การพัฒนาระบบสอบเทียบกล้องสำหรับวิเคราะห์การเดินแบบ 3 มิติ

Development of Camera Calibration System for 3D Gait Analysis

นายกิติศักดิ์ จันทร์สุกปุก

นายเจษฎา ยานันท์

นายชัยภัทร บัวคลี่

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

ปีการศึกษา 2562

ใบรับรองปริญญานิพนธ์

ชื่อหัวข้อโครงงาน การพัฒนาระบบสอบเทียบกล้องสำหรับวิเคราะห์การเดินแบบ 3 มิติ

ผู้ดำเนินโครงงาน นายกิติศักดิ์ จันทร์สุกปุก รหัส 59360471

นายเจษฎา ยานันท์ รหัส 59360839

นายชัยภัทร บัวคลี่ รหัส 59361065

ที่ปรึกษาโครงงาน ดร.สุเมธ เหมะวัฒนะชัย

ที่ปรึกษาร่วม ผศ.ดร.ไชยยงค์ จรเกตุ

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ปีการศึกษา 2562

.....

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร อนุมัติให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล

.....ที่ปรึกษาโครงงาน

(ดร.สุเมธ เหมะวัฒนะชัย)

.....ที่ปรึกษาโครงงานร่วม

(ผศ.ดร.ไชยยงค์ จรเกตุ)

.....กรรมการ

(ดร.ปัญญวัณ ลำเพาพงศ์)

.....กรรมการ

(ผศ.ดร.พรพิศุทธิ์ วรจิรันตน์)

ชื่อหัวข้อโครงงาน การพัฒนาระบบสอบเทียบกล้องสำหรับวิเคราะห์การเดินแบบ 3 มิติ

ผู้ดำเนินโครงงาน นายกิติศักดิ์ จันทร์สุกปุก รหัส 59360471

นายเจษฎา ยานันท์ รหัส 59360839

นายชัยภัทร บัวคลี่ รหัส 59361065

ที่ปรึกษาโครงงาน ดร.สุเมธ เหมะวัฒนะชัย

ที่ปรึกษาร่วม ผศ.ดร.ไชยยงค์ จรเกตุ

สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล

ปีการศึกษา 2562

.....

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบสอบเทียบกล้องสำหรับวิเคราะห์การเดินแบบ 3 มิติ เพื่อวัดองศาการเคลื่อนไหวของข้อสะโพก ข้อเข่า และข้อเท้าขณะเดินบนลู่วิ่งไฟฟ้า โดยทำการทดลองกับอาสาสมัคร จำนวน 3 คน เข้าร่วมการทดสอบในครั้งนี้ อาสาสมัครจะได้รับการติด marker สะท้อนแสงจำนวน 10 ตำแหน่งบริเวณข้อสะโพก ข้อเข่า และข้อเท้า หลังจากนั้นอาสาสมัครทำการเดินบนลู่วิ่งไฟฟ้า โดยใช้ระบบกล้อง AT-Gait ที่ได้ถูกพัฒนาระบบสอบเทียบกล้อง โดยการเปลี่ยนรูปแบบการสอบเทียบกล้องให้มีความแม่นยำและรวดเร็วแล้วทำการบันทึกวิดีโออาสาสมัครขณะเดินบนลู่วิ่งไฟฟ้า และวิเคราะห์องศาการเคลื่อนไหวของข้อสะโพก ข้อเข่า และข้อเท้าในระนาบ sagittal วิเคราะห์ความน่าเชื่อถือในการวัดซ้ำของระบบกล้องฯ ด้วยสถิติค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Intra-class Correlation Coefficient; ICC) ผลของการศึกษาพบว่า การสอบเทียบกล้องแต่ละครั้งใช้เวลาประมาณ 5 นาที การระบุพิกัดใน 3 มิติมีความแม่นยำ (ความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงไม่เกิน 1-2 เซนติเมตรที่ระยะห่างจากกล้อง 225 เซนติเมตร) ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของความน่าเชื่อถือในการวัดซ้ำของระบบกล้อง ขณะเดินบนลู่วิ่งไฟฟ้าในมนุษย์ของข้อสะโพก ข้อเข่า และข้อเท้าในระนาบ sagittal ในภาพรวมอยู่ในระดับที่ดีเยี่ยม (ICC = 0.998, 0.997, 0.985, p-value < 0.001, ตามลำดับ) จึงสรุปได้ว่า ระบบสอบเทียบกล้องสำหรับวิเคราะห์การเดินแบบ 3 มิติที่ถูกจัดทำขึ้น มีความเที่ยงตรงสูงและมีความหน้าเชื่อถือในการวัดซ้ำอยู่ในระดับสูงมาก

Project title Development of camera calibration system for 3D gait analysis

Name Mr. Kitisak Jansukpuk ID. 59360471
Mr. Jessada Yana ID. 59360839
Mr. Chaiyapatr Buaklee ID. 59361065

Project advisor Dr. Sumet Heamawatanachai

ASST. Project advisor Assist.Prof. Dr. Chaiyong Jorrakate

Major Mechanical Engineering

Department Mechanical Engineering

Academic year 2019

.....

Abstract

This study aimed to develop the camera calibration system for 3D gait analysis for measuring the degree of movement of the hip, knee and ankle while walking on treadmill. This experiment tested with 3 volunteers. Volunteers must be equipped with 10 reflective markers on the body at hip, knee, and ankle. Using AT-Gait system with improvement of the camera calibration process in this study, the marker tracking system was more accurate and faster than the previous version. Then recorded video of volunteers while walking on the treadmill and analyzed movement of the hip, knee and ankle joints in the sagittal plane. Analyze the reliability of repeated measurements of the camera system with statistics of Intra-class Correlation Coefficient; ICC. The result of this study showed that each camera calibration takes less time than the previous version of AT-Gait system. The system also achieved accurate position measurement in 3D (the error range is 1-2 cm at distance of 225 cm from camera) and the repeatability of the camera system for the analysis of walking has a correlation coefficient of reliability at an excellent level (ICC = 0.998, 0.997, 0.994, p-value < 0.001). In conclusion, the data obtained from the developed system are highly accurate and excellent reliable in repeated measurements.

กิตติกรรมประกาศ

ในการจัดทำโครงงานครั้งนี้สำเร็จลุล่วงตามเป้าหมายได้ด้วยความอนุเคราะห์อย่างดีจาก ดร.สุเมธ เหมะวัฒนะชัย และ ผศ.ดร.ไชยยงค์ จรเกตุ เป็นที่ปรึกษาในการจัดทำโครงงานครั้งนี้ ซึ่งได้ให้ทั้งความรู้ คำแนะนำ คำปรึกษา แนวทางในการศึกษาหาข้อมูล รวมถึงตรวจสอบและแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ

ขอขอบคุณ ดร.ปัญญวัณ ลำเพาพงศ์ และ ผศ.ดร.พรพิศุทธิ์ วรจิรันตน์ ที่คอยชี้แนะและให้เกียรติมาเป็นกรรมการในครั้งนี้

ขอขอบคุณกลุ่มตัวอย่างจำนวน 3 คน ที่ให้ความร่วมมือกับการเก็บข้อมูลเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณหน่วยวิจัยเทคโนโลยีด้านวิศวกรรมความเที่ยงตรงและการแพทย์ (PMET) ที่ได้ให้ใช้สถานที่ในการทำโครงงาน อุปกรณ์อำนวยความสะดวกต่างๆ

ขอขอบคุณคณะอาจารย์ทุกท่านที่ได้ให้คำแนะนำสำหรับการจัดทำโครงงานครั้งนี้ ทำให้โครงงานสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ขอขอบคุณบิดา มารดาและทุกคนในครอบครัวที่คอยอบรมสั่งสอน เลี้ยงดู และคอยสนับสนุนให้กำลังใจในการจัดทำโครงงานครั้งนี้เป็นอย่างดี

สุดท้ายนี้ คณะผู้จัดทำขอมอบคุณงามความดีที่เกิดขึ้นจากโครงงานนี้ แด่ผู้มีพระคุณทุกท่านที่มีส่วนร่วมในการทำให้โครงงานนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี จึงขอกราบขอบพระคุณทุกท่านเป็นอย่างสูง หากเกิดข้อผิดพลาดประการใดจากโครงงานนี้ คณะผู้จัดทำขออภัยมา ณ โอกาสนี้

ผู้ดำเนินโครงงาน

นายกิติศักดิ์ จันทร์สุกปุก

นายเจษฎา ยานันท์

นายชัยภัทร บัวคลี่

พฤษภาคม 2563

สารบัญ

หน้า

ใบรับรองปริญญานิพนธ์ ..... ก
บทคัดย่อ ..... ข
Abstract ..... ค
กิตติกรรมประกาศ ..... ง
สารบัญ ..... จ
สารบัญตาราง ..... ฌ
สารบัญรูป ..... ฏ
ลำดับสัญลักษณ์และคำย่อ ..... ณ

บทที่ 1 บทนำ 1
1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงงาน 1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา 4
1.3 ขอบเขตของโครงงาน 4
1.4 ขั้นตอนแผนการดำเนินงาน 5
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ 5

บทที่ 2 หลักการและทฤษฎี 6
2.1 ระบบกล้อง (Camera system) 6
2.1.1 โมเดลกล้องที่ใช้ในการการสอบเทียบกล้อง (Camera modal) 6
2.1.2 การสอบเทียบกล้อง (Camera Calibration) 12
2.2 การเคลื่อนไหวเบื้องต้นของร่างกาย 18
2.2.1 การเคลื่อนไหวแบบไม่เคลื่อนที่ 18
2.2.2 การเคลื่อนไหวแบบเคลื่อนที่ 18
2.3 พิสัยการเคลื่อนไหว (Range Of Motion; ROM) 19

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.4 การเดิน.....19
2.4.1 วงจรการเดิน (gait cycle).....20
2.4.2 ช่วงรับน้ำหนัก (stance phase).....20
2.4.3 ช่วงแกว่งขา (swing phase).....21
2.4.4 ช่วงที่เท้าทั้งสองข้างแตะพื้นพร้อมกัน (double support).....21
2.4.5 รูปแบบมุมที่เกิดจากการเดินในระนาบ sagittal plane 21
2.4.6 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการเดิน.....22
2.5 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ภายในชั้น (Intraclass Correlation Coefficient : ICC).....23
2.6 วรรณกรรมปริทรรศน์.....24

บทที่ 3 วิธีการดำเนินงาน.....29
3.1 แผนผังขั้นตอนการดำเนินโครงงาน.....29
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการจัดทำโครงงาน.....30
3.3 ศึกษาหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....33
3.4 ศึกษาการทำงานและปรับปรุงโปรแกรม LabVIEW.....33
3.5 ศึกษาการทำงานของโปรแกรม MATLAB.....34
3.6 สอบเทียบกล้องด้วยแอปพลิเคชัน Camera Calibration ของโปรแกรม MATLAB 35
3.7 นำค่าพารามิเตอร์มาใช้ในโปรแกรม LabVIEW และแก้ไขความบิดเบี้ยวของภาพ.....36
3.8 นำค่าพารามิเตอร์มาทดสอบหาความแม่นยำของโปรแกรม.....41
3.8.1 ทำการทดสอบเปรียบเทียบการวัดตำแหน่งระหว่าง marker.....41
3.8.2 ทำการทดสอบวัดตำแหน่งของ marker บนระนาบฉากอ้างอิง.....42
3.8.3 ทำการทดสอบวัดตำแหน่ง marker ของระบบกล้องใน 3 มิติ.....44
3.8.4 การทดสอบการวัดมุมระหว่าง marker ที่ระนาบต่างๆ.....45

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.9 ทำการทดสอบระบบกล้องบันทึกภาพการเคลื่อนไหวสำหรับการวิเคราะห์การเดินกับกลุ่มตัวอย่างในโปรแกรม LabVIEW และหาความน่าเชื่อถือในการวัดซ้ำ.....45
3.9.1 หลักการวิเคราะห์มุมการเคลื่อนไหวของมนุษย์.....45
3.9.2 มาตรการความปลอดภัยในการทดลอง.....48
3.9.3 ทดสอบกับอาสาสมัครเพื่อหาความน่าเชื่อถือในการวัดซ้ำขณะเดินในมนุษย์.....48
3.10 วิเคราะห์ผลทางสถิติ.....50

บทที่ 4 ผลการดำเนินงานและวิเคราะห์ผล.....51
4.1 ผลการเปรียบเทียบการวัดตำแหน่งระหว่าง marker สะท้อนแสง และmarker อินฟาเรด.....51
4.2 ผลการทดสอบความแม่นยำในการวัด ของระบบกล้อง.....52
4.2.1 ผลการทดสอบการวัดตำแหน่งของ marker บนระนาบฉาก.....52
4.2.2 ผลการทดสอบการวัดตำแหน่ง marker ของระบบกล้องใน 3 มิติ.....55
4.2.3 ผลการทดสอบการวัดมุมระหว่าง marker ที่ระนาบต่างๆ.....56
4.3 ทดสอบหาความน่าเชื่อถือในการวัดซ้ำขณะเดินในมนุษย์ของระบบกล้องวีดีโอบันทึกการเคลื่อนไหว.....58
4.3.1 ทดสอบหาความน่าเชื่อถือในการวัดซ้ำขณะเดินบนลู่วิ่งไฟฟ้าของอาสาสมัครแต่ละคน.....58

บทที่ 5 บทสรุป.....68

เอกสารอ้างอิง.....70

ภาคผนวก ก ตารางการทดสอบการวัดตำแหน่ง X Y และ Z ของ marker ที่ได้จากระบบกล้องบนระนาบฉากอ้างอิง.....73
ภาคผนวก ข ตารางการทดสอบการวัดตำแหน่ง marker ใน 3 มิติ.....99

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก ค ตารางตัวอย่างการเก็บข้อมูลพิกัดของ marker.....104
ภาคผนวก ง ตารางและกราฟตัวอย่างการวิเคราะห์ข้อมูล.....107
ภาคผนวก จ ตารางตัวอย่างการวิเคราะห์เปรียบเทียบข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (ICC).....116
ภาคผนวก ฉ รูปขั้นตอนการสอบเทียบกล้องในโปรแกรม MATLAB.....120
ภาคผนวก ช รูปการพัฒนาและปรับปรุงโปรแกรม LabVIEW.....123

สารบัญตาราง

ตารางที่ **หน้า**

1.1 แผนการดำเนินงาน.....5

2.1 ตัวอย่างแบบจำลองและสูตรการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ภายในชั้น.....23

4.1 การเปรียบเทียบการวัดตำแหน่งระหว่าง marker สะท้อนแสงและ marker อินฟาเรด.....51

4.2 ผลการทดสอบการวัดตำแหน่งของระบบกล้อง.....52

4.3 ผลการทดสอบการวัดตำแหน่ง marker ของระบบกล้องใน 3 มิติ.....55

4.4 ค่าเฉลี่ยจากการทดสอบการวัดตำแหน่ง marker ของระบบกล้องใน 3 มิติ.....56

4.5 ผลการทดสอบวัดมุมระหว่าง marker.....56

4.6 ค่าเฉลี่ยขององศาการเคลื่อนไหวข้อสะโพก ข้อเข่า และข้อเท้า ในระนาบ sagittal และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (ICC) ของการทดสอบ Test-retest reliability (วัดซ้ำ 3 ครั้ง) ขณะทดสอบครั้งที่ 1 และ 2 ของอาสาสมัครคนที่ 2 ในการหาความน่าเชื่อถือของการวัดซ้ำของการเดินในมนุษย์.....63

ก.1 ผลการทดสอบตำแหน่งแกน x ของ marker ที่ได้จากระบบกล้องบนระนาบฉากอ้างอิงแต่ละจุดที่ระยะ 150 เซนติเมตร กล้องคู่ใกล้.....74

ก.2 ผลการทดสอบตำแหน่งแกน y ของ marker ที่ได้จากระบบกล้องบนระนาบฉากอ้างอิงแต่ละจุดที่ระยะ 150 เซนติเมตร กล้องคู่ใกล้.....76

ก.3 ผลการทดสอบตำแหน่งแกน z ของ marker ที่ได้จากระบบกล้องบนระนาบฉากอ้างอิงแต่ละจุดที่ระยะ 150 เซนติเมตร กล้องคู่ใกล้.....78

ก.4 ผลการทดสอบตำแหน่งแกน x ของ marker ที่ได้จากระบบกล้องบนระนาบฉากอ้างอิงแต่ละจุดที่ระยะ 150 เซนติเมตร กล้องคู่ไกล.....80

ก.5 ผลการทดสอบตำแหน่งแกน y ของ marker ที่ได้จากระบบกล้องบนระนาบฉากอ้างอิงแต่ละจุดที่ระยะ 150 เซนติเมตร กล้องคู่ไกล.....82

ก.6 ผลการทดสอบตำแหน่งแกน z ของ marker ที่ได้จากระบบกล้องบนระนาบฉากอ้างอิงแต่ละจุดที่ระยะ 150 เซนติเมตร กล้องคู่ไกล.....84

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ **หน้า**

ก.7 ผลการทดสอบตำแหน่งแกน x ของ marker ที่ได้จากระบบกล้องบนระนาบฉากอ้างอิงแต่ละจุด ที่ระยะ 225 เซนติเมตร กล้องคู่ใกล้.....86

ก.8 ผลการทดสอบตำแหน่งแกน y ของ marker ที่ได้จากระบบกล้องบนระนาบฉากอ้างอิงแต่ละจุด ที่ระยะ 225 เซนติเมตร กล้องคู่ใกล้.....88

ก.9 ผลการทดสอบตำแหน่งแกน z ของ marker ที่ได้จากระบบกล้องบนระนาบฉากอ้างอิงแต่ละจุด ที่ระยะ 225 เซนติเมตร กล้องคู่ใกล้.....90

ก.10 ผลการทดสอบตำแหน่งแกน x ของ marker ที่ได้จากระบบกล้องบนระนาบฉากอ้างอิงแต่ละจุด ที่ระยะ 225 เซนติเมตร กล้องคู่ไกล.....92

ก.11 ผลการทดสอบตำแหน่งแกน y ของ marker ที่ได้จากระบบกล้องบนระนาบฉากอ้างอิงแต่ละจุด ที่ระยะ 225 เซนติเมตร กล้องคู่ไกล.....94

ก.12 ผลการทดสอบตำแหน่งแกน z ของ marker ที่ได้จากระบบกล้องบนระนาบฉากอ้างอิงแต่ละจุด ที่ระยะ 225 เซนติเมตร กล้องคู่ไกล.....96

ก.13 ผลการทดสอบการวัดตำแหน่ง x y และ z โดยเฉลี่ยบนระนาบฉากอ้างอิง.....98

ข.1 ผลการทดสอบการวัดตำแหน่ง marker ใน 3 มิติแต่ละจุด.....100

ข.2 ค่าเฉลี่ยจากการทดสอบการวัดตำแหน่ง marker ของระบบกล้องใน 3 มิติ.....103

ค.1 ตัวอย่างในการเก็บข้อมูลพิกัดของ marker ในหนึ่งเฟรมสำหรับนำไปคำนวณมุมองศาข้อสะโพก ข้อเข่าและข้อเท้า.....105

ค.2 คำอธิบาย marker.....105

ค.3 ตัวอย่างการคำนวณคำนวณมุมองศาในระนาบ sagittal ในรูป ยืนนิ่ง.....106

ค.4 ตัวอย่างการคำนวณมุมองศาในระนาบ sagittal.ในช่วง heel strike.....106

ง.1 ตัวอย่างการเก็บข้อมูลอาสาสมัคร 1 คนในการเดิน 1 ครั้ง.....108

จ.1 ค่าเฉลี่ยขององศาการเคลื่อนไหวข้อสะโพก ข้อเข่า และข้อเท้า ในระนาบ sagittal และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (ICC) ของการทดสอบ Test-retest reliability (วัดซ้ำ 3 ครั้ง) ขณะทดสอบครั้งที่ 1 และ 2 ของอาสาสมัครคนที่ 1.....117

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่ **หน้า**

จ.2 ค่าเฉลี่ยขององศาการเคลื่อนไหวข้อสะโพก ข้อเข่า และข้อเท้า ในระนาบ sagittal และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (ICC) ของการทดสอบ Test-retest reliability (วัดซ้ำ 3 ครั้ง) ขณะทดสอบครั้งที่ 1 และ 2 ของอาสาสมัครคนที่ 2.....118

จ.3 ค่าเฉลี่ยขององศาการเคลื่อนไหวข้อสะโพก ข้อเข่า และข้อเท้า ในระนาบ sagittal และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (ICC) ของการทดสอบ Test-retest reliability (วัดซ้ำ 3 ครั้ง) ขณะทดสอบครั้งที่ 1 และ 2 ของอาสาสมัครคนที่ 3.....119

สารบัญรูป

รูปที่ **หน้า**

1.1 marker แบบสะท้อนแสง.....3
1.2 marker อินฟาเรด.....3
1.3 กล้องบันทึกวิดีโอ 30 fps.....3
1.4 กล้องบันทึกวิดีโอ 60 fps.....3
2.1 การแปลงระบบพิกัดโลกใน 3 มิติ ไปเป็นระบบพิกัดภาพ 2 มิติ.....6
2.2 ภาพเรขาคณิตของการฉายแบบ perspective.....8
2.3 การอ่านค่าพิกัดภาพของเซนเซอร์.....9
2.4 ภาพที่มีการบิดเบี้ยวเนื่องมาจากการบิดเบี้ยวของเลนส์.....11
2.5 กระดานสอบเทียบและแกนอ้างอิง.....12
2.6 การแบ่งร่างกายทั้ง 3 ระนาบ:Sagittal plane, horizontal plane and frontal plane.....19
2.7 วงจรการเดินของคนปกติ.....20
2.8 รูปแบบมุมที่เกิดจากการเคลื่อนไหวในระนาบ sagittal plane.....21
2.9 การวัดค่า stride width, stride length, step length, foot angle จาก footprints.....22
2.10 การวิเคราะห์การเดินบนลู่วิ่งไฟฟ้าด้วยกล้อง 1 ตัว.....25
2.11 แผ่นเหล็กที่ด้านบนพิมพ์เป็นรูปสี่เหลี่ยม เป็นจุดที่ใช้สำหรับการสอบเทียบ 28
2.12 รูปแบบแผ่นกระดานที่ใช้สำหรับการสอบเทียบกล้องของ Zhang.....28
3.1 แผนผังขั้นตอนการดำเนินโครงงาน.....29
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในโครงงาน.....30
3.3 โปรแกรมสำหรับจับภาพสองกล้องในเวลาเดียวกัน.....33
3.4 ศึกษาการทำงานของแอปพลิเคชัน Camera Calibrator ในโปรแกรม MATLAB.....34
3.5 การถ่ายรูปภาพกระดานสอบเทียบ.....35
3.6 การสอบเทียบกล้องโดยใช้แอปพลิเคชัน Camera Calibrator ของโปรแกรม MATLAB.....35
3.7 ตัวอย่างค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการสอบเทียบกล้องในโปรแกรม MATLAB.....36
3.8 ภาพที่กล้องถ่ายได้ที่เกิดการบิดเบี้ยว (ซ้าย) และที่ถูกปรับแก้ค่าให้ตรงด้วย MATLAB (ขวา)....40

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

3.9 เปรียบเทียบตำแหน่งของพิกเซลที่ถูกปรับแก้ค่าระหว่างการแก้สมการด้วยวิธีการของ Newton Raphson (ด้านซ้าย) และค่าที่ได้จากโปรแกรม MATLAB (ด้านขวา).....40
3.10 การวาง marker บนฉากอ้างอิงที่ใช้วัดระยะจริง.....41
3.11 การจับตำแหน่งของ marker ในโปรแกรม LabVIEW.....41
3.12 การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อเก็บข้อมูล.....42
3.13 การตั้งกล้อง webcam กับฉากอ้างอิง ระหว่างกล้องคู่ใกล้ (ก) และกล้องคู่ไกล (ข).....43
3.14 การวาง marker บนฉากอ้างอิงที่ใช้วัดระยะจริง.....43
3.15 การวาง marker บนกระดานที่ใช้วัดระยะจริง.....44
3.16 การจับตำแหน่งของ marker ในโปรแกรม LabVIEW.....44
3.17 การวาง marker บนกระดานที่ใช้วัดมุมองศาจริง.....45
3.18 ตำแหน่ง marker ที่ติดบนร่างกายเมื่อมองจากระนาบ sagittal.....46
3.19 การวัดมุมของข้อสะโพก (ก) ข้อเข่า (ข) และข้อเท้า (ค) ในระนาบ sagittal.....48
4.1 รูปแสดงระนาบของจุด marker ที่ระยะ 150 เซนติเมตร กล้องคู่ใกล้.....53
4.2 รูปแสดงระนาบของจุด marker ที่ระยะ 150 เซนติเมตร กล้องคู่ไกล.....53
4.3 รูปแสดงระนาบของจุด marker ที่ระยะ 225 เซนติเมตร กล้องคู่ใกล้.....54
4.4 รูปแสดงระนาบของจุด marker ที่ระยะ 225 เซนติเมตร กล้องคู่ไกล.....54
4.5 กราฟรูปแบบการเคลื่อนไหวที่ข้อสะโพก ขณะเดินของอาสาสมัครคนที่ 1 จำนวน 3 รอบ
ก. ครั้งที่ 1 ข. ครั้งที่ 2 ในระนาบ sagittal.....58
4.6 กราฟรูปแบบการเคลื่อนไหวที่ข้อเข่า ขณะเดินของอาสาสมัครคนที่ 1 จำนวน 3 รอบ
ก. ครั้งที่ 1 ข. ครั้งที่ 2 ในระนาบ sagittal.....59
4.7 กราฟรูปแบบการเคลื่อนไหวที่ข้อเท้า ขณะเดินของอาสาสมัครคนที่ 1 จำนวน 3 รอบ
ก. ครั้งที่ 1 ข. ครั้งที่ 2 ในระนาบ sagittal.....59

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.8 กราฟเปรียบเทียบรูปแบบการเคลื่อนไหวที่ข้อสะโพก ขณะเดินของอาสาสมัครคนที่ 1 เฉลี่ย ครั้งที่ 1 และ ครั้งที่ 2 ในระนาบ sagittal....60

4.9 กราฟเปรียบเทียบรูปแบบการเคลื่อนไหวที่ข้อเข้า ขณะเดินของอาสาสมัครคนที่ 1 เฉลี่ย ครั้งที่ 1 และ ครั้งที่ 2 ในระนาบ sagittal....61

4.10 กราฟเปรียบเทียบรูปแบบการเคลื่อนไหวที่ข้อเท้า ขณะเดินของอาสาสมัครคนที่ 1 เฉลี่ย ครั้งที่ 1 และ ครั้งที่ 2 ในระนาบ sagittal....61

4.11 รูปที่ระบบกล้องบันทึกในช่วงแกว่งขา (60%-100% gait cycle)....62

4.12 การเปรียบเทียบรูปแบบการเคลื่อนไหวที่ข้อสะโพกขณะเดินของ ก. อาสาสมัครคนที่ 2 ข. Neurmann ในปี 2010 [22] ในระนาบ sagittal....64

4.13 การเปรียบเทียบรูปแบบการเคลื่อนไหวที่ข้อเข่าขณะเดินของ ก. อาสาสมัครคนที่ 2 ข. Neurmann ในปี 2010 [22] ในระนาบ sagittal....65

4.14 การเปรียบเทียบรูปแบบการเคลื่อนไหวที่ข้อเท้าขณะเดินของ ก. อาสาสมัครคนที่ 2 ข. Neurmann ในปี 2010 [22] ในระนาบ sagittal....65

4.15 การเปรียบเทียบรูปแบบการเคลื่อนไหวที่ข้อสะโพกขณะเดินของ ก. อาสาสมัครคนที่ 3 ข. Neurmann ในปี 2010 [22] ในระนาบ sagittal....66

4.16 การเปรียบเทียบรูปแบบการเคลื่อนไหวที่ข้อเข่าขณะเดินของ ก. อาสาสมัครคนที่ 3 ข. Neurmann ในปี 2010 [22] ในระนาบ sagittal....67

4.17 การเปรียบเทียบรูปแบบการเคลื่อนไหวที่ข้อเท้าขณะเดินของ ก. อาสาสมัครคนที่ 3 ข. Neurmann ในปี 2010 [22] ในระนาบ sagittal....67

ง.1 กราฟรูปแบบการเคลื่อนไหวของมุมองศาข้อสะโพกในแนว sagittal plane ของอาสาสมัครคนที่ 1 ก. ครั้งที่ 1 ข. ครั้งที่ 2....111

ง.2 กราฟรูปแบบการเคลื่อนไหวของมุมองศาข้อเข่าในแนว sagittal plane ของอาสาสมัครคนที่ 1 ก .ครั้งที่ 1 ข. ครั้งที่ 2....111

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

ง.3 กราฟรูปแบบการเคลื่อนไหวของมุมองศาข้อเท้าในแนว sagittal plane
ของอาสาสมัครคนที่ 1 ก .ครั้งที่ 1 ข. ครั้งที่ 2.....112
ง.4 กราฟรูปแบบการเคลื่อนไหวของมุมองศาข้อสะโพกในแนว sagittal plane
ของอาสาสมัครคนที่ 2 ก .ครั้งที่ 1 ข. ครั้งที่ 2.....112
ง.5 กราฟรูปแบบการเคลื่อนไหวของมุมองศาข้อเข่าในแนว sagittal plane
ของอาสาสมัครคนที่ 2 ก .ครั้งที่ 1 ข. ครั้งที่ 2.....113
ง.6 กราฟรูปแบบการเคลื่อนไหวของมุมองศาข้อเท้าในแนว sagittal plane
ของอาสาสมัครคนที่ 2 ก .ครั้งที่ 1 ข. ครั้งที่ 2.....113
ง.7 กราฟรูปแบบการเคลื่อนไหวของมุมองศาข้อสะโพกในแนว sagittal plane
ของอาสาสมัครคนที่ 3 ก .ครั้งที่ 1 ข. ครั้งที่ 2.....114
ง.8 กราฟรูปแบบการเคลื่อนไหวของมุมองศาข้อเข่าในแนว sagittal plane
ของอาสาสมัครคนที่ 3 ก .ครั้งที่ 1 ข. ครั้งที่ 2.....114
ง.9 กราฟรูปแบบการเคลื่อนไหวของมุมองศาข้อเท้าในแนว sagittal plane
ของอาสาสมัครคนที่ 3 ก .ครั้งที่ 1 ข. ครั้งที่ 2.....115
ฉ.1 ถ่ายภาพกระดานสอบเทียบโดยโปรแกรมสำหรับจับภาพสองกล้องในเวลาเดียวกัน.....121
ฉ.2 ใช้แอปพลิเคชัน Camera calibrator ในโปรแกรม MATLAB.....121
ฉ.3 การกรอกขนาดตารางของกระดานสอบเทียบ.....121
ฉ.4 ผลจากการกดปุ่ม Calibrate.....122
ฉ.5 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการสอบเทียบกล้อง.....122
ช.1 การพัฒนาระบบกล้องให้มีการจับภาพพร้อมกันทั้ง 2 กล้อง.....124
ช.2 การปรับปรุงโปรแกรมในการดึงข้อมูลการเดินให้มีความรวดเร็วขึ้น.....124

สัญลักษณ์และอักษรย่อ

AT-Gait	Accurate Techology 3D Gait Analysis
ROM	Range Of Motion
ICCs	Intra-class Corelation Coefficeient
fps	frame per second
RGB	Red Green Blue
HSV	Hue Saturation Value
ASIS	Anterrior Superior Iliac Spine
PSIS	Posterrior Superior Iliac Spine
HS	Heel Strike
FF	Foot Flat
MS	Mid Stance
HO	Heel Off
TO	Tor Off
MSW	Mid Swing

มหาวิทยาลัยนเรศวร

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของโครงงาน

การทำกิจกรรมต่างๆเป็นส่วนสำคัญอย่างหนึ่งที่ใช้ในการดำเนินชีวิตของมนุษย์ มีผลต่อการเคลื่อนไหวในชีวิตประจำวัน เช่น การเดิน การลุก-นั่ง นอกจากการเดินจะเป็นการเคลื่อนไหวที่เกิดขึ้นกับมนุษย์ในชีวิตประจำวันแล้ว ยังช่วยส่งเสริมสุขภาพและข้อต่อท่อนล่างของร่างกาย ซึ่งประกอบด้วย ข้อสะโพก ข้อเข่าและข้อเท้า หากต้องการตรวจสอบความผิดปกติของการเดิน จำเป็นต้องใช้เครื่องมือในการช่วยวิเคราะห์หาความผิดปกติของการเดิน ซึ่งระบบการเก็บข้อมูลการเคลื่อนไหวที่มีขายในเชิงการค้ามีราคาสูงมาก จึงมีการพัฒนาระบบกล้องขึ้นเพื่อใช้เป็นข้อมูลทางการแพทย์ในการวิเคราะห์ความผิดปกติของการเดิน

ในการวิเคราะห์การเดินเป็นวิธีการประเมินคุณภาพของข้อต่อของร่างกายท่อนล่างของมนุษย์ จำเป็นต้องใช้ข้อมูลการเคลื่อนไหวในขณะที่ร่างกายกำลังเดิน เพื่อการตรวจประเมิน วางแผนการบำบัดรักษา และติดตามผลการรักษาในผู้ป่วยที่มีปัญหาการเดิน ซึ่งระบบการเก็บข้อมูลการเคลื่อนไหวต้องอาศัยอุปกรณ์ช่วยในการวัดช่วงองศาการเคลื่อนไหวของข้อสะโพก ข้อเข่า และข้อเท้า โดยใช้กล้องวิดีโอจำนวน 2 ตัว บันทึกการเคลื่อนไหวของร่างกาย แล้วใช้เทคนิคการประมวลผลจากจุด marker ในภาพเข้ามาช่วย เพราะเป็นสิ่งสำคัญในการตรวจค้นปัญหาและใช้ในการประเมินความก้าวหน้าในการรักษาต่อไป

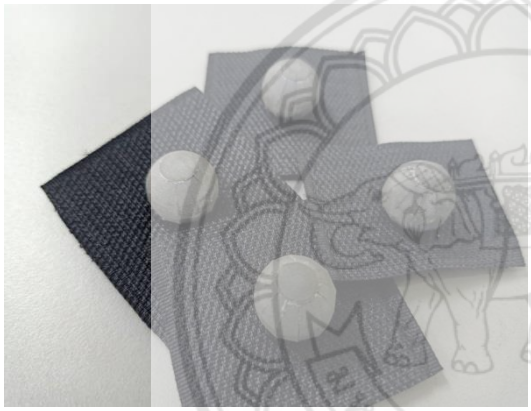
ในปี พ.ศ. 2557 กฤติยา ก่อเจดีย์ และคณะได้มีการพัฒนาระบบกล้องวิดีโอบันทึกภาพการเคลื่อนไหวสำหรับการวิเคราะห์การเดินแบบ 2 มิติ ได้ทำการศึกษาในกลุ่มนิสิตมหาวิทยาลัยนเรศวรมีอายุระหว่าง 21-25 ปี จำนวน 20 คน ผลการศึกษาเมื่อทำการทดสอบหาค่าความเที่ยงตรงขณะอยู่นิ่งและขณะเคลื่อนไหวเมื่อเปรียบเทียบ กับมุมมาตรฐานโดยใช้สถิติ Intra-Class Correlation Coefficient (ICC)

ในปี พ.ศ. 2558 กรรณิการ์ กำมะหยี่ และคณะได้พัฒนาระบบกล้องวิดีโอบันทึกภาพการเคลื่อนไหวสำหรับการวิเคราะห์การเดินแบบ 2 มิติต่อจากการศึกษาของกฤติยา ก่อเจดีย์ และคณะได้ทำการศึกษาในกลุ่มนิสิตมหาวิทยาลัยนเรศวรที่มีอายุระหว่าง 21-25 ปี จำนวน 20 คน ทำการปรับปรุงคุณภาพวิดีโอ ให้มีคุณภาพดีขึ้น และความเร็วของระบบกล้องในการรับภาพขณะเดินให้ใกล้เคียงค่าปกติของการเดิน ทำให้จับภาพได้ชัดเจนมากขึ้น การศึกษานี้มีข้อจำกัดในเรื่องของโปรแกรมที่ใช้สามารถจับ marker เพียงฝั่งขวาของร่างกายในแนว sagittal เท่านั้น

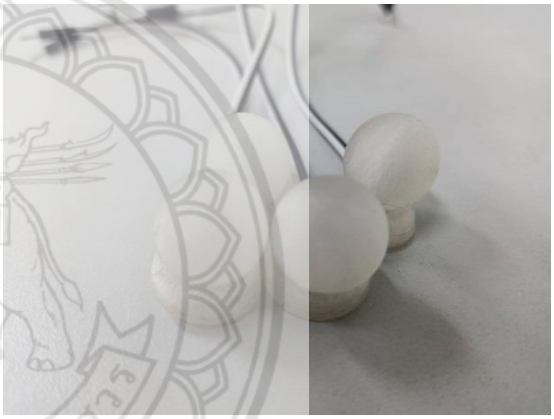
ในปี พ.ศ. 2561 สุเมธ เหมะวัฒนะชัย และคณะได้พัฒนาระบบกล้อง AT-Gait เป็นนวัตกรรมระบบกล้องและซอฟท์แวร์เพื่อประเมินการเดินแบบสามมิติในผู้สูงอายุ ถูกพัฒนาเพื่อใช้สำหรับเฝ้าระวังและคัดกรองเบื้องต้นในปัญหาการเคลื่อนไหวผิดปกติ เช่น ข้อเข่าเสื่อม โดยระบบที่พัฒนาขึ้นนี้จะตรวจจับตำแหน่งของ marker ซึ่งถูกติดบนรยางค์ส่วนล่างของผู้ถูกประเมินตาม anatomical landmark ที่ได้กำหนดไว้ โดยซอฟท์แวร์ที่พัฒนาขึ้นจะนำภาพที่ได้จากระบบกล้องมาคำนวณข้อมูลตำแหน่งของ marker และในด้านการตรวจสอบประเมินความถูกต้องของระบบกล้องและซอฟท์แวร์ที่ได้พัฒนาขึ้นนั้น ทางผู้วิจัยได้นำระบบที่พัฒนาขึ้นไปใช้ในการทดสอบในอาสาสมัครปกติ พบว่าระบบและโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น สามารถตรวจจับองศาเคลื่อนไหวในระหว่างการเดิน ซึ่งเป็นแบบไดนามิกส์ได้ โดยให้ผลการทดสอบซ้ำในวันเดียวกัน และในวันที่ต่างกัน ได้อย่างสอดคล้อง ด้วยสถิติ Intraclass Correlation Coefficient (ICC) ในระดับสูงถึงสูงมาก

ในปี พ.ศ. 2561 ธนดล บุญลือ และคณะได้ทำการปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบกล้องวิดีโอ AT-Gait สำหรับวิเคราะห์การเดินบนลู่วิ่งไฟฟ้า เนื่องจากการเดินบนพื้นจำเป็นต้องมีพื้นที่มาก จึงได้เปลี่ยนการเดินบนพื้นเป็นการเดินบนลู่วิ่งไฟฟ้า ซึ่งมีระยะในการเดินไม่จำกัด และประหยัดพื้นที่ในการทำการทดลอง โดยผู้วิจัยควบคุมความเร็วของสายพานลู่วิ่งไฟฟ้า ใช้กล้องบันทึกวิดีโอที่ความถี่ 30 fps โดยให้ผู้เข้าร่วมการทดลองได้ทดลองเดินจนท่าทางการเดินดูเป็นธรรมชาติที่สุด และจึงนำค่าช่วงนั้นมาวิเคราะห์ เพื่อให้มีความน่าเชื่อถือในการวัดระดับดีเยี่ยม ใช้เวลาในการดึงข้อมูลใน 1 รอบการเดินประมาณ 10-15 นาที เมื่อมีการเคลื่อนย้ายจะทำให้กล้องขยับเอียงอาจส่งผลให้การเก็บข้อมูลในการทำการทดลองเกิดความคลาดเคลื่อนได้ จึงต้องทำการสอบเทียบกับ reference frame ใหม่ทุกครั้งและใช้เวลาในการสอบเทียบกล้องประมาณ 30-60 นาที

