

เทคนิคการขับเคลื่อน End Effector ของหุ่นยนต์ด้วยเซนเซอร์ (A technique for sensor based servoing of Robotic End Effector)

รัชทิน จันทรเจริญ

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

fmercc@eng.chula.ac.th

Ratchatin Chancharoen

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University,

Phayathai Road, Patumwan, Bangkok, 10330, Thailand

Tel : 02-218-6643, Fax : 02-252-2889

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอเทคนิคการควบคุมหุ่นยนต์จากการป้อนกลับด้วยสัญญาณจากเซนเซอร์ที่ End Effector ของหุ่นยนต์ โดยศึกษาทดลองบนหุ่นยนต์ CRS Robotics System ที่ติดตั้งเซนเซอร์ LPS และอุปกรณ์ตรวจจับแรงที่ End Effector การควบคุมจะอาศัยการประมาณจาโคเบียนในขณะที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ และนำข้อมูลจากเซนเซอร์ LPS และอุปกรณ์ตรวจจับแรงป้อนกลับมาควบคุมทางเดิน

บทความนำเสนอผลการจำลองควบคุมทางเดินหุ่นยนต์โดยใช้เซนเซอร์ LPS และอุปกรณ์ตรวจจับแรงมาร่วมควบคุมทางเดินของ End Effector ผลลัพธ์ได้แสดงถึงศักยภาพของวิธีการ และความยืดหยุ่นของเทคนิคที่ไม่ต้องอาศัยพารามิเตอร์ของหุ่นยนต์ในการควบคุม และได้นำเสนอการทดสอบกับหุ่นยนต์ CRS Robotics System โดยนำสัญญาณจาก Fastrak® ซึ่งเป็นอุปกรณ์วัดตำแหน่งใน 3 มิติมาชดเชยควบคุมทางเดินหุ่นยนต์ ทำให้เพิ่มความแม่นยำในการควบคุมและหุ่นยนต์สามารถมีปฏิสัมพันธ์กับสิ่งแวดล้อม

Abstract

The paper presents a technique for robotic end effector control using a feedback signal from sensors installed at the end effector. The CRS robotics system equipped with LPS and force sensors is used for the demonstration. In the proposed technique, Jacobian is estimated from the robot motion and sensor's signals and then used in conjunction with sensor's signals to control the end effector's trajectory.

Several simulations are used to demonstrate the technique including the cases that LPS and force sensors are used to adjust the trajectory. The results show that the robot can interact with the environment and accuracy is improved. In the experimental study, the Fastrak® at the end effector is used to compensate the trajectory of the CRS robotics system.

1. บทนำ

หุ่นยนต์อุตสาหกรรมปัจจุบันมีค่าความผิดพลาดจากการควบคุมตำแหน่ง End Effector ส่วนหนึ่งมาจากการวัดตำแหน่ง End Effector เนื่องจากการวัดตำแหน่งข้อต่อมีค่าความผิดพลาดและค่าพารามิเตอร์ของหุ่นยนต์ในแบบจำลองมีค่าไม่แม่นยำ หุ่นยนต์จะมีค่าความผิดพลาดแม้ว่าจะมี Repeatability สูงก็ตาม และค่าความผิดพลาดจะมีค่ามากขึ้นในหุ่นยนต์ที่มีโครงสร้างขนาดใหญ่ แนวคิดหนึ่งในการเพิ่มความเที่ยงตรงในการควบคุมก็คือการติดตั้งอุปกรณ์วัดตำแหน่ง และ/หรือ เซนเซอร์อื่นๆ ไว้ที่ End Effector และทำการขับเคลื่อนหุ่นยนต์โดยอาศัยข้อมูลจากเซนเซอร์เหล่านี้โดยตรง โดยที่การคำนวณทั้งหมดจะไม่ต้องอาศัยข้อมูลตำแหน่งข้อต่อและแบบจำลอง Kinematics ของหุ่นยนต์ ซึ่งทำให้ค่าความผิดพลาดไม่ขึ้นกับปัจจัยดังกล่าว

บทความนี้นำเสนอเทคนิคการควบคุมหุ่นยนต์รูปแบบใหม่ ที่ขับเคลื่อนหุ่นยนต์จากข้อมูลเซนเซอร์ที่ End Effector โดยตรง โดยติดตั้งเซนเซอร์ LPS (Local Positioning System) สำหรับวัดตำแหน่ง และอุปกรณ์ตรวจจับแรง (Force Sensor) และขับเคลื่อนหุ่นยนต์ในสเปซของเซนเซอร์โดยตรง ข้อมูลจากเซนเซอร์ต่างๆ จะไม่เป็นอิสระจากกัน เทคนิคการควบคุมจะอาศัยการคำนวณประมาณค่าจาโคเบียนของเซนเซอร์จากการเคลื่อนที่ และนำไปคำนวณแรงขับที่ข้อต่อต่างๆ ของมอเตอร์โดยตรง ทำให้เทคนิคการควบคุมนี้ไม่ต้องอาศัยพารามิเตอร์ของหุ่นยนต์ และเซนเซอร์ต่างๆ เลย ซึ่งจะทำให้หุ่นยนต์มีค่าความแม่นยำเท่ากับค่าความแม่นยำของอุปกรณ์วัดตำแหน่ง นอกจากนี้ ลักษณะการควบคุมยังมีความยืดหยุ่นสูงมาก โดยจะสามารถควบคุมพารามิเตอร์จากเซนเซอร์ต่างๆ ได้พร้อมกัน

บทความแสดงผลการจำลองควบคุมหุ่นยนต์ CRS Robotics System โดยนำข้อมูลจากอุปกรณ์วัดตำแหน่งและอุปกรณ์ตรวจจับแรงมาป้อนกลับเพื่อควบคุมทางเดินของ End Effector ซึ่งเป็นการควบคุมที่ทำให้หุ่นยนต์สามารถทำงานที่มีปฏิสัมพันธ์กับสิ่งแวดล้อมได้ และค่าความผิดพลาดในการควบคุมไม่ขึ้นกับแบบจำลองของหุ่นยนต์

