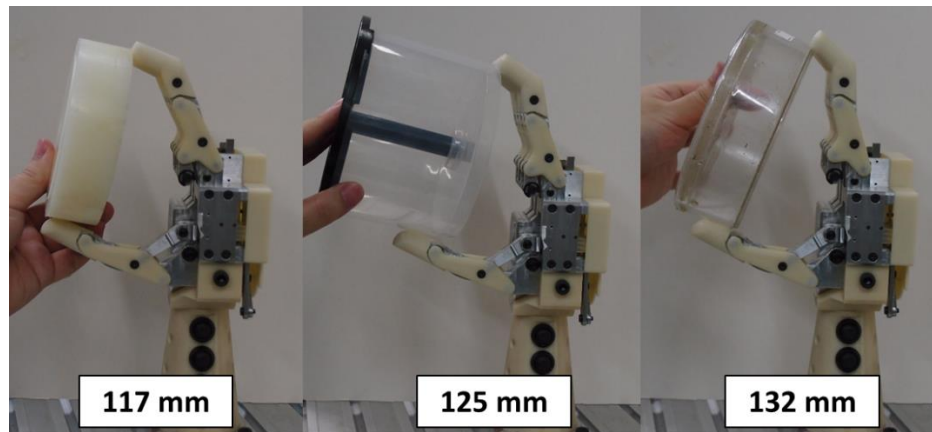
#### ทำจับแบบกำมือ

1. มือเทียมไม่สามารถจับชิ้นงานทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 15 ถึง 35 มิลลิเมตรได้ สามารถจับชิ้นงานทรงกลมขนาด 45 มิลลิเมตรได้แต่ไม่มั่นคงเนื่องจากชิ้นงานขนาดเล็กกว่าฝ่ามือและนิ้วมือเล็กน้อย สามารถจับชิ้นงานทรงกลมขนาด 64 และ 71 มิลลิเมตรได้พอดีและมั่นคงเนื่องจากขนาดของชิ้นงานพอดีและรับเข้ากับส่วนโค้งของนิ้วและฝ่ามือได้พอดี
2. มือเทียมไม่สามารถจับชิ้นงานทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 มิลลิเมตรได้เนื่องจากขนาดชิ้นงานเล็กเกินไป ไม่สามารถจับชิ้นงานขนาด 117 มิลลิเมตรขึ้นไปได้เนื่องจากชิ้นงานมีขนาดใหญ่เกินไปดังรูปที่ 5.31 สามารถจับชิ้นงานทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 45 ถึง 96 มิลลิเมตรได้ แต่ชิ้นงานขนาด 85 มิลลิเมตรมีลักษณะเป็นขวดพลาสติก มีน้ำหนัก 1500 กรัม จับและยกขึ้นมาได้ยากเนื่องจากมีขนาดใหญ่และหนักเกินไป

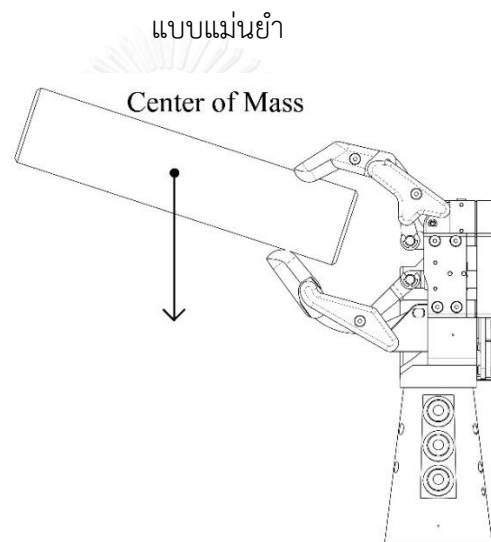


ตารางที่ 5.1 ผลการทดลองจับวัตถุทรงกลมและทรงกระบอกขนาดต่างๆในท่าจับแบบ  
แม่นยำและท่าจับแบบกำมือ

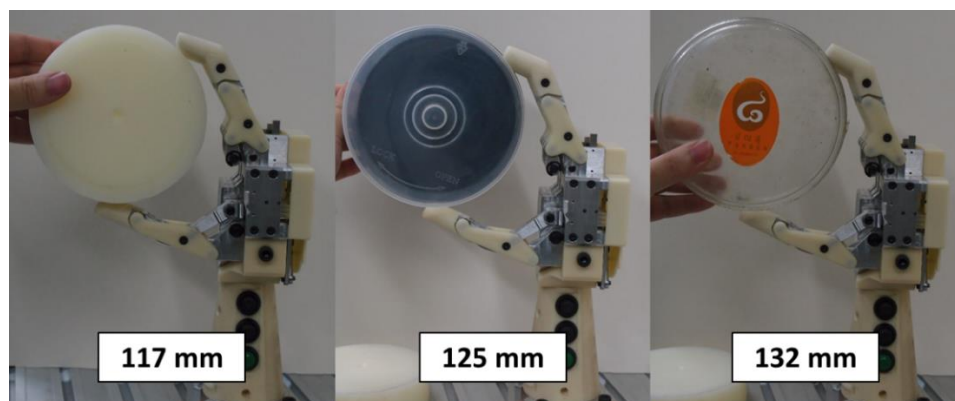
	รูปร่าง	เส้นผ่านศูนย์กลาง (มิลลิเมตร)	ลักษณะ	ผลการทดลอง		น้ำหนัก (กรัม)	ความยาว (มิลลิเมตร)
				การจับวัตถุ	หมายเหตุ		
ท่าจับแบบ แม่นยำ (35% ของ ชีวิตประจำวัน)	ทรงกลม	10	ลูกบอลโฟม	จับไม่ได้	ขนาดเล็กเกินไป	-	-
		15	ลูกบอลโฟม	จับได้	ขนาดเล็กเกินไป	-	-
		20	ลูกบอลโฟม	จับได้	ขนาดเล็กเกินไป	-	-
		25	ลูกบอลโฟม	จับได้		-	-
		30	ลูกบอลโฟม	จับได้		-	-
		35	ลูกบอลโฟม	จับได้		-	-
		45	ลูกบอลพลาสติก	จับได้		10	-
	64	ลูกบอลพลาสติก	จับได้		22	-	
	71	ลูกเบสบอล/แข็ง	จับได้	ขนาดใหญ่เกินไป	140	-	
	ทรงกระบอก	35	ขวดลูมิเนียม	จับได้		73	116
		45	ขวดลูมิเนียม	จับได้	ยาวเกินไป	115	195
		53	ขวดลูมิเนียม	จับได้	ยาวเกินไป	100	165
		66	ขวดลูมิเนียม	จับได้	ยาวเกินไป	600	156
		96	กระป๋องลูมิเนียม	จับได้	ขนาดใหญ่/จับได้ลำบาก	250	140
		117	เปล้าพลาสติก	จับไม่ได้	ขนาดใหญ่เกินไป	325	35
		125	กล่องพลาสติก	จับไม่ได้	ขนาดใหญ่เกินไป	110	90
	132	กล่องพลาสติก	จับไม่ได้	ขนาดใหญ่เกินไป	60	45	
ท่าจับแบบกำ มือ (35% ของ ชีวิตประจำวัน)	ทรงกลม	15	ลูกบอลโฟม	จับไม่ได้	ชิ้นงานเล็กเกินไป	-	-
		20	ลูกบอลโฟม	จับไม่ได้	ชิ้นงานเล็กเกินไป	-	-
		25	ลูกบอลโฟม	จับไม่ได้	ชิ้นงานเล็กเกินไป	-	-
		30	ลูกบอลโฟม	จับไม่ได้	ชิ้นงานเล็กเกินไป	-	-
		35	ลูกบอลโฟม	จับไม่ได้	ชิ้นงานเล็กเกินไป	-	-
		45	ลูกบอลพลาสติก	จับได้	ชิ้นงานเล็กเกินไป	10	-
		64	ลูกบอลพลาสติก	จับได้	ชิ้นงานพอดีกับกำมือ	22	-
	71	ลูกเบสบอล/แข็ง	จับได้	ชิ้นงานใหญ่กว่ากำมือเล็กน้อย	140	-	
	ทรงกระบอก	35	ขวดลูมิเนียม	จับไม่ได้	ชิ้นงานเล็กเกินไป	73	116
		45	ขวดลูมิเนียม	จับได้	ชิ้นงานเล็กเกินไป	115	195
		53	ขวดลูมิเนียม	จับได้	ชิ้นงานพอดีกับมือและนิ้ว	100	165
		66	ขวดลูมิเนียม	จับได้	ชิ้นงานพอดีกับมือและนิ้ว	600	156
		96	กระป๋องลูมิเนียม	จับได้	ชิ้นงานพอดีกับมือและนิ้ว	250	140
		117	เปล้าพลาสติก	จับไม่ได้	ขนาดใหญ่เกินไป	325	35
		125	กล่องพลาสติก	จับไม่ได้	ขนาดใหญ่เกินไป	110	90
		132	กล่องพลาสติก	จับไม่ได้	ขนาดใหญ่เกินไป	60	45
		65	ขวดน้ำพลาสติก	จับได้	ชิ้นงานพอดีกับมือและนิ้ว	770	150
85		ขวดน้ำพลาสติก	จับได้	ชิ้นงานหนักเกินไป	1500	200	



