

การควบคุมแขนกลแบบผสมระหว่างการควบคุมจากระยะไกลกับการควบคุมแรง Hybrid Tele-operated and Force Control of Manipulator Arms

กิตติสุข สระแก้ว จารุบุตร คณะนัย รัชทิน จันทร์เจริญ
ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330
โทร 0-2218-6643 โทรสาร 0-2252-2889 อีเมล Ratchatin.C@eng.chula.ac.th

Kittisuk Srakaew Jaruboot Kananai Ratchatin Chanchaen
Mechanical Engineering Department, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University
Phatumwan, Bangkok, 10330
Tel: 0-2218-6643 Fax: 0-2252-2889 Email: Ratchatin.C@eng.chula.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้ นำเสนอเทคนิคการควบคุมหุ่นยนต์แบบผสมระหว่างการควบคุมจากระยะไกลกับการควบคุมแรง เทคนิคการควบคุมจะใช้การแยกแกนควบคุมใน Catesian Space โดย 2 แกนควบคุมในแนวระดับจะควบคุมจากระยะไกล ในขณะที่แกนในแนวตั้งจะควบคุมแรงสัมผัส ซึ่งจะมีลักษณะคล้ายกับการควบคุมแบบผสมระหว่างแรง/ตำแหน่ง ของ M. H. Raibert และ J. J. Craig โดยเบื้องต้นนี้จะกำหนดขนาดแรงสัมผัสอ้างอิงเท่ากับ 2.5 นิวตัน อุปกรณ์บังคับจะใช้ Fasttrak® จากบริษัท Polhemus Inc ซึ่งเป็นอุปกรณ์วัดตำแหน่งแบบสนามแม่เหล็ก และหุ่นยนต์จะใช้เป็นหุ่นยนต์แบบ Articulated จากบริษัท CRS Robotics Inc ที่ได้รับการดัดแปลงวงจรควบคุมเพื่อให้สามารถพัฒนาสมการควบคุมในระดับข้อต่อได้ หุ่นยนต์ได้รับการติดตั้งอุปกรณ์วัดแรงจากบริษัท JR3 Inc เพื่อใช้ในการวัดแรงสัมผัส ระบบปฏิบัติการในการควบคุมหุ่นยนต์ในเวลาจริงจะใช้ Matlab xPC การสื่อสารระหว่างอุปกรณ์บังคับกับหุ่นยนต์เป็นแบบ TCP/UDP ที่ความเร็ว 10 MB/s ผลลัพธ์การควบคุมในเบื้องต้นแสดงให้เห็นศักยภาพของระบบ และแสดงให้เห็นว่าสามารถควบคุมหุ่นยนต์ได้จากระยะไกลพร้อมกับการควบคุมแรงสัมผัสในแนวแกนที่ตั้งฉากกัน ผลการวิจัยจะเป็นแนวคิดเริ่มต้นในการควบคุมหุ่นยนต์โดยใช้นมนุษย์และระบบอัตโนมัติทำการควบคุมร่วมกัน

Abstract

This paper presents a novel technique to remotely control a manipulator arm in conjunction with force servoing. The proposed technique separates the 3 dimensional control task in Catesian space into two sub-tasks: the tele-operation of robot in horizontal plane and the force servoing in vertical axis. This technique is similar to the hybrid force/position control proposed by M. H. Raibert and J. J. Craig. The reference force is set to 2.5 Newton in the preliminary test. The master device is a Fastrak® from Polhemus Inc which is the magnetic

based position sensor. The robot is articulated type from CRS Robotics Inc which its controller is modified such that the control algorithm can be implemented at joint level. The robot is installed with JR3 Force/Torque sensor to sense the touching force. The matlab xPC is used as operating system for real-time control of robot and force servoing. The communication between the master device and the slave robot is 10 MB/s TCP/UDP. The preliminary result demonstrates the performance of the system. The robot can be remotely control while its touching force, which is in orthogonal axis, is maintained. This investigation is the first step to control the robot using both human intelligence and automatic system in the same time.