จากที่กล่าวมาข้างต้นคณะผู้จัดทำได้สนใจที่จะพัฒนาระบบการสอบเทียบกล้องในการตรวจจับตำแหน่ง marker ใน 3 มิติ โดยการหาวิธีสอบเทียบกล้องเพื่อให้กล้องบันทึกวิดีโอการเคลื่อนไหวสามารถวัดตำแหน่งได้แม่นยำ หาตำแหน่งการจัดวางระยะห่างและมุมของกล้องใหม่ให้เหมาะสม มีการเปลี่ยนไปใช้กล้องบันทึกวิดีโอที่มีความถี่ 60 fps (ดังรูปที่ 1.4) เพื่อให้กล้องสามารถบันทึกวิดีโอการเคลื่อนไหวของ marker ที่ติดบนตัวผู้ทดสอบได้ดีขึ้น จากโครงงานก่อนหน้าใช้กล้องบันทึกวิดีโอความถี่เพียง 30 fps (ดังรูปที่ 1.3) กล้องไม่สามารถจับ marker ได้ทันจึงทำให้การคำนวณคลาดเคลื่อน และทำการเปรียบเทียบความแม่นยำในการตรวจจับตำแหน่งระหว่าง marker สะท้อนแสง (passive marker ดังรูปที่ 1.1) และ marker อินฟาเรด (active marker ดังรูปที่ 1.2) เพื่อที่จะเลือกนำไปใช้ในการวิเคราะห์คำนวณมุมของข้อสะโพก ข้อเข่า และข้อเท้าต่อไป

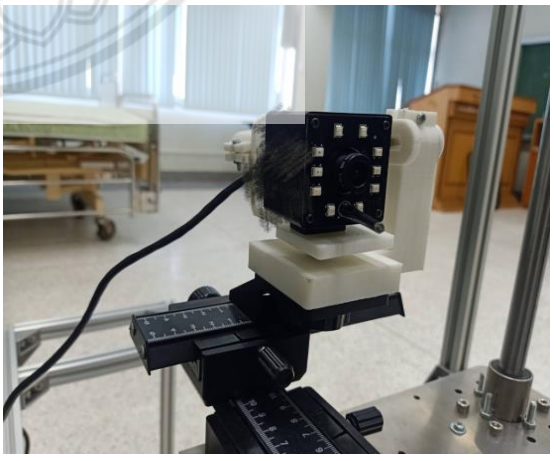


รูปที่ 1.1 marker สะท้อนแสง



รูปที่ 1.2 marker อินฟาเรด

รูปที่ 1.3 กล้องบันทึกวิดีโอ 30 fps



รูปที่ 1.4 กล้องบันทึกวิดีโอ 60 fps

1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

1.2.1 พัฒนาระบบสอบเทียบกล้องให้มีความแม่นยำและรวดเร็ว เพื่อนำไปใช้ในการตรวจจับตำแหน่งของ marker ใน 3 มิติ

1.2.2 เพื่อทดสอบความน่าเชื่อถือของระบบกล้องบันทึกการเคลื่อนไหว สำหรับวิเคราะห์การเดินในระนาบ sagittal

1.3 ขอบเขตของโครงงาน

ทำการพัฒนาระบบการสอบเทียบกล้อง หาระยะห่างในการวางกล้องที่เหมาะสมเพื่อให้ระบบกล้องมีความแม่นยำในการตรวจจับตำแหน่งของ marker ใน 3 มิติและทำการเปรียบเทียบความสามารถในการตรวจจับตำแหน่งระหว่าง marker แบบสะท้อนแสงและ marker อินฟาเรด เพื่อที่จะนำ marker ไปใช้ในการวิเคราะห์การเดินบนลู่วิ่งไฟฟ้า ทำการวิเคราะห์องศาการเคลื่อนไหวของ ข้อสะโพก ข้อเข่า และข้อเท้า โดยทดสอบกับกลุ่มอาสาสมัครจำนวน 3 คน เดินซ้ำคนละ 3 รอบ จำนวน 2 ครั้ง โดยทำการทดสอบการเดินที่ความเร็ว 3 กิโลเมตรต่อชั่วโมง

1.4 ขั้นตอนแผนการดำเนินงาน

ตารางที่ 1.1 แผนการดำเนินงาน

กิจกรรม	เดือน										
	พ.ศ. 2562				พ.ศ. 2563						
	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
1.ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง											
2.พัฒนาระบบสอบเทียบกล้องและทดสอบความแม่นยำในการวัดตำแหน่ง											
3.เก็บข้อมูล. อาสาสมัคร/วิเคราะห์											
4.อภิปราย/วิจารณ์ผลการทดลอง											
5.สรุปผลการวิจัยและจัดทำรูปเล่มปริญญานิพนธ์											

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 ได้ระบบกล้องที่สามารถสอบเทียบกล้องได้รวดเร็ว และสามารถตรวจจับตำแหน่งของ marker ใน 3 มิติที่แม่นยำ

1.5.2 ได้ระบบกล้องที่สามารถบันทึกผลการวัดของการเคลื่อนไหวที่มีความน่าเชื่อถือ โดยนำไปวิเคราะห์มุมองศาการเคลื่อนไหวของ ข้อสะโพก ข้อเข่า และข้อเท้าได้

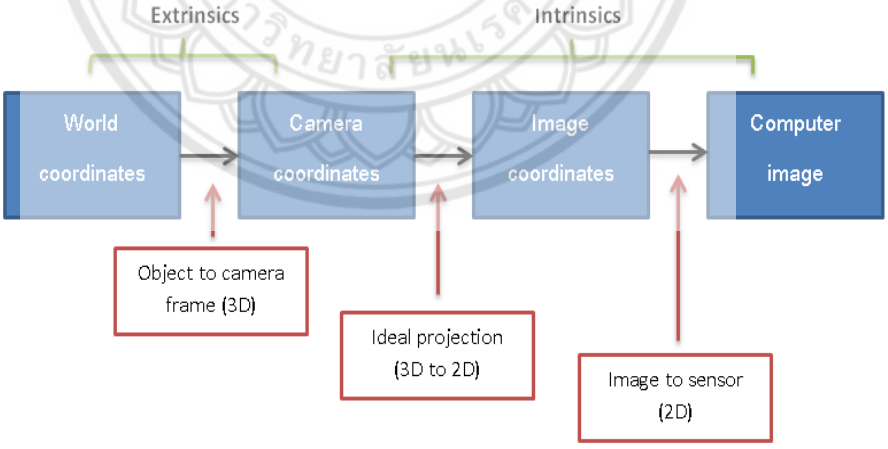
บทที่ 2

หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ระบบกล้อง (Camera system)

2.1.1 โมเดลกล้องที่ใช้ในการการสอบเทียบกล้อง (Camera model)

การสอบเทียบกล้อง เป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญในการที่จะนำกล้องไปใช้งานด้านการวัด โดยการสอบเทียบกล้อง คือการหาค่าพารามิเตอร์ภายใน (intrinsic parameters) และพารามิเตอร์ภายนอก (extrinsic parameters) ของกล้อง ซึ่งสำหรับกล้องที่ใช้งานโดยทั่วไปจะมีลักษณะการทำงานแบบกล้องรูเข็ม (pinhole camera) โดยกล้องจะทำการฉายภาพวัตถุในพิกัด 3 มิติให้ออกมาอยู่ในพิกัด 2 มิติบนระนาบภาพมีขั้นตอน ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 การแปลงระบบพิกัดโลกใน 3 มิติ ไปเป็นระบบพิกัดภาพ 2 มิติ [1]

ขั้นตอนการแปลงจากวัตถุในพิกัดโลก 3 มิติ ไปเป็นพิกัดภาพใน 2 มิติ

ขั้นตอนที่ 1 : เป็นขั้นตอนการแปลงจากระนาบวัตถุไปยังระนาบกล้อง เป็นพารามิเตอร์ภายนอกกล้อง ซึ่งจะอธิบายถึงลักษณะการวางตำแหน่งและมุมของกล้องเทียบกับพิกัดโลก ซึ่งประกอบไปด้วยเมทริกซ์การหมุน (rotation matrix) และเวกเตอร์การเลื่อนตำแหน่ง (translation vector) โดยสามารถเขียนสมการของการแปลงจากพิกัดโลก (x_w,y_w,z_w) ไปเป็นพิกัดกล้อง (x_c,y_c,z_c) ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} x_C \\ y_C \\ z_C \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} x_W \\ y_W \\ z_W \end{bmatrix} + T \qquad (1)$$

เมื่อ R คือ เมทริกซ์การหมุน ขนาด 3x3 และ T คือ เวกเตอร์การเลื่อนตำแหน่ง

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_W \\ y_W \\ z_W \end{bmatrix} \qquad (2)$$

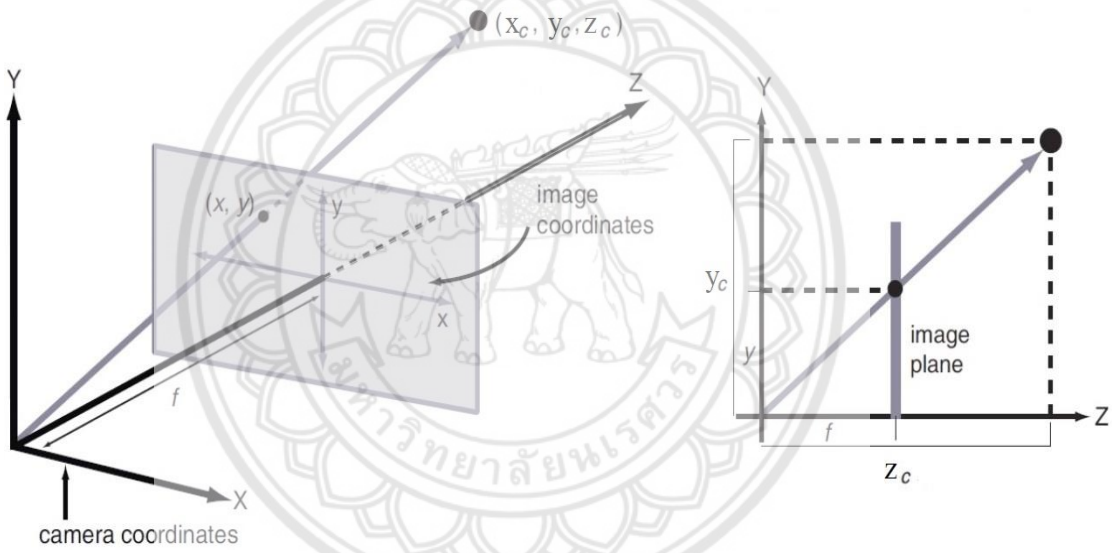
$$, \quad T = \begin{bmatrix} T_X \\ T_y \\ T_Z \end{bmatrix} \qquad (3)$$

นำเมทริกซ์การหมุนและเวกเตอร์การเลื่อนตำแหน่ง มาเขียนให้อยู่ในรูปพิกัดเอกพันธ์ (homogeneous coordinate) จะได้พารามิเตอร์ภายนอกของกล้อง ดังนี้

$$[R|T] = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & T_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & T_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & T_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \qquad (4)$$

โดยระบบพิกัดเอกพันธ์ คือระบบพิกัดที่ถูกสร้างขึ้นมาเพื่อทำให้การคำนวณในระบบพิกัด x,y,z ปกติหรือที่เรียกว่าพิกัดคาร์ทีเซียน (Cartesian coordinate) ถูกแปลงสภาพหลายอย่างเข้าด้วยกันจนเป็นเมทริกซ์ที่อยู่ในรูปการณ์บวกและการคูณกันของเมทริกซ์ ให้เป็นเมทริกซ์การคูณกันเพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณโดยการใช้เวกเตอร์พิกัดร่วมกับจุดกำเนิด โดยพิกัดร่วมที่ถูกเพิ่มเข้ามาจะมีค่าเป็น 1

ขั้นตอนที่ 2 : เป็นขั้นตอนการแปลงจากระนาบกล้อง 3 มิติ (x_c,y_c,z_c) ไปเป็น ระนาบภาพ 2 มิติ (x , y) โดยใช้หลักการฉายภาพแบบ perspective



รูปที่ 2.2 ภาพเรขาคณิตของการฉายแบบ perspective [2]

จากรูปที่ 2.2 สามารถมองเป็นความสัมพันธ์ของสามเหลี่ยมคล้ายจะได้ ดังนี้

$$\frac{x}{f} = \frac{x_c}{z_c} \rightarrow x = \frac{f x_c}{z_c} \tag{5a}$$

$$\frac{y}{f} = \frac{y_c}{z_c} \rightarrow y = \frac{f y_c}{z_c} \tag{5b}$$

เขียนให้อยู่ในรูปเมทริกซ์สมการเอกพันธ์จะได้

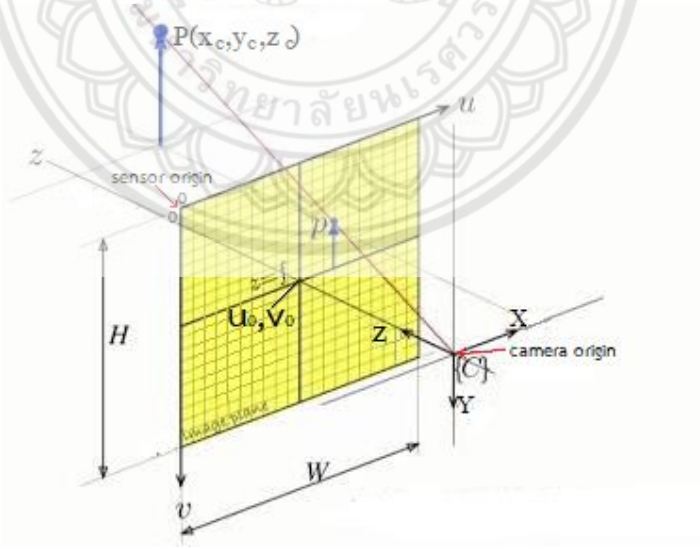
$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

(x,y) คือ จุดบนระนาบของภาพ

f คือ ความยาวโฟกัส (focal length)

(x_c, y_c, z_c) คือ พิกัดบนระนาบกล้อง

ขั้นตอนที่ 3 : เป็นการแปลงแปลงหน่วยของพิกัดรูปจากมิลลิเมตร เป็น **พิกเซล** (pixel) โดยมี**เซนเซอร์เป็น**ตัวอ่านค่า เนื่องจากเซนเซอร์ของระบบกล้องเริ่มอ่านค่าที่**หัวมุมบนซ้ายของภาพ แต่กล้องอ่าน**ค่าที่จุดศูนย์กลางของภาพ (u_0,v_0) จำเป็นต้องย้ายค่าที่เซนเซอร์**ของระบบกล้องอ่านมาไว้ที่จุดศูนย์ก**ลางของภาพ โดยการบวกค่าจุดศูนย์กลางเข้าไป ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การอ่านค่าพิกัดภาพของเซนเซอร์ [3]

$$u = \frac{x}{\rho_x} + s + u_0 \tag{7a}$$

$$v = \frac{y}{\rho_y} + v_0 \tag{7b}$$

เมื่อ (ρ_x, ρ_y) คือ ขนาดของหน่วยความยาว (มิลลิเมตร) ต่อพิกเซล ในตัวเซนเซอร์ของระบบกล้อง เมื่อทำให้อยู่ในรูปพิกัดสมการเอกพันธ์ จะได้สมการดังนี้

$$\lambda \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\rho_x} & s & u_0 \\ 0 & \frac{1}{\rho_y} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \tag{8}$$

s คือ คาสัมประสิทธิ์ความเอียงของเลนสที่ไม่ตั้งฉากกับระนาบรับภาพของกลอง ในกล้องดิจิทัล มีค่าน้อยมากจนเกือบเป็น 0

(u,v) คือ พิกัดที่อยู่บนภาพในหน่วยพิกเซล

λ คือ ค่าคงที่ ซึ่งแสดงถึงสัดส่วนการลดขนาดของจุดใน 3 มิติไปเป็น 2 มิติ

เมื่อนำสมการที่ (6) มารวมกับสมการที่ (11) ซึ่งสมการรวมนี้เรียกว่า ค่าพารามิเตอร์ภายในของกล้อง โดยตัด column ที่ 4 ของสมการที่ (6) ออกเนื่องจากเป็น 0 จะใช้สัญลักษณ์ K และจะได้ค่าความยาวโฟกัสอยู่ในหน่วย พิกเซล ใช้สัญลักษณ์ f_x, f_y จะได้สมการดังนี้

$$K = \begin{bmatrix} \frac{1}{\rho_x} & s & u_0 \\ 0 & \frac{1}{\rho_y} & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} f_x & s & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{9}$$

เมื่อนำสมการทั้งหมดมารวมกัน ดังนั้นจะได้สมการการสอบเทียบกล้อง ในรูปพิกัดสมการเอกพันธ์ ดังสมการที่ 10

$$\lambda\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & s & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & T_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & T_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & T_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

แต่ในทางปฏิบัติ ภาพที่ถ่ายได้ส่วนใหญ่จะมีการบิดเบี้ยวเนื่องจากเลนส์ (lens distortion) ทำให้ภาพที่ถ่ายออกมา มีความบิดเบี้ยว โค้งงอ ผิดจากความเป็นจริง ดังรูปที่ 2.4

รูปที่ 2.4 ภาพที่มีการบิดเบี้ยวเนื่องมาจากการบิดเบี้ยวของเลนส์

โดยการบิดเบี้ยวของภาพแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ การบิดเบี้ยวในแนวรัศมีและแนวเส้นสัมผัส แต่จากงานวิจัย [4] สามารถคิดเฉพาะการบิดเบี้ยวในแนวรัศมี และใช้เพียงสองเทอมแรกของสมการเท่านั้น จากเดิมเป็นสมการอนุกรมอนันต์ โดยมีสมการการแก้ไขความบิดเบี้ยว [5] ดังนี้

$$x_d = x[1 + k_1 r^2 + k_2 r^4] \quad (11a)$$

$$y_d = y[1 + k_1 r^2 + k_2 r^4] \quad (11b)$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}$$

k_1, k_2 คือ สัมประสิทธิ์การบิดเบี้ยวอันดับที่หนึ่งและอันดับที่สอง ตามลำดับ

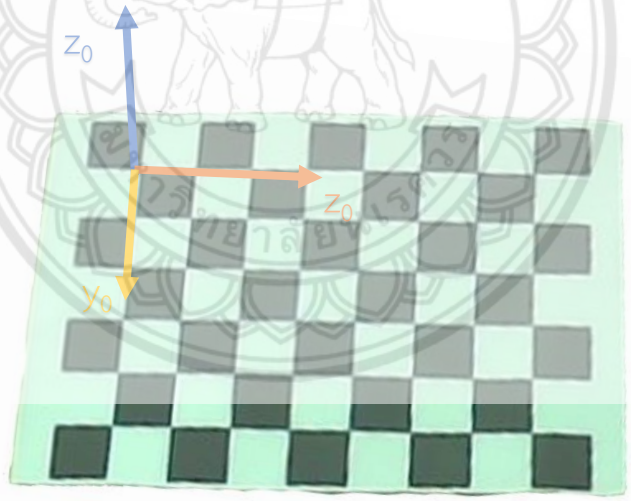
(x_d, y_d) คือ พิกัดจริงที่กล้องถ่ายได้ ซึ่งเป็นพิกัดที่มีความบิดเบี้ยว

(x, y) คือ พิกัดที่ได้รับการแก้ไขความบิดเบี้ยวแล้ว

จากสมการข้างต้นแสดงให้เห็นว่าที่จุดศูนย์กลางของภาพ (r=0) ภาพจะไม่มีการบิดเบี้ยว และจะเกิดการบิดเบี้ยวเมื่อจุดอยู่ห่างจากจุดศูนย์กลางออกไปและสามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การบิดเบี้ยวได้ด้วยวิธีการของZhang [6]

2.1.2 การสอบเทียบกล้อง (Camera Calibration)

โครงงานนี้ได้วิธีการสอบเทียบกล้องของ Zhang [6] ในการประมาณค่าพารามิเตอร์ภายใน (K) และพารามิเตอร์ภายนอกของกล้อง ($[R|T]$) จากภาพถ่ายกระดานสอบเทียบ โดยกำหนดระนาบของกระดานสอบเทียบเป็นระนาบ x y ของแกนอ้างอิง ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 กระดานสอบเทียบและแกนอ้างอิง (รูปจากการทดลอง)

จากกสมการที่ 10 กำหนดให้ r_1 r_2 r_3 และ t แทนหลักในพารามิเตอร์ภายนอกตามลำดับ

$$\begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 & t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & T_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & T_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & T_z \end{bmatrix}$$

จากรูปที่ 2.5 จะเห็นว่าทุกจุดบนระนาบของกระดานสอบเทียบระยะในแนวแกน Z เป็นศูนย์ จึงทำให้ตัวแปรของพารามิเตอร์ภายนอกกล้องในหลักที่ 3 ในสมการที่ 10 ถูกตัดออก จะได้

$$\lambda \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = K \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ 1 \end{bmatrix} \tag{12}$$

กำหนดให้เมทริกซ์จัตุรัสที่เกิดจากการคูณกันของ K กับ $\begin{bmatrix} R|T \end{bmatrix}$ คือ H เรียกวา โฮโมกราฟ (homography)

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} = \lambda K \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & t \end{bmatrix} \tag{13}$$

จะได้

$$\lambda \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ 1 \end{bmatrix} \tag{14}$$

$$\lambda \cdot u = (h_{11} \cdot X_w) + (h_{12} \cdot Y_w) + h_{13}$$
$$\lambda \cdot v = (h_{21} \cdot X_w) + (h_{22} \cdot Y_w) + h_{23}$$
$$\lambda = (h_{31} \cdot X_w) + (h_{32} \cdot Y_w) + h_{33}$$

ดังนั้น

$$u \cdot [(h_{31} \cdot X_w) + (h_{32} \cdot Y_w) + h_{33}] = (h_{11} \cdot X_w) + (h_{12} \cdot Y_w) + h_{13}$$
$$v \cdot [(h_{31} \cdot X_w) + (h_{32} \cdot Y_w) + h_{33}] = (h_{21} \cdot X_w) + (h_{22} \cdot Y_w) + h_{23}$$

$$(u \cdot h_{31} \cdot X_w) + (u \cdot h_{32} \cdot Y_w) + (u \cdot h_{33}) - (h_{11} \cdot X_w) - (h_{12} \cdot Y_w) - h_{13} = 0$$
$$(v \cdot h_{31} \cdot X_w) + (v \cdot h_{32} \cdot Y_w) + (v \cdot h_{33}) - (h_{21} \cdot X_w) - (h_{22} \cdot Y_w) - h_{23} = 0$$

$$-(h_{11} \cdot X_w) - (h_{12} \cdot Y_w) - h_{13} + (u \cdot h_{31} \cdot X_w) + (u \cdot h_{32} \cdot Y_w) + (u \cdot h_{33}) = 0$$
$$-(h_{21} \cdot X_w) - (h_{22} \cdot Y_w) - h_{23} + (v \cdot h_{31} \cdot X_w) + (v \cdot h_{32} \cdot Y_w) + (v \cdot h_{33}) = 0$$

จัดสมการให้อยู่ในรูป Ah=0 เพื่อแก้สมการหาค่าโฮโมกราฟี

$$\begin{bmatrix} -X_w & -Y_w & -1 & 0 & 0 & 0 & u \cdot X_w & u \cdot Y_w & u \\ 0 & 0 & 0 & -X_w & -Y_w & -1 & v \cdot X_w & v \cdot Y_w & v \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_{11} \\ h_{12} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ h_{33} \end{bmatrix} = 0 \qquad (15)$$

เนื่องจากมีสมการ 2 สมการและมีตัวแปรที่ไม่ทราบค่าอยู่ 9 ตัว ดังนั้นจึงต้องการจุดอย่างน้อย 5 จุดในแต่ละภาพเพื่อที่จะแก้สมการหาค่าโฮโมกราฟีได้ โดยวิธีการแยกค่าเอกฐาน (SVD) ซึ่งเป็นวิธีการแยกเมทริกซ์ใหญ่ 1 เมทริกซ์ออกเป็น 3 เมทริกซ์ย่อยที่อยู่ในรูปของการคูณกันและมีค่าเท่ากับเมทริกซ์เดิม

จากสมการที่ (14) จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างโฮโมกราฟีและพารามิเตอร์ของกล้องเป็น

$$\begin{bmatrix} h_1 & h_2 & h_3 \end{bmatrix} = \lambda K \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & t \end{bmatrix}$$

จากคุณสมบัติเมทริกซ์การหมุน R ซึ่งเป็น เมทริกซ์ออโธนอร์มอล (orthonormal) จะได้ว่า r_1 และ r_2 ตั้งฉากกันและมีขนาดเป็น 1 หน่วย

$$r_1^T \cdot r_2 = 0 \tag{16}$$

$$\|r_1\| = \|r_2\| = 1$$

$$r_1^T \cdot r_1 = r_2^T \cdot r_2 \tag{17}$$

โดยที่

$$r_1 = \lambda^{-1} K^{-1} h_1$$

$$r_2 = \lambda^{-1} K^{-1} h_2$$

จากสมการที่ (16) และ (17) จะได้ว่า

$$(\lambda^{-1} K^{-1} h_1)^T \cdot (\lambda^{-1} K^{-1} h_2) = 0$$

$$h_1^T K^{-T} K^{-1} h_2 = 0 \tag{18}$$

$$(\lambda^{-1} K^{-1} h_1)^T \cdot (\lambda^{-1} K^{-1} h_1) = (\lambda^{-1} K^{-1} h_2)^T \cdot (\lambda^{-1} K^{-1} h_2)$$

$$\lambda^{-2} h_1^T K^{-T} K^{-1} h_1 = \lambda^{-2} h_2^T K^{-T} K^{-1} h_2$$

$$h_1^T K^{-T} K^{-1} h_1 = h_2^T K^{-T} K^{-1} h_2 \tag{19}$$

สมการที่ (18) และ (19) เป็นเงื่อนไขบังคับสำหรับพารามิเตอร์ภายในเมื่อทราบค่าโฮโมกราฟี แก้สมการโดยใช้ Closed-Form Solution

กำหนดให้

$$B = K^{-T}K^{-1} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} \\ B_{21} & B_{22} & B_{23} \\ B_{31} & B_{32} & B_{33} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{f_x^{\,2}} & -\frac{s}{f_x^{\,2} f_y} & \frac{v_0 s - u_0 f_y}{f_x^{\,2} f_y} \\ -\frac{s}{f_x^{\,2} f_y} & \frac{s^2}{f_x^{\,2} f_y^{\,2}} + \frac{1}{f_y^{\,2}} & \frac{-s(v_0 s - u_0 f_y)}{f_x^{\,2} f_y^{\,2}} - \frac{v_0}{f_y^{\,2}} \\ \frac{v_0 s - u_0 f_y}{f_x^{\,2} f_y} & \frac{-s(v_0 s - u_0 f_y)}{f_x^{\,2} f_y^{\,2}} - \frac{v_0}{f_y^{\,2}} & \frac{(v_0 s - u_0 f_y)^2}{f_x^{\,2} f_y^{\,2}} + \frac{v_0^2}{f_y^{\,2}} + 1 \end{bmatrix}$$

เนื่องจาก B เป็นเมทริกซ์สมมาตร จึงกำหนดให้

$$b = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} & B_{22} & B_{23} & B_{33} \end{bmatrix}^T$$

สามารถเขียนสมการที่ (18) และ (19) ได้ใหม่เป็นเป็นดังนี้

$$h_1^T B h_2 = 0 \tag{20}$$

$$h_1^T B h_1 = h_2^T B h_2 \tag{21}$$

จากการจัดรูปจะพบรูปแบบของสมการ

$$h_i^T B h_j = v_{ij}^T b$$

โดย $v_{ij} = [h_{i1}h_{j1} \quad h_{i1}h_{j2} + h_{i2}h_{j1} \quad h_{i2}h_{j2} \quad h_{i3}h_{j1} + h_{i1}h_{j3} \quad h_{i3}h_{j2} + h_{i2}h_{j3} \quad h_{i3}h_{j3}]^T$

ดังนั้น จากสมการที่ (20) และ (21) สามารถเขียนใหม่ได้เป็นระบบสมการ

$$\begin{bmatrix} v_{12}^T \\ (v_{11} - v_{22})^T \end{bmatrix} b = 0 \tag{22}$$

กำหนดภาพของกระดานสอบเทียบ 1 ภาพ จะทำให้เกิดสมการ 2 สมการ แต่มีตัวแปรที่ไม่ทราบค่าอยู่ 6 ตัวแปร ดังนั้นจึงต้องมีจำนวนภาพกระดานสอบเทียบอย่างน้อย 3 ภาพจึงจะสามารถแก้สมการหาค่า b ออกมาได้โดยวิธีการแยกค่าเอกฐานเช่นเดียวกับการแก้สมการหาโฮโมกราฟี ถ้ามีภาพจำนวน n ภาพ จะสามารถเขียนให้อยู่ในรูป

$$Vb = 0$$

โดย V เป็นเมทริกซ์ขนาด 2n x 6

เมื่อคำนวณหาค่า b ได้แล้วก็สามารถคำนวณหาเมทริกซ์ของพารามิเตอร์ภายในกล้อง (K) ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
v_0 &= (B_{12}B_{13} - B_{11}B_{23}) / (B_{11}B_{22} - B_{12}^2) \\
\lambda &= B_{33} - [B_{13}^2 + v_0(B_{12}B_{13} - B_{11}B_{23})] / B_{11} \\
f_x &= \sqrt{\lambda / B_{11}} \\
f_y &= \sqrt{\lambda B_{11} / (B_{11}B_{22} - B_{12}^2)} \\
s &= -B_{12} f_x^2 f_y / \lambda \\
u_0 &= s v_0 / f_y - B_{13} f_x^2 / \lambda
\end{aligned} \tag{23}$$

สามารถหาค่าพารามิเตอร์ภายนอกของกล้องสำหรับกระดานสอบเทียบในแต่ละรูปได้ ดังนี้

$$\begin{aligned}
r_1 &= \lambda K^{-1} h_1 \\
r_2 &= \lambda K^{-1} h_2 \\
r_3 &= r_1 \times r_2 \\
t &= \lambda K^{-1} h_3
\end{aligned} \tag{24}$$

การประมาณค่าสัมประสิทธิ์ความบิดเบี้ยว

จากความสัมพันธ์ระหว่างจุดอ้างอิงบนภาพกับจุดพิกัดจริง ($u_d = f_x x_d + s y_d + u_0$ และ $v_d = f_y y_d + v_0$) โดยผ่านเมทริกซ์การสอบเทียบกล้อง ประกอบกับแบบจำลองของค่าสัมประสิทธิ์ความบิดเบี้ยวในสมการที่ (11a) และ (11b) จะได้

$$u_d = u + (u - u_0)[k_1(x^2 + y^2) + k_2(x^2 + y^2)^2] \tag{25a}$$

$$v_d = v + (v - v_0)[k_1(x^2 + y^2) + k_2(x^2 + y^2)^2] \tag{25b}$$

จัดให้อยู่ในรูปเมทริกซ์ได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} (u-u_0)(x^2+y^2) & (u-u_0)(x^2+y^2)^2 \\ (v-v_0)(x^2+y^2) & (v-v_0)(x^2+y^2)^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_d - u \\ v_d - v \end{bmatrix} \tag{26}$$

เมื่อมีขอมูล n จุดสอบเทียบบน m ภาพ จะสามารถสร้างระบบสมการเชิงเสน จำนวน 2mn สมการ และเขียนแทนได้เป็น $Dk = d$ และจะสามารถหาคำตอบเชิงเสนได้โดย

$$k = (D^T D)^{-1} D^T d \tag{27}$$

2.2 การเคลื่อนไหวเบื้องต้นของร่างกาย [7]

2.2.1 การเคลื่อนไหวแบบเคลื่อนที่ เป็นการเคลื่อนไหวร่างกาย โดยที่ร่างกายเคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งในการปฏิบัติภารกิจในชีวิตประจำวันโดยทั่วไปมีดังนี้

(1) การเดิน (walking) คือการถ่ายน้ำหนักตัวจากเท้าหนึ่งไปยังอีกเท้าหนึ่ง ในขณะเปลี่ยนน้ำหนักตัวเท้าข้างหนึ่งนั้นจะอยู่กับพื้น และน้ำหนักของเท้าที่ลงสู่พื้นจะถ่ายจากส้นเท้าไปยังปลายเท้า

(2) การวิ่ง (running) คือการก้าวเท้าสลับกันทีละข้าง โดยการถีบเท้าส่งตัวขึ้นพ้นพื้นงอเข่าสูง ถ่ายน้ำหนักตัวจากเท้าหลังไปเท้าหน้า ลงสู่พื้นด้วยปลายเท้าและในขณะถ่ายน้ำหนักตัวเท้าทั้งสองไม่อยู่บนพื้น

(3) การกระโดด (jumping) คือการสปริงตัวขึ้นจากพื้นแล้วลงสู่พื้นด้วยเท้าทั้งสองพร้อมกัน

2.2.2 การเคลื่อนไหวแบบไม่เคลื่อนที่ เป็นการใช้ส่วนต่าง ๆ ของร่างกายเคลื่อนไหวโดยที่ร่างกายนั้นอยู่กับที่ เช่น การกระพริบตา การยกมือขึ้นลง การแกว่งแขน-ขาไปมา เป็นต้น ส่วนท่าทางในการปฏิบัติภารกิจในชีวิตประจำวันโดยทั่วไปมีดังนี้

(1) การก้มตัว (bending) คือ การงอพับตัวให้ร่างกายส่วนบนลงมาใกล้กับส่วนล่าง

(2) การบิดตัว (twisting) คือการทำส่วนต่าง ๆ ของร่างกายบิดไปจากแกนตั้ง

(3) การดึง (pulling) คือการพยายามทำสิ่งใดสิ่งหนึ่งเข้ามาหาร่างกายหรือทิศทางใดทิศทางหนึ่ง

(4) การดัน (pushing) คือการพยายามทำสิ่งใดสิ่งหนึ่งให้ห่างออกจากร่างกาย

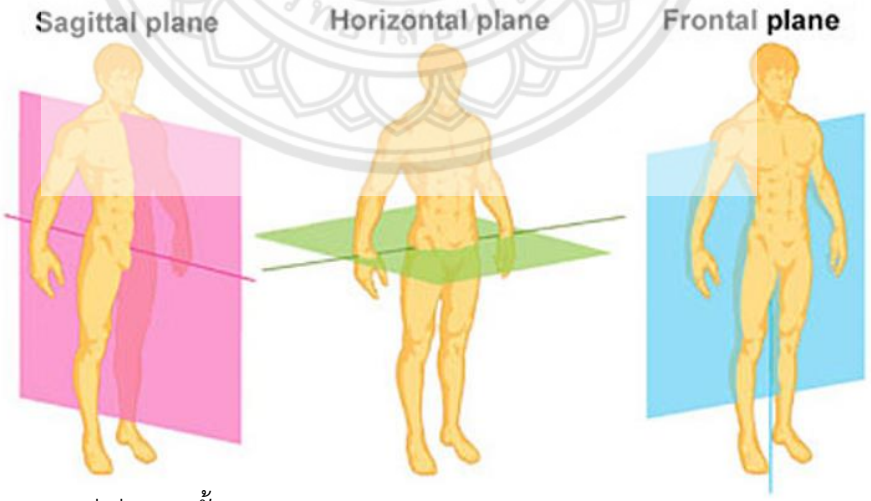
2.3 พิสัยการเคลื่อนไหว (Range Of Motion; ROM)

พิสัยการเคลื่อนไหว คือ ขนาดและทิศทางของการเคลื่อนไหวของร่างกาย ณ จุดข้อต่อที่เคลื่อนที่ผ่านระนาบใดระนาบหนึ่ง โดยทั่วไปพิสัยการเคลื่อนไหวของร่างกายมีความอิสระและ เคลื่อนไหวได้หลายทิศทาง ซึ่งค่าพิสัยของการเคลื่อนไหวนี้จะระบุหน่วยเป็นองศา ดังนั้นค่าพิสัยจึง อยู่ระหว่าง 0 - 360 องศา ในแนวแกนใดแกนหนึ่งจากทั้งหมด 3 แกน ดังรูปที่ 2.6 ได้แก่

1) sagittal plane เป็นระนาบในแนวตั้ง ผ่านร่างกายจากด้านหน้าไปด้านหลัง แบ่งร่างกายออกเป็นด้านซ้ายและด้านขวา การเคลื่อนไหวในระนาบนี้เป็นการเคลื่อนไหวขึ้นและลง

2) horizontal plane เป็นระนาบแนวนอน แบ่งร่างกายออกเป็นด้านบนและด้านล่าง

3) frontal plane เป็นระนาบในแนวตั้ง ผ่านร่างกายในด้านข้าง แบ่งร่างกายออกเป็นส่วนหน้าและส่วนหลัง การเคลื่อนไหวในระนาบนี้เป็นการเคลื่อนไหวด้านข้าง

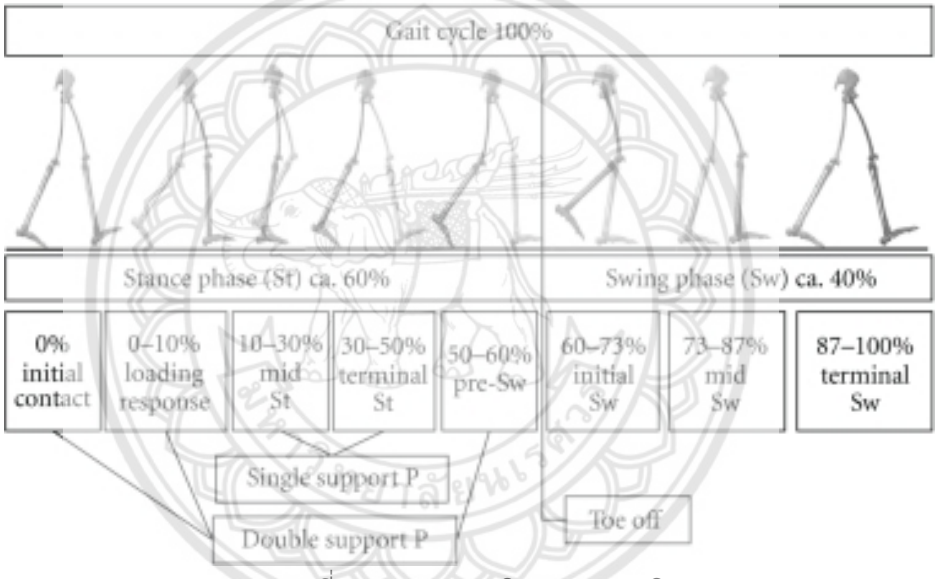


รูปที่ 2.6 การแบ่งร่างกายทั้ง 3 ระนาบ:Sagittal plane, horizontal plane and frontal plane [8]

2.4 การเดิน

การเดินคือการเคลื่อนที่โดยการใช้ขาทั้ง 2 ข้างสลับกันอย่างเป็นจังหวะ และมีการเคลื่อนไหวของลำตัวเพื่อให้จุดศูนย์ถ่วงของร่างกายเคลื่อนที่ไปข้างหน้า

2.4.1 วงจรการเดิน (gait cycle) การเดินเป็นการเคลื่อนไหวอย่างต่อเนื่องในลักษณะซ้ำ ๆ โดยไม่มีจุดเริ่มต้น และจุดสิ้นสุดที่ชัดเจน จึงมักมีการอธิบายการเคลื่อนไหวขณะเดินเป็นระยะต่างๆในหนึ่งวงจรหรือหนึ่งรอบการเดิน โดยหนึ่งวงจรการเดินจะเริ่มจากระยะที่ส้นเท้าของขาข้างหนึ่งสัมผัสพื้นและสิ้นสุดเมื่อเท้าของขาข้างนั้นสัมผัสพื้นอีกครั้ง จะคิดเป็นระยะทางมีค่าเท่ากับ 100 เปอร์เซ็นต์ ระยะเวลาที่ใช้ ในช่วงการเดินต่างๆ มีรายละเอียดดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 วงจรการเดินของคนปกติ [9]