รูปที่ 5.29 มือเทียมไม่สามารถจับวัตถุขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 117 มิลลิเมตรขึ้นไปในท่าจับ



รูปที่ 5.30 การจับวัตถุทรงกระบอกด้วยท่าจับแบบแม่นยำมีจุดศูนย์กลางของมวลอยู่ไกลจากมือเทียมทำให้เกิดแรงบิดขึ้นงานหลุดออกจากนิ้วมือ ส่งผลให้การจับไม่มั่นคง



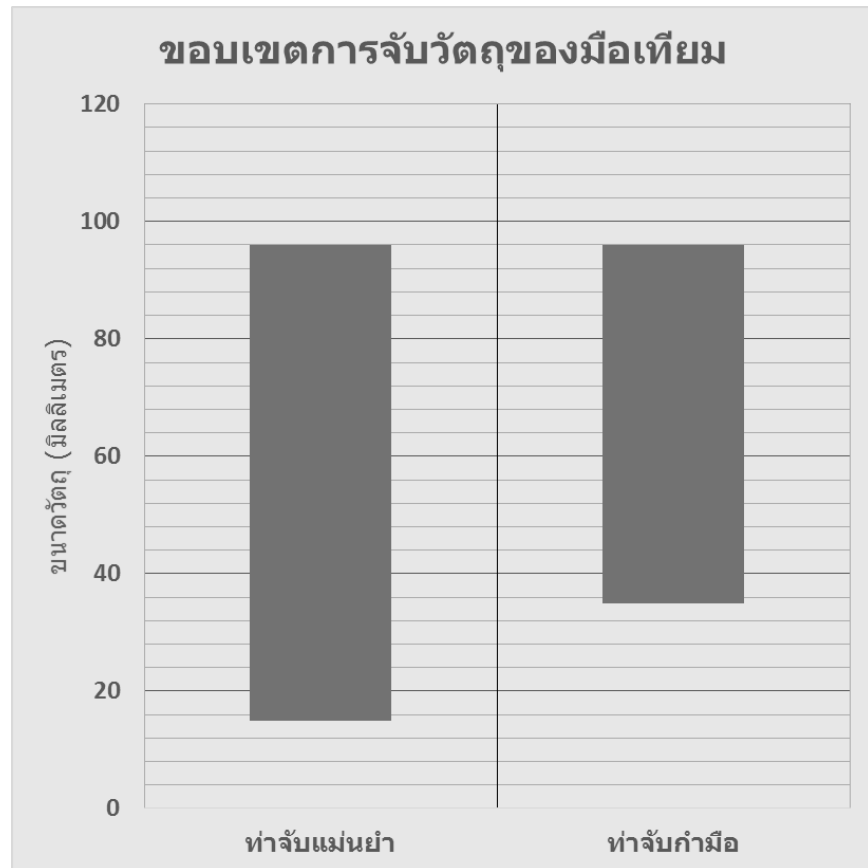
รูปที่ 5.31 มือเทียมไม่สามารถจับวัตถุขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 117 มิลลิเมตรขึ้นไปในท่าจับแบบกำมือ

จากการผลการทดลองข้างต้น สามารถวิเคราะห์ความสามารถในการจับของมือเทียมได้ดังนี้

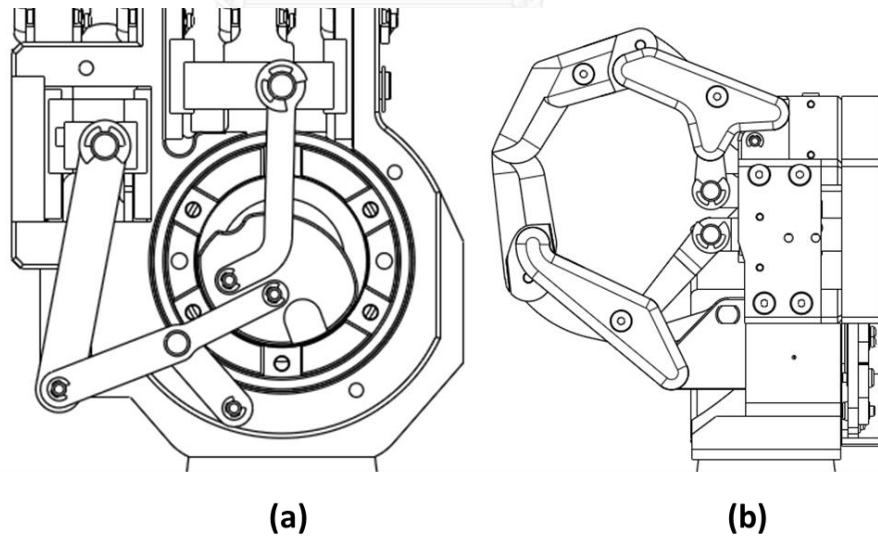
ท่าจับแบบแมนยามีขอบเขตในการจับวัตถุขนาด 15 – 96 มิลลิเมตรดังรูปที่ 5.32 หากวัตถุมีขนาดเล็กกว่า 15 มิลลิเมตรจะจับวัตถุไม่ได้เนื่องจากปลายนิ้วของมือเทียมไม่สามารถเคลื่อนที่เข้ามาสัมผัสกันได้พอดี ทำให้เกิดช่องว่างขณะทำท่าจับแบบแมนย่า ช่องว่างนี้เกิดจากความคลาดเคลื่อนในการผลิตและประกอบมือเทียม ในการออกแบบกำหนดให้เมื่อกลไกหมุนไปยังตำแหน่งท่าจับแบบแมนยาดังรูปที่ 5.33 (a) กลไกนิ้วมือควรจะเคลื่อนที่เข้ามาสัมผัสกันดังรูปที่ 5.33 (b) แต่ในมือเทียมที่ผลิตขึ้น เมื่อมอเตอร์ไฟฟ้าเคลื่อนที่ไปจนสุดขอบเขตของกลไกดังรูปที่ 5.34 (a) แล้วนิ้วมือกลับเคลื่อนที่ไปไม่ถึงตำแหน่งที่ต้องการดังรูปที่ 5.34 (b) สำหรับวัตถุขนาดใหญ่กว่า 96 มิลลิเมตร มือเทียมจะจับวัตถุไม่ได้เนื่องจากมีขนาดใหญ่เกินไปและไม่สามารถเข้าไปอยู่ระหว่างนิ้วมือได้ หากวัตถุมีขนาดใหญ่กว่า 64 มิลลิเมตรมือเทียมจะจับได้ไม่มั่นคงเนื่องจากกลไกนิ้วมือสามารถหดแรงได้มากขึ้นเมื่อนิ้วมือเข้ามาเยอะขึ้น การจับชิ้นงานขนาด 64 มิลลิเมตรขึ้นไปทำให้กลไกนิ้วมือเคลื่อนที่มาได้เพียงส่วนหนึ่ง ส่งผลให้ใช้แรงดึงกลไกดังรูปที่ 5.35 (a) มากกว่าการจับวัตถุเล็กดังรูปที่ 5.35 (b) ท่าจับแบบแมนยามีความสามารถในการจับวัตถุรูปร่างทรงกระบอกได้ไม่ดี เนื่องจากวัตถุมีความยาวและน้ำหนักของวัตถุอยู่ห่างออกไปจากมือเทียม ทำให้วัตถุสามารถหลุดจากการจับได้ง่ายด้วยแรงบิดของน้ำหนักวัตถุดังรูปที่ 5.30

ท่าจับแบบกำมือมีขอบเขตในการจับวัตถุขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 – 96 มิลลิเมตรดังรูปที่ 5.32 หากวัตถุมีขนาดเล็กกว่า 35 มิลลิเมตรจะจับวัตถุไม่ได้เนื่องจากวัตถุเล็กกว่าช่องว่างภายในนิ้วมือและอุ้งมือดังรูปที่ 5.36 ปัญหานี้เกิดจากการออกแบบการเคลื่อนที่ของกลไกนิ้วมือ สามารถแก้ไขได้หากปรับเปลี่ยนกลไก แต่มือเทียมสามารถใช้งานหยิบจับวัตถุขนาดเล็กกว่า 35 มิลลิเมตรได้หากเปลี่ยนไปใช้ท่าจับแบบแมนย่าแทน ปัญหานี้จึงไม่ส่งผลต่อการใช้งานจริง

