

การจำลองท่าทางมือสามมิติจากรูปภาพที่เห็นด้วยตาข้างเดียวและไม่มีการตั้งพิกัด

นายธีรภัทร์ สัจจวิโส

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR) are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

3D HAND POSE MODELING FROM UNCALIBRATE MONOCULAR IMAGES

Mr. Theeraphat Sajjawiso

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

Department of Computer Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2011

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การจำลองท่าทางมือสามมิติจากรูปภาพที่เห็นด้วย  
ตาข้างเดียวและไม่มี การตั้งพิกัด

โดย

นายธีรภัทร์ สัจจวิโส

สาขาวิชา

วิศวกรรมคอมพิวเตอร์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิษณุ คนองชัยยศ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารธุรกิจ

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศศิริวงค์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร. ประภาส จงสถิตย์วัฒนา)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิษณุ คนองชัยยศ)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ดร. ชูติสันต์ เกิดวิบูลย์เวช)

ธีรภัทร์ สัจจวิโส : การจำลองท่าทางมือสามมิติจากรูปภาพที่เห็นด้วยตาข้างเดียวและไม่มีการตั้งพิกัด . (3D HAND POSE MODELING FROM UNCALIBRATED MONOCULAR IMAGES)

อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผศ. ดร. พิษณุ คนองชัยยศ, 61 หน้า.

การสร้างแบบจำลองของมือนั้นเป็นงานวิจัยที่มีความท้าทายเป็นอย่างมากในการสร้างภาพเคลื่อนไหวด้วยคอมพิวเตอร์ เพราะว่ามือเป็นอวัยวะที่มีการเคลื่อนไหวซับซ้อน และนั่นทำให้แบบจำลองของมือนั้น ประกอบไปด้วยองศาเสรีที่ไม่น้อยกว่า 20 องศาเสรีดังนั้นการแก้ปัญหาเช่นนี้ มักต้องการการสร้างฐานข้อมูลขนาดใหญ่ ด้วยอุปกรณ์พิเศษ ซึ่งจำเป็นต้องใช้ค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูง ในงานวิจัยชิ้นนี้ได้นำเสนอวิธีการสร้างแบบจำลองของมือโดยใช้การสร้างสมการข้อจำกัดมาเพื่อรอบคอบ และได้นำเสนอสมการข้อจำกัดใหม่สำหรับแบบจำลองของมือคือข้อจำกัดความเท่ากันของกระดูกและข้อจำกัดวัตถุแข็งเกร็ง โดยงานวิจัยชิ้นนี้ได้ใช้กระบวนการหาค่าเหมาะสมที่สุด เพื่อลดความกำกวมระหว่างจุดข้อกระดูกในสองมิติและท่าทางของมือในสามมิติ โดยวิธีการของเราไม่จำเป็นต้องมีความรู้เรื่องความยาวกระดูกและพารามิเตอร์ของกล้ามเนื้อ มาก่อน และ เราไม่จำเป็นต้องสร้างฐานข้อมูลขนาดใหญ่เพื่อที่จะค้นหาค่าตอบ ทำให้สามารถลดค่าใช้จ่ายไปได้มาก ซึ่งจากงานวิจัยนี้ได้หาค่าความผิดพลาดจากการประมาณกระดูกซึ่งจะเฉลี่ยอยู่ที่ 31 เปอร์เซ็นต์ แต่ระบบก็ยังสามารถทำงานได้

ภาควิชา....วิศวกรรมคอมพิวเตอร์

สาขาวิชา...วิศวกรรมคอมพิวเตอร์

ปีการศึกษา.....2554 .....

ลายมือชื่อนิสิต.....

ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....

# # 520760321 : MAJOR COMPUTER ENGINEERING

KEYWORDS : HAND MODELING, IMAGE RETRIEVAL, IMAGE RECONSTRUCTION

THEERAPHAT SAJJAWISO : 3D HAND POSE MODELING FROM UNCALIBRATE  
MONOCULAR IMAGES.

ADVISOR : ASST.PROF. PIZZANU KANONGCHAIYOS, Ph.D., 61 pp.

Hand pose modeling is one of the most challenging research areas in computer animation because of its complicated motion. Since hand consists of not less than 20 degrees of freedom which is hard to model, the ways to solve this problem require to construct a large multi-dimensional database of poses which obtained by using special equipments. Therefore, both time and cost are much consumed. In this research, we propose a method of 3D hand pose modeling based on new set of constraints and optimization framework to reduce the ambiguity between 2D joint location and 3D hand poses. We propose a new constraint that is symmetry constraint and rigid body constraint for hand pose modeling. Our method does not need prior knowledge of the bone length and camera parameters. Furthermore, a large high-dimension database used for searching is not needed to be constructed, which is considerably reduced the cost. From this research the error of bone length estimation obtained from our experiments are around 31%, however, the system can be archived.

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

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

Academic Year : ..2011.....

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณท่าน ศ.ดร. ประภาส จงสฤษดิ์วัฒนา ท่านประธานกรรมการการสอบ  
วิทยานิพนธ์ ท่าน อ.ดร. ชูติสันต์ เกิดวิบูลย์เวช กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ และท่านผศ.ดร. พิษณุ  
คนองชัยยศ ที่ปรึกษาของวิทยานิพนธ์นี้ วิทยานิพนธ์เล่มนี้คงจะเกิดขึ้นไม่ได้ถ้าขาดท่านคณาจารย์  
ขอขอบคุณท่านคณาจารย์ที่ช่วยชี้แนะ สั่งสอน ตลอดมา

ขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ที่ให้ข้อคิดและข้อเสนอแนะต่างๆ อันเป็น  
ประโยชน์อย่างยิ่งในการพัฒนาคุณภาพของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบคุณห้องวิจัยคอมพิวเตอร์กราฟิกส์ และเพื่อนๆ ทุกคน ที่แบ่งปันความรู้ ช่วยเหลือกัน  
และเป็นกำลังใจให้กันเสมอมา

งานวิจัยนี้ (AS585A) ได้รับการสนับสนุนจาก โครงการส่งเสริมการวิจัยในอุดมศึกษาและการ  
พัฒนามหาวิทยาลัยแห่งชาติ ของสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา

## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .....	จ
กิตติกรรมประกาศ .....	ฉ
สารบัญ .....	ฅ
สารบัญตาราง .....	ญ
สารบัญภาพ .....	ฎ
บทที่ 1 บทนำ .....	1
1.1 ที่มาของปัญหา .....	1
1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย .....	4
1.3 ขอบเขตการวิจัย .....	4
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ .....	5
1.5 วิธีการดำเนินการวิจัย .....	6
1.6 ผลงานตีพิมพ์จากงานวิจัย .....	7
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง .....	8
2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง .....	8
2.1.1 กระบวนการฉายภาพ (Projection) .....	8
2.1.2 การทำแบบจำลองของมือ (Hand Modeling) .....	9

2.1.3	วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุด (Optimization Methods).....	10
2.2	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	11
2.2.1	การประมาณท่าทางมือด้วยวิธีการทางคอมพิวเตอร์วิทัศน์ (Vision based Hand Pose Estimation) .....	12
2.2.2	สรุป .....	18
บทที่ 3	การจำลองท่าทางของมือในสามมิติ.....	20
3.1	การจำลองท่าทางของมือในสามมิติโดยสังเขป.....	20
3.2	แบบจำลองของมือ (Hand Model).....	20
3.2.1	ข้อจำกัดการฉายกระดูก (Bone Projection Constraint).....	21
3.2.2	ข้อจำกัดความเท่ากันของกระดูก (Bone Symmetry Constraint).....	22
3.2.3	ข้อจำกัดของวัตถุแข็งเกร็ง (Rigid Body Constraint) .....	22
3.3	การประมาณขนาดขึ้นกระดูกและพารามิเตอร์ของกล้ามเนื้อ .....	24
3.4	การสร้างท่าทางข้อกระดูกขึ้นใหม่ในสามมิติ (Reconstruction of 3D joint-angle poses) .....	26
3.4.1	พจน์การฉายกระดูก (Bone Projection Term) .....	26
3.4.2	พจน์วัตถุแข็งเกร็ง (Rigid Body Term).....	27
3.5	จำนวนภาพที่ต้องการ .....	27
3.6	สรุป .....	28
บทที่ 4	ผลการทดลองและการอภิปราย.....	29



4.1	การทดลองโดยสังเขป .....	29
4.2	การทดสอบเมื่อเปลี่ยนแปลงจำนวนภาพในการทดลอง .....	30
4.2.1	วิธีการทดสอบบนข้อมูลสังเคราะห์ .....	31
4.2.2	ผลการทดสอบ .....	31
4.3	การทดสอบความแม่นยำของการประมาณความยาวกระดูก .....	32
4.3.1	ผลการทดสอบ .....	32
4.4	การทดสอบความแม่นยำของท่าทางมือที่ได้จากการทดลอง .....	34
4.5	การอภิปรายผลการทดลอง .....	43
บทที่ 5	สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ .....	46
5.1	สรุปผลการวิจัย .....	46
5.2	ข้อเสนอแนะ .....	47
	รายการอ้างอิง .....	49
	ภาคผนวก .....	51
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ .....	61

## สารบัญตาราง

หน้า

ตาราง 4-1 ตารางแสดงค่าความยาวกระดูกที่วัดได้จากแบบจำลอง	
และที่ได้จากการคำนวณด้วยข้อมูลชุดที่ 1 .....	32
ตาราง 4-2 ตารางแสดงค่าความยาวกระดูกที่วัดได้จากแบบจำลอง	
และที่ได้จากการคำนวณด้วยข้อมูลชุดที่ 2 .....	33
ตาราง 4-3 ตารางแสดงค่าความยาวกระดูกที่วัดได้จากแบบจำลอง	
และที่ได้จากการคำนวณด้วยข้อมูลชุดที่ 3 .....	34
ตาราง 4-4 ตารางแสดงภาพแบบจำลองที่คำนวณได้เปรียบเทียบกับแบบจำลองที่สร้างขึ้นและค่า	
ความผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ของมุมที่คำนวณได้ จากชุดการทดลองที่ 1 .....	37
ตาราง 4-5 ตารางแสดงภาพแบบจำลองที่คำนวณได้เปรียบเทียบกับแบบจำลองที่สร้างขึ้นและค่า	
ความผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ของมุมที่คำนวณได้ จากชุดการทดลองที่ 2 .....	40
ตาราง 4-6 ตารางแสดงภาพแบบจำลองที่คำนวณได้เปรียบเทียบกับแบบจำลองที่สร้างขึ้นและค่า	
ความผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ของมุมที่คำนวณได้ จากชุดการทดลองที่ 3 .....	43

## สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 1-1	ภาพแสดงอุปกรณ์สำหรับงานตรวจจับการเคลื่อนไหว .....	3
ภาพที่ 1-2	แสดงแผนภาพเกณฑ์แสดงระยะเวลาการดำเนินการวิจัย .....	6
ภาพที่ 2-1	ภาพกระดูกมือ : (ก) กายวิภาคของมือ	
	(ข) แบบจำลองทางกลศาสตร์ของมือ (ภาพจาก: [8]) .....	9
ภาพที่ 2-2	ภาพแสดงการแบ่งประเภทการประมาณท่าทางของมือด้วยคอมพิวเตอร์วิทัศน์	
	(ภาพจาก: [8]) .....	12
ภาพที่ 2-3	(ก) ภาพแสดงอุปกรณ์ของ [9] (ข) ภาพแสดงการทำงานของระบบใน [9]	
	(ภาพจาก: [9]) .....	13
ภาพที่ 2-4	ภาพการสร้างแบบจำลองจากการตัดกันของรังสีจากภาพไบนารี (ภาพจาก: [10]) .....	13
ภาพที่ 2-5	ภาพแบบจำลองที่รู้จักได้ของงาน [10] (ภาพจาก: [10]) .....	14
ภาพที่ 2-6	ภาพแสดงการทำงานของระบบในงาน [12] (ภาพจาก: [12]) .....	15
ภาพที่ 2-7	ภาพแสดงการทำงานของระบบใน [4] (ก) ภาพแสดงการรับภาพเข้า	
	(ข) ภาพแสดงผลลัพธ์ของการทำงาน (ภาพจาก: [4]) .....	15

ภาพที่ 2-8 ภาพแสดงภาพรับเข้าและผลลัพธ์ของงาน [5] (ภาพจาก: [5]).....	17
ภาพที่ 2-9 ภาพแสดงตัวอย่างการทำงานของเว่ยและคณะจากผลงานปี 2010 (ภาพจาก: [15]).....	17
ภาพที่ 2-10 ภาพแสดงภาพรับเข้าและผลลัพธ์การทำงานของเว่ยและคณะ จากผลงานปี 2009 [6] (ภาพจาก: [6]).....	18
ภาพที่ 3-1 ภาพแสดงลักษณะข้อจำกัดวัตถุแข็งเกร็งของเว่ยและคณะ [6] (ภาพจาก: [6]).....	23
ภาพที่ 3-2 แบบจำลองมือของงานนี้ที่แสดงให้เห็นถึง $\Delta ABC$ , $\Delta ACD$ และ $\Delta ADE$ ที่ใช้ในการ สร้างข้อจำกัดวัตถุแข็งเกร็ง.....	23
ภาพที่ 4-1 ภาพแบบจำลองของมือในโปรแกรม ออโต้เดสก์ มายา ที่ใช้ในการทดลอง .....	30
ภาพที่ 4-2 แผนภาพแสดงความผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์เทียบกับจำนวนภาพที่ใช้ในการทดลอง .....	31

# บทที่ 1

## บทนำ

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงที่มาของปัญหา ว่าที่มาของปัญหานี้มีความน่าสนใจอย่างไร ซึ่งจะแสดงให้เห็นในส่วน หัวข้อที่ 1.1 และนำไปสู่วัตถุประสงค์งานวิจัย ว่างานวิจัยชิ้นนี้ได้นำเสนออะไร มีประโยชน์ที่ได้รับอย่างไร