2.4.2 ช่วงรับน้ำหนัก (stance phase) คือ ระยะที่ขาข้างนั้นยังคงวางอยู่บนพื้นใช้เวลา 0-60% ของวงจรการเดิน เริ่มจากเมื่อส้นเท้าแตะพื้น และสิ้นสุดเมื่อ เท้าข้างนั้นพ้นพื้นการเดินช่วงนี้จะแบ่งได้อีก 5 ระยะ คือ

(1) ระยะที่ส้นเท้านั้นสัมผัสกับพื้น (initial contact)

(2) ระยะหลังจากที่ส้นเท้าแตะพื้น ฝ่าเท้าทั้งหมดจะวางราบกับพื้น (loading response)

(3) ระยะที่มีการเคลื่อนไหวของลำตัวมาด้านหน้ามากขึ้น เท้าจะรับน้ำหนักของร่างกายทั้งหมด ระยะนี้สิ้นสุดเมื่อส้นเท้าพ้นจากพื้น (mid stance)

(4) ระยะที่ส้นเท้ายกสูงจากพื้น ลำตัวจะเอนไปข้างหน้ามากขึ้น (terminal stance)

(5) ระยะที่ปลายเท้ากำลังถีบพื้น นิ้วเท้าดันให้ขาไปข้างหน้า (toe off)

2.4.3 ช่วงแกว่งขา (swing phase) คือ ระยะที่ขาข้างนั้นยกลอยขึ้นจากพื้นใช้เวลา 60-100% ของวงจรการเดิน เป็นช่วงที่ขาแกว่งเท้าพ้นพื้นการเดินช่วงนี้จะแบ่งออกได้อีก 3 ระยะ คือ

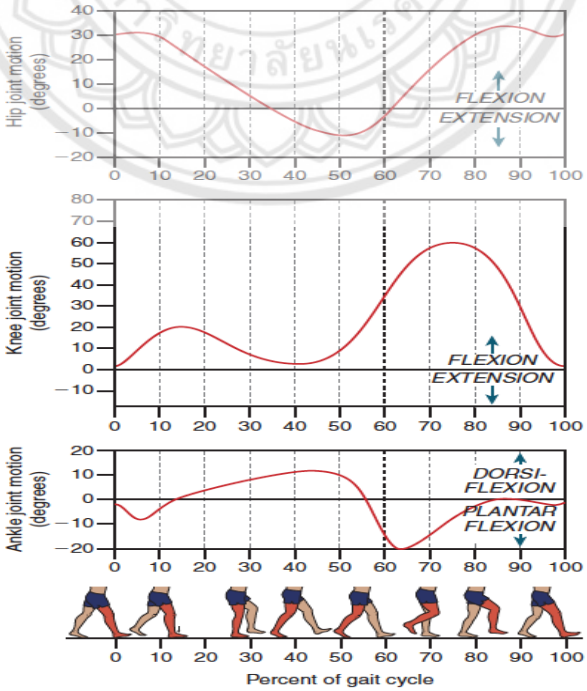
(1) ระยะมีอัตราเร่ง เป็นระยะแรกของช่วงแกว่งขา ขาจะมีอัตราเร่งเพื่อให้เท้าก้าวต่อไป ระยะนี้ลำตัวจะอยู่หน้าต่อขาที่แกว่ง

(2) ระยะแกว่งกลาง เป็นระยะที่ขากำลังแกว่งอยู่ในแนวใต้ลำตัว เป็นระยะที่ขาหดสั้นมากที่สุดเพื่อให้เท้าพ้นพื้น กล้ามเนื้อที่ทำงานเหมือนกับในระยะ acceleration ทุกประการ

(3) ระยะลดอัตราเร่ง เป็นระยะที่ขาเคลื่อนไหวมาด้านหน้าต่อลำตัว และมีการลดอัตราเร่งของขาลง โดยการทำงานของกล้ามเนื้อเพื่อให้ส้นเท้าแตะพื้น ระยะนี้ลำตัวจะอยู่หลังต่อขาที่แกว่ง

2.4.4 ช่วงที่เท้าทั้งสองข้างแตะพื้นพร้อมกัน (double support) คือ ช่วงเวลาที่เท้าทั้งสองแตะพื้นเวลาเดียวกัน โดยที่ขาข้างหนึ่งอยู่ในระหว่าง heel-off และ toe-off ส่วนขาอีกข้างอยู่ในระหว่าง heel strike และ foot flat คิดเป็นสัดส่วน 20-25% ของวงจรการเดิน

2.4.5 รูปแบบมุมที่เกิดจากการเดินในระนาบ sagittal plane ดังรูปที่ 2.8 เป็นการแสดงความสัมพันธ์องศาระหว่างข้อสะโพก ข้อเข่า และ ข้อเท้า เปรียบเทียบกับ percent gait cycle ในข้อสะโพก (hip joint motion) มีมุมงอขาและมุมเหยียดขาในข้อเข่า (knee joint motion) มีมุมงอเข่าและมุมเหยียดเข่า ในข้อเท้า (ankle joint motion) มีมุมงอข้อเท้าและมุมเหยียดข้อเท้า



รูปที่ 2.8 รูปแบบมุมที่เกิดจากการเคลื่อนไหวในระนาบ sagittal plane [10]

2.4.6 ตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการเดิน

การวิเคราะห์การเดินจำเป็นต้องพิจารณาตัวแปรต่าง ๆ ทางด้านระยะทาง (spatial parameters) ระยะเวลา (temporal parameters) ความหมายและค่าปกติของตัวแปรที่เกี่ยวข้องมีความสำคัญต่อการวิเคราะห์ความผิดปกติทางด้านการเดินของผู้ป่วย

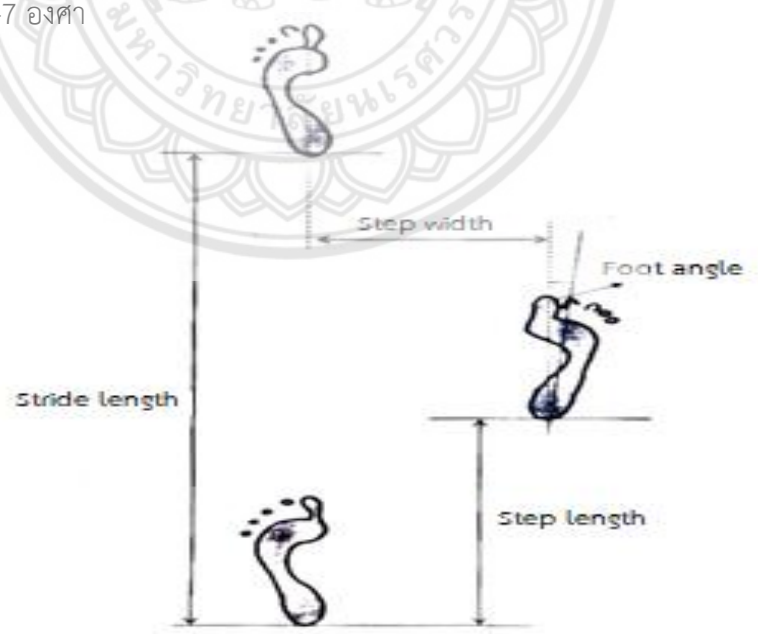
ตัวแปรด้านระยะทาง (spatial parameter) [12] ดังรูปที่ 2.9

(1) ความยาวของรอบการเดิน (stride length) คือ ระยะทางซึ่งวัดจากส้นเท้าของขาข้างหนึ่งถึงส้นเท้าของขาข้างเดิมแตะพื้นอีกครั้ง ค่าปกติประมาณ 144 เซนติเมตร

(2) ความยาวก้าว (step length) คือ ระยะทางซึ่งวัดจากส้นเท้าของขาข้างหนึ่งถึงส้นเท้าของขาอีกข้าง ความยาวก้าวที่วัดได้เป็นความยาวก้าวของขาที่อยู่ข้างหน้า ค่าปกติประมาณ 72 เซนติเมตร

(3) ความกว้างของฐานการเดิน (step width) คือ ระยะห่างระหว่างจุดกึ่งกลางของส้นเท้าทั้งสองข้างในแนวตั้งฉากกับแนวของการเดิน ค่าปกติประมาณ 8-10 เซนติเมตร

(4) มุมการวางเท้า (foot angle) คือ คือ มุมการเบนของเท้าที่เทียบกับแนวการเดิน โดยใช้เส้นที่ลากจากจุดกลางส้นเท้าผ่านนิ้วชี้ของเท้า ปกติมุมนี้มักจะเป็นมุมที่เบนออกจากแนวของการเดิน ค่าปกติประมาณ 5-7 องศา



รูปที่ 2.9 การวัดค่า stride width, stride length, step length, foot angle จาก footprints [11]

ตัวแปรด้านระยะเวลา (temporal parameter) [12]

(1) เวลาที่ใช้เดินในหนึ่งรอบ (cycle time) คือ ระยะเวลาซึ่งวัดจากส้นเท้า ของขาข้างหนึ่งถึงส้นเท้าของขาข้างเดิมแตะพื้นอีกครั้ง

(2) ความถี่ของก้าว (cadence) คือ จำนวนก้าวต่อหนึ่งหน่วยเวลา โดยมีค่าเฉลี่ยปกติประมาณ 70-130 steps/min

(3) ความเร็วของการเดิน (velocity) คือ ระยะทางที่เดินได้ในหนึ่งหน่วยเวลาซึ่งขึ้นกับความยาวก้าว และความถี่ของก้าว โดยมีค่าเฉลี่ยปกติเท่ากับ 80 เมตรต่อนาที

2.5 สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ภายในชั้น (Intraclass Correlation Coefficient : ICC)

สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ภายในชั้นถูกใช้กันอย่างกว้างขวาง เพื่อประเมินผลความน่าเชื่อถือระหว่างผู้สังเกต (Inter-rater Reliability) การทดสอบและทดสอบซ้ำ (Test-retest Reliability) และความน่าเชื่อถือของผู้ประเมิน (Intra-rater Reliability) [13]

(1) One-Way Random-Effects Model หน่วยตัวอย่างจะถูกประเมินโดยผู้ประเมินหรือกลุ่มผู้ประเมินที่แตกต่างกัน ซึ่งผู้ประเมินหรือกลุ่มผู้ประเมินจะถูกสุ่มมาจากประชากรขนาดใหญ่

(2) Two-Way Random-Effects Model หน่วยตัวอย่างจะถูกประเมินโดยผู้ประเมินหรือกลุ่มผู้ประเมินเดียวกัน ซึ่งผู้ประเมินหรือกลุ่มผู้ประเมินจะถูกสุ่มมาจากประชากรขนาดใหญ่

(3) Two-Way Mixed-Effects Model หน่วยตัวอย่างจะถูกประเมินโดยผู้ประเมินหรือกลุ่มผู้ประเมินเดียวกัน ซึ่งผู้ประเมิน หรือกลุ่มผู้ประเมินถูกเลือกมาจากผู้ประเมินที่สนใจ

ตารางที่ 2.1 ตัวอย่างแบบจำลองและสูตรการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ภายในชั้น

แบบจำลองการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ภายในชั้นของ McGraw & Wong (1996)	แบบจำลองการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ภายในชั้นของ Shrout & Fliess (1979)	สูตรในการคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ภายในชั้นของ
Two-Way Mixed-Effects Model	ICC(3,k)	$\frac{MS_R - MS_E}{MS_R}$

เมื่อ MS_R คือ ค่าเฉลี่ยกำลังสองระหว่างแถว

MS_W คือ ค่าเฉลี่ยกำลังสองของความแปรปรวนของความคลาดเคลื่อน

MS_E คือ ค่าเฉลี่ยกำลังสองของความคลาดเคลื่อน

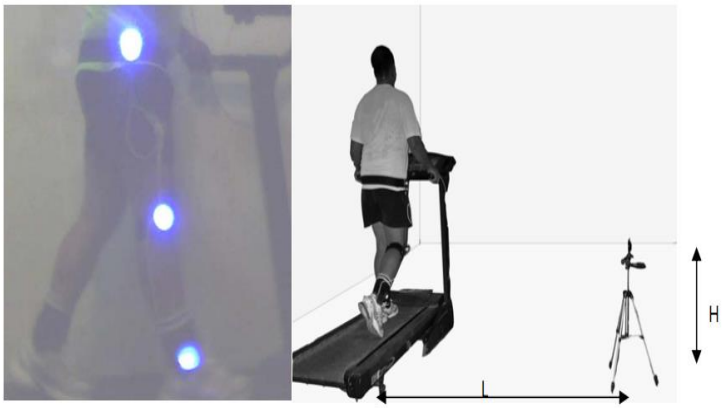
MS_C คือ ค่าเฉลี่ยกำลังสองระหว่างหลัก

n คือ จำนวนตัวอย่าง

k คือ จำนวนผู้ประเมิน/วิธีการวัด

2.5 วรรณกรรมปริทรรศน์

เฉลิมพล คงเขียว ในปี พ.ศ. 2553 [14] ได้ทำการศึกษาทดลองการใช้ระบบภาพเคลื่อนไหวแบบไดนามิกส์ในการวิเคราะห์การเดินของมนุษย์ โดยใช้อุปกรณ์ที่มีราคาไม่สูง ซึ่งประกอบด้วยกล้องวิดีโอ (webcam) ความเร็วในการจับภาพ 30 fps 1 ตัว หลอด LED สีน้ำเงิน เป็น marker ติดด้านข้างลำตัวตามตำแหน่งข้อสะโพก ข้อเข่า และข้อเท้า ดังรูปที่ 2.1 โดยใช้อาสาสมัครจำนวน 15 คน เพศชาย 12 คน และเพศหญิง 3 คน ที่มีความสูงตั้งแต่ 147 cm. ถึง 181 cm. ซึ่งมีผู้พิการที่ขาขวา 1 คน โดยนำอาสาสมัครมาเดินบนลู่วิ่งไฟฟ้า ที่ความเร็ว 4 km/h และใช้โปรแกรม LabVIEW ในการวิเคราะห์ภาพแบบ real time จากผลการทดสอบการคำนวณหาค่ามุมสะโพก และมุมเข่า ของเครื่องมือวัดพบว่ามีค่า error น้อยกว่า 1% โดยมีค่าความละเอียดการคำนวณตำแหน่งมาร์คเกอร์ที่ 1.7 mm ที่ระยะห่างจากกล้องถึงมาร์คเกอร์ 2 m และพบว่ากรณีของอาสาสมัครผู้ที่พิการขาขวามีแนวโน้มของค่าที่แตกต่างจากผู้ทดสอบคนอื่น ๆ จากผลการทดลองนี้สามารถช่วยวิเคราะห์การเดินของมนุษย์ได้ในระดับหนึ่ง เนื่องจากการทดลองนี้ เป็นการทดลองโดยใช้กล้องพียงตัวเดียวจึงมีข้อจำกัดทางด้านข้อมูลในการวิเคราะห์



รูปที่ 2.10 การวิเคราะห์การเดินบนลู่วิ่งไฟฟ้าด้วยกล้อง 1 ตัว [14]

กฤติยา ก่อเจดีย์ และคณะ ในปี 2557 [15] ได้มีการพัฒนาระบบกล้องวิดีโอบันทึกภาพการเคลื่อนไหวสำหรับการวิเคราะห์การเดินแบบ 2 มิติ ได้ทำการศึกษาในกลุ่มนิสิตมหาวิทยาลัยนเรศวรมีอายุระหว่าง 21-25 ปี จำนวน 20 คน โดยแบ่งเป็น เพศชาย 10 คน และเพศหญิง 10 คน ที่ผ่านเกณฑ์การคัดเข้า และทำการปรับปรุงคุณภาพของกล้องวิดีโอให้มีคุณภาพสูงขึ้น สามารถเก็บข้อมูลการวิจัยได้ในสภาพแวดล้อมที่มีแสงสว่างปกติ ไม่ต้องอาศัยห้องมืดหรือฉากหลังขณะทำการเก็บข้อมูลผลการศึกษาเมื่อทำการทดสอบหาค่าความเที่ยงตรงขณะอยู่นิ่ง และขณะเคลื่อนไหวเมื่อเปรียบเทียบกับมุมมาตรฐาน โดยใช้สถิติ Intra-Class Correlation Coefficient (ICCs) model 3,k ได้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ เท่ากับ 1.00 แสดงถึง การมีค่าความเที่ยงตรง และความน่าเชื่อถืออยู่ในระดับสูงมาก ($p<0.05$) เมื่อทำการทดสอบหาค่าความน่าเชื่อถือในการวัดซ้ำในการเดินของมนุษย์โดยใช้ test-retest reliability ในครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 โดยใช้ Intra-class Correlation Coefficient (ICCs) model 3,k พบว่าข้อสะโพกมีค่าความน่าเชื่อถือของช่วง heel strike และheel contact อยู่ในระดับสูง foot flat, mid stance, heel off, toe off, initial Swing และ mid swing อยู่ในระดับต่ำถึงปานกลาง ข้อเข่ามีค่าความน่าเชื่อถือของช่วง mid swing อยู่ในระดับสูงมาก heel strike, mid stance, heel off และ toe off อยู่ในระดับสูง foot flat, initial swing และ heel contact อยู่ในระดับปานกลาง ข้อเท้ามีค่าความน่าเชื่อถือของช่วง heel strike, foot flat, heel off และ heel contact อยู่ในระดับสูง mid stance, toe off, initial swing และ mid swing อยู่ในระดับต่ำถึงปานกลาง การศึกษานี้มีข้อจำกัดในเรื่องของโปรแกรมที่ใช้สามารถจับ marker ได้เพียงฝั่งขวาของร่างกายในแนว Sagittal เท่านั้น แสงสว่างที่ใช้ในการทดลองต้องสว่างมากพอที่จะสามารถสะท้อน marker ให้โปรแกรมจับได้ ชัดเจน และไม่สามารถจับ marker ในสถานที่ที่มีการถ่ายย้อนแสงได้

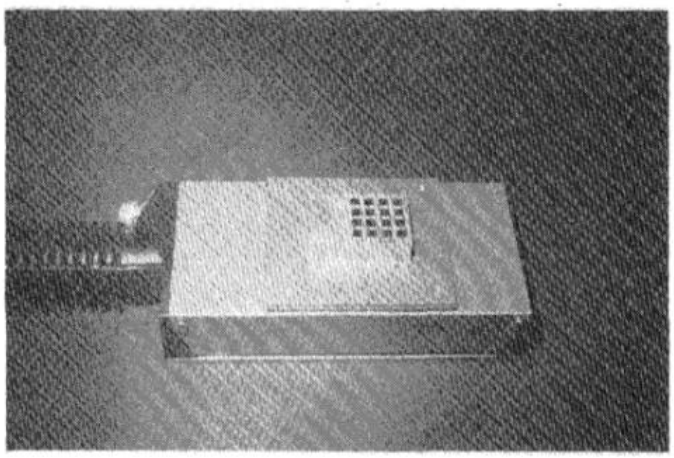
กรรณิการ์ กำมะหยี่ และคณะในปี 2558 [16] ได้พัฒนาระบบกล้องวิดีโอบันทึกภาพการเคลื่อนไหวสำหรับการวิเคราะห์การเดินแบบ 2 มิติต่อจากการศึกษาของกฤติยา ก่อเจดีย์ และคณะ [15] ได้ทำการศึกษาในกลุ่มนิสิตมหาวิทยาลัยนเรศวรที่มีอายุระหว่าง 21-25 ปี จำนวน 20 คน โดยแบ่งเป็นเพศชาย 10 คน เพศหญิง 10 คน ที่ผ่านเกณฑ์การคัดเข้า และทำการปรับปรุงคุณภาพวิดีโอ ให้มีคุณภาพดีขึ้น และความเร็วของระบบกล้องในการรับภาพขณะเดินให้ใกล้เคียงค่าปกติของการเดิน ทำให้จับภาพได้ชัดเจนมากขึ้น สามารถเก็บข้อมูลได้ในสภาพแวดล้อมที่มีแสงสว่างปกติ ไม่ต้องอาศัย ห้องมืดหรือฉากหลังขณะทำการเก็บข้อมูล ผลการศึกษาเมื่อทำการทดสอบความเที่ยงตรงกับมุม มาตรฐานขณะอยู่นิ่งและขณะเคลื่อนไหว โดยใช้สถิติ Intra-class Correlation Coefficient (ICCS) model 3,k ได้ค่าสัมประสิทธิ์ของ ICCs ขณะอยู่นิ่งเท่ากับ 1.00 ($p<0.05$) แสดงถึงค่าความ เที่ยงตรงอยู่ในระดับดีเยี่ยม และได้ค่าสัมประสิทธิ์ของ ICCS ขณะเคลื่อนไหวในข้อสะโพกเท่ากับ 0.955, ข้อเข่าเท่ากับ 0.982 และข้อเท้าเท่ากับ 0.792 ที่ p value เท่ากับ 0.05 แสดงถึงค่าความเที่ยงตรงและความน่าเชื่อถือในข้อสะโพก และข้อเข่าระดับสูงมาก และข้อเท้าในระดับสูง การศึกษานี้ มีข้อจำกัดในเรื่องของ โปรแกรมที่ใช้สามารถจับ marker เพียงฝั่งขวาของร่างกายในแนว sagittal เท่านั้น แสงสว่างที่ใช้ในการทดลองต้องมากเพียงพอที่จะสามารถสะท้อน marker ไม่สามารถจับ marker ในสถานที่ที่มีการถ่ายย้อนแสงได้ มีสัญญาณรบกวนจากสีเสื้อของผู้ร่วมงานวิจัย ที่คล้ายกับสี ของ marker และความเร็วในการจับภาพของกล้องไม่มากพอที่จะจับการเคลื่อนไหวในช่วง toe off ถึงช่วง Swing phase ได้

สุเมธ เหมะวัฒนะชัย และคณะในปี พ.ศ.2561 [17] ได้พัฒนาระบบกล้อง AT-Gait เป็นนวัตกรรมระบบกล้องและซอฟท์แวร์เพื่อประเมินการเดินแบบสามมิติในผู้สูงอายุ ระบบกล้อง AT-Gait ถูกพัฒนาเพื่อใช้สำหรับเฝ้าระวังและคัดกรองเบื้องต้นในปัญหาการเคลื่อนไหวผิดปกติ โดยระบบที่พัฒนาขึ้นนี้จะตรวจจับตำแหน่งของมาร์คเกอร์ซึ่งถูกติดบนรยางค์ส่วนล่างของผู้ถูกประเมินตาม anatomical landmark ที่ได้กำหนดไว้ โดยซอฟท์แวร์ที่พัฒนาขึ้นจะนำภาพที่ได้จากระบบกล้องมาคำนวณข้อมูลตำแหน่งของมาร์คเกอร์ โดยใช้เทคนิคด้าน image processing จากนั้นจึงนำค่าที่ได้มาคำนวณมุมของข้อต่อต่างๆ ระหว่างการเดินแบบไดนามิกส์สามมิติ เพื่อเปรียบเทียบกับค่าอ้างอิง สำหรับประเมินความผิดปกติที่เกิดขึ้น โดยระบบกล้องและซอฟท์แวร์มีการออกแบบ ทำการผลิตและสอบเทียบ เพื่อให้สามารถเคลื่อนย้าย และติดตั้งได้ง่าย ในด้านการตรวจสอบประเมินความถูกต้องของระบบกล้องและซอฟท์แวร์ที่ได้พัฒนาขึ้นนั้น ทางผู้วิจัยได้นำระบบที่พัฒนาขึ้นไปใช้ในการทดสอบในอาสาสมัครปกติ พบว่าระบบและโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น สามารถตรวจจับองศาเคลื่อนไหวในระหว่างการเดิน ซึ่งเป็นแบบไดนามิกส์ได้ โดยให้ผลการทดสอบซ้ำในวันเดียวกัน และในวันที่

ต่างกัน ได้อย่างสอดคล้อง ด้วยสถิติ Intraclass correlation coefficient (ICC) ในระดับสูงถึงสูงมาก นอกจากนี้ ยังมีการทดสอบเพื่อเปรียบเทียบระหว่างห้องปฏิบัติการกับระบบมาตรฐาน ด้วยอาสาสมัครกลุ่มเดียวกัน โดยได้รับความร่วมมือจากคณะกายภาพบำบัด มหาวิทยาลัยมหิดล โดยผลการศึกษาพบว่า มีความสอดคล้องกันด้วยสถิติ ICC โดยความสอดคล้องในการวัดองศาการเดินของข้อสะโพกและเข่าทั้ง 3 ระนาบ (sagittal, frontal และ horizontal) อยู่ในระดับสูงมาก และส่วนของข้อเท้าอยู่ในระดับสูง

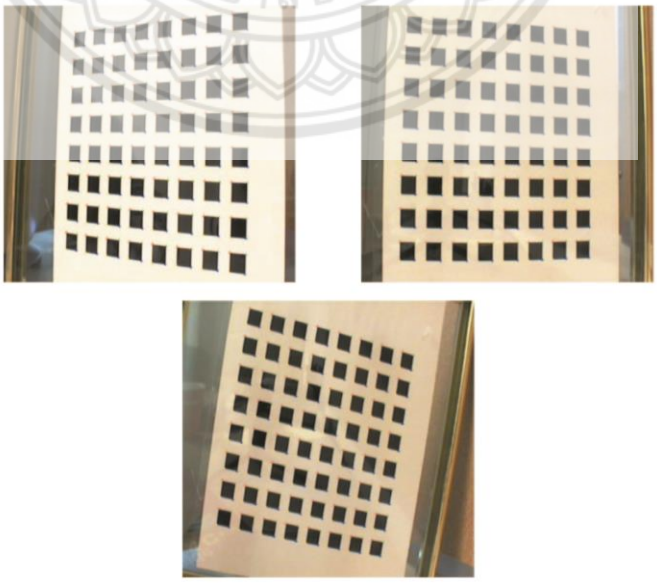
ธนดล บุญลือ และคณะ ในปี พ.ศ. 2561 [18] ได้ทำการปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบกล้องวิดีโอ AT-Gait สำหรับวิเคราะห์การเดินบนลู่วิ่งไฟฟ้า เนื่องจากการเดินบนพื้นจำเป็นต้องมีพื้นที่มาก จึงได้เปลี่ยนการเดินบนพื้นเป็นการเดินบนลู่วิ่งไฟฟ้า ซึ่งมีระยะในการเดินไม่จำกัด และประหยัดพื้นที่ในการทำการทดลอง โดยผู้วิจัยได้ควบคุมความเร็วของสายพานลู่วิ่งไฟฟ้าไว้ที่ความเร็ว 3 km/h ใช้กล้องบันทึกวิดีโอที่ความถี่ 30 fps ฉายไปที่เครื่องหมายแบบสะท้อนแสง (passive marker) และโดยให้ผู้เข้าร่วมการทดลองได้ทดลองเดินไปเรื่อยๆ จนท่าทางการเดินดูเป็นธรรมชาติที่สุด และจึงนำค่าช่วงนั้นมาวิเคราะห์ จากการคำนวณในแนวแกน Z พบว่ามีความคลาดเคลื่อนสูงจึงวิเคราะห์การเดินแค่ระนาบ (X,Y) เพื่อให้มีความน่าเชื่อถือในการวัดระดับดีเยี่ยม เมื่อมีการเคลื่อนย้ายจะทำให้กล้องขยับเอียงอาจส่งผลให้การเก็บข้อมูลในการทำการทดลองเกิดความคลาดเคลื่อนได้ จึงต้องทำการสอบเทียบกับ reference frame ใหม่ทุกครั้ง

Roger Y. Tsai ในปี พ.ศ. 2530 [4] ได้ทำการเสนอเทคนิค สำหรับการสอบเทียบกล้องแบบ 3 มิติ โดยใช้กล้องที่หาได้ทั่วไป โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้มีประสิทธิภาพในด้านการคำนวณตำแหน่งและทิศทางของกล้องที่สัมพันธ์กับระบบพิกัดอ้างอิง รวมทั้งความยาวโฟกัส และการบิดเบี้ยวเนื่องจากเลนส์ในแนวรัศมีและพารามิเตอร์การสแกนภาพ นอกจากนี้เทคนิคนี้ยังมีข้อได้เปรียบในด้านความแม่นยำ ความเร็วและความสามารถอเนกประสงค์ ทดสอบ โดยการใช้แผ่นเหล็กที่ถูกพิมพ์เป็นรูปสี่เหลี่ยมจำนวน 16 จุดที่ซึ่งทราบตำแหน่งบนพิกัดโลก เมื่อทำการจัดตั้งกล้องแล้วถ่ายภาพออกมาจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างจุด 2 มิติในภาพ กับจุดบนพิกัดโลก 3 มิติ จากนั้นนำข้อมูลความสัมพันธ์ที่ได้มาแก้หาค่าพารามิเตอร์ของกล้อง



รูปที่ 2.11 แผ่นเหล็กที่ด้านบนพิมพ์เป็นรูปสี่เหลี่ยม เป็นจุดที่ใช้สำหรับการสอบเทียบ [4]

Zhengyou Zhang ในปี พ.ศ. 2543 [6] ได้นำเสนอหลักการในการพัฒนาเทคนิคการสอบเทียบกล้องแบบใหม่ ที่ยืดหยุ่นและง่ายขึ้นสำหรับประมาณพารามิเตอร์ของกล้อง โดยใช้กระดานจุดจำนวนหนึ่งที่รู้ตำแหน่งของจุดเหล่านั้นก่อนแล้วดังรูปที่ 2.3 จึงทำให้ทราบความสัมพันธ์ระหว่างจุดสองมิติในภาพกับตำแหน่งโลกสามมิติ จากนั้นจึงนำความสัมพันธ์ดังกล่าวมาแก้สมการหาค่าของพารามิเตอร์โดยใช้ closed-form solution โดยคำตอบจากสมการที่เป็นค่าเริ่มต้นในการหาค่าต่ำแบบไม่เชิงเส้น

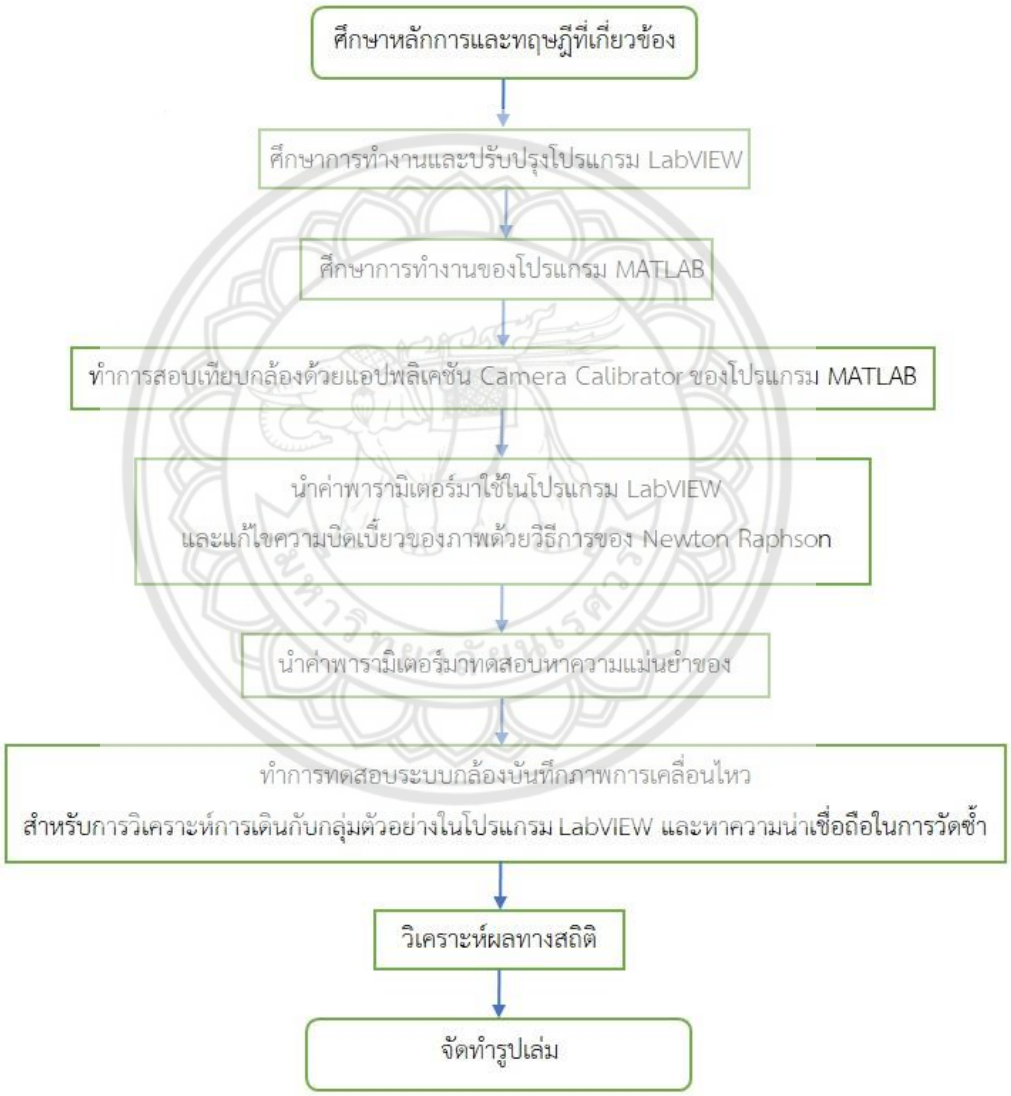


รูปที่ 2.12 รูปแบบแผ่นกระดานที่ใช้สำหรับการสอบเทียบกล้องของ Zhang [6]

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงาน

3.1 แผนผังขั้นตอนการดำเนินโครงงาน



รูปที่ 3.1 แผนผังขั้นตอนการดำเนินโครงงาน

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการจัดทำโครงงาน

1) กล้อง webcam จำนวน 2 ตัว มีความเร็วในการรับภาพสูงสุด 60 ภาพต่อวินาที มีเลนส์รับแสงอินฟราเรด และชุดอุปกรณ์ขาตั้งกล้อง (รูปที่ 3.2 ก.)

2) Computer PC: ยี่ห้อ LENOVO Intel Core I3-4160 RAM 4.0 GB (รูปที่ 3.2 ข.) ที่ติดตั้งโปรแกรม LabVIEW 2013

Laptop: ยี่ห้อ Acer รุ่น Nitro5 Intel Core I5-9300H RAM 16.0 GB (รูปที่ 3.2 ค.) ที่ติดตั้งโปรแกรม LabVIEW 2019 และโปรแกรม MATLAB 2018

3) กระดานสอบเทียบเป็นตารางหมากรุกขนาด 7x9 ช่อง แต่ละช่องมีขนาด 41 มิลลิเมตร (รูปที่ 3.2 ง.)

4) ฉากอ้างอิง (reference frame) (รูปที่ 3.2 จ.)

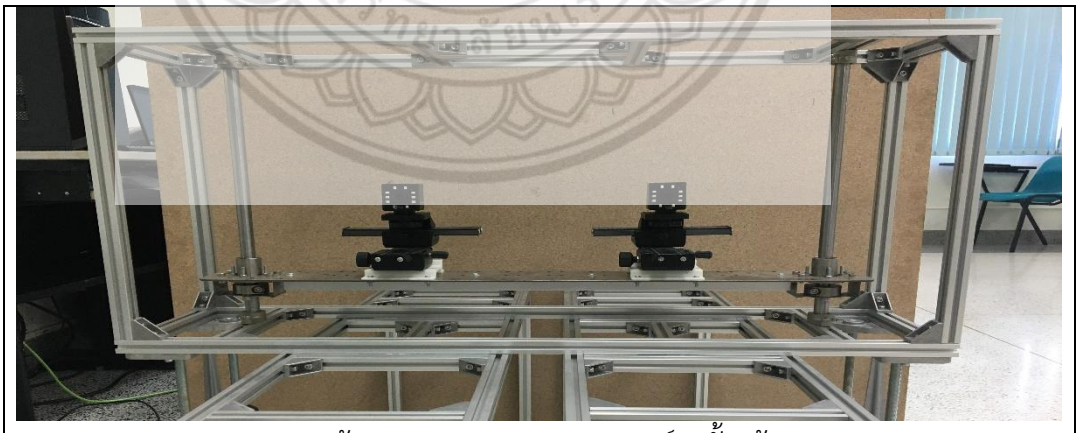
5) marker สะท้อนแสงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 14 มิลลิเมตร (รูปที่ 3.2 ฉ.)

6) marker อินฟาเรดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 14 มิลลิเมตร (รูปที่ 3.2 ช.)

7) ลู่วิ่งไฟฟ้า (รูปที่ 3.2 ซ.)

8) กางเกงขายาวสีดำ (รูปที่ 3.2 ฌ.)

9) ตลับเมตร (รูปที่ 3.2 ญ.)