1. บทนำ

รูปแบบการควบคุมการทำงานของระบบหุ่นยนต์อาจพิจารณาได้เป็น 2 แนวทาง แนวทางแรกจะใช้ระบบควบคุม (Control Technique) หรือปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence) ในการควบคุมการทำงานของระบบหุ่นยนต์อย่างอัตโนมัติ โดยในยุคเริ่มแรกของหุ่นยนต์นั้น ระบบควบคุมหุ่นยนต์จะมีหน่วยความจำเพื่อจดจำทางเดินของหุ่นยนต์ที่ได้โปรแกรมไว้ก่อนล่วงหน้า และระบบควบคุมจะพยายามควบคุมหุ่นยนต์ให้เคลื่อนที่ตามทางเดินที่ได้กำหนดไว้ไว้อย่างอัตโนมัติ หุ่นยนต์จะติดตั้งเอ็นโคเดอร์ (Encoder) หรืออุปกรณ์วัดตำแหน่งในรูปแบบอื่น เพื่อวัดตำแหน่งข้อต่อทุกตัวของหุ่นยนต์ และจะใช้คณิตศาสตร์ทางด้านจลนศาสตร์ของหุ่นยนต์ (Robot Kinematics) [1] ในการคำนวณตำแหน่งของปลายแขนหุ่นยนต์ได้ หลังจากนั้น ได้เริ่มมีงานวิจัยทางด้านหุ่นยนต์เพื่อควบคุมแรงสัมผัส (Force Servoing) ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1950s เพื่อให้หุ่นยนต์สามารถทำงานในลักษณะที่มีปฏิสัมพันธ์กับสิ่งแวดล้อมได้ เทคนิคการควบคุมแรงสัมผัสสามารถศึกษาได้ใน [2] แนวทางหลักในการควบคุมแรงมี 2 แนวทางคือ Hybrid Force/Position Control ที่นำเสนอโดย J. J.

Craig [2] และ Impedance Control ที่นำเสนอโดย N. Hogan [3] หลังจากนั้น ในช่วงต้นของยุคปี ค.ศ. 1980s ได้เริ่มมีงานวิจัย ทางด้านการควบคุมหุ่นยนต์จากการมองเห็นผ่านกล้องดิจิทัล (Visual Servoing) [4] ระบบควบคุมจะต้องประมวลผลรูปภาพ และนำข้อมูล จากการประมวลผลมาใช้ในการป้อนกลับควบคุม เทคนิคการควบคุมใน ลักษณะนี้ ทำให้ระบบควบคุมหุ่นยนต์สามารถควบคุมหุ่นยนต์ให้ทำงาน กับวัตถุที่มีตำแหน่งที่ไม่แน่นอนได้ แนวทางที่นำเสนอในการควบคุมมี 2 รูปแบบหลัก คือ Position Based Visual Servoing และ Image Based Visual Servoing โดยวิธีการแรกนั้น เราจะควบคุม พารามิเตอร์ในรูปภาพผ่านทางตัวควบคุมตำแหน่งของหุ่นยนต์อีกที หนึ่ง ซึ่งการทำในลักษณะนี้ทำให้การควบคุมมีเสถียรภาพมาก ในขณะที่ วิธีการหลังจะเน้นควบคุมพารามิเตอร์รูปภาพโดยตรงซึ่งจะทำให้การ ควบคุมมีประสิทธิภาพมากขึ้น ทั้งนี้ ผู้สนใจสามารถศึกษารายละเอียด ได้ใน [5] จากนั้นมา ก็ได้มีงานวิจัยเพื่อที่จะผสมผสานการควบคุมแรงและ การควบคุมจากการมองเห็นเข้าด้วยกัน [6] P. K. Khosla และคณะ [7] ได้นำเสนอเทคนิคการควบคุมแรงและการควบคุมจากการมองเห็น 3 รูปแบบ คือ Traded Control, Hybrid Control และ Shaded Control ในลักษณะของ Traded Control นั้น การควบคุมจากการ มองเห็นจะทำงานในตอนต้นเพื่อนำหุ่นยนต์ให้เคลื่อนที่เข้าสู่วัตถุ เป้าหมาย เมื่อหุ่นยนต์เข้าใกล้เป้าหมายระบบควบคุมจะสลับเป็นการ ควบคุมแรง จุดเด่นก็คือหุ่นยนต์จะสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างรวดเร็วเพื่อ เข้าสู่วัตถุเป้าหมาย ส่วนในลักษณะของ Hybrid Control นั้น ระบบ ควบคุมจะควบคุมแรงสัมผัสและควบคุมจากการมองเห็นพร้อมกัน แต่ จะควบคุมคนละแกนกัน แกนที่ควบคุมแรงจะตั้งฉากกับแกนการ ควบคุมจากการมองเห็น และในส่วนของ Shared Control นั้น ระบบ ควบคุมจะควบคุมแรงสัมผัสและควบคุมจากการมองเห็นพร้อมกันใน แกนเดียวกัน แต่มีการหลอมรวมข้อมูลอย่างเหมาะสม การควบคุม หุ่นยนต์ที่กล่าวมานี้ มีพื้นฐานอยู่ที่การควบคุมอัตโนมัติ เพื่อให้ระบบ หุ่นยนต์สามารถทำงานได้อย่างอัตโนมัติ