### 1.1 ที่มาของปัญหา

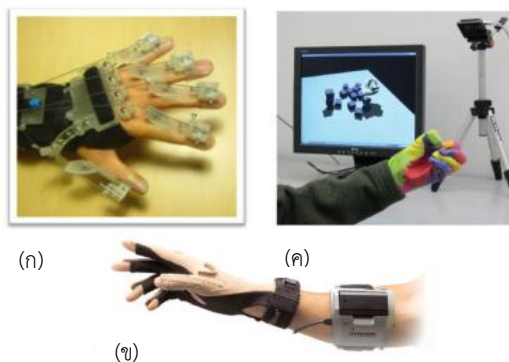
ในปัจจุบันความก้าวหน้าทางอุตสาหกรรมคอมพิวเตอร์ มีความเจริญก้าวหน้าขึ้นมาก ทำให้อุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับคอมพิวเตอร์ มีความเจริญก้าวหน้าตามไปด้วย หนึ่งในนั้นคืออุตสาหกรรมแอนิเมชัน ดังที่เห็นได้จากช่วงหลายปีหลังนี้เราได้รับชมโฆษณา หรือว่าภาพยนตร์ที่ถูกสร้างขึ้นด้วยคอมพิวเตอร์มากขึ้น

ในปัจจุบันคอมพิวเตอร์แอนิเมชันได้กลายมามีบทบาทอย่างมากในสื่อต่างๆ ทั้งในสื่อทางโทรทัศน์หรือว่าอินเทอร์เน็ต ซึ่งกรรมวิธีในการสร้างต้องใช้เทคนิคขั้นสูง เพื่อสร้างตัวละครให้เคลื่อนไหวได้อย่างเสมือนจริง โดยหนึ่งในเทคนิคเหล่านั้นคือ การตรวจจับการเคลื่อนไหว โดยวิธีการนี้คือการพยายามจับการเคลื่อนไหวจริงของมนุษย์ เพื่อนำมาจำลองการเคลื่อนไหวซ้ำอีกครั้งในคอมพิวเตอร์ วิธีการนี้จะมีความแตกต่างกันออกไปตามทิศทางของเทคโนโลยีที่สร้างเพื่อการใช้งานเฉพาะทาง อย่างเช่น การแปลภาษามือ การรู้จำการแสดงท่าทาง หรือว่า การแสดงและการเต้น เป็นต้น

โดยทั่วไปแล้ว สาขาของเทคโนโลยี การตรวจจับการเคลื่อนไหว ยังแบ่งออกได้ตามอวัยวะที่ต้องการจับการเคลื่อนไหว ซึ่งแบ่งออกได้เป็นสามส่วนคือ ใบหน้า ทั้งตัวและมือ โดยเฉพาะงานติดตามการเคลื่อนไหวมือที่ต้องการสร้างการเคลื่อนไหวของมือนั้นทำได้หลากหลายวิธีดังที่ได้

กล่าวไว้ในบทความการตรวจจับการเคลื่อนไหว [1] ซึ่งได้แบ่งงานประเภทการเคลื่อนไหวของมือออกเป็นงานย่อยๆ ได้ตามเทคโนโลยีที่ใช้งานอันได้แก่ การทำงานเชิงกล (mechanical based) การทำงานด้วยสนามแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic based) และสุดท้าย การทำงานด้วยคอมพิวเตอร์วิทัศน์ (computer vision based) ซึ่งการทำงานเชิงกลนั้นผู้ที่ใช้งานนั้นจะต้องสวมอุปกรณ์ที่มีลักษณะแทนโครงกระดูกหรือที่เรียกกันว่า โครงร่างแข็งภายนอก (Exoskeleton) ดังที่แสดงให้เห็นในภาพที่ 1-1 (ก) ซึ่งเมื่อ โครงร่างแข็งภายนอกนั้นถูกทำให้เคลื่อนที่ ตัวรับรู้จะส่งข้อมูลมุมของข้อกระดูกที่เปลี่ยนแปลงไปกลับมาที่หน่วยประมวลผลกลาง วิธีการนี้มีข้อดีหลายประการ อย่างเช่น ไม่มีสัญญาณรบกวนจากแหล่งแสง หรือว่าสนามแม่เหล็กไฟฟ้า แต่ข้อจำกัดของวิธีการนี้ ก็เพราะเนื่องจากเป็นอุปกรณ์ต่อภายนอกและใช้ตัวรับรู้เป็นจำนวนมาก นั้นทำให้วิธีนี้จำเป็นต้องปรับเทียบค่าเริ่มต้นให้เหมาะสมอย่างสม่ำเสมอ และเนื่องจากตัวรับรู้นั้นตอบค่ากลับมาเพียงแค่มุมที่เปลี่ยนแปลงไปของข้อกระดูก เราจำเป็นต้องคำนวณจุดข้อกระดูกเอาจากมุมที่ได้รับมาเหล่านั้น วิธีการที่สองที่จะกล่าวถึงนั้นคือวิธีการที่ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้างดที่แสดงให้เห็นในภาพที่ 1-1 (ข) ที่ผู้ใช้งานจะสวมชุดที่เป็นแผงของตัวรับสัญญาณแม่เหล็กที่ซึ่งจะหาค่าระยะของตัวรับสัญญาณนั้นๆ เอาจากตัวส่งสัญญาณแม่เหล็ก ข้อดีของวิธีการนี้ก็คือเราจะได้คำตอบของตำแหน่งที่แท้จริงและมุมของข้อกระดูกได้โดยไม่ต้องคำนวณหา โดยวิธีการนี้อาจทำได้ในเวลาจริง ข้อจำกัดจากวิธีการแบบนี้คือการลดทอนสัญญาณแม่เหล็กที่เกิดจากระยะทางที่ห่างจากตัวส่งสัญญาณแม่เหล็ก และสัญญาณรบกวนจากแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็กอื่น ทำให้ข้อมูลมักมีสัญญาณรบกวนจำนวนมาก สุดท้ายเป็นวิธีการทางคอมพิวเตอร์วิทัศน์ดังที่แสดงในภาพที่ 1-1 (ค) โดยที่วิธีการนี้ได้ตั้งกล้องเอาไว้ด้านหน้าของผู้ใช้งาน และจากภาพที่รับมาได้นำมาคำนวณหาคำตอบของตำแหน่งและมุมในแต่ละข้อกระดูกจากภาพที่ได้รับเข้ามา จุดเด่นของวิธีการนี้คือสามารถให้ผู้ใช้งานเคลื่อนไหวได้อย่างอิสระในพื้นที่ที่กว้างขึ้นได้ แต่ว่าก็มีข้อจำกัดบางประการอย่างเช่นการรบกวนจาก

แหล่งกำเนิดแสงภายนอก ปัญหาการบังตัวเอง ซึ่งเป็นปัญหาที่ยากแต่ว่าก็สามารถเป็นไปได้ที่จะแก้ไข  
นั้นทำให้งานประเภทนี้ดึงดูดนักวิจัยให้เข้ามาแก้ปัญหานี้เป็นจำนวนมาก



ภาพที่ 1-1 ภาพแสดงอุปกรณ์สำหรับงานตรวจจับการเคลื่อนไหว

- (ก) อุปกรณ์สำหรับวิธีที่ใช้การเคลื่อนไหวทางกล (ภาพจาก : <http://bdml.stanford.edu>)
- (ข) อุปกรณ์สำหรับวิธีที่ใช้สนามแม่เหล็กไฟฟ้า (ภาพจาก : <http://www.cyberglovesystems.com/>)
- (ค) อุปกรณ์ที่ใช้ในงานประเภทคอมพิวเตอร์วิทัศน์ (ภาพจาก: [2])

โดยงานวิจัยที่พยายามจะหาคำตอบโดยการเปรียบเทียบภาพที่ได้รับเข้ามาจากกล้องนำไป  
เทียบกับฐานข้อมูลแบบจำลองก็ได้แก่ งานวิจัยของหวังและคณะ [2,3] โดยใช้วิธีสร้างถุงมือสีเพื่อเป็น  
โครงสร้างแทนมือ เพื่อใช้ในการค้นหาในฐานข้อมูล ซึ่งคล้ายกับงานวิจัยของสแตนเกอร์และคณะ [4]  
ซึ่งจะใช้ขอบของมือและสีผิวแทนโครงสร้างของมือ ซึ่งวิธีการนี้จะสามารถแบ่งได้เป็นสามขั้นตอนหลัก  
โดยขั้นตอนแรกจะทำการใช้วิธีการแบ่งภาพเพื่อแบ่งภาพออกเป็นส่วนย่อยๆ เพื่อกรองเอาข้อมูลที่ไม่  
ต้องการในภาพออก อย่างเช่น พื้นหลัง เป็นต้น ขั้นตอนต่อมาจะนำข้อมูลที่ได้จากขั้นตอนแรกมาใช้ใน  
กาจำแนกโครงสร้างที่ใช้แทนมือออกมา ส่วนขั้นตอนสุดท้ายจะวิธีการค้นหารูปแบบนี้ๆ ใน  
ฐานข้อมูลซึ่งงานวิจัยของหวัง [2] จะใช้การหาด้วยระยะแสมมิงในฐานข้อมูลและในงานวิจัยของสแตน

เกอร์และคณะ [4] จะใช้การเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลแบบจำลองที่สร้างขึ้นด้วย ตัวกรองแบบเบเยเซียนอย่างมีลำดับชั้น ซึ่งงานประเภทนี้จะมีข้อจำกัดอยู่ที่จะใช้การประมวลผลมากเนื่องจากการสร้างฐานข้อมูลขนาดใหญ่มาเก็บฐานข้อมูลแบบจำลอง

อีกวิธีการหนึ่งคือการพยายามที่จะหาคำตอบด้วยการสร้างสมการข้อจำกัดมาเพื่อค้นหาคำตอบอย่างเช่นงานวิจัยของกวนและคณะ [5] ที่พยายามหาคำตอบของท่าทางมือในสามมิติโดยใช้สมการข้อจำกัดที่เสนอขึ้นเพื่อจำกัดเซตของคำตอบที่เป็นไปได้ และงานของเว่ยและคณะ [6] ก็ได้นำเสนอผลงานวิจัยที่มีลักษณะคล้ายกันคือพยายามสร้างสมการข้อจำกัดและได้เสนอการสร้างวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดเพื่อหาคำตอบ ซึ่งงานประเภทนี้มีจุดเด่นตรงที่ไม่จำเป็นต้องสร้างฐานข้อมูลแบบจำลองขนาดใหญ่ และยังสามารถหาคำตอบของท่าทางมือในสามมิติได้

งานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอวิธีการสร้างแบบจำลองของมือโดยไม่ต้องสร้างฐานข้อมูลแบบจำลองจากการใช้สร้างสมการข้อจำกัดจากในแนวทางเดียวกับเว่ยและคณะ [6] เพื่อใช้ในประมาณท่าทางของมือโดยไม่ต้องพึ่งการสร้างฐานข้อมูล

## 1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

เพื่อเสนอวิธีการการสร้างแบบจำลองของมือโดยใช้การสร้างสมการข้อจำกัดที่เหมาะสมกับท่าทางของมือและวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุด ซึ่งจะทำการวัดผลโดยใช้ค่าผิดพลาดของมุมที่ได้เทียบกับแบบจำลองที่สร้างขึ้นด้วยคอมพิวเตอร์ และเปรียบเทียบลักษณะจากแบบจำลองที่คำนวณได้

## 1.3 ขอบเขตการวิจัย

1. ข้อมูลนำเข้าเป็นรูปภาพขนาด  $640 \times 480$  พิกเซล ไม่มีความโปร่งใส โดยวิธีการนี้มีเงื่อนไขว่า ในภาพนั้นจะต้องเห็นจุดของข้อกระดูกทั้งหมด



2. การแสดงผลจะนำข้อมูลที่ได้จากการคำนวณออกมาแสดงผลในโปรแกรมสร้างภาพสามมิติ ออโต้เดสก์ มายา
3. ข้อมูลที่ใช้ในการทดลองจะเป็นข้อมูลที่ถูกรสร้างขึ้นโดยโปรแกรม ออโต้เดสก์ มายา โดยที่ทราบตำแหน่งและมุมในข้อกระดูกทั้งหมด
4. งานวิจัยนี้จะทำการวัดผลโดยการหาค่าความผิดพลาดเทียบกับข้อมูลที่ใช้ในการทดลองว่ามีความผิดพลาดมากน้อยอย่างไร

#### 1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

วิธีการที่นำเสนอได้นั้นได้ใช้สมการข้อจำกัดในการหาคำตอบของมือแทนการค้นหาในฐานข้อมูล ซึ่งคาดว่าจะลดภาระในการสร้างฐานข้อมูลขนาดใหญ่ โดยผลลัพธ์ที่ได้สามารถนำไปใช้ในการสร้างท่าทางการเคลื่อนไหวของมือแบบ คีย์เฟรม (การสร้างภาพการเคลื่อนไหวในคอมพิวเตอร์โดยมีท่าทางหลักจำนวนหนึ่งแล้วทำการประมาณค่ามุมการเคลื่อนไหวระหว่างท่าทางดังกล่าว)

## 1.5 วิธีการดำเนินการวิจัย

วิธีการดำเนินการวิจัยนี้ใช้เวลาทั้งหมด 22 เดือน โดยเริ่มต้นตั้งแต่เดือนตุลาคม 2552 จนถึงเดือนสิงหาคม 2554 โดยประกอบด้วยทั้งหมดเจ็ดขั้นตอนการวิจัย อันได้แก่ ขั้นตอนการศึกษางานวิจัย และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง วิเคราะห์และออกแบบอัลกอริทึม ออกแบบโปรแกรมประยุกต์ที่ใช้ทดสอบ พัฒนาและทดสอบโปรแกรมประยุกต์ ทดลองและประเมินผล สรุปผลดำเนินงาน และจัดทำวิทยานิพนธ์

	เดือนเริ่มต้น	ระยะเวลา (เดือน)	Oct-52	Nov-52	Dec-52	Jan-53	Feb-53	Mar-53	Apr-53	May-53	Jun-53	Jul-53	Aug-53	Sep-53	Oct-53	Nov-53	Dec-53	Jan-54	Feb-54	Mar-54	Apr-54	May-54	Jun-54	Jul-54		
ศึกษางานวิจัย และทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	Oct-52	5	■	■	■	■	■																			
วิเคราะห์ และออกแบบอัลกอริทึม	Jan-53	7				■	■	■	■	■	■	■														
ออกแบบโปรแกรมประยุกต์ที่ใช้ทดสอบ	May-53	5							■	■	■	■	■													
พัฒนา และทดสอบโปรแกรมประยุกต์	Sep-53	8											■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
ทดลองและประเมินผล	Feb-54	5																	■	■	■	■	■	■	■	
สรุปผลการดำเนินงาน	May-54	2																					■	■	■	
จัดทำวิทยานิพนธ์	Jun-54	2																						■	■	