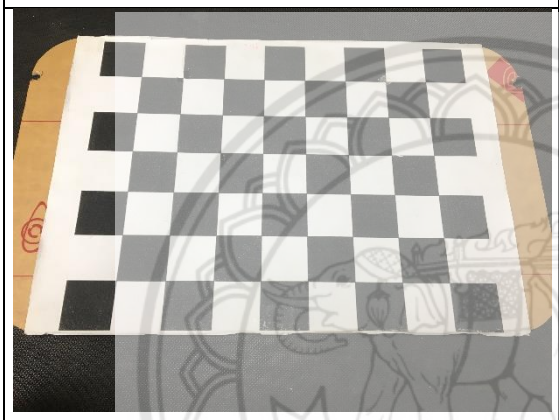


ก. กล้อง webcam และชุดอุปกรณ์ขาตั้งกล้อง

รูปที่ 3.2 เครื่องมือที่ใช้ในโครงงาน

ข. computer PC

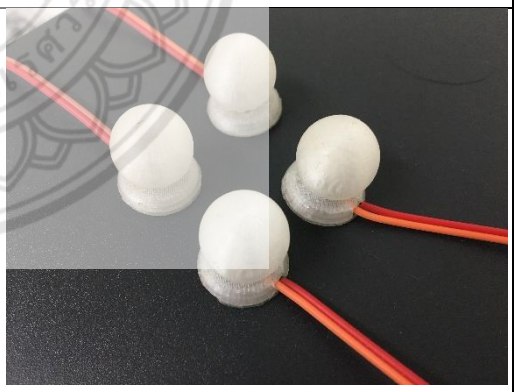
ค. Laptop



ง. กระดานสอบเทียบ

จ. ฉากอ้างอิง

ฉ. marker สะท้อนแสง

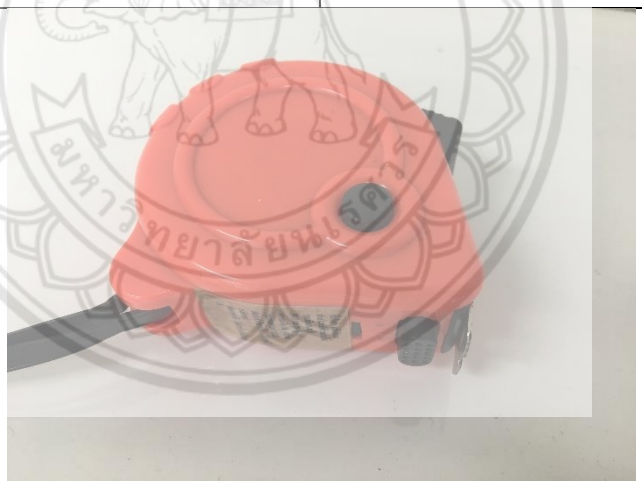


ช. marker อินฟาเรด

รูปที่ 3.2 เครื่องมือที่ใช้ในโครงงาน (ต่อ)

ซ. ลู่วิ่งไฟฟ้า

ฌ. กางเกงขายาวสีดำ



ญ. ตลับเมตร

รูปที่ 3.2 เครื่องมือที่ใช้ในโครงงาน (ต่อ)

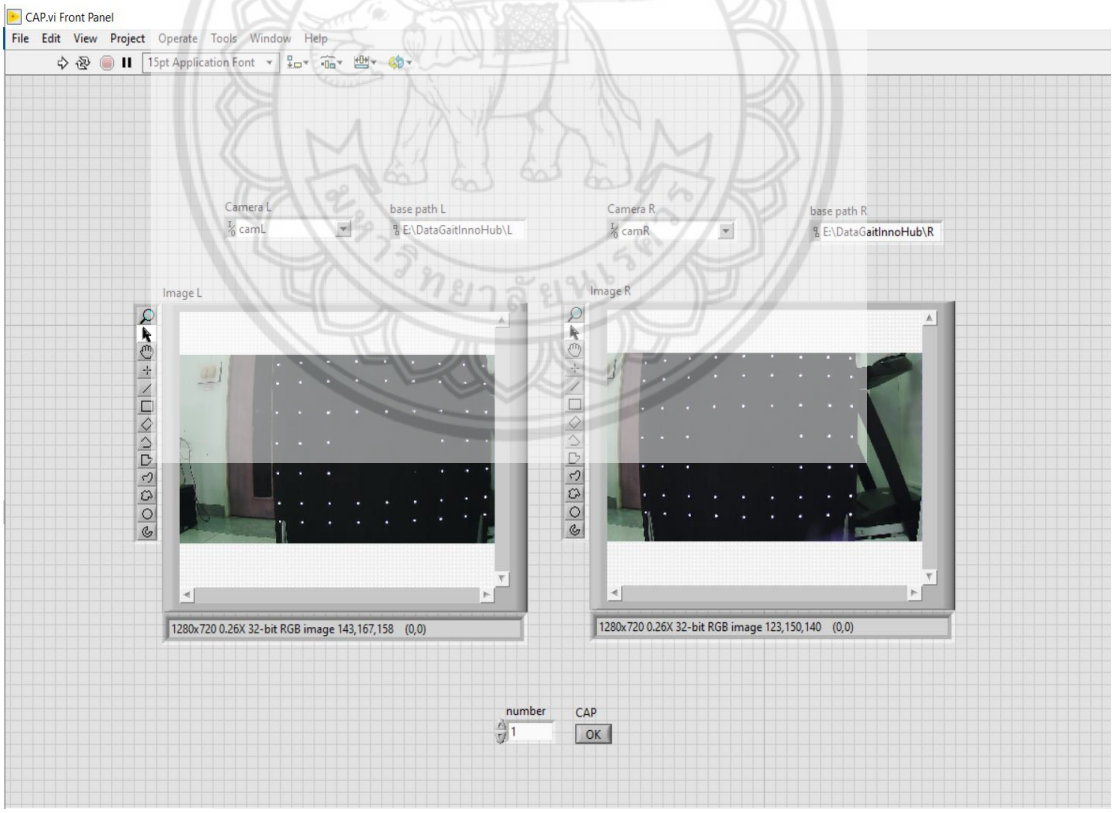
3.3 ศึกษาหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ทำการศึกษาหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับโครงงาน ดังนี้

- ศึกษาหลักการสอบเทียบกล้องและการปรับแก้ค่าความบิดเบี้ยวของกล้อง
- ศึกษาทฤษฎีการเดิน และการทำงานของข้อต่างๆ ในขณะเดิน

3.4 ศึกษาการทำงานและปรับปรุงโปรแกรม LabVIEW

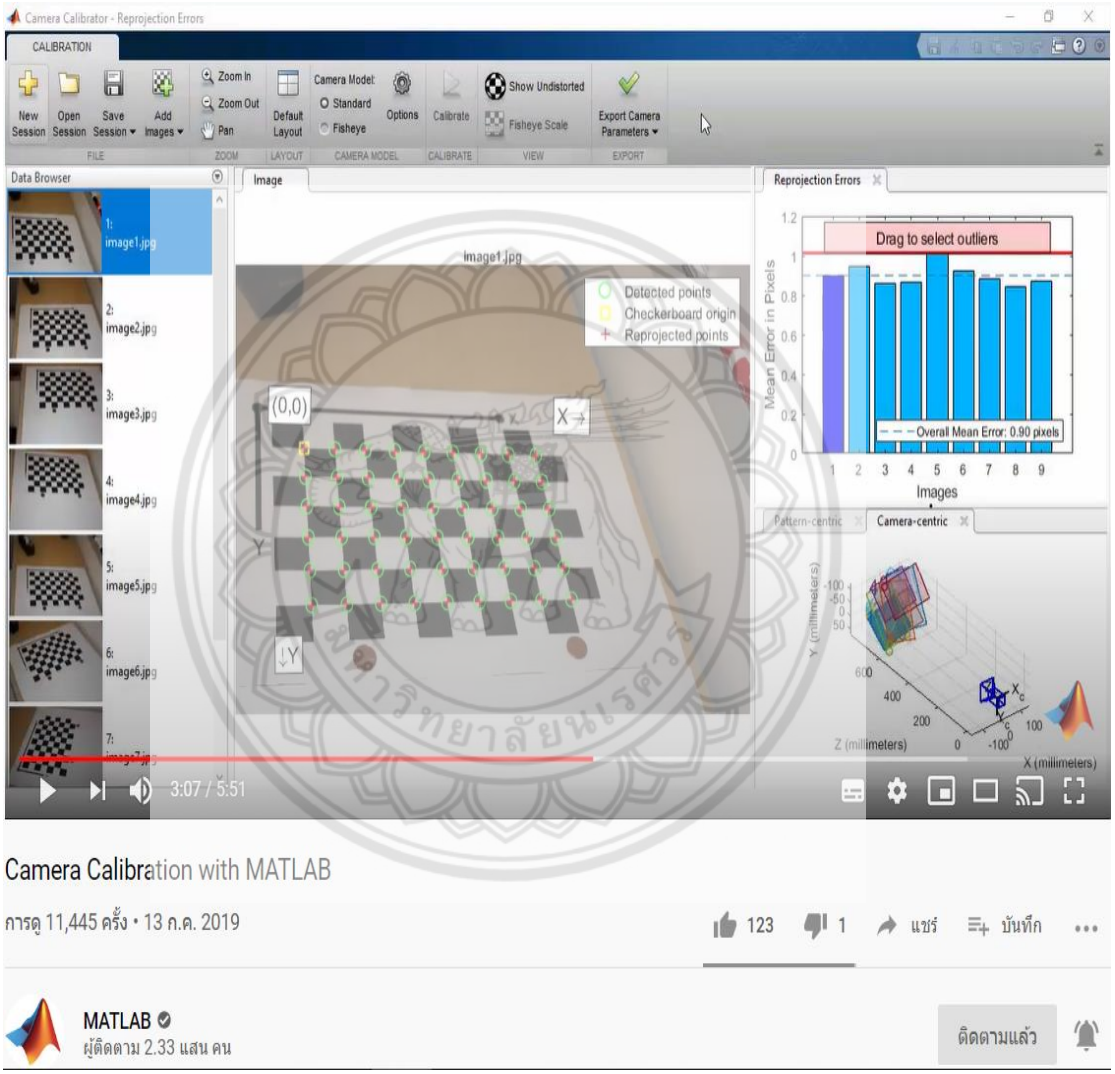
ในโครงงานนี้คณะผู้จัดทำได้เปลี่ยนรูปแบบเป็นการใช้รูปภาพจำนวนมากพร้อมกันสองกล้องในเวลาเดียวกันสำหรับการสอบเทียบกล้อง คณะผู้จัดทำจึงได้ศึกษาการทำงานและเขียนโปรแกรมขึ้นมาดังรูปที่ 3.3 นอกจากนี้ยังได้ทำการปรับปรุงโปรแกรมบางส่วนของโครงงานที่ผ่านมาทำให้การสอบเทียบกล้องใช้เวลาน้อยลง



รูปที่ 3.3 โปรแกรมสำหรับจับภาพสองกล้องในเวลาเดียวกัน

3.5 ศึกษาการทำงานของโปรแกรม MATLAB

ศึกษาการทำงานของแอปพลิเคชัน Camera Calibrator ในโปรแกรม MATLAB ซึ่งอยู่ในส่วนของ Image processing toolbox โดยการศึกษาขั้นตอนการสอบเทียบกล้อง และศึกษาพารามิเตอร์ที่ได้จากการสอบเทียบกล้องของโปรแกรม MATLAB

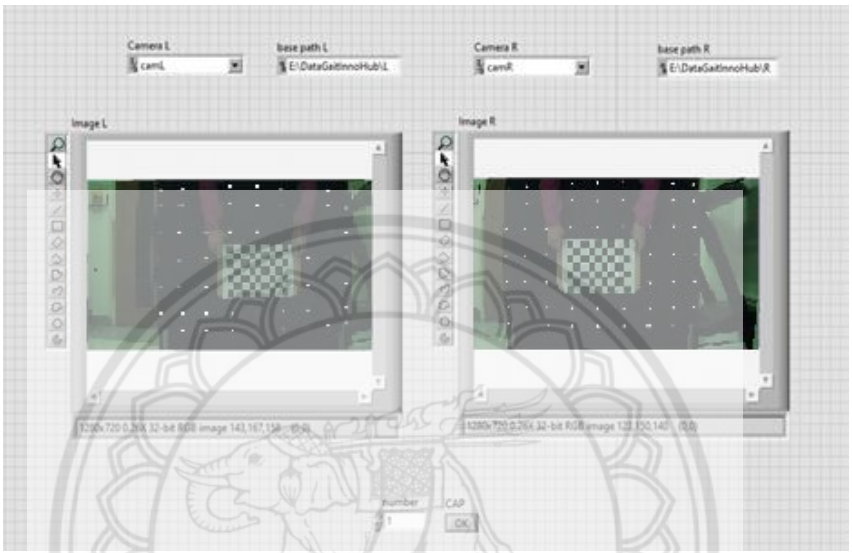


รูปที่ 3.4 ศึกษาการทำงานของแอปพลิเคชัน Camera Calibrator ในโปรแกรม MATLAB [19]

3.6 สอบเทียบกล้องด้วยแอปพลิเคชัน Camera Calibration ของโปรแกรม MATLAB

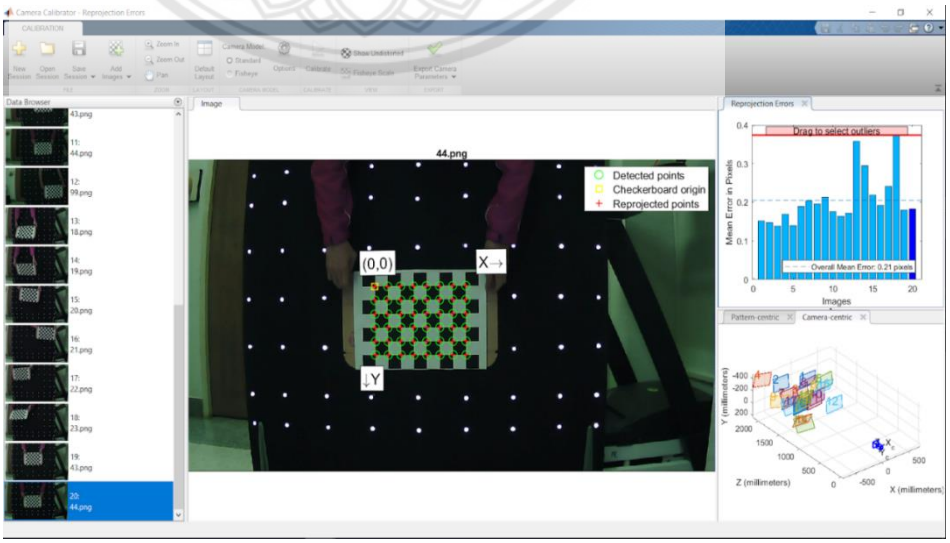
ขั้นตอนการสอบเทียบกล้องมีดังนี้

1) ใช้กล้องถ่ายรูปภาพของกระดานสอบเทียบหลายมุมมองทั้งกล้องซ้ายและกล้องขวาในเวลาเดียวกันด้วยโปรแกรม LabVIEW ดังรูปที่ 3.5



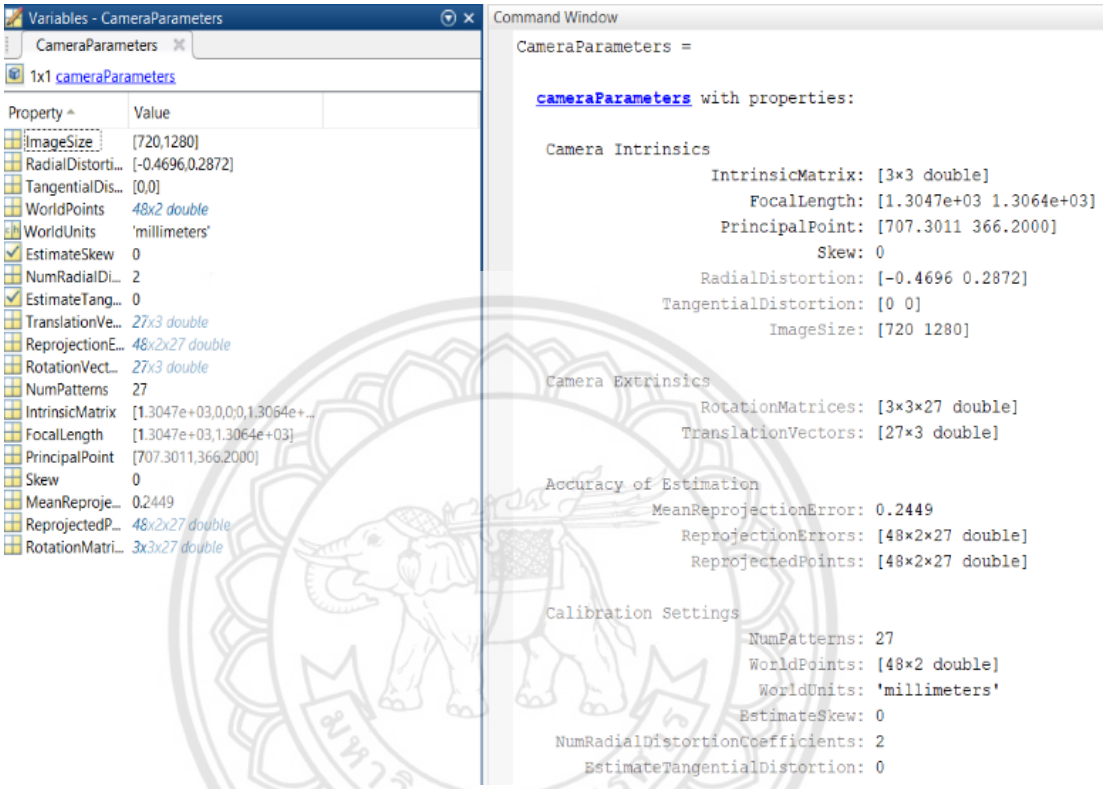
รูปที่ 3.5 การถ่ายรูปภาพกระดานสอบเทียบ

2) นำรูปภาพกระดานสอบเทียบที่ถ่ายเสร็จแล้ว Import เข้ามาในแอปพลิเคชัน Camera Calibrator ของโปรแกรม MATLAB จำนวน 10-20 รูปแล้วให้โปรแกรมทำการคำนวณค่าพารามิเตอร์ของกล้องออกมาจะได้พารามิเตอร์ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.6 การสอบเทียบกล้องโดยใช้แอปพลิเคชัน Camera Calibrator ของโปรแกรม MATLAB

3) นำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการสอบเทียบกล้องนี้ มาทำการแปลงค่า จากนั้นนำไปใช้คำนวณต่อในโปรแกรม LabVIEW โดยพารามิเตอร์ที่นำไปใช้ ได้แก่ IntrinsicMatrix, FocalLength, PrincipalPoint, RadialDistortion, RotationMatrices และ TranslationVector



รูปที่ 3.7 ตัวอย่างค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการสอบเทียบกล้องในโปรแกรม MATLAB

3.7 นำค่าพารามิเตอร์มาใช้ในโปรแกรม LabVIEW และแก้ไขความบิดเบี้ยวของภาพ

ขั้นตอนนี้จะเป็นการนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการสอบเทียบกล้องในโปรแกรม MATLAB เป็นค่าที่กล้องมองจุดเริ่มต้น (origin) ของกระดานสอบเทียบ แต่คณะผู้จัดทำต้องการค่าที่จุดเริ่มต้นมองกล้องเพื่อที่จะนำไปใช้คำนวณในโปรแกรม LabVIEW จะได้สมการดังนี้

$$P = (Rot) \cdot (-Tv) \quad (1)$$

โดยกำหนดให้

P คือ Translation Vectors ที่จุดเริ่มต้นมองกล้อง

Rot คือ Rotation Matrices ของลำดับภาพที่เลือก

Tv คือ Translation Vectors ของลำดับภาพที่เลือก

ขั้นตอนต่อไปคือการแก้สมการเพื่อทำการแก้ไขภาพให้จุดที่อยู่บนภาพตรงไม่เกิดการบิดเบี้ยว โดยใช้สมการการแก้ไขความบิดเบี้ยวของ Zhang [6] ซึ่งเป็นสมการแบบไม่เชิงเส้น (Non-linear) ดังสมการ

$$x_d = x[1 + k_1(x^2 + y^2) + k_2(x^2 + y^2)^2] \quad (2a)$$

$$y_d = y[1 + k_1(x^2 + y^2) + k_2(x^2 + y^2)^2] \quad (2b)$$

ระบบสมการเชิงเส้นที่พบกันโดยทั่วไปนั้น จะประกอบด้วยสมการตัวแปรตาม n สมการ และประกอบด้วยตัวแปรต้น n สมการ ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} f_1(x_1, x_2 \ldots, x_n) &= 0 \quad \text{or} \quad f_1(X) = 0 \\ f_2(x_1, x_2 \ldots, x_n) &= 0 \quad \text{or} \quad f_2(X) = 0 \\ &\vdots \quad\quad \vdots \quad\quad \vdots \\ f_n(x_1, x_2 \ldots, x_n) &= 0 \quad \text{or} \quad f_n(X) = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

โดยกำหนดให้

X คือ Row matrix ซึ่งมีสมาชิก $x_1, x_2 \ldots\ldots, x_n$ ตามลำดับ

F คือ Column matrix ซึ่งมีสมาชิก $f_1, f_2 \ldots\ldots, f_n$ ตามลำดับ

จากสมการการแก้ไขความบิดเบี้ยวของภาพข้างต้น ผู้จัดทำได้ทำการหาจุดที่ไม่เกิดการบิดเบี้ยวโดยการแก้ระบบสมการแบบไม่เชิงเส้น ด้วยวิธีการของ Newton Raphson [20] [21] โดยจะนำค่า FocalLength, PrincipalPoint และ RadialDistortion ที่ได้จากการสอบเทียบด้วยแอปพลิเคชัน Camera Calibrator ในโปรแกรม MATLAB แล้วนำมาคำนวณในโปรแกรม LabVIEW

มีหลักการคือจะใช้การสมมติค่า $x_1, x_2 \ldots\ldots, x_n$ เริ่มต้นก่อน แล้วจึงนำไปคำนวณค่า $f_1, f_2 \ldots\ldots, f_n$ จากนั้นตรวจสอบดูว่าค่าของ f ที่คำนวณได้นั้นแต่ละตัวมีค่าความผิดพลาดอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้หรือไม่ หากเกินกว่าค่าที่ยอมรับได้ต้องทำการสมมติค่า $x_1, x_2 \ldots\ldots, x_n$ ใหม่ ตามขั้นตอนดังนี้

1.หาค่า Jacobian Matrix (J(X)) โดย

$$J(X)=\begin{bmatrix} \frac{\partial f_1(X)}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1(X)}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial f_1(X)}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2(X)}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2(X)}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial f_2(X)}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial f_n(X)}{\partial x_1} & \frac{\partial f_n(X)}{\partial x_2} & \cdots & \frac{\partial f_n(X)}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad (4)$$

การหาค่า Jacobian Matrix นี้ จะใช้ค่า X และ F ใน step ปัจจุบัน (k) เพื่อจะนำค่าที่ได้ไปใช้ในการคำนวณหา X และ F ใน step ต่อไป (k+1)

2. การคำนวณหาค่า X ใน step ต่อไป หาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$X^{k+1}=X^{k}-J(X^{k})^{-1}F(X^{k}) \quad (5)$$

จากนั้นนำค่า X ใหม่ที่ได้ ไปคำนวณหาค่า F จากนั้นตรวจสอบความผิดพลาดที่เกิดขึ้น (เกณฑ์ที่ยอมรับได้ คือ มีค่าความผิดพลาดน้อยมากจนเข้าใกล้ 0)

ดังนั้น สำหรับสมการการแก้ไขความบิดเบี้ยวของภาพ เมื่อนำมาแก้สมการด้วยวิธีการของ Newton Raphson จะได้

$$f_1(X)=x[1+k_1(x^2+y^2)+k_2(x^2+y^2)^2]-x_d \quad (6a)$$

$$f_2(X)=y[1+k_1(x^2+y^2)+k_2(x^2+y^2)^2]-y_d \quad (6b)$$

$$X^k=(x,y)$$

$$x_1=x \quad , x_2=y$$

โดยทำการเดาค่า (x,y) สมการข้างต้นให้มีค่าเท่ากับ (x_d,y_d)

จะได้ Jacobian Matrix ดังนี้

$$J(X)=\begin{bmatrix} \frac{\partial f_1(X)}{\partial x} & \frac{\partial f_1(X)}{\partial y} \\ \frac{\partial f_2(X)}{\partial x} & \frac{\partial f_2(X)}{\partial y} \end{bmatrix} \tag{7}$$

$$\frac{\partial f_1(X)}{\partial x}=1+(3k_1^2x^2)+(k_1y^2)+(5k_2x^4)+(6k_2x^2y^2)+(k_2y^4)$$

$$\frac{\partial f_1(X)}{\partial y}=(2k_1x\,y\,)+(4k_2x^3y\,)+(4k_2x\,y^3)$$

$$\frac{\partial f_2(X)}{\partial x}=(2k_1x\,y\,)+(4k_2x^3y\,)+(4k_2x\,y^3)$$

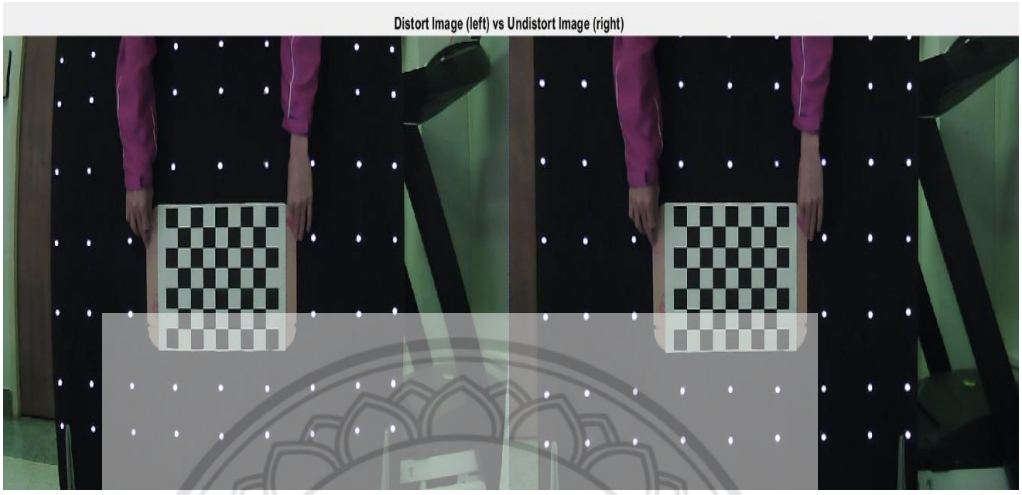
$$\frac{\partial f_2(X)}{\partial y}=1+(3k_1^2y^2)+(k_1x^2)+(5k_2y^4)+(6k_2x^2y^2)+(k_2x^4)$$

ดังนั้นจะได้ค่า X ตัวถัดไปจะมีค่า

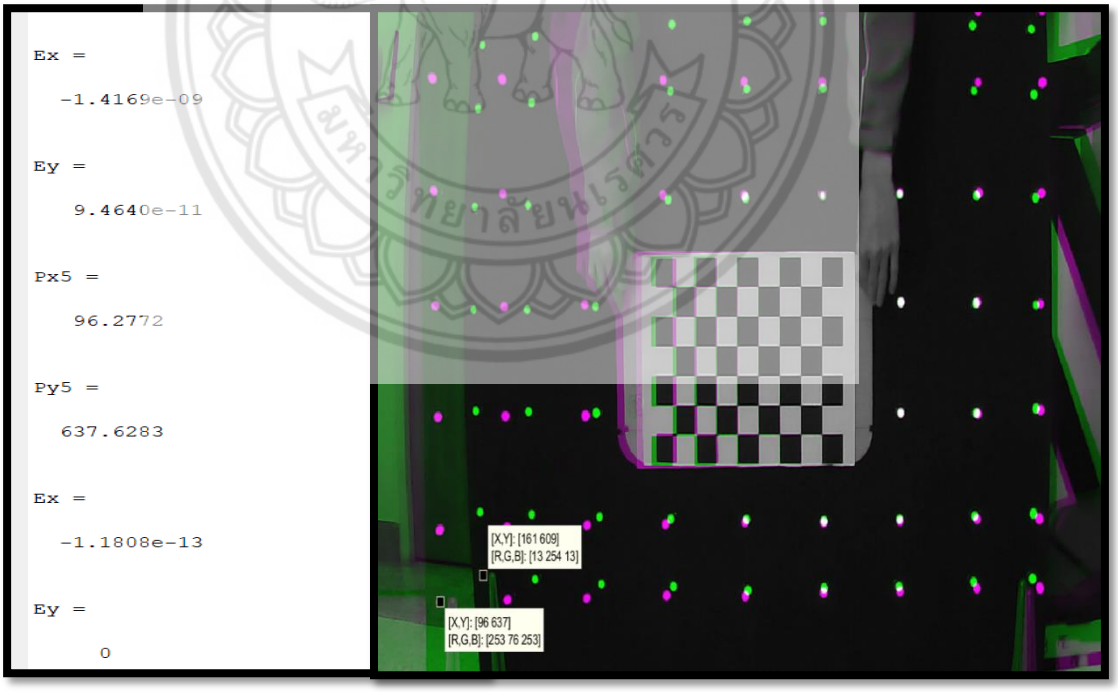
$$X^{k+1}=X^k-J(X^k)^{-1}F(X^k)$$

จากนั้นนำค่า X ใหม่ที่ได้ ไปคำนวณหาค่า F แล้วทำการคำนวณซ้ำจำนวน 5 รอบ เนื่องจากวิธีการของ Newton Raphson ทำให้ได้ค่าที่ลู่เข้าสู่ค่าจริงได้เร็ว

คณะผู้จัดทำได้ทำการแก้สมการโดยใช้วิธีการของ Newton Raphson จะได้ตำแหน่งของพิกเซลที่ถูกปรับแก้ค่า จากนั้นนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการปรับแก้ไขภาพด้วยแอปพลิเคชัน Camera Calibrator ในโปรแกรม MATLAB อยู่ในส่วนของ Image processing toolbox โปรแกรม MATLAB



รูปที่ 3.8 ภาพที่กล้องถ่ายได้ที่เกิดการบิดเบี้ยว (ซ้าย) และที่ถูกปรับแก้ค่าให้ตรงด้วย MATLAB (ขวา)



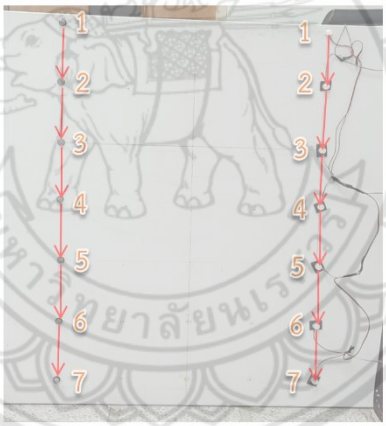
รูปที่ 3.9 เปรียบเทียบตำแหน่งของพิกเซลที่ถูกปรับแก้ค่าระหว่างการแก้สมการ
ด้วยวิธีการของ Newton Raphson (ด้านซ้าย) และค่าที่ได้จากโปรแกรม MATLAB (ด้านขวา)

จากรูปที่ 3.9 เป็นเปรียบเทียบตำแหน่งของพิกเซลที่ถูกปรับแก้ค่าด้วยวิธีการของ Newton Raphson กับการนำภาพที่ 3.8 มาทำการซ้อนทับกัน โดยจุดสีเขียวคือจุดที่ภาพมีการบิดเบี้ยว จุดสีม่วงคือจุดที่ได้รับการแก้ภาพให้ตรงจากพารามิเตอร์ที่ได้จากการสอบเทียบ จากนั้นทำการเลือกจุดเดียวกันของทั้ง 2 ภาพ เพื่อดูตำแหน่งพิกเซลของภาพ

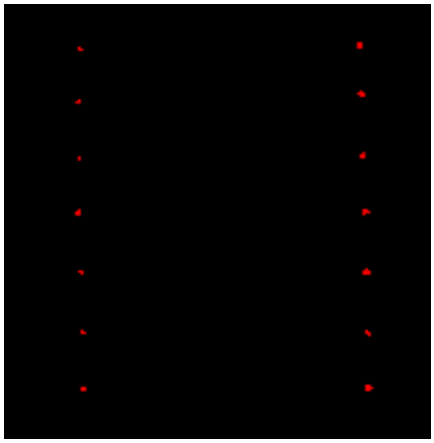
3.8 นำค่าพารามิเตอร์มาทดสอบหาความแม่นยำของโปรแกรม

3.8.1 ทำการทดสอบเปรียบเทียบการวัดตำแหน่งระหว่าง marker

โดยวางตำแหน่ง marker สะท้อนแสงไว้ด้านซ้าย และ marker อินฟาเรดวางไว้ด้านขวา ดังรูปที่ 3.10 จากนั้นใช้โปรแกรม LabVIEW ทำการหาตำแหน่งพิกัดของ marker ทั้ง 2 ชนิดแล้วนำมาเปรียบเทียบความแม่นยำในการวัดตำแหน่ง



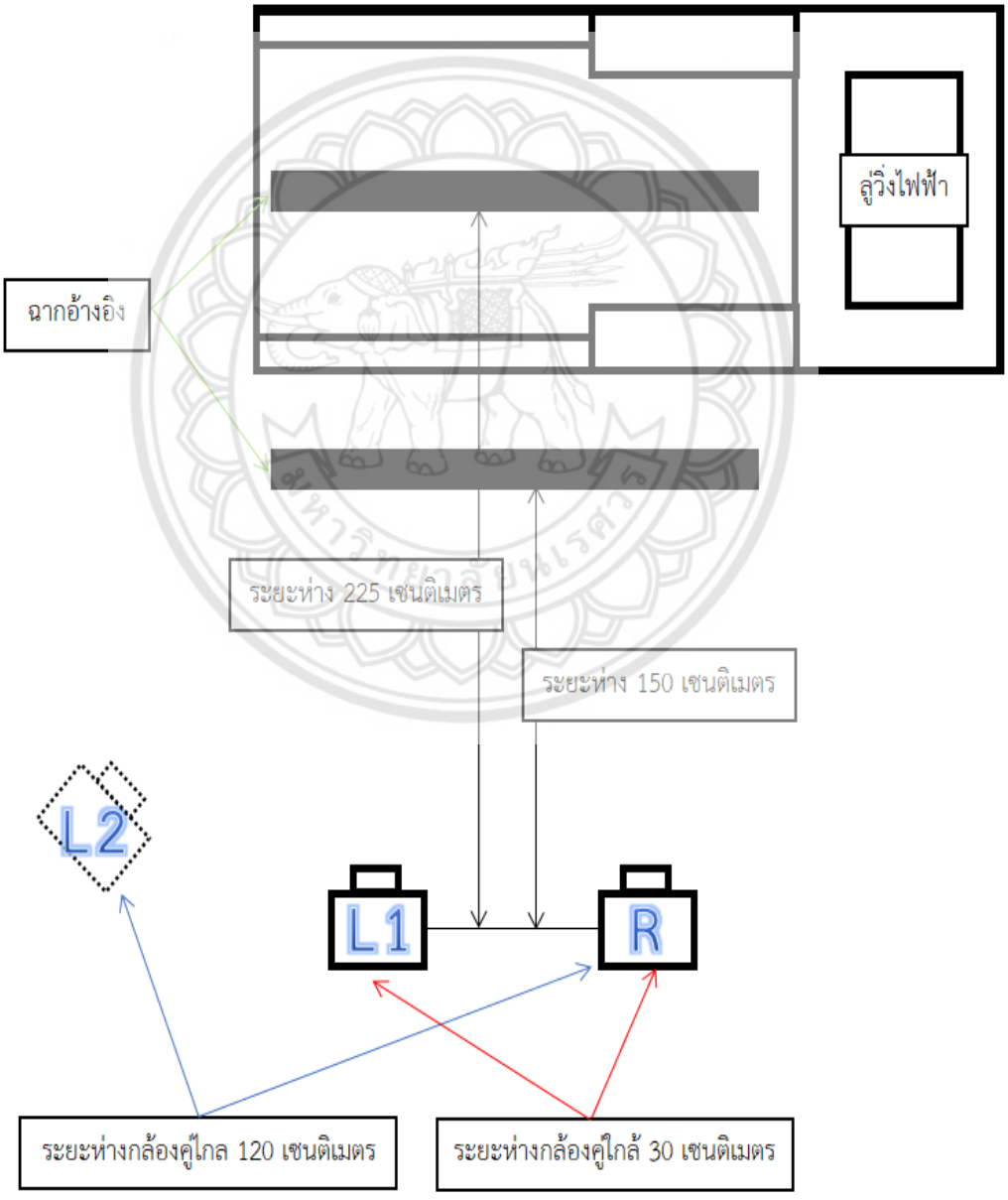
รูปที่ 3.10 การวาง marker บนฉากอ้างอิงที่ใช้วัดระยะจริง



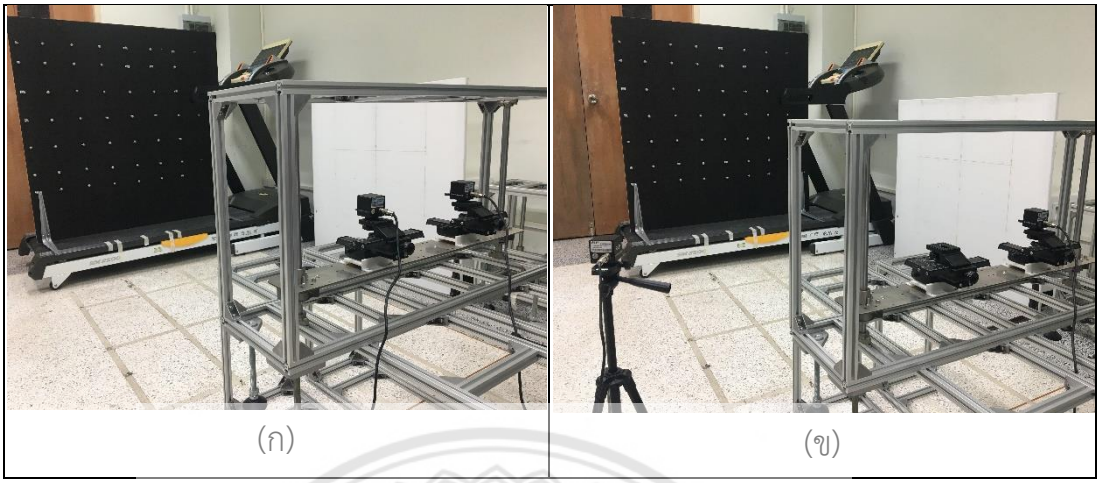
รูปที่ 3.11 การจับตำแหน่งของ marker ในโปรแกรม LabVIEW

3.8.2 ทำการทดสอบการวัดตำแหน่ง x y และ z ของ marker บนระนาบฉากอ้างอิง

เป็นการนำค่าพารามิเตอร์จากโปรแกรม MATLAB ที่ได้ทำการแปลงค่าเรียบร้อยแล้ว นำมาใส่ในโปรแกรม LabVIEW เพื่อหาความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยตามแนวแกน x, y, z ขณะหยุดนิ่งของแต่ละ marker ทั้ง 49 จุด ที่ได้จากกล้องโดยเปรียบเทียบกับตำแหน่งจริงในฉากอ้างอิง ระหว่างกล้องคู่ใกล้ (ใช้ R กับ L1) กับกล้องคู่ไกล (ใช้ R กับ L2) จากการทดสอบหลายครั้งพบว่าสามารถวางกล้อง L กับ R ไว้ที่ตำแหน่งใดก็ได้ที่เห็น marker บนฉากอ้างอิงครบทุกจุด โดยการทดสอบครั้งนี้จะทดสอบที่ระยะห่าง 150 เซนติเมตร และ 225 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 การติดตั้งอุปกรณ์เพื่อเก็บข้อมูล



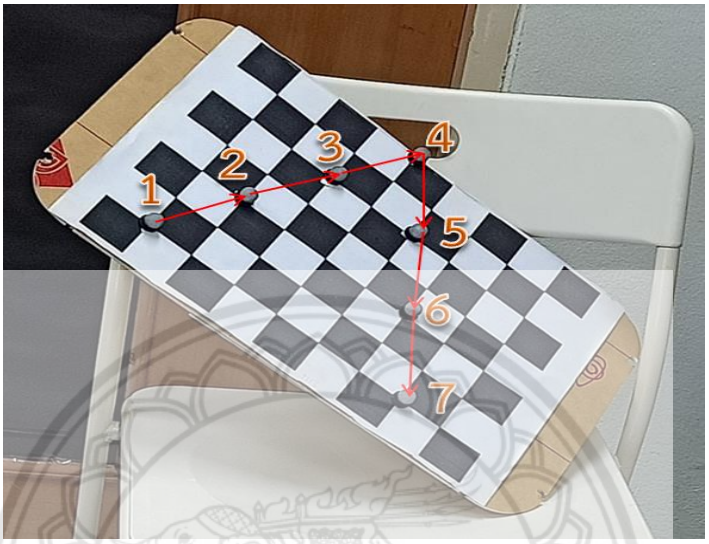
(ก) (ข)

รูปที่ 3.13 การตั้งกล้อง webcam กับฉากอ้างอิง ระหว่างกล้องคู่ใกล้ (ก) และกล้องคู่ไกล (ข)

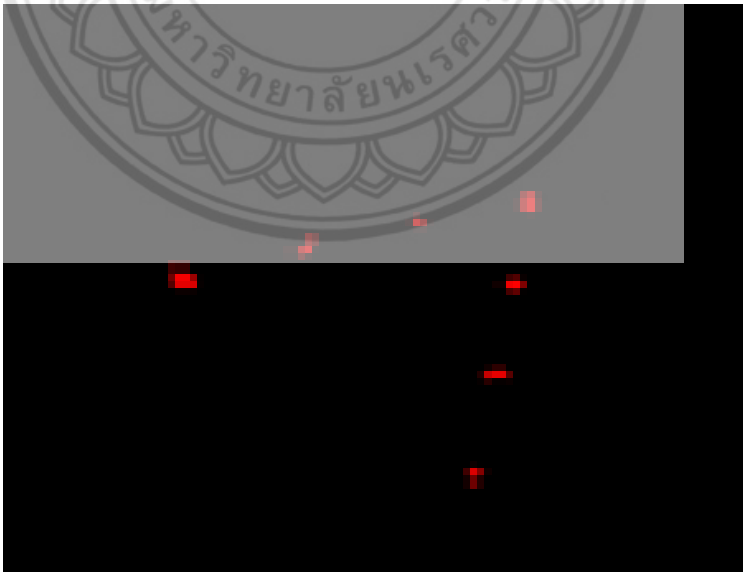
รูปที่ 3.14 การวาง marker บนฉากอ้างอิงที่ใช้วัดระยะจริง