สำหรับการทำงานของหุ่นยนต์ในสภาพแวดล้อมที่ไม่มีรูปแบบที่แน่นอน มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ไม่ทราบลักษณะของวัตถุ เป้าหมายก่อนล่วงหน้า หรืองานที่มีความสลับซับซ้อนมากๆ การ ควบคุมอาจต้องใช้ปัญญาของมนุษย์ (Human Intelligence) เพื่อตัว ลินใจและควบคุมหุ่นยนต์ ดังนั้น อีกแนวทางหนึ่งในการควบคุมการ ทำงานของระบบหุ่นยนต์คือการควบคุมด้วยมนุษย์จากระยะไกล (Teleoperation) [8] ตัวอย่างการทำงานในลักษณะนี้ประกอบด้วย การควบคุมหุ่นยนต์เพื่อจัดการกับสารพิษ หรือเชื้อโรค วัตถุระเบิด กัมมันตรังสี หรือหุ่นยนต์ห้องทำงานในที่ซึ่งมนุษย์ไม่สามารถไปด้วยได้ เช่นที่ใต้ท้องทะเลลึก หรือในอวกาศ

การศึกษานี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อบุกเบิกงานวิจัยเพื่อควบคุมหุ่นยนต์ ในลักษณะที่ใช้ระบบควบคุมอัตโนมัติร่วมกับการควบคุมจากระยะไกล เพื่อพัฒนาให้ศักยภาพการควบคุมมีขีดความสามารถมากขึ้น การ ควบคุมจากระยะไกลด้วยมนุษย์จะใช้เพื่อควบคุมสิ่งที่ควบคุมได้ยาก มาก หรือต้องการทักษะมาก ในขณะที่สิ่งอื่นๆ จะได้รับการควบคุม อย่างอัตโนมัติ มนุษย์ผู้ควบคุมจะมีสมาธิที่ดีขึ้นในการควบคุมเรื่อง ที่สำคัญมาก ในขณะที่ระบบอัตโนมัติก็ควบคุมและจัดการกับเรื่องอื่นๆ

ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยในบทความนี้ นำเสนอผลลัพธ์การศึกษา เบื้องต้นในการควบคุมหุ่นยนต์จากระยะไกลพร้อมกันกับการควบคุม แรง ซึ่งจะมีส่วนช่วยให้รูปแบบการทำงานของหุ่นยนต์มีความ หลากหลายมากขึ้น และพัฒนาเทคนิคการควบคุมหุ่นยนต์ในลักษณะที่ มนุษย์และระบบอัตโนมัติทำงานร่วมกัน ซึ่งจะพัฒนาให้ศักยภาพในการ ควบคุมมีมากขึ้น

2. แนวทางในการควบคุม

ผู้เขียนขอแนะนำรูปแบบการควบคุมเพื่อควบคุมหุ่นยนต์อย่าง อัตโนมัติพร้อมกับการควบคุมจากระยะไกลไว้ 3 รูปแบบ ในลักษณะ คล้ายกันกับที่ P. K. Khosla ได้นำเสนอรูปแบบการควบคุมแรงและ การควบคุมจากการมองเห็นพร้อมกัน ดังนี้

1. การควบคุมแบบสลับเวลา (Traded Control)

การควบคุมแบบนี้จะควบคุมจากระยะไกลในตอนต้น เมื่อหุ่นยนต์เข้า ใกล้พื้นผิวสัมผัสก็สลับมาเป็นการควบคุมแรงอย่างอัตโนมัติ และใน ระหว่างที่ควบคุมแรงสัมผัส ผู้ควบคุมจากระยะไกลก็สามารถส่ง สัญญาณเพื่อเปลี่ยนโหมดการควบคุมมาเป็นการควบคุมจากระยะไกล ได้ตลอดเวลา