ภาพที่ 1-2 แสดงแผนภาพแกนต์แสดงระยะเวลาการดำเนินการวิจัย

## 1.6 ผลงานตีพิมพ์จากงานวิจัย

บางส่วนของผลงานวิจัยนี้ได้รับการตีพิมพ์ในหนังสือรวมบทความจากการประชุมวิชาการชื่อ

- “3D Hand Pose Modeling From Uncalibrate Monocular Images”  
โดย ธีรภัทร์ สัจจวิไล และ พิษณุ คนองชัยยศ ในงานประชุมวิชาการ “The 8<sup>th</sup> International Joint Conference on Computer Science and Software Engineering” ซึ่งจัดขึ้นที่มหาวิทยาลัยมหิดล วิทยาเขต ศาลายา ในระหว่างวันที่ 11-13 พฤษภาคม 2554

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในหัวข้อนี้ เราจะนิยามปัญหาของการสร้างแบบจำลองของมือ และจะอภิปรายเกี่ยวกับความน่าสนใจของปัญหาที่เกี่ยวข้องและรวบรวมงานวิจัยที่เกี่ยวข้องเอาไว้เพื่ออภิปรายถึงข้อดีและข้อจำกัดของงานวิจัยแต่ละงาน ที่ซึ่งจะอภิปรายในหัวข้อ 2.2.1 2.2.1.1 และหัวข้อ 2.2.1.2 ซึ่งในส่วนแรกของบทจะพูดถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องสำหรับที่ใช้ในงานวิจัยนี้

#### 2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ในงานวิจัยนี้มีทฤษฎีที่เกี่ยวข้องอยู่สามทฤษฎีหลักๆ ได้แก่ กระบวนการฉายภาพ (Projection) การทำแบบจำลองของมือ (Hand Modeling) และวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุด (Optimization Methods)

##### 2.1.1 กระบวนการฉายภาพ (Projection)

กระบวนการฉายภาพ นั้นคือการฉายภาพจากในสามมิติลงในระนาบสองมิติ ซึ่งเป็นกระบวนการสร้างความสัมพันธ์ในการแสดงผลในสามมิติกับระนาบสองมิติ ซึ่งใน [7] นั้นจะทำการฉายในลักษณะที่เรียกว่า “การฉายภาพแบบตั้งฉาก” (Orthographic Projection) ที่ซึ่งจะประมาณว่าวัตถุที่อยู่ตรงหน้ากล้องนั้น มีลักษณะขนานกับกล้อง

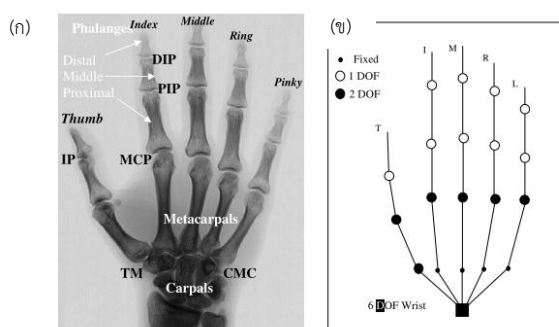
ซึ่งการฉายภาพแบบตั้งฉากนั้นในการฉายจุดในสามมิติ  $(X, Y, Z)^T$  ลงบนจุดในระนาบสองมิติ  $(u, v)^T$  ดังสมการ

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} s & 0 & 0 \\ 0 & s & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

โดยสมการนี้จะหมายถึงจุดสองมิติจะมีความสัมพันธ์กับจุดสามมิติจุดเดียวกันนั้นในลักษณะที่เป็นอัตราส่วนขยายของจุดในสามมิติ

### 2.1.2 การทำแบบจำลองของมือ (Hand Modeling)

การทำแบบจำลองของมือ เรามีพื้นฐานมาจากโครงสร้างกระดูกมือ ซึ่งประกอบไปด้วยกระดูก 27 ชิ้น 8 ชิ้นในนั้นจะอยู่ที่ตรงข้อมือ ดังที่แสดงให้เห็นในภาพที่ 2-1 (ก) กระดูกในโครงสร้างกระดูกของมือได้สร้างระบบของวัตถุแข็งเกร็งขึ้น ที่ซึ่งจุดปลายกระดูกแต่ละชิ้นจะเป็นข้อกระดูกที่มีองศาเสรีสำหรับการหมุนอยู่หนึ่งหรือสององศา ข้อกระดูกเหล่านั้นมีชื่อเรียกว่า metacarpophalangeal (MCP) หรือคือข้อกระดูกที่เชื่อมนิ้วเข้ากับฝ่ามือ proximal interphalangeal (PIP) หรือคือข้อกระดูกที่เชื่อมต่อในท่อนกระดูกถัดไป distal interphalangeal (DIP) หรือคือข้อกระดูกที่เชื่อมกระดูกชิ้นปลายนิ้วมือเข้ากับกระดูกข้อกลาง และสุดท้าย carpometacarpal (CMC) ที่เชื่อมต่อข้อกระดูกชิ้น metacarpals เข้ากับข้อมือ ข้อกระดูกชุดนี้เรียกว่า interphalangeal (IP) นั้น ในแต่ละข้อจะมีหนึ่งองศาเสรี ข้อกระดูก MCP จะมีลักษณะเป็นข้ออานม้า (saddle joint) ซึ่งจะมีสององศาเสรีในทิศทาง กางออก/หุบเข้า และทิศทางกางนิ้ว ข้อกระดูกชุด CMC นั้นไม่มีการเคลื่อนไหวใดๆ เกิดขึ้นเนื่องจากเป็นโครงสร้างที่ติดอยู่ในฝ่ามือ



ภาพที่ 2-1 ภาพกระดูกมือ : (ก) กายวิภาคของมือ (ข) แบบจำลองทางกลศาสตร์ของมือ

(ภาพจาก: [8])

ซึ่งลักษณะแบบจำลองของมือที่เราใช้นั้นเรียกว่า Kinematic model หรือแบบจำลอง กลศาสตร์ ดังที่ได้นิยามให้เห็นในไว้ในบทวิจารณ์ของเอโรลด์ [8] โดยจะเปลี่ยนลักษณะของกระดูกให้ กลายเป็นตัวแปรสองตัวคือความยาวกระดูกและมุมภายในข้อกระดูก อาจเรียกได้ว่าเป็นลักษณะที่ เป็นธรรมชาติที่สุดที่จะสร้างแบบจำลองของมือในลักษณะของตัวแปรในสามมิติ

### 2.1.3 วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุด (Optimization Methods)

วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดเป็นกระบวนการทางคณิตศาสตร์ ที่ซึ่งจะใช้ในการหาค่าสูงที่สุด หรือต่ำที่สุดของฟังก์ชันจุดประสงค์โดยที่กระบวนการจะเป็นไปอย่างเป็นระบบ ซึ่งเราได้นำวิธีการนี้ มาใช้ในการหาค่าตอบของเราจากการสร้างสมการข้อจำกัดขึ้น ซึ่งวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดนั้น สามารถแสดงได้ตามความสัมพันธ์

กำหนดให้ : ฟังก์ชัน  $f : A \rightarrow \mathbb{R}$  จากบางเซต  $A$  ที่เป็นจำนวนจริง คำตอบที่ฟังก์ชันจุดประสงค์จะมี ส่วนประกอบ  $x_0$  ใน  $A$  ที่ซึ่ง  $f(x_0) \leq f(x)$  สำหรับทุกค่า  $x$  ใน  $A$  สำหรับการหาค่าต่ำที่สุด หรือ  $f(x_0) \geq f(x)$  สำหรับทุกค่า  $x$  ใน  $A$  สำหรับการหาค่าสูงที่สุด กล่าวคือวิธีการนี้จะพยายามหาค่าที่ ต่ำที่สุดและสูงที่สุดในรอบคำตอบ ซึ่งวิธีการดังที่กล่าวมาข้างต้นนั้น ได้มีการนำเสนอไว้ในหลายวิธี

#### 2.1.3.1 อัลกอริทึมทรัสต์รีเฟล็กทีฟ (Trust Region Reflective Algorithms)

ทรัสต์รีเจียน (Trust region) คือค่าที่ใช้ในกระบวนการหาค่าเหมาะสมที่สุดทางคณิตศาสตร์ที่ แสดงถึงขอบเขตของบริเวณภายในฟังก์ชันจุดประสงค์ ที่ประมาณด้วยฟังก์ชันแบบจำลอง (โดยมากมัก เป็นสมการกำลังสอง) ถ้าพบแบบจำลองที่เหมาะสมภายในทรัสต์รีเจียนของฟังก์ชันจุดประสงค์ ก็จะทำให้ ทรัสต์รีเจียนนั้นขยายออก ในทางกลับกัน ถ้าการประมาณด้วยฟังก์ชันแบบจำลองนั้นไม่ดี ทรัสต์ รีเจียนก็จะหดเข้า

### 2.1.3.2 อัลกอริทึมของเลเวนเบิร์ก มาควาร์ด (Levenberg – Marquadt Algorithms:

#### LMA)

ในทางคณิตศาสตร์ อัลกอริทึมของเลเวนเบิร์ก มาควาร์ด จะให้คำตอบเชิงตัวเลขของการหาค่าต่ำที่สุดของฟังก์ชันจุดประสงค์ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะเป็นแบบไม่เชิงเส้น บนปริภูมิของตัวแปรในฟังก์ชัน

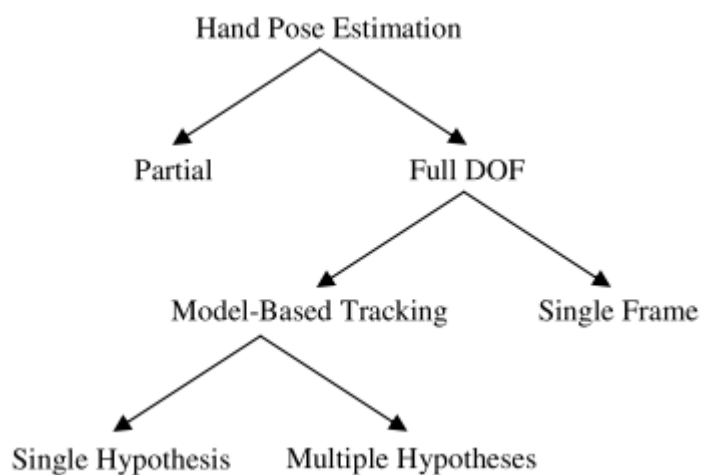
LMA นั้นจะเป็นวิธีที่มีลักษณะคล้ายระหว่างอัลกอริทึมของเกาส์-นิวตัน (Gauss-Newton Algorithm: GNA) และวิธีการลดลงของเกรเดียน (Gradient Descent) ซึ่งวิธี LMA นั้นจะทนทานกว่า GNA ซึ่งนั่นหมายความว่า ในหลายกรณีเมื่อจุดเริ่มต้นนั้นไกลจากคำตอบมาก วิธีการนี้จะสามารถหาคำตอบได้ดีกว่า

วิธีการ LMA นั้นก็เช่นเดียวกับการหาค่าต่ำสุดด้วยวิธีเชิงตัวเลขทั่วไป ซึ่งจะเป็นวิธีทำซ้ำเพื่อที่จะเริ่มหาค่าต่ำที่สุด ผู้ใช้จะต้องกำหนดจุดเริ่มต้นให้กับระบบ เมื่อเวลาทำงานอัลกอริทึมนี้จะใช้การปรับค่าตัวแปรไปเรื่อยๆ จนลู่เข้าคำตอบ

## 2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปในการสร้างแบบจำลองของมือในสามมิติจากรูปภาพ (Vision-based) โดยงานวิจัยในลักษณะนี้สามารถแบ่งออกตามลักษณะการประมาณแบบจำลองได้สองประเภทอันได้แก่ การประมาณท่าทางแบบบางส่วน (Partial Poses Estimation) และการประมาณท่าทางแบบเต็มองศาเสรี (Full DOF Poses Estimation)

## 2.2.1 การประมาณท่าทางมือด้วยวิธีการทางคอมพิวเตอร์วิทัศน์ (Vision based Hand Pose Estimation)



ภาพที่ 2-2 ภาพแสดงการแบ่งประเภทการประมาณท่าทางของมือด้วยคอมพิวเตอร์วิทัศน์

(ภาพจาก: [8])

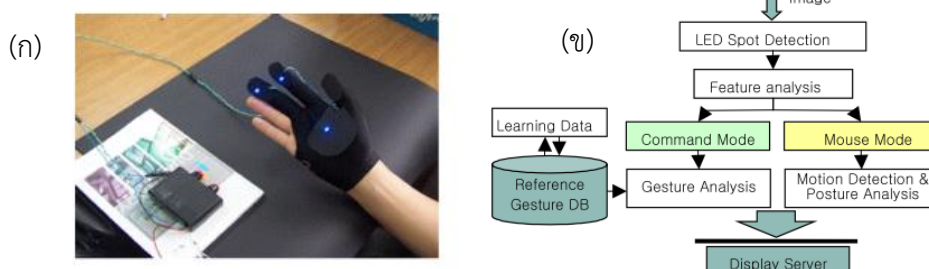
วิธีการหลักๆ ที่ใช้งานในการประมาณท่าทางมือด้วยวิธีการทางคอมพิวเตอร์วิทัศน์นั้น สามารถแบ่งได้สองประเภทคือแบบการประมาณท่าทางแบบบางส่วน (Partial poses estimation) และการประมาณท่าทางแบบเต็มองศาเสรี (Full DOF estimation) ตามดังที่แสดงให้เห็นในภาพที่ 2-2 ซึ่งแบ่งตามส่วนของท่าทางที่พยายามจะสร้างแบบจำลอง ดังจะกล่าวถึงรายละเอียดในหัวข้อย่อยที่ 2.2.1.1 และ 2.2.1.2