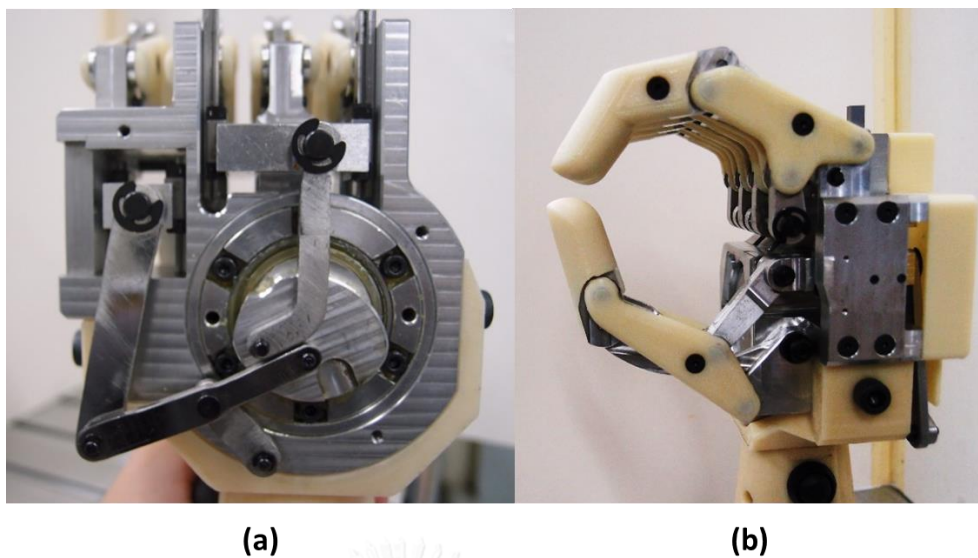




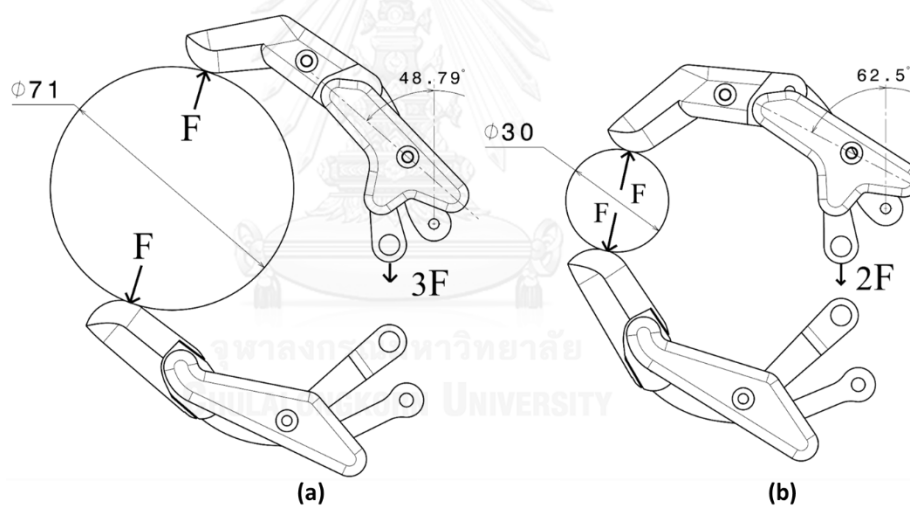
รูปที่ 5.32 ขอบเขตของขนาดวัตถุที่มือเทียมจับได้ในทำจับแบบแคปซูลยาและทำจับแบบแก้วน้ำ



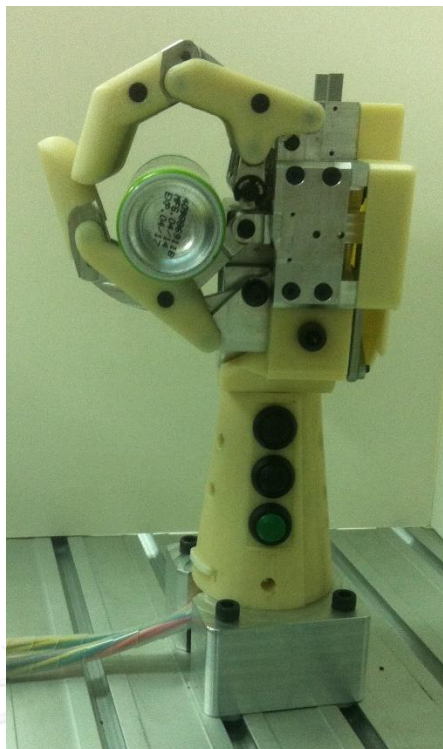
รูปที่ 5.33 กลไกมือเทียมขณะทำทำจับแบบแคปซูลยาตามการออกแบบในโปรแกรม CAD (a) ,  
มอเตอร์ไฟฟ้าหมุนไปยังทำจับแบบแคปซูลยา, (b) ปลายนิ้วมือเคลื่อนที่มาสัมผัสกัน



รูปที่ 5.34 กลไกมือเทียมจริงขณะทำท่าจับแบบแมนย่ำ (a) มอเตอร์ไฟฟ้าหมุนไปยังท่าจับแบบแมนย่ำ, (b) ปลายนิ้วมือไม่สามารถเคลื่อนที่มีสัมผัสกัน



รูปที่ 5.35 แรงดึงนิ้วมือเมื่อจับชิ้นงานขนาดใหญ่ (a) เส้นผ่านศูนย์กลาง 71 มิลลิเมตร, (b) เส้นผ่านศูนย์กลาง 30 มิลลิเมตร



รูปที่ 5.36 มือเทียมไม่สามารถจับวัตถุขนาดเล็กกว่า 35 มิลลิเมตรในท่ากำมือได้

ขอบเขตบนของความสามารถในการจับของมือเทียมนี้ อ้างอิงจากวัตถุขนาดใหญ่ที่สุดที่จับได้ในการทดลองคือ วัตถุทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 96 มิลลิเมตร จากการศึกษาพบว่า ระยะห่างระหว่างปลายนิ้วมือทั้งสองและนิ้วโป้งตั้งแต่ 100 มิลลิเมตรขึ้นไปเป็นค่าที่เพียงพอต่อการจับวัตถุส่วนใหญ่ในชีวิตประจำวัน [5] ซึ่งใกล้เคียงกับผลการทดลอง จึงถือได้ว่ามือเทียมนี้มีความสามารถในการจับวัตถุขนาดต่างๆเพียงพอต่อการใช้งานในชีวิตประจำวัน

หากวิเคราะห์การนำไปใช้งานในชีวิตประจำวัน ความสามารถในการเคลื่อนที่เป็นท่าจับแบบแม่นยำและท่าจับแบบกำมือของมือเทียมนี้ ครอบคลุมการใช้งานในชีวิตประจำวันได้ประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์ [8] ซึ่งถือว่าเพียงพอต่อการใช้งาน

## 5.4 การทดสอบการจับวัตถุในชีวิตประจำวัน

### 5.4.1 วัตถุชนิดต่างๆที่สำคัญในชีวิตประจำวัน

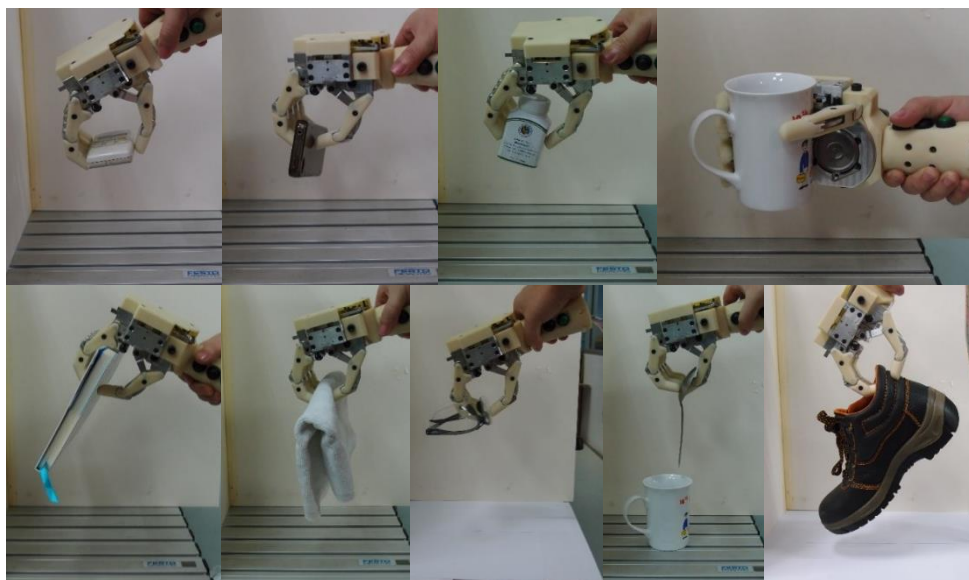
การใช้งานมือเทียมที่สำคัญคือการช่วยหยิบจับวัตถุต่างๆในชีวิตประจำวัน Young et al [21] ได้ทำการเก็บข้อมูลการใช้แขนหุ่นยนต์หยิบจับวัตถุในชีวิตประจำวัน โดยจัดลำดับวัตถุตามความสำคัญของความต้องการใช้งานวัตถุในชีวิตประจำวันของผู้ป่วยและผู้พิการ การทดสอบความสามารถของมือเทียมในการใช้งานในชีวิตประจำวัน จึงเลือกวัตถุต่างๆสำหรับนำมาทดสอบการจับโดยเรียงตามความสำคัญของการใช้งานในชีวิตประจำวันของผู้พิการ วัตถุสำหรับการทดสอบเป็นดังรูปที่ 5.37 ประกอบด้วย รีโมท, แคมป์ซูลยา, โทรศัพท์, ขวดยา, ช้อน, ส้อม, พวงกุญแจ, แวนตา, แปรงสีฟัน, ยาสีฟัน, หนังสือ, รองเท้า, และเสื้อผ้า เป็นต้น



