อุปกรณ์ติดตั้งที่ศีรษะเพื่อเพิ่มศักยภาพในการมองเห็นของการทำงานของระบบ
หุ่นยนต์นำ-หุ่นยนต์ตาม

นายปิติ อู่ทอง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย
The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)
are the thesis authors' files submitted through the University Graduate School.

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2558
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A HEAD-MOUNTED SYSTEM TO ENHANCE VISUALIZATION OF A MASTER – SLAVE OPERATION

Mr. Piti Uthong

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Mechanical Engineering
Department of Mechanical Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University
Academic Year 2015
Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	อุปกรณ์ติดตั้งที่ศีรษะเพื่อเพิ่มศักยภาพในการมองเห็นของการทำงานของระบบหุ่นยนต์นำ-หุ่นยนต์ตาม
โดย	นายปิติ อู่ทอง
สาขาวิชา	วิศวกรรมเครื่องกล
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(รองศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ เตชวรสินสกุล)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

....ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. รัชทิน จันทร์เจริญ)

....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ)

....กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิทยา วัณณสุโภประสิทธิ์)

....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ดร.กฤษณันท์ มะลิทอง)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ปิติ อู่ทอง : อุปกรณ์ติดตั้งที่ศีรษะเพื่อเพิ่มศักยภาพในการมองเห็นของการทำงานของระบบหุ่นยนต์นำ-หุ่นยนต์ตาม (A HEAD-MOUNTED SYSTEM TO ENHANCE VISUALIZATION OF A MASTER – SLAVE OPERATION) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ศ. ดร. วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ, 74 หน้า.

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสนอการออกแบบและควบคุมระบบหุ่นยนต์แบบนำ-ตาม โดยใช้สัญญาณที่มาจากอุปกรณ์สวมใส่ศีรษะส่งไปควบคุม มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาอุปกรณ์สวมใส่ศีรษะเพื่อเพิ่มมุมมองการมองเป้าหมายผ่านกล้องที่ติดตั้งบนแขนกล โดยใช้แขนกลแบบพิกัดทรงกลมในการแก้ปัญหาของการเพิ่มมุมมองภาพ แล้วใช้แขนกลชนิดนี้แบบอนุกรม 2 ก้านต่อและอุปกรณ์ที่ติดกับศีรษะในการพัฒนาระบบควบคุม โดยเริ่มจากการคำนวณสมการจลศาสตร์และพลศาสตร์ของโครงสร้าง แต่เนื่องจากมีสัญญาณรบกวนออกจากอุปกรณ์ตรวจวัด อีกทั้งแบบจำลองของระบบไม่ถูกต้องแม่นยำจึงใช้ ระบบควบคุมแบบ Inverse Dynamics ที่เป็นระบบควบคุมอีกระบบหนึ่งที่มีประสิทธิภาพ รวมกับตัวกรองความถี่ต่ำผ่านในการจัดการปัญหาที่เกิดขึ้น สำหรับการทดลองได้สร้างแขนกลที่ออกแบบไว้แล้วติดกล้องอัตราขยายสูงแบบดิจิทัลไว้ที่ปลายแขนกับอุปกรณ์สวมใส่ศีรษะสำหรับทดสอบ โดยแบ่งออกเป็นสองส่วนคือส่วนที่ให้แขนกลเคลื่อนที่ตามเส้นทางการเคลื่อนที่ที่กำหนดและอีกส่วนหนึ่งคือทำการทดลองใช้งานควบคู่กับแขนกล 6 องศาอิสระ สำหรับงานขนาดเล็ก (RCRT-1) โดยได้ผลว่า ระบบควบคุมสามารถทำให้แขนกลเคลื่อนที่ในตำแหน่งและทิศทางที่กำหนดด้วยความผิดพลาดที่ต่ำ และสามารถทำงานในฐานะระบบภาพของระบบร่วมกับ RCRT-1 ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้ RCRT-1 เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ผู้ใช้งานกำหนดแม่นยำมากขึ้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาควิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่อนิสิต ....
สาขาวิชา วิศวกรรมเครื่องกล ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาหลัก ....
ปีการศึกษา 2558

5670282021 : MAJOR MECHANICAL ENGINEERING
KEYWORDS: INVERSE DYNAMICS CONTROL / SPHERICAL MANIPULATOR / MASTER-SLAVE OPERATION / HEAD-MOUNTED SYSTEM

PITI UTHONG: A HEAD-MOUNTED SYSTEM TO ENHANCE VISUALIZATION OF A MASTER – SLAVE OPERATION. ADVISOR: PROF. VIBOON SANGVERAPHUNSIRI, Ph.D., 74 pp.

This thesis studies design and control of a head mounted system to enhance visualization of master-slave operation. The aim of this study is to develop a device mounted on human head to increase view through a camera which is assembled on manipulator arm. By applying a Spherical manipulator designed specifically for installing camera increase view is solved. The 2-link serial manipulator and head mounted equipment are developed. Computation of the kinematic and dynamic function for system structures are employed to support the control operation. However, the signal which come from measure equipment has noise and model of the system is not accurate. Inverse Dynamics as an effective way to improve controllability and the low-pass filter are conducted to deal with this problem. Manipulator which digital microscope camera is assembled on end-effector and head mount equipment were designed for experimental evaluation by testing trajectory planning of only manipulator and collaborating with a 6-DOF manipulator for miniature tasks (RCRT-1). The first experimental results show that the control system be designed can handle and operate the end-effector to move in correct position and direction with low error. The second show that this structure which is visual reality of the system has effective performance while operates with RCRT-1. It means that RCRT-1 moves to the position more precisely.

Department: Mechanical Engineering Student's Signature ....
Field of Study: Mechanical Engineering Advisor's Signature ....
Academic Year: 2015

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือของ ศ.ดร.วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้สละเวลาเพื่อให้คำปรึกษาและให้ข้อคิดเห็นในการวิจัยของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ พร้อมทั้งจัดหาอุปกรณ์ที่ใช้ในการทำวิทยานิพนธ์ครั้งนี้มาตลอดงานวิจัย รวมทั้งอาจารย์ทุกท่านที่ให้ทั้งความรู้ ความเข้าใจ และประสบการณ์ จึงใคร่ขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลที่สนับสนุนทุนการศึกษา และ ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ นิสิตปริญญาโทและปริญญาเอกในห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีหุ่นยนต์ทุกท่านที่มีส่วนช่วยสนับสนุนงานวิจัยนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญรูปภาพ ..... ญ

สารบัญตาราง ..... ฐ

บทที่ 1 บทนำ 14

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 14

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 15

1.3 ขอบเขตของการวิจัย 15

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานของวิทยานิพนธ์ 16

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 16

บทที่ 2 ความรู้เบื้องต้นของงานวิจัย 17

2.1 ความรู้เบื้องต้นของคุณสมบัติของโครงสร้าง 17

2.2 ความรู้เบื้องต้นของแขนกลแบบอนุกรม และ แขนกลแบบขนาน 17

2.3 ความรู้เบื้องต้นของระบบพิกัด 20

2.3.1 ระบบพิกัดคาร์ทีเซียน 20

2.3.2 ระบบพิกัดทรงกลม 20

2.4 เมตริกซ์การหมุน (Rotation matrix) 21

2.5 ความรู้เบื้องต้นของแขนกลพิกัดทรงกลม (Spherical manipulator) 22

2.6 การนำเสนอภาพ 25

2.6.1 จุดภาพ 25

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

หน้า

2.6.2 อัตราเฟรม 25

2.7 อุปกรณ์สวมใส่ศีรษะและหุ่นยนต์ 26

บทที่ 3 แบบจำลองของแขนกล 28

3.1 โครงสร้างของแขนกล 28

3.2 แบบจำลองจลศาสตร์ (Kinematic) 29

3.2.1 แบบจำลองจลศาสตร์ของอุปกรณ์ตรวจวัดการเคลื่อนที่ของศีรษะ 29

3.2.2 จลศาสตร์ของแขนกลตาม 32

3.3 แบบจำลองพลศาสตร์ (Dynamic) 38

บทที่ 4 การควบคุม 42

4.1 ตัวควบคุมแบบ Inverse Dynamics Control 44

4.2 ตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน (low-pass filter) 45

4.3 อุปกรณ์และระบบควบคุมของแขนกลตาม 46

บทที่ 5 การทดลอง 47

5.1 ทดลองโดยการสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่ 48

5.1.1 ฟังก์ชันความเร็วในรูปแบบสี่เหลี่ยมคางหมู (trapezoidal velocity profile) 48

5.1.2 การทดลอง 49

5.2 ทดลองโดยใช้สัญญาณจากอุปกรณ์สวมใส่ศีรษะ (หุ่นยนต์แบบนำ-ตาม) 55

บทที่ 6 สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ 61

6.1 สรุปผลงานวิจัย 61

6.2 ข้อเสนอแนะ 61

รายการอ้างอิง 63

ภาคผนวก ก 66

ภาคผนวก ข 72

หน้า

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 74

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญรูปภาพ

รูปที่ 1 Mitsubishi PA10 19

รูปที่ 2 แขนกลแฮบติค 19

รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างระบบพิกัดคาร์ทีเซียนและระบบพิกัดทรงกลม....................20

รูปที่ 4 แสดงตัวอย่างแบบร่างของ Spherical serial manipulator โดยให้มุมระหว่างเวกเตอร์ z_0 , z_1 และ z_1 , z_2 เท่ากับ 90 องศา....................22

รูปที่ 5 หุ่นยนต์ Raven-II 23

รูปที่ 6 การเคลื่อนที่ของก้านต่อสุดท้ายที่ต่อกับ แขนกลพิกัดทรงกลมแบบอนุกรมและแบบขนาน กรณีเป็นก้านตรง....................24

รูปที่ 7 กรณีศึกษาของงานวิจัยที่พัฒนาแขนกลพิกัดทรงกลมสำหรับการผ่าตัด 24

รูปที่ 8 แสดงการขยายของกล้องอัตราขยายสูงแบบดิจิทัล 25

รูปที่ 9 กิมเบล และ HARV Viewer 26

รูปที่ 10 โครงสร้างของแขนกล....................28

รูปที่ 11 สัญญาณที่ถูกส่งออกจาก Microstrain 3DM-GX2 กรณีอยู่นิ่งไม่เคลื่อนที่ โดยไม่ผ่านโปรแกรมเฉพาะของผลิตภัณฑ์ 30

รูปที่ 12 แสดงลักษณะการเปลี่ยนมุมมองวัตถุระหว่างศีรษะมนุษย์(ก) และ กล้อง(ข)....................31

รูปที่ 13 แสดงการตั้งเฟรมระหว่างอุปกรณ์ตรวจวัดศีรษะกับจอแสดงผลของคอมพิวเตอร์....................31

รูปที่ 14 แสดงลักษณะแขนกลพิกัดทรงกลมแบบอนุกรม 2 องศาอิสระ(Degree of Freedom)....................33

รูปที่ 15 แสดงเฟรมของแต่ละข้อต่อ....................34

รูปที่ 16 แผนภาพการควบคุมการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์....................43

รูปที่ 17 แผนภาพการควบคุมข้อต่อของแขนกลตาม....................43

รูปที่ 18 แสดงอุปกรณ์สวมใส่ศีรษะและแขนกลที่ใช้ในการทดลอง....................47

รูปที่ 19 แสดงตำแหน่ง ความเร็ว ความเร่งของตำแหน่งของปลายแขนกล 48

รูปที่ 20 แสดงเส้นทางการเคลื่อนที่ที่กำหนดให้ปลายแขนกลเคลื่อนที่ 50

รูปที่ 21 แสดงตำแหน่งและความผิดพลาดที่เกิดขึ้นของข้อต่อแขนกลเมื่อ $\gamma_2 = \frac{\pi}{2}\,\mathrm{rad}$ 51

รูปที่ 22 แสดงตำแหน่งและความผิดพลาดที่เกิดขึ้นของข้อต่อแขนกลเมื่อ $\gamma_2 = 3\frac{\pi}{2}\,\mathrm{rad}$ 52

รูปที่ 23 แสดงตำแหน่งและความผิดพลาดที่เกิดขึ้นของข้อต่อแขนกลเมื่อ $\gamma_2 = 0\,\mathrm{rad}$ 53

รูปที่ 24 แสดงตำแหน่งและความผิดพลาดที่เกิดขึ้นของข้อต่อแขนกลเมื่อ $\gamma_2 = \pi\,\mathrm{rad}$ 54

รูปที่ 25 แสดงการใช้ชุดอุปกรณ์ในงานวิจัยนี้ร่วมกับแขนกล 6 องศาอิสระสำหรับงานขนาดเล็ก 56

รูปที่ 26 แสดงขนาดและการวางตำแหน่ง 90 degree male header pin strip และหลอดไฟ LED 56

รูปที่ 27 การทำงานของการทดลองที่ 1 เมื่อกล้องอัตราขยายสูงอยู่กับที่และแขนกล 6 องศาอิสระทำงาน 57

รูปที่ 28 การทำงานของการทดลองที่ 1 ภาพที่เห็นจากจอแสดงผลคอมพิวเตอร์......................57

รูปที่ 29 การทำงานของการทดลองที่ 1 ใช้แขนกลนำในการควบคุมแขนกล 6 องศาอิสระ ผ่านจอแสดงผลคอมพิวเตอร์ 58

รูปที่ 30 การทำงานของการทดลองที่ 2 เมื่อกล้องอัตราขยายสูงเคลื่อนที่ตามแขนกลพิกัดทรงกลม ทำงานพร้อมกับแขนกล 6 องศาอิสระทำงาน 58

รูปที่ 31 การทำงานของการทดลองที่ 2 ภาพที่เห็นจากจอแสดงผลคอมพิวเตอร์......................59

รูปที่ 32 การทำงานของการทดลองที่ 2 ใช้แขนกลนำในการควบคุมแขนกล 6 องศาอิสระ และการใช้อุปกรณ์สวมใส่ศีรษะควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกลพิกัดทรงกลมแบบอนุกรม 59

รูปที่ ก.1 แสดงการ์ดนับค่าอุปกรณ์วัดมุม..........66

รูปที่ ก.2 ชุดขยายกระแสไฟฟ้าขับมอเตอร์กระแสตรง 66

รูปที่ ก.3 แสดงมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง maxon RE25 67

รูปที่ ก.4 แสดงมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง Maxon A-max16 67

รูปที่ ก.5 แสดงกล้องอัตราขยายสูง dino lite plus..........68

รูปที่ ก.6 Microstrain 3DM-GX2..........69

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

รูปที่ ก.7 แสดงคุณสมบัติของก้านต่อของแขนกล 71

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

สารบัญตาราง

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบคุณสมบัติแขนกลแบบอนุกรมกับแบบขนาน เครื่องหมาย ✓ หมายถึงมีคุณสมบัติดีกว่า....18

ตารางที่ 2 Denavit-Hartenberg Parameter ของแขนกลพิกัดทรงกลมแบบอนุกรม 2 ก้านต่อ....33

ตารางที่ ก - 1 แสดงฟังก์ชันของ Microstrain 3DM-GX2....69

ตารางที่ ก - 2 แสดงฟังก์ชันของ microstrain 3DM-GX2 (ต่อ)....70

ตารางที่ ข - 1แสดงตัวอย่างความสามารถของ OpenCV....72

ตารางที่ ข - 2 แสดงตัวอย่างความสามารถของ OpenCV (ต่อ)....73

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันงานวิจัยด้านต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับหุ่นยนต์มีความก้าวหน้าไปมาก เนื่องจากหุ่นยนต์มีความความสามารถทำงานที่มนุษย์ไม่สามารถทำได้ เช่น งานที่ต้องการควบคุมแรง งานที่ต้องการความแม่นยำสูง และงานอันตรายที่ต้องการความปลอดภัยของผู้ใช้งาน เป็นต้น

มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับหุ่นยนต์ออกมามากมายในหลายรูปแบบ มีงานวิจัยที่อาศัยการประยุกต์ใช้ระบบหุ่นยนต์แบบนำ-ตาม หรือ ระบบการควบคุมหุ่นยนต์จากระยะไกล(master-slave robotic system or teleoperation system) ซึ่งนำข้อดีของมนุษย์และหุ่นยนต์เข้าด้วยกัน กล่าวคือ มนุษย์มีการตัดสินใจ ความนึกคิดที่ดีกว่า ส่วนหุ่นยนต์มีความแม่นยำมากกว่าและสามารถออกแบบให้มีกายภาพเหมาะสมกับการใช้งานในงานเฉพาะเจาะจงได้ ทำให้ทำงานดีกว่ากายภาพของมนุษย์ ในปัจจุบันมีการใช้หุ่นยนต์รูปแบบนี้ ในหลากหลายสาขา ไม่ว่าในอุตสาหกรรม การแพทย์ แม้กระทั่งอวกาศ ทั้งมีการพัฒนาระบบนี้เข้ามาช่วยในการทำงานในงานอื่นๆ ที่หลากหลายมากขึ้นอยู่ตลอดเวลา

การใช้ระบบภาพเป็นอีกสิ่งหนึ่งที่จำเป็นต่อการควบคุมโดยมนุษย์ของระบบหุ่นยนต์แบบนำ-ตาม โดยปกติมนุษย์จะรับภาพที่ได้จากหุ่นยนต์มาประมวลผล จากนั้นควบคุมหุ่นยนต์ให้ทำงาน ส่วนใหญ่แล้วผู้ใช้จำเป็นต้องฝึกการควบคุมด้วยโปรแกรมจำลองก่อน ทั้งความไม่คุ้นเคยของภาพที่ได้รับที่แม้เป็นแบบสามมิติ ยังมีการบังคับแขนกลควบคู่กันอีก ยิ่งถ้าเป็นภาพขยายจากกล้องอัตราขยายสูงด้วยแล้ว ทำให้ผู้ใช้งานเริ่มต้นส่วนใหญ่ไม่คุ้นเคยกับภาพสามมิติที่มองเห็น [1] แต่ในอีกแง่มุมหนึ่งมนุษย์ส่วนใหญ่จะคุ้นเคยกับโทรทัศน์ซึ่งจะนำเสนอภาพในรูปแบบของสองมิติมากกว่า ดังนั้นการนำเสนอภาพในรูปแบบสองมิติ สมควรเป็นอีกแนวทางหนึ่งที่นำไปประยุกต์กับระบบภาพของหุ่นยนต์อย่างไรก็ตามเหตุผลที่ผู้ผลิตส่วนใหญ่มุ่งเน้นการนำเสนอภาพเป็นสามมิติเนื่องจาก การทำงานของหุ่นยนต์ส่วนใหญ่ทำงานให้ปริภูมิสามมิติ ที่มีทั้ง กว้าง ยาว ลึก ซึ่งภาพสองมิติจากโทรทัศน์ไม่สามารถนำเสนอความลึกได้

งานวิจัยของหุ่นยนต์ในลักษณะดังกล่าว ได้นำมาศึกษาแล้ว คือ แขนกล 6 องศาอิสระสำหรับงานขนาดเล็ก [2] ได้ติดตั้งกล้องอัตราขยายสูงอยู่กับที่ เข้ากับระบบเพื่อถ่ายทอดภาพการทำงานของหุ่นยนต์ให้กับมนุษย์ แต่ขาดความอิสระของการมองเห็นด้านความลึก และไม่สามารถเปลี่ยนมุมมอง

ของการนำเสนอภาพได้ ทั้งนี้ในการทำงานจริงโดยอาศัยมนุษย์ของการควบคุมหุ่นยนต์นั้น มนุษย์สามารถมองวัตถุเป็นรูปร่างสามมิติเช่นเดียวกับหุ่นยนต์ทั่วไปส่วนใหญ่ที่ทำงานในปริภูมิสามมิติ

ดังนั้นถ้าสามารถสร้างแขนกลที่ไม่สลับซับซ้อน เพื่อใช้นำเสนอภาพสองมิติบอกความลึกของวัตถุได้ อาศัยการเปลี่ยนมุมมองของกล้อง ก็จะชดเชยมิติที่ขาดไปได้อีกทางหนึ่ง และประยุกต์เข้ากับกล้องที่มีอัตราขยายสูงเช่นเดิม ส่วนการควบคุมยังคงใช้มนุษย์ให้ระบบทำงานด้วยระบบหุ่นยนต์แบบนำ-ตาม ซึ่งในงานทางปฏิบัติส่วนใหญ่จะใช้ศีรษะในการควบคุม เนื่องจากปกติศีรษะเป็นตัวบังคับทิศทางในการรับภาพจากดวงตา ทำให้ผู้ใช้งานไม่จำเป็นต้องฝึกฝนในการใช้งานเป็นเวลานาน ส่วนชนิดอุปกรณ์ในการตรวจวัดตำแหน่งศีรษะเพื่อใช้ในการควบคุม มีงานวิจัยหลากหลาย ดังเช่น [3] เป็นการติดตามตำแหน่งศีรษะและตำแหน่งดวงตา แต่ในปัจจุบันเทคโนโลยี MEMS มีการพัฒนาสูงขึ้นมาก ทำให้อุปกรณ์ตรวจวัดมีขนาดเล็กลงและมีประสิทธิภาพมากขึ้น ดังปรากฏในโทรศัพท์เคลื่อนที่สมาร์ตโฟน ที่มีระบบวัดการหมุนของโทรศัพท์ จึงทำให้มีงานวิจัยไม่น้อยนำเทคโนโลยี MEMS มาประยุกต์ใช้กับการระบุตำแหน่ง [4],[5],[6] ดังนั้นถ้านำเทคโนโลยีนี้มาประยุกต์ใช้วัดการเคลื่อนที่ของศีรษะแล้วนำค่าที่ตรวจวัดไปควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกล ก็จะสามารถแก้ไขปัญหาได้เช่นกัน

กล่าวโดยสรุป งานวิจัยนี้จะศึกษารายละเอียดของการประยุกต์ระบบหุ่นยนต์แบบนำ-ตาม ที่ทำหน้าที่เพิ่มมุมมองในการมองเห็นเพื่อชดเชยมิติที่ขาดไปของกล้อง ไปประยุกต์ใช้กับแขนกล 6 องศาอิสระสำหรับงานขนาดเล็ก โดยครอบคลุม การออกแบบ การสร้าง การคำนวณทางวิศวกรรม และการควบคุมหุ่นยนต์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

