

**การทำงานร่วมกันของแขนกลนำ-ตาม 2 ชุด ที่มีการสะท้อนกลับของแรง
สำหรับการทำงานขนาดเล็ก
Collaborated Two Master-Slave Manipulators with Force Reflection
for Miniature Tasks**

ณัฐพงษ์ นุชประยูร และ วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ถ.พญาไท ปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330.

ติดต่อ: โทรศัพท์: 0-2218-6448, โทรสาร: 0-2218-6437

E-mail: Nuttapong.Nu@student.chula.ac.th, viboon.s@eng.chula.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาแขนกลนำ-ตาม 2 ชุด ที่นำมาทำงานร่วมกันในลักษณะการทำงานแบบ 2 มือ โดยมีแรงสะท้อนกลับและใช้สำหรับทำงานขนาดเล็ก ในขณะเดียวกันก็ต้องการความแม่นยำของการทำงานของแขนกลตามจากคำสั่งของแขนกลนำ งานวิจัยนี้เป็นการทดลองเพื่อทดสอบความสามารถในการทำงานร่วมกันของแขนกลนำ-ตาม 2 ชุด ภายใต้สภาพแวดล้อมจำลองการใช้งานที่เหมาะสม ผลการทดลองเบื้องต้นเป็นประโยชน์ในการพัฒนารูปแบบการทำงานแบบ 2 มือที่เหมาะสมและสะดวกต่อการนำไปใช้ทำงานขนาดเล็ก

คำหลัก: แขนกลนำ-ตาม 2 ชุด / ทำงานร่วมกัน / ทำงานขนาดเล็ก

Abstract

This research work is the development of a two-master-slave manipulator system with force reflection for 2-hand operations. Its target operation is for miniature tasks within desired precisions. This work is concentrating on experiment of collaborated operation of the two-master-slave manipulators under a defined environment. The experimental results are useful for further development of 2-hand operation with force reflection that is suitable for miniature task operation.

Keywords: Two master-slave manipulators / Collaborated / Miniature tasks.

1. บทนำ

ในปัจจุบัน ระบบแขนกลนำ-ตามถูกนำมาใช้ในงานหลายประเภท เช่น ในด้านอุตสาหกรรมที่มีผู้ควบคุมระยะไกล (Remote Control) ด้านการแพทย์ เพื่อช่วยการผ่าตัดในบริเวณแคบๆหรือต้องการลดขนาดของแผล และงานด้านวิทยาศาสตร์ สำหรับงานวิจัยที่ต้องการความละเอียดและความแม่นยำสูง เป็นต้น ระบบดังกล่าวมีข้อได้เปรียบคือ เป็นการนำข้อดีของมนุษย์และหุ่นยนต์มารวมไว้ด้วยกัน โดยมนุษย์เป็นผู้ควบคุมแขนกลนำ มีหน้าที่ตัดสินใจและตอบสนองต่อสถานการณ์ที่เกิดขึ้น ในขณะที่แขนกลตามทำงานได้แม่นยำตามข้อมูลที่ผ่านการประมวลผลจากแขนกลนำ ซึ่งสามารถทำงานที่มีความ

ละเอียดสูง และสามารถควบคุมการทำงานโดยผู้สั่งงานอยู่ในระยะไกลจากตัวแขนหุ่นยนต์ได้

โดยทั่วไป ระบบแขนกลนำ-ตามที่นำมาใช้งานจริงประกอบด้วยชุดแขนกลตั้งแต่ 2 ชุดขึ้นไป เพื่อเพิ่มความสะดวก พื้นที่การทำงาน และขีดความสามารถในการใช้งาน เช่น การช่วยในการยึดจับสิ่งของ การกำหนดให้แขนกลแต่ละชุดมีหน้าที่ใช้งานแตกต่างกันไป เป็นต้น ในงานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาระบบแขนกลนำ-ตาม 2 ชุด ดังรูปที่ 1 และ 2 โดยมีจุดประสงค์เพื่อให้สอดคล้องกับการทำงานร่วมกันระหว่างมือทั้ง 2 ข้างของมนุษย์ ผู้ใช้งานสามารถควบคุมแขนกลตามได้สะดวกด้วย

แขนกลนำ โดยมองเห็นการทำงานบนจอคอมพิวเตอร์ ซึ่งรับข้อมูลภาพผ่านทางกล้องที่ติดตั้งไว้