รูปที่ 5.37 วัตถุสำคัญในชีวิตประจำวัน

### 5.4.2 การทดลองหยิบจับวัตถุที่สำคัญในชีวิตประจำวัน

การทดสอบทำการหยิบวัตถุตั้งรายการในหัวข้อ 5.4.1 จากพื้นโดยวางวัตถุอยู่ในลักษณะใกล้เคียงกับการวางปกติในชีวิตประจำวัน ใช้มือเทียมหยิบวัตถุโดยเลือกท่าที่เหมาะสมกับวัตถุนั้น การทดลองมีลักษณะดังรูปที่ 5.38 ทำการเก็บผลการทดลองความสามารถในการหยิบจับวัตถุ แล้วจึงนำมาประเมินความสามารถของโดยรวมมือเทียม



รูปที่ 5.38 การทดลองหยิบวัตถุในชีวิตประจำวัน

#### 5.4.3 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

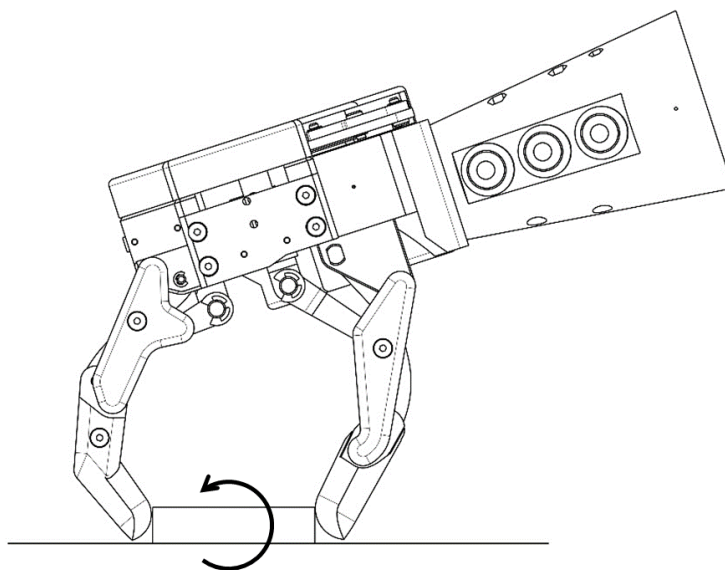
ผลการทดลองใช้มือเทียมหยิบจับวัตถุที่สำคัญในชีวิตประจำวันโดยแบ่งออกเป็นสามกลุ่มคือ สำคัญมาก สำคัญ และ สำคัญเล็กน้อย [21] ตามความต้องการในการใช้งานของผู้ป่วยและผู้พิการ มีรายละเอียดดังตารางที่ 5.2 แสดงถึงความสามารถในการหยิบจับของมือเทียม ทำจับที่เหมาะสมในการจับชิ้นงาน และรายละเอียดเฉพาะในการหยิบวัตถุแต่ละรายการ

ตารางที่ 5.2 ผลการทดลองจับวัตถุในชีวิตประจำวันเรียงตามความสำคัญของวัตถุ

ความสำคัญ	วัตถุ	จับได้/ไม่ได้	ท่าจับที่ใช้	หมายเหตุ
สำคัญมาก	รีโมททีวี	ได้	แมนยำ	จับจากพื้นราบได้ยาก/วัตถุมีลักษณะแบน
	แคปซูลยา	ไม่ได้	-	ขนาดเล็กเกินไป
	โทรศัพท์ไร้สาย	ได้	แมนยำ	จับจากพื้นราบได้ยาก/วัตถุมีลักษณะแบน
	ขวดยา	ได้	กำมือ	
	ส้อม	ได้	กำมือ	
	แวนดา	ได้	แมนยำ	
สำคัญ	แปรงสีฟัน	ได้	แมนยำ	
	ช้อน	ได้	กำมือ	
	ยาสีฟัน	ได้	แมนยำ	
	หนังสือ	ได้	แมนยำ	จับจากพื้นราบได้ยาก/วัตถุมีลักษณะแบน
	ผ้าเช็ดมือ	ได้	แมนยำ	
	แก้วน้ำ	ได้	กำมือ	
	ขวดน้ำพลาสติก	ได้	กำมือ	
	รองเท้า	ได้	แมนยำ	วัตถุมีน้ำหนักมาก
	ขาม	ได้	แมนยำ	
	พวงกุญแจ	ได้	แมนยำ	ใช้วิธีการเกี่ยวเข้ากับนิ้วมือ
จาน	ได้	แมนยำ	จับจากพื้นราบได้ยาก/วัตถุมีลักษณะแบน	
ปากกา	ได้	แมนยำ		
สำคัญเล็กน้อย	บัตรเครดิต	ไม่ได้	-	ขนาดบางเกินไป
	กล่องยา	ได้	แมนยำ	
	ธนบัตร	ไม่ได้	-	ขนาดบางเกินไป
	ขวดน้ำ	ได้	กำมือ	
	กางเกง	ได้	แมนยำ	
	เสื้อ	ได้	แมนยำ	
	กระเป๋าสตางค์	ได้	แมนยำ	
	ถุงเท้า	ได้	แมนยำ	
	หรี	ได้	แมนยำ	
กระป๋อง	ได้	กำมือ		

จากตารางที่ 5.2 พบว่ามีมือเทียมสามารถหยิบจับวัตถุได้ 25 รายการจาก 28 รายการ ซึ่งคิดเป็น 89 เปอร์เซ็นต์ของวัตถุทั้งหมด วัตถุที่หยิบจับไม่ได้คือวัตถุขนาดเล็กหรือบางเช่น แคปซูลยา บัตรเครดิต และธนบัตร เนื่องจากวัตถุมีขนาดเล็กกว่าช่องว่างที่เกิดขึ้นระหว่างปลายนิ้ว มือเทียมสามารถจับวัตถุที่มีลักษณะอ่อนนุ่มได้ดีกว่าวัตถุแข็งเกร็งเนื่องจากวัตถุอ่อนนุ่มมีการยุบตัวเข้ากับนิ้วมือและฝ่ามือทำให้การจับมั่นคง หากวัตถุมีลักษณะแบนและวางราบไปกับพื้นเช่น รีโมททีวี โทรศัพท์ไร้สาย หรือหนังสือ จะทำให้หยิบจับได้ยากเนื่องจากมือเทียมเข้าจับด้านข้างของวัตถุได้ไม่พอดีดังรูปที่ 5.39 วัตถุจะบิดหลุดออกจากนิ้วมือ แต่สามารถแก้ไขโดยใช้วิธีการพลิกวัตถุเพื่อตั้งขึ้นมาจับด้านแบนแทนได้ดังรูป วัตถุบางชนิดจำเป็นต้องใช้วิธีการเฉพาะในการจับเช่น พวงกุญแจสามารถจับได้โดยการเกี่ยวนิ้วมือเข้ากับห่วงกุญแจ หรือรองเท้าซึ่งมีน้ำหนักมากจำเป็นต้องจับโดยใช้นิ้วมือสอดเข้าไประหว่างรองเท้าเพื่อให้จับได้มั่นคง จากการทดลองพบว่ามีมือเทียมสามารถจับวัตถุที่มีความสำคัญในชีวิตประจำวันส่วนใหญ่ได้ แต่จับวัตถุขนาดเล็กและวัตถุแข็งเกร็งได้ยาก ปัญหานี้สามารถแก้ไขได้โดยเพิ่มวัสดุยึดหยุ่นเช่นถุงมือยางที่ปลายนิ้วเพื่อเพิ่มแรงเสียดทานและความสามารถในการยุบตัวเพื่อรับกับลักษณะของวัตถุ รวมทั้งเป็นการลดช่องว่างระหว่างปลายนิ้วที่เกิดขึ้นอีกด้วย