พัฒนาอุปกรณ์ที่ติดกับศีรษะเพื่อเพิ่มมุมมองการมองเป้าหมายผ่านกล้องที่ติดตั้งบนแขนหุ่นยนต์ที่ออกแบบมาเฉพาะ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. วิเคราะห์และออกแบบหุ่นยนต์ที่สามารถควบคุมการเรียงตัว (orientation) ให้ทำงานร่วมกับระบบการมองเห็นของมนุษย์ผ่านกล้องได้อย่างเหมาะสม
2. ออกแบบอุปกรณ์สำหรับสวมใส่เข้ากับศีรษะมนุษย์ พร้อมติดตั้งอุปกรณ์ตรวจรู้ที่เหมาะสม
3. ออกแบบและพัฒนาโปรแกรมควบคุมหุ่นยนต์ให้ได้ตามวัตถุประสงค์

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานของวิทยานิพนธ์

1. ศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบหุ่นยนต์แบบนำ-ตาม (master and slave) กับการทำงานผ่านกล้อง
2. ออกแบบและสร้างแขนหุ่นยนต์ที่ใช้สำหรับติดตั้งกล้อง
3. ศึกษาระบบพลศาสตร์ของหุ่นยนต์และออกแบบตัวควบคุมการเคลื่อนที่
4. พัฒนาโปรแกรมการควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ผ่านอุปกรณ์ตรวจรู้ที่ติดตั้งอยู่ที่ศีรษะ
5. ทดลองการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ตามที่กำหนดและปรับปรุงข้อบกพร้องที่อาจจะเกิดขึ้น
6. สรุปผลและเขียนรูปเล่มวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้อุปกรณ์ที่สามารถเพิ่มมุมมองการมองเป้าหมายผ่านกล้องที่ติดกับแขนหุ่นยนต์ที่ออกแบบมาเฉพาะ สำหรับการใช้งานร่วมกับระบบหุ่นยนต์แบบนำ-ตาม (master-slave robotic system)
2. อุปกรณ์นี้จะเป็นพื้นฐานสำหรับการพัฒนาอุปกรณ์สำหรับงานลักษณะนี้ต่อไปในอนาคต

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 2
ความรู้เบื้องต้นของงานวิจัย

2.1 ความรู้เบื้องต้นของคุณสมบัติของโครงสร้าง

การพัฒนาแขนกลมีวัตถุประสงค์ต้องให้แขนกลสามารถทำงานกับสภาพแวดล้อมซึ่งถูกกำหนดมา กล่าวคือ แขนกลจะต้องถูกออกแบบให้มีลักษณะเหมาะสมกับประเภทของงานที่จะนำไปใช้ เพื่อให้แขนกลมีคุณสมบัติในการเพิ่มมุมมองผ่านกล้อง สามารถสรุปลักษณะเฉพาะที่ต้องคำนึงถึงสำหรับการออกแบบโครงสร้างได้ดังนี้

1. บริเวณของการทำงาน เป็นที่แน่นอนว่าบริเวณการทำงานของตำแหน่งปลายแขน (end-effector) ต้องเคลื่อนที่บนพื้นที่ของผิวทรงกลม เพื่อที่จะเปลี่ยนแปลงการเรียงตัว (orientation) และควรมีขนาดที่เหมาะสมกับการใช้งานในส่วนของพื้นที่ที่จะใช้งาน
2. แขนกลต้องไม่ใหญ่จนเกินไป ทำให้จำเป็นต้องใช้ชุดเฟืองทดเพื่อไม่ต้องเพิ่มขนาดมอเตอร์ ดังนั้นต้องคำนึงถึงความหลวมของชุดเฟืองทด (Backlash) ที่ใช้ในระบบส่งผ่านกำลังซึ่งส่งกำลังจากมอเตอร์ไปยังข้อต่อ ซึ่งจะทำให้อุปกรณ์วัดมุมที่ติดกับมอเตอร์ตัวเดียวกันนั้น วัดค่ามุมผิดพลาด
3. ความแข็งแรงของชิ้นส่วนต่างๆ เช่น ก้านต่อ อุปกรณ์ส่งผ่านกำลัง และข้อต่อควรมีความแข็งแรงเพียงพอ ในกรณีที่ไม่มีความแข็งแรงเพียงพอจะทำให้สัญญาณต่างๆที่วัดได้ผิดพลาดไปจากความเป็นจริงและยังทำให้เกิดความผิดพลาดในการควบคุมตำแหน่งและทิศทาง
4. แรงเสียดทานที่ระบบส่งผ่านและข้อต่อควรมีค่าน้อย แรงเสียดทานที่เกิดขึ้นจะส่งผลกระทบต่อแรงขับมอเตอร์ เนื่องจากส่วนหนึ่งจะต้องถูกนำไปชดเชยให้กับแรงเสียดทานที่มีอยู่ ดังนั้นอาจทำให้มีค่าที่วัดได้ผิดไปจากความเป็นจริง ดังนั้นจึงต้องสวมตลับลูกปืน (bearing) ในทุกข้อต่อ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

2.2 ความรู้เบื้องต้นของแขนกลแบบอนุกรม และ แขนกลแบบขนาน

ปัจจุบันมีการจำแนกประเภทแขนกลตามลักษณะของกลไกข้อต่อได้เป็นสองประเภทคือ แขนกลแบบอนุกรม (Serial Manipulator) และ แขนกลแบบขนาน (Parallel Manipulator) โดยปกติแล้วแขนกลแบบขนานมีความแข็งแรงมากกว่าแขนกลแบบอนุกรมเพราะมีลักษณะโครงสร้างที่สามารถกระจายภาระแรงที่ปลายแขนแขนกลไปยังก้านต่อของแขนกลทั้งหมด ในตารางที่ 1 แสดง

คุณลักษณะเฉพาะของแขนกลแบบอนุกรมเปรียบเทียบกับแขนกลแบบขนาน ตามลักษณะเด่นและด้อยของแขนกลแต่ละชนิด

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบคุณสมบัติแขนกลแบบอนุกรมกับแบบขนาน เครื่องหมาย ✓ หมายถึงมีคุณสมบัติดีกว่า

	Serial Manipulator	Parallel Manipulator
1. Workspace	✓	
2. Load Capacity		✓
3. Stiffness		✓
4. Inertia		✓
5. Kinematics Complexity		
- Forward Kinematics	✓	*Complex*
- Inverse Kinematics	*Complex*	✓
6. Design Complexity	✓	

สำหรับแขนกลแบบอนุกรมมีข้อดีคือ มีพื้นที่การทำงานที่กว้างและรูปแบบของแขนกลที่เข้าใจง่าย แต่ว่าตำแหน่งการวางมอเตอร์อาจจะต้องอยู่บนแขนกลที่เคลื่อนที่ ซึ่งหมายความว่ามอเตอร์ของข้อต่อที่ฐานจะต้องแบกรับภาระน้ำหนักและความเฉื่อย (inertia) ของมอเตอร์ของข้อต่ออื่นๆ จนถึงปลายแขนกล อีกทั้งถ้ามีข้อต่อมากขึ้นหรือมีแขนกลยาวมากขึ้นจะมีผลทำให้การรับแรงที่ปลายแขนลดลง อย่างไรก็ตามแขนกลแบบอนุกรมถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรม ดังเช่น Mitsubishi PA-10 ในรูปที่ 1

สำหรับแขนกลแบบขนานมอเตอร์ทุกตัวสามารถวางข้อต่อที่ฐานได้ ทั้งสามารถแบ่งการรับน้ำหนักและความเฉื่อย (inertia) เคลื่อนที่ได้เร็วด้วยความผิดพลาดที่ต่ำ แต่พื้นที่ทำงานจะแคบ ตามรูปที่ 2

รูปที่ 1 Mitsubishi PA10 [7]

รูปที่ 2 แขนกลแฮบติค [8]

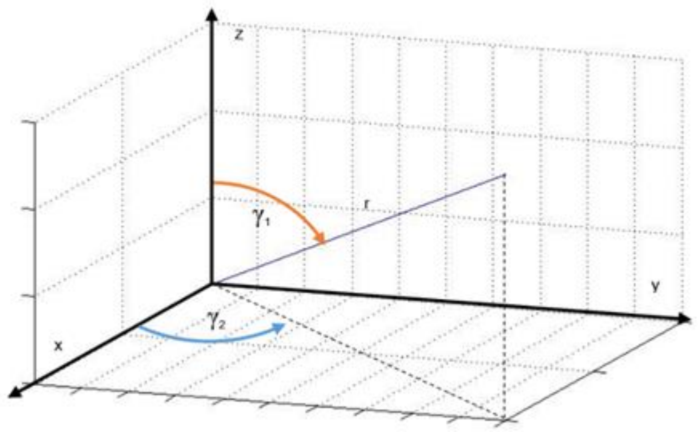
2.3 ความรู้เบื้องต้นของระบบพิกัด

2.3.1 ระบบพิกัดคาร์ทีเซียน

เป็นระบบพิกัดหลักที่ใช้อย่างแพร่หลายเนื่องจากอยู่ปริภูมิสามมิติที่เข้าใจและสร้างได้ง่าย เพียงสร้างเส้นแกนตัดกันเป็นมุมฉากที่จุดกำเนิด เช่น แกน x และ แกน y และกำหนดหน่วยระยะความยาวของแต่ละแกน เพียงเท่านี้ก็จะสามารถระบุตำแหน่งในระบบพิกัดคาร์ทีเซียนได้ทันที ระบบพิกัดคาร์ทีเซียนยังสามารถใช้ได้กับปริภูมิที่สูงกว่าสามมิติอีกด้วย

2.3.2 ระบบพิกัดทรงกลม

เป็นการบอกตำแหน่งในระบบพิกัดเชิงขั้วสามมิติ ในรูปของตัวแปร รัศมี และมุมเชิงขั้วสองมุม γ_1 และ γ_2 โดยระบบพิกัดทรงกลมสามารถอธิบาย โดยอาศัยระบบพิกัดคาร์ทีเซียนเพื่อที่จะสามารถหาความสัมพันธ์ของทั้งสองระบบพิกัด ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างระบบพิกัดคาร์ทีเซียนและระบบพิกัดทรงกลม

และสามารถเขียนสมการหาความสัมพันธ์ของระบบพิกัดทั้งสองได้ดังนี้

$$\begin{aligned} x &= r\sin(\gamma_1)\cos(\gamma_2) \\ y &= r\sin(\gamma_1)\sin(\gamma_2) \\ z &= r\cos(\gamma_1) \end{aligned} \quad (1)$$

เมื่อพิจารณาการเคลื่อนที่ของแขนกลที่ตำแหน่งปลายแขนกลตามหัวข้อที่ 2.1 ที่ต้องอยู่บนพื้นที่ของผิวทรงกลม ทำให้ระบบพิกัดทรงกลมสามารถอธิบายตำแหน่งได้ดีกว่าระบบพิกัดคาร์ทีเซียน กล่าวคือ เมื่อแขนกลเคลื่อนที่ ตำแหน่งปลายแขนกลในระบบพิกัดทรงกลมจะเปลี่ยนแปลงเพียงสอง

ตัวแปรคือมุมเชิงขั้วทั้งสองมุม ส่วนรัศมีในระบบพิกัดคงที่ ทำให้มีส่วนคล้ายกับ แขนกลอนุกรมแบบระนาบ(planar arm) ที่เคลื่อนที่ในพิกัดคาร์ทีเซียนสองมิติ อย่างไรก็ตามการบอกตำแหน่งการเคลื่อนที่ของแขนกลในระบบพิกัดทรงกลมมีขั้นตอนสลับซับซ้อนทันที เมื่อประยุกต์ใช้กับวิธีการสร้างแบบจำลองการเคลื่อนที่โดยวิธีของ Denavit-Hartenberg ที่อ้างอิงตำแหน่งของแขนกลในระบบพิกัดคาร์ทีเซียน ดังนั้นในงานวิจัยฉบับนี้จะใช้ระบบพิกัดทรงกลมไว้อธิบายและกำหนดการเคลื่อนที่ ในส่วนของการทดลองส่วนการสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่เท่านั้น แล้วแปลงค่ากลับระบบพิกัดคาร์ทีเซียนด้วยสมการที่ 1 แล้วนำสัญญาณไปควบคุมต่อไป

2.4 เมตริกซ์การหมุน (Rotation matrix)

การกำหนดตำแหน่งและทิศทางของแขนกล โดยทั่วไปจำเป็นต้องกำหนดตำแหน่งและการเรียงตัว (orientation) อ้างอิงอยู่บนวัตถุ ซึ่งการเรียงตัวสามารถเขียนอยู่ในรูปของเมตริกซ์การหมุน (Rotation matrix) เทียบกับแกนอ้างอิง หรือ เฟรม (frame) เมตริกซ์ของการหมุนมีขนาด 3×3 ซึ่งก็คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วยบอกตำแหน่งแกนทั้งสามตามทิศทางการหมุนรอบแนวแกนที่กำหนด ทั้งแกน x, y และ z โดยเขียนได้ดังสมการที่ 2 3 และ 4

$$\mathrm{R_x}(\alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) \\ 0 & \sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{bmatrix} \tag{2}$$

$$\mathrm{R_y}(\beta) = \begin{bmatrix} \cos(\beta) & 0 & \sin(\beta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\beta) & 0 & \cos(\beta) \end{bmatrix} \tag{3}$$

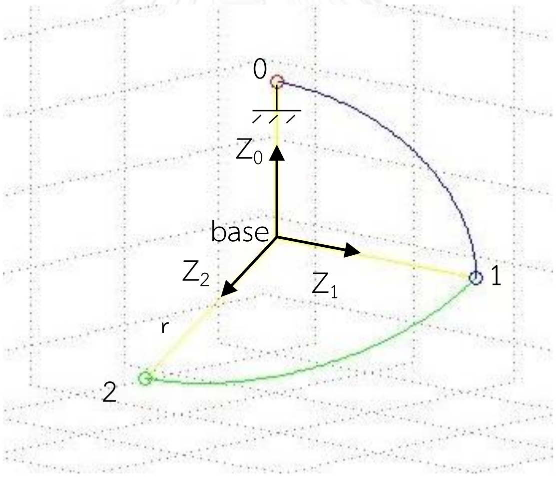
$$\mathrm{R_z}(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{4}$$

โดยเมตริกซ์หลักที่หนึ่งคือตำแหน่งของเวกเตอร์แกน x ที่เปลี่ยนไปหลังการหมุน ในตำแหน่ง x, y และ z ของแกนอ้างอิง ตามลำดับ ส่วนหลักที่สองและสามคือแกน y และ z [9]

2.5 ความรู้เบื้องต้นของแขนกลพิกัดทรงกลม (Spherical manipulator)

แขนกลพิกัดทรงกลมมีจุดเด่นอยู่ที่ข้อต่อทุกข้อต่อรวมทั้งปลายแขนของแขนกลเคลื่อนที่อยู่บนพื้นที่ของผิวทรงกลม ทำให้ได้การเคลื่อนที่ตามต้องการตามหัวข้อที่ 2.1 และเช่นเดียวกับแขนกลแบบปกติ แขนกลพิกัดทรงกลมสามารถแบ่งได้เป็นสองกรณี คือ แบบ อนุกรม และแบบขนาน

แขนกลพิกัดทรงกลมแบบอนุกรม (Spherical serial manipulator) เป็นแขนกลอนุกรมแบบพิเศษที่ปลายแขนกลสามารถเคลื่อนที่ได้ทั้งสามมิติของระบบพิกัดคาร์ทีเซียน ในลักษณะที่เรียกว่า pure rotation ซึ่งมีลักษณะเหมือนข้อต่อลูกปืนกลมที่เป็นเบ้า (ball and socket joint) ที่สามารถหมุนได้รอบทิศทางแต่ไม่สามารถเคลื่อนที่เพิ่มระยะทางจากจุดศูนย์กลางได้ มีคุณสมบัติคือ มีจุดตัดจากเส้นที่ลากผ่านแนวข้อต่ออยู่ที่จุดเดียวกัน ซึ่งต่างจากแขนกลอนุกรมแบบระนาบ (planar arm) ที่มีมิติการเคลื่อนที่ของแขนกลในสองมิติของระบบพิกัดคาร์ทีเซียน (Cartesian coordinates) ส่วนแขนกลพิกัดทรงกลมแบบอนุกรมจะเคลื่อนที่ในสองมิติของ ระบบพิกัดทรงกลม (spherical coordinates)

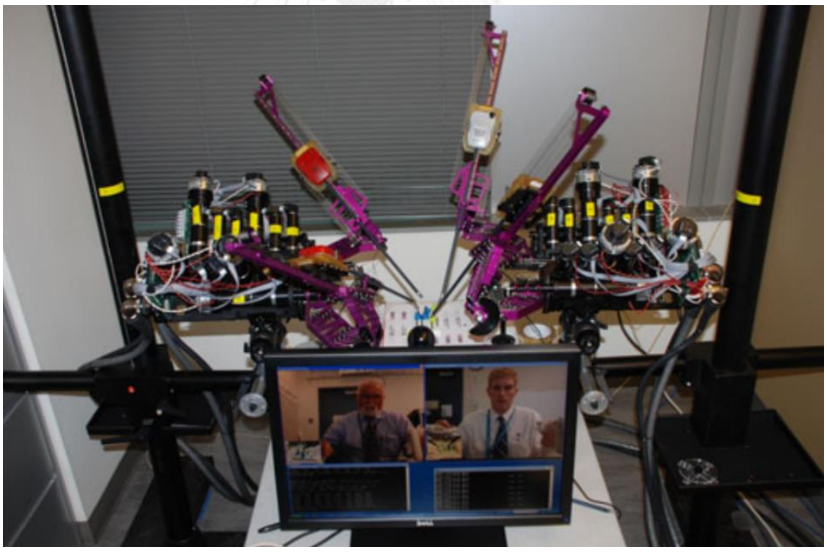


รูปที่ 4 แสดงตัวอย่างแบบร่างของ Spherical serial manipulator โดยให้มุมระหว่างเวกเตอร์ z_0 , z_1 และ z_1 , z_2 เท่ากับ 90 องศา

จากรูปที่ 4 การหาตำแหน่งของปลายแขนกลหรือตำแหน่งที่ 2 ซึ่งขึ้นอยู่กับการหมุนของแต่ละข้อต่อ โดยตำแหน่งที่ 2 จะไม่สามารถเคลื่อนที่ออกห่างจากตำแหน่งฐาน (base) ได้อีก ทำได้เพียงเคลื่อนที่รอบตำแหน่งฐานเท่านั้น ซึ่งเสมือนตำแหน่งที่ 2 หมุนรอบตำแหน่งฐาน ด้วยรัศมีคงที่ r และจะเรียกตำแหน่งฐานนี้ว่า จุดศูนย์กลางของการหมุน (Center of Rotation) โดยข้อต่อ 0 จะหมุนรอบเวกเตอร์ Z_0 ที่อยู่นิ่งไม่เปลี่ยนแปลงทิศทาง ทำให้ทุกจุดของก้านต่อที่เชื่อมระหว่างข้อต่อที่ 0 กับ 1

เคลื่อนที่รอบเวกเตอร์ Z_0 ส่วนข้อต่อ 1 จะหมุนรอบเวกเตอร์ Z_1 ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงทิศทางตามการหมุนของข้อต่อ 0 แต่หากคิดการเคลื่อนที่แบบสัมพัทธ์ ทุกจุดของก้านต่อที่เชื่อมระหว่างข้อต่อที่ 1 กับ 2 จะเคลื่อนที่รอบเวกเตอร์ Z_1 เช่นกัน

มีการประยุกต์ใช้โครงสร้างแบบแขนกลพิกัดทรงกลมแบบอนุกรมในหุ่นยนต์ Raven-II [10] แต่มีโครงสร้างอื่นๆเพิ่มเติม เช่น มีก้านต่อยาวติดกับตัวหนีบขนาดเล็กที่ขับเคลื่อนผ่านสายเคเบิล เพื่อที่จะบิดไปมาและหนีบสิ่งของได้ ทั้งยังสามารถเลื่อนปลายแขนขึ้นลง จึงทำให้หุ่นยนต์ Raven-II มี 7 องศาอิสระ (degree of freedom) ในส่วนของข้อต่อช่วงต้นยังคงลักษณะของแขนกลพิกัดทรงกลมแบบอนุกรมไว้ โดยข้อต่อที่หนึ่งถึงสามมีแนวการหมุนของแต่ละข้อต่อตัดกันที่จุดเดียว ทำให้ข้อต่อช่วงต้นทั้งสามข้อต่อนี้เคลื่อนที่รอบจุดๆหนึ่ง ตามหลักการการเคลื่อนที่และโครงสร้างของแขนกลพิกัดทรงกลม อีกทั้งในงานวิจัยของ Raven-II ยังได้นำหุ่นยนต์ตัวนี้ไปประยุกต์ใช้กับการควบคุมระบบหุ่นยนต์แบบนำ-ตาม (master-slave robotic system) โดยใช้แขนกลแฟนท่อม ทำหน้าที่เป็นหุ่นยนต์นำ และ Raven-II ทำหน้าที่เป็นหุ่นยนต์ตาม ซึ่งถูกนำมาใช้ทดลองใช้งานกับการผ่าตัดสัตว์แล้ว แต่ยังไม่ผ่านมาตรฐานความปลอดภัยที่จะนำมาทดลองใช้งานกับมนุษย์

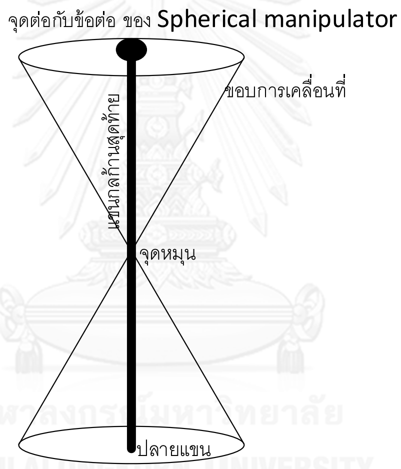


รูปที่ 5 หุ่นยนต์ Raven-II [10]