2. งานวิจัยที่ผ่านมา

การวิจัยการควบคุม End Effector ของหุ่นยนต์โดยอาศัยการป้อนกลับของสัญญาณจากอุปกรณ์ตรวจวัดที่ตั้งที่ End Effector โดยตรง จะทำให้การควบคุมมีความแม่นยำสูงขึ้นและสามารถควบคุมหุ่นยนต์ให้สามารถมีปฏิสัมพันธ์กับสิ่งแวดล้อมได้ โดยในยุคเริ่มต้นของหุ่นยนต์ ในปี 1960s ได้มีงานวิจัยศึกษาการควบคุมแรงสัมผัสของหุ่นยนต์เพื่อให้หุ่นยนต์สามารถทำงานที่มีปฏิสัมพันธ์กับสิ่งแวดล้อมได้ ประวัติของงานวิจัยการควบคุมแรงสัมผัสของหุ่นยนต์สามารถศึกษาได้จาก [1] ในปี 1981 M. H. Raibert และ J. J. Craig [2] ได้เสนอวิธีในการควบคุมแรงแบบผสมระหว่างแรงกับตำแหน่ง (Hybrid Force/Position Control) ซึ่งแยกวงจรควบคุมออกเป็น 2 วงจรที่ตั้งฉากกัน วงจรหนึ่งจะควบคุมแรง และอีกวงจรหนึ่งจะควบคุมตำแหน่งหรือการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ ในการควบคุมแรงจะใช้สัญญาณแรงจากอุปกรณ์ตรวจวัดที่ตั้งที่ End Effector มาควบคุมโดยตรง และอาจใช้ตัวควบคุมแบบอินทิกรัลในการควบคุมแรงสัมผัส การควบคุมแรงในลักษณะนี้เรียกว่าการควบคุมแรงทางตรง (Explicit Force Control)

อีกแนวทางหนึ่งคือการควบคุมแรงทางอ้อม (Implicit Force Control) เช่นการควบคุมความหน่วง (Impedance Control) ดังที่นำเสนอในงานวิจัยของ Neville Hogan ในปี 1985 หรือการควบคุมความแข็ง (Stiffness Control) วิธีนี้จะควบคุมแรงผ่านทางตัวควบคุมตำแหน่ง (Position Controller) การควบคุมแบบนี้จะมี 2 วงจรควบคุมซ้อนกัน วงจรชั้นในเป็นวงจรควบคุมตำแหน่งโดยใช้การป้อนกลับของสัญญาณจากอุปกรณ์วัดตำแหน่ง เช่น Encoder ที่ติดตั้งที่ข้อต่อของหุ่นยนต์ ซึ่งจะทำงานที่ความเร็วสูง ส่วนวงจรชั้นนอกจะเป็นวงจรควบคุมแรง ซึ่งจะนำสัญญาณความผิดพลาดของแรงมาผ่านตัวควบคุมแรงและป้อนค่าเป็นสัญญาณตำแหน่งอ้างอิงให้กับวงจรควบคุมตำแหน่งอีกทีหนึ่ง

ในช่วงต้นของปี 1980s ได้เริ่มมีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมโดยการป้อนกลับจากสัญญาณรูปภาพ หรือ Visual Servo Control โดยมี 2 รูปแบบในการควบคุม แบบแรกเรียกว่า Fix in Space ซึ่งจะติดตั้งกล้องถ่ายภาพในตำแหน่งคงที่ และอีกแบบหนึ่งเรียกว่า Eye in Hand ซึ่งจะติดตั้งกล้องไว้ที่ End Effector ของหุ่นยนต์ หลังจากนั้น ได้มีงานวิจัยจำนวนมากที่ศึกษาการควบคุมแบบ Visual Servo Control โดยผู้สนใจสามารถศึกษาได้จาก [3] การขับเคลื่อน Visual Servo Control ในแบบของ Eye in Hand ก็เป็นอีกรูปแบบหนึ่งที่จะขับเคลื่อน End Effector โดยใช้การป้อนกลับของสัญญาณจากอุปกรณ์ตรวจวัดที่ตั้งที่ End Effector การติดตั้งกล้องที่ End Effector ทำให้แบบจำลองของระบบมีความซับซ้อนขึ้นไปมาก เทคนิคการควบคุมจึงอาศัยการประมาณค่าจาโคเบียนขึ้นในขณะที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ แทนที่จะคำนวณค่าจาโคเบียนจาก Kinematics ของหุ่นยนต์และแบบจำลองของการบันทึกภาพ และนำค่าจาโคเบียนที่ประมาณขึ้นนี้ไปใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์

ในปี 2000s ได้เริ่มมีงานวิจัยที่ศึกษาการควบคุมแบบ Visual Servo Control และ Force Control พร้อมกัน โดย B. J. Nelson และคณะ [4] ได้นำเสนอ 3 รูปแบบในการควบคุม ประกอบด้วย Traded Control, Hybrid Control และ Shared Control โดยที่การควบคุมแบบ

Traded Control นั้นจะควบคุม End Effector ด้วย Visual Servo Control ก่อน จากนั้นจะสลับเป็น Force Control เมื่อ End Effector เข้าใกล้ผิวสัมผัส สำหรับการควบคุมแบบ Hybrid Control นั้น จะควบคุมแบบ Visual Servo Control และ Force Control พร้อมกัน ในทิศทางที่ตั้งฉากกัน โดยแยกวงจรควบคุมออกเป็น 2 วงจร วงจรหนึ่งจะควบคุมแบบ Visual Servo Control และอีกวงจรหนึ่งจะควบคุมแบบ Force Control และสำหรับ Shared Control นั้น จะควบคุมแรงสัมผัสและสัญญาณจากรูปภาพในทิศทางเดียวกัน

การควบคุมแรงและสัญญาณจากรูปภาพพร้อมกันในแบบของ Hybrid Control และ Shared Control แสดงให้เห็นถึงความยืดหยุ่นของวิธีการควบคุม และหุ่นยนต์สามารถทำงานที่มีปฏิสัมพันธ์กับสิ่งแวดล้อมได้อย่างเต็มรูปแบบ ตัวอย่างหนึ่งของการควบคุม End Effector โดยตรง เช่นต้องการให้หุ่นยนต์วิ่งไปจับวัตถุที่กำลังเคลื่อนที่ ขณะเดียวกันก็ต้องการควบคุมแรงสัมผัส และหลบหลีกสิ่งกีดขวางที่อาจมีไปด้วยพร้อมกัน หุ่นยนต์อาจติดตั้งกล้องบันทึกภาพ อุปกรณ์ตรวจวัดแรง และอุปกรณ์วัดระยะ ไว้ที่ End Effector และนำสัญญาณจากอุปกรณ์ตรวจวัดต่างๆ เหล่านี้ มาควบคุมการเคลื่อนที่หรือแรงที่ข้อต่อของหุ่นยนต์โดยตรง ทั้งนี้ผู้เขียนได้นำเสนอการควบคุมแรงและสัญญาณจากรูปภาพพร้อมกันในแบบของ Hybrid Control ใน [5] และได้นำเสนอการควบคุมแบบ Visual Servo Control โดยมีเงื่อนไขการควบคุมที่กำหนดให้แรงที่สัมผัสต้องมีค่าไม่เกินที่กำหนดใน [6] การควบคุมหุ่นยนต์โดยมีเงื่อนไขในการควบคุม (Constraint) นั้น ผู้เขียนได้นำเสนอวิธี Gradient Projection Method เพื่อรักษาให้เงื่อนไขเป็นจริงตลอดการควบคุม

บทความนี้ได้นำเสนอการควบคุม End Effector ในรูปแบบต่างๆ ประกอบด้วยการควบคุม End Effector จากสัญญาณตำแหน่งที่วัดได้จาก LPS และจากสัญญาณแรงที่วัดได้จากอุปกรณ์ตรวจวัดแรง และการควบคุมจากสัญญาณทั้งสองพร้อมกัน โดยเน้นนำเสนอถึงวิธีการควบคุมที่ไม่อ้างอิงแบบจำลองเนื่องจากในทางปฏิบัติจะไม่สามารถหาแบบจำลองของระบบโดยรวมได้อย่างแม่นยำ ซึ่งเป็นผลมาจากการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดที่ End Effector ทำให้ความซับซ้อนของแบบจำลองเพิ่มขึ้นไปมาก และจะอาศัยการประมาณค่าต่างๆ ขึ้นจากการเคลื่อนที่ในขณะที่ควบคุม

3. การควบคุมการเคลื่อนที่ที่หุ่นยนต์ใน Catesian Space

แบบจำลองการเคลื่อนที่ (Equation of motion) ของข้อต่อของหุ่นยนต์สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\tau = M(\Theta)\ddot{\Theta} + V(\Theta, \dot{\Theta})\dot{\Theta} + G(\Theta) \quad (1)$$

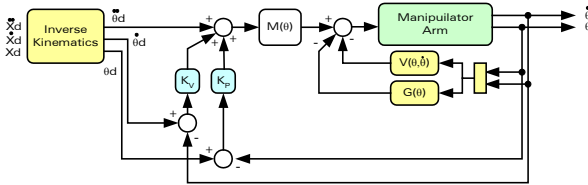
โดยที่ $M(\Theta)$ คือ Mass matrix ของหุ่นยนต์
 $V(\Theta, \dot{\Theta})$ คือ Centrifugal และ Coriolis vector
 $G(\Theta)$ คือ Gravity vector
 τ คือ แรงบิดที่ข้อต่อของหุ่นยนต์
 Θ คือ ตำแหน่งข้อต่อหุ่นยนต์

ในการควบคุมทางเดินของ End Effector ใน Catesian Space สามารถทำได้โดยการควบคุมการเคลื่อนที่ของข้อต่อของหุ่นยนต์ทุกข้อต่อให้สัมพันธ์กัน โดยเมื่อกำหนดการเคลื่อนที่ใน Catesian Space ทั้งในเรื่องของตำแหน่ง ความเร็ว และความเร่ง ที่เวลาต่างๆ ของการเคลื่อนที่ ก็สามารถแปลงจลศาสตร์ย้อนกลับ (Inverse Kinematics) เพื่อคำนวณหาการเคลื่อนที่ของข้อต่อต่างๆ ที่สัมพันธ์กันได้ดังนี้

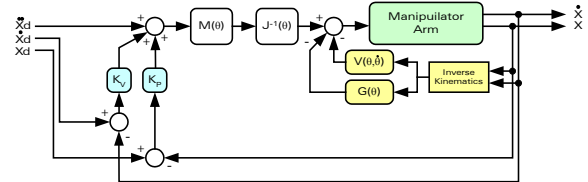
$$\begin{aligned}\Theta_d &= Invkin(X_d) \\ \dot{\Theta}_d &= J^{-1}(\Theta_d)(\dot{X}_d) \\ \ddot{\Theta}_d &= \dot{J}^{-1}(\Theta_d)(\dot{X}_d) + J^{-1}(\Theta_d)(\ddot{X}_d)\end{aligned}\quad (2)$$

โดยที่ $Invkin$ คือ ชุดสมการการแปลงย้อนกลับของหุ่นยนต์
 J^{-1} คือ ค่าผกผันของจาโคเบียน
 X_d, Θ_d คือ ค่าตำแหน่งของ End Effector และข้อต่อตามลำดับ

หลักจากที่แปลงการเคลื่อนที่ใน Catesian Space ให้เป็น Joint Space แล้ว จากนั้นก็นำค่าอ้างอิงของข้อต่อ ทั้งตำแหน่ง ความเร็ว และความเร่ง ของข้อต่อ ไปควบคุมการเคลื่อนที่ของข้อต่อ หากการควบคุมมีความสมบูรณ์ ตำแหน่ง End Effector ก็จะมีการเคลื่อนที่ใน Catesian Space ตามที่ต้องการ วงจรควบคุมจะมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 1a



(a) Conventional Trajectory Controller



(b) Catesian Based Trajectory Controller

รูปที่ 1 การควบคุมทางเดินของหุ่นยนต์

รูปที่ 1b แสดงถึงแนวคิดหนึ่งในการควบคุมการเคลื่อนที่ของ End Effector ใน Catesian Space โดยตรง การควบคุมแบบนี้เรียกว่า The inverse Jacobian Cartesian control Scheme [2] โดยสัญญาณค่าความผิดพลาดจะเป็นการเปรียบเทียบตำแหน่งของ End Effector ใน Catesian Space กับค่าที่ต้องการโดยตรง จากนั้นนำไปคำนวณแรงใน Catesian Space ผ่านทาง Inertia Matrix และนำไปคำนวณแรงที่ข้อต่อด้วย Inverse ของ Jacobian การควบคุมในลักษณะนี้ หากเราติดตั้งอุปกรณ์วัดตำแหน่งหรือเซนเซอร์ LPS ที่ End Effector ก็จะสามารถนำสัญญาณตำแหน่งจากอุปกรณ์วัดตำแหน่งมาป้อนกลับควบคุมได้ หากระบบควบคุมมีความสมบูรณ์ ก็จะทำให้ค่าความแม่นยำของระบบควบคุมขึ้นอยู่กับค่าความแม่นยำของอุปกรณ์วัดตำแหน่ง และไม่ขึ้นกับค่าความผิดพลาดของแบบจำลอง หรือ Kinematics ของหุ่นยนต์

4. การขับเคลื่อน End Effector ของหุ่นยนต์ด้วยเซนเซอร์

4.1 การขับเคลื่อนจากเซนเซอร์ที่ End Effector

แนวทางหนึ่งในการขับเคลื่อนโดยการป้อนกลับด้วยสัญญาณจากเซนเซอร์ที่ End Effector คือการปรับระเบียบวิธี Optimization แบบ Gradient based Searching เพื่อใช้ในการควบคุมระบบทางกล โดยรายละเอียดสามารถศึกษาได้ใน [7] จากแนวคิดดังกล่าว สมการควบคุมจะเขียนได้ดังนี้

$$\Delta\theta_c = -\alpha_k J^{-1} \cdot F \quad (3)$$

โดยที่ $\Delta\theta_c$ คือ ขนาดในการปรับตำแหน่งข้อต่อ
 α_k คือ ขนาดก้าวเดินในการปรับตำแหน่งข้อต่อ
 F คือ ค่าความผิดพลาดของสัญญาณจากเซนเซอร์

เมื่อนำวิธีการดังกล่าวมาใช้ในการควบคุมหุ่นยนต์ก็จะมีลักษณะที่ระบบควบคุมจะพยายามปรับข้อต่อแขนกลเพื่อให้ความผิดพลาดมีค่าลดลง ความผิดพลาดจะกำหนดในรูปของค่าสัญญาณจากเซนเซอร์ที่ End Effector ซึ่งอาจเป็นอุปกรณ์ตรวจจับแรง กล้องบันทึกภาพ หรือเซนเซอร์วัดระยะ หรือสัญญาณจากเซนเซอร์ต่างๆ พร้อมๆ กัน เทคนิคการปรับข้อต่ออาศัยการประมาณหาจาโคเบียนผสม (Hybrid Jacobian) ในขณะที่ยกเคลื่อนที่ จาโคเบียนผสมนี้จะใช้เพื่อหาทิศทางในการปรับข้อต่อ โดยที่เมื่อปรับข้อต่อตามนี้แล้ว ความผิดพลาดควรจะมียาลดลง

4.2 การประมาณค่าจาโคเบียนในขณะทำงาน

เพื่อให้วิธีการควบคุมเป็นอิสระจากสมการ Kinematics ของหุ่นยนต์และเซนเซอร์ต่างๆ วิธีที่ใช้ในงานวิจัยนี้จึงประมาณค่าจาโคเบียนขึ้นจากการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์กับสัญญาณจากเซนเซอร์ต่างๆ โดยค่าจาโคเบียนที่ประมาณได้นี้จะเรียกว่าจาโคเบียนผสมเนื่องจากเป็น Matrix ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนตำแหน่งข้อต่อกับการเปลี่ยนค่าของสัญญาณจากเซนเซอร์ต่างชนิดพร้อมๆ กัน (ในกรณีที่สัญญาณจากเซนเซอร์เป็นสัญญาณแรงสัมผัสทั้งหมด จะเรียกจาโคเบียนนี้ว่าจาโคเบียนแรง (Force Jacobian) และในกรณีที่สัญญาณเป็นข้อมูลจากรูปภาพ จะเรียกว่าจาโคเบียนรูปภาพ (Image Jacobian))

ในการประมาณค่าจาโคเบียนขณะทำงานนั้น ทุกๆ รอบของการวัดค่า (Sampling) ระบบควบคุมจะเก็บค่าสัญญาณที่จะควบคุม $f_v^j(\theta_c)$ และค่าตำแหน่งข้อต่อ θ_c^j โดยที่ j คือตำแหน่งเวลา จากนั้นก็จะคำนวณค่าการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณดังกล่าว โดยที่ $df_v^j = f_v^j - f_v^{j-1}$ และ $d\theta_c^j = \theta_c^j - \theta_c^{j-1}$ และนำค่าเหล่านี้มาประมาณหาค่าจาโคเบียนจากสมการ

$$DQ = \begin{bmatrix} d\theta_{c1}^{j-n+1} & \dots & d\theta_{c1}^j \\ \dots & \dots & \dots \\ d\theta_{cn}^{j-n+1} & \dots & d\theta_{cn}^j \end{bmatrix}, DF = \begin{bmatrix} df_{v1}^{j-n+1} & \dots & df_{v1}^j \\ \dots & \dots & \dots \\ df_{vm}^{j-n+1} & \dots & df_{vm}^j \end{bmatrix}$$

$$\hat{J} = DF \cdot DQ^{-1} \quad (4)$$

ค่าจาโคเบียนที่ประมาณได้นี้ จะมีความแม่นยำ ณ ตำแหน่งที่ประมาณเท่านั้น เมื่อหุ่นยนต์มีการเคลื่อนที่ ระบบก็จะประมาณค่าจาโคเบียนขึ้นใหม่ในทุกๆ รอบของการปรับค่าสัญญาณควบคุม สำหรับการประมาณค่าจาโคเบียนในตำแหน่งเริ่มต้นจะใช้การบังคับให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ในขนาดและทิศทางที่กำหนดขึ้น จากระบบที่มีข้อมูลที่มาพอสำหรับการประมาณค่าจาโคเบียน แล้วจึงใช้ค่าจาโคเบียนนี้มาคำนวณคำสั่งควบคุมหุ่นยนต์

4.3 การชดเชยการเคลื่อนที่จากอุปกรณ์วัดตำแหน่ง

ในกรณีที่ใช้เซนเซอร์ที่ End Effector ในการตรวจจับสิ่งกีดขวางหรือป้องกันไม่ให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปในทิศทางที่ไม่ต้องการ เช่นการใช้เซนเซอร์ LPS หรือเซนเซอร์วัดระยะในการตรวจจับสิ่งกีดขวาง และกำหนดให้ End Effector มีระยะห่างจากสิ่งกีดขวางมากกว่าระยะที่กำหนด เทคนิคการควบคุมเมื่อมีการกำหนดเงื่อนไขในลักษณะนี้ จะใช้การปรับแก้การเคลื่อนที่ในขณะที่ทำงาน โดยการปรับแก้จะเกิดขึ้นเฉพาะเมื่อ End Effector เคลื่อนที่จนทำให้ไม่สามารถรักษาให้เงื่อนไขที่กำหนดให้เป็นจริงได้ ระบบปรับการเคลื่อนที่ก็จะ Active และเข้ามาปรับการเคลื่อนที่เพื่อรักษาให้เงื่อนไขเป็นจริงตลอดเวลา ผู้เขียนได้ปรับแต่งระเบียบวิธี Gradient Projection Method [7] เพื่อใช้ในการควบคุมโดยมีหลักการดังนี้ ในกรณีที่กำหนดให้ระยะห่างระหว่าง End Effector กับกำแพงมีค่ามากกว่าค่าที่กำหนด และที่ End Effector ได้ติดตั้งอุปกรณ์วัดระยะห่างจากกำแพงไว้ เราสามารถประมาณค่าระยะห่างจากกำแพงได้จากสมการ

$$\Delta s = \begin{bmatrix} J_{s1} & J_{s2} & \dots & J_{sn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta_1 \\ \Delta \theta_2 \\ \dots \\ \Delta \theta_n \end{bmatrix} \quad (5)$$

โดยที่ S คือค่าสัญญาณจากอุปกรณ์วัดระยะ

$\begin{bmatrix} J_{s1} & J_{s2} & \dots & J_{sn} \end{bmatrix}$ คือ sensitivity vector

$\begin{bmatrix} \theta_1 & \theta_2 & \dots & \theta_n \end{bmatrix}$ คือตำแหน่งของข้อต่อหุ่นยนต์

เมื่อสมการนี้ประมาณได้ว่าสัญญาณจากอุปกรณ์วัดระยะจะมีค่ามากกว่าที่กำหนด ระบบปรับการเคลื่อนที่ก็จะ Active และปรับการเคลื่อนที่ให้เข้ามาอยู่บนระนาบของสมการเงื่อนไข โดยที่ทิศในการปรับการเคลื่อนที่จะเลือกทิศทางที่ทำให้ระยะในการปรับการเคลื่อนที่มีค่าน้อยที่สุดซึ่งจะทำให้ความแม่นยำในการควบคุมมีค่ามากที่สุด

สำหรับ Sensitivity vector นั้น ก็สามารถประมาณขึ้นจากการเคลื่อนที่โดยใช้แนวคิดเดียวกันกับที่ใช้ในการประมาณค่าจาโคเบียน และสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$DS = \begin{bmatrix} ds^{j-n+1} & \dots & ds^j \end{bmatrix}, DQ = \begin{bmatrix} d\theta_{c1}^{j-n+1} & \dots & d\theta_{c1}^j \\ \dots & \dots & \dots \\ d\theta_{cn}^{j-n+1} & \dots & d\theta_{cn}^j \end{bmatrix}$$

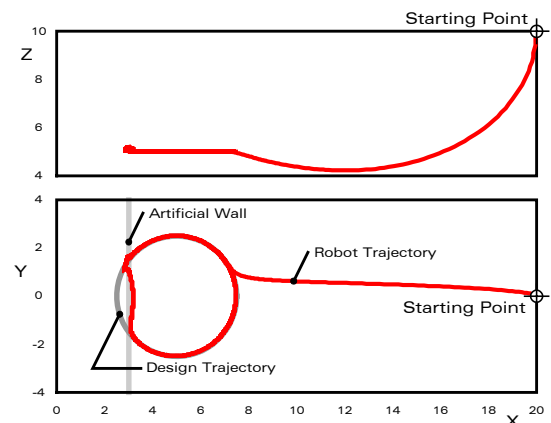
$$\hat{J}_s = DS \cdot DQ^{-1} \quad (6)$$

การที่สามารถประมาณค่าจาโคเบียนและ sensitivity vector ได้จากการเคลื่อนที่ ทำให้การควบคุม End Effector สามารถทำได้โดยไม่ต้องทราบ Kinematics ของหุ่นยนต์และแบบจำลองของเซนเซอร์ต่างๆ

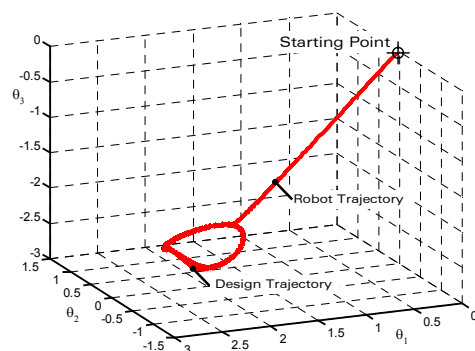
ตารางที่ 1 DH parameter of the CRS robotics system

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

เมื่อนำวิธีการที่ได้นำเสนอมาจำลองควบคุมหุ่นยนต์ CRS Robotics System ที่ติดตั้งเซนเซอร์ LPS ไว้ หุ่นยนต์มีพารามิเตอร์ดังแสดงในตารางที่ 1 หุ่นยนต์เริ่มต้นในตำแหน่ง θ_1, θ_2 และ θ_3 เป็นศูนย์ ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ End Effector อยู่ที่ตำแหน่ง XYZ = (20, 0, 10) จากนั้นออกแบบให้หุ่นยนต์มีเส้นทางเดินเป็นวงกลมบนระนาบ XY มีจุดศูนย์กลางที่ (5, 0, 5) และมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 นิ้ว และหมุนด้วยความเร็ว $\pi/6$ เรเดียนต่อวินาที วิธีการควบคุมทางเดินจะใช้แบบ Conventional Trajectory Controller ดังที่ได้แสดงในรูป 1a เงื่อนไขการควบคุมจะกำหนดให้ End Effector มีตำแหน่งในระนาบ X มากกว่า 3



(a) การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ใน Catesian Space



(b) การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ใน Joint Space

รูปที่ 2 ทางเดินของหุ่นยนต์จากการควบคุมป้องกันด้วย LPS

เมื่อจำลองการควบคุมด้วยโปรแกรม Matlab® และ Robotics TOOLBOX [8] โดยกำหนดให้ $K_p=100$ และ $K_v=20$ ได้ผลลัพธ์ของทางเดิน End Effector ดังแสดงในรูปที่ 2 หุ่นยนต์สามารถติดตามทางเดินได้ตามที่ต้องการ ทั้งตำแหน่ง ความเร็ว และความเร่ง ทำให้เส้นทางเดินเรียบ เมื่อพิจารณาการเคลื่อนที่ใน Catesian Space (รูปที่ 2a) พบว่าในแนວแกน Z นั้น หุ่นยนต์เคลื่อนที่ลงมาต่ำกว่าค่าที่ต้องการก่อนที่จะปรับเข้าสู่ค่าอ้างอิงที่ $Z=5$ แต่เมื่อพิจารณาการเคลื่อนที่ใน Joint Space (รูปที่ 2b) พบว่าหุ่นยนต์เดินตรงเข้าสู่เส้นทางเดินที่กำหนด เนื่องจากเส้นทางเดินที่กำหนดจะทำให้ End Effector เคลื่อนที่เข้าสู่ตำแหน่งที่ระยะในแนວแกน X มีค่าน้อยกว่า 3 ที่ตำแหน่งนี้ ระบบปรับการเคลื่อนที่ที่จะ Active และทำการปรับค่าตำแหน่ง ความเร็ว และความเร่ง อ้างอิง เพื่อปรับเส้นทางให้ขนานกับเงื่อนไข แม้ว่าทางเดินของหุ่นยนต์ในตำแหน่งนี้จะไม่เรียบ แต่ระบบควบคุมที่นำเสนอสามารถทำให้หุ่นยนต์มีปฏิสัมพันธ์กับสิ่งแวดล้อม หรือสามารถใช้เซนเซอร์ที่ติดตั้งที่ End Effector มาปรับการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ได้

4.4 การควบคุมแรงสัมผัส

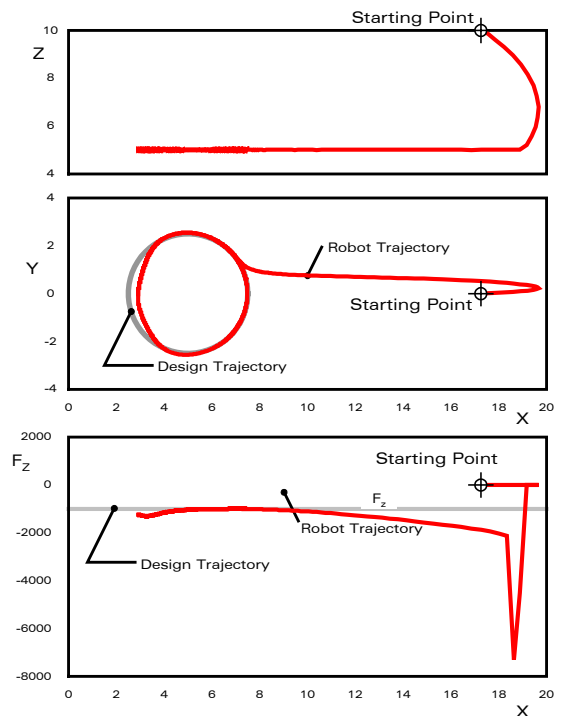
การควบคุมแรงสัมผัสเป็นอีกตัวอย่างหนึ่งของการควบคุม End Effector โดยในการศึกษาจะควบคุมหุ่นยนต์ CRS Robotics System ให้มีเส้นทางเดินเดียวกันกับในหัวข้อที่ผ่านมา และกำหนดสิ่งแวดล้อมมีพื้นอยู่ที่ระยะ $Z=5$ ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ควบคุมระยะในแนວแกน Z และจะควบคุมแรงสัมผัสให้มีค่าเท่ากับ 1000 นิวตันในระหว่างที่ End Effector เคลื่อนที่เป็นวงกลมบนระนาบ XY

เทคนิคการควบคุมจะใช้วิธีเดียวกันกับการจำลองการชดเชยการเคลื่อนที่จากอุปกรณ์วัดตำแหน่ง โดยปรับให้ระบบปรับการเคลื่อนที่นั้นเริ่ม Active เมื่อ End Effector เข้าสู่เส้นทางเดินอ้างอิง และจากนั้นให้ทำงานตลอดเวลา และทิศทางในการ Project กลับมาที่สมการเงื่อนไขควบคุมจะใช้ความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ข้อต่อกับแรงสัมผัสที่เกิดขึ้นหรือกล่าวคือการควบคุมแรงเป็นแบบทางตรง

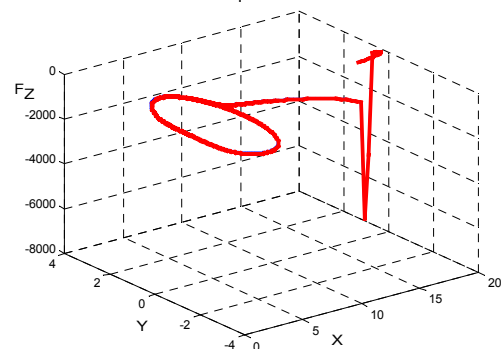
การจำลองควบคุมแรงสัมผัสนั้นมีความยุ่งยากและสลับซับซ้อนกว่าการควบคุมการเคลื่อนที่มาก เนื่องจากต้องสร้างแบบจำลองการเกิดแรงสัมผัสขึ้น โดยในการจำลองนี้จะกำหนดให้พื้นหรือสิ่งแวดล้อมมีความแข็งเกร็ง หรือไม่มีการยุบตัวเกิดขึ้น และค่าแรงสัมผัสจะหาได้จากค่าแรงที่ข้อต่อและจาโคเบียนของแรง

กำหนดให้ตำแหน่งเริ่มต้นของหุ่นยนต์อยู่ที่ θ_1, θ_2 และ θ_3 เท่ากับ 0, $-\pi/6$ และ $\pi/3$ ตามลำดับ หุ่นยนต์เคลื่อนที่จากตำแหน่งเริ่มต้นจนกระทั่งเข้าชนกับพื้นในระยะ $Z=5$ และเกิดแรงกระแทกขึ้นที่ตำแหน่งนี้ จากนั้น หุ่นยนต์จะวิ่งสัมผัสกับพื้นไปตลอดจนเข้าสู่เส้นทางอ้างอิงที่กำหนด รูปที่ 3 แสดงให้เห็นว่าวิธีที่นำเสนอสามารถควบคุมแรงสัมผัสได้ในระดับหนึ่ง ระบบควบคุมสามารถใช้สัญญาณแรงจากอุปกรณ์ตรวจรู้แรงที่ติดตั้งที่ปลายแขนมาปรับพารามิเตอร์ควบคุมเพื่อให้หุ่นยนต์สามารถมีปฏิสัมพันธ์กับสิ่งแวดล้อมได้

การประมาณค่า Sensitivity Vector จะใช้การคำนวณเหมือนกันกับการจำลองควบคุมชดเชยการเคลื่อนที่จากอุปกรณ์วัดตำแหน่งในหัวข้อที่ผ่านมา ซึ่งจะเห็นว่าวิธีการควบคุมลักษณะนี้มีความยืดหยุ่นสูง และสามารถปรับใช้งานได้กับเซนเซอร์ที่มีลักษณะแตกต่างกัน



(a) การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ใน Catesian Space



(b) แรงสัมผัสที่เกิดขึ้นบนทางเดินในระนาบ XY

รูปที่ 3 ทางเดินของหุ่นยนต์จากการควบคุมแรงสัมผัส

5 หุ่นยนต์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

การทดลองควบคุมจะใช้หุ่นยนต์แบบ Articulated รุ่น A255 ของบริษัท CRS Robotics Inc ซึ่งมีพารามิเตอร์ค่าเดียวกันกับที่ใช้ในการจำลองควบคุม และนำมาติดตั้ง Fastrack® ของ Polhemus Inc สำหรับวัดตำแหน่งของ End Effector ใน Catesian Space และ JR3 Force Sensor สำหรับวัดค่าแรงสัมผัส และใช้ Interface Box ที่สร้างขึ้นเพื่อให้สามารถควบคุมหุ่นยนต์ในระดับแรงบิดที่ข้อต่อด้วยเครื่องคอมพิวเตอร์ได้ การควบคุมในเวลาจริงจะใช้ Matlab® xPC ซึ่งใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ 2 เครื่อง คือ Host PC กับ Target PC สมการควบคุมจะพัฒนาในเครื่อง Host PC และจากนั้น ทำการ Compile และส่ง Code ควบคุมไปที่ Target PC ที่ติดตั้ง PCL726 ของบริษัท Advantech Inc และ ETT8255 เพื่อเป็น Interface Card สำหรับควบคุมหุ่นยนต์ การสื่อสารระหว่าง Host กับ Target PC ใช้โปรโตคอล TCP/IP ในระหว่างควบคุม Target PC จะส่งค่าสัญญาณต่างๆ กลับมาแสดงผลที่ Host PC กลับมาทางสายสัญญาณสื่อสาร รูปที่ 4 แสดงระบบโดยรวมสำหรับการทดลอง



รูปที่ 4 หุ่นยนต์และเครื่องมือทดลอง

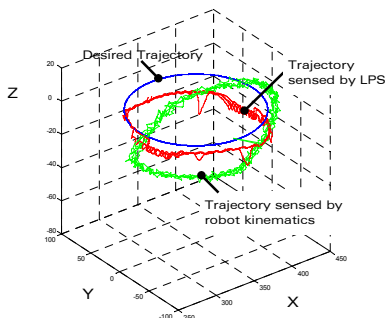
6 การทดลองจับควบคุม

6.1 การควบคุม

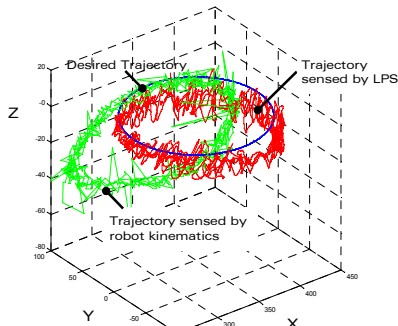
การทดลองนี้จะควบคุมให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่เป็นวงกลมบนระนาบ XY โดยมีจุดศูนย์กลางที่ตำแหน่ง $XYZ = (350, 0, 0)$ โดยมีรัศมี 50 มิลลิเมตร ในขณะเดียวกัน ก็จะควบคุมให้ระยะในแนวแกน Z มีค่าเป็นศูนย์โดยใช้การป้อนกลับด้วยสัญญาณจาก Fastrak® เนื่องจากในทางปฏิบัติ ตำแหน่ง End Effector ที่คำนวณได้จาก Kinematics ของหุ่นยนต์ กับค่าที่วัดได้จาก Fastrak® จะแตกต่างกัน การทดลองนี้จึงเป็นการแสดงผลเบื้องต้นถึงการใช้ Fastrak® ในการปรับแก้ไขการเคลื่อนที่ในขณะทำงาน

6.2 ผลลัพธ์การควบคุม

ผลลัพธ์การควบคุมด้วยวิธีการที่นำเสนอในรูปที่ 5 แสดงให้เห็นว่าสามารถใช้สัญญาณจาก Fastrak® ในการปรับการเคลื่อนที่ได้ ให้พิจารณารูปที่ 5a ซึ่งข้อมูลตำแหน่งที่คำนวณได้จากตำแหน่งข้อต่อที่วัดด้วย Encoder ผ่านทาง Kinematics ของหุ่นยนต์ จะแตกต่างกับค่าที่วัดได้ด้วย Fastrak® และในรูปยังแสดงถึงความไม่สมบูรณ์ของระบบควบคุม ซึ่งทำให้ทางเดินเกิดขึ้นจริงแตกต่างจากค่าที่ต้องการ



(a) ทางเดินของ End Effector ก่อนชดเชยการเคลื่อนที่



(b) ทางเดินของ End Effector จากการชดเชยการเคลื่อนที่

รูปที่ 5 การปรับชดเชยการเคลื่อนที่จากข้อมูล LPS

โดยการใช้ระบบปรับการเคลื่อนที่ซึ่งนำสัญญาณจาก Fastrak® เข้ามาปรับแก้ไขทำให้ตำแหน่ง End Effector ที่วัดด้วย Fastrak® มีค่าเข้าใกล้ทางเดินที่ต้องการมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 5b การทดลองแสดงให้เห็นถึงการควบคุมที่ทำให้หุ่นยนต์มีปฏิสัมพันธ์กับสิ่งแวดล้อม และการเพิ่มความแม่นยำให้กับการควบคุมโดยนำสัญญาณที่ End Effector ป้อนกลับเข้ามาควบคุมการเคลื่อนที่

7 บทสรุป

บทความนี้นำเสนอวิธีการควบคุม End Effector ของหุ่นยนต์ โดยใช้การป้อนกลับของสัญญาณที่ติดตั้งที่ End Effector โดยนำเสนอระบบปรับการเคลื่อนที่ซึ่งมีพื้นฐานมาจาก Gradient Projection Method ซึ่งเมื่อทำงาน จะปรับแก้ไขค่าตำแหน่งอ้างอิง เพื่อควบคุมทางเดินของหุ่นยนต์ใน Sensor space วิธีการที่นำเสนอสามารถใช้ได้ทั้งในการควบคุมติดตามเป้าหมาย หรือใช้ในการหลบหลีกสิ่งกีดขวาง บทความได้แสดงการจำลองควบคุมในกรณีที่ใช้เซนเซอร์ LPS และอุปกรณ์ตรวจรู้แรงเข้ามาปรับชดเชยการเคลื่อนที่ และทดลองใช้ Fastrak® เข้ามาร่วมควบคุมทางเดินของ End Effector

ผลลัพธ์แสดงถึงการมีปฏิสัมพันธ์กับสิ่งแวดล้อมและการเพิ่มความแม่นยำ นอกจากนี้วิธีการที่นำเสนอคาดว่าจะจะเป็นแนวทางในการพัฒนาให้หุ่นยนต์มีความยืดหยุ่นในการทำงานเพิ่มมากขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ (MTEC) ที่ให้ทุนสนับสนุนให้งานวิจัยนี้ให้เสร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี และขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สนับสนุนให้ผู้วิจัยได้มีเวลาในการทำงานวิจัยนี้อย่างเต็มที่

รายการอ้างอิง

- [1] Whitney, D.E. (1977), History perspective and state of the art on robot force control, Proc. 1985 International Conference on Robotics and Automation, New York.
- [2] John J. Craig (1989), Introduction to ROBOTICS: mechanics and control, Addison-Wesley Publishing Company, 0-201-09528-9, USA.
- [3] S. Hutchinson and G. D. Hager (1996), A Tutorial on Visual Servo Control, IEEE Transaction on Robotics Automation, vol.12, pp. 650-670, Oct. 1996.
- [4] 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.
- [5] V. Sangveraphunsiri, R. Chanchaen (2000), A Hybrid Force/Visual Servo Control for Industrial Robots, 2000 JSAE Spring Conference, Yokohama, Japan, May, 2000.
- [6] Chanchaen R., Sangveraphunsiri V., Sanguanpiyapan K., Chatchaisucha P., Dharachantra P., Nattarom S., and Pongparit S., "Collision Avoidance Technique for Uncalibrated Visual Servoing for Industrial Robots," 2002 IEEE International Conference on Industrial Technology, Bangkok, Thailand, December 2002.
- [7] P. Y. Papalambros, D. J. Wilde, Principles of optimal design Modeling and computation, Cambridge University Press, 1988.
- [8] P. I. Corke, A Robotics Toolbox for MATLAB, IEEE Robotics and Automation Magazine, Vol. 3, pp. 24-32, Mar 1996.