3.8.3 ทำการทดสอบวัดตำแหน่ง marker ของระบบกล้องใน 3 มิติ

ทดสอบโดยการวาง marker บนกระดานที่ตำแหน่งต่างๆ จากนั้นให้ระบบกล้องทำการวัดตำแหน่งของ marker ในมุมมองต่างๆ จากนั้นทำการคำนวณออกมาเป็นตำแหน่งใน 3 มิติ



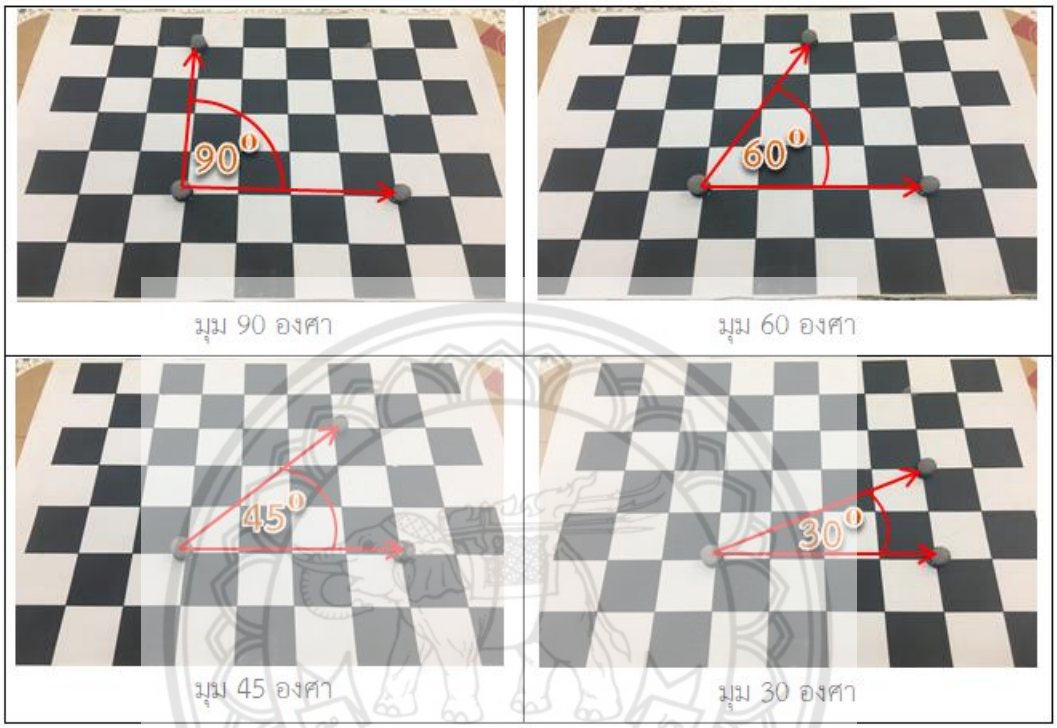
รูปที่ 3.15 การวาง marker บนกระดานที่ใช้วัดระยะจริง



รูปที่ 3.16 การจับตำแหน่งของ marker ในโปรแกรม LabVIEW

3.8.4 การทดสอบการวัดมุมระหว่าง marker ที่ระนาบต่างๆ

ทำการทดสอบการวัดมุมระหว่าง marker 3 ตัวมาวางบนกระดานเป็นสามเหลี่ยมทำมุม 30,45,60 และ 90 องศา จากนั้นทำการวัดมุมโดยเอียงกระดานให้อยู่ในระนาบต่างๆ

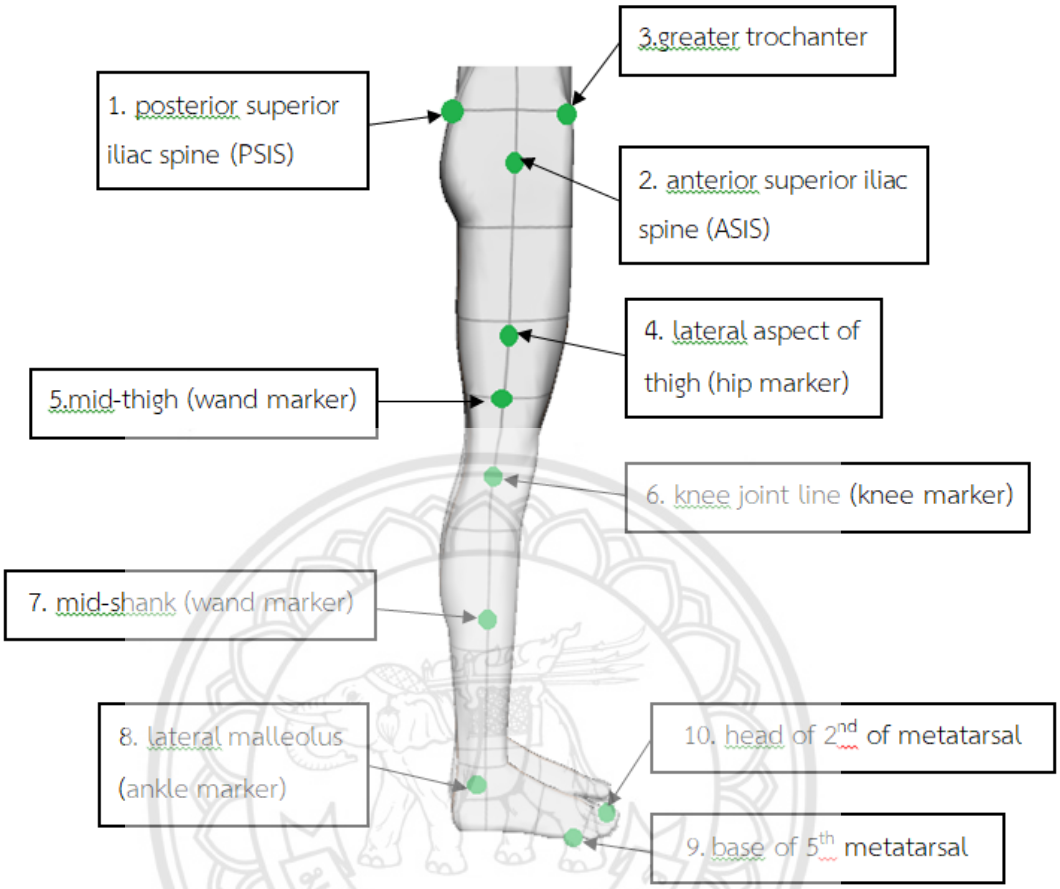


รูปที่ 3.17 การวาง marker บนกระดานที่ใช้วัดมุมองศาจริง

3.9 ทำการทดสอบระบบกล้องบันทึกภาพการเคลื่อนไหวสำหรับการวิเคราะห์การเดินกับอาสาสมัครในโปรแกรม LabVIEW และหาความน่าเชื่อถือในการวัดซ้ำ

3.9.1 หลักการวิเคราะห์มุมการเคลื่อนไหวของมนุษย์

ศึกษาหลักการเคลื่อนไหวของมนุษย์และกำหนดให้ท่ายืนตรงองศาของข้อ hip, knee และ ankle มีค่ามุมเท่ากับ 0 องศา เพื่อเป็นค่าอ้างอิงในการเคลื่อนไหวของข้อต่อขณะเดินในระยะต่างๆ โดยติด marker จำนวน 10 จุดที่บริเวณดังรูปที่ 3.18 ในระนาบ sagittal



รูปที่ 3.18 ตำแหน่ง marker ที่ติดบนร่างกายเมื่อมองจากระนาบ sagittal

sagittal plane

hip joint : เนื่องจากการเคลื่อนไหวที่เป็นธรรมชาติจะมีการแกว่งของแขนร่วมด้วยขณะเดิน จึงทำการติด marker ที่บริเวณ lateral aspect of thigh แทนการติด marker ที่ hip โดยทำการวัดเส้นตรงจากปลายนิ้วกลางขณะมือแนบข้างลำตัว ลงมาที่ knee joint Line แล้วทำการติด marker บริเวณเส้นตรงนั้น ต่ำกว่ามือลงมา 1 เซนติเมตร จากนั้นทำการคำนวณมุมโดยใช้หลักการตรีโกณมิติหามุม hip ดังรูปที่ 3.19 ก. เมื่อเทียบกับมุมสะโพกท่ายืนอ้างอิง $\theta_{hip.STD.}$ ดังรูปที่ 3.18

$$\theta_{hip.cal} = \tan^{-1}\left(\frac{Y_6 - Y_4}{X_6 - X_4}\right) \quad (8)$$

$$\theta_{hip} = \theta_{hip.cal} - \theta_{hip.STD.} \quad (9)$$

knee joint : มุมที่เกิดระหว่างเส้นสมมุติที่ลากจาก marker ของ hip และ knee กับเส้นที่ลากจาก marker ของ knee และ ankle ดังรูปที่ 3.19 ข. เมื่อเทียบกับมุมข้อเข่าท่ายืนอ้างอิง $\theta_{knee.STD.}$ ดังรูปที่ 3.18

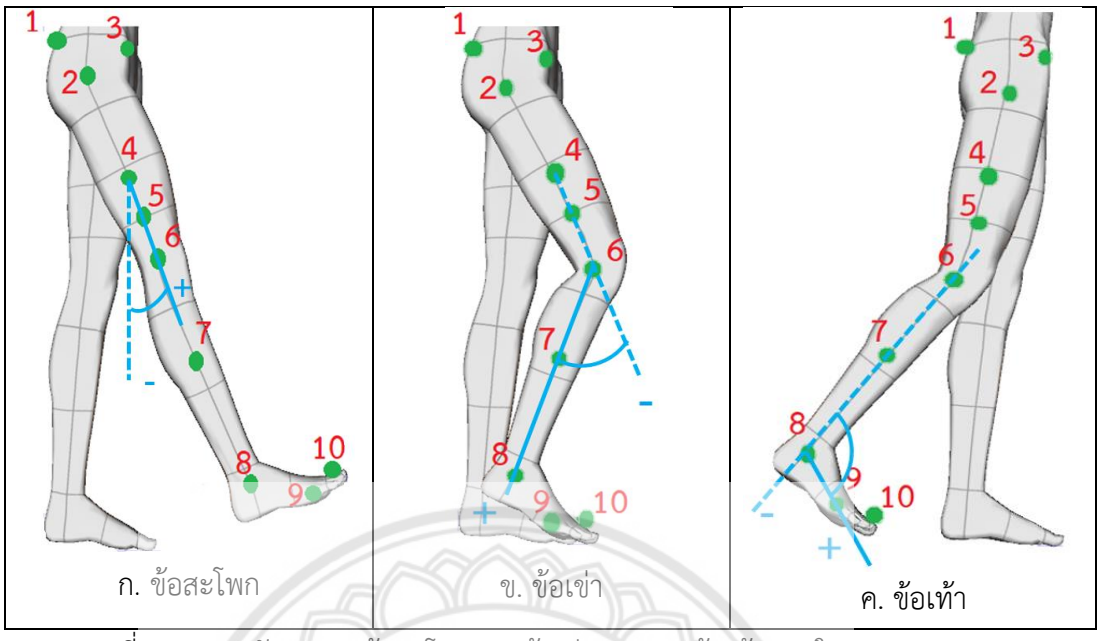
$$\theta_{knee.cal} = \tan^{-1}\left(\frac{Y_6 - Y_4}{X_6 - X_4}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{Y_8 - Y_6}{X_8 - X_6}\right) \quad (10)$$

$$\theta_{knee} = \theta_{knee.cal} - \theta_{knee.STD.} \quad (11)$$

ankle joint : มุมที่เกิดระหว่างเส้นของ knee กับ ankle และเส้นที่ลากจาก marker ของ ankle กับ dorsolateral of 5th metatarsophalangeal ดังรูปที่ 3.19 ค. เมื่อเทียบกับมุมข้อเท้าท่ายืนอ้างอิง $\theta_{ankle.STD.}$ ดังรูปที่ 3.18

$$\theta_{ankle.cal} = \tan^{-1}\left(\frac{Y_8 - Y_6}{X_8 - X_6}\right) - \tan^{-1}\left(\frac{Y_9 - Y_8}{X_9 - X_8}\right) \quad (12)$$

$$\theta_{ankle} = \theta_{ankle.cal} - \theta_{ankle.STD.} \quad (13)$$



รูปที่ 3.19 การวัดมุมของข้อสะโพก (ก) ข้อเข่า (ข) และข้อเท้า (ค) ในระนาบ sagittal

3.9.2 มาตรการความปลอดภัยในการทดลอง

การทำการทดลองต้องคำนึงถึงความปลอดภัยอันดับแรกคณะผู้จัดทำโครงงาน จึงมีมาตรการความปลอดภัยในการทดลอง ดังนี้

- มีผู้จัดทำ 1 คน คอยควบคุมความเร็วของลู่วิ่งไฟฟ้าตลอดการทำการทดลอง
- มีผู้จัดทำ 1 คน อยู่ด้านหลังลู่วิ่งไฟฟ้าเพื่อทำการป้องกันอาสาสมัครเมื่อเกิดอุบัติเหตุในการทดลอง
- ลู่วิ่งไฟฟ้ามีปุ่มฉุกเฉิน (emergency) ไว้สำหรับกรณีเกิดอุบัติเหตุ

3.9.3 ทดสอบกับอาสาสมัครเพื่อหาความน่าเชื่อถือในการวัดซ้ำขณะเดินในมนุษย์

เริ่มทดสอบวัดการเดินบนลู่วิ่งไฟฟ้ากับอาสาสมัครนิสิตมหาวิทยาลัยนเรศวรที่มีอายุระหว่าง 21-23 ปี ที่คณะผู้จัดทำได้จัดเตรียมหามา 3 คน แล้วทำการบันทึกภาพการเคลื่อนไหวซ้ำ 3 รอบการเดิน จำนวน 2 ครั้ง โดยใช้ความเร็วของลู่วิ่งที่ 3 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เพื่อหาค่าเฉลี่ยที่จะนำไปวิเคราะห์หาค่ามุมองศาของข้อต่อช่วงล่างขณะเดิน โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

1) คณะผู้จัดทำจะเป็นผู้จัดเตรียมกางเกงสำหรับทดสอบให้กับอาสาสมัคร

2) ทำการติด marker ให้กับอาสาสมัครจำนวน 10 จุด บริเวณดังต่อไปนี้

- posterior superior iliac spine (PSIS)
- greater trochanter
- anterior superior iliac spine (ASIS)
- lateral aspect of thigh (hip marker)
- mid - thigh
- knee joint line (knee marker)
- mid-shank (wand marker)
- lateral malleolus (ankle marker)
- base of 5th metatarsal bone
- head of 2nd of metatarsal bone

3) คณะผู้จัดทำจะสาธิตวิธีการทดสอบให้แก่อาสาสมัครดู หลังจากนั้นจะให้อาสาสมัครฝึกเดินบนลู่วิ่งไฟฟ้าที่ใช้ทดสอบจนเกิดความคุ้นชิน แล้วจึงจะเริ่มการทดสอบจริงโดยระบบกล้อง AT-gait ทำการบันทึกภาพการเคลื่อนไหวในระนาบ sagittal plane โดยบันทึกภาพขณะอยู่นิ่งในท่ายืนตรง เพื่อทำการเก็บเป็นค่าอ้างอิง จากนั้นให้ทำการบันทึกภาพการเดินของอาสาสมัคร ระหว่างการทดสอบถ้าอาสาสมัครรู้สึกเหนื่อยสามารถพักระหว่างการทดสอบได้จนกว่าจะรู้สึกหายเหนื่อย จากนั้นโปรแกรมจะวิเคราะห์ภาพเพื่อหามุมที่ได้ออกมาแล้วนำค่าที่ได้ออกมาใส่ในแบบบันทึกข้อมูล ทำการหาค่าเฉลี่ยโดยภาพที่จะเลือกนั้นจะต้องเห็น marker ครบทุกตัว และเดินครบ gait cycle

4) เมื่อเสร็จสิ้นการทดสอบในครั้งที่ 1 นี้แล้ว คณะผู้จัดทำจะทำการนัดให้อาสาสมัครมาทำการทดสอบอีกครั้งในวันถัดไป โดยใช้เวลาในการเดินครั้งละประมาณ 5-10 นาที

5) หลังจากสิ้นสุดการทดสอบ คณะผู้จัดทำจะนำข้อมูลที่ได้ไปวิเคราะห์ทางสถิติเพื่อหาความน่าเชื่อถือในการวัดซ้ำของระบบกล้องวิดีโอบันทึกการเคลื่อนไหวสำหรับวิเคราะห์การเดินบนลู่วิ่งไฟฟ้าของมุมข้อสะโพก ข้อเข่า และข้อเท้า และเปรียบเทียบกราฟกับระบบวิเคราะห์การเคลื่อนไหวมาตรฐาน

3.10 วิเคราะห์ผลทางสถิติ

โครงงานนี้ได้เลือกใช้สถิติสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ภายในชั้น (Intraclass Correlation Coefficient : ICC) เพื่อประเมินผล ความน่าเชื่อถือในการทดสอบซ้ำ (Test-retest Reliability) โดยเลือกใช้ Two-Way Mixed-Effects Model (model 3,k) เป็นการทดสอบในวิธีเก็บข้อมูลแบบเดิมเพื่อดูผลจากการวัดในช่วงเวลาที่ต่างกัน จากคนกลุ่มเดียวกันด้วยเครื่องมือเดียวกัน โดยทำการวัดซ้ำอีกครั้งในเวลาที่ต่างกัน ซึ่งในโครงงานนี้มีวิธีการเก็บข้อมูลโดยทำการวัดมุมองศาในการเคลื่อนไหวขณะเดินของข้อสะโพก ข้อเข่า และข้อเท้า โดยทำการเก็บข้อมูลขณะเดิน 5 ครั้ง เลือกข้อมูลจำนวน 3 ครั้ง ที่เห็น marker หลักในแต่ละช่วงการเดิน และมีการเดินที่ครบวงจรการเดิน โดยนำค่ามุมที่คำนวณได้มาหาค่าเฉลี่ยเพื่อเป็นค่ามุมองศาการเคลื่อนไหวของข้อสะโพก ข้อเข่า และข้อเท้า ที่เกิดขึ้นในระยะต่างๆ ของการเดินในแต่ละคน จากนั้นนำไปเปรียบเทียบความน่าเชื่อถือการวัดของการเดินระหว่างการเก็บข้อมูลครั้งที่ 1 และ 2 โดยมีระยะห่างระหว่างการเก็บข้อมูลทั้ง 2 ครั้งเป็นเวลาอย่างน้อย 1 วัน จากนั้นนำข้อมูลมา คำนวณโดยใช้สถิติ ICCs ซึ่งสามารถแปลผลได้ดังนี้

ICCs > 0.90	หมายถึง ความน่าเชื่อถือในระดับสูงมาก
ICCs 0.75-0.90	หมายถึง ความน่าเชื่อถือในระดับสูง
ICCs 0.50-0.74	หมายถึง ความน่าเชื่อถือในระดับปานกลาง
ICCs < 0.50	หมายถึง ความน่าเชื่อถือในระดับต่ำ

โดยจะนำเสนอข้อมูลในรูปแบบค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (mean + SD) ขององศาการเคลื่อนไหวของข้อสะโพก ข้อเข่า และข้อเท้า ในวงจรการเดินในช่วงการเดิน 1 รอบการเดิน (1 gait cycle) ทำการวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้โปรแกรม Statistical Package for Social Sciences (SPSS) กำหนดระดับนัยสำคัญที่ค่า $p < 0.001$

บทที่ 4

ผลการดำเนินงานและวิเคราะห์ผล

4.1 ผลการเปรียบเทียบการวัดตำแหน่งระหว่าง marker

นำ marker สะท้อนแสงมาเปรียบเทียบกับ marker อินฟาเรดในการวัดตำแหน่งบนฉากอ้างอิงเพื่อที่จะนำมาเลือกใช้ในการวิเคราะห์การเดินต่อไป (ระยะของจุด marker เป็นไปตามหัวข้อ 3.8.1)

ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบการวัดตำแหน่งระหว่าง marker สะท้อนแสงและ marker อินฟาเรด

ระยะของจุด Marker	Marker สะท้อนแสง			Marker อินฟาเรด		
	ระยะที่วัดได้จากกล้อง (cm)	ระยะจริง (cm)	ความคลาดเคลื่อน (cm)	ระยะที่วัดได้จากกล้อง (cm)	ระยะจริง (cm)	ความคลาดเคลื่อน (cm)
1-2	14.691	14.7	0.009	13.345	13.6	0.255
2-3	15.254	15.2	-0.054	16.246	16.4	0.154
3-4	14.368	14.6	0.232	14.743	14.8	0.057
4-5	15.599	15.6	0.001	15.364	15.6	0.236
5-6	15.865	16.0	0.135	16.049	16.3	0.251
6-7	15.145	15.4	0.255	14.466	14.6	0.134
ค่าเฉลี่ย	-	-	0.096	-	-	0.181

จากตารางที่ 4.1 พบว่า marker สะท้อนแสงและ marker อินฟาเรด มีค่าความคลาดเคลื่อนในการวัดตำแหน่งไม่ต่างกันมาก แต่ด้วยข้อจำกัดของ marker อินฟาเรดมีความยุ่งยากในการติดตั้งและมีน้ำหนักที่ส่งผลต่อการเดิน จึงทำให้คณะผู้จัดทำเลือกใช้ marker สะท้อนแสงในการทดสอบ

4.2 ผลการทดสอบความแม่นยำในการวัด ของระบบกล้อง

4.2.1 ผลการทดสอบการวัดตำแหน่ง x y และ z ของ marker บนระนาบฉากอ้างอิง

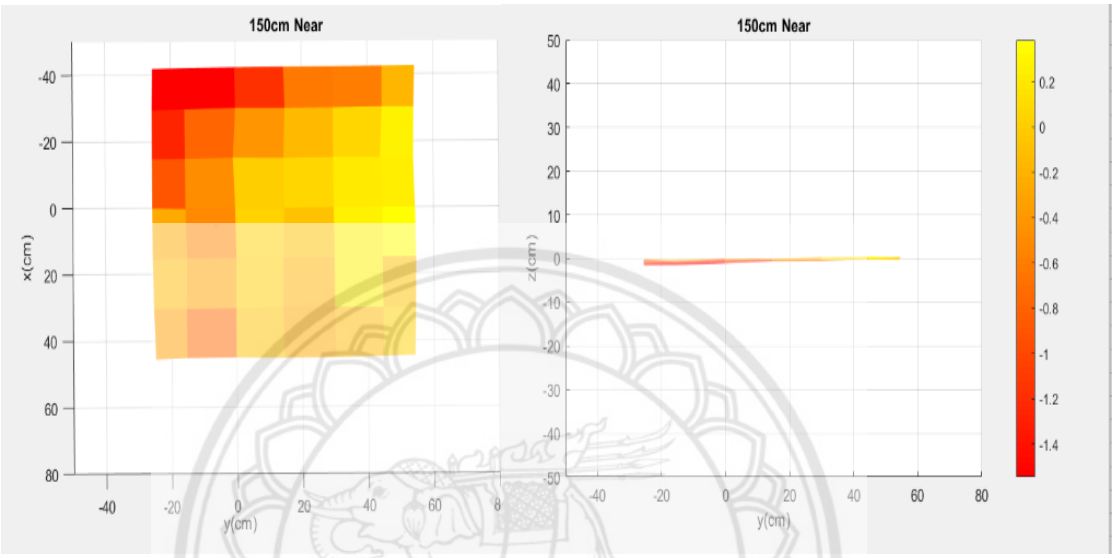
การทดสอบหาตำแหน่งของจุดต่าง ๆ บนฉากอ้างอิง ที่ระยะ 150 และ 225 เซนติเมตร และที่การวางตำแหน่งของกล้องใกล้และไกล สรุปผลการทดลองได้ดังตารางที่ 4.2 (ระยะและตำแหน่งการวางกล้องเป็นไปตามหัวข้อ 3.8.2)

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบการวัดตำแหน่งของระบบกล้อง

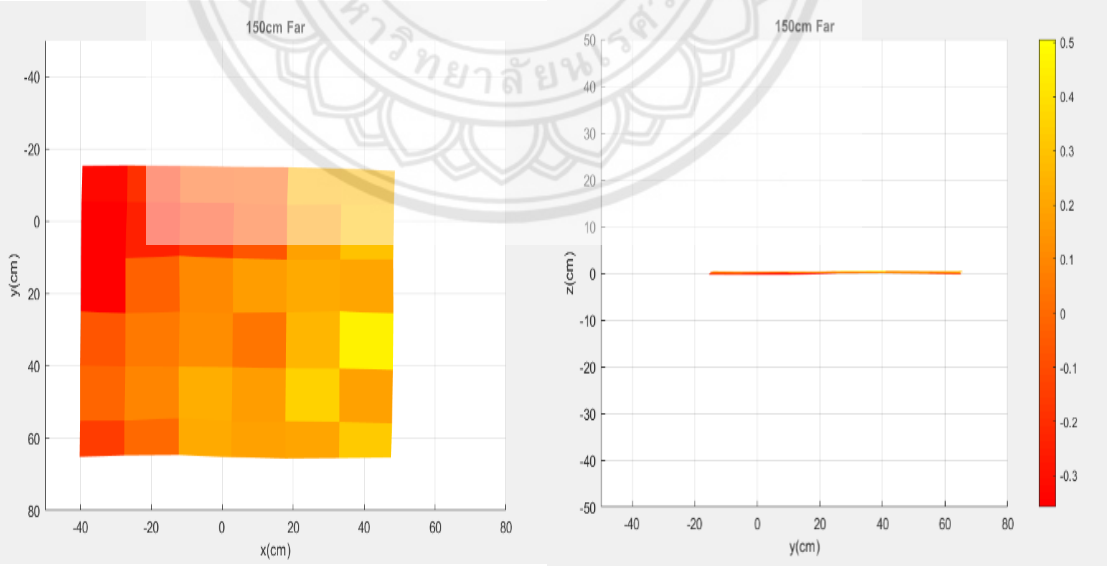
ระยะและตำแหน่งการวางกล้อง	ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยตามแนวแกน (cm)			ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานตามแนวแกน (cm)		
	x	y	z	x	y	z
150 cm , กล้องคู่ใกล้	0.097	0.131	-0.235	0.124	0.083	0.466
150 cm , กล้องคู่ไกล	0.073	0.086	0.125	0.051	0.050	0.224
225 cm , กล้องคู่ใกล้	0.072	0.092	0.739	0.062	0.079	0.579
225 cm , กล้องคู่ไกล	0.078	0.099	-0.112	0.060	0.077	0.999

จากตารางที่ 4.2 พบว่าในแนวแกน z มีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยมากกว่าแกน x และ y และยังพบว่าถ้าวางกล้องไว้ไกลกันจะทำให้ระบบกล้องวัดระยะความลึกในแนวแกน z ได้แม่นยำกว่าการวางกล้องไว้ใกล้กันแต่ค่าในแต่ละจุดจะค่อนข้างแกว่ง สำหรับความคลาดเคลื่อนของการวัดตำแหน่งในแนวแกน x และแกน y จะมีค่าความคลาดเคลื่อนไม่ต่างกันมาก ส่วนหนึ่งความคลาดเคลื่อนที่เกิดขึ้นอาจมีปัจจัยมาจาก การวางกระดานสอบเทียบทาบกับฉากทำให้ฉากเกิดการเอียง ความคลาดเคลื่อนจากการคำนวณของตัวโปรแกรม และความคลาดเคลื่อนจากผู้ที่ทำการวัดระยะจริงของจุดบนฉาก สามารถดูผลการทดสอบแบบละเอียดได้ที่ภาคผนวก ก ตารางผลการทดสอบตำแหน่ง x y และ z ของ marker บนระนาบฉากอ้างอิง

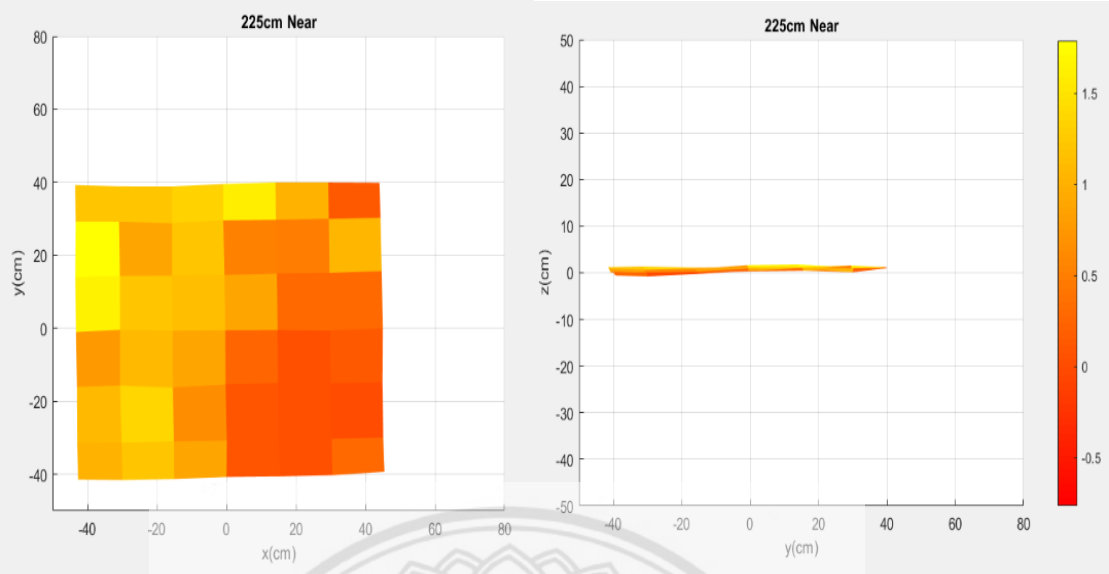
นำผลจากการทดสอบการวัดตำแหน่งของจุด marker มาพลอตเป็นระนาบ x,y กับระนาบในมุม top view ได้ดังรูปที่ 4.1-4.4 โดยลักษณะของสีเข้มจะบ่งบอกถึงระยะที่ฉากอ้างอิงเอียงไปด้านหลัง สีอ่อนบ่งบอกถึงระยะฉากอ้างอิงเอียงไปด้านหน้า มีหน่วยเป็นเซนติเมตร



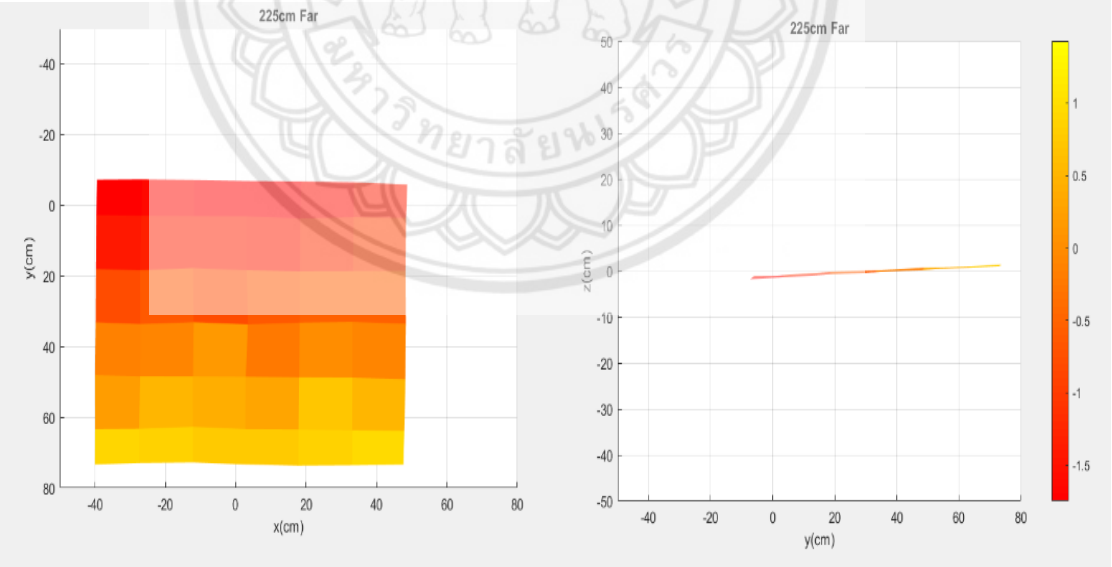
รูปที่ 4.1 รูปแสดงระนาบของจุด marker ที่ระยะ 150 เซนติเมตร กล้องคู่ใกล้



รูปที่ 4.2 รูปแสดงระนาบของจุด marker ที่ระยะ 150 เซนติเมตร กล้องคู่ไกล



รูปที่ 4.3 รูปแสดงระนาบของจุด marker ที่ระยะ 225 เซนติเมตร กล้องคู่ใกล้



รูปที่ 4.4 รูปแสดงระนาบของจุด marker ที่ระยะ 225 เซนติเมตร กล้องคู่ไกล

4.2.2 ผลการทดสอบการวัดตำแหน่ง marker ของระบบกล้องใน 3 มิติ

ทดสอบโดยการวาง marker บนกระดานที่ตำแหน่งต่าง ๆ จากนั้นให้ระบบกล้องทำการวัดตำแหน่งของ marker ในมุมมองต่างๆ จากนั้นทำการคำนวณออกมาเป็นตำแหน่งใน 3 มิติ ดังผลตารางที่ 4.3 ซึ่งเป็นตัวอย่างผลการวัดตำแหน่ง 3 รอบจาก 10 รอบ สามารถดูผลการทดสอบแบบละเอียดได้ที่ภาคผนวก ก (ระยะห่างระหว่างจุดเป็นไปตามหัวข้อที่ 3.8.3)

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบการวัดตำแหน่ง marker ของระบบกล้องใน 3 มิติ

ระยะห่างระหว่างจุด	ระยะจริงที่วัดได้ (cm)	ระยะจากระบบกล้อง (cm)	ความคาดเคลื่อน (cm)
รอบ1 / 1-2	9.5	9.229	0.271
2-3	9.3	9.171	0.129
3-4	8.7	8.543	0.157
4-5	8.6	8.542	0.058
5-6	9.0	8.989	0.011
6-7	9.4	9.251	0.149
รอบ2 / 1-2	9.5	9.021	0.479
2-3	9.3	8.864	0.436
3-4	8.7	8.419	0.281
4-5	8.6	8.491	0.109
5-6	9.0	8.923	0.077
6-7	9.4	9.371	0.029
รอบ3 / 1-2	9.5	9.652	-0.152
2-3	9.3	8.958	0.342
3-4	8.7	8.457	0.243
4-5	8.6	8.680	-0.080
5-6	9.0	8.879	0.121
6-7	9.4	9.573	-0.173

ตารางที่ 4.4 ค่าเฉลี่ยจากการทดสอบการวัดตำแหน่ง marker ของระบบกล้องใน 3 มิติ

ระยะห่างระหว่างจุด	ค่าเฉลี่ย (cm)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (cm)	ความคลาดเลื่อนเฉลี่ย (cm)	ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)
1-2	9.409	0.238	0.091	1.0
2-3	9.079	0.160	0.221	2.4
3-4	8.412	0.193	0.288	3.3
4-5	8.551	0.121	0.049	0.6
5-6	9.042	0.117	-0.042	0.5
6-7	9.383	0.198	0.017	0.2

จากผลการทดสอบการวัดตำแหน่งของกล้องใน 3 มิติ พบว่าระบบกล้องมีความแม่นยำในการวัดตำแหน่งอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยไม่เกิน 0.3 เซนติเมตร ซึ่งเกิดจากมุมการวางของกระดานที่ทำให้ระบบกล้องจับตำแหน่งของ marker คลาดเคลื่อนไป นอกจากนี้ยังมีความคลาดเคลื่อนจากการคำนวณของตัวโปรแกรมและความคลาดเคลื่อนจากผู้ที่ทำการวัดระยะจริงของจุด marker

4.2.3 ผลการทดสอบการวัดมุมระหว่าง marker ที่ระนาบต่าง ๆ

ทำการทดสอบการวัดมุมระหว่าง marker 3 ตัวมาวางบนกระดานเป็นสามเหลี่ยมทำมุม 30,45,60 และ 90 องศา จากนั้นทำการวัดมุมโดยเอียงกระดานให้อยู่ในระนาบต่าง ๆ ได้ผลการทดอสอบดังตารางที่ 4.5 (การทดสอบเป็นไปตามหัวข้อที่ 3.8.4)

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบวัดมุมระหว่าง marker

มุม (องศา) / ครั้งที่	90	60	45	30
1	90.319	60.033	45.746	30.686
2	90.453	59.937	45.736	30.665
3	90.328	59.883	46.057	30.922
4	89.861	60.421	46.515	29.825

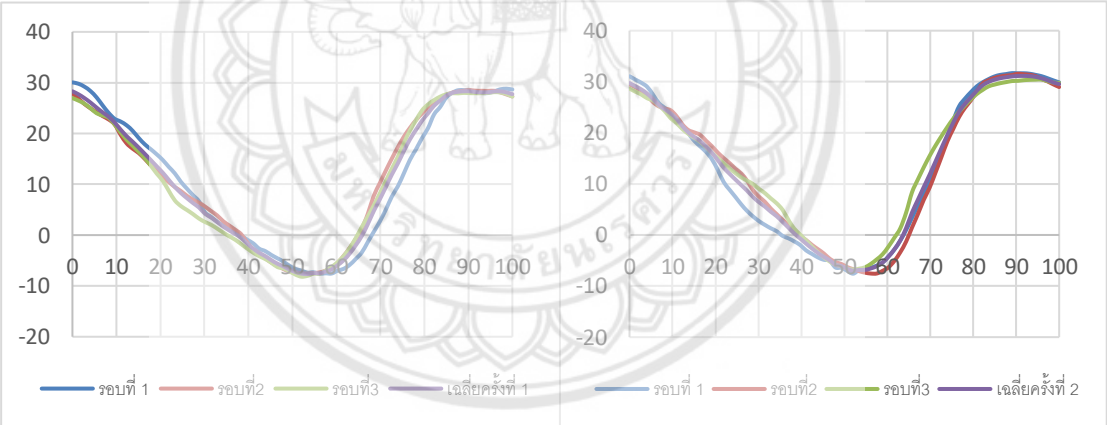
5	90.751	60.266	45.791	29.212
6	90.641	60.252	44.066	29.842
7	89.871	59.930	45.332	31.170
8	90.558	59.826	44.606	31.274
9	90.190	58.486	44.969	29.991
10	88.759	60.115	45.318	29.144
11	91.388	59.543	45.456	29.855
12	90.516	60.136	44.556	29.435
13	90.417	60.526	45.514	30.690
14	89.879	58.842	44.156	30.806
15	89.926	59.134	44.587	30.145
16	90.335	60.707	44.985	30.655
17	91.561	59.955	45.934	30.379
18	90.620	59.656	46.310	30.797
19	90.115	59.715	44.919	30.873
20	90.496	59.681	44.606	30.439
ค่าเฉลี่ย	90.349	59.852	45.258	30.340
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (องศา)	0.583	0.544	0.701	0.628
ค่าความคลาดเคลื่อนค่าเฉลี่ย (องศา)	0.349	0.148	0.258	0.340

จากตารางที่ 4.5 พบว่าค่ามุมองศาที่วัดได้จากระบบกล้องมีค่าความคลาดเคลื่อนจากมุมองศาที่วัดจริงอยู่ในระดับที่ยอมรับได้ โดยค่ามุมองศามีความคลาดเคลื่อนจากมุมองศาที่วัดจริงเฉลี่ยไม่เกิน 0.4 องศา ซึ่งความคลาดเคลื่อนมีสาเหตุมาจากการวางมุมเอียงของกระดานที่ทำให้ระบบกล้องจับตำแหน่งของ marker คลาดเคลื่อนไป นอกจากนี้ยังมีความคลาดเคลื่อนจากการคำนวณของตัวโปรแกรมและความคลาดเคลื่อนจากผู้ที่ทำการวัดมุมองศาจริงของจุด marker

4.3 ทดสอบหาความน่าเชื่อถือในการวัดซ้ำขณะเดินในมนุษย์ของระบบกล้องวีดีโอบันทึกการเคลื่อนไหว

4.3.1 ทดสอบหาความน่าเชื่อถือในการวัดซ้ำขณะเดินบนลู่วิ่งไฟฟ้าของอาสาสมัครแต่ละคน

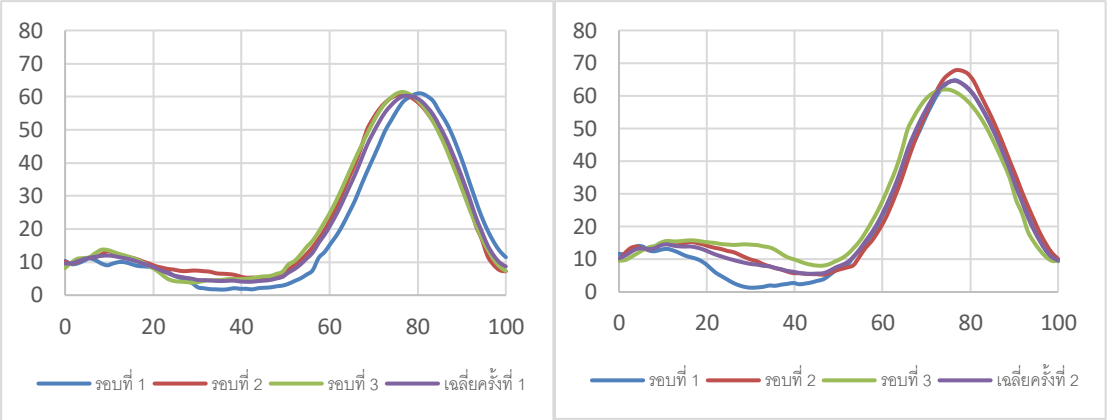
ทำการทดสอบหาความน่าเชื่อถือในการวัดซ้ำขณะเดินในมนุษย์ของระบบกล้องวีดีโอบันทึกการเคลื่อนไหวตามขั้นตอนของ ธนดล และคณะ (2561) จากนั้นนำผลการทดลองมาทำเป็นกราฟลักษณะองศาการเคลื่อนไหวของข้อสะโพก ข้อเข่า และข้อเท้า ใน 1 รอบการเดิน (1 gait cycle) โดยเริ่มทำการบันทึกจากเท้าขวาอยู่ในลักษณะ heel strike จนกลับมาที่เท้าขวาอยู่ในลักษณะ heel strike อีกครั้ง ยกตัวอย่างกราฟเปรียบเทียบรูปแบบการเคลื่อนไหวที่ข้อสะโพก ข้อเข่า และข้อเท้าขณะเดินของอาสาสมัครคนที่ 2 จำนวน 3 รอบครั้งที่ 1 และ 2 ในระนาบ sagittal ดังรูปที่ 4.5-4.7



ก. ข.