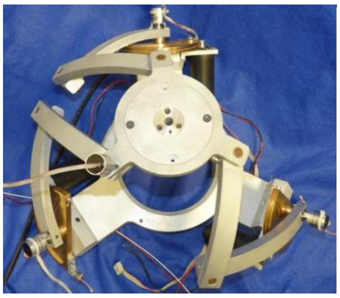
แขนกลพิกัดทรงกลมแบบขนาน (Spherical parallel manipulator) เป็นแขนกลขนานแบบพิเศษที่ปลายแขนกลสามารถเคลื่อนที่ได้ทั้งสามมิติของระบบพิกัดคาร์ทีเซียน ในลักษณะที่เรียกว่า pure rotation เช่นเดียวกับ แขนกลพิกัดทรงกลมแบบอนุกรมแต่การหาสมการ จลศาสตร์ไปข้างหน้า (forward kinematic) จะอยู่ในรูปแบบที่สลับซับซ้อนกว่ามาก กล่าวคือจะอยู่ในรูปของสมการทางพีชคณิตของแขนกลแต่ละทางเชื่อมต่อกันที่ตำแหน่งปลาย (multi-loop kinematic

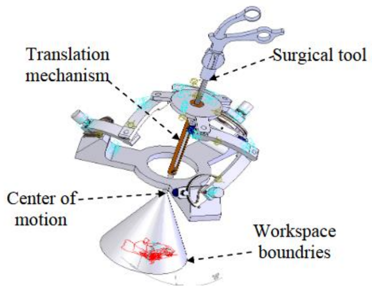
chains) [11] แขนกลชนิดนี้มีข้อดีกว่าแขนกลชนิดเดียวกันแบบอนุกรมคือมีความแข็งแรงมากกว่า และถูกนำไปประยุกต์เข้ากับการผ่าตัดเช่นกัน ซึ่งมีงานวิจัยออกมาหลากหลาย [12],[13]

แนวความคิดที่นำทั้ง แขนกลแบบอนุกรมและแบบขนาน มาประยุกต์ใช้กับการผ่าตัด มาจากจุดเด่นของ แขนกลพิกัดทรงกลม คือ มีส่วนหนึ่งของแขนกลไม่เคลื่อนที่มีแต่การหมุน เสมือนหมุนรอบจุดๆเดียว และเอกลักษณ์ข้อนี้มาสร้างก้านต่อในข้อต่อสุดท้ายให้เป็นก้านตรงและยาวมากกว่าจุดหมุนนั้นลงไป ก้านต่อสุดท้ายจะมีลักษณะการเคลื่อนที่แบบหมุนรอบตัวเองดังรูปที่ 6 ถ้าตั้งจุดหมุนนี้ให้อยู่บนผิวหนังของมนุษย์ ในการผ่าตัดจะทำให้ไม่ต้องเปิดแผลกว้าง เพียงแค่เปิดแผลให้ใหญ่เท่ากับขนาดของก้านต่อสุดท้ายเท่านั้น(minimally invasive surgery) หลังจากสอดก้านต่อสุดท้ายเข้าไป ปลายแขนยังมีระยะการเคลื่อนที่ พอที่จะทำงานได้ จึงเหมาะแก่การนำไปประยุกต์ใช้ในงานในด้านนี้ดังรูปที่ 7



รูปที่ 6 การเคลื่อนที่ของก้านต่อสุดท้ายที่ต่อกับ แขนกลพิกัดทรงกลมแบบอนุกรมและแบบขนาน กรณีเป็นก้านตรง





รูปที่ 7 กรณีศึกษาของงานวิจัยที่พัฒนาแขนกลพิกัดทรงกลมสำหรับการผ่าตัด [12],[13]

2.6 การนำเสนอภาพ

กล้องอัตราขยายสูงแบบดิจิทัล (digital microscope) แบบ USB (ภาคผนวก ก) เป็นการใช้กล้องดิจิทัล ควบคู่กับ เลนส์ขยาย เพื่อนำเสนอภาพขึ้นจอแสดงผลของคอมพิวเตอร์ดังรูปที่ 8 โดยจะมี ซอฟแวร์เฉพาะของผู้ผลิตในการนำเสนอ

รูปที่ 8 แสดงการขยายของกล้องอัตราขยายสูงแบบดิจิทัล

2.6.1 จุดภาพ

จุดภาพ (pixel) เป็นหน่วยภาพพื้นฐานที่รายงานจำนวนจุดบนจอแสดงผล กล่าวได้อีกอย่างหนึ่งคือ เป็นการแสดงจำนวนจุดในรูปภาพที่รวมกันขึ้นเป็นภาพ ซึ่งแต่ละภาพประกอบด้วยจุดภาพมากมาย อย่างไรก็ตามแต่ละภาพถึงมีขนาดเท่ากันอาจจะมีจุดภาพไม่เท่ากันก็ได้ขึ้นกับความหนาแน่นของจุดภาพในภาพ โดยเรียกความหนาแน่นนี้ว่า ความละเอียดภาพ (resolution) ที่ใช้แสดงคุณสมบัติของภาพอุปกรณ์ จุดภาพยังเป็นตัวบอกขนาดภาพ (กว้างxยาว) เช่น 800 x 600 pixel, 1024 x 768 pixel และ 4000 x 3000 pixel เป็นต้น

CHULALONGKORN UNIVERSITY

2.6.2 อัตราเฟรม

การใช้กล้องในการนำเสนอภาพ ยังมีสิ่งที่ต้องคำนึงถึงคือ อัตราเฟรม (frame rate) วัดกันในหน่วยของ ภาพต่อเวลา หมายถึงการจัดเก็บภาพของกล้องดิจิทัลว่า มีการบันทึกภาพจากภาพเคลื่อนไหวที่กล้องถ่ายไว้ได้ จำนวนกี่ภาพต่อเวลา หรือในกรณีอื่น คือจำนวนภาพที่แสดงออกมาจากการแสดงผลอื่นๆ เช่น วีดีโอ ภาพยนตร์แม้กระทั่ง แอนิเมชัน

อัตราเฟรม เป็นค่าที่บอกคุณภาพของการนำเสนอได้อีกตัวหนึ่ง กล่าวคือ อัตราเฟรมที่สูงจะทำให้ภาพเคลื่อนไหวที่ได้มีความต่อเนื่องมากขึ้น แต่จะทำให้พื้นที่ในการจัดเก็บรวมไปถึงการประมวลผลของอุปกรณ์นำเสนอสูงขึ้น ในกรณีของกล้องอัตราขยายสูงแบบ ดิจิทัล มีอัตราเฟรมที่

จำกัดโดยขึ้นกับความละเอียดของภาพ ยิ่งมีความละเอียดสูงอัตราเฟรมจะยิ่งต่ำ สำหรับกล้องอัตราขยายสูงแบบ ดิจิทัล ที่ใช้มีความสัมพันธ์คือ

ขนาดภาพ 640 x 480 pixel จะได้อัตราเฟรม 30 fps

ขนาดภาพ 1280 x 1024 pixel จะได้อัตราเฟรม 10 - 15 fps

fps คือ หน่วยของอัตราเฟรม เฟรมต่อวินาที (frames per second)

อัตราเฟรม โดยปกติจะถูกตั้งให้มากกว่า 24 fps ที่เป็นการนำเสนอภาพทางโทรทัศน์ระบบแอนะล็อกตามมาตรฐาน โดยผู้รับชมจะไม่มีความรู้สึกว่าภาพที่มองเห็นขาดความต่อเนื่อง ส่วน 25 fps ปรากฏอยู่ในการนำเสนอภาพของ จอภาพของคอมพิวเตอร์ (computer monitor) และ เครื่องฉาย (projector) ในกรณีนี้ใช้อัตราเฟรม 30 fps ซึ่งเป็นอัตราเฟรมมาตรฐานของกล้อง ทำให้การนำเสนอภาพผ่านจอภาพของคอมพิวเตอร์อยู่ในเกณฑ์ที่ใช้กันทั่วไป

2.7 อุปกรณ์สวมใส่ศีรษะและหุ่นยนต์

รูปที่ 9 กิมเบล และ HARV Viewer [14]

ในปัจจุบันยานไร้คนขับหรือยานที่ไม่มีผู้บังคับอยู่บนเครื่อง มีการพัฒนาก้าวหน้าไปมาก ซึ่งจะทำงานร่วมกับคอมพิวเตอร์ควบคุมระหว่างยานและผู้บังคับ และมีการแก้ปัญหาการมองของผู้บังคับ โดยติดตั้งอุปกรณ์การภาพหรือกิมเบล (Gimbal) ไว้กับโครงสร้างของยาน แต่ยังติดปัญหาอยู่ที่ผู้บังคับไม่สามารถควบคุมการเคลื่อนที่ของกิมเบลได้สะดวก เพราะจะต้องใช้มือทั้งสองควบคุมการเคลื่อนที่ของยานไปด้วย

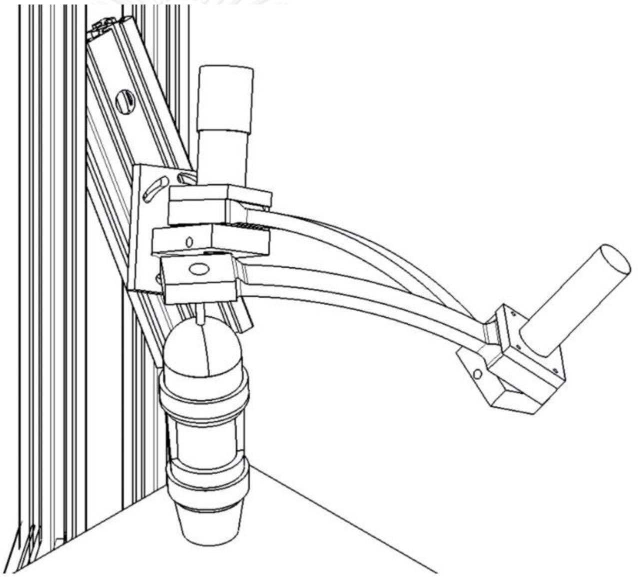
ในการทหารมีการนำอุปกรณ์สวมใส่ศีรษะปรับใช้ในการควบคุมการทำงานของกิมเบล บนยานไร้คนขับ โดยใช้ลักษณะการเคลื่อนที่ที่คล้ายกันระหว่างศีรษะกับกิมเบล กล่าวคือกิมเบลถูกสร้างขึ้นเพื่อให้มีลักษณะการเคลื่อนที่เป็นการหมุนรอบแกน โดยมีโครงสร้างจัดเรียงเป็นวงซ้อนกัน และมีแนวการหมุนของแต่ละวงตัดกันที่จุดเดียวกัน โดยมีมุมระหว่างข้อต่อแขนกลภายในเป็น 90 องศา หรือ แนวการหมุนของแต่ละวงจะทำมุมของแนวการหมุนของวงที่อยู่ถัดไป 90 องศา ดังนั้นกิมเบลจึงสามารถเคลื่อนที่แบบหมุนสองแกนคือ ปักเงย (Elevation) และหมุนรอบตัว (Azimuth) ให้กิมเบลติดกล้องอยู่กึ่งกลางแนวของการหมุนเพื่อส่งภาพให้ผู้บังคับ ดังตัวอย่างในรูปที่ 9 เมื่อเปรียบเทียบกับส่วนศีรษะก็สามารถเคลื่อนที่ทั้งสองแกนนี้ได้เช่นเดียวกันกับของกิมเบลและใช้แนวการมองเห็นจากสายตาแทนกล้อง จึงมีการประยุกต์ส่วนคล้ายนี้ สร้างอุปกรณ์ HARV เพื่อเชื่อมต่อสัญญาณที่วัดได้จากการเคลื่อนที่ของศีรษะของผู้บังคับไปบังคับการเคลื่อนที่ของกิมเบล ทำให้สะดวกต่อการบังคับยานมากขึ้น โดยใช้มือ บังคับยานและใช้ศีรษะบังคับการมองเห็นที่รับมือจากตัวยานผ่านกิมเบล ซึ่งทำให้มองเห็นภาพหลายทิศทาง

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 3
แบบจำลองของแขนกล

3.1 โครงสร้างของแขนกล

นำลักษณะเฉพาะของแขนกลแบบพิกัดทรงกลมที่ได้ศึกษามาในบทที่ 2 มาประยุกต์ใช้ในการเพิ่มมุมมองเมื่อวางวัตถุไว้ที่จุดศูนย์กลางการหมุนแทน จะทำให้เห็นภาพรอบทิศทางของวัตถุนั้น เนื่องจากต้องการให้แขนกลมีลักษณะที่ซับซ้อนน้อยที่สุด จึงออกแบบโครงสร้างเป็นแขนกลแบบอนุกรมได้ดังรูปที่ 10 โดย มอเตอร์ อุปกรณ์วัดมุมและอุปกรณ์ส่งผ่านกำลังหรือเฟืองทดติดตั้งเข้าด้วยกันที่แต่ละข้อต่อของแขนกล และติดตั้งกล้องอัตราขยายสูงไว้ที่ข้อต่อสุดท้าย



รูปที่ 10 โครงสร้างของแขนกล

หลังจากการกำหนดรูปแบบและโครงสร้างของแขนกลแล้ว สิ่งที่พิจารณาอย่างต่อไปคือ พื้นที่การทำงานที่ขึ้นกับขนาดของแขนกล ที่แล้วแต่การนำไปปรับหรือประยุกต์ใช้แขนกลในงานต่างๆ ในการออกแบบของงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นเพื่อใช้ในการพิสูจน์ระบบควบคุมเพื่อให้แขนกลทำงานบรรลุตามวัตถุประสงค์เป็นหลัก โดยให้มีข้อกำหนดดังนี้

1. การเคลื่อนที่ของแขนกล ให้เท่ากับความสามารถของการขยับศีรษะของมนุษย์ในท่าที่สบายและอยู่ได้นาน [15] โดยกำหนดให้มุมที่วัดการขยับศีรษะทางแนวตั้งและแนวนอนเท่ากันคือบวกลบ 30 องศา

2. การกำหนดขนาดของแขนกลกำหนดโดยการหา dexterity โดยตั้งตัวแปรเป็นขนาดของแขนกล ให้มีค่าสูงเพียงพอเพื่อให้มีความสามารถในการทำงานที่ราบเรียบ

3.2 แบบจำลองจลศาสตร์ (Kinematic)

3.2.1 แบบจำลองจลศาสตร์ของอุปกรณ์ตรวจวัดการเคลื่อนที่ของศีรษะ

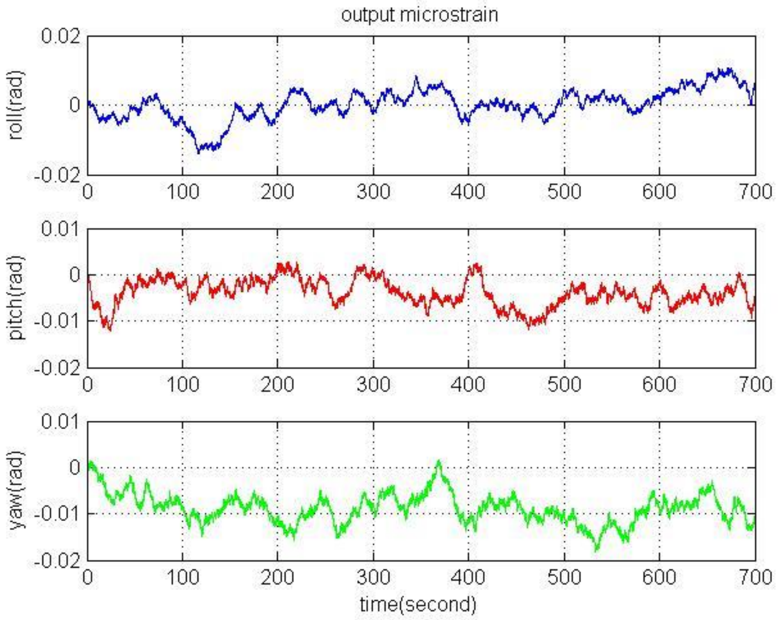
อุปกรณ์ตรวจวัดการเคลื่อนที่ของศีรษะ ในงานวิจัยนี้ใช้ Microstrain 3DM-GX2 ตาม (ภาคผนวก ก) ซึ่งมีฟังก์ชันที่สามารถแสดงค่าของมุม Euler angle ได้ทันที โดยปกติเทคโนโลยี MEMS จะมีอุปกรณ์ตรวจวัดประเภท gyroscope accelerometer และ compass ติดอยู่ในตัวซึ่งต้องผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อหาความสัมพันธ์ของสัญญาณของทั้งสาม จากอุปกรณ์ตรวจวัดดังกล่าวกับ Euler angle แต่ Microstrain 3DM-GX2 มีคำสั่งจัดการแปลงสัญญาณที่วัดได้ให้ส่งสัญญาณเป็นค่าของ Euler angle ทั้งนี้ทำให้ลดขั้นตอนที่ต้องผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ระหว่าง Euler angle กับสัญญาณที่วัดได้ จากนั้นนำค่าของสัญญาณผ่าน เมตริกซ์การหมุน (Rotation matrix) ที่ทางผู้ผลิตกำหนด ดังนี้

$$M_0 = \begin{bmatrix} \cos(\psi)\cos(\theta) & \sin(\psi)\cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \cos(\psi)\sin(\theta)\sin(\phi) - \sin(\psi)\cos(\phi) & \sin(\psi)\sin(\theta)\sin(\phi) + \cos(\psi)\cos(\phi) & \cos(\theta)\sin(\phi) \\ \cos(\psi)\sin(\theta)\cos(\phi) + \sin(\psi)\sin(\phi) & \sin(\psi)\sin(\theta)\cos(\phi) - \cos(\psi)\sin(\phi) & \cos(\theta)\cos(\phi) \end{bmatrix} \tag{5}$$

เมื่อ $Pitch = \theta, Roll = \phi, Yaw = \psi$

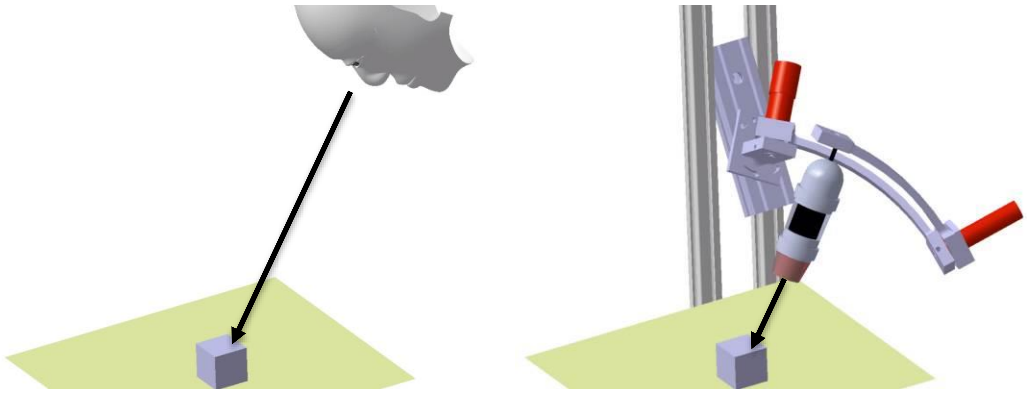
อย่างไรก็ตาม ค่า Euler angle ที่ได้นั้นมีสัญญาณรบกวนที่ส่งผลกระทบกับการควบคุมและถูกจำกัดความถี่ใช้งาน ดังรูปที่ 11 เป็นการทดลองดึงค่า Euler angle ในกรณีที่อุปกรณ์อยู่นิ่ง ซึ่งสมควรได้สัญญาณขาออกเป็นศูนย์ทั้งสามตัวแปร ดังนั้นจึงจำเป็นต้องกรองสัญญาณรบกวน ด้วยตัวกรองสัญญาณที่จะกล่าวถึงในบทถัดไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

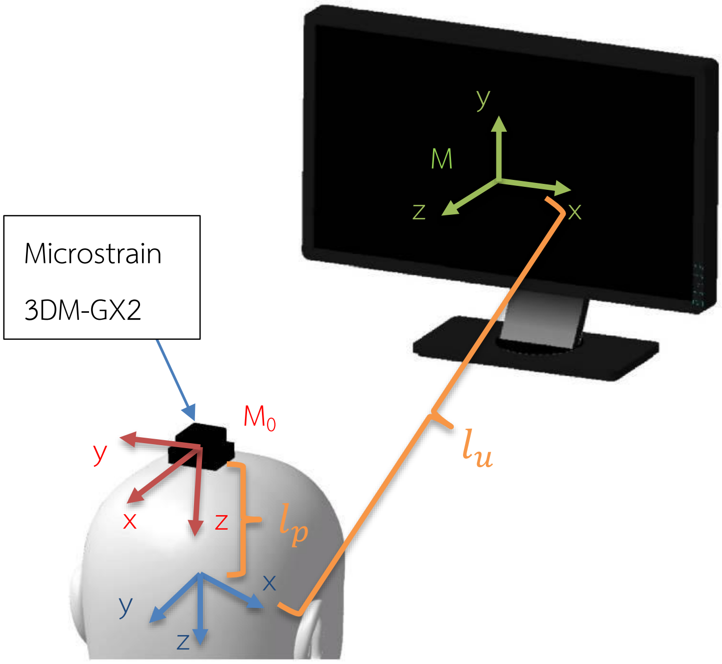


รูปที่ 11 สัญญาณที่ถูกส่งออกจาก Microstrain 3DM-GX2 กรณีอยู่นิ่งไม่เคลื่อนที่ โดยไม่ผ่านโปรแกรมเฉพาะของผลิตภัณฑ์