การทำงานของระบบแขนกลนำ-ตาม 2 ชุด แยกเป็นอิสระออกจากกัน โดยแขนกลตามแต่ละข้างรับข้อมูลจากแขนกลนำ ซึ่งควบคุมด้วยมือแต่ละข้างของผู้ใช้งาน แขนกลตามทั้ง 2 ข้างทำงานร่วมกันภายในบริเวณที่จำกัดขอบเขต ด้วยโหมดการทำงานที่เหมาะสมสำหรับทำงานขนาดเล็ก โดยการปรับอัตราส่วนการเคลื่อนที่ระหว่างแขนกลนำและแขนกลตาม ให้แขนกลตามเคลื่อนที่เป็นสัดส่วนระยะทางน้อยกว่ามาก เมื่อเทียบกับระยะอ้างอิงที่ได้รับจากแขนกลนำ ทั้งนี้เพื่อให้ผู้ใช้งานมีความรู้สึกสะดวกและควบคุมง่าย เมื่อแขนกลตามเคลื่อนที่ภายในบริเวณที่เล็กมากหรือทำงานกับชิ้นงานขนาดเล็ก นอกจากนี้ ในระหว่างการทำงานมีระบบกำแพงเสมือน (Virtual Fixture) ทำหน้าที่สร้างแรงต้านกลับสู่มือของผู้ใช้งาน เมื่อปลายแขนกลตามเคลื่อนที่ออกนอกบริเวณที่ใช้งาน เพื่อป้องกันไม่ให้ปลายแขนกลตามชนกับสิ่งกีดขวางภายนอกขอบเขตที่กำหนดไว้



รูปที่ 1 แขนกลนำ PHANTOM® Omni™ 2 แขน



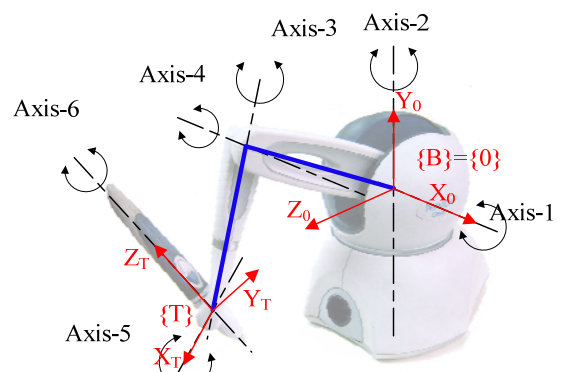
รูปที่ 2 แขนกลตาม RCRT-1 manipulator 2 แขน

2. แขนกลนำ PHANTOM® Omni™ Haptic Device

PHANTOM® Omni™ Haptic Device ในรูปที่ 3 เป็นแขนกลนำแบบอนุกรม 6 องศาอิสระที่มีตัววัดตำแหน่ง (Encoder) ด้วยความละเอียดในระดับ 0.055 มิลลิเมตร [7] และสามารถสร้างแรงสะท้อนกลับได้ใน 3 ทิศทาง (X, Y, Z) แขนกลดังกล่าวเป็นผลิตภัณฑ์ของบริษัท SensAble Technologies การติดตั้งแกนโครงสร้างของแขนกลนำนี้มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 4 โดยโครงสร้างจะเป็นแบบ 6 องศาอิสระ และข้อต่อจะมีการเคลื่อนที่ในลักษณะหมุนทั้ง 6 องศาอิสระ หรือที่เรียกว่าแบบ Articulate ได้