2. การควบคุมแบบแยกแกนควบคุม (Hybrid Control)

การควบคุมแบบนี้จะควบคุมหุ่นยนต์จากระยะไกลไปพร้อมกับการ ควบคุมแรง แต่ว่าแยกแกนควบคุมกันอย่างชัดเจน ตัวอย่างเช่นควบคุม การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์บนระนาบจากระยะไกลและควบคุมการเคลื่อน ในแนวตั้งด้วยแรง เป็นต้น แกนที่ควบคุมจากระยะไกลกับแกนที่ ควบคุมแรงจะตั้งฉากกัน

3. การควบคุมแบบผสมข้อมูล (Shared Control)

การควบคุมในลักษณะนี้จะควบคุมจากระยะไกลและควบคุมแรงใน แนวแกนเดียวกัน ระบบควบคุมจะต้องหลอมรวมข้อมูลจากอุปกรณ์ Master Device และจากอุปกรณ์วัดแรง เพื่อนำมาคำนวณสัญญาณ ควบคุม ตัวอย่างเช่น ค่าแรงสัมผัสเป็นสัดส่วนกับค่าสัญญาณตำแหน่ง จากอุปกรณ์ Master Device เป็นต้น

โดยในบทความนี้ จะเน้นศึกษาเทคนิคการควบคุมจากระยะไกล และการควบคุมแรงพร้อมกันในแบบของ Hybrid Control และจะใช้ ชื่อว่า การควบคุมแบบผสมระหว่างการควบคุมจากระยะไกลกับ การควบคุมแรง

2.1 การควบคุมแรง

การทดสอบการควบคุมนี้ จะใช้การควบคุมแรงสัมผัสในแนวแกน ดิ่ง (หรือแกน z) โดยจะใช้การควบคุมแรงทางอ้อม (Implicit Force Control) และใช้การควบคุมแบบอินทิกรัล (Integral Control) โดยมีสมการควบคุมดังนี้

การควบคุมแรง

$$z_c = K_{fp} \int (f_c - f_m) dt \quad (1)$$

การควบคุมตำแหน่ง

$$\tau = K_p (x_c - x_m) + K_v (\dot{x}_c - \dot{x}_m) \quad (2)$$

โดยที่ τ คือ ค่าแรงบิดที่ใช้ในการขับเคลื่อนข้อต่อแขนกล
 K_f คือ ค่าเกนของการควบคุมแบบอินทิกรัล
 f_c คือ ค่าแรงที่ต้องการ
 f_m คือ ค่าแรงที่เกิดขึ้นจริง
 K_v คือ ค่าเกนของความหน่วง
 K_p คือ ค่าเกนของตัวควบคุมแบบสัดส่วน
 z_c คือ ตำแหน่งอ้างอิงในแนวแกน z ของข้อต่อแขนกล
 x_c คือ ตำแหน่งอ้างอิง (x,y,z) ของข้อต่อแขนกล
 x_m คือ ตำแหน่งของข้อต่อแขนกล

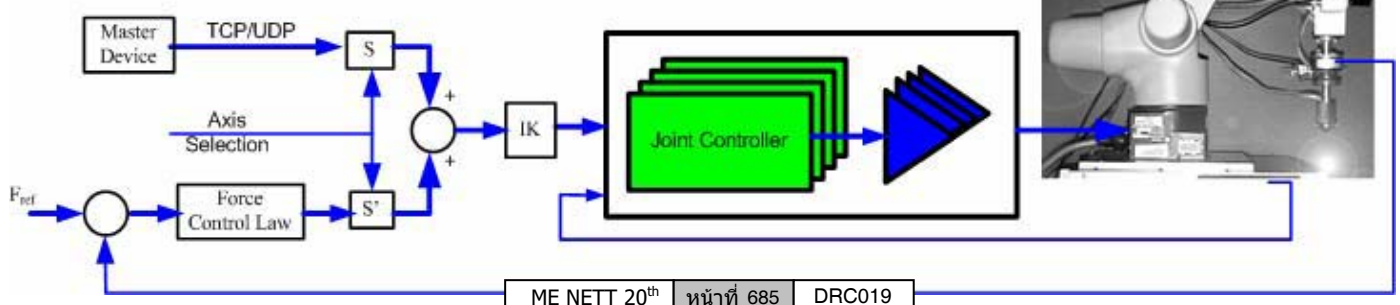
การออกแบบการประมวลผลสัญญาณควบคุม ระบบควบคุมจะคำนวณตำแหน่งอ้างอิงในแนวแกน Z , z_c , จากค่าความผิดพลาดของแรงสัมผัสที่เกิดขึ้น และนำค่าตำแหน่งอ้างอิงนี้ ไปรวมกับตำแหน่งอ้างอิงในแนวแกน X และ Y เพื่อป้อนเข้าเป็นตำแหน่งอ้างอิงให้กับตัวควบคุมตำแหน่งของหุ่นยนต์ต่อไป ความเร็วในการประมวลผลเท่ากับ 0.001 วินาที