### 2.2.1.1 การประมาณท่าทางแบบบางส่วน (Partial Poses Estimation)

งานวิจัยประเภทนี้เป็นการประมาณท่าทางแบบบางส่วนของมือเช่น ปลายนิ้วมือ (Fingertips) หรือฝ่ามือ (Palm) ซึ่งระบบแบบนี้จะมีพื้นฐานอยู่บนภาพที่ได้รับเข้ามาและพยายามจะวิเคราะห์ภาพนั้นเพื่อที่จะไปใช้งานอย่างเช่น ท่าทางการชี่นนิ้ว หรือว่าการลากนิ้ว โดยงานประเภทนี้

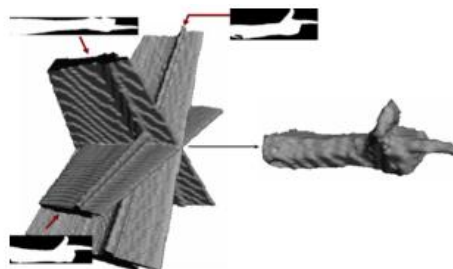


มีตัวอย่างอย่างเช่น งานของปาร์คและยุน [9] งานวิจัยนี้ได้สร้างถุงมือที่ติดหลอดไฟแอลอีดี อยู่ที่ปลายนิ้วชี้ นิ้วกลางและฝ่ามือ และสร้างฐานข้อมูลเก็บท่าทางพื้นฐานที่จะใช้งานในงานประชุมทางไกลผ่านวิดีโอ ซึ่งถูกสอนการรู้จำด้วย ฮิดเดนมาคอฟโมเดล (Hidden Markov Models) ข้อดีของงานประเภทนี้คือ สามารถทำงานได้ตามเวลาจริงเนื่องจากมีฐานข้อมูลขนาดเล็กและสามารถสร้างให้เข้ากับโปรแกรมประยุกต์ที่ต้องการจะใช้งานได้

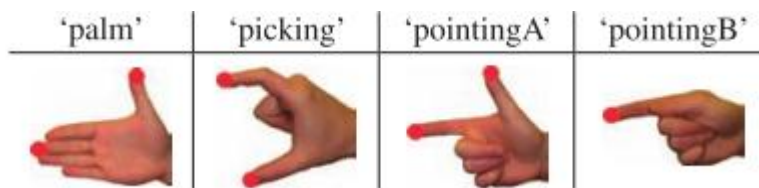


ภาพที่ 2-3 (ก) ภาพแสดงอุปกรณ์ของ [9] (ข) ภาพแสดงการทำงานของระบบใน [9] (ภาพจาก: [9])

งานวิจัยของมาร์คัสและคณะ [10,11] ที่ใช้การตั้งกล้องแบบพิเศษเพื่อใช้ในการตรวจจับท่าทางของมือในภาพที่รับเข้ามาได้ โดยการสร้างเปลือกหุ้มเสมือนขึ้นมาจากจุดตัดกันของรังสีจากภาพไบนารีที่สามารถหาได้จากภาพที่รับเข้ามา งานนี้สามารถสร้างแบบจำลองขึ้นมาได้จากภาพที่รับเข้ามาและสามารถรู้จำท่าทางของมือได้สี่แบบ คือ “อุ้งมือ” “การหยิบ” “การชี้ A” “การชี้ B”



ภาพที่ 2-4 ภาพการสร้างแบบจำลองจากการตัดกันของรังสีจากภาพไบนารี (ภาพจาก: [10])

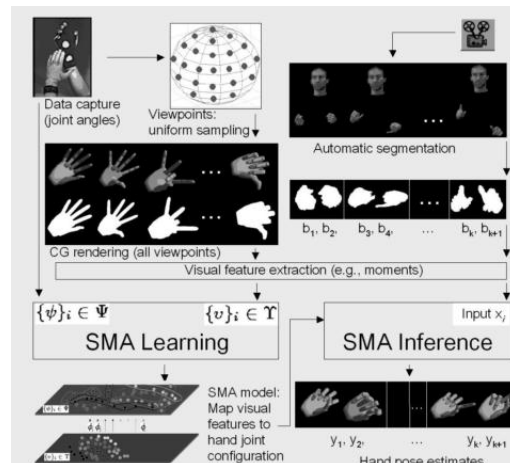


ภาพที่ 2-5 ภาพแบบจำลองที่รู้จักได้ของงาน [10] (ภาพจาก: [10])

แต่ข้อจำกัดของงานประเภทนี้คือไม่สามารถสร้างการเคลื่อนไหวได้อย่างเต็มองศาเสรีของมือนั้นคืองานประเภทนี้ไม่เหมาะสำหรับการนำไปสร้างภาพหลัก (Key framing) ของการสร้างภาพเคลื่อนไหว

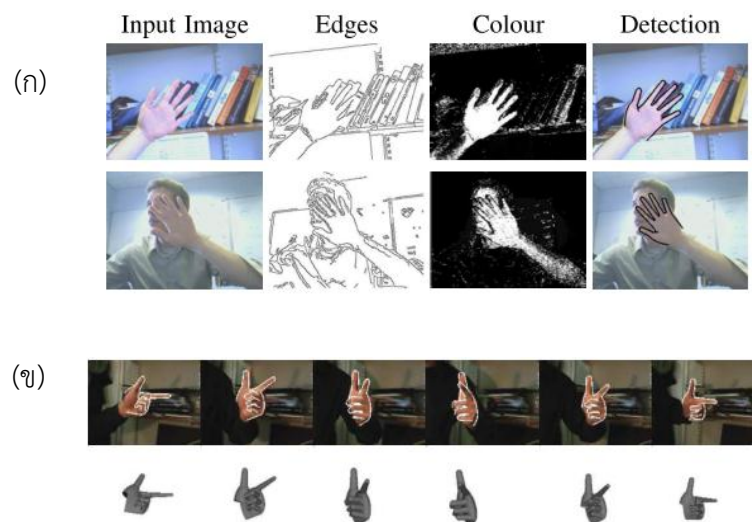
### 2.2.1.2 การประมาณท่าทางแบบเต็มองศาเสรี (Full DOF Poses Estimation)

การประมาณท่าทางแบบเต็มองศาเสรีนี้จะประมาณท่าทางของมือทุกข้อกระดูกซึ่งสามารถแบ่งออกได้ตามสมมติฐานที่ใช้งานตามที่แสดงให้เห็นในภาพที่ 2-2 นั่นคือ การติดตามมือด้วยแบบจำลอง (Model-based Tracking) และการประมาณค่าจากภาพเดี่ยว ซึ่งแบบติดตามมือด้วยฐานแบบจำลองนั้นจะอ้างถึงโครงสร้างทางกลศาสตร์ของมือจำลองที่เก็บเอาไว้ในฐานข้อมูล การติดตามมือด้วยแบบจำลองนั้นจะเกี่ยวข้องกับการค้นหาแบบจำลองของมือที่ถูกต้องจากโครงสร้างที่ใช้แทนรูปแบบของมือจากภาพสองมิติที่รับเข้ามา ตัวอย่างงานประเภทนี้ อย่างเช่น [12] ได้นำเสนออัลกอริทึมที่สร้างแบบจำลองสามมิติจากรูปภาพ ซึ่งจะใช้สถาปัตยกรรมการจับคู่แบบพิเศษ (Specialize Mapping Architecture : SMA) เพื่อที่จะจับคู่ภาพที่ได้รับเข้ามากับแบบจำลองสามมิติในฐานข้อมูล ซึ่งมีลักษณะการทำงานดังภาพต่อไปนี้



ภาพที่ 2-6 ภาพแสดงการทำงานของระบบในงาน [12] (ภาพจาก: [12])

ในปี 2006 สเตนเกอร์และคณะ [4] ได้สร้างฐานข้อมูลที่เก็บแบบจำลองของมือขนาดใหญ่ และได้คำนวณโครงสร้างที่ใช้แทนลักษณะมือด้วยเส้นขอบและสีผิวของมือ จากนั้นก็ได้ใช้ตัวกรองเบเยเซียนแบบเป็นชั้นลำดับ (Hierarchical Bayesian Filter) เพื่อคัดกรองภาพที่รับเข้ามาว่าลักษณะของแบบจำลองใดเป็นคำตอบ



ภาพที่ 2-7 ภาพแสดงการทำงานของระบบใน [4]

(ก) ภาพแสดงการรับภาพเข้า (ข) ภาพแสดงผลลัพธ์ของการทำงาน

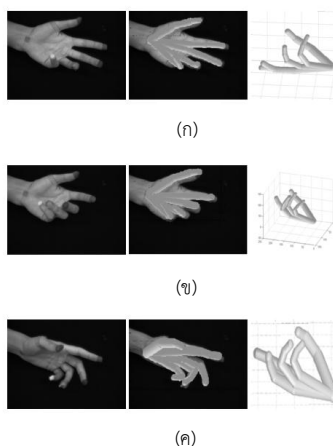
(ภาพจาก: [4])

ในปี 2008 เดอ ลา กอส์และคณะ [13] ได้สร้างระบบที่มีลักษณะเป็นแบบจำลอง เช่นเดียวกันกับ [4,12] ซึ่งมีข้อแตกต่างตรงที่เดอ ลา กอส์ นั้น จะใช้ประโยชน์จากลักษณะพื้นผิว และลักษณะของแสง เพื่อใช้กับการติดตามมือในแบบจำลอง

ในปี 2009 เกิดวิบูลย์เวชและไซโตะ [14] ได้พัฒนาการติดตามมือด้วยแบบจำลองในลักษณะที่คล้ายกับสเตนเกอร์และคณะ[4] แต่มีข้อแตกต่างตรงที่วิธีการหาลักษณะเฉพาะของมือที่มีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของแสง และวิธีการติดตามมือที่สามารถจะกู้ตัวเองคืนมาได้เมื่อติดตามผิดพลาด

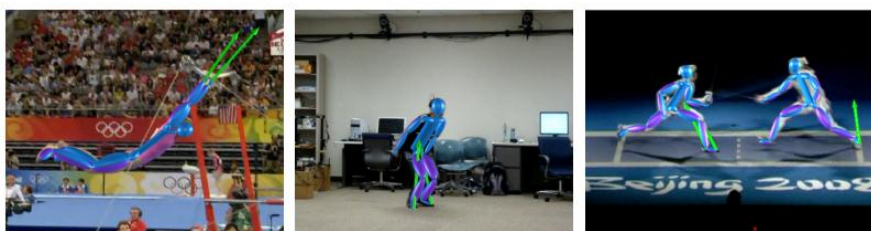
แต่ทั้งนี้งานทั้งหลายที่ได้กล่าวมานี้ โดยพื้นฐานแล้วจะอยู่บนการค้นหาลักษณะเฉพาะที่จะใช้แทนโครงสร้างมือแล้วค้นหาแบบจำลองที่มีลักษณะสมมูลกันนั้นในฐานข้อมูล ซึ่งมักจะต้องสร้างฐานข้อมูลขนาดใหญ่ ด้วยวิธีการเก็บข้อมูลท่าทางของมือจากการใช้อุปกรณ์พิเศษและจำเป็นต้องใช้การคำนวณมาก

ยังมีงานอีกประเภทที่พยายามจะสร้างแบบจำลองของมือโดยพยายามจะหาลักษณะเฉพาะของมือและสร้างสมการข้อจำกัดนั้นเพื่อหาคำตอบของท่าทางของมือ อย่างเช่น ในปี 2001 กวนและคณะ [5] ใช้การวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของมือเช่น มุมในข้อกระดูกชุด Distal Interphalangeal (DIP) กับข้อกระดูกชุด Proximal Interphalangeal (PIP) มีความสัมพันธ์ในลักษณะ  $\square_{DIP} = \frac{2}{3} \square_{PIP}$  เป็นต้น ซึ่งงานนี้ได้นำเสนอวิธีการสร้างข้อจำกัดออกมาแปดแบบ เพื่อใช้ในการคำนวณลักษณะท่าทางของมือ



ภาพที่ 2-8 ภาพแสดงภาพรับเข้าและผลลัพธ์ของงาน [5] (ภาพจาก: [5])

จากการศึกษาเพิ่มเติมในวิธีการสร้างแบบจำลองของโครงสร้างกระดูกมนุษย์ทั้งตัวนั้น เราได้พบงานที่น่าสนใจคืองานของเว่ยและคณะ [15] ซึ่งทำไว้ได้อย่างน่าสนใจ เนื่องจากงานนี้สามารถสร้างการเคลื่อนไหวของท่าทางมนุษย์ได้จากภาพวิดีโอ โดยไม่จำเป็นต้องสร้างฐานข้อมูลของแบบจำลองเพื่อใช้ในการค้นหาท่าทางการเคลื่อนไหวของมนุษย์ แต่จะทำการคำนวณหาท่าทางหลักในสามมิติจากภาพวิดีโอที่เป็นข้อมูลรับเข้าและให้ผู้ใช้กำหนดจุดที่เป็นจุดข้อกระดูก และข้อจำกัดต่างๆ ตามที่กำหนดไว้แทน



ภาพที่ 2-9 ภาพแสดงตัวอย่างการทำงานของเว่ยและคณะจากผลงานปี 2010 (ภาพจาก [15])

ในปี 2009 เว่ยและคณะ [6] ได้สร้างวิธีการสร้างแบบจำลองของโครงสร้างกระดูกมนุษย์จากภาพถ่ายโดยไม่จำเป็นต้องทราบพารามิเตอร์ของกล้อง ความยาวกระดูกและความลึกของข้อ

กระดุกแต่ละชุด แต่ใช้วิธีการที่สร้างสมการข้อจำกัดมาเป็นสร้างเป็นฟังก์ชันจุดประสงค์ เพื่อที่จะใช้วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดเพื่อหาคำตอบของท่าทางของมนุษย์ในภาพถ่ายนั้นในสามมิติ



ภาพที่ 2-10 ภาพแสดงภาพรับเข้าและผลลัพธ์การทำงานของเว่ยและคณะจากผลงานปี 2009 [6]  
(ภาพจาก: [6])