รูปที่ 5.39 การเข้าจับวัตถุลักษณะแบนของมือเทียมทำได้ยากเนื่องจากจะทำให้วัตถุบิดหลุดออกจากนิ้วมือ

#### 5.4.4 การปรับปรุงการจับวัตถุลักษณะแข็งเกร็งของมือเทียม

จากการทดลองในหัวข้อ 5.4.3 มือเทียมในงานวิจัยมีความลำบากในการหยิบจับวัตถุลักษณะแข็งเกร็งเนื่องจากปลายนิ้วมือทำจากวัสดุพลาสติก ABS-M30i (Acrylonitrile Butadiene Styrene) มีลักษณะแข็งและผิวเรียบลื่นดังรูปที่ 5.40 เมื่อมือเทียมหยิบจับวัตถุจะเกิดการบิดหลุดออกได้ง่าย แตกต่างจากมือมนุษย์ที่สามารถยุบตัวเพื่อโอบรับวัตถุได้และมีแรงเสียดทานสูง หากสามารถปรับปรุงมือเทียมให้มีผิวสัมผัสหยาบและเหนียวมากขึ้นจะช่วยเพิ่มสมรรถนะของมือเทียมได้เป็นอย่างดี ปัญหานี้แก้ไขได้โดยการใช้ถุงมือยางครอบมือเทียมเช่นเดียวกับมือเทียมในท้องตลาดอื่นๆดังรูปที่ 5.41 เนื่องจากมือเทียมในงานวิจัยนี้มีขนาดแตกต่างจากมือเทียมในท้องตลาดจึงไม่สามารถใช้ถุงมือเทียมในท้องตลาดได้ จึงจำเป็นต้องพัฒนาถุงมือสำหรับใช้งานกับมือเทียมในงานวิจัยนี้โดยเฉพาะต่อไปในอนาคตหรือเปลี่ยนวัสดุที่ปลายนิ้วให้เป็นอย่างแทนที่พลาสติกแบบแข็งในปัจจุบัน



รูปที่ 5.40 ปลายนิ้วมือเทียมผลิตจากพลาสติก ABS-M30i



รูปที่ 5.41 ถุงมือยางช่วยเพิ่มแรงเสียดทาน สำหรับใช้กับมือเทียมในท้องตลาด



## บทที่ 6

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ (Conclusion and Future Work)

#### 6.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มีเป้าหมายในการออกแบบมือเทียมแบบใช้งานสำหรับผู้พิการแขนขาในประเทศไทยซึ่งยังไม่มีมือเทียมแบบใช้งานที่มีต้นทุนอยู่ในระดับที่ผู้พิการสามารถเข้าถึงได้ งานวิจัยนี้จึงทำการออกแบบมือเทียมโดยนำหลักการใช้ตัวขับเคลื่อนน้อยที่สุดในการสร้างการเคลื่อนที่หลายแบบมาเป็นแนวคิดหลักในการออกแบบ มือเทียมใช้การทำงานของกลไกหนองเป็นหลักเพื่อให้นิ้วมือทั้งสี่และนิ้วโป้งสามารถเคลื่อนที่แยกจากกันได้ ใช้มอเตอร์ไฟฟ้าหนึ่งตัวในมือเทียมเพื่อลดความซับซ้อนในการออกแบบและเพิ่มแรงจับของกลไก การออกแบบมือเทียมเริ่มจากการออกแบบกลไกนิ้วมือและกลไกข้อมือเทียม ทำการสร้างแบบจำลองเบื้องต้นโดยกำหนดขนาดของชิ้นส่วนนิ้วมือและกลไกอย่างคร่าวๆ เพื่อดูความเป็นไปได้ในการใช้งานและปัญหาในการออกแบบ จากนั้นจึงปรับปรุงแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นและสังเคราะห์กลไกใหม่โดยใช้การหาขนาดกลไกด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดไว้ แล้วจึงออกแบบรูปร่างของมือเทียมให้มีน้ำหนักเบาและความแข็งแรงเพียงพอต่อการใช้งาน ผลิตชิ้นส่วนต่างๆของมือเทียม เช่น โครงสร้างหลัก ห้องเกียร์ทด ปลายนิ้วมือ ฝาปิดด้านหน้า-หลัง และค้ำข้อมือเทียมเพื่อความสะดวกในการใช้งานและความสวยงาม

มือเทียมถูกนำมาทดสอบความสามารถโดยแบ่งเป็นสี่หัวข้อหลักคือ เวลาในการเคลื่อนที่, แรง, ขนาดของวัตถุที่จับได้, และประเภทของวัตถุที่จับได้ในชีวิตประจำวัน ผลการทดสอบพบว่ามือเทียมมีความสามารถในการเคลื่อนที่มาจับวัตถุภายใน 1.5 วินาทีและให้แรงจับได้ 34.5 นิวตันซึ่งเพียงพอต่อการใช้งานในชีวิตประจำวัน สามารถยกวัตถุได้น้ำหนักสูงสุด 1,500 กรัม สามารถจับวัตถุได้ขนาดตั้งแต่ 15 ถึง 96 มิลลิเมตรในท่าจับแบบแม่นยำและวัตถุขนาดตั้งแต่ 35 ถึง 96 มิลลิเมตรในท่าจับแบบกำมือ สามารถจับวัตถุที่สำคัญในชีวิตประจำวันได้ประมาณ 90 เปอร์เซ็นต์ ผลการทดสอบเหล่านี้แสดงถึงความสามารถของมือเทียมที่เป็นไปตามจุดประสงค์ของงานวิจัยทั้งด้านความสามารถในการใช้งานและความเป็นธรรมชาติของมือเทียม นอกจากนี้ชิ้นส่วนของมือเทียมถูกออกแบบให้ผลิตและประกอบง่าย จึงมีความเป็นไปได้ในการนำไปผลิตสำหรับใช้งานจริงและเป็นประโยชน์ต่อผู้พิการในประเทศไทยต่อไป

## 6.2 ข้อเสนอแนะ

การออกแบบกลไกมือเทียมยังขาดการวิเคราะห์เรื่องแรงภายในกลไกอย่างละเอียด ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์แรงภายในกลไกจากแผนภาพจลนศาสตร์ (Kinematic Diagram) และออกแบบชิ้นส่วนมือเทียมรวมถึงเลือกใช้มอเตอร์ไฟฟ้าและเกียร์ทดตามผลการคำนวณแรงนี้ แต่แรงที่เกิดขึ้นจริงในกลไกมีปัจจัยอื่นอีกหลายข้อ เช่น แรงในแกนอื่นนอกจากในระนาบของกลไก, แรงบิดและแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นระหว่างชิ้นส่วนต่างๆ, ความคลาดเคลื่อนจากการผลิต, หรือความคลาดเคลื่อนจากการประกอบชิ้นงาน เป็นต้น ปัจจัยเหล่านี้ล้วนส่งผลต่อความสามารถของมือเทียม การวิเคราะห์ในระดับที่ละเอียดขึ้นจึงจะช่วยให้สามารถออกแบบกลไกแต่ละส่วนได้เหมาะสมยิ่งขึ้นทั้งด้านขนาดและการรับแรง ส่งผลให้มือเทียมมีแรงจับเพิ่มขึ้นและมีน้ำหนักลดลง

หัวข้อต่างๆที่สามารถนำมาพัฒนาต่อยอดให้มือเทียมในงานวิจัยมีดังนี้

1. เนื่องจากมือเทียมนี้อาศัยการเคลื่อนไหวทั้งหมด 1 องศาอิสระ จึงใช้งานได้ดีในการจับวัตถุลักษณะอ่อนนุ่ม แต่จับวัตถุแข็งเกร็งได้ยากเนื่องจากนิ้วมือที่ไม่สัมผัสชิ้นงานจะหยุดเคลื่อนที่เมื่อบางนิ้วสัมผัสชิ้นงานก่อน การเพิ่มความหยุ่น (Compliance) ลงในกลไกนิ้วมือเพื่อให้นิ้วมือเคลื่อนที่ต่อไปได้แม้นิ้วมืออื่นจะสัมผัสกับวัตถุแล้ว ส่งผลให้มือเทียมจะสามารถเคลื่อนที่ทุกนิ้วมาสัมผัสชิ้นงานได้
2. การเพิ่มกลไกขับเคลื่อนแบบ Non-Backdriveable สำหรับป้องกันแรงจากปลายนิ้วย้อนกลับไปยังมอเตอร์ไฟฟ้าและเกียร์ทด ช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถจับวัตถุได้มั่นคงมากขึ้น
3. ทำแบบมือเป็นท่าเริ่มต้นของมือเทียมซึ่งมีความสามารถในการใช้งานหลากหลาย หากมือเทียมสามารถหมุนนิ้วโป้งไปมารอบฝ่ามือได้ มือเทียมจะสามารถเคลื่อนที่เป็นท่าจับแบบด้านข้างจากท่าแบมือได้ การเพิ่มองศาอิสระให้นิ้วโป้งสามารถหมุนไปมารอบฝ่ามือจึงเป็นการเพิ่มขอบเขตความสามารถในการจับวัตถุของมือเทียม
4. เนื่องจากการใช้งานมือเทียมสามารถเกิดการกระแทกได้ง่าย หากเกิดการกระแทกในส่วนของนิ้วมือของมือเทียม จะเกิดแรงส่งผ่านกลไกไปยังมอเตอร์ไฟฟ้าทันที การเพิ่มกลไกป้องกันการกระแทก โดยใช้วัสดุประเภทสปริงคอยรับแรงเมื่อเกิดการกระแทกจะช่วยป้องกันความเสียหายและเพิ่มอายุการใช้งานของมือเทียมได้