รูปที่ 4.5 กราฟรูปแบบการเคลื่อนไหวที่ข้อสะโพก ขณะเดินของอาสาสมัครคนที่ 2 จำนวน 3 รอบ ก. ครั้งที่ 1 ข. ครั้งที่ 2 ในระนาบ sagittal

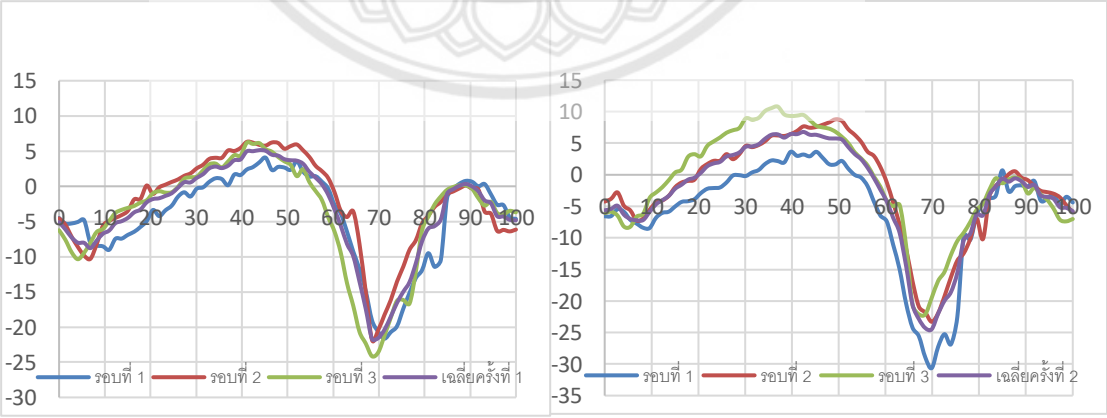
จากรูปที่ 4.5 พบว่ามุมข้อสะโพกที่เริ่มจากเท้าขวาอยู่ในลักษณะ heel strike มีค่าประมาณ 30 องศา และมาต่ำสุดที่ mid-stance ประมาณ -8 องศา และกลับขึ้นไป 30 องศา จากข้อมูลถือว่ากราฟมีความใกล้เคียงกันระหว่างครั้งที่ 1 และ 2



ก. ข.

รูปที่ 4.6 กราฟรูปแบบการเคลื่อนไหวที่ข้อเข่า ขณะเดินของอาสาสมัครคนที่ 2 จำนวน 3 รอบ ก. ครั้งที่ 1 ข. ครั้งที่ 2 ในระนาบ sagittal

จากรูปที่ 4.6 พบว่ามุมข้อเข่าที่เริ่มจากเท้าขวาอยู่ในลักษณะ heel strike มีค่าประมาณ 10 องศา แล้วเพิ่มขึ้นไปถึง 20 องศา ตอนเท้าขวาอยู่ในลักษณะ foot flat จากนั้นมุมลดลงเหลือประมาณ 5 องศา ตรงช่วง 40% gait cycle จากนั้นขึ้นไปถึงประมาณ 65 องศา ตรงช่วง 70% gait cycle และลงมาเหลือประมาณ 10 องศา เมื่อเท้าขวากลับมาอยู่ในลักษณะ heel strike อีกครั้ง จากข้อมูลถือว่ากราฟมีความใกล้เคียงกัน ระหว่างครั้งที่ 1 และ 2

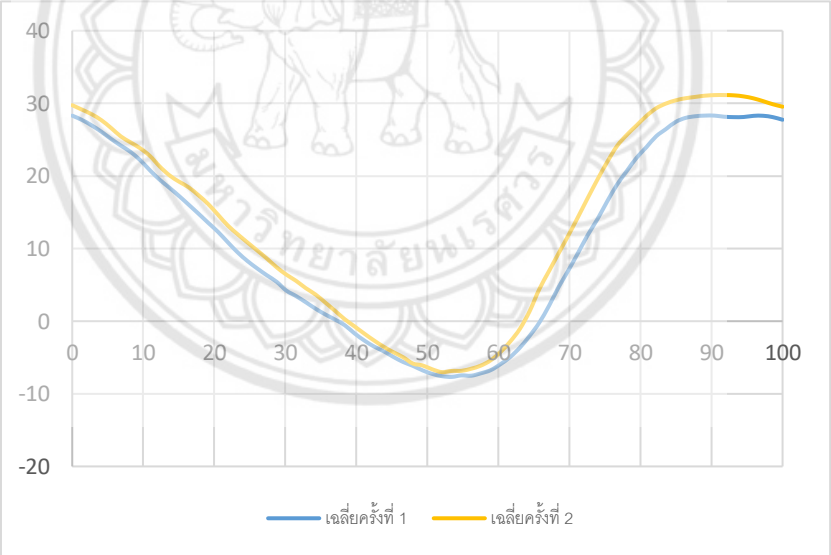


ก. ข.

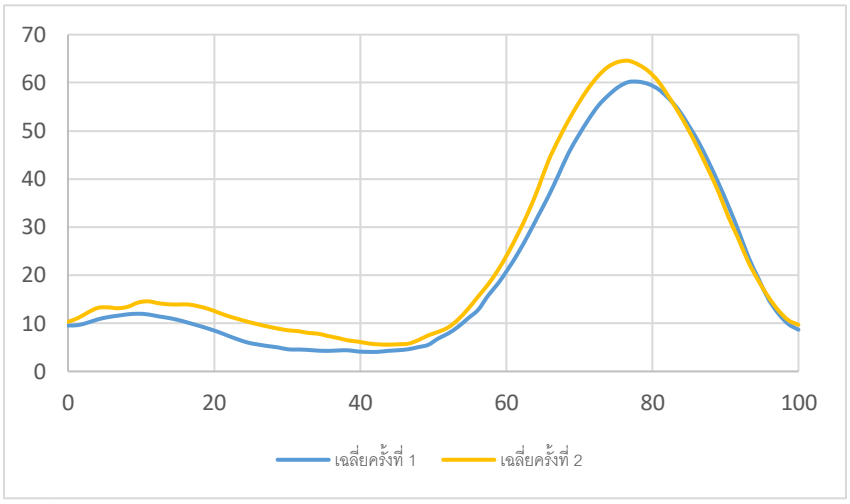
รูปที่ 4.7 กราฟรูปแบบการเคลื่อนไหวที่ข้อเท้า ขณะเดินของอาสาสมัครคนที่ 2 จำนวน 3 รอบ ก. ครั้งที่ 1 ข. ครั้งที่ 2 ในระนาบ sagittal

จากรูปที่ 4.7 พบว่ามุมข้อเท้าที่เริ่มจากเท้าขวาอยู่ในลักษณะ heel strike มีค่าประมาณ -5 องศา ลดลงเหลือประมาณ -10 องศา ตอนเท้าขวาอยู่ในลักษณะ foot flat จากนั้นมุมเพิ่มขึ้นถึงประมาณ 10 องศา ในช่วง 50% gait cycle จากนั้นค่ามุมจะลดลงมาต่ำสุดที่ประมาณ -20 องศา ตรงช่วง 65% gait cycle จากนั้นมุมเพิ่มขึ้นถึงประมาณ 0 องศา และมีค่าลงมาเหลือประมาณ -5 องศา เมื่อเท้าขวาอยู่ในลักษณะ heel strike อีกครั้ง จากข้อมูลถือว่ากราฟมีรูปแบบคล้ายกันระหว่างครั้งที่ 1 และ 2 แต่จะเห็นว่าเส้นกราฟมีการสั่น กราฟไม่เรียบ สาเหตุ มาจากความคลาดเคลื่อนของโปรแกรมในการคำนวณแต่ละครั้งผลออกมาจะมีความคลาดเคลื่อน แม้จะใช้วิดีโอเดิมในการคำนวณและอีกสาเหตุมาจากเท้ามีความเร็วมากในช่วงที่แกว่งขา (swing phase) จึงทำให้กล้องจับ marker ได้ไม่ทัน จึงทำให้การประมวลผลมีความคลาดเคลื่อน

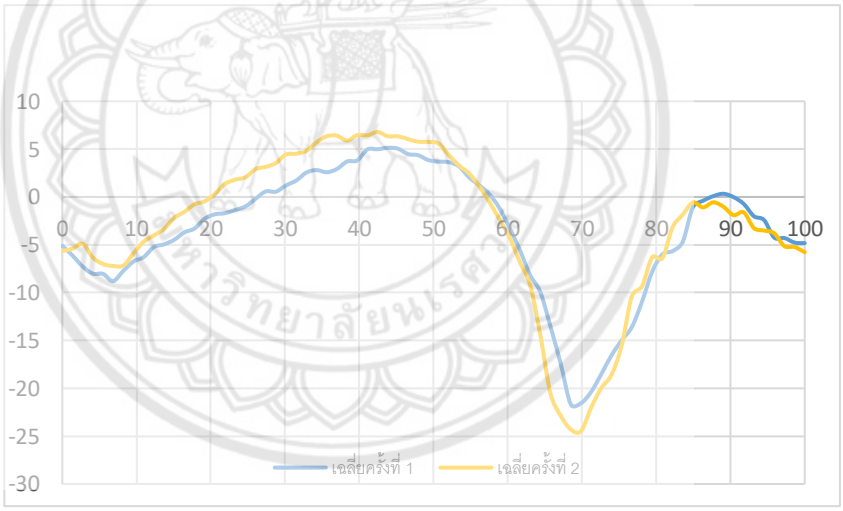
กราฟของคนที่ 2 กราฟเปรียบเทียบรูปแบบการเคลื่อนไหวของมุมองศาข้อสะโพก (hip joint) ข้อเข่า (knee joint) และข้อเท้า (ankle joint) ขณะเดินของอาสาสมัครคนที่ 2 เฉลี่ยทั้ง 5 รอบ ครั้งที่ 1 และ 2 ในระนาบ sagittal ดังรูปที่ 4.8-4.10



รูปที่ 4.8 กราฟเปรียบเทียบรูปแบบการเคลื่อนไหวที่ข้อสะโพก ขณะเดินของอาสาสมัครคนที่ 2 เฉลี่ยครั้งที่ 1 และ ครั้งที่ 2 ในระนาบ sagittal

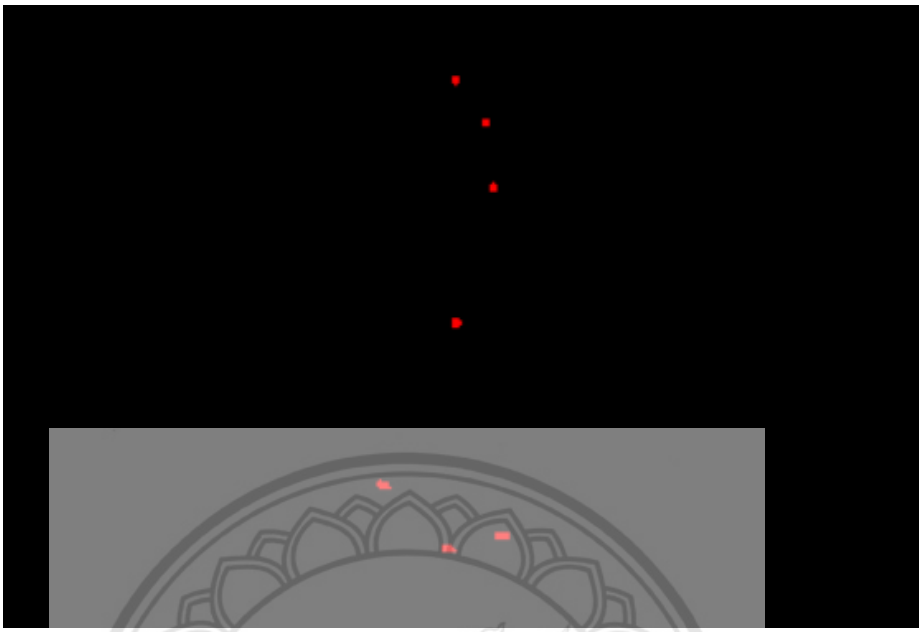


รูปที่ 4.9 กราฟเปรียบเทียบรูปแบบการเคลื่อนไหวที่ข้อเข้า ขณะเดินของอาสาสมัครคนที่ 2 เฉลี่ยครั้งที่ 1 และ ครั้งที่ 2 ในระนาบ sagittal



รูปที่ 4.10 กราฟเปรียบเทียบรูปแบบการเคลื่อนไหวที่ข้อเท้า ขณะเดินของอาสาสมัครคนที่ 2 เฉลี่ยครั้งที่ 1 และ ครั้งที่ 2 ในระนาบ sagittal

จากรูปที่ 4.8 ถึงรูปที่ 4.10 ลักษณะของกราฟเปรียบเทียบข้อมูลการเดิน 3 รอบของทั้ง 2 ครั้ง เฉลี่ยกัน มีความใกล้เคียงกัน แต่มุมข้อเท้าจะมีความคลาดเคลื่อนมากกว่า เนื่องจากช่วงเท้าขวาช่วงที่ก้าวไปกับช่วงที่แกว่งขามีความเร็วมากทำให้ระบบกล้องจับ marker มีความคลาดเคลื่อน แสดงดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 รูปที่ระบบกล้องบันทึกในช่วงแกว่งขา (60%-100% gait cycle)

จากนั้นนำข้อมูลที่ได้จากการทดสอบไปวิเคราะห์ผลทางสถิติด้วยคำนวณโดยใช้สถิติ ICCs model (3, K) เปรียบเทียบค่าเฉลี่ย และ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 ของมุมองศาข้อสะโพก (hop joint) ข้อเข่า (knee joint) และข้อเท้า (ankle joint) ในระหว่างวงจรการเดิน (1 gait cycle) ในระนาบ sagittal และแสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (ICC) ของการทดสอบ Test-retest reliability ของคนที่ 2 ดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ค่าเฉลี่ยขององศาการเคลื่อนไหวข้อสะโพก ข้อเข่า และข้อเท้า ในระนาบ sagittal และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (ICC) ของการทดสอบ Test-retest reliability (วัดซ้ำ 3 ครั้ง) ขณะทดสอบครั้งที่ 1 และ 2 ของอาสาสมัครคนที่ 2 ในการหาความน่าเชื่อถือของการวัดซ้ำของการเดินในมนุษย์

Percent gait cycle	Hip joint (mean ± SD)			Knee joint (mean ± SD)			Ankle joint (mean ± SD)		
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ICC	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ICC	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ICC
0(HS)	28.304 ± 1.588	29.744 ± 1.230		9.553 ± 1.199	10.307 ± 1.717		-5.103 ± 0.993	-5.632 ± 1.228	
10(FF)	21.734 ±0.867	23.478 ± 0.808		11.944 ± 2.377	14.388 ± 1.202		-6.607 ± 1.809	-5.522 ± 2.285	
20	12.770 ± 2.139	15.216 ± 1.555		8.491 ± 0.537	12.551 ± 3.778		-1.997 ± 1.825	0.008 ± 3.208	
30(MS)	4.336 ± 1.568	6.511 ± 3.300		4.622 ± 2.532	8.575 ± 6.679		1.140 ± 1.480	4.356 ± 4.487	
40	-1.864 ± 0.899	-0.900 ± 1.117	0.998*	4.122 ± 1.940	6.111 ± 3.634	0.997*	4.046 ± 2.040	6.465 ± 2.913	0.985*
50(PO)	-7.017 ± 0.609	-6.361 ± 0.378		6.180 ± 2.662	7.853 ± 1.724		3.775 ± 1.572	5.670 ± 3.441	
60(TO)	-6.094 ± 0.890	-4.488 ± 1.951		20.751 ± 4.989	23.988 ± 3.585		-2.864 ± 2.856	-3.879 ± 3.249	
70	7.263 ± 3.921	12.094 ± 3.201		49.293 ± 6.578	55.976 ± 2.820		-21.439 ± 1.772	-24.234 ± 5.621	
80(MSW)	23.084 ± 2.812	27.478 ± 0.832		59.310 ± 1.365	61.558 ± 4.193		-7.090 ± 3.363	-6.344 ± 1.724	
90	28.309 ± 0.305	31.107 ± 0.820	(0.992-	35.799 ± 4.562	33.675 ± 3.327	(0.988-	0.087 ± 0.513	-1.637 ± 0.922	(0.942-
100(HS)	27.738 ± 0.800	29.535 ± 0.497	0.999)**	8.667 ± 2.432	9.694 ± 0.392	0.999)**	-4.828 ±1.239	-5.774 ± 1.320	0.996)**

*ระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ $p < 0.001$

** 95% confidence interval

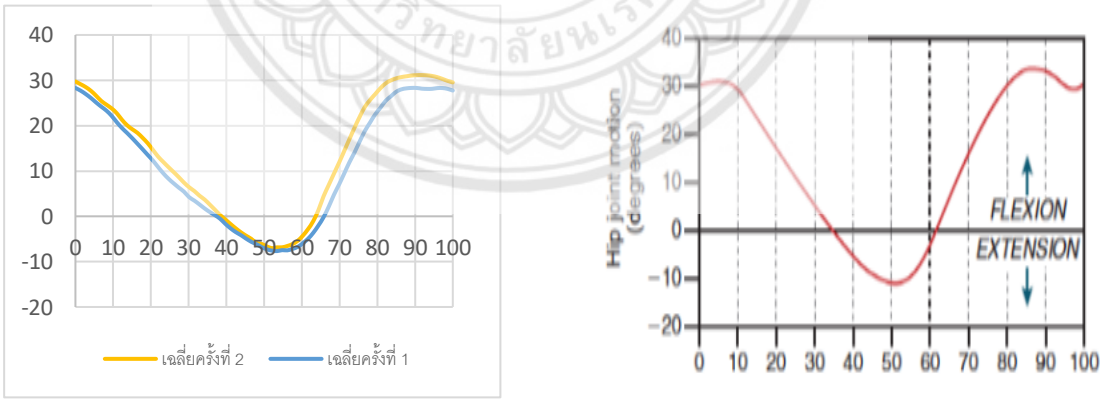
hip ค่า + เท่ากับ hip flexion ค่า – เท่ากับ hip extension

knee ค่า + เท่ากับ knee flexion ค่า – เท่ากับ knee extension

ankle ค่า + เท่ากับ ankle dorsiflexion ค่า – เท่ากับ ankle plantarflexion

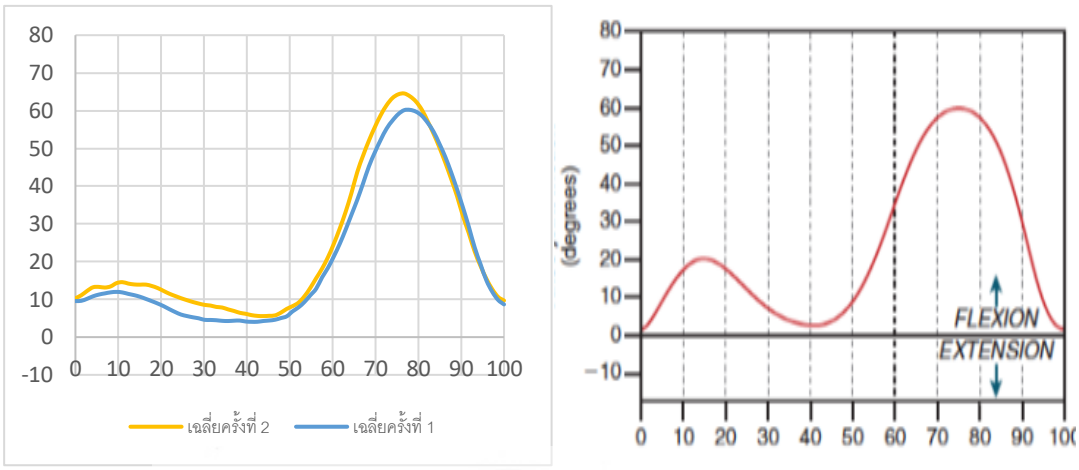
จากตารางที่ 4.6 ได้ทำการทดสอบความน่าเชื่อถือของการวัดซ้ำขณะเดินของอาสามัครคนที่ 2 โดยเปรียบเทียบมุมองศาข้อสะโพก (hop joint) ข้อเข่า (knee joint) และข้อเท้า (ankle joint) ในระหว่างวงจรการเดิน (gait cycle) ในระนาบ sagittal ซึ่งการทดสอบหาความน่าเชื่อถือของการวัดซ้ำวัดซ้ำจำนวน 2 ครั้ง ๆ ละ 3 รอบ ผลของการศึกษาพบว่า มีความน่าเชื่อถือของการวัดซ้ำของระบบกล้องวิดีโอบันทึกภาพการเคลื่อนไหนขณะเดินของ ข้อสะโพก ข้อเข่า และข้อเท้า ในระนาบ sagittal อยู่ในระดับดีเยี่ยม (ICC = 0.998,0.997,0.985 p-value < 0.001, ตามลำดับ) แสดงให้เห็นว่าระบบกล้องมีความน่าเชื่อถือสูงในการวัดซ้ำ สามารถดูผลการทดลองของอาสาสมัครทั้ง 3 คนอยู่ในภาคผนวก ค ตารางการทดสอบการวัดตำแหน่ง x y และ z ของ marker บนระนาบฉากอ้างอิง

เมื่อนำข้อมูลของอาสาสมัครคนที่ 2 ทั้ง 2 ครั้งมาทำการเปรียบเทียบกับรูปแบบมุมองศาการเคลื่อนไหวในการเดินของมนุษย์จากการทบทวนวรรณกรรมของ Neurmann ในปี 2010 [22] ในระนาบ sagittal ดังรูปที่ 4.12-4.14



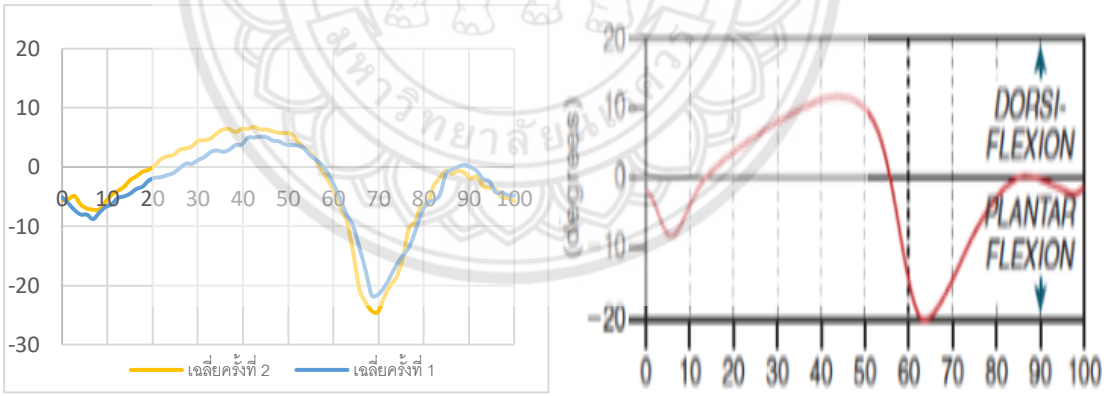
ก. ข.

รูปที่ 4.12 การเปรียบเทียบรูปแบบการเคลื่อนไหวที่ข้อสะโพกขณะเดินของ ก. อาสาสมัครคนที่ 2 ข. Neurmann ในปี 2010 [22] ในระนาบ sagittal



ก. ข.

รูปที่ 4.13 การเปรียบเทียบรูปแบบการเคลื่อนไหวที่ข้อเข่าขณะเดินของ ก. อาสาสมัครคนที่ 2 ข. Neurmann ในปี 2010 [22] ในระนาบ sagittal

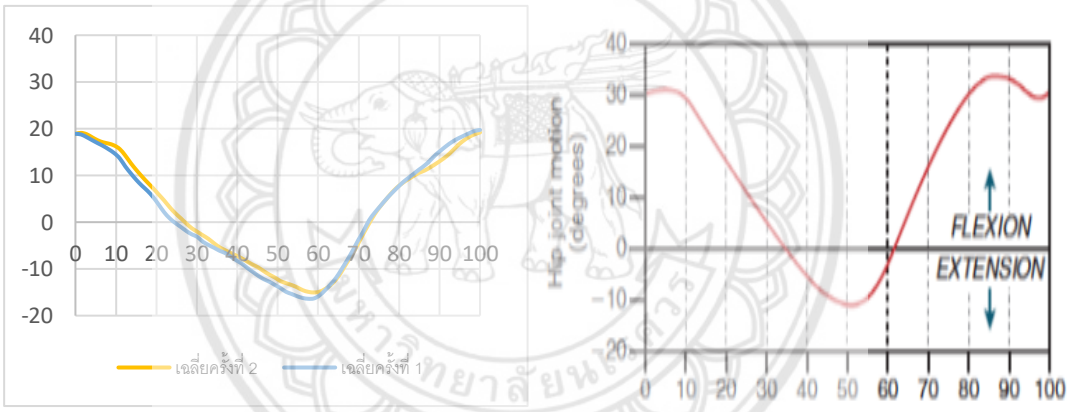


ก. ข.

รูปที่ 4.14 การเปรียบเทียบรูปแบบการเคลื่อนไหวที่ข้อเท้าขณะเดินของ ก. อาสาสมัครคนที่ 2 ข. Neurmann ในปี 2010 [22] ในระนาบ sagittal

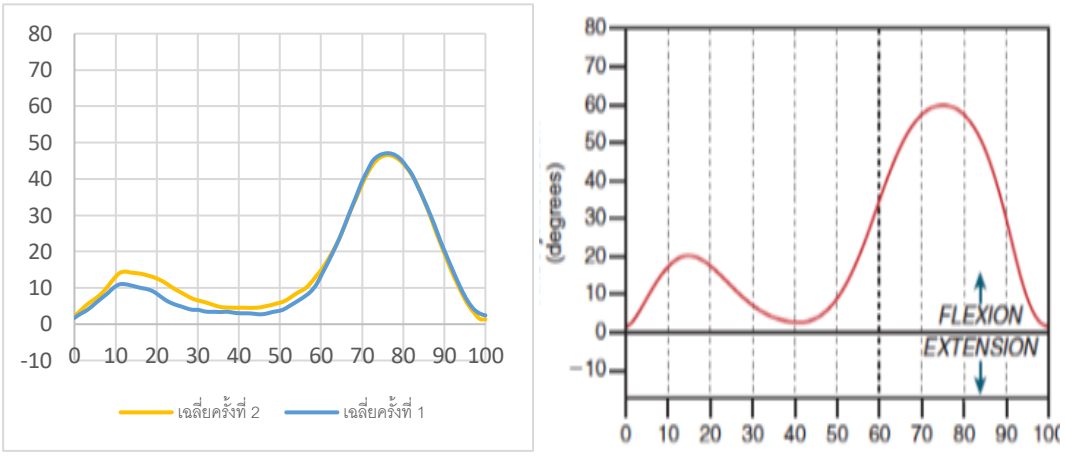
จากรูปภาพ รูปที่ 4.12-4.14 ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบรูปแบบมุมองศาการเคลื่อนไหวในการเดินของอาสาสมัครคนที่ 2 โดยเทียบจากการทบทวนวรรณกรรมของ Neurmann ในปี 2010 [22] ในระนาบ sagittal พบว่ารูปแบบการเคลื่อนไหวของอาสาสมัครคนที่ 2 มีความคล้ายกับวรรณกรรมของ Neurmann จะมีความแตกต่างบ้างในบางจังหวะของการเดิน ตามท่าทางการเดินและลักษณะทางกายภาพของแต่ละคน เช่น อายุ ความสูง และความยาวของท่อนขา เป็นต้น

จะเห็นว่าแต่ละคนมีลักษณะของการเดินที่แตกต่างกัน โดยตัวอย่างที่เห็นได้ชัดคือรูปแบบการเดินของอาสาสมัครคนที่ 3 จะมีลักษณะการเดินที่แตกต่างออกไปจาก 2 คนแรก ดังรูปที่ 4.15-4.17



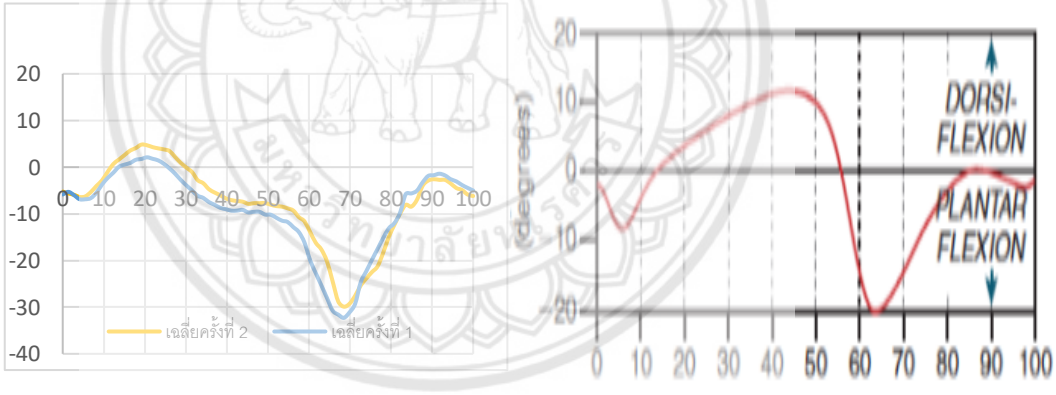
ก. ข.

รูปที่ 4.15 การเปรียบเทียบรูปแบบการเคลื่อนไหวที่ข้อสะโพกขณะเดินของ ก. อาสาสมัครคนที่ 3 ข. Neurmann ในปี 2010 [22] ในระนาบ sagittal



ก. ข.

รูปที่ 4.16 การเปรียบเทียบรูปแบบการเคลื่อนไหวที่ข้อเข่าขณะเดินของ ก. อาสาสมัครคนที่ 3 ข. Neurmann ในปี 2010 [22] ในระนาบ sagittal



ก. ข.

รูปที่ 4.17 การเปรียบเทียบรูปแบบการเคลื่อนไหวที่ข้อเท้าขณะเดินของ ก. อาสาสมัครคนที่ 3 ข. Neurmann ในปี 2010 [22] ในระนาบ sagittal

จากรูปที่ 4.15-4.17 พบว่าลักษณะการเดินของอาสาสมัครคนที่ 3 มีความผิดปกติจากลักษณะการเดินของคนทั่วไป คือ จะมีช่วงก้าวขาที่สั้นกว่าปกติ จึงทำให้กราฟมุมข้อสะโพกในช่วง Heel Strike มีค่าประมาณ 18 องศา และมีการยกส้นเท้าสองครั้ง จึงทำให้กราฟมุมของข้อเท้าในช่วง 10 – 60 % gait มีมุมองศาดิ่งลงถึงสองครั้ง

บทที่ 5

บทสรุป

โครงงานนี้เป็นการพัฒนาระบบการสอบเทียบกล้องกล้อง ให้มีความแม่นยำในการวัดตำแหน่งใน 3 มิติและสามารถนำมาใช้กับการวิเคราะห์การเดินบนลู่วิ่งไฟฟ้า และทดสอบความน่าเชื่อถือของการวัดซ้ำขณะเดินในมนุษย์ของระบบกล้อง AT-Gait ในการวัดองศาการเคลื่อนไหวของข้อสะโพก ข้อเข่า และข้อเท้า กับอาสาสมัครอายุระหว่าง 21-23 ปี จำนวน 3 คน

ในการพัฒนาระบบการสอบเทียบกล้อง และทำการทดสอบความแม่นยำในการวัดตำแหน่งใน 3 มิติ ในครั้งนี้พบว่า ระบบกล้องสามารถประมวลผลตำแหน่ง marker ในแนวแกน x และ y ได้ดีเยี่ยม และสามารถประมวลผลตำแหน่งในแนวแกน z อยู่ในระดับที่ดี (ความคลาดเคลื่อนอยู่ในช่วงที่ไม่เกิน 1-2 เซนติเมตร) เมื่อมีการเคลื่อนย้ายระบบกล้องสามารถนำกระดานสอบเทียบมาใช้ในการสอบเทียบกล้องใหม่โดยใช้เวลาประมาณ 5 นาที จากรุ่นที่ผ่านมาใช้เวลาประมาณ 30-60 นาที และใช้เวลาในการดึงข้อมูลจากวิดีโอ 1 gait cycle ประมาณ 3-5 นาที จากรุ่นที่ผ่านมาใช้เวลาประมาณ 10-15 นาทีต่อ 1 รอบการเดิน สามารถนำไปใช้ในการพัฒนาระบบกล้อง AT-Gait ทำให้ระบบกล้องประมวลผลได้เร็วขึ้น และการทดสอบความน่าเชื่อถือของการวัดซ้ำขณะเดินในมนุษย์โดยใช้สถิติ Intra-class Correlation Coefficient Two-Way Mixed-Effects (Model 3,k) ระหว่างการทดสอบครั้งที่ 1 และ 2 ในช่วงการเดิน 1 รอบการเดินในระนาบ sagittal plane ของทั้งข้อสะโพก ข้อเข่า และข้อเท้ามีค่าความน่าเชื่อถืออยู่ในระดับที่สูงมาก (ICC = 0.998, 0.997, 0.985, p-value < 0.001, ตามลำดับ) อย่างไรก็ตามแม้ว่าการศึกษาครั้งนี้ยังมีความคลาดเคลื่อนจากโปรแกรม

ระบบกล้อง AT-Gait มีศักยภาพในการต่อยอดไปในทางการแพทย์เช่น คลินิก โรงพยาบาลขนาดกลางลงมา อย่างไรก็ตามถ้ามีการปรับปรุงโปรแกรมให้สามารถประมวลผลตำแหน่งใน 3 มิติให้มีความแม่นยำมากขึ้น มีจัดการข้อมูลให้มีความสะดวก และรวดเร็ว ผลที่ได้ออกมาเป็นกราฟแบบ real-time สามารถวิเคราะห์จากหน้าจอได้เลยเพื่อสะดวกต่อการเฝ้าระวังและคัดกรองเบื้องต้นในปัญหาการเคลื่อนไหวผิดปกติ

ข้อจำกัดของงานวิจัย

- ระบบโปรแกรมในการตรวจจับ marker มีความคลาดเคลื่อนการประมวลผลตำแหน่งของ marker อาจมีสาเหตุมาจาก คลื่นสัญญาณรบกวน (noise) และ แสงสะท้อนที่เกิดจากสภาพแวดล้อม สังเกตได้จากกราฟของการเดินมีการสั่นเกิดขึ้น

- ใช้เวลาในการดึงข้อมูลจากวิดีโอ 1 gait cycle ประมาณ 3-5 นาที เนื่องจากต้องดึงข้อมูลทีละเฟรม

- ฉากอ้างอิงไม่มั่นคง ทำให้ฉากเอียงเมื่อสอบเทียบกล้อง ทำให้การคำนวณคลาดเคลื่อน

ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยครั้งต่อไป

- ปรับปรุงระบบโปรแกรมในการตรวจจับ marker ให้มีความคลาดเคลื่อนน้อยด้วยการกรองสัญญาณจากข้อมูลดิบที่ได้

- พัฒนาระบบติดตาม marker เพื่อลดเวลาในการดึงข้อมูลจากวิดีโอ

- เพิ่มจำนวนกล้องที่ใช้เป็น 3 ตัว เพื่อที่จะทำให้ระบบกล้องประมวลผลตำแหน่งในแนวแกน z แม่นยำมากยิ่งขึ้นและทำให้สามารถวิเคราะห์การเดินในระนาบอื่นๆพร้อมกันได้

- ปรับปรุงฉากอ้างอิงให้มีความมั่นคง ไม่เกิดการเคลื่อนที่หรือโก่งงอเมื่อทำการสอบเทียบกล้อง

เอกสารอ้างอิง

[1] Cyrill Stachniss. (July 9 2015). **Photogrammetry I - 15a - Camera Extrinsics and Intrinsics** (2015) [Video]. Retrieved October 3 2019, from www.youtube.com/watch? v=DX2GooBIESs&t=526s

[2] Rich Radke. (March 28 2014). **CVFX Lecture 17: Image formation and single-camera calibration** [Video]. Retrieved October 3 2019, from www.youtube.com/watch?v=4-thTdR7Blg&t=1591s

[3] QUT robot academy**. Image formation** [Video]. Retrieved October 3 2019, from https://robotacademy.net.au/lesson/image-formation/

[4] Tsai, R.Y. (August 1987). **A Versatile Camera Calibration Technique for High Accuracy 3D Machine Vision Metrology using off-the-shelf TV Cameras and Lenses**. IEEE Journal of Robotics and Automation,

[5] วิบูลย แสงวีระพันธุศิริ และกรรมมันต ชูประเสริฐ. (4-7 พฤศจิกายน 2552). **ระบบติดตามอนุภาคใน 3 มิติโดยใชภาพสเตอริโอ.** การประชุมเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23, เชียงใหม่.

[6] Zhang Z. (November 2000). **A Flexible New Technique for Camera Calibration**. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence.

[7] Putruksa Pattanasiri. (11 เมษายน 2556). ใบความรู้ เรื่อง การเคลื่อนไหวร่างกาย. สืบค้นเมื่อ 12 ตุลาคม 2562, จาก putruksa.blogspot.com/2013/04/blog-post_10.html

[8] Michael Walden**. Planes Of Motion.** Retrieved December 15 2019, from www.teachpe.com/anatomy-physiology/planes-of-movement

[9] Perry J. (2003). **Ganganalyse**. München, Germany**:** Urban & Fischer.

[10] Peggy A. Houglum, Dolores B. Bertoti. (1948). **Brunnstrom's Clinical Kinesiology**. the United States of America .F. A. Davis Company.