## 2.2.2 สรุป

จากการศึกษาที่ผ่านมา เราพบว่า งานประเภทประมาณค่าแบบเต็มองศาเสรีนั้นมีความน่าสนใจมากกว่าตรงที่สามารถสร้างการเคลื่อนไหวของมือต่อไปได้ สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้หลากหลาย และเหมาะจะนำไปใช้งานที่เป็นการสร้างภาพการเคลื่อนไหวมากกว่าวิธีการประมาณแบบบางส่วน ซึ่งวิธีการประมาณแบบบางส่วนนั้นจะเหมาะกับการใช้งานกับงานเฉพาะด้าน อย่างเช่น ใช้งานการสั่งงานคอมพิวเตอร์ เป็นต้น

นอกจากนั้นเรายังได้พบว่า งานประเภทนี้ยังฐานข้อมูลขนาดใหญ่ เพื่อเก็บฐานข้อมูลของรูปแบบมือที่ต้องการ ทำให้ต้องใช้การคำนวณและการจัดการข้อมูลจำนวนมาก และในการสร้าง

ฐานข้อมูลเหล่านั้น มักจะพึ่งอุปกรณ์พิเศษในการเก็บข้อมูลการเคลื่อนไหวของมือ ซึ่งจะเสียค่าใช้จ่ายเป็นจำนวนมาก

แต่ยังมีงานอีกประเภทหนึ่งที่มีความน่าสนใจอย่างเช่นงานวิจัยชิ้นที่ [5,6,15] ที่พยายามจะหาโครงสร้างของมือและโครงสร้างกระดูกร่างกายมนุษย์จากข้อมูลรับเข้าเช่น จุดของข้อกระดูก เป็นต้น ซึ่งงานประเภทนี้นั้นมีค่าใช้จ่ายถูกกว่า เนื่องจากไม่จำเป็นต้องมีอุปกรณ์พิเศษใดๆ มาเพื่อเก็บข้อมูลการเคลื่อนไหวของมือ แต่จะใช้ข้อมูลจากภาพรับเข้า มาช่วยกรอคำตอบ และสร้างภาพการเคลื่อนไหวขึ้น ทำให้งานประเภทนี้มีความน่าสนใจมากขึ้นในการนำไปพัฒนา

## บทที่ 3

### การจำลองท่าทางของมือในสามมิติ

ในหัวข้อนี้จะเกริ่นนำเรื่องการจำลองท่าทางของมือในสามมิติโดยสังเขป ว่างานวิจัยชิ้นนี้มีลักษณะข้อแตกต่างอย่างไรกับงานของเว่ยและคณะ [6] พร้อมทั้งอธิบายถึงลักษณะวิธีการที่ใช้สร้างแบบจำลองของมือ การประมาณขนาดขึ้นกระดูกและพารามิเตอร์กล้อง การสร้างท่าทางของข้อกระดูกขึ้นใหม่ในสามมิติ จำนวนภาพที่ต้องการ และสรุปในบทนี้ในตอนท้ายบท

#### 3.1 การจำลองท่าทางของมือในสามมิติโดยสังเขป

ในวิธีการที่เราได้นำเสนอนั้น เราได้ทำการปรับแบบจำลองของเว่ยและคณะ [6] ซึ่งที่ใช้สำหรับสร้างแบบจำลองเชิงแนวคิดของร่างกายมนุษย์ทั้งหมดมาปรับเพื่อใช้สำหรับการสร้างแบบมือจำลอง โดยที่เราจะสร้างโครงแบบมือจำลองโดยพร้อมกันนั้น เราจำเป็นจะต้องสร้างข้อจำกัดมาเพื่อลดความกำกวมของข้อจำกัดการฉายอย่างอ่อน ซึ่งเราได้นำเสนอการสร้างข้อจำกัดดังกล่าวดังที่จะได้กล่าวในหัวข้อถัดไป ด้วยวิธีการปรับวิธีการสร้างระบบสมการที่เว่ยและคณะ[6] ได้นำเสนอไว้ เราได้นำเสนอสมการข้อจำกัดสองอย่างที่ทำการปรับให้เข้ากับลักษณะโครงสร้างของมือ คือข้อจำกัดความเท่ากันของกระดูก และข้อจำกัดวัตถุแข็งเกร็ง ซึ่งจะได้กล่าวเอาไว้ในส่วนถัดไป

#### 3.2 แบบจำลองของมือ (Hand Model)

จากการศึกษารายงานเกี่ยวกับวิธีการสร้างการติดตามมือของเอโรลด์และคณะ [8] เราได้พบว่าแบบจำลองของมือนั้นมีอยู่หลายรูปแบบ แต่รูปแบบที่เหมาะสมกับการทำงานด้วยวิธีนี้เป็นแบบที่เรียกว่าแบบจำลองกลศาสตร์ (kinematic model) ซึ่งเป็นแบบจำลองที่จะเปลี่ยนลักษณะโครงสร้างกระดูกของมือให้กลายเป็นตัวแปรที่สามารถนำไปคำนวณได้



โดยมีลักษณะเป็นกระดูกเชื่อมโยงกันด้วยข้อกระดูกดังที่แสดงให้เห็นในภาพที่ 2-1 (ข) สมการข้อจำกัดสำหรับการจำลองท่าทางของมือในสามมิติ

ดังที่ได้กล่าวไว้ในช่วงเกริ่นนำ เราจะสร้างสมการข้อจำกัดจากการปรับแบบจำลองของ [6] เพื่อสร้างสมการข้อจำกัดที่เหมาะสมกับแบบจำลองของมือ ตามหัวข้อดังต่อไปนี้

### 3.2.1 ข้อจำกัดการฉายกระดูก (Bone Projection Constraint)

ในระบบการรับภาพ เราได้เสนอ ข้อจำกัดการฉายภาพโดยตามแบบจำลองของเว่ยและคณะ [6] ที่ซึ่งใช้ "ข้อจำกัดการฉายภาพอย่างอ่อน" ที่ซึ่งพยายามจะประมาณความลึกของวัตถุที่ถูกฉายลงบนระนาบด้วยการปรับอัตราการขยายของภาพ ดังที่ได้แสดงให้เห็นในสมการด้านล่าง

$$\begin{aligned} u &= sX \\ v &= sY \end{aligned} \quad (3.1)$$

เราได้นิยามจุดข้อกระดูกในสามมิติดังสมการ  $p = (X, Y, Z)^T$ ,  $x = (u, v)^T$  เป็นจุดข้อกระดูกในสองมิติหรือในเขตของภาพ และ  $s$  คืออัตราการขยายของภาพ เพื่อที่จะได้ให้สมการเป็นไปตามข้อจำกัดการฉายภาพอย่างอ่อน ณ ตอนนี้อย่างแรกเราจะสังเกตที่ชั้นกระดูกที่  $i$  ในระนาบของภาพซึ่งชั้นกระดูกนี้ สามารถนิยามได้ตามสมการ

$$l_i^2 = \|p_{i1} - p_{i2}\|^2, \quad i = 1, \dots, B \quad (3.2)$$

โดยที่ซึ่ง  $B$  หมายถึงจำนวนกระดูกทั้งหมด  $l_i$  คือความยาวของชั้นกระดูกแต่ละชั้น  $p_{i1}$  และ  $p_{i2}$  คือจุดในสามมิติที่เป็นจุดเริ่มต้นของชั้นกระดูกและจุดปลายของชั้นกระดูก ตามลำดับ ซึ่งจากสองสมการ สมการ 3.1 และสมการ 3.2 เราสามารถสร้างความลึกสัมพันธ์และความยาวกระดูกได้จากจุดสองมิติดังสมการ

$$dz_i^2 = l_i^2 - \frac{|x_{i1} - x_{i2}|^2}{s^2}, \quad i = 1, \dots, B \quad (3.3)$$

$dz_i$  คือความลึกสัมผัสของจุดข้อกระดูกที่  $i$   $x_{i1}$  และ  $x_{i2}$  คือจุดในภาพที่แสดงถึงจุดข้อกระดูกที่  $i$  โดยเป็นจุดเริ่มต้นและจุดปลายของชิ้นกระดูก ตามลำดับ

โดยในสมการที่ 3.3 นั้นจะหมายถึง เราสามารถหาระยะความลึกสัมผัสได้จากผลต่างของความยาวกระดูก (พิกัดในสามมิติ) และพิกัดในสองมิติที่ผ่านการปรับค่าแล้ว

### 3.2.2 ข้อจำกัดความเท่ากันของกระดูก (Bone Symmetry Constraint)

ข้อจำกัดความเท่ากันของกระดูกที่เว่ยและคณะ [6] ได้นำเสนอเอาไว้ นั่นคือมนุษย์นั้นมีลักษณะสมมาตรซ้ายและขวา ดังนั้น ขนาดกระดูกของด้านซ้ายและขวาควรจะมีขนาดเท่ากัน จึงได้สร้างข้อจำกัดนี้ขึ้น

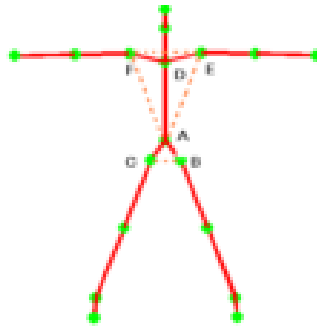
ในลักษณะเดียวกัน จากการศึกษาทางด้านกระดูกนิ้วมือของมนุษย์เราพบว่า ขนาดของชิ้นกระดูกในนิ้วมือนั้นมีความใกล้เคียงกันมากอันได้แก่ กระดูกชิ้น distal phalanges intermediate phalanges และ proximal phalanges ของนิ้วชี้ และนิ้วนาง เนื่องจากขนาดของชิ้นกระดูกดังกล่าวมีความใกล้เคียงกันมาก ดังนั้นเราจะนิยามด้วยสมการ

$$l_{i1}^2 = l_{i2}^2 \quad (3.4)$$

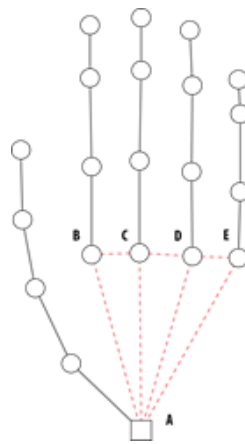
ที่ซึ่ง  $i_1$  และ  $i_2$  นั้นได้แสดงถึงชิ้นกระดูกที่มีขนาดเท่ากัน ซึ่งเมื่อเราทำเช่นนี้แล้วเราจะสามารถจำกัดให้ความยาวกระดูกในชิ้นที่เรากำหนดให้มีขนาดเท่ากันได้ ในลักษณะเดียวกันกับนิยามความเท่ากันของกระดูกมนุษย์

### 3.2.3 ข้อจำกัดของวัตถุแข็งเกร็ง (Rigid Body Constraint)

ข้อจำกัดวัตถุแข็งเกร็งนี้ เว่ยและคณะ [6] ได้นำเสนอเอาไว้ เพื่อให้เป็นการอนุรักษ์ลักษณะระยะห่างของกระดูกที่อยู่ภายในอวัยวะชิ้นเดียวกัน ซึ่งได้นำเสนอไว้ในสองส่วนคือจะรักษาระยะห่างระหว่างไหล่ทั้งสองข้างและระยะระหว่างกระดูกกันกบ โดยการสร้างลักษณะที่เป็นสามเหลี่ยมขึ้น



ภาพที่ 3-1 ภาพแสดงลักษณะข้อจำกัดวัตถุแข็งเกร็งของเว่ยและคณะ [6] (ภาพจาก [6])



ภาพที่ 3-2 แบบจำลองมือของงานนี้ที่แสดงให้เห็นถึง  $\Delta ABC$ ,  $\Delta ACD$  และ  $\Delta ADE$  ที่ใช้ในการสร้างข้อจำกัดวัตถุแข็งเกร็ง

โดยที่ข้อจำกัดวัตถุแข็งเกร็งนั้นสนใจที่ชิ้นกระดูกที่อยู่ภายในวัตถุแข็งเกร็งชิ้นเดียวกันซึ่งในงานนี้คือฝ่ามือ ในกรณีของเรานั้นเราสามารถใช้กระดูกชิ้น metacarpals เพื่อที่จะสร้างข้อจำกัดนี้ ซึ่งเราได้สร้าง  $\Delta ABC$ ,  $\Delta ACD$  และ  $\Delta ADE$  เพื่อที่จะคงสภาพระยะห่างระหว่างชิ้นกระดูกที่จุด B, C, D และ E เอาไว้ จากนิยามข้างต้นเราสามารถสร้างสมการเพื่ออธิบาย ลักษณะดังกล่าวได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
d_{B,C} &= d_{A,B} - d_{B,C} \\
d_{C,D} &= d_{A,C} - d_{A,D} \\
d_{D,E} &= d_{A,D} - d_{A,E}
\end{aligned}
\tag{3.5}$$

ที่ซึ่ง  $dz_{B,C}$ ,  $dz_{C,D}$  และ  $dz_{D,E}$  คือความลึกสัมพันธ์ของจุด C เทียบจุด B, จุด C เทียบจุด D และจุด D เทียบจุด E ซึ่งเมื่อเรารวมสมการ 3.3 และ 3.5 เข้าด้วยกัน จะสามารถเขียนใหม่ได้ว่า

$$l_{B,C}^2 - \frac{\|x_B - x_C\|^2}{s^2} = (dz_{A,B} - dz_{A,C})^2 \tag{3.6}$$

โดยจากสมการ  $l_{B,C}$  คือระยะของกระดูกตามเส้นตรง  $BC$  เมื่อนำมาเขียนในรูปของตัวแปร  $dz^2$  ซึ่งเมื่อกระจายพจน์ออกจะได้ตามสมการด้านล่าง

$$\left( l_{B,C}^2 - \frac{\|x_B - x_C\|^2}{s^2} - dz_{A,B}^2 - dz_{A,C}^2 \right)^2 = 4dz_{A,B}^2 dz_{A,C}^2 \tag{3.7}$$