## รายการอ้างอิง

- [1] ส. กระทรวงเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร, "จำนวนประชากรพิการที่มีลักษณะความบกพร่อง จำแนกตามลักษณะความบกพร่อง เพศ และเขตการปกครอง," ed, พ.ศ. 2550
- [2] ส. กระทรวงเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร, "จำนวนประชากรที่พิการ จำแนกตามการใช้อุปกรณ์หรืออวัยวะเทียมหรือเครื่องช่วย เพศ และเขตการปกครอง," ed, พ.ศ. 2550.
- [3] L. Resnik, M. R. Meucci, S. Lieberman-Klinger, C. Fantini, D. L. Kelty, R. Disla, et al., "Advanced Upper Limb Prosthetic Devices: Implications for Upper Limb Prosthetic Rehabilitation," *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, vol. 93, pp. 710-717, 4// 2012.
- [4] A. Freivalds, "Models of the Upper Limbs," in *Biomechanics of the upper limbs : mechanics, modeling, and musculoskeletal injuries*, ed: CRC Press LLC, 2000 N.W. Corporate Blvd., Boca Raton, Florida 33431, 2004, pp. 195-206.
- [5] P. D. Richard F. ff. Weir, "DESIGN OF ARTIFICIAL ARMS AND HANDS FOR PROSTHETIC APPLICATIONS," in *Standard Handbook of Biomedical Engineering & Design*, ed: McGRAW-HILL, 2003.
- [6] J. R. Napier, "The prehensile movements of the human hand," *J Bone Joint Surg Br*, vol. 38-B, pp. 902-13, Nov 1956.
- [7] T. Iberall, "The nature of human prehension: Three dextrous hands in one," in *Robotics and Automation. Proceedings. 1987 IEEE International Conference on*, 1987, pp. 396-401.
- [8] C. M. Light, P. H. Chappell, and P. J. Kyberd, "Establishing a standardized clinical assessment tool of pathologic and prosthetic hand function: Normative data, reliability, and validity," *Archives of Physical Medicine and Rehabilitation*, vol. 83, pp. 776-783, 6// 2002.
- [9] C. Cipriani, F. Zaccone, S. Micera, and M. C. Carrozza, "On the Shared Control of an EMG-Controlled Prosthetic Hand: Analysis of User-Prosthesis Interaction," *Robotics, IEEE Transactions on*, vol. 24, pp. 170-184, 2008.
- [10] H. Takeda, N. Tsujiuchi, T. Koizumi, H. Kan, M. Hirano, and Y. Nakamura, "Development of prosthetic arm with pneumatic prosthetic hand and tendon-

- driven wrist," in *Engineering in Medicine and Biology Society, 2009. EMBC 2009. Annual International Conference of the IEEE*, 2009, pp. 5048-5051.
- [11] A. Kargov, T. Werner, C. Pylatiuk, and S. Schulz, "Development of a miniaturised hydraulic actuation system for artificial hands," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 141, pp. 548-557, 2/15/ 2008.
- [12] J. H. Lee, S. Okamoto, and S. Matsubara, "Development of Multi-Fingered Prosthetic Hand Using Shape Memory Alloy Type Artificial Muscle," *Computer Technology and Application*, vol. 3, pp. 477-484, July 25, 2012.
- [13] A. M. El Kady, A. E. Mahfouz, and M. F. Taher, "Mechanical design of an anthropomorphic prosthetic hand for shape memory alloy actuation," in *Biomedical Engineering Conference (CIBEC), 2010 5th Cairo International*, 2010, pp. 86-89.
- [14] J. T. Belter, J. L. Segil, A. M. Dollar, and R. F. Weir, "Mechanical design and performance specifications of anthropomorphic prosthetic hands: a review," *J Rehabil Res Dev*, vol. 50, pp. 599-618, Aug 2013.
- [15] C. Medynski and B. Rattray, "Bebionic Prosthetic Design," *Proceedings of the MEC'11 conference, UNB*, 2011.
- [16] H. Liu, K. Wu, P. Meusel, N. Seitz, G. Hirzinger, M. H. Jin, *et al.*, "Multisensory five-finger dexterous hand: The DLR/HIT Hand II," in *Intelligent Robots and Systems, 2008. IROS 2008. IEEE/RSJ International Conference on*, 2008, pp. 3692-3697.
- [17] F. Lotti, P. Tiezzi, G. Vassura, L. Biagiotti, G. Palli, and C. Melchiorri, "Development of UB Hand 3: Early Results," in *Robotics and Automation, 2005. ICRA 2005. Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on*, 2005, pp. 4488-4493.
- [18] J. L. Pons, E. Rocon, R. Ceres, D. Reynaerts, B. Saro, S. Levin, *et al.*, "The MANUS-HAND Dexterous Robotics Upper Limb Prosthesis: Mechanical and Manipulation Aspects," *Autonomous Robots*, vol. 16, pp. 143-163, 2004/03/01 2004.

- [19] R. L. Norton, "Graphical Linkage Synthesis," in *Design of machinery: an introduction to the synthesis and analysis of mechanisms and machines*, ed New York: McGraw-Hill, 1992.
- [20] ก. สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, "รายงานการสำรวจและวิจัยขนาดโครงสร้างร่างกายคนไทย," ed, พ.ศ. 2544.
- [21] C. Young Sang, T. Deyle, T. Chen, J. D. Glass, and C. C. Kemp, "A list of household objects for robotic retrieval prioritized by people with ALS," in *Rehabilitation Robotics, 2009. ICORR 2009. IEEE International Conference on*, 2009, pp. 510-517.





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
CHULALONGKORN UNIVERSITY

## ภาคผนวก ก คุณสมบัติทางกลของวัสดุ

พลาสติก ABS-M30i (Acrylonitrile Butadiene Styrene)

คุณสมบัติทางกลของพลาสติก ABS-M30i (Acrylonitrile Butadiene Styrene) มีรายละเอียดดังรูปที่ ก.1

MECHANICAL PROPERTIES <sup>1</sup>	TEST METHOD	ENGLISH	METRIC
Tensile Strength (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	5,200 psi	36 MPa
Tensile Modulus (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	350,000 psi	2,400 MPa
Tensile Elongation (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	4%	4%
Flexural Strength (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D790	8,800 psi	61 MPa
Flexural Modulus (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D790	336,000 psi	2,300 MPa
IZOD Impact, notched (Method A, 23°C)	ASTM D256	2.6 ft-lb/in	139 J/m
IZOD Impact, un-notched (Method A, 23°C)	ASTM D256	5.3 ft-lb/in	283 J/m

THERMAL PROPERTIES <sup>2</sup>	TEST METHOD	ENGLISH	METRIC
Heat Deflection (HDT) @ 66 psi, 0.125" unannealed	ASTM D648	204°F	96°C
Heat Deflection (HDT) @ 264 psi, 0.125" unannealed	ASTM D648	180°F	82°C
Vicat Softening Temp. (Rate B/50)	ASTM D1525	210°F	99°C
Coefficient of Thermal Expansion (flow)	ASTM E831	4.9E-05 in/in/°F	8.82E-05 mm/mm/°C
Coefficient of Thermal Expansion (xflow)	ASTM E831	4.7E-05 in/in/°F	8.46E-05 mm/mm/°C
Glass Transition (Tg)	DSC (SSYS)	226°F	108°C

ELECTRICAL PROPERTIES <sup>4</sup>	TEST METHOD	VALUE RANGE
Volume Resistivity	ASTM D257	1.5x10e14-6.0x10e13 ohm-cm
Dielectric Constant	ASTM D150-98	2.9 - 2.7
Dissipation Factor	ASTM D150-98	.0053 - .0051
Dielectric Strength	ASTM D149-09, Method A	370 - 80 V/mil