เมตริกซ์การหมุน ของอุปกรณ์ตรวจวัดนี้จะเป็นตัวแสดงทิศทางของ เฟรม (frame) ของอุปกรณ์ตรวจวัดที่ติดอยู่บนศีรษะ ซึ่งยังไม่สามารถนำค่าที่ได้ไปควบคุมการเคลื่อนที่แขนกลได้โดยตรง จำเป็นต้องสร้างเฟรมอื่นอีกเพื่อสร้างความสัมพันธ์กับแขนกลตาม โดยใช้วัตถุที่ต้องการรับภาพเป็นเกณฑ์ ซึ่งในการออกแบบนี้เสมือนว่า ศีรษะของมนุษย์เป็นตัวแทนของปลายแขนกลตาม ที่สามารถเคลื่อนที่เพื่อเปลี่ยนมุมมองการมองเป้าหมาย กล่าวคือ การขยับศีรษะเข้าหาภาพวัตถุอีกด้านหนึ่งของวัตถุตามรูปที่ 12ก จะเหมือนกับแขนกลตามขยับเพื่อเข้าหาด้านนั้นเช่นกันตามรูปที่ 12ข ดังนั้นถ้าให้ภาพจากจอแสดงผลของคอมพิวเตอร์เป็นตัวแทนของวัตถุนั้น ภาพที่ฉายออกมาจากกล้องที่ติดอยู่บนแขนกลจะต้องฉายภาพวัตถุนั้นในมุมมองเดียวกันกับตำแหน่งของศีรษะมนุษย์ ทำให้เฟรมที่ตั้งอยู่ที่จอแสดงผลของคอมพิวเตอร์เป็นเฟรมเดียวกันกับเฟรมของปลายแขนกลที่ตั้งของจุดศูนย์กลางของการหมุน (Center of Rotation) อย่างไรก็ตาม เนื่องจากไม่สามารถควบคุมระยะระหว่างศีรษะของมนุษย์กับจอแสดงผลของคอมพิวเตอร์และระยะระหว่างอุปกรณ์ตรวจวัดกับสายตาได้หมายความว่าระยะ l_u และ l_p ตามรูปที่ 13 ดังนั้นในงานวิจัยนี้ทราบเฉพาะทิศทางของเฟรมเท่านั้น อนึ่งเฟรมอ้างอิงของ Microstrain 3DM-GX2 ไม่ได้อยู่ในทิศทางเดียวกันกับเฟรมอ้างอิงของแขนกล เพื่อให้สัญญาณมีเฟรมอ้างอิงตัวเดียวกันจึงจำเป็นต้องคูณเมตริกซ์การหมุนในแต่ละแกนเฟรม เพื่อให้ค่าสัญญาณที่ออกจาก Microstrain 3DM-GX2 มีเฟรมอ้างอิงมีทิศทางเดียวกับแขนกลตาม



รูปที่ 12 แสดงลักษณะการเปลี่ยนมุมมองวัตถุระหว่างศีรษะมนุษย์(ก) และ กล้อง(ข)



รูปที่ 13 แสดงการตั้งเฟรมระหว่างอุปกรณ์ตรวจวัดศีรษะกับจอแสดงผลของคอมพิวเตอร์

ด้วยความสัมพันธ์ทั้งหมดนี้จะสามารถสร้างสมการทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ส่งสัญญาณที่แปลงค่าแล้วไปให้แขนกลตามเพื่อการเคลื่อนที่ต่อไป ตามสมการที่ 6 โดยความสัมพันธ์นี้อยู่ในรูปแบบของเมตริกซ์การหมุนที่สามารถคำนวณได้จากเฟรมแต่และเฟรมตามรูปที่ 13 ซึ่งแสดงการตั้งเฟรมระหว่างอุปกรณ์ตรวจวัดศีรษะกับจอแสดงผลของคอมพิวเตอร์

$$M=\begin{bmatrix}\sin(\psi)\sin(\theta)\sin(\phi)+\cos(\psi)\cos(\phi) & \cos(\theta)\sin(\phi) & -\cos(\psi)\sin(\theta)\sin(\phi)+\sin(\psi)\cos(\phi)\\ \sin(\psi)\sin(\theta)\cos(\phi)-\cos(\psi)\sin(\phi) & \cos(\theta)\cos(\phi) & -\cos(\psi)\sin(\theta)\cos(\phi)-\sin(\psi)\sin(\phi)\\ -\sin(\psi)\cos(\theta) & \sin(\theta) & \cos(\psi)\cos(\theta)\end{bmatrix}$$

(6)

โดยเมตริกซ์ M จะเป็นตัวเชื่อมค่าสัญญาณที่ส่งจากอุปกรณ์สวมใส่ศีรษะไปควบคุมแขนกลตามต่อไป

3.2.2 จลศาสตร์ของแขนกลตาม

สำหรับการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ของแขนกล มีความจำเป็นต้องคำนวณตำแหน่งจากแบบจำลองจลศาสตร์ (kinematics) ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็นสองประเภท คือ แบบจำลองจลศาสตร์ไปข้างหน้า (Forward Kinematic) และแบบจำลองจลศาสตร์ไปข้างหลัง (Inverse Kinematic) การคำนวณแบบจำลองจลศาสตร์ไปข้างหลังนั้นเป็นการหาตำแหน่งการหมุนของแต่ละข้อต่อเมื่อกำหนดตำแหน่งของปลายแขน ส่วนการคำนวณของแบบจำลองจลศาสตร์ไปข้างหน้าเป็นการหาตำแหน่งที่ปลายแขน เมื่อกำหนดตำแหน่งของข้อต่อ

ในการหาสมการแบบจำลองจลศาสตร์ของแขนกล กำหนดให้

i = 1, 2 , 3 แทนลำดับของก้านต่อของแขนกล

r แทนระยะจากจุดศูนย์กลางของการหมุน (Center of Rotation) ถึงก้านต่อของแขนกล

a แทนระยะที่ข้อต่อแบบหมุนเของแขนที่ i

d แทนระยะที่ข้อต่อแบบเลื่อนของแขนที่ i

α แทนความยาวก้านต่อของแขนกล

θ แทนระยะการหมุนของข้อต่อของแขนกล

$C_i=\cos(\theta_i)$

$S_i=\sin(\theta_i)$

$C\alpha_i=\cos(\alpha_i)$

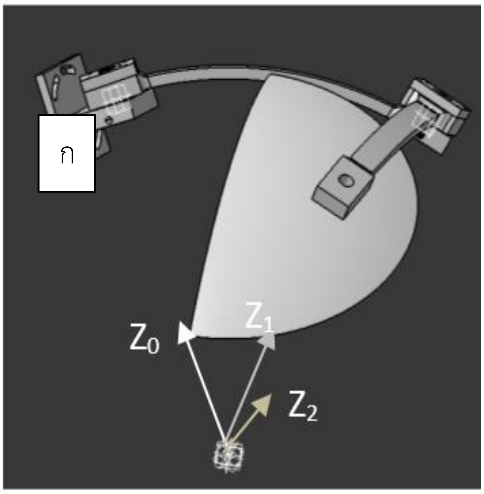
$S\alpha_i=\sin(\alpha_i)$

การหาแบบจำลองจลศาสตร์ ของระบบโดยอาศัย Denavit-Hartenberg Parameters ดังแสดงในตารางที่ 2 โดยกำหนดให้ฐานที่จุด ก. ตามรูปที่ 14 ไม่ได้อยู่ในแนวระดับแต่เกิดจากการหมุนฐานไปตามแกน x มุม ϕ_x และหมุนต่อไปตามแกน y ทำมุม ϕ_y ตามลำดับ

ตารางที่ 2 Denavit-Hartenberg Parameter ของแขนกลพิกัดทรงกลมแบบอนุกรม 2 ก้านต่อ

Link	a_i	α_i	d_i	θ_i
$i = 1$	0	α_1	0	θ_1
$i = 2$	0	$-\alpha_2$	0	θ_2
i = 3	0	0	0	θ_3

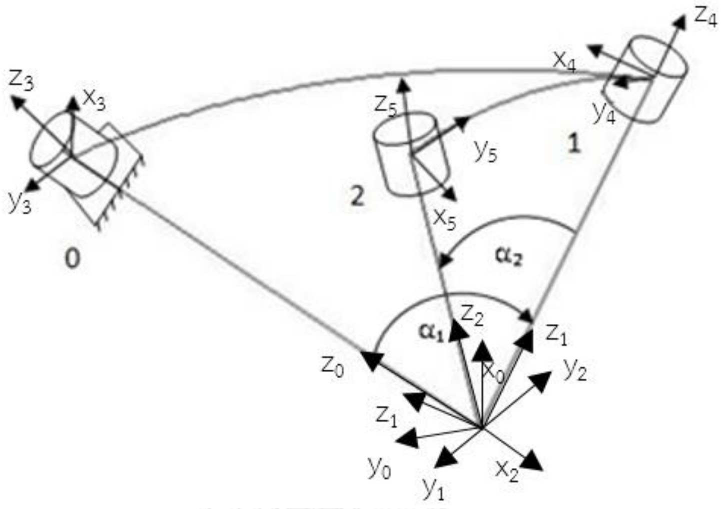
ที่ i = 3 เป็นตำแหน่งปลายแขนที่ต้องการให้กล้องหมุนไปยังตำแหน่งองศาที่ต้องการ สาเหตุที่จำเป็นต้องเพิ่มตัวแปรนี้เข้าไปเพราะ ในทางปฏิบัติภาพที่ส่งให้ผู้ใช้งานไม่ควรหมุนไปตามแนวการเคลื่อนที่ของแขนกลตาม แต่ควรจะอยู่ในแนวระดับอยู่ที่ผู้ใช้งานอยู่เสมอ



รูปที่ 14 แสดงลักษณะแขนกลพิกัดทรงกลมแบบอนุกรม 2 องศาอิสระ(Degree of Freedom)

ในวิธีของ Denavit-Hartenberg การเขียนเฟรม (frame) แต่ละข้อต่อทำให้ผู้ที่จะนำทิศทางของเฟรมไปใช้งานเกิดความสับสน เนื่องจากเฟรมทุกเฟรมมีตำแหน่งเดียวกัน นั่นคือจุดตัดแกน z ดังในรูปที่ 14 คือเฟรม 0 1 และ 2 ทำให้ไม่สะดวกต่อการตรวจสอบทิศทางของเวกเตอร์แกน เมื่อแขนกลเริ่มเคลื่อนที่ ดังนั้นจึงสร้างเฟรมใหม่ให้ติดที่ตำแหน่งข้อต่อแต่ละข้อต่อ คือเฟรม 3 4 และ 5 โดยมีทิศทางเช่นเดียวกับเฟรม 0 1 และ 2 ตามลำดับ

- หมายเหตุ การสร้างเฟรมขึ้นใหม่นี้เพื่อสังเกตการเคลื่อนที่ของแขนกลเท่านั้น เฟรมที่ติดตั้งในสมการและโปรแกรมยังคงใช้หลักการของ Denavit-Hartenberg อยู่ นั่นคือระยะห่างของเฟรมทุกเฟรมยังคงเป็นศูนย์



รูปที่ 15 แสดงเฟรมของแต่ละข้อต่อ

จากรูปที่ 14 และตารางที่ 2 แสดงให้เห็นว่าเมื่อตั้งแกนตามวิธีของ Denavit-Hartenberg จะทำให้แกนทุกแกนของแต่ละข้อต่อตัดกันที่จุดๆเดียวกัน ตามนิยามข้างต้น จึงไม่สามารถหาระยะห่างระหว่างแกนเพื่อกำหนดตำแหน่งในระบบพิกัดคาร์ทีเซียนได้โดยตรง โดยจากตาราง Denavit-Hartenberg สามารถหา Homogeneous Transformation Matrixes ได้ดังนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

$$A_1 = \begin{bmatrix} C_1 & -S_1C\alpha_1 & S_1S\alpha_1 & 0 \\ S_1 & C_1C\alpha_1 & -C_1S\alpha_1 & 0 \\ 0 & S\alpha_1 & C\alpha_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} C_2 & -S_2C\alpha_2 & S_2S\alpha_2 & 0 \\ S_2 & C_2C\alpha_2 & -C_2S\alpha_2 & 0 \\ 0 & S\alpha_2 & C\alpha_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad (7)$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} C_3 & -S_3 & 0 & 0 \\ S_3 & C_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C\alpha_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

และทำให้สามารถหา transformation matrix ที่ปลายแขนได้คือ

$${}_3^0A = A_1A_2A_3 = \begin{bmatrix} a & b & c & 0 \\ d & e & f & 0 \\ g & h & i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
a &= C_3(C_1C_2 - C\alpha_1S_1S_2) - C\alpha_2S_3(C_1S_2 + C\alpha_1S_1C_2) - S\alpha_1S\alpha_2S_1S_3 \\
b &= -S_3(C_1C_2 - C\alpha_1S_1S_2) - C\alpha_2C_3(C_1S_2 + C\alpha_1S_1C_2) - S\alpha_1S\alpha_2S_1C_3 \\
c &= S\alpha_2(C_1S_2 + C\alpha_1S_1C_2) - S\alpha_1C\alpha_2S_1 \\
d &= C_3(S_1C_2 + C\alpha_1C_1S_2) - C\alpha_2S_3(S_1S_2 - C\alpha_1C_1C_2) + S\alpha_1S\alpha_2C_1S_3 \\
e &= -S_3(S_1C_2 + C\alpha_1C_1S_2) - C\alpha_2C_3(S_1S_2 - C\alpha_1C_1C_2) + S\alpha_1S\alpha_2C_1C_3 \\
f &= S\alpha_2(S_1S_2 - C\alpha_1C_1C_2) + S\alpha_1C\alpha_2C_1 \\
g &= C\alpha_1S\alpha_2S_3 - S\alpha_1S_2C_3 - S\alpha_1C\alpha_2C_2S_3 \\
h &= C\alpha_1S\alpha_2C_3 + S\alpha_1S_2S_3 - S\alpha_1C\alpha_2C_2C_3 \\
i &= C\alpha_1C\alpha_2 + S\alpha_1S\alpha_2C_2
\end{aligned} \qquad (8)$$

สังเกตจากสมการที่ 8 เห็นว่าตำแหน่งหลักที่ 4 ของ Homogeneous Transformation Matrixes นับจากแถวที่ 1 ถึงแถวที่ 3 ซึ่งเป็นเมตริกซ์บอกตำแหน่งของปลายแขน x y z ตามลำดับในระบบพิกัดคาร์ทีเซียน มีค่าเป็นศูนย์ทั้งหมด ทำให้ไม่สามารถหาตำแหน่งของปลายแขนจากหลักที่ 4 นี้ได้ แต่เมื่อพิจารณาหลักที่ 1 ถึง 3 ที่มาจากเมตริกซ์การหมุน (rotation matrix) ที่แสดงอยู่ในรูปของเวกเตอร์หนึ่งหน่วยของแกน x y z ตามลำดับ เป็นฟังก์ชันของตำแหน่งการหมุนของข้อต่อต่างๆ และตามข้อกำหนดของ Denavit-Hartenberg เวกเตอร์แกน z จะต้องชี้ผ่านแนวข้อต่อเสมอ จึง

สามารถใช้เวกเตอร์หนึ่งหน่วยของแกน z หาตำแหน่งปลายแขน (ตำแหน่งที่ 2 ตามรูปที่ 15) ได้แทน อย่างไรก็ตาม เวกเตอร์นี้เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วย ทำให้ไม่สามารถใช้แทนตำแหน่งปลายแขนในระบบพิกัดคาร์ทีเซียนได้ทันที เนื่องจากระยะห่างของปลายแขนกับจุดตัดไม่เท่ากับหนึ่งตามขนาดของเวกเตอร์ จึงต้องคูณรัศมี r ซึ่งก็คือระยะจากจุดศูนย์กลางของการหมุนถึงก้านต่อของแขนกล เพื่อให้อยู่ในตำแหน่งที่ถูกต้องในระบบพิกัดคาร์ทีเซียน

ดังนั้นจะสามารถหาแบบจำลองของจลศาสตร์ไปข้างหน้า (Forward Kinematic) ได้คือ

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = r \begin{bmatrix} S\alpha_2(C_1S_2 + C\alpha_1S_1C_2) - S\alpha_1C\alpha_2S_1 \\ S\alpha_2(S_1S_2 - C\alpha_1C_1C_2) + S\alpha_1C\alpha_2C_1 \\ C\alpha_1C\alpha_2 + S\alpha_1S\alpha_2C_2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

สำหรับการหาคำตอบของจลศาสตร์ไปข้างหลัง (Inverse Kinematic) จำเป็นต้องใช้ความสัมพันธ์กับค่าที่ตรวจวัดได้จากอุปกรณ์ตรวจวัดศีรษะ หรือสัญญาณขาเข้า จากรูปที่ 14 ฐานที่จุด ก. ที่ไม่ได้อยู่ในแนวระดับ สามารถเขียน transformation matrix ดังนี้

กำหนด $\boldsymbol{R}_0$ เป็น rotation matrix ที่อธิบายความสัมพันธ์ฐานที่จุด ก. กับแนวระดับ ได้คือ

$$\mathrm{R}_0 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\phi_x) & -\sin(\phi_x) \\ 0 & \sin(\phi_x) & \cos(\phi_x) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos(\phi_y) & 0 & -\sin(\phi_y) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\phi_y) & 0 & \cos(\phi_y) \end{bmatrix} \quad (10)$$

จากสมการที่ 6 ได้เมตริกซ์การหมุน (rotation matrix) ที่ได้จากสัญญาณของอุปกรณ์ตรวจวัด $\boldsymbol{M}$ ที่แปลงให้อยู่ในแกนอ้างอิงเดียวกันแล้ว จะสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่าง จลศาสตร์ไปข้างหน้าในระบบพิกัดคาร์ทีเซียน ผ่านเมตริกซ์การหมุน $\boldsymbol{R}_0$ คือ

$$\boldsymbol{T} = \boldsymbol{R}_0^T \times \boldsymbol{M} \quad (11)$$

และจากสมการที่ 8 ให้ $T = {}^3_0A$ ทำให้ได้ความสัมพันธ์กับ Transformation matrix คือ

$$\begin{aligned} T_{13} &= S\alpha_2(C_1S_2 + C\alpha_1S_1C_2) - S\alpha_1C\alpha_2S_1 \\ T_{23} &= S\alpha_2(S_1S_2 - C\alpha_1C_1C_2) + S\alpha_1C\alpha_2C_1 \\ T_{31} &= C\alpha_1S\alpha_2S_3 - S\alpha_1S_2C_3 - S\alpha_1C\alpha_2C_2S_3 \\ T_{32} &= C\alpha_1S\alpha_2C_3 + S\alpha_1S_2S_3 - S\alpha_1C\alpha_2C_2C_3 \\ T_{33} &= C\alpha_1C\alpha_2 + S\alpha_1S\alpha_2C_2 \end{aligned} \quad (12)$$

สังเกตจาก 5 สมการข้างต้น หรือสมการที่ 12 นี้จะมีตัวแปรอยู่ 3 ตัวคือ $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ อยู่ในรูปแบบสมการไม่เชิงเส้น แต่สามารถหา θ_2 ได้ใน 1 สมการ จึงเหลือ 4 สมการ 2 ตัวแปร จึงกำหนดตัวแปรใหม่คือให้ sin ของมุมเป็น 1 ตัวแปรและ cos ของมุมเป็นอีก 1 ตัวแปร ทำให้ได้ 4 สมการ 4 ตัวแปรและเปลี่ยนเป็นสมการเชิงเส้น จึงหาคำตอบของ $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ ได้ดังนี้

$$C_2 = \frac{T_{33} - C\alpha_1 C\alpha_2}{S\alpha_1 S\alpha_2} \quad (13)$$

จากสมการที่ 13 จะสังเกตได้ว่าในตำแหน่งหนึ่งๆ จะมีค่ามุมของการหมุนของข้อต่อที่สองได้สองมุม หมายถึงว่าในแต่ละตำแหน่ง แขนกลสามารถเข้าได้สองทิศทางตามสมการ $S_2 = \pm\sqrt{1 - C_2^{\,2}}$ จึงกำหนดให้เป็นทิศทางเดียว โดยกำหนดค่า sin ให้เป็นบวกเท่านั้น ทำให้หาค่ามุมของข้อต่อได้คือ

$$\theta_2 = atan2(S_2, C_2) \quad (14)$$

หลังจากได้ ตำแหน่งการเคลื่อนที่ของการหมุนของข้อต่อที่สองมาแล้ว สามารถนำตำแหน่งนี้เพื่อนำไปหาตำแหน่งของข้อต่ออื่นๆจากสมการที่ 12 และ 14 คือ

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ C_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C\alpha_1 S\alpha_2 C_2 - S\alpha_1 C\alpha_2 & S\alpha_2 S_2 \\ S\alpha_2 S_2 & S\alpha_1 C\alpha_2 - C\alpha_1 S\alpha_2 C_2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} T_{13} \\ T_{23} \end{bmatrix} \quad (15)$$
$$\theta_1 = atan2(S_1, C_1)$$

$$\begin{bmatrix} S_3 \\ C_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C\alpha_1 S\alpha_2 - S\alpha_1 C\alpha_2 C_2 & -S\alpha_1 S_2 \\ S\alpha_1 S_2 & C\alpha_1 S\alpha_2 - S\alpha_1 C\alpha_2 C_2 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} T_{31} \\ T_{32} \end{bmatrix} \quad (16)$$
$$\theta_3 = atan2(S_3, C_3)$$

หลังจากได้แบบจำลองจลศาสตร์มาแล้ว สามารถนำแบบจำลองนี้เป็นข้อกำหนดในการหาขนาดของแขนกลได้ คือ ใช้แบบจำลอง สมการที่ 9 และ 10 หาค่า $\alpha_1, \alpha_2, \phi_x, \phi_y$ โดยจำลองการเคลื่อนที่รูปแบบต่างๆ 4 รูปแบบ เพื่อหาค่า dexterity ดังปรากฏในบทความ [16] ซึ่งได้ผลออกมาคือหลังจากการจำลองการเคลื่อนที่ ค่ามุม α_1, α_2 ตามรูปที่ 15 ที่ให้ค่า dexterity สูงเพียงพอให้ประสิทธิภาพแขนกลเคลื่อนที่อย่างราบเรียบคือ α_1 = 55 องศา α_2 =45 องศา และมีมุมทำกับแกนฐาน x และ y (ϕ_x, ϕ_y) คือ 40 องศา และ 10 องศา ตามลำดับ โดยกำหนด r เท่ากับ 20 เซนติเมตร

3.3 แบบจำลองพลศาสตร์ (Dynamic)

การหาสมการพลศาสตร์ของแขนกลมีอยู่หลายวิธี ในระบบอย่างง่าย การใช้กฎของนิวตันแก้ปัญหาสมการจะเป็นวิธีที่รวดเร็ว ส่วนระบบที่มีอันดับสูงขึ้นไป การใช้ลากรานจ์ [17] จะแก้ปัญหาได้รวดเร็วกว่าการใช้กฎของนิวตัน ในที่นี้จึงใช้ลากรานจ์ในการแก้ปัญหา เพื่อหาสมการพลศาสตร์

สมการลากรานจ์ใช้อธิบายการเคลื่อนที่ของระบบทางกลในรูปแบบของสมการเชิงอนุพันธ์ ในรูปของพลังงาน ซึ่งแบ่งเป็นพลังงานจลน์และพลังงานศักย์ โดยมีจำนวนพิกัด(coordinate) ตามอันดับของระบบ เนื่องจากไม่มีการสูญเสียพลังงานของระบบ จึงใช้แบบจำลองของระบบคงพลังงาน (conservative system) ดังนี้

$$\frac{d}{dt}\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_i} - \frac{\partial L}{\partial \theta_i} = Q_i \tag{17}$$

โดย L คือ ลากรานเจียน (Lagrangian) $= T - V$

T คือ พลังงานจลน์รวมของระบบ (total kinetic energy of the system)

V คือ พลังงานศักดิ์รวมของระบบ (total potential energy)

θ คือ ระบบพิกัด(generalized coordinate system)

Q คือ แรงในระบบพิกัดที่สนใจ (generalized force)

i คือ อันดับของระบบ (system order)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

การหาพลังงานจลน์สามารถแบ่งออกเป็น 3 กรณีคือ

1. พลังงานจลน์ที่เกิดจากความเร็วเชิงเส้น
2. พลังงานจลน์ที่เกิดจากความเร็วเชิงมุม
3. พลังงานจลน์ที่เกิดจากความเฉื่อยและเฟืองทดของมอเตอร์

จึงสามารถเขียนได้ในรูป

$$T = \frac{1}{2}m(v)^2 + \frac{1}{2}I(\omega)^2 + \frac{1}{2}I_M(k\dot{\theta})^2 \tag{18}$$

โดย m คือ มวลของวัตถุ

v คือ ความเร็วเชิงเส้น

I คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของแขนหุ่นยนต์เทียบกับจุดกึ่งกลางมวล

ω คือ ความเร็วเชิงมุม

I_M คือ โมเมนต์ความเฉื่อยเทียบกับแกนหมุนของมอเตอร์

k คือ อัตราส่วนเฟืองทด

$\dot{\theta}$ คือ ความเร็วเชิงมุมของมอเตอร์

การหาพลังงานศักย์ ในระบบนี้มีเพียงพลังงานศักย์อันเนื่องมาจากแรงโน้มถ่วงของโลกของแต่ละก้านต่อเท่านั้น จะได้สมการคือ

$$V = \sum_{i=1}^{n} V_i \tag{19}$$

กำหนดให้ก้านต่อทั้งหมดในระบบเป็นวัตถุแข็งเกร็ง ดังนั้นพลังงานศักย์ที่เกิดขึ้นจากแรงโน้มถ่วงของโลกคือ

$$V_i = \int g^T r_i dm = g^T \int r_i dm = g^T r_{ci} m_i \tag{20}$$

โดย g คือ เวกเตอร์ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก

r_{ci} คือ เวกเตอร์ที่ชี้เข้าสู่จุดศูนย์กลางมวลของแต่ละก้านต่อ

เมื่อแทนค่าตัวแปรต่างๆ ในสมการพลังงานจลน์และสมการพลังงานศักย์ของแขนกลแล้ว เราสามารถคำนวณหา Lagrangian ของก้านต่อโยงได้จากสมการ

$$L = T - V \tag{21}$$

หลังจากแทนค่าตัวแปรในสมการที่ 17 18 20 และ 21 จะสามารถหาคำตอบของสมการโดยเขียนในรูปแบบสมการการเคลื่อนที่ทั่วไปตามสมการที่ 22 โดยให้ $Q = \tau$ ได้ดังนี้

$$B(\theta)\ddot{\theta} + C\left(\theta,\dot{\theta}\right)\dot{\theta} + G(\theta) = \tau \tag{22}$$

โดย $B(\theta)$ คือ มวลที่พิกัดที่สนใจ

$C\left(\theta,\dot{\theta}\right)$ คือ แรงคอริออลิสและแรงเข้าหาศูนย์กลาง

$G(\theta)$ คือ แรงเนื่องจากแรงโน้มถ่วง

เมื่อตั้งค่า $\theta = \begin{Bmatrix}\theta_1 \\ \theta_2\end{Bmatrix}$ จะสามารถจัดให้อยู่ในรูปสมการการเคลื่อนที่ทั่วไป ทำให้ เมตริกซ์ $B(\theta)$ และ $C\left(\theta,\dot{\theta}\right)$ มีขนาด 2x2 ส่วน $G(\theta)$ มีขนาด 2x1

พิจารณา $B(\theta)$ โดยกำหนด

$$B(\theta) = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}$$

จัดรูปสมการข้างต้นจะสามารถหาค่า $B(\theta)$ ได้ดังนี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

$$\begin{aligned} a_{11} = {} & I_1 + I_2 + I_{M1}(k_1)^2 + m_1\left(rA\right)^2 \\ & + m_2 r^2\left((\mathrm{S}\alpha_1)^2 + (\mathrm{S}\frac{\alpha_2}{2})^2 - (\mathrm{S}\alpha_1)^2(\mathrm{S}\frac{\alpha_2}{2})^2\left(C_2{}^2 + 1\right) - \mathrm{S}\alpha_1\mathrm{C}\alpha_1\mathrm{S}\alpha_2 C_2 \right) \end{aligned}$$

$$a_{12} = UI_2 + m_2 r^2\left(\mathrm{C}\alpha_1(\mathrm{S}\frac{\alpha_2}{2})^2 - \frac{1}{2}\mathrm{S}\alpha_1\mathrm{S}\alpha_2 C_2 \right)$$

$$a_{21} = UI_2 + m_2 r^2\left(\mathrm{C}\alpha_1(\mathrm{S}\frac{\alpha_2}{2})^2 - \frac{1}{2}\mathrm{S}\alpha_1\mathrm{S}\alpha_2 C_2 \right)$$

$$a_{22} = I_2 + I_{M2}(k_2)^2 + m_2 r^2(\mathrm{S}\frac{\alpha_2}{2})^2$$

พิจารณา $C\left(\theta,\dot{\theta}\right)$ โดยกำหนด

$$C\left(\theta,\dot{\theta}\right) = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix}$$

จัดรูปสมการข้างต้นจะสามารถหาค่า $C\left(\theta,\dot{\theta}\right)$ ได้ดังนี้

$$b_{11} = m_2 r^2 \dot{\theta}_2 \left(2(\mathrm{S}\alpha_1)^2 (\mathrm{S}\frac{\alpha_2}{2})^2 S_2 C_2 + \mathrm{S}\alpha_1 \mathrm{C}\alpha_1 \mathrm{S}\alpha_2 S_2 \right)$$

$$b_{12} = m_2 r^2 \left(\frac{1}{2} \mathrm{S}\alpha_1 \mathrm{S}\alpha_2 S_2 \dot{\theta}_2 \right)$$

$$b_{21} = -m_2 r^2 S_2 \left(\frac{1}{2} \mathrm{S}\alpha_1 \mathrm{C}\alpha_1 \mathrm{S}\alpha_2 + (\mathrm{S}\alpha_1)^2 (\mathrm{S}\frac{\alpha_2}{2})^2 C_2 \right) \dot{\theta}_1$$

$$b_{22} = 0$$

พิจารณา $G\left(\theta\right)$ โดยกำหนด

$$G(\theta) = \begin{Bmatrix} c_1 \\ c_2 \end{Bmatrix}$$

จัดรูปสมการข้างต้นจะสามารถหาค่า $G\left(\theta\right)$ ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} c_1 = {} & m_1 g r \mathrm{S}\frac{\alpha_1}{2} (\mathrm{C}\phi_x \mathrm{S}\phi_y C_1 - \mathrm{S}\phi_x S_1) \\ & + m_2 g r \left(\begin{array}{l} \mathrm{S}\phi_x \left(\mathrm{S}\frac{\alpha_2}{2} \left(\mathrm{C}\alpha_1 S_1 C_2 + C_1 S_2 \right) - \mathrm{S}\alpha_1 \mathrm{C}\frac{\alpha_2}{2} S_1 \right) \\ + \mathrm{C}\phi_x \mathrm{S}\phi_y \left(\mathrm{S}\frac{\alpha_2}{2} \left(-\mathrm{C}\alpha_1 C_1 C_2 + S_1 S_2 \right) + \mathrm{S}\alpha_1 \mathrm{C}\frac{\alpha_2}{2} C_1 \right) \end{array} \right) \end{aligned}$$

$$c_2 = m_2 g r \left(\begin{array}{l} \mathrm{C}\phi_x \mathrm{S}\phi_y \left(\mathrm{S}\frac{\alpha_2}{2} \left(\mathrm{C}\alpha_1 S_1 S_2 - C_1 C_2 \right) \right) \\ + \mathrm{S}\phi_x \left(\mathrm{S}\frac{\alpha_2}{2} \left(\mathrm{C}\alpha_1 C_1 S_2 + S_1 C_2 \right) \right) - \mathrm{C}\phi_x \mathrm{C}\phi_y \left(\mathrm{S}\alpha_1 \mathrm{S}\frac{\alpha_2}{2} C_2 \right) \end{array} \right)$$

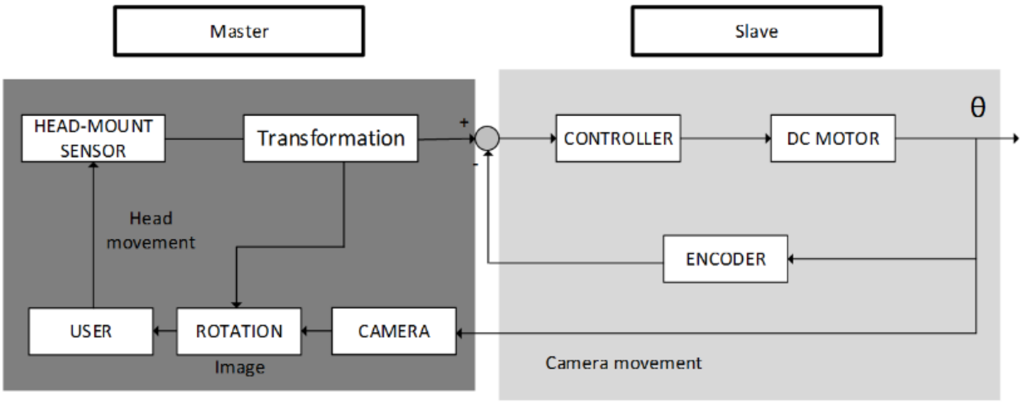
บทที่ 4
การควบคุม

การควบคุมแขนกลตามให้สามารถเคลื่อนที่ตามอุปกรณ์ตรวจวัดที่ติดบนศีรษะ ต้องอาศัยข้อมูลสัญญาณของตำแหน่งและทิศทางที่วัดได้จากอุปกรณ์ตรวจวัดที่ติดบนศีรษะ มาแปลงเป็นคำสั่งควบคุมแขนกลตามให้เคลื่อนที่ ตามแบบจำลองที่ได้กล่าวมา

การควบคุมระบบหุ่นยนต์ตามแบ่งออกเป็น 2 กรณีคือ การควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกลโดยควบคุมการเคลื่อนที่จากมอเตอร์ และการควบคุมการหมุนภาพจากกล้อง

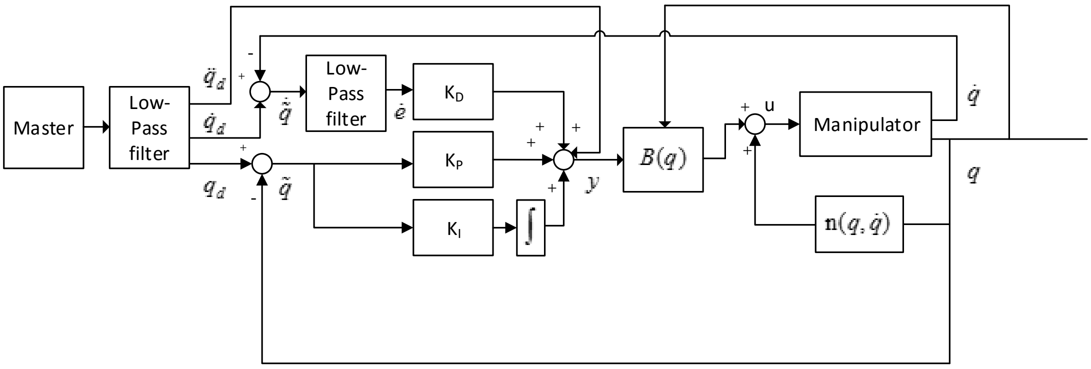
การควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกลโดยควบคุมการเคลื่อนที่จากมอเตอร์ มีขั้นตอนการทำงาน เริ่มจากกล้องถ่ายภาพเป้าหมาย ภาพจะถูกส่งให้ผู้ใช้งาน ผู้ใช้งานเป็นผู้กำหนดให้แขนกลเคลื่อนที่ผ่านการเคลื่อนที่ของศีรษะ โดยใช้สัญญาณที่ส่งออกจากอุปกรณ์ตรวจวัดที่สวมใส่บนศีรษะส่งเข้าไปคำนวณในสมการจลศาสตร์ เพื่อเปลี่ยนแปลงตำแหน่งที่ได้ให้เป็นการเคลื่อนที่เชิงมุมแล้วส่งไปบังคับให้มอเตอร์ที่ติดอยู่บนแขนกลเคลื่อนที่ในหน่วยเรเดียน ส่วนการควบคุมการหมุนภาพไม่จำเป็นต้องผ่านระบบควบคุม เพราะไม่จำเป็นต้องหมุนกล้องจริง เพียงแค่รับสัญญาณตำแหน่งจากสมการจลศาสตร์ที่คำนวณได้ไปหมุนภาพที่ได้รับจากกล้องเท่านั้น แล้วส่งคำสั่งไปยังซอฟแวร์เฉพาะ (ภาคผนวก ข) ที่ใช้ในการหมุนภาพ ทั้งนี้ภาพที่ได้มาเป็นภาพทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า การหมุนภาพจึงจำเป็นต้องตัดภาพให้เหลือพื้นที่เป็นวงกลมแล้วหมุนภาพวงกลมนั้นจากจุดศูนย์กลางวงกลมเพื่อให้ผู้ใช้งานไม่สังเกตว่าภาพถูกสั่งให้หมุน

จากแผนภาพระบบควบคุมแบ่งได้ 2 ส่วนคือ ระบบฝั่งหุ่นยนต์นำ และระบบฝั่งหุ่นยนต์ตามหรือส่วนควบคุมการเคลื่อนที่มอเตอร์ของแขนกล ในระบบฝั่งหุ่นยนต์นำทำหน้าที่ส่งสัญญาณของผู้ใช้งานเข้าระบบฝั่งหุ่นยนต์ตามโดยให้ผู้ใช้งานจะทำหน้าที่แทนระบบควบคุมโดยรับข้อมูลขาเข้าคือภาพที่ได้จากกล้อง จากนั้นประมวลผล และขยับศีรษะเพื่อส่งสัญญาณผ่านอุปกรณ์ตรวจวัดออกไป



รูปที่ 16 แผนภาพการควบคุมการเคลื่อนที่ของอุปกรณ์

ตามที่กล่าวไว้ข้างต้นแขนกลประกอบด้วยแกนหมุนจากข้อต่อจำนวน 2 แกน และแกนหมุนจากการหมุนภาพจำนวน 1 แกน สำหรับการควบคุมแนวการมองเห็นสามารถทำได้โดยการควบคุมทิศทางของการหมุนของทั้งสามแกนนี้ แต่เนื่องจากในทุกระบบจะมีสิ่งรบกวนที่มาจากภายนอกอยู่หลายประการที่จะส่งผลกระทบต่อการการควบคุม ตัวระบบของแขนกลเองเป็นสมการไม่เชิงเส้นและการหาแบบจำลองที่แม่นยำทำได้ยาก อีกทั้งต้องการให้ภาพที่ส่งให้ผู้ใช้งาน ถ่ายทอดออกมาด้วยลักษณะที่ราบรื่น ดังนั้นจำเป็นต้องมีระบบควบคุมที่มีประสิทธิภาพเข้าควบคุมให้เคลื่อนที่อย่างที่ต้องการ ในการทดลองจึงได้ใช้ตัวควบคุมแบบ inverse dynamics ในการควบคุมการหมุนของมอเตอร์ ประกอบกับตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน (low-pass filter) ดังแสดงในรูปที่ 17 โดยรับสัญญาณขาเข้าจากอุปกรณ์สวมใส่ศีรษะ (Master) เฉพาะ q_d เท่านั้น ส่วน $\dot{q}_d, \ddot{q}_d$ เกิดจากการใช้วิธีการเชิงตัวเลขโดยการหาผลต่างต่อเวลาของ $q_d, \dot{q}_d$ ตามลำดับ ซึ่งหลังจากผ่านตัวกรองแล้ว $\dot{q}_d$ มีความราบเรียบเพียงพอที่จะใช้คำนวณหา $\ddot{q}_d$ ได้



รูปที่ 17 แผนภาพการควบคุมข้อต่อของแขนกลตาม

4.1 ตัวควบคุมแบบ Inverse Dynamics Control

จากระบบสมการการเคลื่อนที่ของแขนกลที่กล่าวมาแล้วข้างต้นในสมการที่ 22 เพื่อควบคุมเส้นทางการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลไปยังทิศทางที่ต้องการ จำเป็นต้องควบคุมการหมุนของแต่ละข้อต่อผ่านตัวขับหรือมอเตอร์แต่ละตัว ให้สามารถเคลื่อนที่ไปตามตำแหน่งที่ระบุ โดยผ่านแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งแบบจำลองของระบบนี้เป็นระบบสมการไม่เชิงเส้นและเป็นระบบควบคุมหลายตัวแปร อีกทั้งในทางปฏิบัติการหาค่าของสมการแบบจำลองอาจไม่ถูกต้องแม่นยำ ไม่เพียงแบบจำลองที่ไม่ถูกต้องเท่านั้นยังมีตัวแปรที่ไม่สามารถหาค่าได้อีกเช่น แรงเสียดทาน ความเฉื่อย (inertia) และแรงดึงของสายไฟที่เปลี่ยนไปตามลักษณะรูปร่างและมีผลอย่างมาก ดังนั้นจึงใช้เทคนิคการควบคุมแบบ inverse dynamics control เพื่อชดเชยระบบให้มากที่สุด โดยมีฟังก์ชันของตัวแปรสเตตที่มีสมการขาเข้าระบบคือ

$$\tau = B(q)y + \mathbf{C}(q,\dot{q})\dot{q} + G(q) \tag{23}$$

กำหนดให้ $\mathrm{n}(q,\dot{q}) = \mathbf{C}(q,\dot{q})\dot{q} + G(q)$

แทนค่าสมการขาเข้านี้ลงในสมการที่ 22 ได้

$$\ddot{q} = y \tag{24}$$

y คือเวกเตอร์ขาเข้าใหม่ หลังจากใช้วิธี inverse dynamic ทำให้ระบบสมการที่เข้าควบคุมแบบจำลองเป็นเชิงเส้น คือ

$$y = \ddot{q}_d + K_p\left(q_d - q\right) + K_D\dot{e} + K_I\int_0^t \left(q_d - q\right)dt \tag{25}$$

$\dot{e}$ เกิดจากค่าความผิดพลาดที่ผ่านตัวกรองต่ำผ่าน (low-pass filter) ซึ่งสามารถเขียนความสัมพันธ์ให้อยู่ในรูปการแปลงลาปลาซได้คือ

$$\frac{\dot{e}}{\dot{q}_d - q} = \frac{1}{\tau s + 1} \tag{26}$$

$q_d, \dot{q}_d, \ddot{q}_d$ คือ สัญญาณคำสั่งที่กำหนดค่าแล้วในรูปแบบของระยะการเคลื่อนที่ ความเร็วของการเคลื่อนที่ และความเร่งของการเคลื่อนที่ จากสมการที่ 25 และ 26 สามารถเขียนอยู่ในรูปของสมการเชิงอนุพันธ์ได้อีกรูปแบบหนึ่งคือ

$$\ddot{\tilde{q}} + K_D\dot{e} + K_P\tilde{q} + K_I\int_o^t \tilde{q}dt = 0 \qquad (27)$$

$\tilde{q}$ คือความผิดพลาดของการเคลื่อนที่ กล่าวคือ $\tilde{q} = q_d - q$

การตั้งค่าเกนของตัวควบคุม มุ่งเน้นเพื่อให้แขนกลมีตำแหน่ง ความเร็วและความเร่งใกล้เคียงที่ต้องการ โดยกำหนดความเร็วของการตอบสนองใน ส่วนสัญญาณควบคุมนั้นสามารถคำนวณในรูปแบบเวลาจริงโดยใช้พื้นฐานของสมการของแบบจำลองทั้งจลศาสตร์และพลศาสตร์ดังข้างต้น ในทางปฏิบัติจำเป็นต้องกำหนดคาบเวลาที่ใช้ในการหาคำตอบของสมการเชิงอนุพันธ์ เนื่องจากตัวควบคุมซึ่งก็คือคอมพิวเตอร์ทำงานในระบบเวลาไม่ต่อเนื่อง (discrete time) โดยกำหนดให้มีความถี่ที่ 250 Hz

4.2 ตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน (low-pass filter)

ตัวกรองความถี่ต่ำผ่านเป็นตัวกรองที่ตัดสัญญาณที่มีความถี่สูงกว่าความถี่คัตออฟ (cutoff frequency) และคงค่าสัญญาณที่มีความถี่ต่ำกว่า ซึ่งตรงกันข้ามกับตัวกรองความถี่สูงผ่าน โดยรูปแบบการกรองจะขึ้นอยู่กับการออกแบบตัวกรองนั้นๆ ตัวกรองชนิดนี้ถูกใช้เป็นประจำเช่น ระบบแอนะล็อกปรากฏอยู่ในตัวกรองอิเล็กโทรนิกส์ของสัญญาณเสียง ระบบดิจิทัลใช้ในการกรองข้อมูล ปรับลักษณะภาพ เป็นต้น ในกรณีของระบบนี้ ตัววัดสัญญาณจากอุปกรณ์ตรวจวัดที่ศีรษะ มีสัญญาณรบกวน ตัวกรองความถี่ต่ำผ่านถือเป็นตัวเลือกที่ดีที่จะตัดสัญญาณรบกวนออกไป

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

โดยปกติตัวกรองความถี่ต่ำอันดับหนึ่ง (first-order filter) จะเป็นที่นิยมใช้กันและสร้างได้ง่ายที่สุด ทั้งระบบแอนะล็อกที่อยู่ในรูปของวงจรไฟฟ้าและระบบดิจิทัล ตัวกรองความถี่สามารถเขียนผลการแปลงลาปลาซ (Laplace Transform) สำหรับเวลาต่อเนื่อง (Continuous-time) โดยสัญญาณขาเข้าเป็น ฟังก์ชันอิมพัลส์ (impulse response) ทำให้ฟังก์ชันถ่ายโอน (Transfer Function) คือ

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} \qquad (28)$$

โดย τ คือ ค่าคงที่เวลา (time constant)

K คือ ค่าเกนของตัวกรอง

ในกรณีของเวลาไม่ต่อเนื่อง (discrete time) หาได้จากการหาฟังก์ชันถ่ายโอนแบบเวลาต่อเนื่อง ในรูปแบบของ การแปลงแซด(z-transform) ได้โดยการใช้วิธีอินทิเกรตเชิงตัวเลข หรือการใช้โพล-ซีโรแม็ปปิง หรือการใช้การคงค่าเทียบเท่า ซึ่งต้องมีความสัมพันธ์กับคาบเวลา (time constant) โดยจำเป็นต้องนำคาบเวลาของการสุ่มค่าของอุปกรณ์ตรวจวัดนำมาพิจารณาเป็นหลักในการตั้งคาบเวลาของฟังก์ชันถ่ายโอนนี้

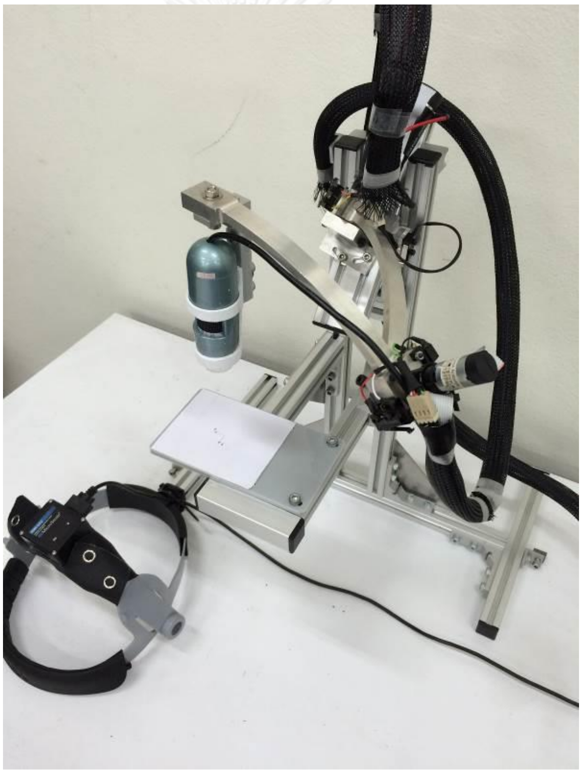
4.3 อุปกรณ์และระบบควบคุมของแขนกลตาม

ระบบควบคุมที่ใช้ควบคุมตำแหน่งของแขนกลตามคือระบบควบคุม inverse dynamic control ส่วนอุปกรณ์ที่ใช้รับค่ามุมการหมุนของมอเตอร์จากอุปกรณ์วัดมุมและอุปกรณ์ที่ใช้ส่งข้อมูลไปยังตัวขยายสัญญาณที่ใช้ในการส่งกระแสไฟฟ้าเพื่อควบคุมมอเตอร์คือ SENSORAY 626 ที่สามารถรับค่าสัญญาณจากอุปกรณ์วัดมุม ได้ 6 ตัว และสามารถส่งสัญญาณไปยังตัวขยายสัญญาณได้ 4 ตัว ในงานวิจัยนี้ใช้ SENSORAY 626 จำนวน 1 ชุด เพื่อรับค่าสัญญาณจากอุปกรณ์วัดมุม 2 ตัว และส่งข้อมูลไปยังตัวขยายสัญญาณ 2 ตัว เพื่อให้กำลังมอเตอร์ขับเคลื่อนกล้องอัตราขยายสูง dino lite ซึ่งมีอัตราเฟรม 30 fps ด้วยขนาดภาพ 640x480 pixel โดยสัญญาณที่ใช้ควบคุมแขนกลจะถูกคำนวณและส่งไปที่ตัวควบคุมทุกๆ 4 มิลลิวินาที หรือเท่ากับอัตราความเร็วในการสุ่ม (sampling frequency) เท่ากับ 250 Hz โดยประมวลผลผ่านคอมพิวเตอร์แบบตั้งโต๊ะด้วยโปรแกรมที่เขียนขึ้นจาก Visual Studio C++ ทั้งนี้ อัตราความเร็วในการสุ่มไม่สามารถเพิ่มมากกว่านี้ได้เนื่องจากอัตราความเร็วในการสุ่มของอุปกรณ์ตรวจวัดการเคลื่อนที่ของศีรษะ Microstrain 3DM-GX2 ถูกจำกัดตามการกรองด้วยตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน (ภาคผนวก ก)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 5
การทดลอง

ในการทดลองระบบควบคุมที่ออกแบบไว้ จะทดลองกับโครงสร้างที่ถูกสร้างขึ้นดังรูปที่ 18 ประกอบไปด้วยอุปกรณ์สวมใส่ศีรษะที่ติด Microstrain 3DM-GX2 และแขนกลพิกัดทรงกลมแบบอนุกรมที่ติดกล้องอัตราขยายสูงไว้ที่ปลายแขน โดยใช้อลูมิเนียมเป็นโครงสร้างของแขนกล แล้วยึดโครงสร้างของแขนกลเข้ากับฐานที่ประกอบจากอลูมิเนียมโปรไฟล์ และทำการทดลองในห้องปฏิบัติการ สำหรับการควบคุมใช้ชุดคอมพิวเตอร์แบบตั้งโต๊ะเป็นตัวประมวลผลรับสัญญาณการเคลื่อนที่ของศีรษะและนำไปควบคุมแขนกล



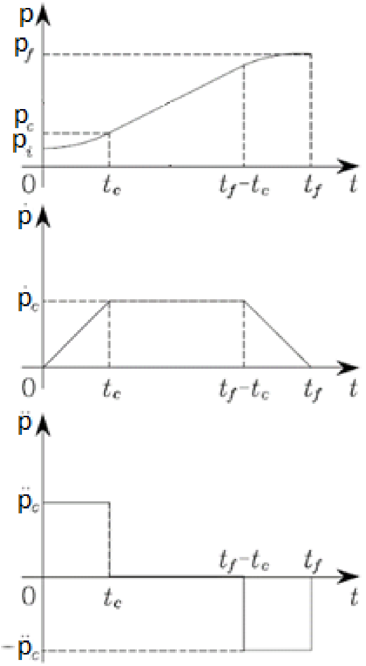
รูปที่ 18 แสดงอุปกรณ์สวมใส่ศีรษะและแขนกลที่ใช้ในการทดลอง

ในการทดลองนี้แบ่งเป็นสองกรณีคือ สำรวจว่าแขนกลเคลื่อนที่ไปในตำแหน่งและทิศทางที่ต้องการหรือไม่ เพื่อให้ง่ายต่อความเข้าใจจะใช้ระบบพิกัดทรงกลมในการสร้างเส้นทางในการทดลอง อีกกรณีหนึ่งคือ ใช้สัญญาณจากอุปกรณ์สวมใส่ศีรษะควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกล ให้ทำงานได้ตามเป้าหมาย

5.1 ทดลองโดยการสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่

5.1.1 ฟังก์ชันความเร็วในรูปแบบสี่เหลี่ยมคางหมู (trapezoidal velocity profile)

ทุกการสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่ จะต้องกำหนดตำแหน่งที่ต้องการให้แขนกลเคลื่อนที่ไป ในวิธีการสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่นี้จะกำหนดเวลาของการเคลื่อนที่และอัตราเร่งสูงสุดในการเคลื่อนที่ของตำแหน่งปลายแขนกล ดังตัวอย่างในรูปที่ 19



รูปที่ 19 แสดงตำแหน่ง ความเร็ว ความเร่งของตำแหน่งของปลายแขนกล [18]

CHULALONGKORN UNIVERSITY

ในกรณีที่กำหนดความเร่ง และเวลาในการเคลื่อนที่ จะสามารถคำนวณช่วงเวลาที่ปลายแขนกลเคลื่อนที่ด้วยความเร่ง t_c ได้และช่วงเวลาที่ปลายแขนกลเคลื่อนที่ด้วยความหน่วง $t_f - t_c$ จากสมการ

$$|\ddot{p}_c| = \frac{6|p_f - p_i|}{t_f^2} \quad (29)$$

$$t_c = \frac{t_f}{2} - \frac{1}{2}\sqrt{\frac{t_f^2\ddot{p}_c - 4(p_f - p_i)}{\ddot{p}_c}} \quad (30)$$

โดย $\ddot{p}_c$ คือค่าความเร่งสูงสุด

p_i คือตำแหน่งเริ่มต้นของแขนกล

p_f คือตำแหน่งปลายที่ต้องการให้แขนกลเคลื่อนที่ไป

ในการสร้างสมการเส้นทางการเดินของปลายแขนกลในรูปแบบนี้ จะแบ่งช่วงการเคลื่อนที่เป็น 3 ช่วงคือ ช่วงที่เคลื่อนที่ด้วยความเร่ง ช่วงที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่และช่วงที่เคลื่อนที่ด้วยความหน่วงดังนี้

เคลื่อนที่ด้วยความเร่ง $t < t_c$

$$p(t) = p_i + \frac{1}{2}\ddot{p}_c t^2 \tag{31}$$

เคลื่อนที่ด้วยความเร็วคงที่ $t_c \leq t \leq t_f - t_c$

$$p(t) = p_i + \ddot{p}_c t_c \left(t - \frac{t_c}{2} \right) \tag{32}$$

เคลื่อนที่ด้วยความหน่วง $t_f - t_c \leq t \leq t_f$

$$p(t) = p_f - \frac{1}{2}\ddot{p}_c (t_f - t)^2 \tag{33}$$

โดยจะกำหนดตำแหน่งที่ต้องการเดินทาง เวลา และความเร่งอยู่ในระบบพิกัดทรงกลม แล้วแปลงให้อยู่ในการเคลื่อนที่ของตำแหน่งของแต่ละข้อต่อของแขนกลตามสมการจลศาสตร์ที่ได้กล่าวมา จากนั้นนำเข้าระบบควบคุมที่ตัดสัญญาณจากอุปกรณ์สวมใส่ศีรษะออกและแทนด้วยสัญญาณนี้

5.1.2 การทดลอง

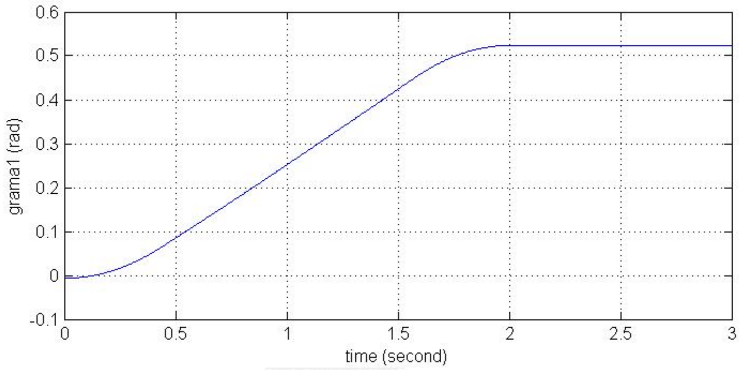
ในการทดลองจะป้อนสัญญาณขาเข้าตามที่ได้กล่าวมาจากหัวข้อ 5.1.1. โดยอ้างอิงตำแหน่งจากระบบพิกัดทรงกลมในรูปที่ 3 ให้ค่าตำแหน่งเริ่มต้นของปลายแขนกลพิกัดทรงกลมอยู่ที่ $\gamma_1 = 0, \gamma_2 = 0$ เสมอซึ่งอยู่ตำแหน่งสูงสุด ส่วนเวลาในการเคลื่อนที่กำหนดให้เท่ากับ 2 วินาที และค่าตำแหน่งสุดท้ายที่มุมเชิงขั้วเป็น $\frac{\pi}{6}$ เรเดียน จากนั้นแทนค่าตามสมการที่ 1 จะได้เวกเตอร์แกน z ของเฟรมปลายแขนกล แล้วแทนกลับลงในสมการจลศาสตร์ที่ 12 13 14 และ 15 จะทำให้ได้ตำแหน่ง

ของทั้งสองข้อต่อเพื่อนำไปควบคุมการเคลื่อนที่ต่อไป ค่าที่วัดจากอุปกรณ์ตรวจวัดมุมที่ติดกับมอเตอร์เป็นตัวตรวจสอบความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในการทดลอง

กรณีที่ 1 ปลายแขนกลหมุนรอบแกน x กำหนดให้ $\gamma_2 = \frac{\pi}{2}, 3\frac{\pi}{2}$ rad

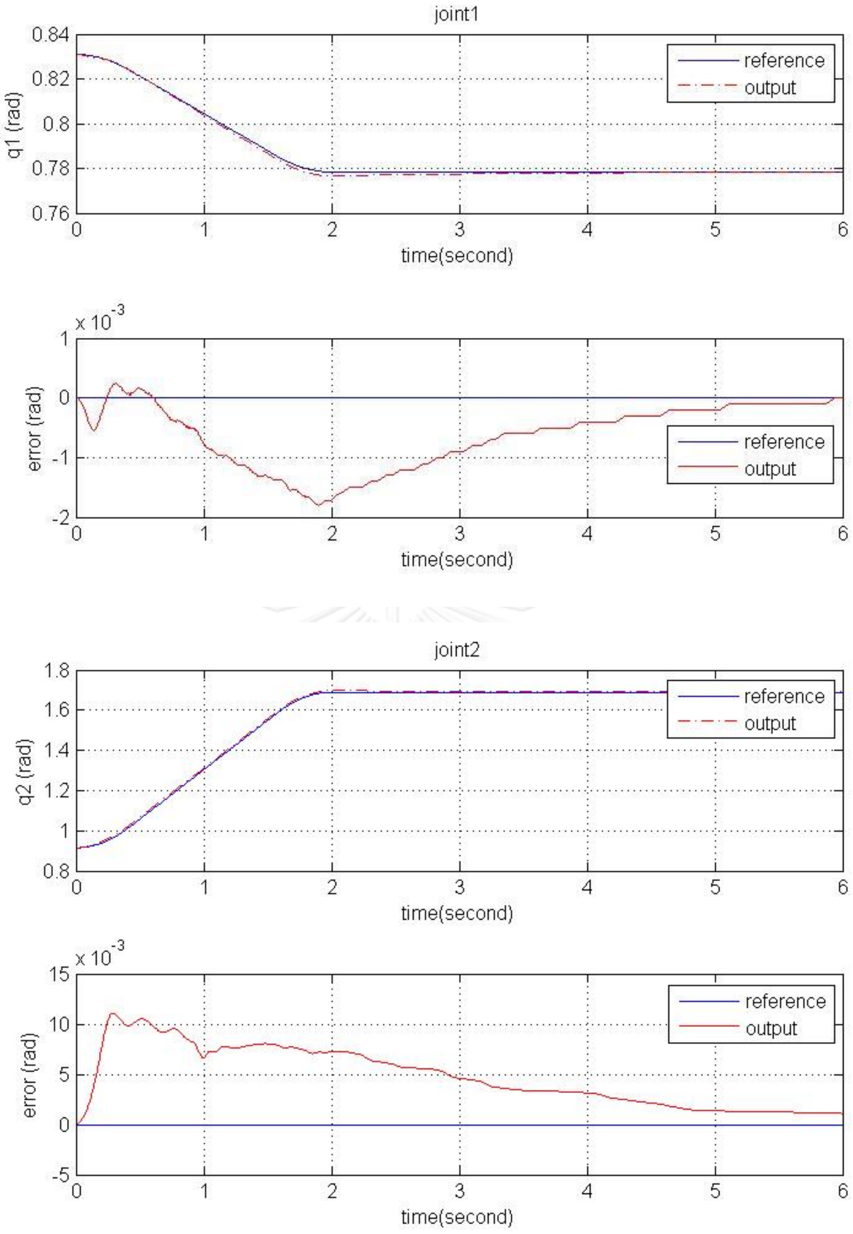
กรณีที่ 2 ปลายแขนกลหมุนรอบแกน y กำหนดให้ $\gamma_2 = 0, \pi$ rad

และ γ_1 เปลี่ยนแปลงตามฟังก์ชันความเร็วในรูปแบบสี่เหลี่ยมคางหมูตามรูปที่ 20

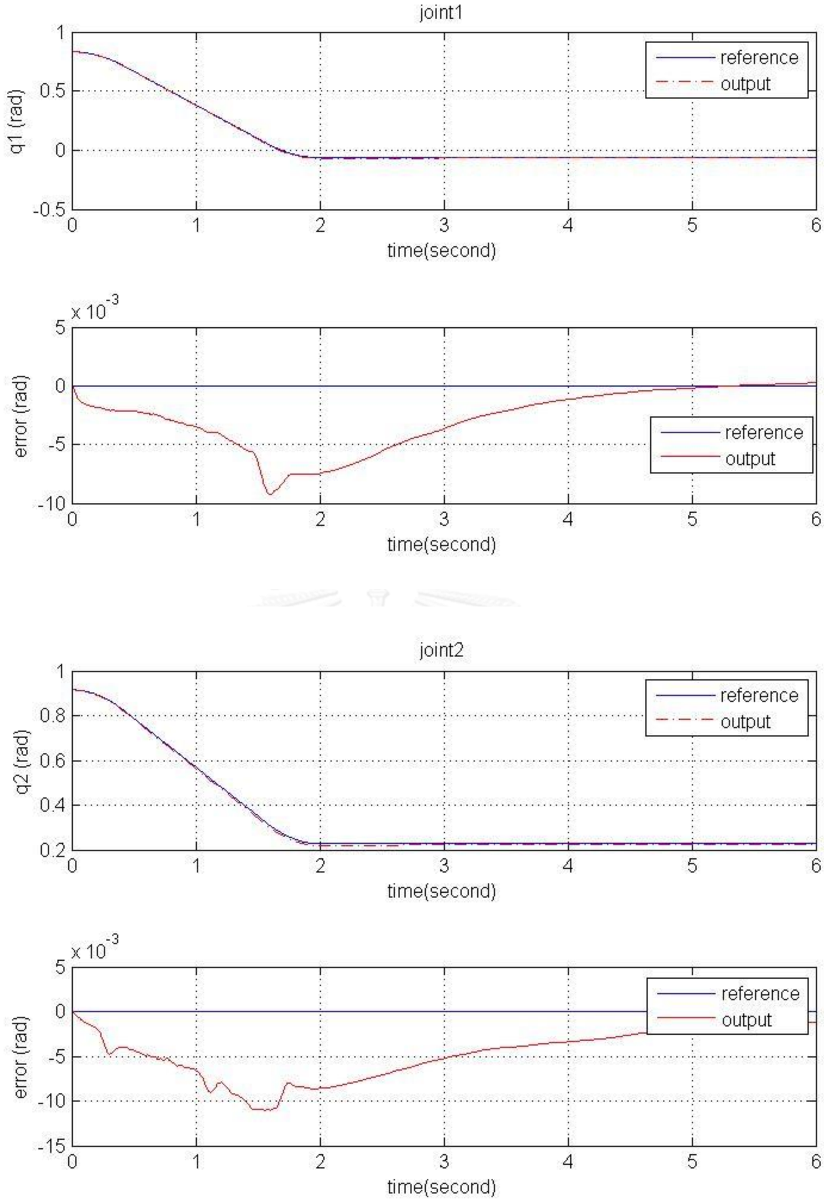


รูปที่ 20 แสดงเส้นทางการเคลื่อนที่ที่กำหนดให้ปลายแขนกลเคลื่อนที่

กรณีที่ 1 รูปที่ 21 และ 22 เป็นการทดลองควบคุมให้แขนกลตามนี้เคลื่อนที่รอบแกน x โดยให้ปลายแขนกลเคลื่อนที่จากตำแหน่งสูงสุดลงมาเป็นมุม $\frac{\pi}{6}$ เรเดียน ด้วยเวลา 2 วินาที โดยใช้ตัวควบคุมแบบ Inverse dynamics control ได้ผลว่าตัวควบคุมนี้สามารถควบคุมให้แขนกลสามารถเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่กำหนดไว้ได้ จากการควบคุมการเคลื่อนที่นี้จะมีค่าความผิดพลาดของแต่ละข้อต่อในช่วงของการเคลื่อนที่ประมาณ 0.01 เรเดียน

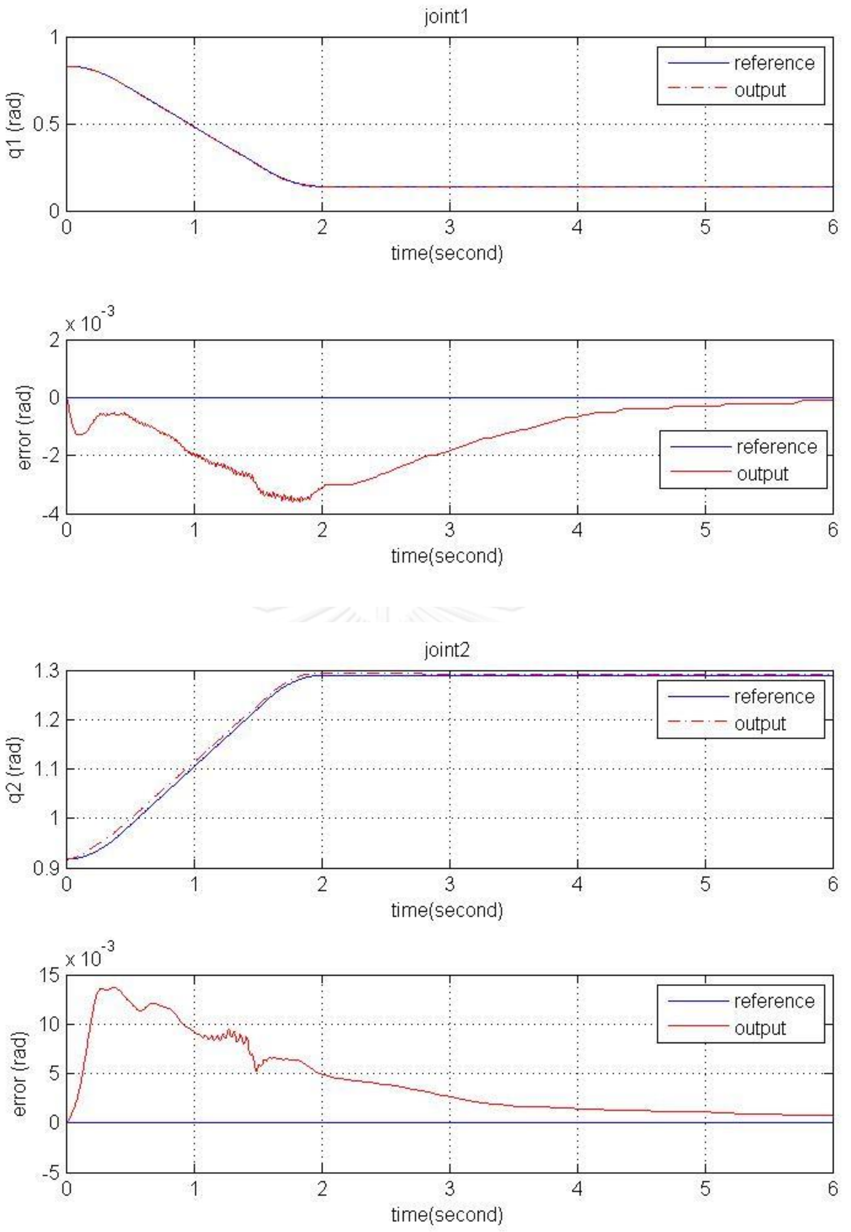


รูปที่ 21 แสดงตำแหน่งและความผิดพลาดที่เกิดขึ้นของข้อต่อแขนกลเมื่อ $\gamma_2 = \frac{\pi}{2}$ rad

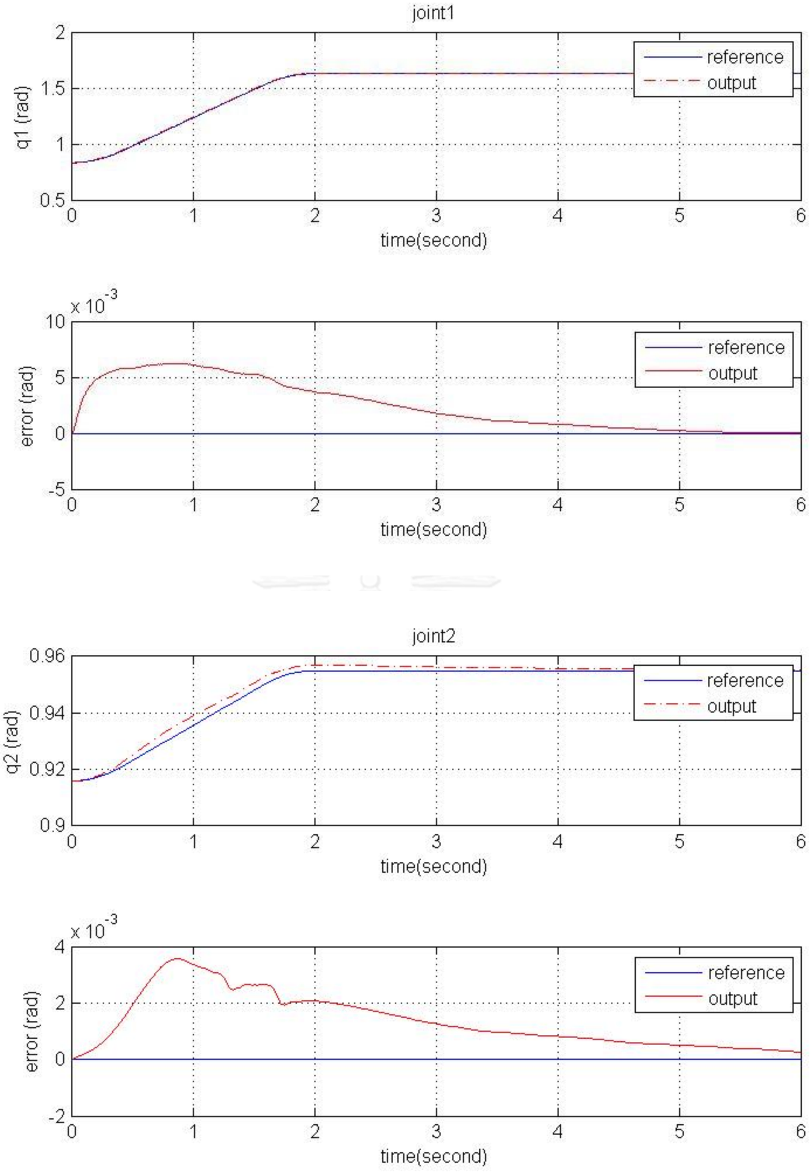


รูปที่ 22 แสดงตำแหน่งและความผิดพลาดที่เกิดขึ้นของข้อต่อแขนกลเมื่อ $\gamma_2 = 3\frac{\pi}{2}\,\mathrm{rad}$

<u>กรณีที่ 2</u> ในรูปที่ 23 และ 24 เป็นการทดลองควบคุมให้แขนกลตามนี้เคลื่อนที่รอบแกน y โดยให้ปลายแขนกลเคลื่อนที่จากตำแหน่งสูงสุดลงมาเป็นมุม $\frac{\pi}{6}$ เรเดียน ด้วยเวลา 2 วินาที โดยใช้ตัวควบคุมแบบ Inverse dynamics control ได้ผลว่าตัวควบคุมนี้สามารถควบคุมให้แขนกลตามสามารถเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่กำหนดไว้ได้ จากการควบคุมการเคลื่อนที่นี้จะมีค่าความผิดพลาดของแต่ละข้อต่อในช่วงของการเคลื่อนที่ประมาณ 0.015 เรเดียน



รูปที่ 23 แสดงตำแหน่งและความผิดพลาดที่เกิดขึ้นของข้อต่อแขนกลเมื่อ $\gamma_2 = 0$ rad



รูปที่ 24 แสดงตำแหน่งและความผิดพลาดที่เกิดขึ้นของข้อต่อแขนกลเมื่อ $\gamma_2 = \pi$ rad

ผลการทดลองควบคุมให้แขนกลตามนี้เคลื่อนที่ทั้งสี่ทิศทางจากตำแหน่งสูงสุดลงมาเป็นมุม $\frac{\pi}{6}$ เรเดียน ด้วยเวลา 2 วินาที โดยใช้ตัวควบคุมแบบ Inverse dynamics control ได้ผลว่าตัวควบคุมนี้สามารถควบคุมให้แขนกลตามสามารถเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่กำหนดไว้ได้ จากการควบคุมการเคลื่อนที่นี้จะมีค่าความผิดพลาดของแต่ละข้อต่อในช่วงของการเคลื่อนที่มากที่สุดประมาณ 0.015 เรเดียน

5.2 ทดลองโดยใช้สัญญาณจากอุปกรณ์สวมใส่ศีรษะ (หุ่นยนต์แบบนำ-ตาม)

ในกรณีนี้ใช้ระบบแบบหุ่นยนต์แบบนำ-ตาม ให้สัญญาณจากอุปกรณ์สวมใส่ศีรษะทำหน้าที่เป็นหุ่นยนต์นำ แปลงสัญญาณที่เกิดจากการขยับศีรษะ แทนค่าในสมการจลศาสตร์เพื่อนำไปควบคุมแขนกลพิกัดทรงกลมแบบอนุกรม โดยเพิ่มฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์กับสัญญาณที่ออกจากอุปกรณ์สวมใส่ศีรษะ เพื่อให้ช่วงการขยับศีรษะแคบลงกับการเคลื่อนที่ของแขนกลเท่าเดิม จึงทำให้สามารถมองภาพจากจอแสดงผลของคอมพิวเตอร์ได้ ตามสมการที่ 34

$$\begin{aligned}
\phi_{out} &= 0.1\phi|\phi| \times \frac{180}{\pi}\ rad \\
\theta_{out} &= 0.1\theta|\theta| \times \frac{180}{\pi}\ rad \\
\psi_{out} &= 0.1\psi|\psi| \times \frac{180}{\pi}\ rad
\end{aligned} \tag{34}$$

เมื่อ $Pitch = \theta, Roll = \phi, Yaw = \psi$

โดย θ, ϕ, ψ เป็นสัญญาณที่ออกจากอุปกรณ์สวมใส่ศีรษะ หน่วยเป็นเรเดียน

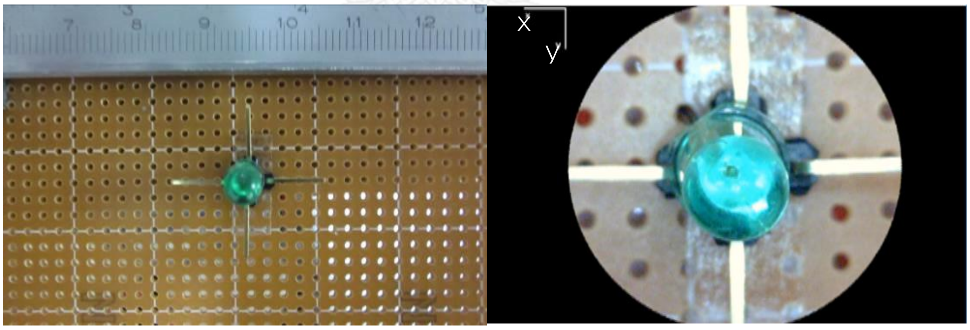
$\theta_{out}, \phi_{out}, \psi_{out}$ เป็นสัญญาณที่ใช้สำหรับแทนค่าในสมการจลศาสตร์เพื่อนำไปควบคุมแขนกลตาม หน่วยเป็นเรเดียน

จากนั้นทดลองนำอุปกรณ์ชุดนี้ทดลองร่วมกับแขนกล 6 องศาอิสระสำหรับงานขนาดเล็ก เพื่อให้แขนกลสัมผัสเป้าหมายที่กำหนด

ทำการทดลองกับเป้าหมายคือ อุปกรณ์เปิดปิดหลอดไฟ LED ขนาดเล็กอย่างง่าย โดยให้ขาทุกขาของ 90 degree male header pin strip ทำมุมตั้งฉากกันและมีทิศทางเดียวกับเฟรมอ้างอิงของแขนกลพิกัดทรงกลมที่ทำหน้าที่เป็นแขนกลตามดังรูปที่ 26 โดยให้แยกออกเป็น 4 ทิศทางและให้ขาอีกด้านของ pin นั้นต่อกับขั้วหนึ่งของหลอดไฟ LED และ อีกขั้วหนึ่งของหลอดไฟ LED ต่อกับแหล่งกำเนิดไฟฟ้า โดยอีกขั้วหนึ่งของแหล่งกำเนิดไฟฟ้าต่อเข้ากับ pin ที่ติดอยู่ที่ปลายแขนกล 6 องศาอิสระ

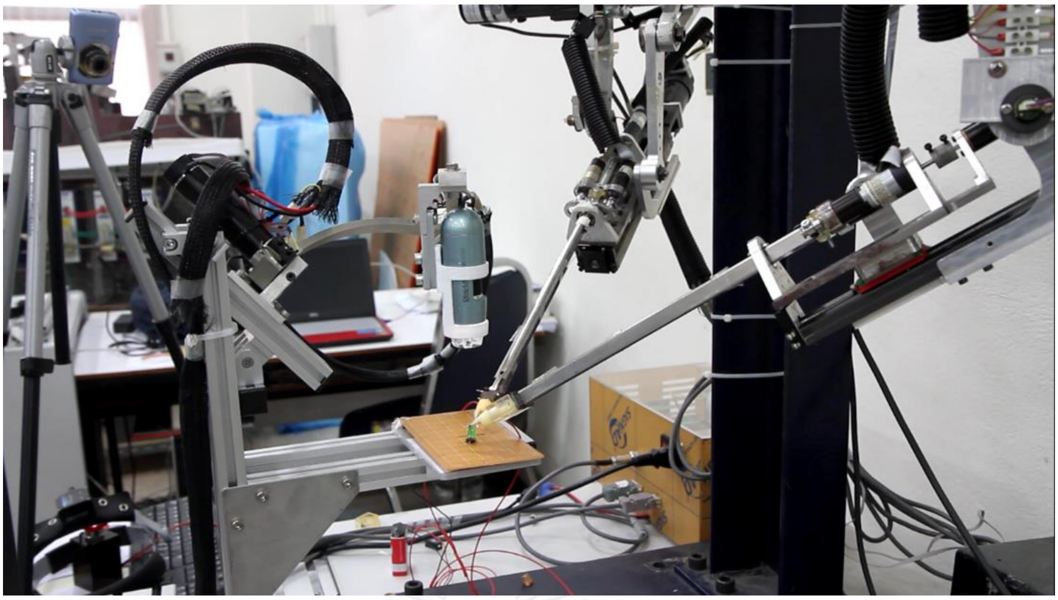
รูปที่ 25 แสดงการใช้ชุดอุปกรณ์ในงานวิจัยนี้ร่วมกับแขนกล 6 องศาอิสระสำหรับงานขนาดเล็ก

ผู้ใช้งานรับภาพจากจอแสดงผลคอมพิวเตอร์ เพื่อควบคุมแขนกล 6 องศาอิสระ ผ่านแขนกลนำ ให้เคลื่อนที่ให้ pin ที่ติดอยู่กับแขนกลนั้น สัมผัส 90 degree male header pin strip ทำให้ครบวงจร และหลอดไฟจะสว่างขึ้น ซึ่งเป็นวิธีตรวจสอบวิธีหนึ่งว่าปลายแขนกลเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ผู้ใช้งานกำหนดหรือไม่

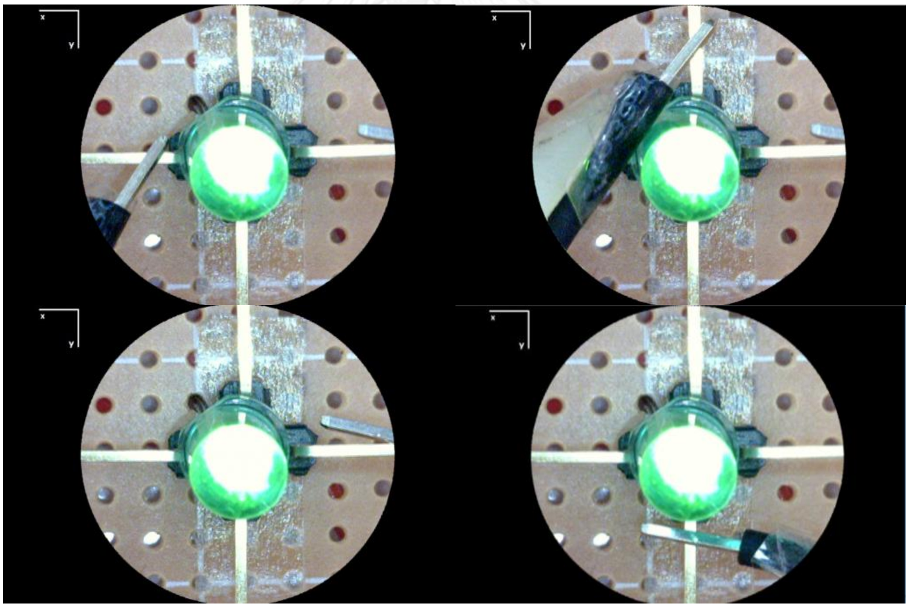


รูปที่ 26 แสดงขนาดและการวางตำแหน่ง 90 degree male header pin strip และหลอดไฟ LED

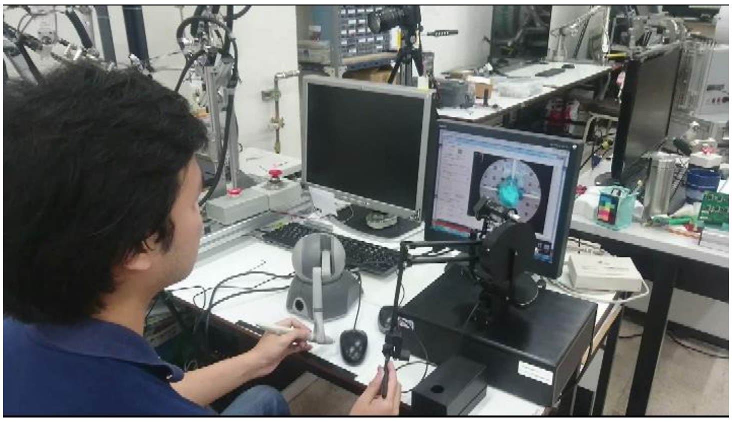
<u>การทดลองที่ 1</u> ทำการทดลอง โดยให้แขนกลพิกัดทรงกลมแบบอนุกรมนำกล้องอัตราขยายสูงขึ้นไปตั้งฉากกับพื้นแล้วหยุดไม่เคลื่อนที่อีกเท่ากับว่ากล้องอยู่นิ่งกับที่ตลอดการทดลองเปิดปิดหลอดไฟ LED โดยให้แขนกล 6 องศาอิสระ ที่ติด pin ที่ปลายเคลื่อนที่ไปสัมผัส 90 degree male header pin strip ทั้ง 4 ทิศทางเพื่อให้หลอดไฟ LED สว่าง ตามรูปที่ 27 28 และ 29



รูปที่ 27 การทำงานของการทดลองที่ 1 เมื่อกล้องอัตราขยายสูงอยู่กับที่และแขนกล 6 องศาอิสระทำงาน



รูปที่ 28 การทำงานของการทดลองที่ 1 ภาพที่เห็นจากจอแสดงผลคอมพิวเตอร์

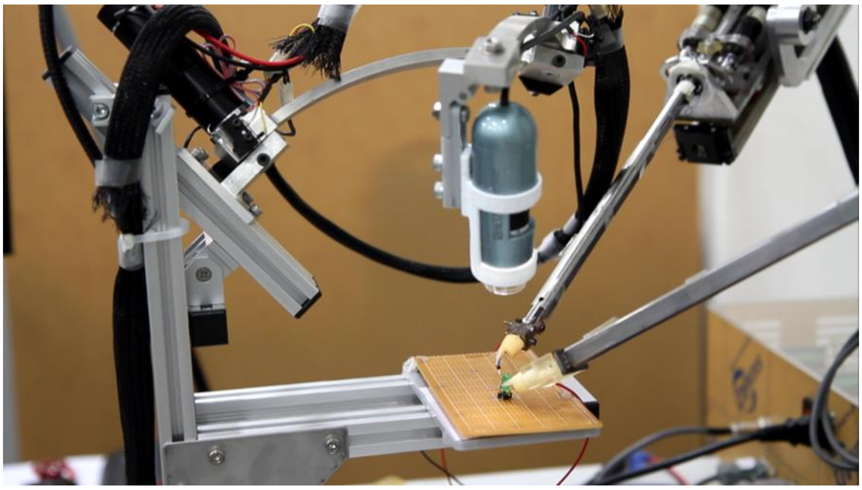


รูปที่ 29 การทำงานของการทดลองที่ 1 ใช้แขนกลนำในการควบคุมแขนกล 6 องศาอิสระ ผ่านจอแสดงผลคอมพิวเตอร์

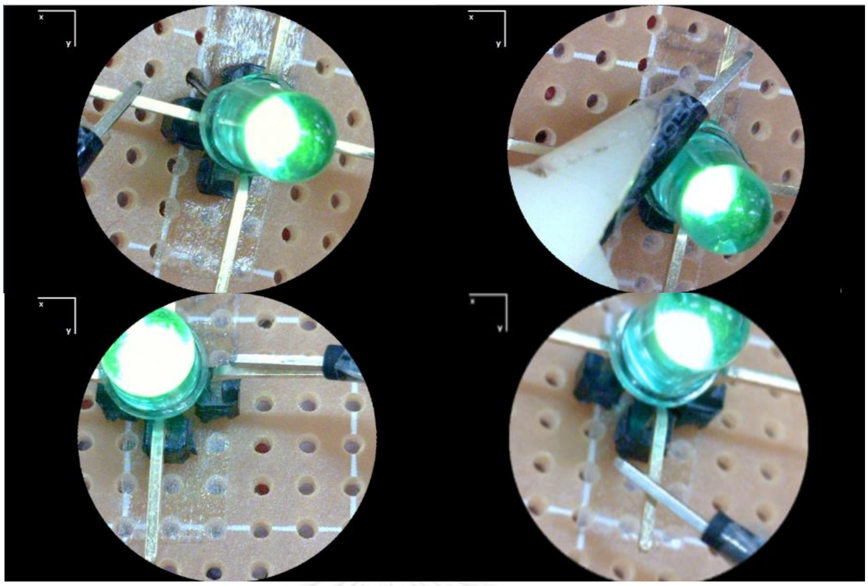
จากการทดลอง ขณะใช้งานแขนกล 6 องศาอิสระ ให้เคลื่อนที่ผู้ใช้งานไม่ทราบระยะความลึกระหว่างปลาย pin กับ 90 degree male header pin strip แต่ก็ยังสามารถเคลื่อนที่ไปยังเป้าหมายที่กำหนดได้ แม้ว่าการเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งเป้าหมายค่อนข้างช้า เนื่องจากไม่ต้องการให้ pin ชนกัน

<u>การทดลองที่ 2</u> ทำการทดลอง โดยใช้สัญญาณจากอุปกรณ์สวมใส่ศีรษะ (หุ่นยนต์แบบนำ-ตาม) ควบคุมแขนกลพิกัดทรงกลมแบบอนุกรมที่ติดกล้องอัตราขยายสูงให้เคลื่อนที่ เพื่อแสดงภาพในมุมมองต่างๆ ให้เหมาะสมกับการทำงาน ควบคู่กับใช้งานแขนกล 6 องศาอิสระ และทดลองเปิดปิดหลอดไฟ LED เช่นเดียวกันกับการทดลองที่ 1 ตามรูปที่ 30 31 และ 32

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University



รูปที่ 30 การทำงานของการทดลองที่ 2 เมื่อกล้องอัตราขยายสูงเคลื่อนที่ตามแขนกลพิกัดทรงกลมทำงานพร้อมกับแขนกล 6 องศาอิสระทำงาน



รูปที่ 31 การทำงานของการทดลองที่ 2 ภาพที่เห็นจากจอแสดงผลคอมพิวเตอร์

รูปที่ 32 การทำงานของการทดลองที่ 2 ใช้แขนกลนำในการควบคุมแขนกล 6 องศาอิสระ และการใช้อุปกรณ์สวมใส่ศีรษะควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกลพิกัดทรงกลมแบบอนุกรม

จากการทดลอง เมื่อผู้ใช้งานสามารถปรับเปลี่ยนมุมมองของกล้องอัตราขยายสูง ทำให้ทราบระยะความลึกระหว่าง pin กับ 90 degree male header pin strip จึงทำให้การสั่งการการเคลื่อนที่ของแขนกล 6 องศาอิสระ ของผู้ใช้งานเคลื่อนที่ไปยังเป้าหมายดีขึ้นเมื่อเทียบกับการทดลองก่อนหน้าที่ตั้งกล้องอยู่กับที่ ไม่ว่า 90 degree male header pin strip ตั้งอยู่บนทิศทางใดก็ตาม

ผลการทดลองคือแขนกลพิกัดทรงกลมที่สร้างขึ้นสามารถเคลื่อนที่ไปตามการขยับของศีรษะผ่านสัญญาณจากอุปกรณ์สวมใส่ศีรษะ ด้วยความสัมพันธ์ของสมการจลศาสตร์ในสมการที่ 14 15 16 และ 34 ตามทิศทางที่ศีรษะเคลื่อนที่ ถึงแม้สัญญาณขาเข้าจากอุปกรณ์ที่เข้ามากำหนดตำแหน่งมีสัญญาณรบกวนอยู่ แต่การเคลื่อนที่ของแขนกลตามที่ผ่านระบบควบคุมนี้ มีประสิทธิภาพเพียงพอที่จะทำให้ผู้ใช้งานสามารถเพิ่มมุมมองการมองเป้าหมายผ่านกล้องที่ติดกับแขนกลตาม เพื่อใช้ทำงานที่กำหนดให้สำเร็จได้ ในกรณีนี้คือการแสดงความลึกให้แขนกล 6 องศาอิสระให้เคลื่อนที่ไปตามตำแหน่งที่ต้องการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

บทที่ 6
สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลงานวิจัย

งานวิจัยฉบับนี้เป็นการพัฒนาระบบหุ่นยนต์แบบนำ-ตาม (master and slave) กับการทำงานผ่านกล้อง และได้ออกแบบระบบควบคุมเพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกลที่ติดตั้งกล้องให้สามารถเคลื่อนที่ไปตามตำแหน่งและทิศทางที่กำหนด สำหรับการวิเคราะห์การเคลื่อนที่ เริ่มจากคำนวณหาสมการจลศาสตร์โดยใช้หลักการของ Denavit-Hartengerg จากนั้นใช้ลากรานจ์ ในการหาแบบจำลองคณิตศาสตร์ของแขนกล และนำสมการทางคณิตศาสตร์นี้ไปใช้ในการออกแบบระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกล ในการออกแบบระบบควบคุมนี้ ออกแบบระบบควบคุมแบบ Inverse Dynamics Control รวมกับตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน ซึ่งผลการทดลองควบคุมแขนกลนี้แบ่งออกเป็นสองกรณี คือควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกลจากการสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่ และการใช้สัญญาณจากอุปกรณ์สวมใส่ศีรษะควบคุมการเคลื่อนที่ในระบบหุ่นยนต์แบบนำ-ตาม ในกรณีแรกในขณะทดลองเริ่มจากแขนกลอยู่ตำแหน่งสูงสุดไม่มีการเคลื่อนที่และให้แขนกลเคลื่อนที่ไป $\frac{\pi}{6}$ เรเดียน ทั้งสี่ทิศทาง ได้ความผิดพลาดของการเคลื่อนที่ทั้งสี่ทิศทางไม่เกิน 0.015 เรเดียน สรุปได้ว่าแขนกลสามารถรักษาตำแหน่งและทิศทางของแนวการมองเห็นของกล้องเมื่อเปลี่ยนมุมมองได้ อีกกรณีหนึ่งคือใช้สัญญาณจากอุปกรณ์สวมใส่ศีรษะที่กรองค่าสัญญาณรบกวนออกไปบางส่วนโดยตัวกรองความถี่ต่ำผ่าน แล้วทดลองการทำงานด้วยการเปิดปิดหลอดไฟ LED ขนาดเล็กกับแขนกล 6 องศาอิสระ สำหรับงานขนาดเล็ก เมื่อขยับศีรษะให้เคลื่อนที่ แขนกลสามารถเคลื่อนที่และรักษาทิศทางของแนวการมองเห็นของกล้องเมื่อเปลี่ยนมุมมองผ่านการเคลื่อนที่ของศีรษะ ทำให้กล้องที่ติดอยู่ที่ปลายแขนกลส่งภาพมุมมองของเป้าหมายกลับมาได้ถูกทิศทาง ส่งผลให้ผู้ใช้งานเห็นภาพความลึกที่แขนกลต้องเคลื่อนที่ไปทั้งสี่เป้าหมายสี่ทิศทาง เป็นการชดเชยมิติที่ขาดไปของกล้องและทำงานร่วมกับแขนกล 6 องศาอิสระ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงทำให้แขนกล 6 องศาอิสระ ทำงานด้วยความแม่นยำมากขึ้น

6.2 ข้อเสนอแนะ

1.ขนาดสายไฟมีขนาดใหญ่ แรงดึงของสายไฟจึงมีผลอย่างมาก วิธีการแก้ไขคือทำการเพิ่มขนาดแขนกลหรือย้ายตำแหน่งของสายไฟออก โดยการเปลี่ยนตำแหน่งมอเตอร์ที่ข้อต่อให้อยู่ที่ตำแหน่งฐาน

2. ในอนาคตสามารถดัดแปลงใช้**กล้องรูเข็ม**ติดตั้งที่ปลายแขนแทนกล้องอัตราขยายสูง โดยยื่นให้เกินกว่าจุดศูนย์กลางของการหมุน (Center of Rotation) ของแขนกล และปรับสมการจลศาสตร์ จะสามารถนำไปใช้ในการผ่าตัดตามที่ได้กล่าวมาในบทที่ 2

3. อาจประยุกต์ระบบควบคุมนี้ไปใช้กับกิมเบลในระบบหุ่นยนต์แบบนำ-ตาม เพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ของกิมเบลผ่านการขยับศีรษะของผู้บังคับ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รายการอ้างอิง

1. Fager PJ, v.W.P., *The use of haptics in medical applications.* The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery, June 2004,. 1(1): p. 36–42.
2. สุภชัย วงศ์บุณย์ยง, แขนกล *6* องศาอิสระสำหรับงานขนาดเล็ก, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์. 2551, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
3. R. S. Allison , M.E., *Combined head and eye tracking system for dynamic testing of the vestibular system.* IEEE Transactions on Biomedical Engineering, Nov. 1996. 43(11): p. 1073 – 1082.
4. Fei Liu , J.L., Chang Liu , Ji Zhao, *An improved method to integrate low-cost sensors for the navigation of small UAVs*, in *Control, Automation and Systems (ICCAS), 2012 12th International Conference on*. Oct. 2012. p. 1980 – 1984.
5. Lidai Wang, S.X., Zhaoying Zhou , Qian Wei , Jinhui Lan *Constrained Filtering Method for MAV Attitude Determination*, in *2005 IEEE Instrumentationand Measurement Technology Conference Proceedings*. May 2005. p. 1480 - 1483.
6. Wang, M.X.N.F.Z., *Study on Extended Kalman Filtering for Attitude Estimation of Micro Flight Vehicle*, in *2011 Third International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation*. Jan. 2011. p. 457 – 460.
7. *Mitsubishi PA-10*. [cited 2016 4 July]; Available from: http://www.robot-arm.com,.
8. ทวี งามวิไลกร, การทำงานแบบมาสเตอร์-สเลฟของแขนกลแฮบติคหกองศาอิสระแบบใหม่ที่มีโครงสร้างแบบขนาน สำหรับงานสร้างชิ้นงานต้นแบบ, ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์. 2549, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
9. Craig, J.J., *Introduction to Robotics mechanics and control*. 1989: Silma,Inc.
10. Blake Hannaford, J.R., *Raven-II: An Open Platform for Surgical Robotics Research.* IEEE Transactions on Biomedical Engineering, November 2012. 60(4): p. 954 – 959.

11. Shaoping Bai , M.R.H., *Forward kinematics of spherical parallel manipulators with revolute joints*, in *2008 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*. July 2008. p. 522 – 527.
12. A. Chaker , M.A.L., *Design and optimization of spherical parallel manipulator as a haptic medical device*, in *IECON 2011 - 37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*. Nov. 2011. p. 80 – 85.
13. H. Saafi , M.A.L., *Development of a spherical parallel manipulator as a haptic device for a tele-operation system: Application to robotic surgery*, in *Industrial Electronics Society, IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE*. Nov. 2013. p. 4097 – 4102.
14. *Telefactor Robotics LLC, HARV Viewer*. [cited 2016 4 July]; Available from: http://www.telefactor-robotics.com/content/harv-controller.
15. Tilley, A.R., *The Measure of Man and Woman: Human Factors in Design*. 2002, New York: John Wiley & Sons inc.
16. Piti Uthong, V.S., *Dexterity Measure for a 2-DOF Revolute Spherical Serial Manipulator.* Applied Mechanics and Materials, October 2015. 799-800: p. 1016-1020.
17. วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ, พลวัตรระบบและการจำลองสถานการณ์ (*System Dynamics and Simulation)*. 2556: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
18. Lorenzo Sciavicco, B.S., *Modeling and Control of Robot Manipulators*. 2009: McGraw-Hill.

ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

ภาคผนวก ก

อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

1. Sensoray Model 626 คือ ตัวรับส่งสัญญาณแอนาลอกที่ใช้ในการเชื่อมต่อสัญญาณแอนาลอกสำหรับควบคุมแขนกล ซึ่งมีหน้าที่คือ ส่งสัญญาณแอนาลอกที่ส่งไปยังตัวขยายสัญญาณเพื่อขับมอเตอร์ และรับสัญญาณจากตัวตรวจรู้การเคลื่อนที่ของมอเตอร์ (รายละเอียดของพอร์ตอยู่ใน Sensoray Model 626 Instruction Manual PCI Multifunction I/O Board)

รูปที่ ก.1 แสดงการ์ดนับค่าอุปกรณ์วัดมุม

2. ตัวขยายสัญญาณของกระแสไฟฟ้าเพื่อขับมอเตอร์กระแสตรง (DC Servo Motor Amplifier) Copley รุ่น 4122P สามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าต่อเนื่องได้สูงสุด 10 แอมแปร์ จำนวน 2 ชุด

รูปที่ ก.2 ชุดขยายกระแสไฟฟ้าขับมอเตอร์กระแสตรง

3. มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง Maxon RE25 กำลัง 20 วัตต์ ติดตั้งกับเฟืองทดอัตราส่วน 1:71 พร้อม อุปกรณ์วัดมุมความละเอียด 512 พัลส์ต่อรอบ

รูปที่ ก.3 แสดงมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง maxon RE25

ค่าคงที่ต่าง ๆ ของ Maxon RE25

$J_m = 14.7\ g \cdot cm^2$

$m = 110\ g$

$b = 20.8\ mN \cdot m / A$

$L = 0.186\ mH$

$R = 1.53\ ohm$

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

4. มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง Maxon A-max16 กำลัง 2 วัตต์ ติดตั้งกับเฟืองทดอัตราส่วน 1:84 พร้อม อุปกรณ์วัดมุมความละเอียด 512 พัลส์ต่อรอบ

รูปที่ ก.4 แสดงมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง Maxon A-max16

ค่าคงที่ต่างๆ ของ Maxon A-max16

$$J_m = 0.849\ g \cdot cm^2$$

$$m = 22\ g$$

$$b = 9.17\ mN \cdot m / A$$

$$L = 0.83\ mH$$

$$R = 23\ ohm$$

5. dino-lite plus เป็นกล้องอัตราขยายสูงแบบพกพา ที่สามารถเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ โดยเชื่อมต่อผ่าน USB ขึ้นจอแสดงผลของคอมพิวเตอร์และสามารถ บันทึกภาพเป็นทั้ง ภาพนิ่ง และ วีดีโอได้

รูปที่ ก.5 แสดงกล้องอัตราขยายสูง dino lite plus

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
Chulalongkorn University

รายละเอียด

ความละเอียดภาพ :	640x480 pixels
ฟอร์ตส่งสัญญาณ:	USB 2.0
อัตราขยาย:	10~200X
อัตราเฟรม :	สูงสุด 30 fps
อุปกรณ์ส่องสว่าง:	8 white LEDs on/off controlled by software
ขนาด :	4 inches / 10.2 cm เส้นผ่าศูนย์กลาง: 1.26 inches / 3.2cm
น้ำหนัก :	95g +/- 10g

6. อุปกรณ์วัดการเคลื่อนที่ของศีรษะ เป็นอุปกรณ์ที่มีฟังก์ชันหลากหลาย เช่น สามารถใช้วัดค่าค่าความเข้มสนามแม่เหล็ก อัตราเร่งเชิงมุม อัตราเร็วเชิงมุมและมุม ทั้งสามแกน โดยมุมที่วัดได้จะวัดเทียบกับแกนแม่เหล็กโลก โดย Microstrain 3DM-GX2 เชื่อมต่อผ่านพอร์ต USB ซึ่งมีรายละเอียดดังตารางที่ ก - 1 และ ก - 2

รูปที่ ก.6 Microstrain 3DM-GX2

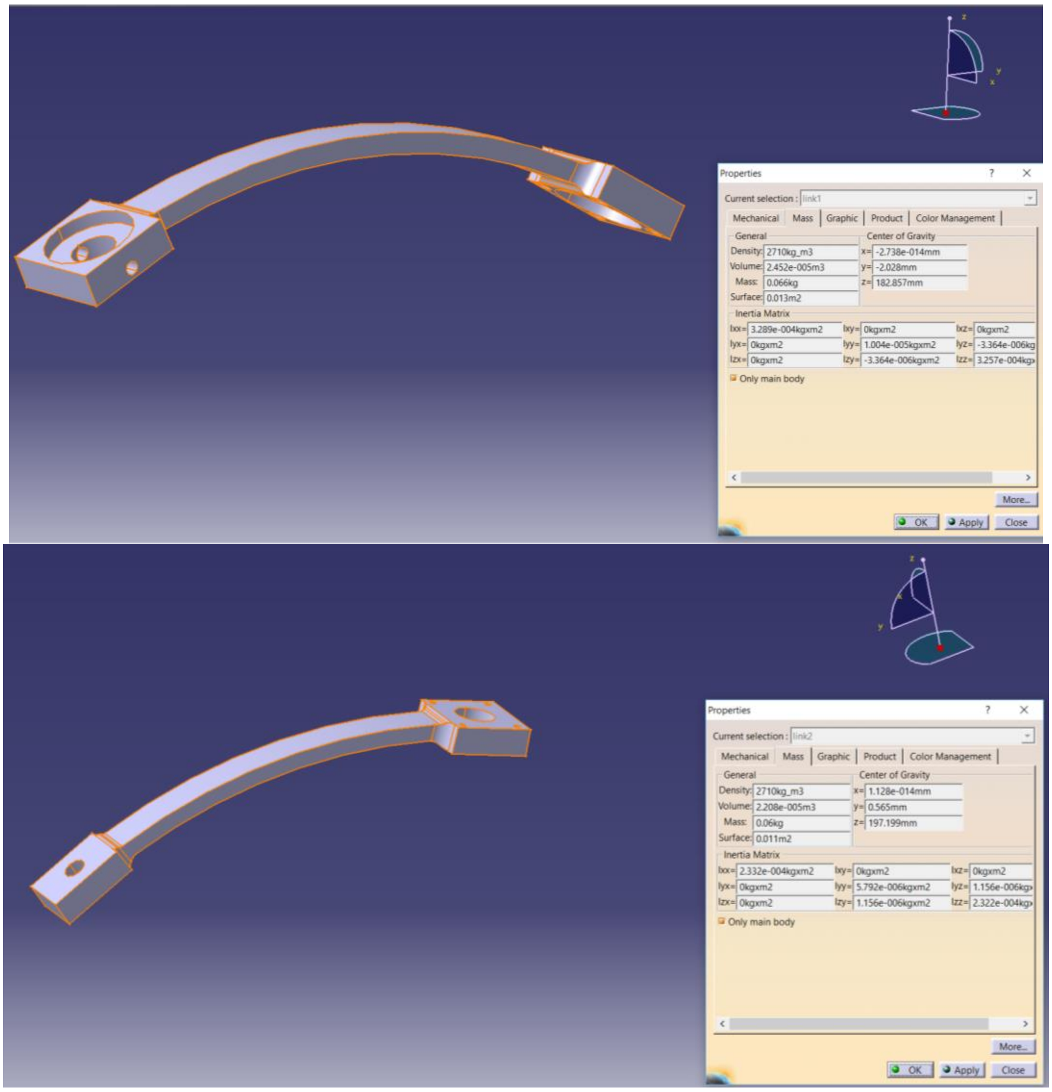
ตารางที่ ก - 1 แสดงฟังก์ชันของ Microstrain 3DM-GX2

Command	Definition	Data Rate in (per second)
0x02	Wireless Ping (wirelessunits only)	
0xC1	Raw Accelerometer and Angular Rate Sensor Outputs	187
0xC2	Acceleration& Angular Rate	187
0xC3	DeltaAngle & DeltaVelocity	187
0xC4	Set Continuous Mode	
0xC5	Orientation Matrix	156
0xC6	Attitude Update Matrix	156
0xC7	Magnetometer Vector	237

ตารางที่ ก - 2 แสดงฟังก์ชันของ microstrain 3DM-GX2 (ต่อ)

Command	Definition	Data Rate in (per second)
0xC8	Acceleration, Angular Rate & Orientation Matrix	115
0xC9	Write Accelerometer Bias Correction	
0xCA	Write Gyro Bias Correction	
0xCB	Acceleration, Angular Rate & Magnetometer Vector	155
0xCC	Accel, Ang Rate & Mag Vectors & Orientation Matrix	102
0xCD	Capture Gyro Bias	
0xCE	Euler Angles	218
0xCF	Euler Angles and Angular Rates	180
0xD0	Transfer Quantity to Non-Volatile Memory	
0xD1	Temperatures	
0xD2	Gyro Stabilized Acceleration, Angular Rate & Magnetometer Vector	155
0xD3	DeltaAngle & DeltaVelocity & Magnetometer Vectors	155
0xE4	Write Word to EEPROM	
0xE5	Read Word from EEPROM	
0xE9	Read Firmware Version Number	
0xFA	Stop Continuous Mode (no reply)	

7. ก้านต่อของแขนกลที่ 1 และ ที่ 2 มีคุณสมบัติตามรูป ก.7 อย่างไรก็ตามคุณสมบัตินี้มีไว้เพื่ออ้างอิงขนาดของมวลและคลวามเฉื่อยเท่านั้น เนื่องจากต้องรวมตัวแปรไม่ทราบค่าอย่างเช่นสายไฟที่ต่อเข้ากับมอเตอร์เข้าไปด้วยเพราะขนาดของสายไฟมีผลต่อแบบจำลองอย่างมีนัยสำคัญ



รูปที่ ก.7 แสดงคุณสมบัติของก้านต่อของแขนกล

ภาคผนวก ข

โอเพนซีวี (OpenCV)

โอเพนซีวี (OpenCV) เป็นซอฟต์แวร์แบบเปิดเผย (open source) ของบริษัทอินเทลคอร์เปอเรชัน ถูกพัฒนาขึ้นโดยมีจุดประสงค์เพื่อเป็นซอฟต์แวร์พื้นฐาน ในระบบปฏิบัติการวินโดว์ และลีนุกซ์ ใช้สำหรับการพัฒนาซอฟต์แวร์ที่เกี่ยวกับการประมวลผลภาพ (Image Processing)

วิธีใช้งาน OpenCV ในงานวิจัยนี้เพื่อใช้พัฒนาโปรแกรมนั้น จะใช้ร่วมโปรแกรม Visual Studio C++ ในระบบปฏิบัติการวินโดว์ แล้วตั้งค่าให้กับโปรแกรม Visual Studio C++ ในการระบุตำแหน่งของ Library ของ OpenCV ให้หาตำแหน่งของไฟล์และ Source File ที่ต้องใช้ในโปรแกรมให้โปรแกรมทราบ จากนั้นดึงมาใช้งาน เช่น การรับภาพจากกล้อง การกรองภาพ การตัดภาพ การเพิ่มเส้น ตัวอักษร การสร้างจุดภาพทับภาพต้นฉบับ และการหมุนภาพ เป็นต้น

ตารางที่ ข - 1แสดงตัวอย่างความสามารถของ OpenCV

Categories	Functions
Image functions	Creation, allocation, destruction of images.
Data Structures	Static types and dynamic storage.
Contour Processing	Finding, displaying, manipulation, and simplification of image contours.
Geometry	Line and ellipse fitting. Convex hull. Contour analysis.
Image Statistics	In region of interest: Count, Mean, STD, Min, Max, Norm, Moments, Hu Moments.
Image Pyramids	Power of 2. Color/texture segmentation.
Morphology	Erode, dilate, open, close. Gradient, top-hat, black-hat.
Background Differencing	Accumulate images and squared images. Running averages.

ตารางที่ ข - 2 แสดงตัวอย่างความสามารถของ OpenCV (ต่อ)

Categories	Functions
Thresholding	Binary, inverse binary, truncated, to zero, to zero inverse.
Camera Calibration	Intrinsic and extrinsic, Rodrigues, un-distortion, Finding checkerboard calibration pattern
Drawing Primatives	Line, rectangle, circle, ellipse, polygon. Text on images.
System Functions	Load optimized code. Get processor info.
Utility	Abs difference. Template matching. Convert Scale. Sampling lines. Bi-linear interpolation. ArcTan, sqrt, inv-sqrt, reciprocal. CartToPolar, Exp, Log. Random numbs. Set image. K-Means.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายปิติ อู่ทอง เกิดเมื่อวันที่ 13 มีนาคม พ.ศ. 2533 จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 6 จากโรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัยรามคำแหง สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตร์บัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2554 หลังจากสำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาบัณฑิตได้เข้าทางานกับ บริษัท ปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน) ตำแหน่งวิศวกรเครื่องกล หลังจากนั้นเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2556

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
CHULALONGKORN UNIVERSITY