2.2 การควบคุมจากระยะไกล

การควบคุมจากระยะไกลจะใช้อุปกรณ์วัดตำแหน่งพิกัด 3 มิติ เป็นอุปกรณ์ Master Device เพื่อสร้างข้อมูลพิกัด 3 มิติ เพื่อป้อนเข้าสู่ระบบควบคุมหุ่นยนต์ การส่งผ่านข้อมูลจาก Master Device ไปที่ระบบควบคุมหุ่นยนต์จะผ่านระบบการสื่อสารแบบ RS 232C ที่ความเร็ว 115200 Baud rate และ TCP/UDP ที่ความเร็ว 10 MB/s และจากนั้นจะใช้ Selection Matrix (S) เพื่อกรองข้อมูลออกให้เหลือเพียงข้อมูลตำแหน่งในแกนที่ต้องการควบคุมจากระยะไกล

2.3 การควบคุมแบบผสม

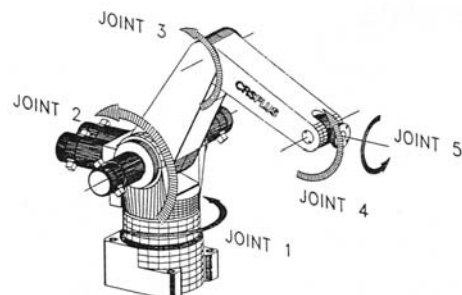
การควบคุมแบบผสมในลักษณะของ Hybrid Tele-operated and Force Control จะใช้ Selection Matrix (S) เพื่อกำหนดแกนในคาร์ทีเซียนที่จะควบคุมจากระยะไกล และแกน $[1-S]$ ก็จะเป็นแกนที่ควบคุมแรง ข้อมูลตำแหน่งอ้างอิงที่ได้จาก Master Device และจากตัวควบคุมแรง จะนำมารวมกันเพื่อสร้างตำแหน่งอ้างอิงทั้ง 3 แกน และป้อนเข้าสู่ระบบควบคุมหุ่นยนต์เพื่อเป็นสัญญาณอ้างอิง จากนั้นข้อมูลตำแหน่งอ้างอิงนี้จะนำไปใช้ในการคำนวณตำแหน่งข้อต่ออ้างอิงผ่านทาง Inverse Kinematics ในเวลาจริง และจากนั้น จึงนำข้อมูลตำแหน่งข้อต่ออ้างอิงป้อนเข้าสู่ระบบควบคุมตำแหน่งข้อต่ออีกทีหนึ่ง ระบบควบคุมตำแหน่งข้อต่อมีการควบคุมแบบ PD Control แผนผังการควบคุมแสดงในรูปที่ 1



3. หุ่นยนต์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

3.1 หุ่นยนต์ CRS robotics

หุ่นยนต์ CRS robotics (รูปที่ 2) เป็นหุ่นยนต์แบบ Articulated Robot รุ่น A255 ของบริษัท CRS Robotics Inc ที่มี 5 องศาอิสระ มีมอเตอร์ขับเคลื่อนแบบ Permanent Magnet DC Servo และมีอุปกรณ์วัดตำแหน่งแบบเอ็นโคเดอร์ ที่มีความละเอียด 1000 PPR ระบบส่งกำลังสำหรับข้อต่อเอว (Waist) ไหล่ (Shoulder) และข้อศอก (Elbow) จะเป็นแบบ Harmonic Drive ที่มีอัตราทด 1:72 หุ่นยนต์มี DH parameter [1] ดังแสดงในตารางที่ 1 ระบบควบคุมได้รับการพัฒนาใหม่เพื่อให้สามารถควบคุมหุ่นยนต์ในระดับแรงบิดของข้อต่อได้ โดยจะใช้ Power Amplifier ของระบบควบคุมหุ่นยนต์เดิมและพัฒนา Interface Circuit ขึ้นมาใหม่เพื่อเชื่อมต่อสัญญาณควบคุมและสัญญาณจากเอ็นโคเดอร์ ไปที่เครื่องคอมพิวเตอร์ควบคุม