รูปที่ ก.1 คุณสมบัติทางกลของพลาสติก ABS-M30i



## Aluminium 7075-T6

คุณสมบัติทางกลของโลหะ Aluminium 7075-T6 มีรายละเอียดดังรูปที่ ก.2

Aluminum 7075-T6; 7075-T651		
Ultimate Tensile Strength	572 MPa	83000 psi
Tensile Yield Strength	503 MPa	73000 psi
Elongation at Break	11 %	11 %
Elongation at Break	11 %	11 %
Modulus of Elasticity	71.7 GPa	10400 ksi
Poisson's Ratio	0.33	0.33
Fatigue Strength	159 MPa	23000 psi
Fracture Toughness	20 MPa-m <sup>1/2</sup>	18.2 ksi-in <sup>1/2</sup>
Fracture Toughness	25 MPa-m <sup>1/2</sup>	22.8 ksi-in <sup>1/2</sup>
Fracture Toughness	29 MPa-m <sup>1/2</sup>	26.4 ksi-in <sup>1/2</sup>
Machinability	70 %	70 %
Shear Modulus	26.9 GPa	3900 ksi
Shear Strength	331 MPa	48000 psi
<b>Electrical Properties</b>		
Electrical Resistivity	5.15e-006 ohm-cm	5.15e-006 ohm-cm
<b>Thermal Properties</b>		
CTE, linear 68°F	23.6 µm/m-°C	13.1 µin/in-°F
CTE, linear 250°C	25.2 µm/m-°C	14 µin/in-°F
Specific Heat Capacity	0.96 J/g-°C	0.229 BTU/lb-°F
Thermal Conductivity	130 W/m-K	900 BTU-in/hr-ft <sup>2</sup> -°F
Melting Point	477 - 635 °C	890 - 1175 °F
Solidus	477 °C	890 °F
Liquidus	635 °C	1175 °F
<b>Processing Properties</b>		
Annealing Temperature	413 °C	775 °F
Solution Temperature	466 - 482 °C	870 - 900 °F
Aging Temperature	121 °C	250 °F

รูปที่ ก.2 คุณสมบัติทางกลของโลหะ Aluminium 7075-T6

AISI Stainless steel 304

คุณสมบัติทางกลของโลหะ AISI Stainless steel 304 มีรายละเอียดดังรูปที่ ก.3

AISI Type 304 Stainless Steel		
Hardness, Brinell	123	123
Hardness, Knoop	138	138
Hardness, Rockwell B	70	70
Hardness, Vickers	129	129
Tensile Strength, Ultimate	505 MPa	73200 psi
Tensile Strength, Yield	215 MPa	31200 psi
Elongation at Break	70 %	70 %
Modulus of Elasticity	193 - 200 GPa	28000 - 29000 ksi
Poisson's Ratio	0.29	0.29
Charpy Impact	325 J	240 ft-lb
Shear Modulus	86 GPa	12500 ksi
<b>Electrical Properties</b>		
Electrical Resistivity	7.2e-005 ohm-cm	7.2e-005 ohm-cm
Magnetic Permeability	1.008	1.008
<b>Thermal Properties</b>		
CTE, linear 20°C	17.3 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}$	9.61 $\mu\text{in}/\text{in}\cdot^{\circ}\text{F}$
CTE, linear 250°C	17.8 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}$	9.89 $\mu\text{in}/\text{in}\cdot^{\circ}\text{F}$
CTE, linear 500°C	18.7 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}$	10.4 $\mu\text{in}/\text{in}\cdot^{\circ}\text{F}$
Specific Heat Capacity	0.5 J/g $\cdot^{\circ}\text{C}$	0.12 BTU/lb $\cdot^{\circ}\text{F}$
Thermal Conductivity	16.2 W/m-K	112 BTU-in/hr-ft <sup>2</sup> $\cdot^{\circ}\text{F}$
Melting Point	1400 - 1455 $^{\circ}\text{C}$	2550 - 2650 $^{\circ}\text{F}$
Solidus	1400 $^{\circ}\text{C}$	2550 $^{\circ}\text{F}$
Liquidus	1455 $^{\circ}\text{C}$	2650 $^{\circ}\text{F}$

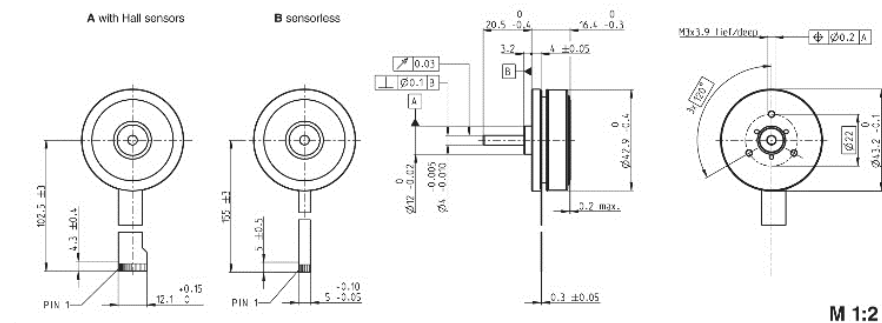
รูปที่ ก.3 คุณสมบัติทางกลของโลหะ AISI Stainless steel 304

ภาคผนวก ข อุปกรณ์ภายในมือเทียม

มอเตอร์ไฟฟ้า

มอเตอร์ไฟฟ้า MAXON EC-45Flat-30W มีรายละเอียดดังรูปที่ ข.1

**EC 45 flat** Ø42.9 mm, brushless, 30 Watt



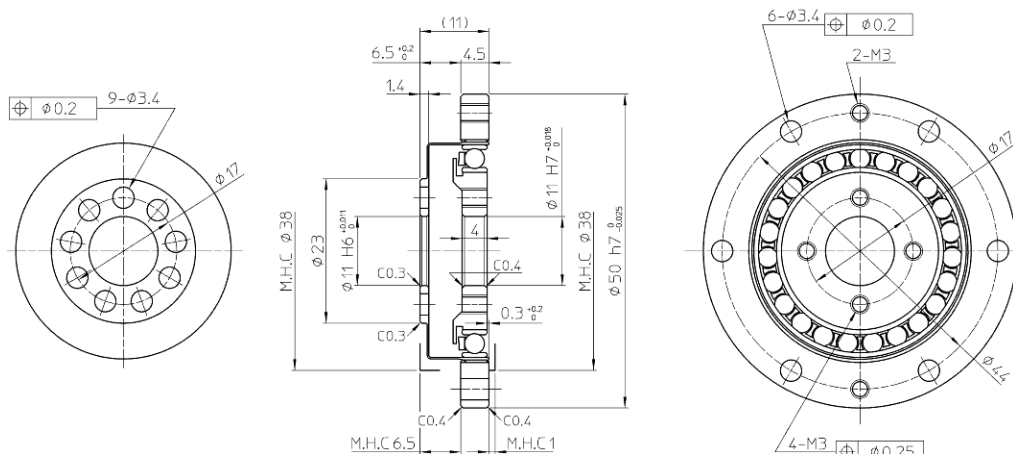
Stock program		Part Numbers					
Standard program		A with Hall sensors		B sensorless			
Special program (on request)		200142	200189	339281	339283	339282	339284
<b>Motor Data</b>							
Values at nominal voltage							
1 Nominal voltage	V	12	12	24	24	36	36
2 No load speed	rpm	4390	4370	4380	4380	4790	4760
3 No load current	mA	146	146	73	73	55.4	55.3
4 Nominal speed	rpm	2940	2850	2940	2910	3290	3270
5 Nominal torque (max. continuous torque)	mNm	55.5	53.2	55.3	54.7	66.6	66.1
6 Nominal current (max. continuous current)	A	2.03	1.96	1.01	1	0.849	0.844
7 Stall torque	mNm	241	206	239	230	337	330
8 Starting current	A	10	8.58	4.97	4.77	5.38	5.22
9 Max. efficiency	%	78	76	78	77	81	81
<b>Characteristics</b>							
10 Terminal resistance phase to phase	Ω	1.2	1.4	4.83	5.03	6.69	6.89
11 Terminal inductance phase to phase	mH	0.56	0.56	2.24	2.24	4.29	4.29
12 Torque constant	mNm/A	25.5	25.5	51	51	70.6	70.6
13 Speed constant	rpm/V	374	374	187	187	135	135
14 Speed/torque gradient	rpm/mNm	17.6	20.5	17.7	18.5	12.8	13.2
15 Mechanical time constant	ms	17.1	19.9	17.2	17.9	12.4	12.8
16 Rotor inertia	gcm <sup>2</sup>	92.5	92.5	92.5	92.5	92.5	92.5
<b>Specifications</b>							
<b>Thermal data</b>		<b>Operating Range</b>		<b>Comments</b>			
17 Thermal resistance housing-ambient	5.7 K/W			<b>Continuous operation</b>			
18 Thermal resistance winding-housing	3.96 K/W			In observation of above listed thermal resistance (lines 17 and 18) the maximum permissible winding temperature will be reached during continuous operation at 25°C ambient.			
19 Thermal time constant winding	11.5 s			= Thermal limit.			
20 Thermal time constant motor	251 s			<b>Short term operation</b>			
21 Ambient temperature	-40...+100°C			The motor may be briefly overloaded (recurring).			
22 Max. permissible winding temperature	+125°C			<b>Assigned power rating</b>			
<b>Mechanical data (preloaded ball bearings)</b>							
23 Max. permissible speed	10000 rpm						
24 Axial play at axial load < 5.0 N	0 mm						
	typ. 0.14 mm preloaded						
25 Radial play	4.8 N						
26 Max. axial load (dynamic)	53 N						
27 Max. force for press fit (static) (static, shaft supported)	1000 N						
28 Max. radial loading, 7.5 mm from flange	21 N						
<b>Other specifications</b>							
29 Number of pole pairs	3						
30 Number of phases	3						
31 Weight of motor	75 g						
Values listed in the table are nominal.							
<b>Connection</b>							
Pin 1	V <sub>DC</sub> 4.5...18 VDC	Motor winding 1					
Pin 2	Hall sensor 3*	Motor winding 2					
Pin 3	Hall sensor 1*	Motor winding 3					
Pin 4	Hall sensor 2*	neutral point					
Pin 5	GND						
Pin 6	Motor winding 3						
Pin 7	Motor winding 2						
Pin 8	Motor winding 1						
*Internal pull-up (7...13 kΩ) on pin 1							
Wiring diagram for Hall sensors see p. 31							
<b>Adapter</b>		<b>Part number</b>	<b>Part number</b>				
see p. 339	220300	220310					
<b>Connector</b>		<b>Part number</b>	<b>Part number</b>				
Typo	1-64953-1	84953-4					
Molex	52207-1185	52207-0485					
Molex	52089-1119	52089-0419					
Pin for design with Hall sensors: FPC, 11-pol, Pitch 1.0 mm, top contact style							
<b>maxon Modular System</b> Overview on page 20 - 25							
<b>Planetary Gearhead</b>							
Ø42 mm	3 - 15 Nm						
Page 271							
<b>Spur Gearhead</b>							
Ø45 mm	0.5 - 2.0 Nm						
Page 272							
<b>Recommended Electronics:</b>							
ESCON 36/3 EC	Page 320						
ESCON Module 50/5	321						
ESCON 50/5	324						
DECS 50/5	324						
DEC Module 24/2	325						
DEC Module 50/5	325						
EPOS2 24/2, Module 36/2	330						
EPOS2 24/5	331						
EPOS2 P 24/5	334						
ESOS3 70/10 EtherCAT	337						
Notes	24						