ซึ่งจากสมการดังกล่าวเราได้เพิ่มตัวแปรใหม่ให้กับระบบนั้นคือความยาวกระดูกพิเศษ

$l_{B,C}$ ,  $l_{C,D}$  และ  $l_{D,E}$

โดยจากสมการที่ 3.7 จะเป็นการสร้างความสัมพันธ์ให้กับจุดข้อกระดูกที่อยู่ภายใต้วัตถุแข็งเกร็งขึ้นเดียวกันเพื่อที่จะคงสภาพระยะห่างระหว่างขึ้นกระดูกที่จุด B, C, D และ E เอาไว้ โดยสมการของข้อกระดูกพิเศษนี้จะถูกเขียนในรูปของตัวแปรความลึกของจุดข้อกระดูกที่อยู่ภายใต้วัตถุแข็งเกร็งขึ้นเดียวกัน และเพื่อลดความกำกวมของสัญลักษณ์บวกลบ จากการจัดรูปสมการที่ 3.6 จึงทำการกำลังสองอีกครั้งเพื่อลดความกำกวมนั้น

### 3.3 การประมาณขนาดขึ้นกระดูกและพารามิเตอร์ของกล้อง

จากสมการข้อจำกัดที่เราได้มาข้างต้น เราคาดว่าเรามีสมการข้อจำกัดที่เพียงพอต่อการที่จะลดความกำกวมของข้อจำกัดการฉายอย่างอ่อนแล้ว ในส่วนที่จะกล่าวถึงต่อไปนั้นเป็นส่วนของการที่จะประมาณค่าขนาดของขึ้นกระดูกและพารามิเตอร์ของกล้องในเวลาเดียวกัน ซึ่งจากวิธีของเว่ยและคณะ [6] เราได้จัดการปัญหานี้ด้วยการสร้างกรอบงานการหาค่าเหมาะสมที่สุด

แต่ถึงกระนั้น เมื่อเราสามารถหาค่าความยาวของกระดูกและพารามิเตอร์ของกล้องได้ เราจะพบว่าความลึกสัมพันธ์  $dz_i$  นั้นยังคงมีรากของคำตอบที่เป็นไปได้อยู่สองคำตอบ ดังที่แสดงให้เห็นดังสมการด้านล่าง

$$dz_i = \pm \sqrt{l_i^2 - \frac{\|x_{i1} - x_{i2}\|^2}{s^2}} \quad (3.8)$$

ซึ่งปัญหานี้สามารถสร้างความกำกวมให้กับคำตอบที่เราได้เนื่องจากเครื่องหมายที่เราไม่ทราบค่า เพื่อที่จะเอาชนะปัญหานี้ เราหลีกเลี่ยงที่จะสร้างฟังก์ชันจุดประสงค์เป็นรากที่สองของตัวแปรที่เราต้องการทราบค่า ดังนั้นเราจึงสร้างฟังก์ชันจุดประสงค์ในรูปของกำลังสองของตัวแปรทั้งหมด ซึ่งเราสามารถกำหนดให้ตัวแปรของเราเป็นเวกเตอร์  $\mathbf{x} = \{l^2, \mathbf{dz}^2, \bar{s}^2, \mathbf{e}^2\}$  ที่ซึ่ง  $\bar{s}^2 = \left(\frac{1}{s_1^2}, \dots, \frac{1}{s_k^2}\right)^T$  ซึ่งฟังก์ชันจุดประสงค์ได้รวมเอาสมการ 3.3, 3.4 และสมการ 3.7 เอาไว้ด้วยกัน และสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\operatorname{argmin}_{\mathbf{x}} E_p(l^2, \bar{s}^2, \mathbf{dz}^2) + \lambda_1 E_s(l^2) + \lambda_2 E_r(\mathbf{e}^2, \bar{s}^2, \mathbf{dz}^2) \quad (3.9)$$

ที่ซึ่งสมการจุดประสงค์นี้พยายามที่จะหาค่าเหมาะสมที่มีขนาดเล็กที่สุดที่ทำให้สมการที่นิยามมาข้างต้นเป็นจริง โดยที่ต้องหาค่าที่เล็กที่สุดนั้นก็เพราะว่า เราจัดรูปสมการให้เป็น  $f(\mathbf{x}) = 0$  ซึ่งก็สมเหตุสมผลในกรณีหาค่าเหมาะสมที่เล็กที่สุด และถ้าเป็นการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีขนาดมากที่สุดนั้นจะทำให้สามารถมีขนาดที่ใหญ่ไม่สิ้นสุดได้

จากฟังก์ชันจุดประสงค์ข้างต้น เราได้คำนวณหาคำตอบด้วยกรอบงานการหาค่าเหมาะสมที่สุด เราได้ใช้วิธีการที่เรียกว่า Trust-reflective methods ที่ซึ่งรองรับการคำนวณที่มีกรอบค่าบนสุดและกรอบค่าล่างสุด เพื่อที่จะจำกัดคำตอบของระบบ โดยเราทำการตั้งค่าให้ระบบคำนวณในขอบเขตที่เป็นบวก เพราะเนื่องจากความลึกสัมพันธ์ ค่าความยาวของกระดูก และค่าความยาวของกระดูกเสริม นั้นเป็นค่ากำลังสองซึ่งควรจะอยู่ในขอบเขตที่เป็นบวก และการคำนวณในส่วนนี้เราได้ตั้งค่าเริ่มต้นดังนี้  $l_i^2, \bar{s}_k^2, dz_{k,i}^2, e_i^2$  เป็น 10, 0.1, 0, 10 ตามลำดับ

### 3.4 การสร้างท่าทางข้อกระดูกขึ้นใหม่ในสามมิติ (Reconstruction of 3D joint-angle poses)

ในหัวข้อนี้เราจะอธิบายวิธีการสร้างท่าทางมือในสามมิติจากคำตอบที่เราได้จากกระบวนการก่อนหน้า นั่นคือ ค่าขนาดของขั้วกระดูก  $l$  ค่าความยาวกระดูกพิเศษ  $e$  ค่าพารามิเตอร์กลิ้ง  $s$  และกำลังสองของความลึกสัมพันธ์  $dz^2$  ซึ่งการทำงานหลักๆ นั้นจะได้มาโดยใช้วิธีการของเว่ยและคณะ [6]

จากเนื้อหาในส่วนก่อนหน้านี้นี้ เราได้อธิบายไปแล้วว่า  $dz^2$  นั้นสามารถมีรากได้สองค่าและเราไม่สามารถทราบค่าที่แท้จริงได้ เพื่อที่เราจะลดความกำกวมตรงนี้ลง เราใช้ขอบเขตจำกัดของมุมในข้อกระดูกแต่ละข้อจากงานของหลินและคณะ [16] เพื่อช่วยในการแก้ปัญหา

#### 3.4.1 พจน์การฉายกระดูก (Bone Projection Term)

พจน์นี้จะคำนวณระยะห่างระหว่างคำตอบที่ได้จากกรอบงานหาค่าเหมาะสมที่สุด และจุดเดียวกันนั้นจากที่รับเข้ามาจากผู้ใช้งาน

$$E'_p = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^B (s_k f_i^x(\mathbf{q}_k; \mathbf{l}) - u_{k,i})^2 + (s_k f_i^y(\mathbf{q}_k; \mathbf{l}) - v_{k,i})^2 \quad (3.9)$$

ที่ซึ่งฟังก์ชัน  $f_i^x$  และ  $f_i^y$  คือฟังก์ชันการจับคู่ระหว่างจุด  $x$  และ  $y$  ของข้อกระดูกที่  $i$  และ  $u_{k,i}$  กับ  $v_{k,i}$  คือจุดของข้อกระดูกในสองมิติของข้อกระดูกที่  $i$  ของภาพที่  $k$

โดยสมการนี้มีจุดประสงค์ที่จะลดขนาดความแตกต่างระหว่างค่าของคำตอบของจุดข้อกระดูกที่เป็นคำตอบจากกรอบงานการหาค่าเหมาะสมที่สุด กับค่าของจุดกระดูกเดียวกันนั้นที่รับเข้ามาจากผู้ใช้งาน เนื่องจากความแตกต่างของคำตอบที่ได้กับค่าที่รับเข้ามาจากผู้ใช้นั้นควรจะมีค่าต่ำสุด

### 3.4.2 พจน์วัตถุแข็งเกร็ง (Rigid Body Term)

พจน์นี้มีไว้เพื่อให้แน่ใจว่ากระดูกเสริม  $\mathbf{e}$  นั้นเป็นค่าคงที่ตลอดทุกภาพ สมการนี้จะนำไปในทิศทางเดียวกับสมการที่ 3.9 โดยพยายามจะไม่ให้ขนาดของกระดูกเสริมนั้นเปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากอาจจะทำให้จุดกระดูกที่ควรจะต้องอยู่บนวัตถุแข็งเกร็งเดียวกัน หลุดออกจากกัน และทำให้เกิดความกำกวมในลักษณะของการเกิดท่าทางที่เป็นไปไม่ได้เกิดขึ้น

$$E_r' = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^B (\|\mathbf{f}_{i1}(\mathbf{q}_k; \mathbf{I}) - \mathbf{f}_{i2}(\mathbf{q}_k; \mathbf{I})\| - e_i)^2 \quad (3.10)$$

ที่ซึ่ง  $\mathbf{f}_{i1}$  และ  $\mathbf{f}_{i2}$  นั้นแทนจุดของข้อกระดูกเสริมในสามมิติของ กระดูกเสริมชิ้นที่  $i$

เราเริ่มต้นการทำงานของระบบด้วยค่าที่ได้มาจากกระบวนการก่อนหน้า ซึ่งค่าของความลึกสัมพันธ์นั้นตั้งค่าเริ่มต้นด้วยรากที่สองของความลึกสัมพันธ์กำลังสองซึ่งสุ่มค่าเครื่องหมายให้ และ ค่ามุมของข้อกระดูกแต่ละชิ้น  $\mathbf{q}_k$  นั้นได้มาจากการคำนวณ inverse kinematics ของข้อกระดูกที่ถูกสร้างขึ้นใหม่จากการประมาณขนาดชิ้นกระดูกและพารามิเตอร์ของกล้อง

### 3.5 จำนวนภาพที่ต้องการ

เนื่องจากวิธีการนี้เป็นวิธีการที่จะสร้างระบบสมการมาเพื่อหาคำตอบของตัวแปรแต่ละตัว ดังนั้นเราจำเป็นต้องมีข้อมูลจำนวนหนึ่งเพื่อใช้ในการสร้างระบบสมการ โดยจำนวนสมการนั้นจะต้องมากกว่าจำนวนตัวแปร ซึ่งเราจำเป็นจะต้องใช้ภาพเป็นจำนวนดังต่อไปนี้

$$\text{จำนวนตัวแปรทั้งหมด} = KB + K + B + 3$$

$$\text{จำนวนสมการ} = KB + 3K + 4$$

ซึ่งสามารถพิสูจน์ได้ดังนี้

จำนวนสมการ		จำนวนตัวแปรทั้งหมด
$KB + 3K + 4$	$\geq$	$KB + K + B + 3$
$2K + 2$	$\geq$	$B$
$K$	$\geq$	$10$

ที่ซึ่ง

$$K = \text{จำนวนตัวแปรภาพ}$$

$$B = \text{จำนวนตัวแปรกระดูก}$$

ดังนั้นเราต้องการภาพเป็นจำนวนประมาณ 10 ภาพ เพื่อที่จะใช้ในการทดลองแก้ไขระบบสมการนี้

### 3.6 สรุป

จากที่ได้กล่าวมาทั้งหมดในบทนี้นั้น เราแสดงให้เห็นถึงวิธีการของเว่ยและคณะ [6] ที่เรานำแบบจำลองมาปรับใช้กับท่าทางของมือโดยได้ทำการปรับเปลี่ยนสมการข้อจำกัดสองแบบ คือข้อจำกัดความเท่ากันของกระดูก (symmetry constraint) และข้อจำกัดวัตถุแข็งเกร็ง (rigid body constraint) ให้มีความเหมาะสมกับท่าทางของมือ โดยเมื่อเราจะใช้วิธีนี้ในการสร้างระบบสมการเพื่อหาคำตอบนั้น เราควรใช้ภาพราว 10 ภาพในการทำงาน โดยเพื่อลดความกำกวมของคำตอบ



## บทที่ 4

### ผลการทดลองและการอภิปราย

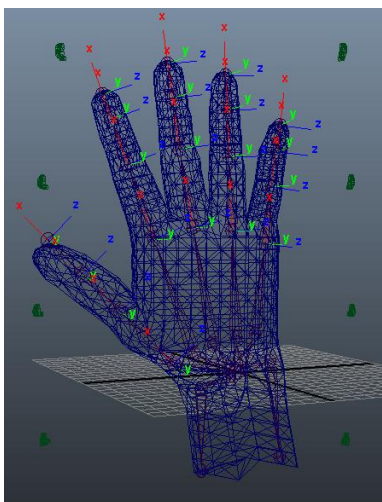
งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ในการทดสอบการประมาณค่าความลึก ความยาวกระดูกและ พารามิเตอร์ของกล้องโดยการหาคำตอบจากกระบวนการหาค่าเหมาะสมที่สุด จากฟังก์ชันจุดประสงค์ ที่สร้างมาจากสมการข้อจำกัดที่นำเสนอ โดยการทดสอบจะเน้นไปที่ความแม่นยำในการสร้าง แบบจำลองสามมิติของมือ โดยจะทดสอบกับข้อมูลสองประเภท คือข้อมูลสังเคราะห์ และข้อมูลจาก ภาพถ่าย

โดยโปรแกรมทดสอบนั้นถูกพัฒนาด้วยโปรแกรมแมทแล็บ รุ่น R2010a บนหน่วย ประมวลผล อินเทลรุ่น Core i7 860 สัญญาณนาฬิกา 2.80 GHz และหน่วยความจำแบบ DDR3 จำนวน 4 กิกะไบต์

รูปที่ใช้ในงานวิจัยทั้งหมดมีรายละเอียด  $640 \times 480$  พิกเซล โดยข้อมูลสังเคราะห์ได้มาจากการสร้างแบบจำลองมือจำลองในโปรแกรม ออโต้เดสก์ มายา

#### 4.1 การทดลองโดยสังเขป

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของงานวิจัย ในการสร้างแบบจำลอง ของมือโดยการใช้วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุด โดยทำการทดสอบแบบจำลองของมือในโปรแกรม ออโต้เดสก์ มายา ดังมีตัวอย่างดังภาพ



ภาพที่ 4-1 ภาพแบบจำลองของมือในโปรแกรม ออโต้เดสก์ มายา ที่ใช้ในการทดลอง

งานนี้ได้ทำการทดลองเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของงานวิจัย ในการสร้างแบบจำลองของมือ โดยใช้สมการข้อจำกัดในการประมาณความยาวกระดูก และหาค่ามุมภายในข้อกระดูกเพื่อนำไปใช้ในการสร้างท่าทางหลัก โดยทำการทดสอบบนข้อมูลสังเคราะห์ โดยทำการทดสอบ 3 แบบอันได้แก่

1. การทดสอบเปรียบเทียบความยาวกระดูกเมื่อเปลี่ยนแปลงจำนวนภาพที่ใช้ในการทดลอง มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบว่าจำนวนภาพที่ใช้ในการทดลองจะตรงตามทีคำนวณไว้หรือไม่โดยทำการทดสอบบนความยาวกระดูกด้วยค่าความผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์
2. การทดสอบความแม่นยำของการประมาณค่าความยาวกระดูกด้วยความยาวกระดูกที่คำนวณได้เปรียบเทียบกับค่าความยาวกระดูกจริงที่ได้จากแบบจำลอง
3. การทดสอบความแม่นยำของท่าทางของมือที่ได้จากการทดลอง โดยเปรียบเทียบกันระหว่างแบบจำลองที่ใช้ในการทดลองและแบบจำลองที่สร้างได้

#### 4.2 การทดสอบเมื่อเปลี่ยนแปลงจำนวนภาพในการทดลอง

การทดสอบเชิงปริมาณบนข้อมูลสังเคราะห์ เป็นการทดสอบถึงประสิทธิภาพของวิธีการนี้ในการสร้างแบบจำลอง ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ใช้การสร้างสมการข้อจำกัดมาเพื่อหาคำตอบว่าแบบจำลองจาก

ภาพที่ได้นั้นควรมีลักษณะอย่างไร ในการสร้างท่าทางของมือในสามมิติ และค่าความยาวกระดูกจะทำการวัดด้วยมาตรวัดค่าความผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ (Mean Absolute Error: MAE).