รูปที่ 3 PHANTOM® Omni™ Haptic Device



รูปที่ 4 การติดตั้งแกนของแขนกลนำ

3. แขนกลตาม RCRT-1 Manipulator

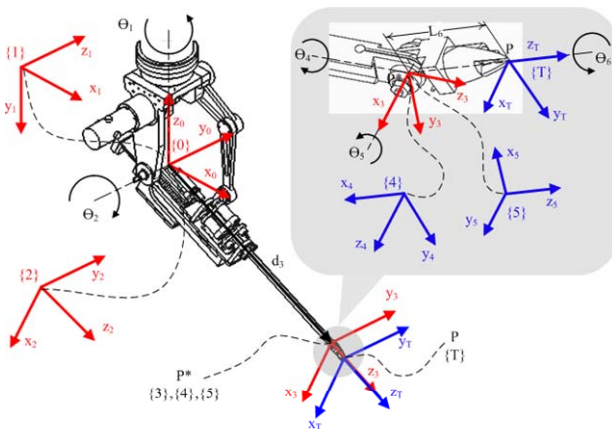
แขนหุ่นยนต์ตาม ชื่อ RCRT-1 Manipulator (Regional Center of Robotic Technology – no.1 Manipulator) ดังแสดงในรูปที่ 5 เป็นแขนกลตามแบบอนุกรม 6 องศาอิสระ ที่มีความแม่นยำในระดับ 0.5 มิลลิเมตร และถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อใช้ประโยชน์ในงานวิจัย



รูปที่ 5 RCRT-1 Manipulator

3.1 โครงสร้างของแขนกลตาม

RCRT-1 Manipulator ถูกออกแบบให้มีโครงสร้างการเรียงต่อของข้อต่อเป็นแบบอนุกรมหรือแบบเปิด (Open-Chain) เหมาะสำหรับการทำงานขนาดเล็กหรือบริเวณแคบ เป็นต้น ทุกข้อต่อขับเคลื่อนด้วยเซอร์โวมอเตอร์ โดยที่แขนกลนำ PHANTOM® Omni™ Haptic Device จะมีลักษณะการเคลื่อนที่ในลักษณะเดียวกับแขนกล RCRT-1 เพื่อให้เหมาะสมสำหรับการควบคุมการทำงานในลักษณะแขนกลนำ-ตาม โดยแขนกลตาม RCRT-1 นั้นประกอบด้วยข้อต่อแบบหมุน (Revolute Joint) และข้อต่อแบบเลื่อน (Prismatic Joint) ในรูปแบบ R-R-P-R-R-R การติดตั้งแกนของแขนกลตามแสดงได้ดังรูปที่ 6 และค่าพารามิเตอร์แบบเดนาวิต-ฮาร์เทนเบิร์ก (Denavit-Hartenberg) แสดงได้ดังตารางที่ 1 [3]



รูปที่ 6 การติดตั้งแกนของแขนกลตาม

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์แบบเดนาวิต-ฮาร์เทนเบิร์กของแขนกลตาม

i	a_{i-1}	α_{i-1}	d_i	θ_i
1	L_1	-90°	0	θ_1
2	0	90°	0	θ_2
3	0	0	d_3	0
4	0	-90°	0	θ_4
5	0	90°	0	θ_5
T	0	0	L_6	θ_6

3.2 แบบจำลองพลวัตของแขนกลตาม

แบบจำลองพลวัต (Dynamic Model) เขียนขึ้นมาด้วยวิธีการลากรางจ์-ออยเลอร์ (The Lagrange-Euler Method) โดยสนใจข้อต่อที่ 1-3 เท่านั้น เนื่องจากข้อต่อที่ 4-6 มีผลของความเฉื่อยน้อยมากเมื่อเทียบกับ 3 ข้อต่อแรก นอกจากนี้ในงานวิจัยนี้ไม่สนใจผลกระทบของแรงเสียดทานที่เกิดจากความเร็ว เนื่องจากในการทำงานจริงแขนกลตามถูกออกแบบให้เคลื่อนที่ด้วยความเร็วต่ำมาก ค่าแรงเสียดทานจึงมีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับตัวแปรอื่น ดังนั้นแบบจำลองพลวัตของแขนกลตามสามารถเขียนขึ้นมาได้ดังสมการที่ (1)

$$\tau - J^T(q)h = D(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q}) + G(q) \quad (1)$$