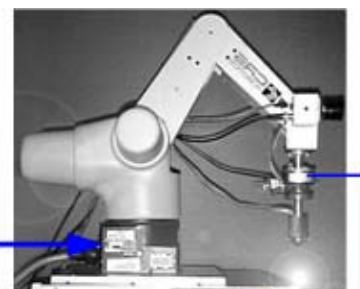
รูปที่ 2 หุ่นยนต์ CRS robot

ตารางที่ 1 ค่า DH ของหุ่นยนต์ CRS Robot

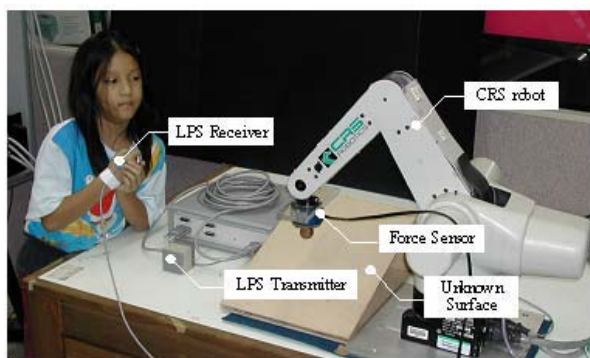
i	α_i	a_{i-1}	d_i	θ_i
1	0	0	10"	θ_1
2	-90°	0	0	θ_2
3	0	10"	0	θ_3
4	0	10"	0	θ_4
5	-90°	0	2"	θ_5

3.2 ระบบโดยรวม

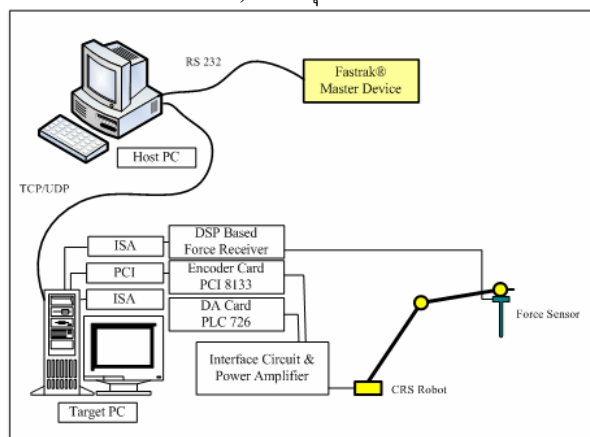
การทดลองควบคุมจะใช้หุ่นยนต์แบบ Articulated Robot รุ่น A255 ของ บริษัท CRS Robotics Inc ซึ่งมีพารามิเตอร์ดังที่แสดงอยู่ในตารางที่ 1 ที่ปลายแขนจะติดตั้ง Force sensor ของ บริษัท JR3 ไว้นับสำหรับวัดแรงค่าสัมผัส และ Fastrack ของบริษัท Polhemus Inc สำหรับวัดค่าตำแหน่งที่ปลายแขนใน Cartesian Space โดยหุ่นยนต์ได้ทำการดัดแปลงกล่องควบคุมให้สามารถควบคุมแบบ open



architecture ได้ โดยการควบคุมในเวลาจริงจะใช้โปรแกรม Matlab xPC ซึ่งใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ 2 เครื่อง คือ Host PC และ Target PC โดยที่สมการควบคุมจะพัฒนาบนเครื่อง Host PC และจากนั้นจะทำการ Upload และส่ง code ควบคุมไปยัง Target PC ที่ติดตั้ง D/A card รุ่น PCL-726 ของบริษัท Advantech Inc เพื่อที่จะส่งสัญญาณ ไปยังกล่องควบคุมให้หุ่นยนต์ทำงาน และ รับสัญญาณ Encoder ผ่าน Encoder counter card รุ่น PCI-8133 ของ บริษัท Advantech Inc เพื่อควบคุมหุ่นยนต์ ส่วน Fastrack จะรับสัญญาณผ่าน RS-232 มายังเครื่อง Host PC โดยการสื่อสารระหว่าง Host PC และ Target PC จะสื่อสารผ่านโปรโตคอล TCP/IP ความเร็ว 10 MB/s ค่าสัญญาณต่างๆจะถูกส่งกลับมายัง Host PC ดังรูปที่ 3