[11] สุจิตรา บุญหยง. (4 สิงหาคม 2547) **เอกสารประกอบการสอน เรื่องปฏิบัติการเรื่อง Normal Gait Analysis I** : Footprint. จุฬาลงกรณมหาวิทยาลัย.

[12] สกัลยา สิทธิคงศักดิ์ และวรวรรณ คำถาชา. (2549). **การเดินและการเคลื่อนย้ายตัว**. ขอนแก่น: โรงพิมพ์คลังนานาวิทยา.

[13] สายวรุณ สุกกำ, เอกสิริ แก่นศักดิ์ศิริ และอุทุมพร โดมทอง. **บทความ สหสัมพันธ์ภายในชั้น (Intraclass Correlation).** มหาวิทยาลัยขอนแ

[14] เฉลิมพล คงเขียว. (2553). **ระบบภาพเคลื่อนไหวสำหรับการวิเคราะห์การเดินของมนุษย์**, [วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาตรี] สงขลา: มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

[15] กฤติยา ก่อเจดีย์, กัญญสิริ นิลแก้ว และณัฐิกานต์ นกแก้ว. (2557). **การพัฒนาระบบกล้องวิดีโอบันทึกภาพการเคลื่อนไหวสำหรับวิเคราะห์การเดินแบบ 2 มิติในกลุ่มตัวอย่างอายุระหว่าง 18-25 ปี.** [วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาตรี] พิษณุโลก: มหาวิทยาลัยนเรศวร.

[16] กรรณิการ์ กำมะหยี่, จิราภา ชมพู และวิภาดา ภัทรคุณ. (2558). **การทดสอบความแม่นยำของระบบ กล้องวิดีโอบันทึกภาพการเคลื่อนไหวสำหรับสำหรับวิเคราะห์การเดินแบบ 2 มิติในกลุ่ม ตัวอย่างอายุระหว่าง 21-25 ปี**. [วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาตรี] พิษณุโลก: มหาวิทยาลัยนเรศวร.

[17] สุเมธ เหมะวัฒนะชัย, สะการะ ตันโสภณ และ ไชยยงค์ จรเกตุ. (2561). **รายงานการวิจัยเรื่อง ระบบบันทึกและประเมินการเดินแบบสามมิติในผู้สูงอายุ** (แหล่งทุนจากที่ประชุมอธิการบดีแห่งประเทศไทย ทปอ.) โครงการ Innovation Hub เพื่อสร้างเศรษฐกิจฐานนวัตกรรมของประเทศตามนโยบายประเทศไทย 4.0 กลุ่มสังคมผู้สูงอายุ).

[18] ธนดล บุญลือ, นายภัคพล คำฟู และ สุมาลี สารฟอง. (2561). **ระบบกล้องสำหรับวิเคราะห์การเดินบนลู่วิ่งไฟฟ้า.** [วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาตรี] พิษณุโลก: มหาวิทยาลัยนเรศวร.

[19] MATLAB. (July 12 2019). **Camera Calibration with MATLAB** [Video]. Retrieved January 8 2020, from www.youtube.com/watch?v=x6YIwoQBBxA

[20] สุเมธ เหมะวัฒนะชัย (2542). **การศึกษาเชิงวิเคราะห์เกี่ยวกับการระบายอากาศในระบบหลายห้อง.** [วิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโท] กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

[21] Richard L. Burden. and J. Douglas. (1989). Numerical Analysis, 4th Edition, Youngstown State University

[22] Neumann DA. (2010). **Kinesioly of the musculoskeleton system**. Foundations for rehabilitation. 2nd ed. St Louis, Missouri. Mosby Elsevier.

ภาคผนวก ก

ตารางการทดสอบการวัดตำแหน่ง x y และ z ของ marker บนระนาบฉากอ้างอิง

ตารางที่ ก.1 ผลการทดสอบตำแหน่งแกน x ของ marker ที่ได้จากระบบกล้องบนระนาบฉากอ้างอิง แต่ละจุด ที่ระยะ 150 เซนติเมตร กล้องคู่ใกล้

ระยะระหว่างจุด	ระยะห่างจริง (cm)	ระยะจากกล้อง (cm)	ความคาดเคลื่อน (cm)
A1-B1	12.6	12.490	0.110
A2-B2	12.8	12.483	0.317
A3-B3	12.5	12.159	0.341
A4-B4	12.6	12.345	0.255
A5-B5	12.7	12.376	0.324
A6-B6	12.6	12.282	0.318
A7-B7	12.6	12.460	0.140
B1-C1	15.0	14.717	0.283
B2-C2	14.9	14.793	0.107
B3-C2	15.2	15.028	0.172
B4-C4	15.1	15.118	-0.018
B5-C5	15.0	14.987	0.013
B6-C6	15.2	15.258	-0.058
B7-C7	15.5	15.205	0.295
C1-D1	15.1	14.800	0.300
C2-D2	15.1	15.112	-0.012
C3-D3	15.2	15.110	0.090
C4-D4	15.2	15.018	0.182
C5-D5	15.0	14.999	0.001
C6-D6	14.9	14.815	0.085
C7-D7	14.8	14.811	-0.011

D1-E1	15.5	15.406	0.094
D2-E2	15.1	14.905	0.195
D3-E3	15.0	15.108	-0.108
D4-E4	15.0	14.974	0.026
D5-E5	15.1	15.110	-0.010
D6-E6	15.0	15.103	-0.103
D7-E7	15.2	15.067	0.133
E1-F1	14.9	14.915	-0.015
E2-F2	15.2	15.147	0.053
E3-F3	15.1	15.083	0.017
E4-F4	15.0	15.014	-0.014
E5-F5	15.1	15.052	0.048
E6-F6	15.1	15.182	-0.082
E7-F7	15.2	15.107	0.093
F1-G1	15.1	15.112	-0.012
F2-G2	15.0	14.840	0.160
F3-G3	14.9	14.815	0.085
F4-G4	15.2	15.109	0.091
F5-G5	15.0	14.976	0.024
F6-G6	14.8	14.721	0.079
F7-G7	14.6	14.517	0.083

ตารางที่ ก.2 ผลการทดสอบตำแหน่งแกน y ของ marker ที่ได้จากระบบกล้องบนระนาบฉากอ้างอิง แต่ละจุด ที่ระยะ 150 เซนติเมตร กล้องคู่ใกล้

ระยะระหว่างจุด	ระยะห่างจริง (cm)	ระยะจากกล้อง (cm)	ความคาดเคลื่อน (cm)
A1-A2	9.9	9.832	0.068
A2-A3	15.4	15.138	0.262
A3-A4	15.1	14.902	0.198
A4-A5	15.0	14.821	0.179
A5-A6	15.2	15.255	-0.055
A6-A7	10.2	9.969	0.227
B1-B2	10.2	9.969	0.231
B2-B3	15.6	15.463	0.137
B3-B4	15.2	15.128	0.072
B4-B5	14.8	14.672	0.128
B5-B6	15.0	14.879	0.121
B6-B7	9.8	9.662	0.138
C1-C2	10.3	10.043	0.257
C2-C3	14.8	14.616	0.184
C3-C4	15.5	15.363	0.137
C4-C5	15.3	15.238	0.062
C5-C6	14.4	14.245	0.155
C6-C7	10.1	10.085	0.015
D1-D2	10.2	10.086	0.114
D2-D3	15.4	15.198	0.202
D3-D4	15.2	15.020	0.180

D4-D5	15.2	14.995	0.205
D5-D6	14.9	14.853	0.047
D6-D7	10.1	9.907	0.193
E1-E2	10.6	10.514	0.086
E2-E3	15.1	14.967	0.133
E3-E4	14.6	14.502	0.098
E4-E5	15.6	15.462	0.138
E5-E6	14.9	14.630	0.270
E6-E7	10.4	10.272	0.128
F1-F2	10.0	9.945	0.055
F2-F3	15.2	15.079	0.121
F3-F4	14.5	14.335	0.165
F4-F5	15.8	15.780	0.020
F5-F6	15.0	14.781	0.219
F6-F7	10.0	9.943	0.057
G1-G2	9.5	9.519	-0.019
G2-G3	15.1	14.978	0.122
G3-G4	15.0	14.867	0.133
G4-G5	15.5	15.563	-0.063
G5-G6	14.8	14.611	0.189
G6-G7	9.7	9.496	0.204

ตารางที่ ก.3 ผลการทดสอบตำแหน่งแกน z ของ marker ที่ได้จากระบบกล้องบนระนาบฉากอ้างอิง แต่ละจุด ที่ระยะ 150 เซนติเมตร กล้องคู่ใกล้

จุด	ระยะห่างจริง (cm)	ระยะจากกล้อง (cm)	ความคาดเคลื่อน (cm)
A1	150	148.455	-1.545
A2	150	148.480	-1.520
A3	150	148.844	-1.156
A4	150	149.378	-0.622
A5	150	149.418	-0.582
A6	150	149.819	-0.181
A7	150	149.889	-0.111
B1	150	148.741	-1.259
B2	150	149.231	-0.769
B3	150	149.596	-0.404
B4	150	149.857	-0.143
B5	150	150.064	0.064
B6	150	150.280	0.280
B7	150	150.285	0.285
C1	150	149.091	-0.909
C2	150	149.529	-0.471
C3	150	150.019	0.019
C4	150	150.059	0.059
C5	150	150.221	0.221
C6	150	150.245	0.245
C7	150	150.294	0.294
D1	150	149.742	-0.258

D2	150	149.499	-0.501
D3	150	150.024	0.024
D4	150	149.916	-0.084
D5	150	150.276	0.276
D6	150	150.383	0.383
D7	150	150.213	0.213
E1	150	149.861	-0.139
E2	150	149.713	-0.287
E3	150	150.015	0.015
E4	150	149.800	-0.200
E5	150	150.266	0.266
E6	150	149.909	-0.091
E7	150	150.247	0.247
F1	150	149.661	-0.339
F2	150	149.264	-0.736
F3	150	149.927	-0.073
F4	150	149.725	-0.275
F5	150	149.866	-0.134
F6	150	150.049	0.049
F7	150	150.295	0.295
G1	150	149.944	-0.056
G2	150	149.271	-0.729
G3	150	149.610	-0.390
G4	150	149.864	-0.136
G5	150	149.758	-0.242
G6	150	149.851	-0.149
G7	150	149.734	-0.266

ตารางที่ ก.4 ผลการทดสอบตำแหน่งแกน x ของ marker ที่ได้จากระบบกล้องบนระนาบฉากอ้างอิง แต่ละจุด ที่ระยะ 150 เซนติเมตร กล้องคู่ไกล

ระยะระหว่างจุด	ระยะห่างจริง (cm)	ระยะจากกล้อง (cm)	ความคาดเคลื่อน (cm)
A1-B1	12.6	12.731	0.131
A2-B2	12.8	12.824	0.024
A3-B3	12.5	12.518	0.018
A4-B4	12.6	12.591	0.009
A5-B5	12.7	12.711	0.011
A6-B6	12.6	12.513	0.087
A7-B7	12.6	12.610	0.010
B1-C1	15.0	14.884	0.116
B2-C2	14.9	14.973	0.073
B3-C2	15.2	15.170	0.030
B4-C4	15.1	15.291	0.191
B5-C5	15.0	15.099	0.099
B6-C6	15.2	15.340	0.140
B7-C7	15.5	15.345	0.155
C1-D1	15.1	15.034	0.066
C2-D2	15.1	15.189	0.089
C3-D3	15.2	15.163	0.037
C4-D4	15.2	15.061	0.139
C5-D5	15.0	15.101	0.101
C6-D6	14.9	14.876	0.024
C7-D7	14.8	14.856	0.056

D1-E1	15.5	15.451	0.049
D2-E2	15.1	14.978	0.122
D3-E3	15.0	15.146	0.146
D4-E4	15.0	15.038	0.038
D5-E5	15.1	15.115	0.015
D6-E6	15.0	15.156	0.156
D7-E7	15.2	15.134	0.066
E1-F1	14.9	14.934	0.034
E2-F2	15.2	15.230	0.030
E3-F3	15.1	15.123	0.023
E4-F4	15.0	15.091	0.091
E5-F5	15.1	15.081	0.019
E6-F6	15.1	15.220	0.120
E7-F7	15.2	15.165	0.035
F1-G1	15.1	15.118	0.018
F2-G2	15.0	14.892	0.108
F3-G3	14.9	14.924	0.024
F4-G4	15.2	15.092	0.108
F5-G5	15.0	15.132	0.132
F6-G6	14.8	14.845	0.045
F7-G7	14.6	14.699	0.099

ตารางที่ ก.5 ผลการทดสอบตำแหน่งแกน y ของ marker ที่ได้จากระบบกล้องบนระนาบฉากอ้างอิง แต่ละจุด ที่ระยะ 150 เซนติเมตร กล้องคู่ไกล

ระยะระหว่างจุด	ระยะห่างจริง (cm)	ระยะจากกล้อง (cm)	ความคาดเคลื่อน (cm)
A1-A2	9.9	9.926	0.026
A2-A3	15.4	15.304	0.096
A3-A4	15.1	15.059	0.041
A4-A5	15.0	14.920	0.080
A5-A6	15.2	15.293	0.093
A6-A7	10.2	10.010	0.190
B1-B2	10.2	10.163	0.037
B2-B3	15.6	15.554	0.046
B3-B4	15.2	15.184	0.016
B4-B5	14.8	14.752	0.048
B5-B6	15.0	14.912	0.088
B6-B7	9.8	9.695	0.105
C1-C2	10.3	10.214	0.086
C2-C3	14.8	14.684	0.116
C3-C4	15.5	15.402	0.098
C4-C5	15.3	15.255	0.045
C5-C6	14.4	14.322	0.078
C6-C7	10.1	10.118	0.018
D1-D2	10.2	10.059	0.141
D2-D3	15.4	15.249	0.151
D3-D4	15.2	15.057	0.143

D4-D5	15.2	15.030	0.170
D5-D6	14.9	14.899	0.001
D6-D7	10.1	10.034	0.066
E1-E2	10.6	10.499	0.101
E2-E3	15.1	15.039	0.061
E3-E4	14.6	14.522	0.078
E4-E5	15.6	15.523	0.077
E5-E6	14.9	14.723	0.177
E6-E7	10.4	10.292	0.108
F1-F2	10.0	9.899	0.101
F2-F3	15.2	15.231	0.031
F3-F4	14.5	14.381	0.119
F4-F5	15.8	15.819	0.019
F5-F6	15.0	14.842	0.158
F6-F7	10.0	9.964	0.036
G1-G2	9.5	9.385	0.115
G2-G3	15.1	15.103	0.003
G3-G4	15.0	14.940	0.060
G4-G5	15.5	15.652	0.152
G5-G6	14.8	14.695	0.105
G6-G7	9.7	9.574	0.126

ตารางที่ ก.6 ผลการทดสอบตำแหน่งแกน z ของ marker ที่ได้จากระบบกล้องบนระนาบฉากอ้างอิง แต่ละจุด ที่ระยะ 150 เซนติเมตร กล้องคู่ไกล

จุด	ระยะห่างจริง (cm)	ระยะจากกล้อง (cm)	ความคาดเคลื่อน (cm)
A1	150	149.674	-0.326
A2	150	149.650	-0.350
A3	150	149.642	-0.358
A4	150	149.935	-0.065
A5	150	149.992	-0.008
A6	150	149.856	-0.144
A7	150	149.761	-0.239
B1	150	149.817	-0.183
B2	150	149.761	-0.239
B3	150	149.978	-0.022
B4	150	150.057	0.057
B5	150	150.089	0.089
B6	150	149.996	-0.004
B7	150	150.009	0.009
C1	150	149.944	-0.056
C2	150	149.837	-0.163
C3	150	150.109	0.109
C4	150	150.120	0.120
C5	150	150.233	0.233
C6	150	150.210	0.210
C7	150	150.070	0.070

D1	150	149.953	-0.047
D2	150	149.926	-0.074
D3	150	150.180	0.180
D4	150	150.037	0.037
D5	150	150.176	0.176
D6	150	150.182	0.182
D7	150	150.250	0.250
E1	150	150.251	0.251
E2	150	150.190	0.190
E3	150	150.218	0.218
E4	150	150.255	0.255
E5	150	150.351	0.351
E6	150	150.202	0.202
E7	150	150.271	0.271
F1	150	150.274	0.274
F2	150	150.298	0.298
F3	150	150.199	0.199
F4	150	150.458	0.458
F5	150	150.195	0.195
F6	150	150.328	0.328
F7	150	150.304	0.304
G1	150	150.427	0.427
G2	150	150.329	0.329
G3	150	150.389	0.389
G4	150	150.307	0.307
G5	150	150.506	0.506
G6	150	150.445	0.445
G7	150	150.465	0.465

ตารางที่ ก.7 ผลการทดสอบตำแหน่งแกน x ของ marker ที่ได้จากระบบกล้องบนระนาบฉากอ้างอิง แต่ละจุด ที่ระยะ 225 เซนติเมตร กล้องคู่ใกล้

ระยะระหว่างจุด	ระยะห่างจริง (cm)	ระยะจากกล้อง (cm)	ความคาดเคลื่อน (cm)
A1-B1	12.6	12.681	0.081
A2-B2	12.8	12.785	0.015
A3-B3	12.5	12.403	0.097
A4-B4	12.6	12.630	0.030
A5-B5	12.7	12.807	0.107
A6-B6	12.6	12.434	0.166
A7-B7	12.6	12.609	0.009
B1-C1	15.0	14.923	0.077
B2-C2	14.9	15.061	0.161
B3-C2	15.2	15.214	0.014
B4-C4	15.1	15.170	0.070
B5-C5	15.0	14.995	0.005
B6-C6	15.2	15.238	0.038
B7-C7	15.5	15.204	0.296
C1-D1	15.1	15.084	0.016
C2-D2	15.1	15.220	0.120
C3-D3	15.2	15.175	0.025
C4-D4	15.2	15.147	0.053
C5-D5	15.0	15.109	0.109
C6-D6	14.9	14.814	0.086
C7-D7	14.8	14.793	0.007

D1-E1	15.5	15.421	0.079
D2-E2	15.1	14.928	0.172
D3-E3	15.0	15.107	0.107
D4-E4	15.0	15.009	0.009
D5-E5	15.1	15.081	0.019
D6-E6	15.0	15.153	0.153
D7-E7	15.2	15.066	0.134
E1-F1	14.9	14.986	0.086
E2-F2	15.2	15.223	0.023
E3-F3	15.1	15.136	0.036
E4-F4	15.0	15.066	0.066
E5-F5	15.1	15.131	0.031
E6-F6	15.1	15.175	0.075
E7-F7	15.2	15.200	0.000
F1-G1	15.1	15.006	0.094
F2-G2	15.0	14.834	0.166
F3-G3	14.9	14.845	0.055
F4-G4	15.2	15.190	0.010
F5-G5	15.0	15.021	0.021
F6-G6	14.8	14.866	0.066
F7-G7	14.6	14.652	0.052

ตารางที่ ก.8 ผลการทดสอบตำแหน่งแกน y ของ marker ที่ได้จากระบบกล้องบนระนาบฉากอ้างอิง แต่ละจุด ที่ระยะ 225 เซนติเมตร กล้องคู่ใกล้

ระยะระหว่างจุด	ระยะห่างจริง (cm)	ระยะจากกล้อง (cm)	ความคาดเคลื่อน (cm)
A1-A2	9.9	9.963	0.063
A2-A3	15.4	15.420	0.020
A3-A4	15.1	15.012	0.088
A4-A5	15.0	14.989	0.011
A5-A6	15.2	15.280	0.080
A6-A7	10.2	9.982	0.218
B1-B2	10.2	10.223	0.023
B2-B3	15.6	15.690	0.090
B3-B4	15.2	15.207	0.007
B4-B5	14.8	14.797	0.003
B5-B6	15.0	14.841	0.159
B6-B7	9.8	9.674	0.126
C1-C2	10.3	10.320	0.020
C2-C3	14.8	14.715	0.085
C3-C4	15.5	15.561	0.061
C4-C5	15.3	15.126	0.174
C5-C6	14.4	14.321	0.079
C6-C7	10.1	10.085	0.015
D1-D2	10.2	9.970	0.230
D2-D3	15.4	15.391	0.009

D3-D4	15.2	14.814	0.386
D4-D5	15.2	15.210	0.010
D5-D6	14.9	14.894	0.006
D6-D7	10.1	9.970	0.130
E1-E2	10.6	10.553	0.047
E2-E3	15.1	15.013	0.087
E3-E4	14.6	14.509	0.091
E4-E5	15.6	15.505	0.095
E5-E6	14.9	14.703	0.197
E6-E7	10.4	10.249	0.151
F1-F2	10.0	10.017	0.017
F2-F3	15.2	15.134	0.066
F3-F4	14.5	14.435	0.065
F4-F5	15.8	15.821	0.021
F5-F6	15.0	14.819	0.181
F6-F7	10.0	9.977	0.023
G1-G2	9.5	9.408	0.092
G2-G3	15.1	14.964	0.136
G3-G4	15.0	14.890	0.110
G4-G5	15.5	15.653	0.153
G5-G6	14.8	14.664	0.136
G6-G7	9.7	9.559	0.141

ตารางที่ ก.9 ผลการทดสอบตำแหน่งแกน z ของ marker ที่ได้จากระบบกล้องบนระนาบฉากอ้างอิง แต่ละจุด ที่ระยะ 225 เซนติเมตร กล้องคู่ใกล้

จุด	ระยะห่างจริง (cm)	ระยะจากกล้อง (cm)	ความคาดเคลื่อน (cm)
A1	150	151.013	1.013
A2	150	151.089	1.089
A3	150	150.791	0.791
A4	150	151.647	1.647
A5	150	151.79	1.79
A6	150	151.202	1.202
A7	150	151.293	1.293
B1	150	151.213	1.213
B2	150	151.362	1.362
B3	150	151.106	1.106
B4	150	151.21	1.21
B5	150	150.902	0.902
B6	150	151.214	1.214
B7	150	151.134	1.134
C1	150	150.9	0.9
C2	150	150.651	0.651
C3	150	150.902	0.902
C4	150	151.118	1.118
C5	150	151.2	1.2
C6	150	151.325	1.325
C7	150	151.129	1.129

D1	150	150.079	0.079
D2	150	150.104	0.104
D3	150	150.264	0.264
D4	150	150.892	0.892
D5	150	150.521	0.521
D6	150	151.595	1.595
D7	150	151.188	1.188
E1	150	150.052	0.052
E2	150	150.037	0.037
E3	150	150.039	0.039
E4	150	150.309	0.309
E5	150	150.494	0.494
E6	150	151.023	1.023
E7	150	151.036	1.036
F1	150	150.281	0.281
F2	150	149.997	-0.003
F3	150	150.152	0.152
F4	150	150.297	0.297
F5	150	151.05	1.05
F6	150	150.131	0.131
F7	150	151.206	1.206
G1	150	149.415	-0.585
G2	150	149.234	-0.766
G3	150	149.755	-0.245
G4	150	150.468	0.468
G5	150	150.463	0.463
G6	150	150.955	0.955
G7	150	150.967	0.967

ตารางที่ ก.10 ผลการทดสอบตำแหน่งแกน x ของ marker ที่ได้จากระบบกล้องบนระนาบฉากอ้างอิง แต่ละจุด ที่ระยะ 225 เซนติเมตร กล้องคู่ไกล

ระยะ ระหว่างจุด	ระยะห่างจริง (cm)	ระยะจากกล้อง (cm)	ความคาดเคลื่อน (cm)
A1-B1	12.6	12.720	0.120
A2-B2	12.8	12.852	0.052
A3-B3	12.5	12.501	0.001
A4-B4	12.6	12.591	0.009
A5-B5	12.7	12.715	0.015
A6-B6	12.6	12.502	0.098
A7-B7	12.6	12.622	0.022
B1-C1	15.0	14.897	0.103
B2-C2	14.9	14.961	0.061
B3-C2	15.2	15.188	0.012
B4-C4	15.1	15.306	0.206
B5-C5	15.0	15.073	0.073
B6-C6	15.2	15.298	0.098
B7-C7	15.5	15.315	0.185
C1-D1	15.1	15.011	0.089
C2-D2	15.1	15.161	0.061
C3-D3	15.2	15.142	0.058
C4-D4	15.2	15.362	0.162
C5-D5	15.0	15.063	0.063
C6-D6	14.9	14.875	0.025
C7-D7	14.8	14.827	0.027
D1-E1	15.5	15.404	0.096

D2-E2	15.1	14.998	0.102
D3-E3	15.0	15.129	0.129
D4-E4	15.0	14.708	0.292
D5-E5	15.1	15.161	0.061
D6-E6	15.0	15.127	0.127
D7-E7	15.2	15.119	0.081
E1-F1	14.9	14.974	0.074
E2-F2	15.2	15.217	0.017
E3-F3	15.1	15.137	0.037
E4-F4	15.0	15.043	0.043
E5-F5	15.1	15.099	0.001
E6-F6	15.1	15.246	0.146
E7-F7	15.2	15.180	0.020
F1-G1	15.1	15.168	0.068
F2-G2	15.0	14.900	0.100
F3-G3	14.9	15.003	0.103
F4-G4	15.2	15.211	0.011
F5-G5	15.0	15.104	0.104
F6-G6	14.8	14.835	0.035
F7-G7	14.6	14.675	0.075

ตารางที่ ก.11 ผลการทดสอบตำแหน่งแกน y ของ marker ที่ได้จากระบบกล้องบนระนาบฉากอ้างอิง แต่ละจุด ที่ระยะ 225 เซนติเมตร กล้องคู่ไกล

ระยะระหว่างจุด	ระยะห่างจริง (cm)	ระยะจากกล้อง (cm)	ความคาดเคลื่อน (cm)
A1-A2	9.9	9.949	0.049
A2-A3	15.4	15.303	0.097
A3-A4	15.1	15.088	0.012
A4-A5	15.0	14.976	0.024
A5-A6	15.2	15.276	0.076
A6-A7	10.2	10.003	0.197
B1-B2	10.2	10.214	0.014
B2-B3	15.6	15.515	0.085
B3-B4	15.2	15.214	0.014
B4-B5	14.8	14.734	0.066
B5-B6	15.0	14.926	0.074
B6-B7	9.8	9.694	0.106
C1-C2	10.3	10.179	0.121
C2-C3	14.8	14.709	0.091
C3-C4	15.5	15.342	0.158
C4-C5	15.3	15.297	0.003
C5-C6	14.4	14.297	0.103
C6-C7	10.1	10.133	0.033
D1-D2	10.2	10.009	0.191
D2-D3	15.4	15.277	0.123
D3-D4	15.2	15.321	0.121

D4-D5	15.2	14.764	0.436
D5-D6	14.9	14.865	0.035
D6-D7	10.1	10.012	0.088
E1-E2	10.6	10.447	0.153
E2-E3	15.1	15.017	0.083
E3-E4	14.6	14.530	0.070
E4-E5	15.6	15.534	0.066
E5-E6	14.9	14.704	0.196
E6-E7	10.4	10.283	0.117
F1-F2	10.0	9.859	0.141
F2-F3	15.2	15.259	0.059
F3-F4	14.5	14.377	0.123
F4-F5	15.8	15.819	0.019
F5-F6	15.0	14.825	0.175
F6-F7	10.0	9.971	0.029
G1-G2	9.5	9.431	0.069
G2-G3	15.1	15.021	0.079
G3-G4	15.0	14.982	0.018
G4-G5	15.5	15.675	0.175
G5-G6	14.8	14.652	0.148
G6-G7	9.7	9.568	0.132

ตารางที่ ก.12 ผลการทดสอบตำแหน่งแกน z ของ marker ที่ได้จากระบบกล้องบนระนาบฉากอ้างอิง แต่ละจุด ที่ระยะ 225 เซนติเมตร กล้องคู่ไกล

จุด	ระยะห่างจริง (cm)	ระยะจากกล้อง (cm)	ความคาดเคลื่อน (cm)
A1	150	148.300	-1.700
A2	150	148.578	-1.422
A3	150	149.225	-0.775
A4	150	149.848	-0.152
A5	150	150.213	0.213
A6	150	150.921	0.921
A7	150	151.292	1.292
B1	150	148.386	-1.614
B2	150	148.660	-1.340
B3	150	149.361	-0.639
B4	150	149.913	-0.087
B5	150	150.506	0.506
B6	150	150.845	0.845
B7	150	151.330	1.330
C1	150	148.288	-1.712
C2	150	148.656	-1.344
C3	150	149.231	-0.769
C4	150	150.155	0.155
C5	150	150.403	0.403
C6	150	150.737	0.737
C7	150	151.008	1.008

D1	150	148.253	-1.747
D2	150	148.645	-1.355
D3	150	149.345	-0.655
D4	150	149.751	-0.249
D5	150	150.294	0.294
D6	150	150.738	0.738
D7	150	151.183	1.183
E1	150	148.444	-1.556
E2	150	148.887	-1.113
E3	150	149.478	-0.522
E4	150	150.031	0.031
E5	150	150.708	0.708
E6	150	150.847	0.847
E7	150	151.242	1.242
F1	150	148.626	-1.374
F2	150	149.085	-0.915
F3	150	149.455	-0.545
F4	150	149.924	-0.076
F5	150	150.491	0.491
F6	150	150.934	0.934
F7	150	151.428	1.428
G1	150	148.915	-1.085
G2	150	148.992	-1.008
G3	150	149.804	-0.196
G4	150	150.150	0.150
G5	150	150.647	0.647
G6	150	150.991	0.991
G7	150	151.373	1.373

ตารางที่ ก.13 ผลการทดสอบการวัดตำแหน่ง x y และ z โดยเฉลี่ยบนระนาบฉากอ้างอิง

ระยะและตำแหน่งการวางกล้อง	ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยตามแนวแกน (cm)			ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานตามแนวแกน (cm)		
	x	y	z	x	y	z
150 cm , กล้องคู่ใกล้	0.097	0.131	-0.235	0.124	0.083	0.466
150 cm , กล้องคู่ไกล	0.073	0.086	0.125	0.051	0.050	0.224
225 cm , กล้องคู่ใกล้	0.072	0.092	0.739	0.062	0.079	0.579
225 cm , กล้องคู่ไกล	0.078	0.099	-0.112	0.060	0.077	0.999

ภาคผนวก ข

ตารางการทดสอบการวัดตำแหน่ง marker ใน 3 มิติ

ตารางที่ ข.1 ผลการทดสอบการวัดตำแหน่ง marker ใน 3 มิติแต่ละจุด

ระยะห่างระหว่างจุด	ระยะจริงที่วัดได้ (cm)	ระยะจากระบบกล้อง (cm)	ความคาดเคลื่อน (cm)
รอบ1 / 1-2	9.5	9.229	0.271
2-3	9.3	9.171	0.129
3-4	8.7	8.543	0.157
4-5	8.6	8.542	0.058
5-6	9.0	8.989	0.011
6-7	9.4	9.251	0.149
รอบ2 / 1-2	9.5	9.021	0.479
2-3	9.3	8.864	0.436
3-4	8.7	8.419	0.281
4-5	8.6	8.491	0.109
5-6	9.0	8.923	0.077
6-7	9.4	9.371	0.029
รอบ3 / 1-2	9.5	9.652	-0.152
2-3	9.3	8.958	0.342
3-4	8.7	8.457	0.243
4-5	8.6	8.680	-0.080
5-6	9.0	8.879	0.121
6-7	9.4	9.573	-0.173

รอบ4 / 1-2	9.5	9.440	0.060
2-3	9.3	9.251	0.049
3-4	8.7	8.582	0.118
4-5	8.6	8.553	0.047
5-6	9.0	9.133	-0.133
6-7	9.4	9.529	-0.129
รอบ5 / 1-2	9.5	9.489	0.011
2-3	9.3	9.211	0.089
3-4	8.7	8.561	0.139
4-5	8.6	8.583	0.017
5-6	9.0	9.203	-0.203
6-7	9.4	9.584	-0.184
รอบ6 / 1-2	9.5	9.412	0.088
2-3	9.3	8.831	0.469
3-4	8.7	8.159	0.541
4-5	8.6	8.362	0.238
5-6	9.0	8.942	0.058
6-7	9.4	9.381	0.019
รอบ7 / 1-2	9.5	9.342	0.158
2-3	9.3	9.095	0.205
3-4	8.7	8.494	0.206
4-5	8.6	8.674	-0.074
5-6	9.0	8.992	0.008
6-7	9.4	8.911	0.489

รอบ8 / 1-2	9.5	9.769	-0.269
2-3	9.3	8.989	0.311
3-4	8.7	8.044	0.656
4-5	8.6	8.632	-0.032
5-6	9.0	9.022	-0.022
6-7	9.4	9.490	-0.090
รอบ9 / 1-2	9.5	9.121	0.379
2-3	9.3	9.274	0.026
3-4	8.7	8.256	0.444
4-5	8.6	8.341	0.259
5-6	9.0	9.178	-0.178
6-7	9.4	9.348	0.052
รอบ10 / 1-2	9.5	9.613	-0.113
2-3	9.3	9.147	0.153
3-4	8.7	8.599	0.101
4-5	8.6	8.649	-0.049
5-6	9.0	9.161	-0.161
6-7	9.4	9.391	0.009

ตารางที่ ข.2 ค่าเฉลี่ยจากการทดสอบการวัดตำแหน่ง marker ของระบบกล้องใน 3 มิติ

ระยะห่างระหว่างจุด	ค่าเฉลี่ย (cm)	ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (cm)	ความคลาดเลื่อนเฉลี่ย (cm)	ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (%)
1-2	9.409	0.238	0.091	1.0
2-3	9.079	0.160	0.221	2.4
3-4	8.412	0.193	0.288	3.3
4-5	8.551	0.121	0.049	0.6
5-6	9.042	0.117	-0.042	0.5
6-7	9.383	0.198	0.017	0.2

ภาคผนวก ค

ตารางตัวอย่างการเก็บข้อมูลพิกัดของ marker

ตารางที่ ค.1 ตัวอย่างในการเก็บข้อมูลพิกัดของ marker ในหนึ่งเฟรมสำหรับนำไปคำนวณมุมองศาข้อสะโพก ข้อเข่า ข้อเท้า

เฟรม	marker	Tx	Ty	Tz
65	1	10.817	45.63	12.396
	2	6.464	32.952	6.605
	3	-6.766	45.914	15.51
	4	11.141	14.851	8.879
	5	13.089	8.462	5.338
	6	14.222	-0.02	10.364
	7	17.3	-19.971	7.833
	8	15.152	-43.794	16.281
	9	26.128	-48.942	13.434
	10	33.81	-46.758	18.662

ตารางที่ ค.2 คำอธิบาย marker

1	PSIS	สะโพกด้านหลัง
2	GT	สะโพกด้านข้าง
3	ASIS	สะโพกด้านหน้า
4	UT	ขาท่อนบนด้านบน
5	MT	ขาท่อนบนตรงกลาง
6	KJL	ข้อเข่า
7	MK	กึ่งกลางขาท่อนล่าง
8	LM	ตาตุ่ม
9	Ring	นิ้วก้อย
10	Index	นิ้วชี้

ตารางที่ ค.3 ตัวอย่างการคำนวณคำนวณมุมองศาข้อสะโพก ข้อเข่า ข้อเท้าในระนาบ sagittal ในรูปยืนนิ่ง (standard : STD)

	Sagittal(Flex/extens)
มุมสะโพก	-100.9545
มุมขาท่อนบน	-100.9545
มุมขาท่อนล่าง	-94.11868
มุมเข่า	6.8358465
มุมเท้า	-26.76587
มุมข้อเท้า	67.352811

ตารางที่ ค.4 ตัวอย่างการคำนวณมุมองศาข้อสะโพก ข้อเข่า ข้อเท้าในระนาบ sagittal ในช่วง heel strike

	Sagittal(Flex/extens)	
มุมสะโพก	-74.92464	26.029887
มุมขาท่อนบน	-74.92464	
มุมขาท่อนล่าง	-75.75188	
มุมเข่า	-0.82724	7.6630861
มุมเท้า	-14.49313	
มุมข้อเท้า	61.258752	-6.094059

มุมสะโพกช่วง heel strike = มุมสะโพกขณะนั้น - มุมสะโพก(standard : STD)

มุมเข่าช่วง heel strike = มุมเข่า(standard : STD) - มุมเข่าขณะนั้น

มุมข้อเท้าช่วง heel strike = มุมข้อเท้าขณะนั้น - มุมข้อเท้า(standard : STD)

ภาคผนวก ง

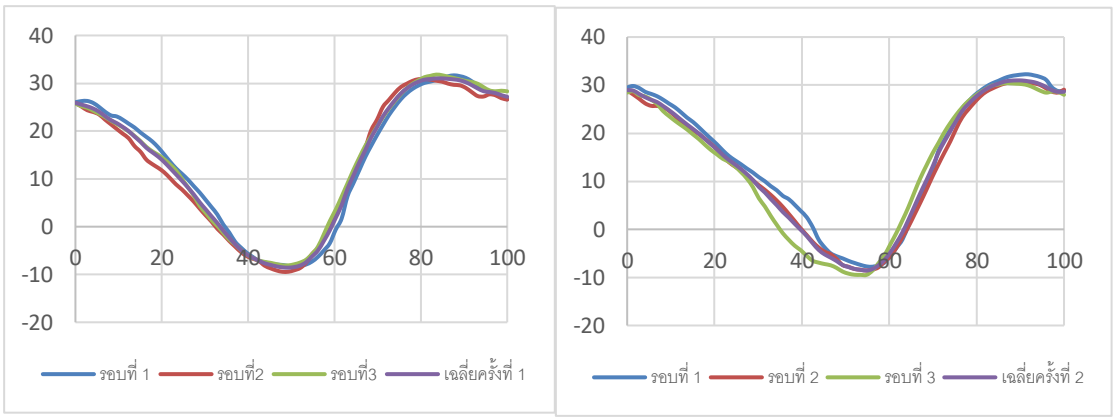
ตารางและกราฟตัวอย่างการวิเคราะห์ข้อมูล

ตารางที่ ง.1 ตัวอย่างการเก็บข้อมูลอาสาสมัคร 1 คนในการเดิน 1 ครั้ง

ลำดับ	100% GCL	frame	hip	knee	ankle
0	0.000	57	26.030	7.663	-6.094
1	1.316	58	26.263	7.789	-6.213
2	2.632	59	26.329	8.923	-6.368
3	3.947	60	25.977	10.245	-6.177
4	5.263	61	25.196	11.511	-5.667
5	6.579	62	24.239	12.018	-7.131
6	7.895	63	23.301	13.241	-5.257
7	9.211	64	23.203	15.273	-4.817
8	10.526	65	22.660	17.324	-3.698
9	11.842	66	21.782	18.073	-2.280
10	13.158	67	21.132	18.969	0.311
11	14.474	68	20.144	19.244	0.247
12	15.789	69	19.150	19.324	2.397
13	17.105	70	18.373	19.555	3.294
14	18.421	71	17.333	19.471	5.133
15	19.737	72	16.032	19.083	5.037
16	21.053	73	14.542	18.339	5.599
17	22.368	74	13.101	17.490	5.740
18	23.684	75	11.828	16.690	6.692
19	25.000	76	10.790	16.066	6.251
20	26.316	77	9.619	15.255	6.585
21	27.632	78	8.243	14.218	6.397
22	28.947	79	6.977	13.286	7.291
23	30.263	80	5.491	12.181	6.807
24	31.579	81	4.025	11.095	7.463
25	32.895	82	2.504	10.011	7.530
26	34.211	83	0.483	8.676	7.060
27	35.526	84	-1.078	7.675	7.510

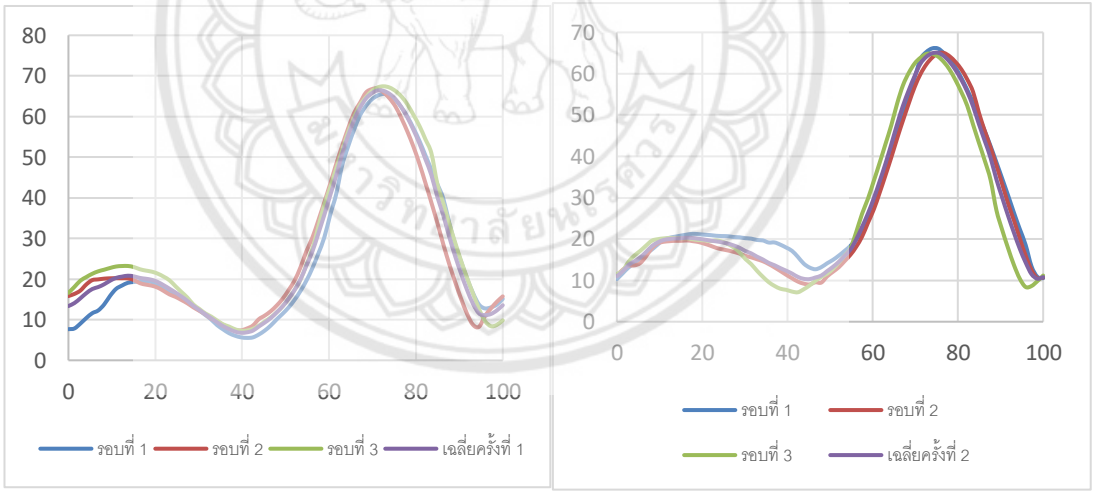
28	36.842	85	-3.016	6.743	7.301
29	38.158	86	-4.232	6.123	6.817
30	39.474	87	-5.328	5.685	7.058
31	40.789	88	-6.155	5.525	6.680
32	42.105	89	-6.995	5.487	6.507
33	43.421	90	-7.390	6.068	4.936
34	44.737	91	-7.609	6.969	6.208
35	46.053	92	-7.923	7.970	5.189
36	47.368	93	-7.933	9.463	5.420
37	48.684	94	-8.100	10.837	3.817
38	50.000	95	-8.355	12.170	2.551
39	51.316	96	-8.368	13.757	0.953
40	52.632	97	-8.151	15.737	0.128
41	53.947	98	-7.744	17.930	-1.673
42	55.263	99	-7.042	20.535	-3.932
43	56.579	100	-5.965	23.699	-6.213
44	57.895	101	-4.591	27.249	-8.412
45	59.211	102	-2.849	31.128	-12.767
46	60.526	103	-0.148	36.953	-11.256
47	61.842	104	2.335	41.593	-13.185
48	63.158	105	6.655	48.722	-21.111
49	64.474	106	9.280	52.892	-22.186
50	65.789	107	11.920	56.816	-20.826
51	67.105	108	14.548	60.218	-18.630
52	68.421	109	16.809	62.511	-17.270
53	69.737	110	18.983	64.143	-15.055
54	71.053	111	21.029	65.128	-13.359
55	72.368	112	23.027	65.630	-10.829
56	73.684	113	24.707	65.279	-8.723
57	75.000	114	26.309	64.458	-7.575

58	76.316	115	27.559	62.815	-5.232
59	77.632	116	28.586	60.829	-4.004
60	78.947	117	29.296	58.174	-2.616
61	80.263	118	29.928	55.392	-2.211
62	81.579	119	30.264	52.106	-1.991
63	82.895	120	30.443	48.574	-1.622
64	84.211	121	30.900	45.356	-2.262
65	85.526	122	31.185	41.787	-2.338
66	86.842	123	31.658	38.476	-2.508
67	88.158	124	31.645	31.140	-6.963
68	89.474	125	31.401	27.334	-7.849
69	90.789	126	31.006	23.041	-4.203
70	92.105	127	30.228	19.236	-4.960
71	93.421	128	29.340	15.854	-4.683
72	94.737	129	28.493	13.327	-4.907
73	96.053	130	28.262	12.707	-4.826
74	97.368	131	27.962	13.048	-5.955
75	98.684	132	27.202	13.735	-7.944
76	100.000	133	26.628	15.124	-8.690



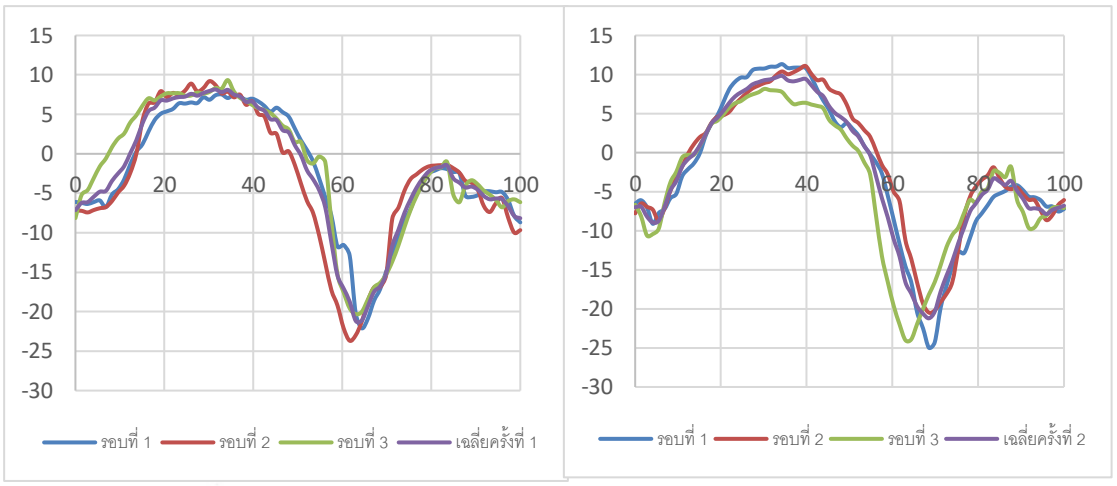
ก. ข.