รูปที่ ข.1 รายละเอียดคุณสมบัติ (specification) ของมอเตอร์ไฟฟ้า

MAXON™ EC-45Flat-30W Model No. 339281

เกียร์ทด Harmonic Drive

เกียร์ทด Harmonic Drive รุ่น CSD-100-2A-R มีขนาด, ความสามารถในการรับแรงบิด, และ ประสิทธิภาพดังรูปที่ ข.2, รูปที่ ข.3, และรูปที่ ข.4 ตามลำดับ



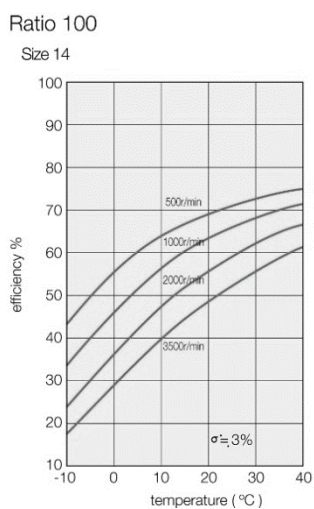
รูปที่ ข.2 ขนาดของชุดเกียร์ทด Harmonic Drive™ : CSD-100-2A-R

CSD Rating Table

Table 1

CSD Size	Gear Ratio	Rated Torque at 2000 T. rpm		Limit for Repeated Peak Torque		Limit for Average Torque		Limit for Momentary Peak Torque		Maximum Input Speed		Limit for Average Input Speed		Moment of Inertia	
		Nm	in-lb	Nm	in-lb	Nm	in-lb	Nm	in-lb	Oil	Grease	Oil	Grease	I	J
		rpm		rpm		rpm		rpm		rpm		rpm		x10 <sup>3</sup> kg·m <sup>2</sup>	x10 <sup>3</sup> kgf·m·s <sup>2</sup>
14	50	3.7	33	12	106	4.8	42	24	212	14000	8500	6500	3500	0.021	0.021
	100	5.4	48	19	168	7.7	68	31	274						

รูปที่ ข.3 กำลังทดและแรงบิดของชุดเกียร์ทด Harmonic Drive™ : CSD-100-2A-R



รูปที่ ข.4 ประสิทธิภาพของชุดเกียร์ทด Harmonic Drive™ : CSD-100-2A-R

## โหลดเซลล์สำหรับวัดแรงกด (Compression Load Cell)

ใช้โหลดเซลล์ Compression Load Cell KYOWA รุ่น LMB-A-200N มีขนาด, ความสามารถในการรับแรง, และความแม่นยำดังรูปที่ ข.5

# LMB-A

## Small-Sized Compression Load Cells

● 10 N to 2 kN



### Compact, Lightweight, Low Price Suitable for Load Distribution Measurement

Ultra-small and lightweight LMB-A series load cells can be used by merely putting or bonding on the measurement point or setting in a hollow. (Patent pending)

#### Specifications

##### Performance

<b>Rated Capacity:</b>	See table below.
<b>Nonlinearity:</b>	Within $\pm 0.5\%$ RO
<b>Hysteresis:</b>	Within $\pm 0.5\%$ RO:
<b>Repeatability:</b>	Within $\pm 0.3\%$ RO
<b>Rated Output:</b>	1.4mV/V(2800 $\mu$ m/m) or more
Note : Rated output is sorted to one of the classes divided by every 1% difference in output value to the rated capacity. Since the rated output stated in the Test Data Sheet is the center value of the class, it may have a maximum error of $\pm 0.5\%$ .	

##### Environmental Characteristics

<b>Safe Temperature Range:</b>	-10 to 80°C (noncondensing)
<b>Compensated Temperature Range:</b>	0 to 70°C (noncondensing)
<b>Temperature Effect on Zero Balance:</b>	Within $\pm 0.1\%$ RO/°C (LMB-A-50N) Within $\pm 0.05\%$ RO/°C (LMB-A-100N to 2KN)
<b>Temperature Effect on Output:</b>	Within $\pm 0.05\%$ /°C

##### Electrical Characteristics

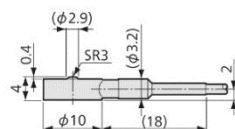
<b>Safe Excitation Voltage:</b>	7V AC or DC
<b>Recommended Excitation Voltage:</b>	1 to 5V AC or DC
<b>Input Resistance:</b>	350 $\Omega$ $\pm$ 2.5%
<b>Output Resistance:</b>	350 $\Omega$ $\pm$ 2.5%
<b>Cable:</b>	4-conductor (0.035 mm <sup>2</sup> ) vinyl shielded cable, 1.7 mm diameter by 2 m long, bared at the tip (Shield wire is not connected to mainframe.)

##### Mechanical Properties

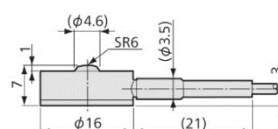
<b>Safe Overload Rating:</b>	150%
<b>Natural Frequency:</b>	See table below.
<b>Material:</b>	Stainless steel
<b>Weight:</b>	10 to 200N : approx. 1.5g (not including cable) 500N to 2kN : approx. 6g (not including cable)
<b>Protection Rating:</b>	IP64 JIS C 0920 splash-proof type

Model	Rated Capacity	Natural Frequency (Approx.)
LMB-A-10N	10N	32kHz
LMB-A-50N	50N	40kHz
LMB-A-100N	100N	47kHz
LMB-A-200N	200N	59kHz
LMB-A-500N	500N	37kHz
LMB-A-1KN	1kN	45kHz
LMB-A-2KN	2kN	54kHz

#### ■ Dimensions

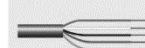


LMB-A-50 to 200N



LMB-A-500N to 2KN

Bared at the tip



รูปที่ ข.5 รายละเอียด (specification) ของโหลดเซลล์ KYOWA™ : LMB-A-200N

### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายปณิภัทร วัฒนศิริ เกิดวันที่ 8 พฤษภาคม พ.ศ.2533 ณ กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2554 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2555