a) ระบบหุ่นยนต์



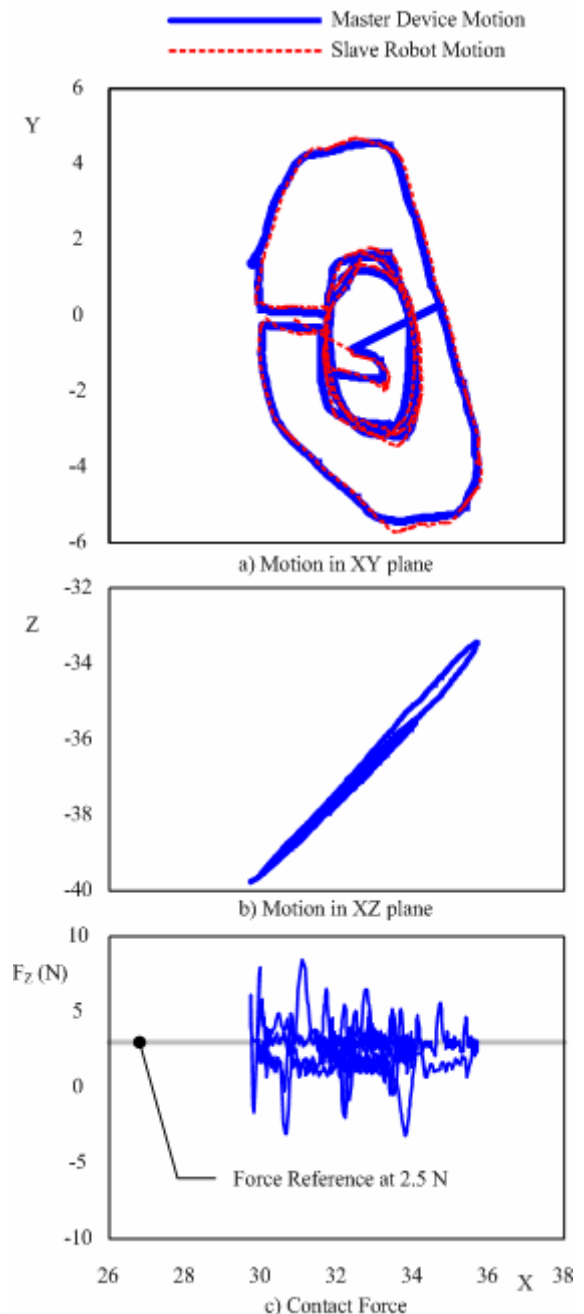
b) แผนผังระบบโดยรวม

รูปที่ 3 ระบบหุ่นยนต์ควบคุมจากระยะไกลและควบคุมแรง

4. ผลลัพธ์การควบคุมเบื้องต้น

การทดสอบการควบคุมในเบื้องต้นประสบความสำเร็จ กล่าวคือ ระบบควบคุมสามารถควบคุมหุ่นยนต์จากระยะไกล และควบคุมแรงสัมผัสได้พร้อมกัน รูปที่ 4a แสดงให้เห็นว่าหุ่นยนต์สามารถติดตามทางเดินของอุปกรณ์ Master Device บนระนาบ XY ได้ และจะมี Tracking Error เกิดขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากระบบควบคุมตำแหน่งข้อต่อหุ่นยนต์เป็นแบบ Stiff PD Control จึงทำให้หุ่นยนต์ติดตามทางเดินของ Master Device ได้ค่อนข้างดี การทดลองไม่ได้กำหนดรูปแบบทางเดินของ Master Device โดยผู้ควบคุมพยายามเคลื่อนที่เป็นวงกลมที่มีขนาดใหญ่เพียงพอและอยู่ใน Workspace การทำงานของหุ่นยนต์ ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าการคำนวณ Inverse

Kinematics ในเวลาจริงกระทำได้อย่างถูกต้องและทันเวลา การทดสอบการตั้งเส้นทางที่อุปกรณ์ Master Device เพื่อกำหนดให้ทางเดินบนอุปกรณ์ Master Device กับทางเดินของหุ่นยนต์เป็นสัดส่วนตามเส้นที่ตั่งก็ให้ผลลัพธ์ที่ดี (ไม่ได้แสดงในรูป)