รูปที่ ง.1 กราฟรูปแบบการเคลื่อนไหวของมุมองศาข้อสะโพกในแนว sagittal plane ของอาสาสมัครคนที่ 1 ก. ครั้งที่ 1 ข. ครั้งที่ 2



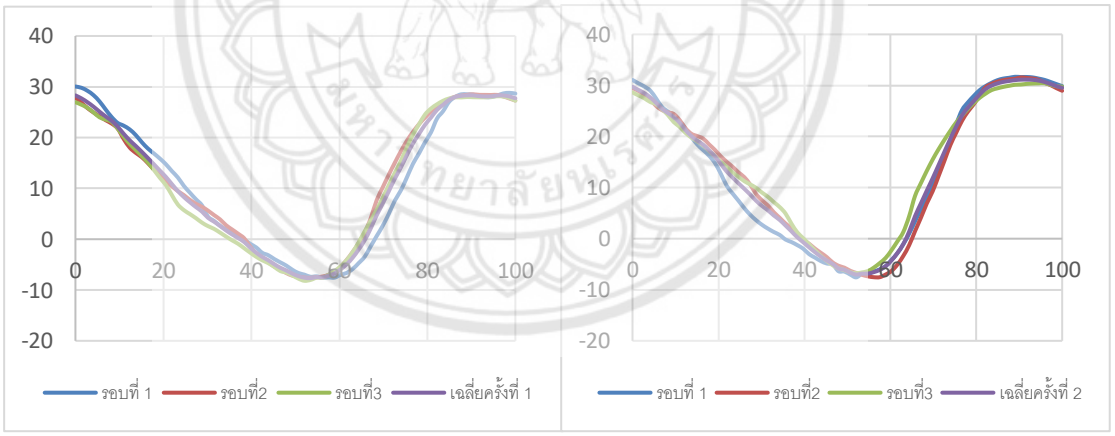
ก. ข.

รูปที่ ง.2 กราฟรูปแบบการเคลื่อนไหวของมุมองศาข้อเข่าในแนว sagittal plane ของอาสาสมัครคนที่ 1 ก .ครั้งที่ 1 ข. ครั้งที่ 2



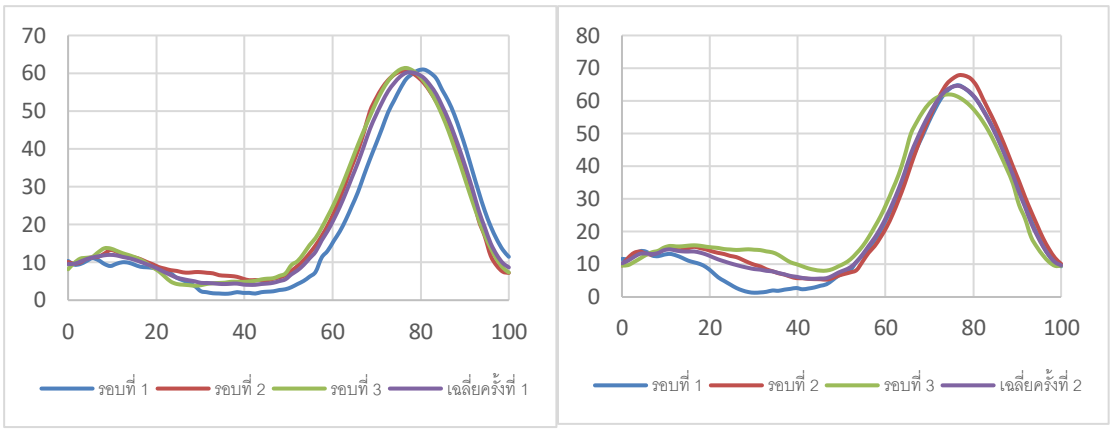
ก. ข.

รูปที่ ง.3 กราฟรูปแบบการเคลื่อนไหวของมุมองศาข้อเท้าในแนว sagittal plane ของอาสาสมัครคนที่ 1 ก .ครั้งที่ 1 ข. ครั้งที่ 2



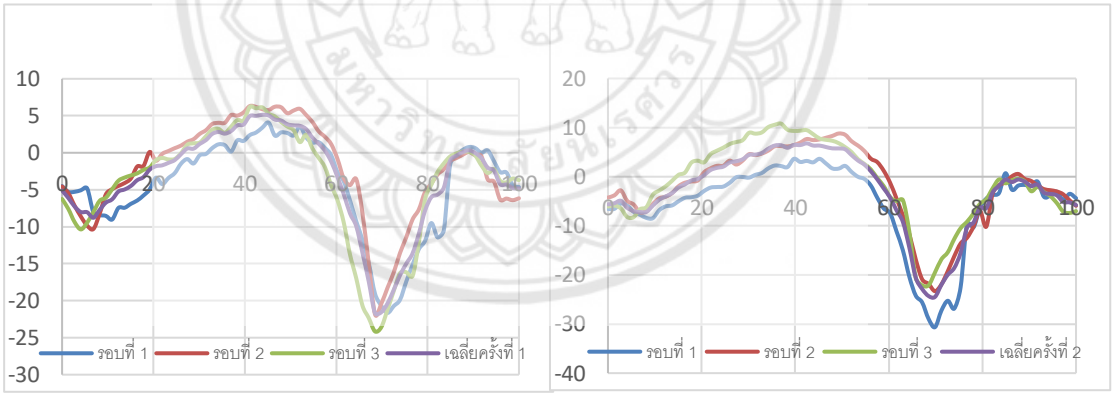
ก. ข.

รูปที่ ง.4 กราฟรูปแบบการเคลื่อนไหวของมุมองศาข้อสะโพกในแนว sagittal plane ของอาสาสมัครคนที่ 2 ก .ครั้งที่ 1 ข. ครั้งที่ 2



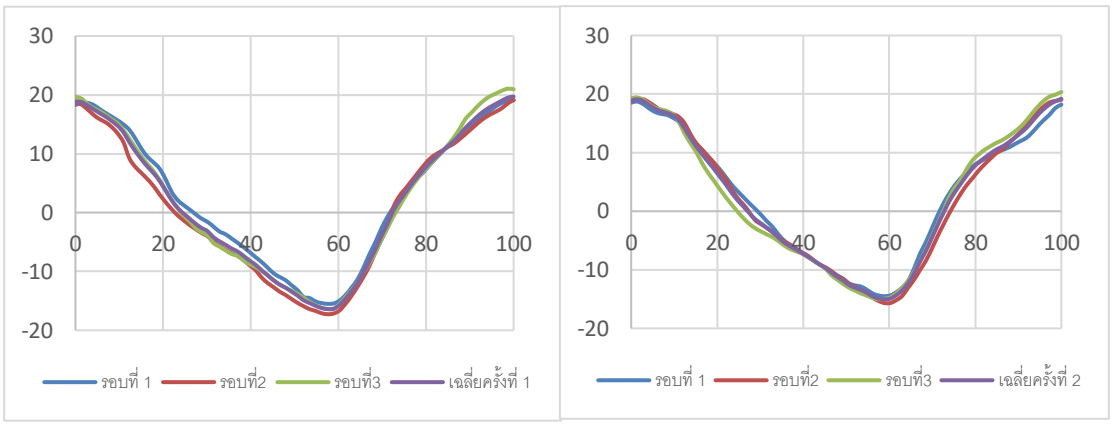
ก. ข.

รูปที่ ง.5 กราฟรูปแบบการเคลื่อนไหวของมุมองศาข้อเข่าในแนว sagittal plane ของอาสาสมัครคนที่ 2 ก .ครั้งที่ 1 ข. ครั้งที่ 2



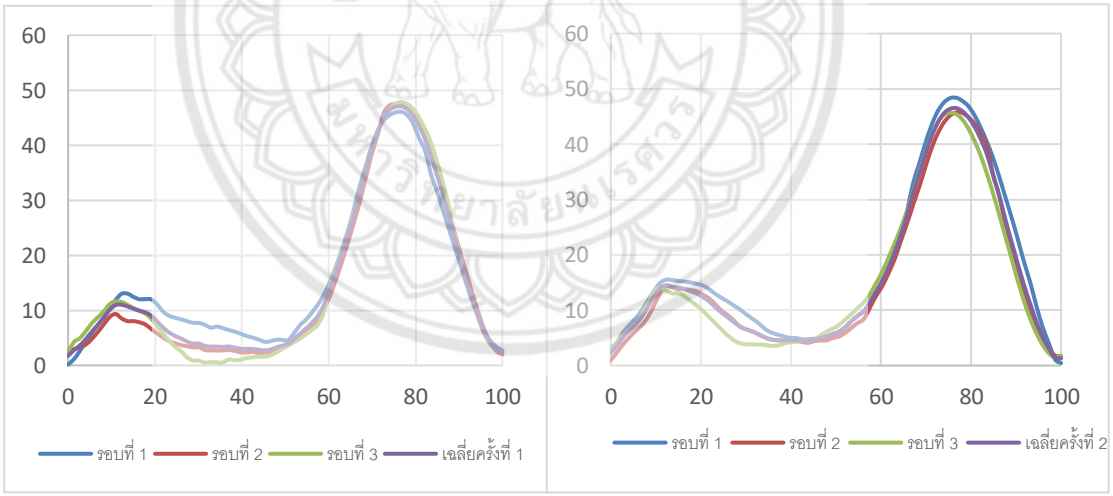
ก. ข.

รูปที่ ง.6 กราฟรูปแบบการเคลื่อนไหวของมุมองศาข้อเท้าในแนว sagittal plane ของอาสาสมัครคนที่ 2 ก .ครั้งที่ 1 ข. ครั้งที่ 2



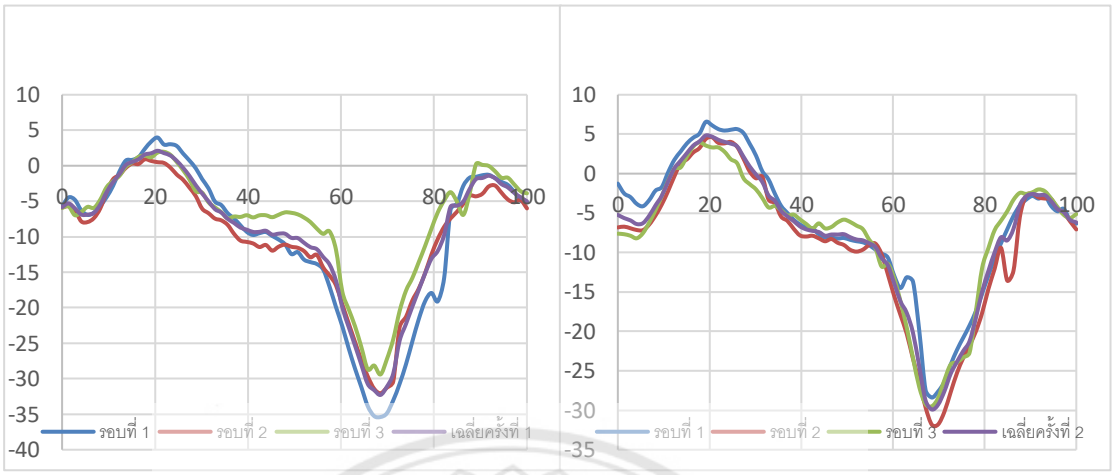
ก. ข.

รูปที่ ง.7 กราฟรูปแบบการเคลื่อนไหวของมุมองศาข้อสะโพกในแนว sagittal plane ของอาสาสมัครคนที่ 3 ก .ครั้งที่ 1 ข. ครั้งที่ 2



ก. ข.

รูปที่ ง.8 กราฟรูปแบบการเคลื่อนไหวของมุมองศาข้อเข่าในแนว sagittal plane ของอาสาสมัครคนที่ 3 ก .ครั้งที่ 1 ข. ครั้งที่ 2



ก. ข.

รูปที่ ง.9 กราฟรูปแบบการเคลื่อนไหวของมุมองศาข้อเท้าในแนว sagittal plane ของอาสาสมัครคนที่ 3 ก .ครั้งที่ 1 ข. ครั้งที่ 2

ภาคผนวก จ

ตารางตัวอย่างการวิเคราะห์เปรียบเทียบข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (ICC)

ตารางที่ จ.1 ค่าเฉลี่ยขององศาการเคลื่อนไหวข้อสะโพก ข้อเข่า และข้อเท้า ในระนาบ sagittal และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (ICC) ของการทดสอบ Test-retest reliability (วัดซ้ำ 3 ครั้ง) ขณะทดสอบครั้งที่ 1 และ 2 ของอาสาสมัครคนที่ 1 ในการหาความน่าเชื่อถือของการวัดซ้ำของการเดินในมนุษย์

Percent gait cycle	Hip joint (mean ± SD)			Knee joint (mean ± SD)			Ankle joint (mean ± SD)		
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ICC	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ICC	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ICC
0(HS)	25.893 ± 0.145	28.956 ± 0.531		13.360 ± 4.949	11.000 ± 0.657		-7.145 ± 1.027	-6.987 ± 0.688	
10(FF)	21.410 ± 1.364	24.498 ± 1.337		19.802 ± 3.258	19.360 ± 0.602		-2.208 ± 3.764	-3.086 ± 1.384	
20	13.971 ± 2.031	17.066 ± 1.096		19.497 ± 1.805	19.945 ± 1.055		6.756 ± 1.325	5.011 ± 0.698	
30(MS)	3.800 ± 1.740	8.978 ± 2.138		12.479 ± 0.256	17.189 ± 2.657		7.943 ± 1.126	9.254 ± 1.366	
40	-5.983 ± 0.319	-0.359 ± 4.081	0.976*	6.796 ± 1.019	12.193 ± 5.149	0.977*	6.458 ± 0.477	9.276 ± 2.548	0.963*
50(PO)	-8.512 ± 0.679	-7.638 ± 1.350		14.230 ± 1.990	12.748 ± 1.587		0.461 ± 2.714	3.347 ± 1.965	
60(TO)	1.311 ± 2.229	-5.057 ± 1.327		39.654 ± 4.300	29.127 ± 3.576		-16.717 ± 4.965	-10.513 ± 7.546	
70	21.076 ± 1.644	13.230 ± 2.480		65.822 ± 1.309	59.752 ± 2.798		-14.808 ± 0.509	-20.085 ± 3.762	
80(MSW)	30.498 ± 0.664	27.701 ± 0.731		55.340 ± 4.241	59.926 ± 2.465		-2.050 ± 0.455	-6.064 ± 2.209	
90	30.330 ± 1.039	30.971 ± 1.038	(0.911-	22.596 ± 5.368	31.293 ± 6.713	(0.915-	-4.421 ± 0.832	-5.594 ± 1.347	(0.862-
100(HS)	27.170 ± 0.981	28.604 ± 0.158	0.994)**	13.564 ± 3.248	10.406 ± 0.556	0.994)**	-8.163 ± 1.827	-7.071 ± 0.422	0.990)**

*ระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ p < 0.001

** 95% confidence interval

hip ค่า + เท่ากับ hip flexion ค่า – เท่ากับ hip extension

knee ค่า + เท่ากับ knee flexion ค่า – เท่ากับ knee extension

ankle ค่า + เท่ากับ ankle dorsiflexion ค่า – เท่ากับ ankle plantarflexion

ตารางที่ จ.2 ค่าเฉลี่ยขององศาการเคลื่อนไหวข้อสะโพก ข้อเข่า และข้อเท้า ในระนาบ sagittal และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (ICC) ของการทดสอบ Test-retest reliability (วัดซ้ำ 3 ครั้ง) ขณะทดสอบครั้งที่ 1 และ 2 ของอาสาสมัครคนที่ 2 ในการหาความน่าเชื่อถือของการวัดซ้ำของการเดินในมนุษย์

Percent gait cycle	Hip joint (mean ± SD)			Knee joint (mean ± SD)			Ankle joint (mean ± SD)		
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ICC	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ICC	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ICC
0(HS)	28.304 ± 1.588	29.744 ± 1.230		9.553 ± 1.199	10.307 ± 1.717		-5.103 ± 0.993	-5.632 ± 1.228	
10(FF)	21.734 ±0.867	23.478 ± 0.808		11.944 ± 2.377	14.388 ± 1.202		-6.607 ± 1.809	-5.522 ± 2.285	
20	12.770 ± 2.139	15.216 ± 1.555		8.491 ± 0.537	12.551 ± 3.778		-1.997 ± 1.825	0.008 ± 3.208	
30(MS)	4.336 ± 1.568	6.511 ± 3.300		4.622 ± 2.532	8.575 ± 6.679		1.140 ± 1.480	4.356 ± 4.487	
40	-1.864 ± 0.899	-0.900 ± 1.117	0.998	4.122 ± 1.940	6.111 ± 3.634	0.997*	4.046 ± 2.040	6.465 ± 2.913	0.985*
50(PO)	-7.017 ± 0.609	-6.361 ± 0.378		6.180 ± 2.662	7.853 ± 1.724		3.775 ± 1.572	5.670 ± 3.441	
60(TO)	-6.094 ± 0.890	-4.488 ± 1.951		20.751 ± 4.989	23.988 ± 3.585		-2.864 ± 2.856	-3.879 ± 3.249	
70	7.263 ± 3.921	12.094 ± 3.201		49.293 ± 6.578	55.976 ± 2.820		-21.439 ± 1.772	-24.234 ± 5.621	
80(MSW)	23.084 ± 2.812	27.478 ± 0.832		59.310 ± 1.365	61.558 ± 4.193		-7.090 ± 3.363	-6.344 ± 1.724	
90	28.309 ± 0.305	31.107 ± 0.820	(0.992-	35.799 ± 4.562	33.675 ± 3.327	(0.988-	0.087 ± 0.513	-1.637 ± 0.922	(0.942-
100(HS)	27.738 ± 0.800	29.535 ± 0.497	0.999)**	8.667 ± 2.432	9.694 ± 0.392	0.999)**	-4.828 ±1.239	-5.774 ± 1.320	0.996)**

*ระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ p < 0.001

** 95% confidence interval

hip ค่า + เท่ากับ hip flexion ค่า – เท่ากับ hip extension

knee ค่า + เท่ากับ knee flexion ค่า – เท่ากับ knee extension

ankle ค่า + เท่ากับ ankle dorsiflexion ค่า – เท่ากับ ankle plantarflexion

ตารางที่ จ.3 ค่าเฉลี่ยขององศาการเคลื่อนไหวข้อสะโพก ข้อเข่า และข้อเท้า ในระนาบ sagittal และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (ICC) ของการทดสอบ Test-retest reliability (วัดซ้ำ 3 ครั้ง) ขณะทดสอบครั้งที่ 1 และ 2 ของอาสาสมัครคนที่ 3 ในการหาความน่าเชื่อถือของการวัดซ้ำของการเดินในมนุษย์

Percent gait cycle	Hip joint (mean ± SD)			Knee joint (mean ± SD)			Ankle joint (mean ± SD)		
	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ICC	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ICC	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ICC
0(HS)	18.906 ± 0.691	18.880 ± 0.387		1.732 ± 1.372	2.282 ± 1.185		-5.857 ± 0.103	-5.232 ± 3.460	
10(FF)	14.437 ± 1.267	16.174 ± 0.380		10.351 ± 1.25	12.979 ± 1.282		-3.280 ± 0.637	-2.267 ± 1.129	
20	4.432 ± 2.054	6.485 ± 1.805		8.390 ± 2.740	12.585 ± 2.222		1.968 ± 1.632	4.747 ± 1.461	
30(MS)	-3.103 ± 1.376	-1.984 ± 1.456		3.959 ± 3.473	6.581 ± 2.721		-3.796 ± 2.089	-0.004 ± 2.225	
40	-8.286 ± 1.231	-7.259 ± 0.117	0.998*	3.032 ± 2.370	4.524 ± 0.416	0.996*	-9.070 ± 1.892	-6.768 ± 0.993	0.985*
50(PO)	-13.770 ± 1.146	-12.233 ± 0.455		3.772 ± 0.716	5.946 ± 0.964		-10.176 ± 3.007	-7.870 ± 1.727	
60(TO)	-15.838 ± 0.845	-14.929 ± 0.658		13.348 ± 1.366	14.905 ± 1.406		-19.192 ± 2.792	-13.445 ± 1.337	
70	-3.711 ± 1.100	-4.388 ± 1.737		39.314 ± 0.728	38.471 ± 2.162		-30.944 ± 3.872	-29.113 ± 2.217	
80(MSW)	7.743 ± 0.586	7.782 ± 1.472		44.553 ± 1.71	44.136 ± 2.170		-12.656 ± 5.306	-13.905 ± 2.765	
90	15.110 ± 1.406	13.027 ± 1.171	(0.991-	20.327 ± 1.173	19.516 ± 3.931	(0.997-	-1.773 ± 2.127	-2.674 ± 0.277	(0.946-
100(HS)	19.723 ± 1.065	19.190 ± 1.082	0.999)**	2.411 ± 0.412	1.309 ± 0.760	0.999)**	-5.007 ± 1.065	-6.186 ± 0.982	0.996)**

*ระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ p < 0.001

** 95% confidence interval

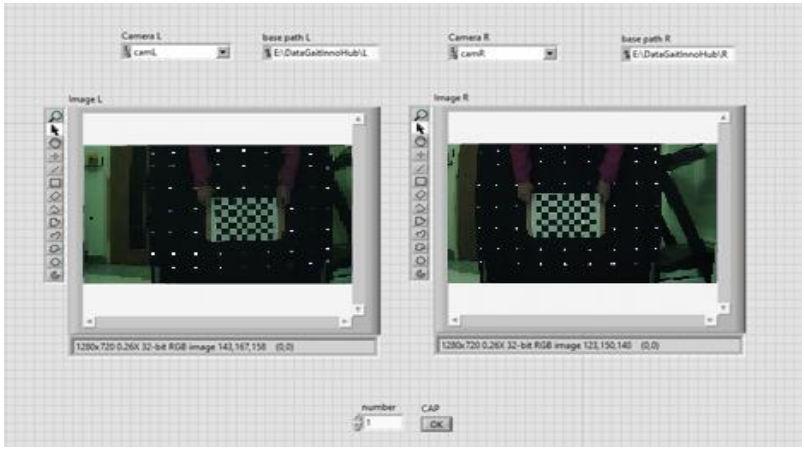
hip ค่า + เท่ากับ hip flexion ค่า – เท่ากับ hip extension

knee ค่า + เท่ากับ knee flexion ค่า – เท่ากับ knee extension

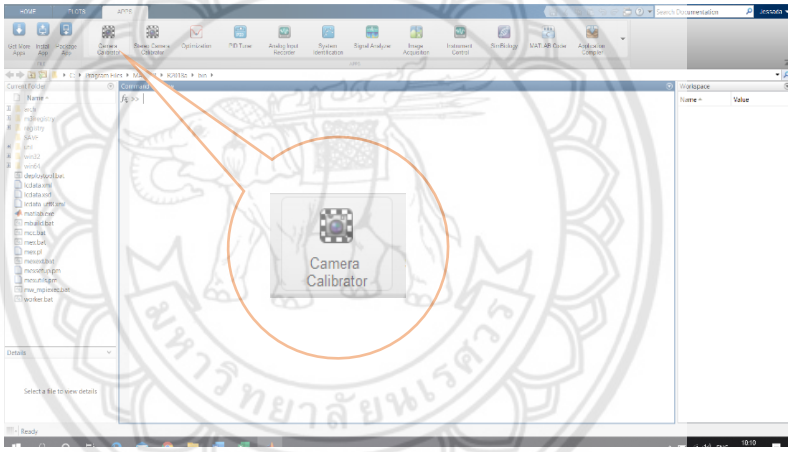
ankle ค่า + เท่ากับ ankle dorsiflexion ค่า – เท่ากับ ankle plantarflex ion

ภาคผนวก ฉ

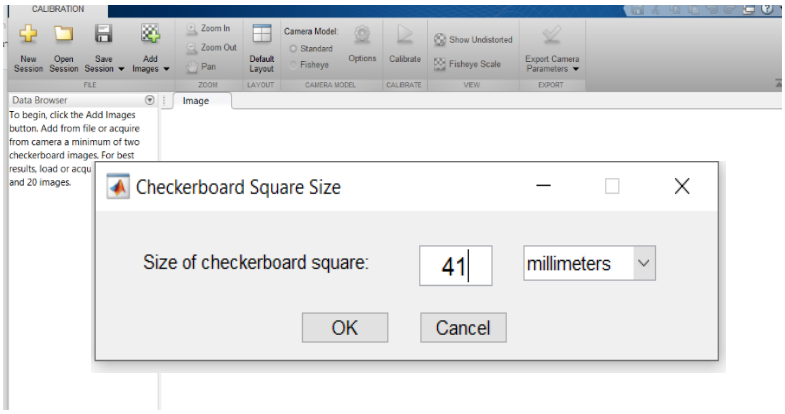
รูปขั้นตอนการสอบเทียบกล้องในโปรแกรม MATLAB



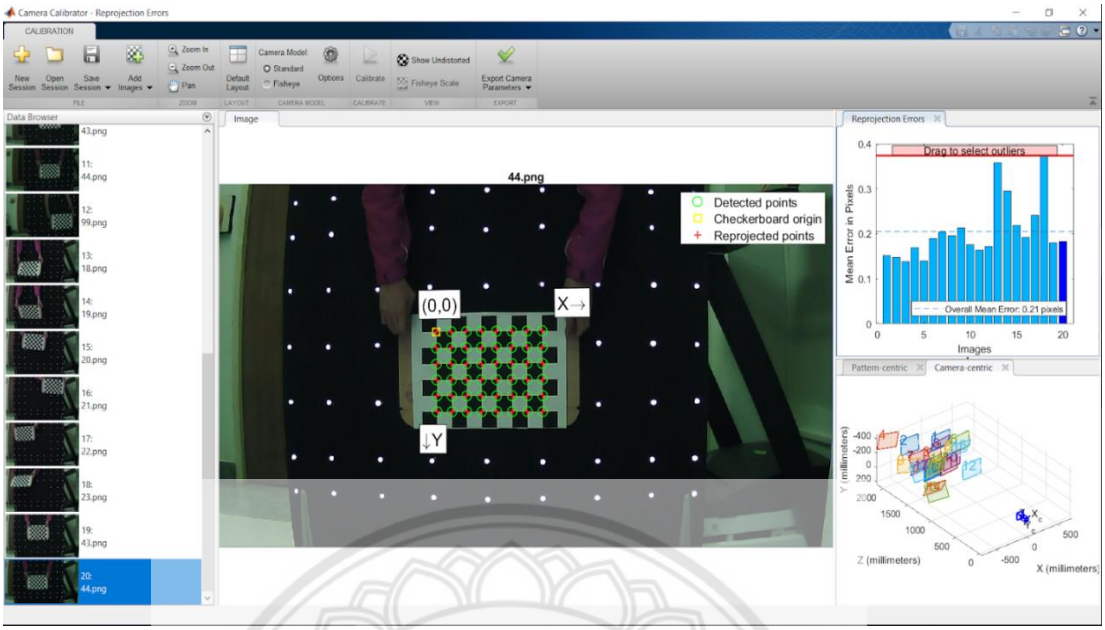
รูปที่ ฉ.1 ถ่ายภาพกระดานสอบเทียบโดยโปรแกรมสำหรับจับภาพสองกล้องในเวลาเดียวกัน



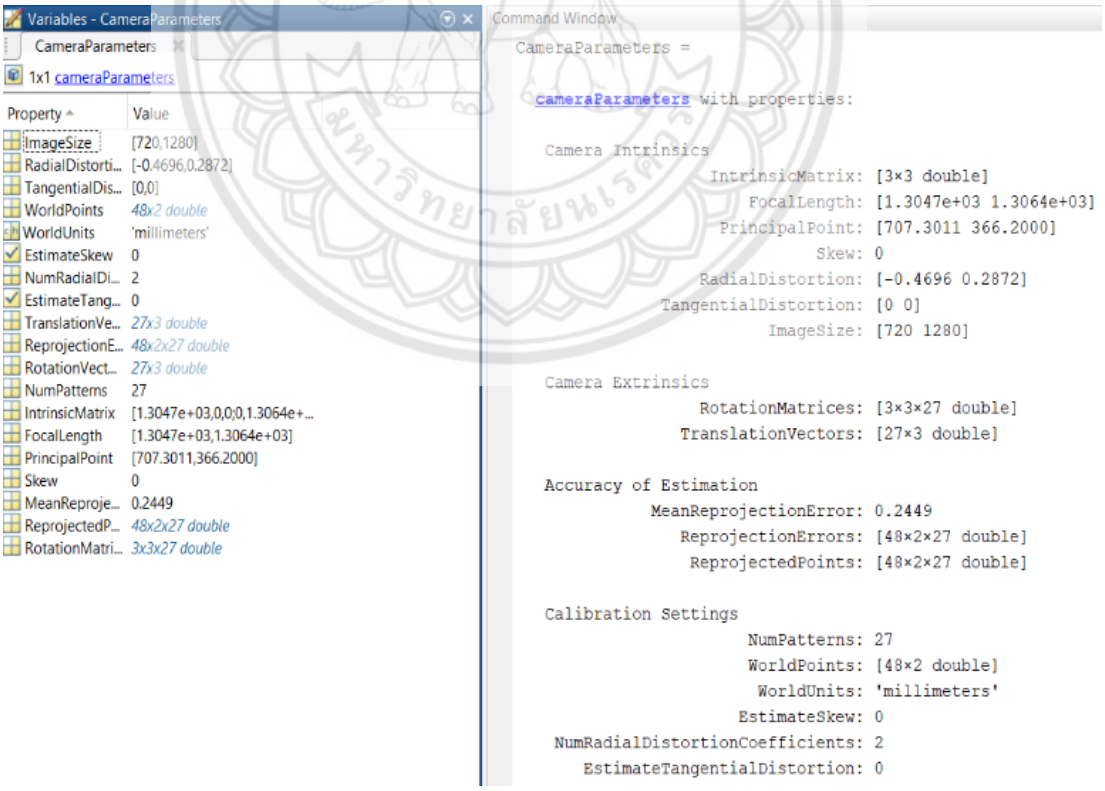
รูปที่ ฉ.2 ใช้แอปพลิเคชัน Camera calibrator ในโปรแกรม MATLAB



รูปที่ ฉ.3 การกรอกขนาดตารางของกระดานสอบเทียบ



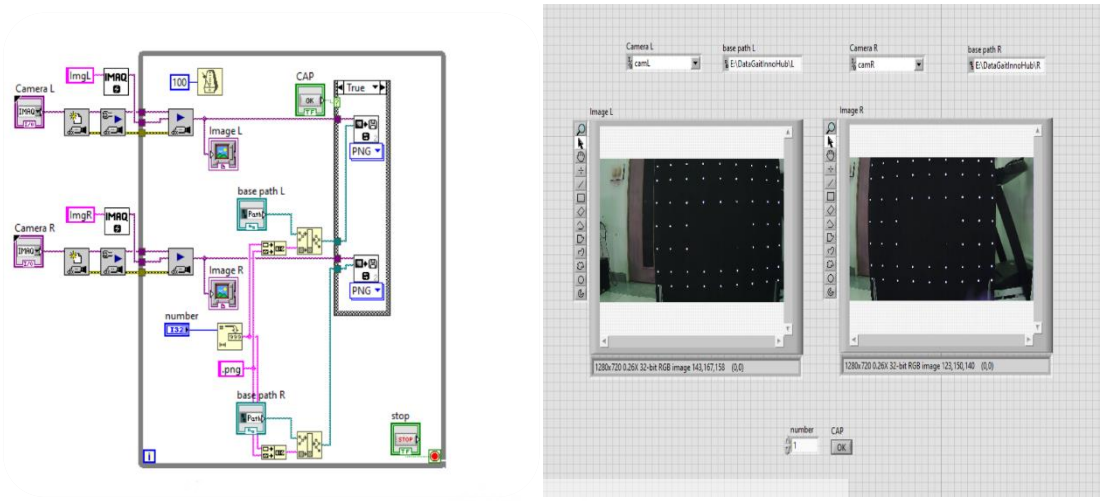
รูปที่ ฉ.4 ผลจากการกดปุ่ม Calibrate



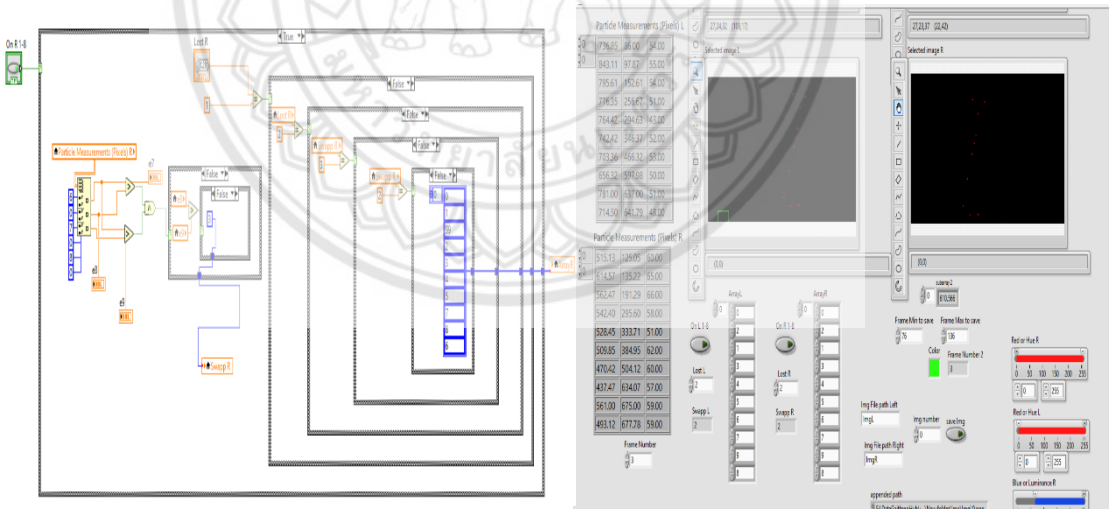
รูปที่ ฉ.5 ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการสอบเทียบกล้อง

ภาคผนวก ช

รูปการพัฒนาและปรับปรุงโปรแกรม LabVIEW



รูปที่ ช.1 การพัฒนาระบบกล้องให้มีการจับภาพพร้อมกันทั้ง 2 กล้อง



รูปที่ ช.2 การปรับปรุงโปรแกรมในการดึงข้อมูลการเดินให้มีความรวดเร็วขึ้น

จากรูปที่ ช.2 ทำการปรับปรุงโดยการเขียนโปรแกรมให้มีการเรียงตำแหน่งของ marker ให้เองอัตโนมัติในแต่ละเฟรม เนื่องจากตำแหน่งของ marker ที่ติดอยู่ตรงข้อเท้าจะมีการสลับตำแหน่งกันในบางช่วงของการเดิน