#### 4.2.1 วิธีการทดสอบบนข้อมูลสังเคราะห์

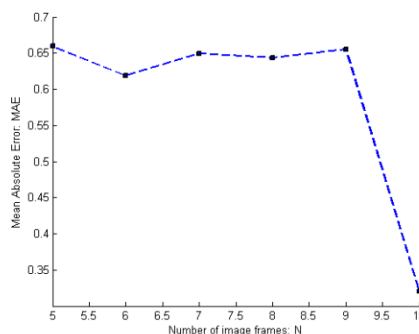
การทดสอบความแม่นยำจะทำการเปรียบเทียบข้อมูลสังเคราะห์กับผลคำนวณที่ได้จากระบบและทำการเปรียบเทียบท่าทางของแบบจำลองด้วยมาตรวัดค่าความผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ซึ่งเปรียบเทียบบนความยาวกระดูก ซึ่งมีสูตรการคำนวณดังสมการ

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n \left| \frac{A_t - F_t}{A_t} \right| \quad (4.1)$$

ที่ซึ่ง  $n$  คือจำนวนข้อมูลทั้งหมด  $A_t$  คือข้อมูลจริง  $F_t$  คือที่ทำการทดลองได้ โดยตัวชี้วัดนี้จะบอกความแปรปรวนระหว่างข้อมูลที่ทำกรทดลองได้กับข้อมูลจริง

#### 4.2.2 ผลการทดสอบ

ข้อมูลทดสอบในขั้นตอนนี้จะใช้รูปภาพที่ได้จากการสร้างแบบจำลองของมือขึ้นมาในโปรแกรม ออโต้เดสก์ มายา ขึ้นมา 10 ภาพ (ภาพชุดทดลองที่ 1) และทำการปรับค่ามุมของข้อกระดูกต่างๆ กัน เพื่อใช้ในการทดลอง



ภาพที่ 4-2 แผนภาพแสดงความผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์เทียบกับจำนวนภาพที่ใช้ในการทดลอง

จากการทดลองเราพบว่าค่าความผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ของความยาวกระดูกที่ได้จากการทดลองเทียบกับความยาวกระดูกที่ใช้ทดสอบมีความแตกต่างกันอยู่ประมาณร้อยละ 31 ซึ่ง ถือว่าเป็นค่าที่ไม่ดีนัก แต่ก็ลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อใช้จำนวนภาพตามที่ได้พิสูจน์เอาไว้ในบทที่แล้ว

#### 4.3 การทดสอบความแม่นยำของการประมาณความยาวกระดูก

การทดสอบนี้ใช้เพื่อตรวจสอบว่าความยาวกระดูกที่คำนวณได้นั้น มีลักษณะแตกต่างกับความยาวกระดูกที่วัดได้จากแบบจำลองอย่างไร

##### 4.3.1 ผลการทดสอบ

กระดูก	ความยาวกระดูกที่วัดได้จากแบบจำลอง (หน่วย)	ความยาวกระดูกที่คำนวณได้ (หน่วย)
1	1.9	4.7809
2	2.526	4.5561
3	4.164	4.5635
4	7.3029	6.8452
5	2.373	4.9537
6	3.321	5.5728
7	5.222	6.6467
8	8.1394	9.9700
9	2.315	5.1613
10	3.505	5.5906
11	5.491	7.6765
12	9.0866	11.5148
13	1.695	4.9547
14	3.210	5.5863
15	5.431	6.6156
16	9.6083	9.9235
17	3.383	6.3975
18	3.756	7.0801
19	5.602	6.6587
20	5.216	6.9688

ตาราง 4-1 ตารางแสดงค่าความยาวกระดูกที่วัดได้จากแบบจำลองและที่ได้จากการคำนวณด้วยข้อมูลชุดที่ 1

กระดุก	ความยาวกระดุกที่วัดได้จากแบบจำลอง (หน่วย)	ความยาวกระดุกที่คำนวณได้ (หน่วย)
1	1.9	4.5542
2	2.526	4.5269
3	4.164	4.5283
4	7.3029	6.7925
5	2.373	4.5490
6	3.321	4.6546
7	5.222	5.8281
8	8.1394	8.7421
9	2.315	4.6236
10	3.505	4.9263
11	5.491	5.8785
12	9.0866	8.8178
13	1.695	4.5490
14	3.210	4.6546
15	5.431	5.8281
16	9.6083	8.7421
17	3.383	5.0211
18	3.756	5.9091
19	5.602	5.8161
20	5.216	6.2683

ตาราง 4-2 ตารางแสดงค่าความยาวกระดุกที่วัดได้จากแบบจำลองและที่ได้จากการคำนวณด้วยข้อมูลชุดที่ 2

กระดุก	ความยาวกระดุกที่วัดได้จากแบบจำลอง (หน่วย)	ความยาวกระดุกที่คำนวณได้ (หน่วย)
1	1.9	4.4724
2	2.526	4.4736
3	4.164	4.5608
4	7.3029	6.8412
5	2.373	4.4799
6	3.321	4.8978

7	5.222	7.4118
8	8.1394	11.1177
9	2.315	4.4736
10	3.505	5.1767
11	5.491	7.4119
12	9.0866	11.1178
13	1.695	4.4799
14	3.210	4.8978
15	5.431	7.4118
16	9.6083	11.1177
17	3.383	6.3241
18	3.756	6.0521
19	5.602	6.1993
20	5.216	8.5015

ตาราง 4-3 ตารางแสดงค่าความยาวกระดูกที่วัดได้จากแบบจำลองและที่ได้จากการคำนวณด้วยข้อมูลชุดที่ 3

ตาราง 4-1 ตาราง 4-2 และ ตาราง 4-3 นั้นแสดงให้เห็นถึงความยาวกระดูกที่ใกล้เคียงกับความ  
ความเป็นจริง แต่จะมีข้อกระดูกบางชิ้นที่มีความเปรียบต่างค่อนข้างสูง เนื่องจากเป็นชิ้นกระดูกขนาด  
เล็กคือข้อกระดูกชิ้น distal phalange และชิ้น middle phalange หรือจากในตารางคือข้อกระดูก  
ชิ้นที่ 1,2,5,6,9,10,13,14,17 และ 18 ซึ่งมีขนาดใกล้เคียงกันมากในภาพสองมิติ จึงทำให้การวัดความ  
ยาวกระดูกผิดพลาดไปค่อนข้างมาก







#### 4.4 การทดสอบความแม่นยำของท่าทางมือที่ได้จากการทดลอง

การทดสอบนี้เป็นการตรวจสอบความแม่นยำของผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลอง โดยแสดงให้เห็น  
เห็นเป็นแบบจำลอง และความผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ของมุมในข้อกระดูก

ภาพที่ใช้ในการทดลอง	ภาพที่ได้จากการทดลอง	ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย สัมบูรณ์ของมุมในข้อ กระดูก
		0.5652
		0.6424
		0.7374



		0.4769
		0.6347
		0.7186
		0.6537







		0.6858
		0.5328
		0.6194

ตาราง 4-4 ตารางแสดงภาพแบบจำลองที่คำนวณได้เปรียบเทียบกับแบบจำลองที่สร้างขึ้นและค่าความผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ของมุมที่คำนวณได้ จากชุดการทดลองที่ 1



ภาพที่ใช้ในการทดลอง	ภาพที่ได้จากการทดลอง	ค่าความผิดพลาดเฉลี่ย สมบูรณ์ในข้อกระดูก
		0.6688
		0.6730
		0.6712
		0.6424





		0.6562
		0.6406
		0.6551
		0.6124

		0.6582
		0.6480

ตาราง 4-5 ตารางแสดงภาพแบบจำลองที่คำนวณได้เปรียบเทียบกับแบบจำลองที่สร้างขึ้นและค่าความผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ของมุมที่คำนวณได้ จากชุดการทดลองที่ 2

ภาพที่ใช้ในการทดลอง	ภาพที่ได้จากการทดลอง	ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ ในข้อกระดูก
		0.6377
		0.5428
		0.6343
		0.6020

		0.5933
		0.6058
		0.6636
		0.5327

		0.6896
		0.6018

ตาราง 4-6 ตารางแสดงภาพแบบจำลองที่คำนวณได้เปรียบเทียบกับแบบจำลองที่สร้างขึ้นและค่าความผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ของมุมที่คำนวณได้ จากชุดการทดลองที่ 3

#### 4.5 การอภิปรายผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธีด้วยการทดลองกับชุดข้อมูลสังเคราะห์ และหาค่าความแปรปรวนต่างโดยใช้มาตรวัดคือค่าความผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์

โดยในส่วนแรกนั้นทำการทดลองเปรียบเทียบกับจำนวนภาพที่เปลี่ยนไป ว่าผลการประมาณความยาวกระดูกจะเป็นไปตามที่คาดหวังไว้หรือไม่ คือใช้ภาพประมาณ 10 ภาพในการทดลอง จะทำให้สามารถหาค่าความยาวกระดูกได้ใกล้เคียงความเป็นจริง ซึ่งเราก็พบว่า ค่าที่ได้นั้นเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความยาวกระดูกและค่าความผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ของความยาวกระดูกนั้น ค่าความผิดพลาดที่ได้มีลักษณะลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งลดลงเหลือราวร้อยละ 31 นั่นทำให้การหาค่าตอบเป็นไปในทิศทางที่ดี ดังที่แสดงให้เห็นในตาราง 4-1 ตารางแสดงค่าความยาวกระดูกที่วัดได้จากแบบจำลองและที่ได้จากการคำนวณด้วยข้อมูลชุดที่ 1 ตาราง 4-2 ตารางแสดงค่าความยาวกระดูกที่วัดได้จาก

แบบจำลองและที่ได้จากการคำนวณด้วยข้อมูลชุดที่ 2 และตาราง 4-3 ตารางแสดงค่าความยาวกระดูกที่วัดได้จากแบบจำลองและที่ได้จากการคำนวณด้วยข้อมูลชุดที่ 3 นั้นจะเป็นการทดสอบสมมติฐานว่าเมื่อเรามีจำนวนสมการที่มากพอ ระบบจะทำการหาคำตอบได้ ซึ่งเป็นไปตามการทดลองของเวย์และคณะ [6] ที่ทำการทดลองนี้กับกระดูกมนุษย์ แต่เนื่องด้วยความเปรี๊ยะต่างของท่าทางและข้อมูลที่มีมากกว่าในโครงสร้างกระดูกมนุษย์ทำให้ผลการทดลองออกมาดีกว่า ในตาราง 4-1 ตาราง 4-2 และตาราง 4-3 นั้นแสดงถึงค่าความเปรี๊ยะต่างของกระดูกที่ทำการทดลองได้และค่าความยาวกระดูกที่ได้วัดมาจากแบบจำลองสำหรับใช้ในการทดลอง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความยาวกระดูกที่เราทำการทดลองได้นั้น เป็นไปในทิศทางเดียวกับค่าความยาวกระดูกที่ทำการวัดออกมาจากแบบจำลอง ซึ่งจากสามตารางดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าวิธีการนี้เป็นไปตามสมมติฐานแต่ก็ยังคงได้คำตอบที่ไม่ดีนัก อันเนื่องมาจากเมื่อเราทำการกำหนดจุดที่คาดว่าเปรี๊ยะเป็นจุดของข้อกระดูกนั้น ลักษณะระยะจากจุดข้อกระดูกสองจุดที่เป็นกระดูกชิ้นเล็ก คือข้อกระดูกชุด distal phalange และ middle phalange หรือในตารางคือข้อกระดูกชิ้นที่ 1, 2, 5, 6, 9, 10, 13, 14, 17 และ 18 เมื่อเปรี๊ยะเทียบกันในภาพสองมิตินั้น จะมีความใกล้เคียงกันมาก ทำให้ค่าที่คำนวณได้จากวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดนั้น มีความคลาดเคลื่อนค่อนข้างมาก แต่อย่างไรก็ตามในกระดูกที่เหลือค่าที่คำนวณได้ถือว่าคำนวณออกมาได้ใกล้เคียง