รูปที่ 4 ผลลัพธ์การควบคุม

การทดสอบกำหนดให้พื้นสัมผัสไม่ได้อยู่ในแนวระดับ แต่เป็นพื้นเอียงทำมุมประมาณ 30 องศา พื้นทำด้วยไม้อัดและมีลักษณะไม่แข็งเกร็ง ซึ่งจะอ่อนตัวตามแรงสัมผัสที่เกิดขึ้น การทดสอบพบว่าหุ่นยนต์สามารถปรับทางเดินให้อยู่ในระนาบของพื้นได้ดังแสดงในรูปที่ 4b เทคนิคการควบคุมที่นำเสนอสามารถรับมือการตำแหน่งที่ไม่แน่นอนของพื้นสัมผัสได้ดีมาก และจะควบคุมให้แรงสัมผัสในแนวแกนตั้งมีค่าตามที่กำหนด คือ -2.5 นิวตัน ได้ สัญญาณแรงมีการสั่นค่อนข้างมาก เนื่องจากพื้นเกิดการสั่นตลอดเวลาที่ควบคุมแรง แต่ขนาดการสั่นก็อยู่

ในช่วงที่จำกัด ทั้งนี้ เราไม่ทราบแรงสัมผัสที่เกิดขึ้นจริง แต่ระบบควบคุมแรงสามารถควบคุมให้สัญญาณแรงมีค่าเท่ากับค่าสัญญาณแรงอ้างอิงตามที่ระบบเข้าใจ ซึ่งการทดลองแสดงให้เห็นถึงเทคนิคการควบคุมบนพื้นฐานของสัญญาณโดยตรง หากต้องการให้แรงสัมผัสที่เกิดขึ้นมีค่าตรงตามจริงก็จะต้องทำการปรับเทียบอุปกรณ์วัดแรงให้มีความถูกต้องด้วย

5. สรุป

การทดสอบการควบคุมแบบผสมระหว่างการควบคุมจากระยะไกลกับการควบคุมแรงให้ผลลัพธ์ที่ดี กล่าวคือสามารถควบคุมทางเดินบนระนาบในแนวระดับของหุ่นยนต์ได้จากระยะไกลด้วยอุปกรณ์ Fastrak® และควบคุมแรงสัมผัสในแนวตั้งไปด้วยพร้อมกัน หุ่นยนต์สามารถปรับเส้นทางเดินตามพื้นผิวสัมผัสเพื่อรักษาให้ค่าแรงสัมผัสมีค่าตามที่กำหนดได้

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบ หอปฏิบัติการวิจัยหุ่นยนต์และระบบอัตโนมัติ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สนับสนุนเครื่องมืออุปกรณ์ต่างๆ ในการวิจัยนี้ และขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) สำหรับทุนในการวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] J. J. Craig (1989), Introduction to ROBOTICS: mechanics and control, Addison-Wesley Publishing Company, 0-201-09528-9, USA.
- [2] M. H. Raibert, J. J. Craig, Hybrid Position/Force Control of Manipulators. ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 102 (June 1981): 126-133.
- [3] N. Hogan, Impedance Control: An Approach to Manipulation: Part I - Theory, Part II - Implementation, Part III - Applications. Trans of the ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 107 (March 1985): 1-24.
- [4] L. E. Weiss, A. C. Sanderson and C. P. Neumann (1987), Dynamic Sensor-Based Control of Robots with Visual Feedback, J. of Robotics and Automation v. RA-3 1987.
- [5] S. Hutchinson and G. D. Hager (1996), A Tutorial on Visual Servo Control, IEEE Trans. Robot. Automat., vol.12, pp. 650-670, Oct. 1996.
- [6] K. Hosoda, K. Igarashi, M. Asada, Adaptive Hybrid Visual Servoing/Force Control in Unknown Environment, Proceedings of the 1996 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 1996.
- [7] B. J. Nelson, J. D. Morrow, and P. K. Khosla (1995), Improved Force Control Through Visual Servoing, 1995 American Control Conference, Seattle, USA, June 1995.
- [8] J. Kofman, X. Wu, T. J. Luu, and S. Verma, "Teleoperation of a Robot Manipulator Using a Vision-Based Human-Robot Interface," IEEE Trans on Industrial Electronics, Vol.52., NO.5, Oct. 2005.