โดยแต่ละตัวแปรมีความหมายดังนี้

τ คือ แรงขับจากมอเตอร์

D คือ พจน์ของความเฉื่อย

C คือ พจน์ของแรงโคลิอริสและแรงสู่ศูนย์กลาง

G คือ พจน์ของแรงโน้มถ่วง

q คือ ตัวแปรค่ามุม θ หรือระยะ d

J คือ จาโคเบียน (Jacobian) ของแขนกลตาม

h คือ แรงและโมเมนต์ภายนอกที่กระทำกับแขนกล

สำหรับรายละเอียดของแต่ละตัวแปร แสดงได้ดังสมการที่ (2) - (6)

$$\tau = \begin{bmatrix} \tau_1 & \tau_2 & F_3 \end{bmatrix}^T \quad (2)$$

τ_1, τ_2 คือ แรงบิดสำหรับข้อต่อแบบหมุน

F_3 คือ แรงป้อนสำหรับข้อต่อแบบเลื่อน

$$D(q) = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$d_{11} = -[I_{3xx} + I_{2xx} - I_{2zz} + 2d_3 m_3 G_{3z} + d_3^2 m_3] c_2^2 + 2d_3 m_3 G_{3z} + [d_3 m_3 G_{3x} + I_{2xz}] s_{22} + d_3^2 m_3 + I_{3xx} + I_{1yy} + I_{2xx} + k_{r1}^2 I_{1m}$$

$$d_{12} = d_{21} = -[2d_3 m_3 G_{3z} + d_3^2 m_3 + I_{3xx}] c_2^2 + I_{3xx} + d_3 m_3 G_{3x} s_{22} + 2d_3 m_3 G_{3z} + d_3^2 m_3$$

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

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

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

$$d_{33} = m_3$$

$$C(q, \dot{q}) = [C_1 \quad C_2 \quad C_3]^T \quad (4)$$

$$C_1 = [(m_3 d_3^2 + 2m_3 d_3 G_{3z} + I_{2xx} - I_{2zz} + I_{3xx}) s_{22} + (2d_3 m_3 G_{3x} + 2I_{2xz}) c_{22}] \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + m_3 [G_{3x} s_{22} + (d_3 + G_{3z})(1 - c_{22})] (\dot{\theta}_1 \dot{d}_3 + \frac{1}{2} \dot{\theta}_2 \dot{\theta}_3)$$

$$C_2 = 2m_3 [G_{3z} + d_3] \dot{\theta}_2 \dot{d}_3 - \left[\frac{1}{2} (d_3^2 m_3 + 2d_3 m_3 G_{3z} I_{xx3} - I_{zz2} + I_{xx2}) s_{22} + (d_3 m_3 G_{3x} + I_{xz2}) c_{22} \right] \dot{\theta}_1^2$$

$$C_3 = m_3 \left[(G_{3z} + d_3) c_{22} + \frac{1}{2} G_{3x} s_{22} \right] \dot{\theta}_1^2 - m_3 [G_{3z} + d_3] \dot{\theta}_2^2$$

$$G(q) = [G_1 \quad G_2 \quad G_3]^T \quad (5)$$

$$G_1 = 0$$

$$G_2 = -g \left((m_2 G_{2z} + m_3 G_{3z} + m_3 d_3) s_2 + (m_2 G_{2x} + m_3 G_{3x}) c_2 \right)$$

$$G_3 = m_3 g c_2$$

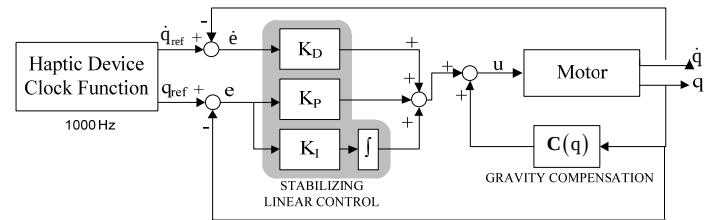
$$h = \begin{bmatrix} f \\ \mu \end{bmatrix} \quad (6)$$

f คือ แรงภายนอกที่กระทำกับปลายแขนกลตาม

μ คือ โมเมนต์ภายนอกที่กระทำกับปลายแขนกลตาม

3.3 ตัวควบคุมการทำงานของแขนกลตาม

แขนกลตามทั้ง 2 ข้างใช้ตัวควบคุมแบบ PID และมีตัวชดเชยแรงโน้มถ่วง ในการควบคุมการทำงานของมอเตอร์แต่ละแกนที่แยกเป็นอิสระต่อกัน นอกจากนี้ การทำงานอาศัยฟังก์ชันกำหนดจังหวะของแขนกลตาม (Haptic Device) เพื่อส่งข้อมูลให้แขนกลตามทั้ง 2 ข้างมีความเร็วในการทำงานพร้อมกัน ที่ความถี่ระดับ 1000 Hz ดังรูปที่ 7



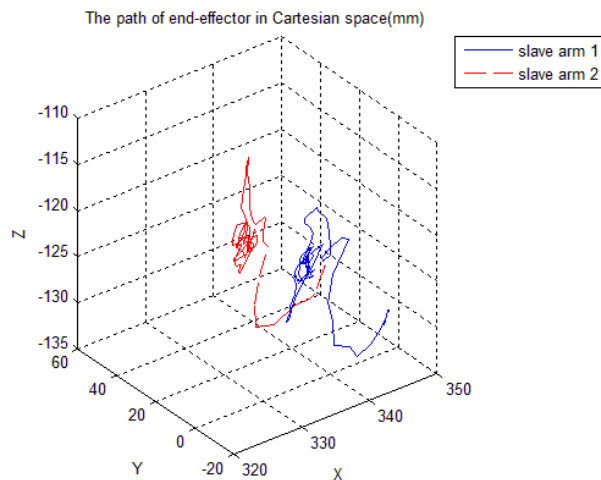
รูปที่ 7 ตัวควบคุมการทำงานของมอเตอร์ในแต่ละแกน

4. การทดลอง

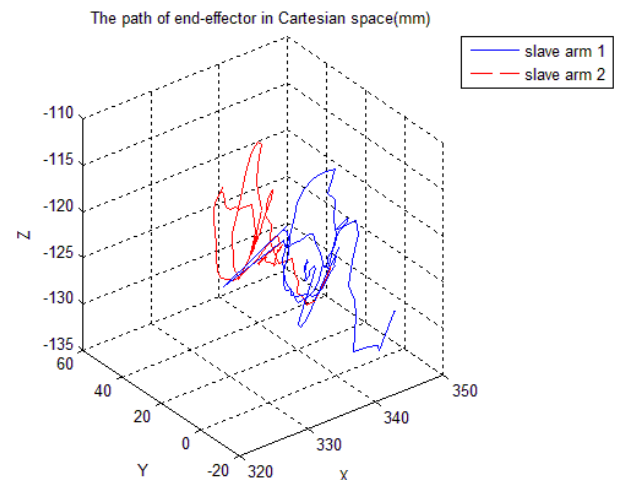
การทดลองในเบื้องต้น กำหนดให้แขนกลทั้งสองข้างเคลื่อนที่เป็นอิสระต่อกัน โดยมีการตอบสนองในความถี่ระดับเดียวกันที่ 1000 Hz ตำแหน่งในการเคลื่อนที่ของแขนกลตามคำนวณมาจากค่ามุมอ้างอิงในแต่ละแกนของแขนกลนำแพนท่อม จากนั้นรับค่ามุมที่มอเตอร์แต่ละแกนเคลื่อนที่ผ่านทาง Encoder แล้วนำมาคำนวณและแสดงผลในรูปแบบของพิกัด 3 มิติ การทดลองได้กำหนดรูปแบบการทำงานของแขนกลนำ-ตาม 2 ชุด ดังต่อไปนี้

4.1 แขนกลนำ-ตาม 2 ชุด เคลื่อนที่ด้วยโหมดการทำงานแบบหยาบ

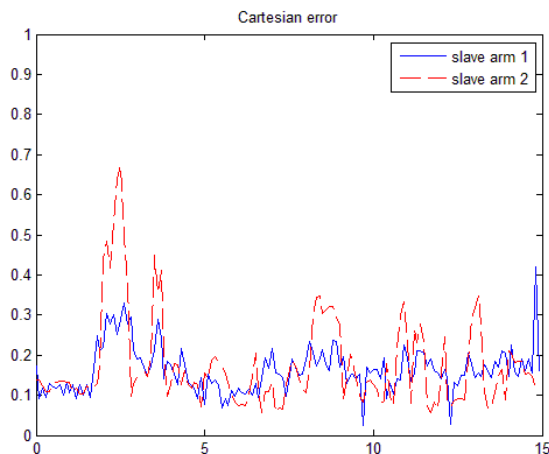
ระยะทางในการเคลื่อนที่ของแขนกลตามเป็นสัดส่วนเทียบเท่ากับแขนกลนำ รูปที่ 8 แสดงการเคลื่อนที่ใน 3 มิติของแขนกลตามทั้ง 2 ข้าง และรูปที่ 9 แสดงค่าความผิดพลาดของตำแหน่งปลายแขนกลในพิกัดคาร์ทีเซียน



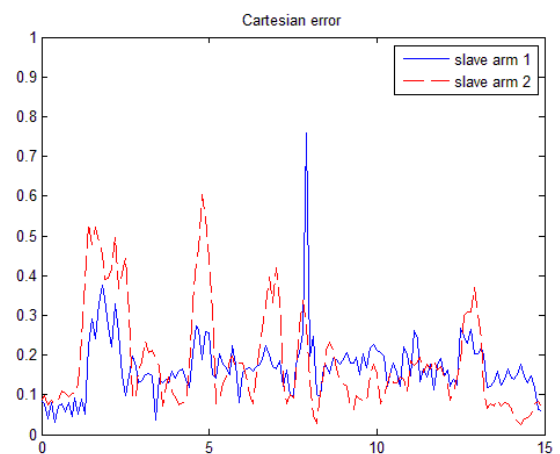
รูปที่ 8 การเคลื่อนที่ใน 3 มิติของแขนกลตามทั้ง 2 ข้าง
ในโหมดการทำงานแบบหยาบ



รูปที่ 10 การเคลื่อนที่ใน 3 มิติของแขนกลตามทั้ง 2 ข้าง
ในโหมดการทำงานแบบละเอียด



รูปที่ 9 ค่าความผิดพลาดของตำแหน่งปลายแขนกลตาม
ทั้ง 2 ข้าง ในโหมดการเคลื่อนที่แบบหยาบ



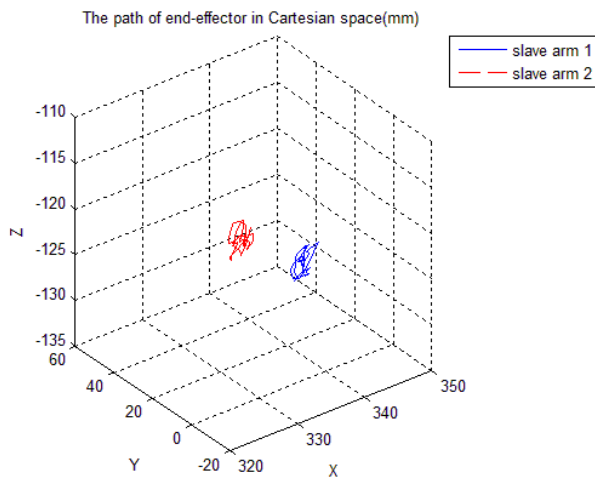
รูปที่ 11 ค่าความผิดพลาดของตำแหน่งปลายแขนกลตาม
ทั้ง 2 ข้าง ในโหมดการเคลื่อนที่แบบละเอียด

4.2 แขนกลนำ-ตาม 2 ชุด เคลื่อนที่ด้วยโหมดการทำงานแบบละเอียด

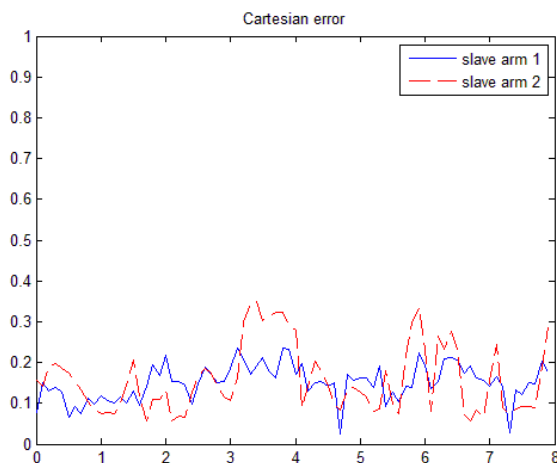
กำหนดให้ระยะทางในการเคลื่อนที่ของแขนกลตามเป็นสัดส่วนน้อยกว่าแขนกลนำ 10 เท่า รูปที่ 10 แสดงการเคลื่อนที่ใน 3 มิติของแขนกลตามทั้ง 2 ข้าง และรูปที่ 11 แสดงค่าความผิดพลาดของตำแหน่งปลายแขนกลในพิกัดคาร์ทีเซียน

4.3 เคลื่อนที่แขนกลนำ-ตาม 2 ชุด ด้วยโหมดการทำงานแบบละเอียด ภายใต้การทำงานของกำแพงเสมือน

แขนกลตามแต่ละข้างเคลื่อนที่ภายในขอบเขตจำกัดด้วยกำแพงเสมือน (Virtual Fixture) ในที่นี้กำหนดให้กำแพงเสมือนเป็นรูปทรงกลมที่มีรัศมีเท่ากับ 20 มิลลิเมตร รูปที่ 12 แสดงการเคลื่อนที่ใน 3 มิติของแขนกลตามทั้ง 2 ข้าง และรูปที่ 13 แสดงค่าความผิดพลาดของตำแหน่งปลายแขนกลในพิกัดคาร์ทีเซียน



รูปที่ 12 การเคลื่อนที่ใน 3 มิติของแขนกลตามทั้ง 2 ข้าง ภายใต้การทำงานของกำแพงเสมือนรูปทรงกลม



รูปที่ 13 ค่าความผิดพลาดของตำแหน่งปลายแขนกลตามทั้ง 2 ข้าง ในโหมดการเคลื่อนที่แบบละเอียด ภายใต้การทำงานของกำแพงเสมือน

5. สรุปผลการทดลอง

การทดลองข้างต้น แสดงให้เห็นการทำงานเบื้องต้นของแขนกลนำ-ตาม 2 ชุด ที่นำมาใช้ทำงานร่วมกัน โดยอ้างอิงตำแหน่งจุดพิกัดเดียวกัน และทำงานพร้อมกันโดยอาศัยการกำหนดจังหวะในการทำงานจากแขนกลนำ นอกจากนี้ยังอาศัยระบบกำแพงเสมือน ช่วยป้องกันไม่ให้ปลายแขนกลตามออกนอกบริเวณที่กำหนด ทั้งนี้เพื่อใช้เป็นประโยชน์ในการพัฒนาระบบแขนกลนำ-ตาม 2 แขน ให้มีการใช้งานที่มีความเหมาะสมต่อสภาพแวดล้อม แนวทางการพัฒนาต่อไป คือการกำหนดจุดพิกัดระหว่างปลายแขนกลตาม 2 ข้าง เพื่อเป็นตำแหน่งอ้างอิงสำหรับการสร้างกำแพงเสมือน ซึ่งทำให้ปลายแขนกลตามทั้ง 2

ข้างทำงานอยู่ภายใต้กำแพงเสมือนอันเดียวกัน จากเดิมที่กำแพงเสมือนของแขนกลตามแต่ละข้างได้แยกเป็นอิสระต่อกัน

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากโครงการศูนย์ระดับภูมิภาคเทคโนโลยีหุ่นยนต์ภายใต้โครงการเพิ่มศักยภาพด้านวิศวกรรมศาสตร์สหสาขา ในแผนพัฒนาวิชาการจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย (จุฬาฯ 100 ปี)

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Shuxin Wang, School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, People's Republic of China. Control design and implementation of a novel master-slave surgery robot system, MicroHand A, *The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*, 2011.
- [2] Tian Xia, Ankur Kapoor, Peter Kazanzides, and Russell Taylor. A Constrained Optimization Approach to Virtual Fixtures for Multi-Robot Collaborative Teleoperation, *International Conference on Intelligent Robots and Systems*, San Francisco, CA, USA, September 25-30, 2011.
- [3] วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ, สุกชัย วงศ์บุญยั้ง (2551). ระบบแขนกลนำและตาม 6 องศาอิสระสำหรับงานขนาดเล็ก, *การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 22*, 15-17 ตุลาคม 2551
- [4] Lorenzo Sciacivco, Bruno Siciliano (1996). *Modeling and control of robot manipulators*, Italy: McGraw-Hill Book Company
- [5] John J.Craig (2005). *Introduction to robotics: Mechanical and control*, International Edition, 3rd ed. USA: Pearson Prentice Hall
- [6] วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ (2548). การควบคุมระบบพลศาสตร์ (Control of Dynamic Systems), พิมพ์ครั้งที่ 2, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- [7] SensAble Technologies Inc. (2008). PHANTOM Omni® Haptic Device [Online], URL: <http://www.sensable.com/haptic-phantom-omni.htm>, access on 24/01/2011.