ส่วนต่อมานั้นเป็นส่วนต่อเนื่องจากส่วนแรก ซึ่งจะนำค่าที่ได้จากส่วนแรกมาคำนวณหาค่ามุมที่เกิดขึ้นในกระดูก โดยค่าที่คำนวณได้นั้นได้ทำการสร้างออกมาเป็นแบบจำลองที่ได้แสดงไว้ในตาราง 4-4 ตาราง 4-5 และตาราง 4-6 โดยในตารางแรกนั้นคือชุดภาพที่ใช้ในการทดลองชุดที่หนึ่ง ซึ่งจะเป็นลักษณะที่ใช้ภาพในการทดลองโดยปรับรูปมือต่างๆ กันอย่างไม่มีรูปแบบ ผลการทดลองที่ได้นั้น ภาพที่มีลักษณะแบมืออย่างเช่น ภาพที่ 1, 2, 7 และ 10 ในตาราง 4-4 นั้น จะมีลักษณะที่งอนิ้วมือในข้อที่สองและสามในนิ้วมือแต่ละนิ้วลง เป็นผลมาจากการที่ค่าความยาวกระดูกที่มากกว่าความยาวกระดูก



จริง ทำให้ผลที่ได้นั้นเมื่อทำการปรับให้ปลายข้อกระดูกที่คำนวณได้นั้นมีค่าลูเข้าหาจุดข้อกระดูกที่ได้ทำการกำหนดให้ไว้แต่แรกนั้น จะต้องปรับมุมในกระดูกให้งอลงมากกว่าความเป็นจริง ซึ่งก็เกิดในลักษณะเดียวกันนี้ในตาราง 4-5 ซึ่งทำการทดลองบนชุดข้อมูลที่มีความแปรียบต่างน้อย และมีลักษณะแบบมือเข้าหากล้อง

มีภาพบางส่วนที่ทำออกมาได้ใกล้เคียงกับคำตอบนั้นอย่างเช่นภาพที่ 3, 5 และ 9 จากตาราง 4-4 และภาพที่ 1, 6 และ 10 จากตาราง 4-6 ภาพที่ได้มีลักษณะใกล้เคียงกับคำตอบ เป็นผลมาจากภาพในชุดทดลองดังกล่าวนั้นมีลักษณะขี้นิ้วเข้าหากล้อง ซึ่งเมื่อทำการปรับปลายข้อกระดูกที่คำนวณได้แล้วนั้น จะมีลักษณะที่งอเข้าเช่นเดียวกัน

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

งานวิจัยชิ้นนี้ได้นำเสนอวิธีการสร้างแบบจำลองของมือด้วยวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดของแบบจำลองโดยการปรับแบบจำลองของเว่ยและคณะ [6] ให้มีความเหมาะสมกับมือโดยการศึกษาเกี่ยวกับลักษณะโครงสร้างกระดูกของมือ และสร้างสมการข้อจำกัดเพื่อใช้หาคำตอบ โดยตั้งอยู่บนสมมติฐานที่ว่า ถ้าเรามีจำนวนสมการที่มากพอ เราจะสามารถหาคำตอบที่ใกล้เคียงได้ โดยเริ่มต้นที่การสร้างสมการข้อจำกัดเพื่อหาคำตอบของรูปร่างมือในค่าต่างๆ ของแบบจำลองอย่างเช่น ความยาวกระดูก พารามิเตอร์กล้อง และความลึกของจุดข้อกระดูก และได้นำข้อมูลที่ได้นี้มาสร้างสมการข้อจำกัดอีกครั้งเพื่อหาคำตอบว่า มือนั้นกำลังอยู่ในท่าทางใด โดยได้ทำการทดลองเปรียบเทียบค่าที่ได้กับแบบจำลองที่สร้างขึ้น โดยมีข้อจำกัดอยู่ที่ภาพที่ใช้ในการทดลองนั้นจะต้องเห็นภาพจุดของข้อกระดูกครบทุกจุด

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการทดลองจะพบว่า ความยาวกระดูกที่ได้นั้นมีความยาวเกินจริงอยู่ เนื่องจากกระดูกชิ้นเล็กๆ อย่างเช่น distal phalange และ middle phalange นั้นจะมีความยาวคล้ายกันมากเมื่อนิยามเป็นจุดในสองมิติ ทำให้ระบบสมการเมื่อแก้ออกมาแล้วมีความผิดพลาดไปค่อนข้างมาก แต่ในส่วน of ข้อกระดูกอื่นที่มีความชัดเจนอย่างเช่น proximal phalange และข้อกระดูกชุด metacarpals

นั้นจะทำการประมาณค่าออกมาได้ดีกว่า เนื่องจากมีความชัดเจนมากกว่า การทดลองหาค่าความแม่นยำในการสร้างแบบจำลองของมือจากวิธีการนี้นั้นได้ทำการวัดความถูกต้องด้วย การหาค่าความผิดพลาดเฉลี่ยสัมบูรณ์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าโดยเฉลี่ยแล้วจะยังมีความผิดพลาดอยู่ค่อนข้างมาก ซึ่งเฉลี่ยอยู่ที่ราวร้อยละ 60 ถึงอย่างไรก็ตามที่ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยออกมาเป็นแบบนี้ก็ไม่ถือว่าแม่นยำ

นัก เนื่องจากค่าที่ได้จากการวางจุดเครื่องหมายของจุดข้อกระดูกนั้นมีความเปรียบต่างกันในภาพแต่ละแบบค่อนข้างน้อย อย่างเช่นภาพที่มีลักษณะแบริเออร์เข้าหากล้องในข้อมูลชุดที่สอง จะมีลักษณะคล้ายกันมากเมื่อถูกนิยามเป็นจุดในสองมิติ ซึ่งเป็นสาเหตุให้ทำการวัดค่าออกมายังมีค่าความผิดพลาดอยู่ แต่เนื่องจากภาพบางภาพมีลักษณะใกล้เคียงอย่างเช่น ภาพที่ทำลักษณะงอนัวเข้าหากล้อง จะมีลักษณะชัดเจนว่ากำลังงอนัวอยู่เมื่อเป็นจุดข้อกระดูกในสองมิติ ดังนั้นจึงทำการประมาณค่าออกมาได้ลักษณะของภาพใกล้เคียงกว่า

ซึ่งวิธีการนี้ ที่สร้างระบบสมการ และใช้ร่วมกับกระบวนการหาค่าเหมาะสมที่สุดเพื่อหาคำตอบของแบบจำลองมือนั้น เป็นไปตามสมมติฐานแต่ยังไม่ถือว่าเป็นวิธีการที่ตึกในการใช้หาคำตอบของโครงสร้างที่มีความซับซ้อนเช่นโครงสร้างมือมนุษย์

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

ในงานวิจัยนี้ยังมีความน่าสนใจในการนำไปพัฒนาปรับปรุงพัฒนาประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธีนี้อยู่ เนื่องจากค่าความแม่นยำที่ได้ยังไม่ถือว่าเป็นแม่นยำนัก โดยในสวนนี้จะนำเสนอแนวทางในการปรับปรุงขั้นตอนวิธีเพิ่มเติม และการนำผลลัพธ์ที่ได้ไปประยุกต์ใช้

ในส่วนของขั้นตอนการสร้างสมการข้อจำกัดมาเพื่อใช้ในการหาคำตอบนั้น อาจจะยังไม่เพียงพอในการที่จะลดความกำกวมของท่าทางมือได้ทั้งหมด เนื่องจากมือเป็นอวัยวะที่มีลักษณะของความกำกวมสูง เมื่อมองในลักษณะของภาพสองมิติแล้วนั้น จะมีลักษณะใกล้เคียงกันมาก ทำให้การคำนวณค่าที่ได้ยังมีความผิดพลาดอยู่ค่อนข้างสูง นั่นคือไม่สามารถหาขนาดความยาวกระดูกของกระดูกชิ้นเล็กๆ ได้อย่างสมบูรณ์ แต่อย่างไรก็ตาม กระดูกชิ้นที่ใหญ่กว่านั้นจะสามารถหาค่าได้ดี ซึ่งถ้าสามารถนิยามความสัมพันธ์กันระหว่างความยาวกระดูกแต่ละชิ้นได้ จะส่งผลให้ลดความกำกวมในส่วนนี้ลงได้

ส่วนหลักๆ ที่สองคือขั้นตอนของกระบวนการสร้างท่าทางของกระดูกชิ้นใหม่ในสามมิติ ซึ่งส่วนนี้อาจเกิดความผิดพลาดได้จากค่าเริ่มต้นในส่วนก่อนหน้าที่มีมาก ทำให้ความผิดพลาดส่วนหลังเกิดขึ้นค่อนข้างมากตามไปด้วย และมุมที่เกิดขึ้นก็ยังคงมีความผิดพลาดอยู่ในระดับหนึ่ง เนื่องจากสมการข้อจำกัดที่ได้สร้างขึ้นนั้น ยังไม่มีส่วนไหนที่มีลักษณะจะสื่อถึงมุมที่เกิดขึ้นในข้อกระดูก จากจุดข้อกระดูกในสองมิติ ซึ่งถ้าสามารถนิยามได้ อาจจะช่วยลดความกำกวมของค่ามุมที่คำนวณได้อีกทางหนึ่ง

ส่วนสุดท้ายที่น่าสนใจของงานนี้คือ สามารถที่จะสร้างแบบจำลองจากภาพสองมิติได้จำนวนเท่ากับภาพที่ใช้ ดังนั้นสำหรับการทำแอนิเมชัน ซึ่งต้องอาศัยคีย์เฟรม หรือการสร้างเฟรมภาพหลักเป็นส่วนสำคัญ งานวิจัยนี้จึงเหมาะสำหรับนำไปประยุกต์ใช้กับ การสร้างแบบจำลองของเฟรมหลักในการสร้างภาพเคลื่อนไหวด้วยคอมพิวเตอร์

ซึ่งแตกต่างจากวิธีการก่อนหน้านั้นจำเป็นต้องใช้วิธีการสร้างฐานข้อมูลลักษณะของมือเอาไว้เพื่อเก็บท่าทางการเคลื่อนไหว และใช้ภาพมาเป็นข้อมูลในการสืบค้น

## รายการอ้างอิง

- [1] Maureen, F., Motion Capture.
- [2] Wang, R. Y. and Popović, J., Real-time hand-tracking with a color glove, ACM Transactions on Graphics 28 (July 2009): 1.
- [3] Wang, R. Y., Real-Time Hand-Tracking as a User Input Device, ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST).
- [4] Stenger, B., Thayananthan, A., Torr, P. H. S., and Cipolla, R., Model-based hand tracking using a hierarchical Bayesian filter., IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence 28 (September 2006): 1372-84.
- [5] Guan, H. and Ho, C.-seng C. Y.-khing, 3D hand pose retrieval from a single 2D image, Proceedings 2001 International Conference on Image Processing (Cat. No.01CH37205) IEEE, pp. 157-160.
- [6] Wei, X. K. and Chai, J., Modeling 3d human poses from uncalibrated monocular images, Computer Vision, 2009 IEEE 12th International Conference on IEEE, p. 1873–1880.
- [7] Taylor, C., Reconstruction of Articulated Objects from Point Correspondences in a Single Uncalibrated Image, Computer Vision and Image Understanding 80 (December 2000): 349-363.
- [8] Erol, A., Bebis, G., Nicolescu, M., Boyle, R. D., and Twombly, X., Vision-based hand pose estimation: A review, Computer Vision and Image Understanding 108 (October 2007): 52-73.

- [9] Park, J. and Yoon, Y.-lip, LED-Glove Based Interactions in Multi-Modal Displays for Teleconferencing, 16th International Conference on Artificial Reality and Telexistence--Workshops (ICAT'06) (November 2006): 395-399.
- [10] Schlattmann, M., Kahlesz, F., Sarlette, R., and Klein, R., Markerless 4 gestures 6 DOF real-time visual tracking of the human hand with automatic initialization, Computer Graphics Forum 26 (September 2007): 467-476.
- [11] Schlattman, M. and Klein, R., Simultaneous 4 gestures 6 DOF real-time two-hand tracking without any markers, Proceedings of the 2007 ACM symposium on Virtual reality software and technology - VRST '07 1 (2007): 39.
- [12] Rosales, R., Athitsos, V., Sigal, L., and Sclaroff, S., 3D hand pose reconstruction using specialized mappings, Proceedings Eighth IEEE International Conference on Computer Vision. ICCV 2001 2000 (2001): 378-385.
- [13] La Gorce, M. de, Paragios, N., and Fleet, D. J., Model-based hand tracking with texture, shading and self-occlusions, 2008 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (June 2008): 1-8.
- [14] Kerdvibulvech, C. and Saito, H., Model-Based Hand Tracking by Chamfer Distance and Adaptive Color Learning Using Particle Filter, EURASIP Journal on Image and Video Processing 2009 (2009): 1-11.
- [15] Wei, X. and Chai, J., VideoMocap: modeling physically realistic human motion from monocular video sequences, ACM Transactions on Graphics (TOG) 29 (2010): 1-10.
- [16] Lin, J., Wu, Y., and Huang, T. S., Modeling the constraints of human hand motion, Human Motion, 2000. Proceedings. Workshop on IEEE, p. 121-126.

ภาคผนวก

รูปแบบจำลองที่ใช้ในการทดลองมีทั้งหมด 30 ภาพ จากการสร้างขึ้นด้วยโปรแกรม ออโต้  
เดสก์ มายา ซึ่งมีรายการดังนี้

ชุดข้อมูลชุดที่ 1



1)



2)



3)



4)





5)



6)



7)



8)



9)



10)

ชุดข้อมูลชุดที่ 2



1)



2)



3)



4)



5)



6)



7)



8)



9)



10)

ชุดข้อมูลชุดที่ 3



1)



2)



3)



4)



5)



6)



7)



8)



9)



10)



### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายธีรภัทร์ สัจจวิโส เกิดเมื่อวันที่ 25 พฤษภาคม พ.ศ. 2530 สำเร็จการศึกษาระดับมัธยม จากโรงเรียนเบญจมราชานุสรณ์ จากนั้นจึงเข้าศึกษาต่อที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขต บางเขน ในปีการศึกษา 2548 และสำเร็จ การศึกษาระดับปริญญาตรีในปีการศึกษา 2551 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตร์ มหาบัณฑิตในปีการศึกษา 2552 ในภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย