

## ระบบแขนกลนำและตาม 6 องศาอิสระสำหรับงานขนาดเล็ก

## A 6-DOF Master Slave System for Miniature Tasks

วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ และ สุภชัย วงศ์บุญยง

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ถ.พญาไท ปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330 โทร 0-2218-6610-1 โทรสาร 0-2252-8889

E-Mail: Viboon.S@eng.chula.ac.th , reverserp@eng.chula.ac.th

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาระบบแขนกลแบบนำ-ตาม หรือระบบควบคุมระยะไกล 6 องศาอิสระ สำหรับทำงานขนาดเล็กทั่วไป แขนกลตามในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบโดยใช้โครงสร้างแบบอนุกรม ซึ่งการออกแบบได้พิจารณาเน้นถึงพื้นที่การทำงาน การเข้าถึงงาน และความสะดวกในการตอบสนองกับผู้ใช้ สำหรับพื้นที่ในการทำงานนั้นระบบถูกออกแบบให้สามารถใช้งานสลับเปลี่ยนกันได้ระหว่างการทำงานสองลักษณะคือ การเคลื่อนที่แบบหยาบ และการเคลื่อนที่แบบละเอียด สำหรับการเคลื่อนที่แบบหยาบนั้นจะถูกใช้เพื่อการเคลื่อนที่อย่างรวดเร็วภายในพื้นที่ทำงาน ในขณะที่การเคลื่อนที่แบบละเอียดนั้นจะถูกใช้เพื่อการเข้าถึงงาน และ ทำงานในบริเวณเล็กๆที่ต้องการความแม่นยำ นอกจากนี้ รูปแบบโครงสร้างของแขนกลตามได้ถูกออกแบบให้สัมพันธ์กับแขนกลนำเพื่อเพิ่มความสามารถในการบังคับของผู้ใช้ด้วยในงานวิจัยนี้แขนกลนำแพนทอม ออมนิ (Phantom Omni<sup>®</sup>) ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์จากบริษัท เซนเซเบิล เทคโนโลยี ได้ถูกเลือกมาใช้เป็นแขนกลนำ เนื่องจากมีอุปกรณ์ตรวจรู้สำหรับวัดการเคลื่อนที่ได้ถึง 6 องศาอิสระ ซึ่งเพียงพอต่อการระบุตำแหน่ง และการวางตัว ในการควบคุมแขนกลตาม สำหรับการทดสอบนั้น ได้ทำการติดตั้งกล้องวงจรปิดเข้ากับระบบเพื่อบันทึกภาพเคลื่อนไหวตลอดการทำงาน เพื่อให้ผู้ใช้สามารถเห็น และ บังคับการทำงานของแขนกลได้สะดวกมากยิ่งขึ้น

**คำหลัก** ระบบแขนกลนำ และ ตาม / แขนกลสำหรับงานขนาดเล็ก

## Abstract

This research cover a novel design of a general purpose 6-DOF teleoperation system for miniature tasks. A slave manipulator, used in this teleoperation, is designed based on a serial mechanism. Significant criteria used in this design are workspace, task approach, and comfortable user interaction. About the workspace and task approach, the slave robot is designed so that the operation can be operated in both coarse motion and fine motion by switching operation modes. The coarse one will be applied for moving in large workspaces. On

the other hands, the fine motion will be used for approaching and working on desired small workspaces. Furthermore, the configuration of the slave arm is designed based on the master arm configuration to extend the effectiveness of an operator.

In this work, the Phantom Omni<sup>®</sup>, a commercial haptic device from Sensable Technologies Company, is selected as the master arm. Thanks to its 6-DOF positional sensing, this device can provide enough effectively approach, 3 for positions and 3 for orientation, to control the slave manipulator. Finally, in an experiment, a CCTV camera was installed in the system to capture real-time images of the operations. This will help a user to monitor tasks during operation. A task of piercing a cord or wire through the sewing needle hole is illustrated in this work.

**Keywords:** Master Slave System / Miniature Task Manipulator

## 1. คำนำ

ในปัจจุบันระบบแขนกลนำ-ตาม หรือ ระบบการควบคุมระยะไกล ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในงานหลายประเภท อาทิเช่น งานด้านอุตสาหกรรม งานด้านวิทยาศาสตร์ รวมไปถึง งานด้านการแพทย์ โดยระบบดังกล่าวเป็นการรวมเอาข้อดีของมนุษย์ และ หุ่นยนต์มารวมเข้าด้วยกัน นั่นคือ มนุษย์มีความสามารถในการรับรู้ และ ตัดสินใจ เหตุการณ์ต่างๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในขณะที่หุ่นยนต์มีความละเอียด และ แม่นยำมากกว่ามนุษย์ เมื่อนำข้อดีของทั้งสองมาประยุกต์เข้าด้วยกันแล้ว จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานขึ้นอย่างมาก ระบบแขนกลนำ-ตาม ที่ต้องการความแม่นยำ และ ความละเอียดสูงนั้นถูกนำมาใช้ในหลากหลายลักษณะงาน โดยเฉพาะด้านการแพทย์ ได้นำมาประยุกต์ใช้สำหรับระบบหุ่นยนต์ ช่วยในการผ่าตัดแบบ MIS (Minimally Invasive Surgery) ซึ่งเป็นการผ่าตัดภายในตัวผู้ป่วย ซึ่งดำเนินการโดยการเจาะช่องขนาดเล็กประมาณ 1-2 เซนติเมตร แล้วจึงใช้เครื่องมือแพทย์ที่มีลักษณะเรียวยาว และกล้องขนาดเล็กสอดเข้าไปทำการผ่าตัดภายในตัวผู้ป่วย โดยการผ่าตัดลักษณะนี้จะส่งผลดีต่อผู้ป่วยในด้านการช่วยลดความเจ็บปวด ลดการเสียเลือด และ ระยะเวลา

การฟื้นตัวลง โดยในปัจจุบันมีระบบที่ใช้งานอยู่อย่างแพร่หลาย คือ ระบบผ่าตัดดาร์วินซี (The daVinci<sup>®</sup> Surgical System) [1] โดยแขนกลตามของระบบผ่าตัดดังกล่าว แสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 แขนกลตามในระบบผ่าตัดดาร์วินซี [1]

นอกจากการใช้งานด้านการแพทย์แล้ว ในปัจจุบันมีการใช้งานอุปกรณ์ยึดจับ หรือ แขนกลสำหรับงานขนาดเล็ก สำหรับวัตถุประสงค์อื่น ๆ อีกมากมาย ได้แก่ การวิเคราะห์เคลื่อนย้ายระดับเซลล์ หรือ การจับยึด และประกอบชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็ก (MEMS) แต่โดยส่วนมากนั้นยังคงเป็นอุปกรณ์ยึดจับโดยทั่วไป ที่ยังไม่มีการขยับโน้มนามาเกี่ยวข้อง ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้สร้างและพัฒนาาระบบแขนกลนำตามสำหรับงานขนาดเล็กสำหรับงานทั่วไปขึ้น

## 2. หลักเกณฑ์ในการออกแบบแขนกลตาม

แขนกลตามสำหรับงานวิจัยนี้มุ่งเน้นให้สามารถใช้งานร่วมกับแขนกลนำสำหรับการทำงานขนาดเล็กๆ ภายในพื้นที่จำกัด ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นปัจจัยที่ต้องคำนึงถึงเป็นส่วนสำคัญอันดับแรก คือ การออกแบบอย่างไรให้แขนกลตามดังกล่าว มีละเอียด ความแม่นยำ และความแม่นยำสูงสุด โดยจะกล่าวโดยละเอียดต่อไป ปัจจัยที่สำคัญต่อมาเกี่ยวข้องกับพื้นที่การทำงาน (Workspace) และการเข้าถึงงานในบริเวณพื้นที่จำกัด ซึ่งปัจจัยเกี่ยวกับพื้นที่ทำงานนี้ จะขึ้นกับลักษณะโครงสร้างของแขนกลเป็นสำคัญ สำหรับปัจจัยสุดท้ายเกี่ยวข้องกับความเหมาะสมของโครงสร้างแขนกลตาม กับการนำมาใช้ร่วมกับกับแขนกลนำแพนท่อม ปัจจัยทั้งหมดที่กล่าวมาได้อธิบายไว้โดยละเอียดดังนี้

### 2.1 รูปแบบโครงสร้าง

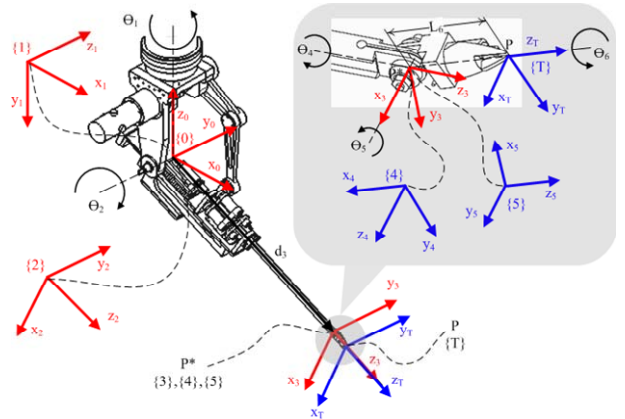
เพื่อความสะดวกในการทำงานทั่วไปนั้น พื้นที่การทำงานจะต้องมีขนาดใหญ่เพียงพอ โดยแขนกลจะต้องสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างสะดวก สำหรับงานวิจัยนี้ แขนกลตามประกอบด้วย 6 องศาอิสระ และได้ออกแบบโดยใช้โครงสร้างอนุกรม (Serial mechanism) เนื่องจากเมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างขนาน (Parallel mechanism) แล้วได้พบว่าโครงสร้างอนุกรมนั้นมีข้อได้เปรียบ คือ มีอัตราส่วนพื้นที่การทำงานเทียบกับพื้นที่ฐานมากกว่าโครงสร้างแบบขนานมาก โดยจะส่งผลให้แขนกลมีความกะทัดรัดมากขึ้น นอกจากนี้โครงสร้างแบบอนุกรมมีความซับซ้อนน้อยกว่ามาก ซึ่งส่งผลดีคือ ความสะดวกในการประกอบซ่อมแซม รวมถึงการสอบเทียบ (Calibration) อีกด้วย

ในทางกลับกัน เมื่อกล่าวถึงข้อดีของโครงสร้างแบบขนานนั้น โครงสร้างแบบขนานมีความเฉื่อยต่ำ และความแข็งแรงสูงมาก แต่เมื่อพิจารณาแล้วจะเห็นว่า คุณสมบัติดังกล่าวส่งผลดีกับแขนกลตามใน

งานวิจัยนี้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น เนื่องจากแขนกลตามจะเคลื่อนที่โดยใช้ความเร็วต่ำ เพราะ สำหรับงานขนาดเล็กนั้นการเคลื่อนที่ที่จะเกิดขึ้นเป็นระยะทางสั้นๆ เท่านั้น โดยเมื่อพิจารณาจากแบบจำลองพลศาสตร์ การเคลื่อนที่อย่างช้าๆ นี้ลดผลของความเฉื่อยลงไปอย่างมาก สำหรับความแข็งแรงสูงนั้น จะป้องกันการเสียรูป (Deformation) ของก้านต่อในกรณีที่มีภาระภายนอกมาก แต่สำหรับงานขนาดเล็กนั้น ค่อนข้างมั่นใจได้ว่าภาระภายนอกจะมีน้ำหนักเบามากด้วยเช่นกัน ดังนั้นความแข็งแรงจึงส่งผลกระทบน้อยเช่นกัน

สำหรับโครงสร้างของแขนกลตาม สามข้อต่อแรกเป็นรูปแบบ R-R-P โดยการออกแบบให้ข้อต่อที่ 3 เป็นข้อต่อแบบเลื่อน (Prismatic joint) เพื่อเพิ่มความสามารถในการเคลื่อนที่เข้าหางานในบริเวณแคบๆ โดยใช้การสอดเข้าไปได้ ข้อต่อแบบเลื่อนนี้ใช้ ball-screw เป็นระบบส่งกำลัง นอกจากนี้ ผู้วิจัยได้ออกแบบโดยใช้กลไกสี่ข้อต่อ (Four-bar linkage) มาร่วมกับโครงสร้างอนุกรม โดยใช้เป็นส่วนหนึ่งของระบบส่งกำลังสำหรับการขับเคลื่อนข้อต่อที่ 2 เพื่อเป็นการลดความเฉื่อย เพิ่มความแข็งแรง และ เพิ่มความแม่นยำให้กับระบบอีกด้วย

ลักษณะสำคัญอีกประการสำหรับการเข้าถึงงานในพื้นที่จำกัด คือ ก้านต่อที่ 4 จะมีเส้นผ่านศูนย์กลางเล็ก (ประมาณ 12 มิลลิเมตร) และยาวเป็นพิเศษ (ยาวสุดได้ประมาณ 450 มิลลิเมตร) โดยภาพโครงสร้างของแขนกลตามแสดงไว้ในรูปที่ 2



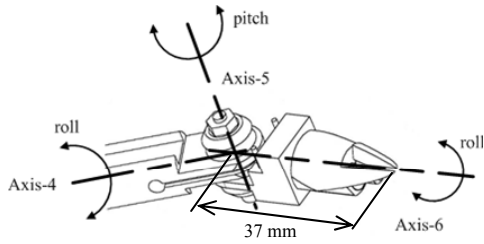
รูปที่ 2 โครงสร้างของแขนกลตามที่พัฒนาขึ้น

### 2.2 ความเกี่ยวข้องกับแขนกลนำ

โครงสร้างบริเวณข้อต่อ (Wrist) หรือก็คือข้อต่อที่ 4 ถึง 6 ของแขนกล เป็นส่วนสำคัญที่สุด ที่จะส่งผลต่อความสะดวกของผู้ใช้ระบบแขนกลนำตาม โดยโครงสร้างข้อต่อของทั้งแขนกลนำ และ แขนกลตาม ควรจะเป็นลักษณะเดียวกัน ในที่นี้ได้ใช้โครงสร้าง Spherical joint แบบ roll-pitch-roll ซึ่งนอกจากจะสัมพันธ์กับแขนกลนำแล้ว ยังสามารถออกแบบกลไกได้ง่าย และการคำนวณไม่ซับซ้อนอีกด้วย

สำหรับข้อต่อที่ต้องการออกแบบให้มีขนาดเล็กมากนั้น ไม่สามารถติดตั้งมอเตอร์ลงบนก้านต่อได้โดยตรง เนื่องจากจะส่งผลต่อขนาด และ น้ำหนักที่ปลายแขนมาก ดังนั้นสำหรับข้อต่อที่ 5 และ 6 จึงใช้กลไก Tendon-driven มาช่วยในการส่งกำลังในระยะทางไกล โดยมอเตอร์ทั้งสองจะติดตั้งอยู่บนก้านต่อที่ 4 กลับกับบริเวณกลไกสี่ข้อต่อ

อย่างไรก็ตามการเคลื่อนที่ของก้านต่อ 5 และ 6 จะมีความสัมพันธ์กัน อยู่แบบ Couple แต่ก็สามารถคำนวณสมการการเคลื่อนที่ได้ที่ถูกต้อง ได้ สำหรับโครงสร้างของข้อมือนั้นได้แสดงไว้ในรูปที่ 3



รูปที่ 3 โครงสร้างของข้อมือของแขนกลตาม

### 2.3 ความละเอียด (Resolution)

ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลกับความละเอียดโดยรวมของแขนกลตาม คือ ขนาดของโครงสร้าง และ ความละเอียดของอุปกรณ์วัดมุม (Encoder) สำหรับขนาดโครงสร้างนั้น ความยาวของก้านต่อจะต้องมีขนาดไม่ยาวเกินไป เพราะความผิดพลาดที่ปลายแขนจะเกิดมากขึ้น

สำหรับความละเอียดของอุปกรณ์วัดมุมนั้น สามารถเพิ่มสัญญาณการนับต่อรอบการหมุน (PPR: Pulse per Revolution) ได้ด้วยการติดตั้งชุดเฟืองทดที่มีอัตราทดสูงเข้ากับอุปกรณ์ดังกล่าว

### 2.4 ความแม่นยำ (Accuracy)

ความแม่นยำนั้นขึ้นอยู่กับความถูกต้องของโครงสร้างโดยรวม และ ชิ้นส่วนต่างๆภายในกลไก เทียบกับในสมการคิเนมาติกส์ ซึ่งได้แก่ ขนาดของก้านต่อ ขนาดของมอเตอร์ รวมถึงมุมเอียงผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นจากการประกอบด้วย อย่างไรก็ตามปัจจัยดังกล่าวสามารถชดเชยได้ด้วยการสอบเทียบในภายหลัง

### 2.5 ความแม่นยำตรง (Precision)

ความแม่นยำตรงนั้นสามารถพิจารณาจากความสามารถในการทำซ้ำ (Repeatability) ซึ่งปัจจัยสำคัญที่ต้องคำนึงถึงคือ Backlash ภายในชุดเฟือง การยืดหดของสาย Tendon และ ความหวมคลอนที่จุดต่างๆภายในกลไก ซึ่งทั้งหมดนี้จะส่งผลให้แขนกลมีความไม่เชิงเส้น และ เกิดความผิดพลาดในการควบคุมมากขึ้น

Backlash นั้นโดยปรกติมีอยู่มากภายในชุดเฟือง โดยผลที่เกิดขึ้นคือความผิดพลาดของตำแหน่งการหมุน เมื่อเกิดการหมุนในทิศทางตรงข้ามกับทิศทางเดิม Backlash สามารถกำจัดออกได้โดยใช้ชุดเฟืองฮาร์โมนิก (Harmonic gear) โดยชุดเฟืองนี้จะมีอัตราทดที่สูงมาก จะถูกติดตั้งอยู่กับมอเตอร์ ซึ่งนอกจากจะช่วยลดความผิดพลาดได้แล้ว ยังช่วยในด้านความละเอียดในการวัดมุม และ เพิ่มแรงบิด (Torque) อีกด้วย

สำหรับการยืดหดของสาย Tendon นั้นจะส่งผลใกล้เคียงกับ Backlash ภายในเฟืองมาก การแก้ไขทำได้โดยการเลือกวัสดุที่มีความยืดหยุ่นต่ำ ได้แก่ เส้นลวดสแตนเลส และทำให้สาย Tendon มีความตึงอยู่เสมอโดยการเพิ่มอุปกรณ์เพิ่มความตึงเสริมเข้าไป

### 3. สมการคิเนมาติกส์ที่เกี่ยวข้อง

เนื่องจากแขนกลมีโครงสร้างแบบอนุกรมรูปแบบ R-R-P-R-R-R ซึ่งเป็นรูปแบบทั่วไปและมีทฤษฎีรองรับอยู่แล้ว ผู้วิจัยจึงได้เลือกใช้วิธีการแบบเมทริกส์ในการหาสมการคิเนมาติกส์ โดยเริ่มต้นด้วยการตั้งแกน และ พรรณนาแขนกลด้วยวิธีของ Denavit-Hartenberg [3] โดยพารามิเตอร์แสดงไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์แบบเดนาวิต-ฮาร์เทนเบิร์กของแขนกลตาม

i	$a_{i-1}$	$\alpha_{i-1}$	$d_i$	$\theta_i$
1	$L_1$	$-90^\circ$	0	$\theta_1$
2	0	$90^\circ$	0	$\theta_2$
3	0	0	$d_3$	0
4	0	$-90^\circ$	0	$\theta_4$
5	0	$90^\circ$	0	$\theta_5$
T	0	0	$L_6$	$\theta_6$

#### 3.1 คิเนมาติกส์เดิหน้า (Forward kinematics)

คิเนมาติกส์เดิหน้าใช้ในการหาค่าของตัวแปรในพิกัดคาร์ทีเซียน จากตัวแปรของแต่ละข้อต่อ เพื่อความสะดวกในการใช้งานจึงได้เขียนไว้ในรูป Transformation matrix ซึ่งสามารถคำนวณจากสมการที่ (3.1) สำหรับงานวิจัยนี้ ได้ใช้คิเนมาติกส์เดิหน้าในขั้นตอนการสอบเทียบ โดยนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกับค่าตำแหน่งจริงจากเครื่องมือวัด

$${}^0T_T = {}^0T_1 {}^1T_2 {}^2T_3 {}^3T_4 {}^4T_5 {}^5T_T \quad (3.1)$$

#### 3.2 คิเนมาติกส์ย้อนกลับ (Inverse kinematics)

คิเนมาติกส์ย้อนกลับใช้ในการหาค่าของมุมของแต่ละข้อต่อจากตัวแปรในพิกัดคาร์ทีเซียน ซึ่งมักจะอยู่ในรูปของ Transformation matrix สมการคิเนมาติกส์ย้อนกลับแสดงไว้ในสมการที่ (3.2) ถึง (3.7)

$$\theta_1 = \tan^{-1} \left( \frac{p_y - d_6 a_y}{p_x - d_6 a_x} \right) - \tan^{-1} \left( \frac{d_2}{\pm \sqrt{r^2 - d_2^2}} \right) \quad (3.2)$$

โดย

$$r = \sqrt{(p_x - d_6 a_x)^2 + (p_y - d_6 a_y)^2}$$

$$\theta_2 = \tan^{-1} \left( \frac{c_1 (p_x - d_6 a_x) + s_1 (p_y - d_6 a_y)}{(p_z - d_6 a_z)} \right) \quad (3.3)$$

$$d_3 = s_2 (c_1 (p_x - d_6 a_x) + s_1 (p_y - d_6 a_y)) + c_2 (p_z - d_6 a_z) \quad (3.4)$$

$$\theta_4 = \tan^{-1} \left( \frac{-s_1 a_x + c_1 a_y}{c_2 (c_1 a_x + s_1 a_y) - s_2 a_z} \right) ; \theta_4 \neq 0 \quad (3.5)$$

$$\theta_5 = \tan^{-1} \left( \frac{c_4 (c_2 (c_1 a_x + s_1 a_y) - s_2 a_z) + s_4 (-s_1 a_x + c_1 a_y)}{s_2 (c_1 a_x + s_1 a_y) + c_2 a_z} \right) \quad (3.6)$$

$$\theta_6 = \tan^{-1} \left( \frac{s_6}{c_6} \right) \quad (3.7)$$

โดย

$$s_6 = -c_5 \left( c_4 \left( c_2 \left( c_1 o_x + s_1 o_y \right) - s_2 o_z \right) + s_4 \left( -s_1 o_x + c_1 o_y \right) \right) + s_5 \left( s_2 \left( c_1 o_x + s_1 o_y \right) + c_2 o_z \right)$$

$$c_6 = -s_4 \left( c_2 \left( c_1 o_x + s_1 o_y \right) - s_2 o_z \right) + c_4 \left( -s_1 o_x + c_1 o_y \right)$$

### 3.3 แบบจำลองพลศาสตร์ (Dynamics Model)

สำหรับแขนกลในงานวิจัยนี้ โครงสร้างของสามแกนแรกซึ่งกล่าวได้ว่าเป็นโครงสร้างหลักนั้น ขนาดของก้านต่อที่ยาว และมีมวลมากเมื่อเทียบกับโครงสร้างของข้อมือ ซึ่งโครงสร้างดังกล่าวจะส่งผลกระทบต่อความแม่นยำโดยรวมที่ปลายแขนกล ในอีกนัยหนึ่ง อาจกล่าวได้ว่า พลศาสตร์ของส่วนข้อมือมีผลต่อความแม่นยำโดยรวมน้อยมาก ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้ทำการหาแบบจำลองพลศาสตร์เฉพาะสามแกนแรกโดยใช้วิธีของลากรางจ์-ออยเลอร์ (Lagrange Euler) [4] ซึ่งข้อมูลของพารามิเตอร์ที่สำคัญต่างๆ ได้แก่ ความยาวข้อต่อ มวลของก้านต่อ ตำแหน่งศูนย์กลางมวล และ โมเมนต์ความเฉื่อย ได้จากแบบจำลองในคอมพิวเตอร์ ซึ่งมีความผิดพลาดเกิดขึ้นเล็กน้อย เมื่อเทียบกับค่าที่ได้จากการวัดจากชิ้นงานจริง แบบจำลองพลศาสตร์ได้แสดงอยู่ในรูปของแรงบิดป้อน (Computed Torque) ในกรณีที่เป็นข้อต่อหมุน และ แรงป้อน (Computed Force) กรณีที่เป็นข้อต่อเลื่อน ดังสมการที่ (3.8)

$$\tau = \mathbf{D}(q)\ddot{q} + \mathbf{h}(q, \dot{q}) + \mathbf{c}(q) + \mathbf{f}(\dot{q}) \quad (3.8)$$

โดย  $\tau$  คือ เวกเตอร์ (3x1) ของแรงบิดป้อน  $\tau$  (หรือแรงป้อน  $F$ )

$\mathbf{D}$  คือ เมตริกซ์ (3x3) ของพจน์ความเฉื่อย

$\mathbf{h}$  คือ เวกเตอร์ (3x1) ของพจน์แรงโคลิโอริส และ แรงสู่ศูนย์กลาง

$\mathbf{c}$  คือ เวกเตอร์ (3x1) ของพจน์แรงโน้มถ่วง

$\mathbf{f}$  คือ เวกเตอร์ (3x1) ของพจน์แรงเสียดทาน

$q$  คือ มุม  $\theta$  (กรณีข้อต่อหมุน) หรือ ระยะ  $d$  (กรณีข้อต่อเลื่อน)

ในการคำนวณตามสมการ (3.8) ได้ละทิ้งพจน์ของแรงเสียดทาน  $\mathbf{f}(\dot{q})$  ซึ่งเป็นฟังก์ชันของความเร็วไป เนื่องจากแขนกลตามในงานวิจัยนี้ได้ถูกออกแบบให้ทำงานในความเร็วต่ำ ดังนั้นพจน์ดังกล่าวจึงส่งผลน้อยมาก อย่างไรก็ตามรายละเอียดสำหรับพจน์อื่นนั้นได้แสดงไว้ตามสมการที่ (3.9) ถึง (3.12)

$$D(q) = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

โดย

$$d_{11} = -[I_{3xx} + I_{2xx} - I_{2zz} + 2d_3 m_3 G_{3z} + d_3^2 m_3] c_2^2 + 2d_3 m_3 G_{3z}$$

$$+ [d_3 m_3 G_{3x} + I_{2xz}] s_{22} + d_3^2 m_3 + I_{3xx} + I_{1yy} + I_{2xx} + k_{r1}^2 I_{1m}$$

$$d_{12} = d_{21} = -[2d_3 m_3 G_{3z} + d_3^2 m_3 + I_{3xx}] c_2^2 + I_{3xx}$$

$$+ d_3 m_3 G_{3x} s_{22} + 2d_3 m_3 G_{3z} + d_3^2 m_3$$

$$d_{13} = d_{31} = 0$$

$$d_{22} = 2d_3 m_3 G_{3z} + d_3^2 m_3 + I_{3yy} + I_{2yy} + k_{r2}^2 I_{2m}$$

$$d_{23} = d_{32} = -m_3 G_{3x}$$

$$d_{33} = m_3$$

$$\mathbf{h}(q, \dot{q}) = [h_1 \quad h_2 \quad h_3]^T \quad (3.10)$$

โดย

$$h_1 = [(m_3 d_3^2 + 2m_3 d_3 G_{3z} + I_{2xx} - I_{2zz} + I_{3xx}) s_{22} + (2d_3 m_3 G_{3x} + 2I_{2xz}) c_{22}] \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + m_3 [G_{3x} s_{22} + (d_3 + G_{3z})(1 - c_{22})] (\dot{\theta}_1 \dot{d}_3 + \frac{1}{2} \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3)$$

$$h_2 = 2m_3 [G_{3z} + d_3] \dot{\theta}_2 \dot{d}_3 - [(d_3 m_3 G_{3x} + I_{xz2}) c_{22} + \frac{1}{2} (d_3^2 m_3 + 2d_3 m_3 G_{3z} I_{xx3} - I_{zz2} + I_{xx2}) s_{22}] \dot{\theta}_1^2$$

$$h_3 = m_3 [(G_{3z} + d_3) c_{22} + \frac{1}{2} G_{3x} s_{22}] \dot{\theta}_1^2 - m_3 [G_{3z} + d_3] \dot{\theta}_2^2$$

$$\mathbf{c}(q) = [C_1 \quad C_2 \quad C_3]^T \quad (3.11)$$

โดย

$$C_1 = 0$$

$$C_2 = -g [(m_2 G_{2z} + m_3 G_{3z} + m_3 d_3) s_2 + (m_2 G_{2x} + m_3 G_{3x}) c_2]$$

$$C_3 = m_3 g c_2$$

$$\tau = [\tau_1 \quad \tau_2 \quad F_3]^T \quad (3.12)$$

จากสมการ (3.12) เนื่องจากข้อต่อแบบเลื่อน (ข้อต่อที่ 3) ถูกขับโดยมอเตอร์ผ่าน ball-screw แรง  $F_3$  ที่คำนวณได้นั้นจึงจำเป็นต้องแปลงให้อยู่ในรูปของแรงบิด  $\tau_3$  โดยสามารถคำนวณด้วยสมการ (3.13)

$$\tau_3 = \frac{F_3 D_p}{2} \left[ \frac{L_d + \mu \pi D_p}{\pi D_p - \mu L_d} \right] + (J_{motor} + J_{screw}) \left( \frac{2\pi \ddot{d}_3}{L_d} \right) \pm \tau_{friction} \quad (3.13)$$

โดย

$I_{ijk}$  คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของก้านต่อ  $i$  ตามแนวแกน  $ij$

$I_{mi}$  คือ โมเมนต์ความเฉื่อยของมอเตอร์ที่ขับก้านต่อ  $i$

$k_{ri}$  คือ อัตราทดของมอเตอร์  $i$

$m_i$  คือ มวลของก้านต่อ  $i$

$G_{ij}$  คือ ตำแหน่งจุดศูนย์กลางมวลของก้านต่อ  $i$  ตามแนวแกน  $j$

$D_p$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางวงกลมพิทช์ ของ Ball-screw

$L_d$  คือ ระยะระหว่างเกลียว (Lead) (mm/rev) ของ ball-screw

$\mu$  คือ สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของ Ball-screw

$J_{motor} + J_{screw}$  คือ ความเฉื่อยรวมของมอเตอร์และ Ball-screw

$\tau_{friction}$  คือ แรงบิดเสียดทานรวม

### 4. แขนกลนำแพนท่อม

แขนกลนำแพนท่อม (รูปที่ 3) ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลาย ทั้งด้านโปรแกรมออกแบบ 3 มิติ และงานวิจัยเกี่ยวกับระบบแขนกลนำ-ตาม เนื่องจากแพนท่อมสามารถตอบสนองความต้องการต่างๆ ของการวิจัยได้เป็นอย่างดี คือ มี 6 องศาอิสระ คือ สามารถระบุตำแหน่ง และการวางตัวของจุดปลายแขนได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสามารถระบุ

ตำแหน่งได้แม่นยำมากมีความละเอียดถึง 0.055 มิลลิเมตร นอกจากนี้ยังสามารถสร้างแรงโต้ตอบกับผู้ใช้ใน 3 ทิศทางได้ด้วย



รูปที่ 3 แขนกลนำแฟนท่อม [2]

การติดต่อกับแขนกลนำแฟนท่อมสามารถทำได้ง่าย เนื่องจากทางผู้ผลิตมีไดรฟ์เวอร์ของอุปกรณ์ (Device driver) และไลบรารี (Library) ให้มาพร้อมอยู่แล้ว สำหรับงานวิจัยนี้การติดต่อนั้นจะใช้เฉพาะส่วนที่ติดต่อกับระบบระดับล่าง (Low-level) หรือไลบรารี HDAPI เท่านั้น โดย HDAPI นี้สามารถเข้าถึงข้อมูลที่เป็นสำหรับการควบคุมได้ ได้แก่ ตำแหน่งในพิกัดคาร์ทีเซียน การวางตัวในพิกัดคาร์ทีเซียน ข้อมูลดิบของอุปกรณ์วัดมุม ความเร็วของปลายแขน การสร้างแรงในพิกัดคาร์ทีเซียน รวมไปถึงข้อมูลที่ใช้สำหรับการสอบเทียบต่างๆ ด้วย

นอกจากนั้นแฟนท่อมยังสามารถสร้างฐานเวลา เพื่อใช้สำหรับการสุ่มข้อมูลสำหรับใช้ในระบบควบคุม โดยอัตราการสุ่ม (Sampling rate) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เท่ากับ 1000 Hz โดยในการควบคุมนั้นได้เลือกใช้ฐานเวลาแบบ Asynchronous Scheduler

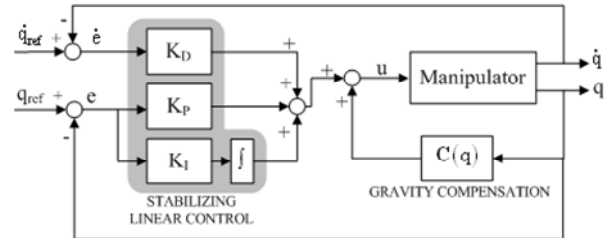
### 5. ระบบควบคุมแขนกลตาม

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการควบคุมระดับล่าง (Low-level control) ของแขนกลตาม โดยสำหรับงานวิจัยนี้ได้แบ่งการควบคุมออกเป็น 2 ลักษณะตามลักษณะการเคลื่อนที่ ซึ่งได้แก่ การเคลื่อนที่แบบหยาบ (Coarse motion) และ การเคลื่อนที่แบบละเอียด (Fine motion) ซึ่งมีความแตกต่างกันเล็กน้อยในแง่ของจุดประสงค์การทำงาน

สำหรับการเคลื่อนที่แบบหยาบนั้น จะเน้นให้สามารถเคลื่อนที่ได้เข้าสู่บริเวณที่ต้องการได้อย่างรวดเร็ว โดยไม่จำเป็นต้องมีความแม่นยำ ในขณะที่การเคลื่อนที่แบบละเอียด นั้นจะเน้นไปที่ความถูกต้องแม่นยำของตำแหน่งเป็นสำคัญ โดยการเคลื่อนที่นั้นจะเกิดขึ้นอย่างช้าๆ แต่ราบเรียบ

การควบคุมทั้งสองลักษณะนั้น ได้ใช้ระบบควบคุมลักษณะเดียวกัน แต่จะแตกต่างกันที่ค่าเกน (Gain) สำหรับการเลือกระบบควบคุมนั้น เมื่อได้พิจารณาแบบจำลองทางพลศาสตร์แล้ว ได้พบว่าการออกแบบทางกลที่เหมาะสม เช่น การเลือกใช้เฟืองอัตราทดสูงมาก การใช้กลไกที่ปราศจาก backlash และ การออกแบบโครงสร้างที่ลดผลจากแรงโน้มถ่วง นั้นสามารถลดผลของความไม่เชิงเส้น (Nonlinearity) ลงได้มาก อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาสัดส่วนของกำลังของมอเตอร์ต่อภาระจากน้ำหนักก้านต่อแล้ว พบว่าปัจจัยจากแรงโน้มถ่วงมีผลกระทบต่อความแม่นยำในการเคลื่อนที่อย่างมาก โดยเฉพาะก้านต่อที่ 2 ซึ่งเคลื่อนที่ในแนวตั้งฉากกับพื้นโลก ดังนั้นเพื่อลดความคลาดเคลื่อนดังกล่าว จึงได้

เลือกใช้ตัวควบคุมแบบ PID ร่วมกับการชดเชยแรงโน้มถ่วง (PID-Gravity compensation) โดยแผนผังการควบคุมได้แสดงไว้ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ระบบควบคุมแบบ PID-Gravity compensation

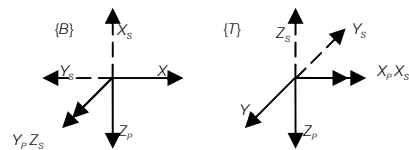
ดังเหตุผลที่ได้กล่าวมาข้างต้นเกี่ยวกับปัจจัยกายภาพ ตัวควบคุมแบบ PID ร่วมกับการชดเชยแรงโน้มถ่วงได้ถูกนำมาใช้กับโครงสร้าง 3 ข้อต่อแรกเท่านั้น สำหรับโครงสร้างส่วนข้อมือ ได้ใช้ตัวควบคุมแบบ PID ซึ่งเป็นการควบคุมแต่ละข้อต่ออย่างอิสระต่อกัน (Decentralize)

### 6. การเชื่อมต่อระหว่างแขนกลนำ และ แขนกลตาม

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการควบคุมระดับสูง (High-level control) ซึ่งเป็นกระบวนการประมวลผลจากข้อมูลที่ได้รับจากแขนกลนำ เพื่อหามุมมองอ้างอิงของแขนกลตาม โดยมุมมองอ้างอิงเหล่านี้จะถูกส่งไปใช้ในการควบคุมแขนกลตามในระดับล่างต่อไป

#### 6.1 ความแตกต่างของการตั้งแกนระหว่างแขนกลทั้งสอง

แขนกลนำแฟนท่อมจะส่งข้อมูลในรูปแบบของ Transformation Matrix โดยข้อมูลนี้ยังไม่สามารถส่งไปยังแขนกลตามเพื่อเป็นสัญญาณอ้างอิงได้โดยตรง เนื่องจากการตั้งแกนที่ฐานและปลายแขน ระหว่างแขนกลนำ และ แขนกลตามมีลักษณะต่างกัน ดังรูปที่ 5 โดยที่ S แทนแขนกลตาม P แทนแขนกลนำ {B} แทนกรอบอ้างอิงของฐาน (Base frame) และ {T} แทนกรอบอ้างอิงของปลายแขน (Tool frame)



รูปที่ 5 การตั้งแกนของแขนกลนำ และ แขนกลตาม

การแปลงให้แกนของแขนกลทั้งสองมีความสัมพันธ์กันสามารถทำได้โดยการแม็พเมทริกซ์ ดังแสดงในสมการที่ (6.1)

$$\begin{matrix} SB \\ ST \end{matrix} \mathbf{T} = \begin{matrix} SB \\ PT \end{matrix} \mathbf{T} \begin{matrix} PB \\ PT \end{matrix} \mathbf{T} \begin{matrix} PT \\ ST \end{matrix} \mathbf{T} \quad (6.1)$$

โดยที่ ST คือ กรอบอ้างอิงของปลายแขนของแขนกลตาม SB คือ กรอบอ้างอิงของฐานของแขนกลตาม PT คือ กรอบอ้างอิงของปลายแขนของแขนกลนำ และ PB คือ กรอบอ้างอิงของฐานของแขนกลนำ

จากเมทริกซ์  $\begin{matrix} PB \\ PT \end{matrix} \mathbf{T}$  ที่ได้จากแฟนท่อม ตามสมการที่ (6.2) เมื่อทำการแม็พโดยสมการที่ (6.1) แล้ว จะได้เมทริกซ์เทียบกับแขนกลตาม

$^{SB}_{ST}T$  ดังสมการที่ (6.3) ซึ่งจะนำไปแปลงเป็นสัญญาณการอ้างอิงสำหรับแขนกลตามต่อไป

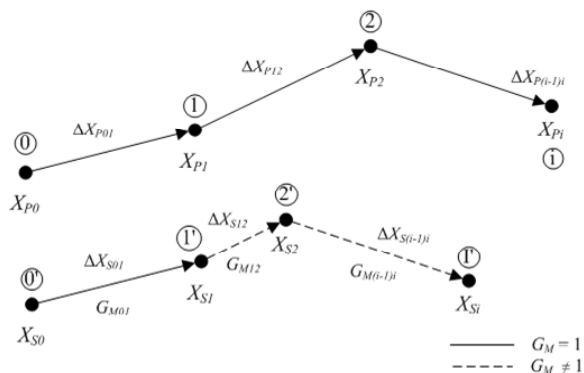
$${}^{PB}_{PT}T = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6.2)$$

$${}^{SB}_{ST}T = \begin{bmatrix} -n_z & o_z & a_z & -p_z \\ -n_x & o_x & a_x & -p_x \\ n_y & -o_y & -a_y & p_y \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6.3)$$

## 6.2 การเปลี่ยนแปลงระหว่างการเคลื่อนที่แบบหยวบและละเอียด

การเคลื่อนที่ทั้งสองลักษณะ จะถูกระบุด้วยค่าเกนขยายตำแหน่งการเคลื่อนที่ (Motion amplified gain)  $G_M$  ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างระยะการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลตาม ต่อระยะการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลนำ และในการทดลองโดยทั่วไปผู้วิจัยได้กำหนดให้  $G_M = 1$  สำหรับการเคลื่อนที่แบบหยวบซึ่งมีผลให้การเคลื่อนที่ของแขนกลทั้งสองมีระยะเท่ากัน และ  $G_M = 0.1$  สำหรับการเคลื่อนที่แบบละเอียดซึ่งส่งผลให้แขนกลตามเคลื่อนที่ไปในระยะที่น้อยกว่าแขนกลนำ 10 เท่า อย่างไรก็ตาม เพื่อความสะดวกในการบังคับแขนกลตามของผู้ใช้งาน ค่าเกน  $G_M$  จะนำไปใช้กับการขยายตำแหน่งเท่านั้น ไม่มีความสัมพันธ์กับวงตัวของปลายแขนเลย ซึ่งหมายความว่า การวางตัวของปลายแขนกลตาม และ ปลายแขนกลนำจะอยู่ในลักษณะเดียวกันตลอดเวลาสำหรับการเคลื่อนที่ทุกลักษณะ

เนื่องจากผู้วิจัยต้องการออกแบบให้สามารถสลับเปลี่ยนลักษณะการเคลื่อนที่ได้อย่างรวดเร็วตลอดเวลาของการใช้งาน จึงทำให้ค่าเกน  $G_M$  จำเป็นต้องถูกรับเข้ามาตลอดทุกรอบการสุ่มข้อมูล โดยรูปที่ 6 แสดงการเคลื่อนที่ของตำแหน่งของปลายแขนกลทั้งสองเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงค่าเกน  $G_M$  โดยที่เส้นเชื่อมต่อแต่ละเส้นแสดงถึงการเคลื่อนที่ภายในหนึ่ง รอบการสุ่มข้อมูล



รูปที่ 6 ตำแหน่งของปลายแขนกลทั้งสอง ขณะที่เปลี่ยนค่า  $G_M$

โดย  $\mathbf{X} = [P_x \ P_y \ P_z]^T$

$\mathbf{X}_{P0}$  คือ ตำแหน่งเริ่มต้นของปลายแขนกลนำ

$\mathbf{X}_{Pi}$  คือ ตำแหน่งของปลายแขนกลนำ ที่ตำแหน่ง  $i$

$\Delta\mathbf{X}_{Pij}$  คือ ระยะระหว่างตำแหน่ง  $i$  และ  $j$  ของแขนกลนำ

$\mathbf{X}_{S0}$  คือ ตำแหน่งเริ่มต้นของปลายแขนกลตาม

$\mathbf{X}_{Si}$  คือ ตำแหน่งของปลายแขนกลตาม ที่ตำแหน่ง  $i$

$\Delta\mathbf{X}_{Sij}$  คือ ระยะระหว่างตำแหน่ง  $i$  และ  $j$  ของแขนกลตาม

$G_{Mij}$  คือ ค่าเกนขยายตำแหน่งระหว่างตำแหน่ง  $i$  และ  $j$

ตำแหน่งของปลายแขนกลตาม ณ เวลาใดๆ สามารถคำนวณได้จากค่าเกน  $G_M$  ของช่วงเวลานั้นๆ และ ข้อมูลของแขนกลทั้งสองในรอบการสุ่มข้อมูล ครั้งก่อน ตามสมการที่ (6.4)

$$\mathbf{X}_{Si} = \mathbf{X}_{S(i-1)} + G_{M(i-1)i} (\mathbf{X}_{Pi} - \mathbf{X}_{P(i-1)}) \quad (6.4)$$

เมื่อได้ตำแหน่งอ้างอิงของแขนกลตาม ( $\mathbf{X}_{Si}$ ) จากสมการที่ (6.4) แล้ว จะนำตำแหน่งดังกล่าวมาแทนลงในเวกเตอร์ตำแหน่งในเมทริกซ์  ${}^{SB}_{ST}T$  ในสมการที่ (6.3) จากนั้นจึงนำเมทริกซ์ดังกล่าวที่ได้ถูกแก้ไขตำแหน่งแล้วมาหามุมอ้างอิงสำหรับแต่ละข้อต่อของแขนกลตาม โดยใช้สมการคิเนมาติกส์ย้อนกลับ เมื่อได้มุมอ้างอิงของทั้งหกข้อต่อแล้วจึงนำไปควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกลตามในระดับล่างต่อไป

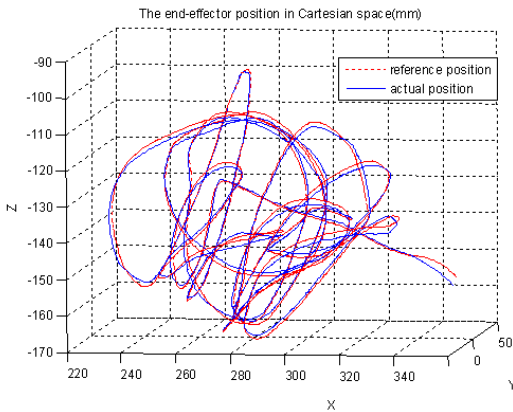
## 7. วิธีการและผลการทดสอบ

ผู้วิจัยได้แบ่งการทดสอบเป็น 2 ส่วน คือ การทดสอบความแม่นยำ และการทดสอบโดยใช้งานจริง

### 7.1 การทดสอบความแม่นยำ

หลังจากการปรับตั้งและสอบเทียบแล้ว การทดลองนี้ได้ถูกกำหนดขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาความแม่นยำขณะเคลื่อนที่ โดยเส้นทางการเคลื่อนที่นั้นถูกสร้างขึ้นแบบสุ่มโดยแขนกลนำแพนท่อม ซึ่งผู้วิจัยเป็นผู้บังคับเส้นทาง

การทดลองนี้ได้กระทำกับการเคลื่อนที่ทั้งสองลักษณะ คือ แบบหยวบ ( $G_M = 1$ ) และ แบบละเอียด ( $G_M = 0.1$ ) สำหรับผลการทดลองนั้น ได้พิจารณาเปรียบเทียบ ความผิดพลาดของตำแหน่งและมุมการวางตัวของปลายแขนกลนำกับปลายแขนกลตามในพิกัดคาร์ทีเซียน โดยการเคลื่อนที่แบบหยวบนั้น มีความผิดพลาดของตำแหน่งเฉลี่ย 2.117 มิลลิเมตร และความผิดพลาดของการวางตัวเฉลี่ย 0.728 องศา ในขณะที่เคลื่อนที่แบบละเอียดนั้นมีความผิดพลาดของตำแหน่งเฉลี่ย 0.862 มิลลิเมตร และความผิดพลาดของการวางตัวเฉลี่ย 0.472 องศา โดยตัวอย่างเส้นทางเดินหนึ่งของการทดสอบได้แสดงไว้ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 เส้นทางเดินแบบสุ่ม ของตำแหน่งปลายของแขนกลทั้งสอง ในพิกัดคาร์ทีเซียน

## 7.2 การทดสอบโดยการใช้งานจริง

ในการทดลองในขั้นต้นนั้น ผู้วิจัยได้ทดลองใช้แขนกลนำบังคับแขนกลตามให้เคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง ซึ่งห่างกันประมาณ 3 มิลลิเมตร โดยผู้ทดลองสามารถสังเกตภาพการเคลื่อนที่ของแขนกลนำได้ตลอดเวลา โดยผ่านทางกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัล [5] ที่ติดตั้งไว้กับฐานของแขนกลตาม โดยลักษณะการจับอุปกรณ์ทดลองแสดงไว้ดังรูปที่ 8 และ ตัวอย่างภาพจากกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัลขณะทดลอง ดังรูปที่ 9 ผลการทดลองนั้น ปลายแขนกลตามสามารถเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ผู้ทดลองคาดหวังได้อย่างรวดเร็ว และ แม่นยำ โดยความผิดพลาดไม่เกิน 0.5 มิลลิเมตร ทั้งนี้ผลดังกล่าวขึ้นอยู่กับความชำนาญของผู้ทดลองด้วย

ในการทดลองขั้นต่อไปนั้น ผู้วิจัยจะทดลองใช้แขนกลตามหนีบจับเส้นลวดเพื่อร้อยเข้ารูเข็มที่มีขนาดไม่เกิน 1 มิลลิเมตร โดยการทดลองส่วนนี้จุดประสงค์ที่เพิ่มขึ้นคือ ทดสอบความคล่องตัวของการบังคับแขนกลทั้งสองว่ามีความสะดวกมากน้อยเพียงใด



รูปที่ 8 ลักษณะการจับอุปกรณ์ทดลองแสดง



รูปที่ 9 ตัวอย่างภาพจากกล้องจุลทรรศน์ดิจิทัลขณะทดลอง

## 8. สรุปผลการทดลอง

ความแม่นยำของระบบแขนกลนำ-ตาม มีความแตกต่างกันตามลักษณะการเคลื่อนที่ของแขนกล โดยการเคลื่อนที่แบบละเอียดนั้นมีความผิดพลาดน้อยกว่า 1 มิลลิเมตร ซึ่งเพียงพอกับการใช้งานจริง ทั้งนี้เนื่องจากเป็นระบบแขนกลนำและตาม ความผิดพลาดดังกล่าวสามารถชดเชยได้ในระดับหนึ่งโดยการบังคับของผู้ใช้เอง

## 9. ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากการใช้งานระบบแขนกลนำ-ตามให้เกิดประสิทธิภาพ และความแม่นยำสูงสุดนั้น ความชำนาญของผู้ใช้งานเป็นองค์ประกอบที่สำคัญมาก ดังนั้นหากเพิ่มเติมส่วนของวิธีการที่ลดความไม่สะดวกส่วนนี้ลงได้จะส่งผลให้การทำงานมีประสิทธิภาพขึ้นมาก โดยวิธีการดังกล่าวได้แก่ เพิ่มระบบสะท้อนแรง (Force feedback) เพื่อให้ผู้ใช้ได้รับรู้ถึงสภาพที่เกิดขึ้นจริง และ การใช้ขอบเขตเสมือนจริง (Virtual wall) เพื่อจำกัดขอบเขตการเคลื่อนที่ของแขนกลตาม ให้เป็นไปในบริเวณพื้นที่ที่ต้องการเท่านั้น

## เอกสารอ้างอิง

1. The da Vinci Surgical System [Online], Available from: <http://www.intuitivesurgical.com/>
2. SensAble Technologies, Inc., [Online], Available from: <http://www.sensable.com/haptic-phantom-omni.htm>
3. John J.Craig, Introduction to Robotics Mechanical and Control, International Edition, Third Edition, Pearson Prentice Hall, Pearson Education International, ISBN 0-13-123629-6
4. Lorenzo Sciacivco, Bruno Siciliano, Modeling and Control of Robot Manipulators, University of Naples, Naples, Italy, McGraw-Hill Book Company, ISBN-0-07-114726-8
5. Dino Lite Digital Microscope Plus, ANMO Electronics Corporation, [Online], Available from: <http://www.anmo.com.tw/db/products-more.asp?id=33>
6. Viboon Sangveraphunsiri, Control of Dynamic Systems, Second Edition, Chulalongkorn University Press, ISBN 974-13-3393-5
7. Gerry B. Andeen, Editor-in-Chief, Robot design Handbook, SRI International, McGraw-Hill Book Company, ISBN 0-07-060777-X
8. Lung-Wen Tsai, Robot Analysis: The Mechanics of Serial and Parallel Manipulators, Department of Mechanical Engineering and Institute for Systems Research, University of Maryland, A Wiley-Interscience Publication, ISBN 0-471-21593-7