บทที่ 6

การควบคุมแรงและรูปภาพของหุ่นยนต์อุตสาหกรรม

6.1 นำเรื่อง

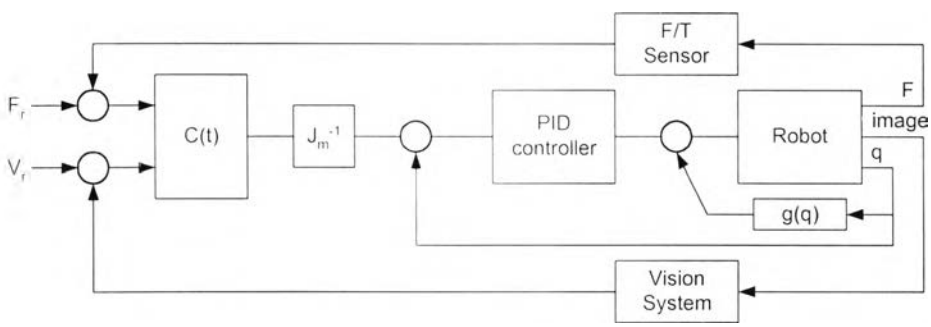
การควบคุมแรงเป็นวิธีการสำคัญในการควบคุมให้แขนกลมีปฏิสัมพันธ์กับสิ่งแวดล้อม แรงจะให้ข้อมูลตำแหน่งสัมพัทธ์กับวัตถุที่ละเอียดมาก (ณ จุดสัมผัส) อย่างไรก็ตาม การวัดแรงมีข้อจำกัดที่แขนกลจะต้องสัมผัสกับวัตถุหรือสิ่งแวดล้อม การควบคุมป้อนกลับด้วยรูปภาพมีจุดเด่นที่แตกต่างกัน กล่าวคือรูปภาพจะให้ข้อมูลในขอบเขตที่กว้างกว่า และการวัดไม่จำเป็นต้องเกิดการสัมผัส แต่ข้อมูลตำแหน่งมีความละเอียดน้อยกว่าการวัดด้วยแรง ข้อมูลทั้งสองนี้จะเสริมกันเพื่อให้การทำงานของหุ่นยนต์มีความหลากหลายและสามารถทำงานได้อย่างมีเสถียรภาพแม้ว่าสภาพแวดล้อมจะมีความไม่แน่นอน

การควบคุมแรงและรูปภาพพร้อมกันจะทำให้หุ่นยนต์มีศักยภาพในการทำงานที่ใกล้เคียงกับมนุษย์มากขึ้น พิจารณาการนำหุ่นยนต์มาขัดเพรียงที่เกาะอยู่บนผิวท้องเรือออก หุ่นยนต์ต้องมีความสามารถในการหาตำแหน่งของเพรียง และยังต้องสามารถควบคุมแรงในการขัดออก เพื่อให้มีค่าแรงมากพอในการขัดออกแต่ไม่มากเกินไปในการทำความเสียหายให้กับผนังเรือ การควบคุมแรงและรูปภาพพร้อมกันเป็นวิธีการหนึ่งสำหรับงานดังกล่าว เช่นเดียวกัน ในการนำหุ่นยนต์มายาแนวกาวเพื่อยึดบริเวณรอยต่อของชิ้นงาน การควบคุมด้วยตำแหน่งอาจไม่ดีเพียงพอในการหาตำแหน่งที่มีความแม่นยำ การควบคุมด้วยแรงและรูปภาพจะทำให้หุ่นยนต์ทราบตำแหน่งได้ถูกต้อง ประกอบกับควบคุมแรงหรือปริมาณกาวได้อย่างแม่นยำ

การควบคุมแบบผสมระหว่างแรงกับรูปภาพกับหุ่นยนต์อุตสาหกรรมยังเป็นเรื่องที่ค่อนข้างยากในปัจจุบัน โดยทั่วไปต้องทราบสมการทางคณิตศาสตร์ของระบบกล้องดิจิตัล หุ่นยนต์และอุปกรณ์วัดแรง อย่างถูกต้อง และเนื่องจากธรรมชาติของการควบคุมด้วยแรงและรูปภาพมีความแตกต่างกันมาก วิธีการทั่วไปในการรวมข้อมูลจึงไม่เหมาะสมกับงานลักษณะนี้ ในบทนี้จะนำเสนอสามวิธีการหลักในการควบคุมแรงและรูปภาพ ได้แก่การควบคุมแบบสลับ (Traded Control) และการควบคุมแบบผสม (Hybrid Control) และการควบคุมร่วมกัน (Shared Control) และได้นำเสนอสองวิธีการใหม่ในการควบคุมแรงและพารามิเตอร์รูปภาพพร้อมกัน เรียกว่า การควบคุมแบบเรียนรู้ (Learning Control) และการควบคุมแบบขนาน ระหว่างแรงและรูปภาพ (Parallel Control) พร้อมกับแสดงผลการทดสอบกับหุ่นยนต์อุตสาหกรรมจริงเพื่อแสดงถึงความเป็นไปได้ในทางปฏิบัติ

6.2 การควบคุมแรงและรูปภาพของแขนกล

งานของหุ่นยนต์บางครั้งต้องการใช้การควบคุมด้วยรูปภาพและแรงร่วมกัน ตัวอย่างเช่น การควบคุมด้วยรูปภาพนำปลายแขนกลเข้าหาวัตถุและเข้าหาในทิศทางที่ถูกต้อง และการควบคุมแรงทำให้ชิ้นงานเกิดแรงในการสวมประกอบตามที่ต้องการ หรือในการควบคุมจากระยะไกล อาจใช้เมาส์เพื่อบังคับแขนกลในขณะที่ดูภาพวิดีทัศน์ของหุ่น การควบคุมด้วยรูปภาพจะทำให้มั่นใจว่าทางเดินของแขนกลมีความแม่นยำและเป็นไปตามที่ผู้ควบคุมกำหนดจากตำแหน่งเมาส์ และใช้การควบคุมแรงเมื่อแขนกลสัมผัสกับพื้น



รูปที่ 6.1 ผังการทำงานของการควบคุมแรงและพารามิเตอร์รูปภาพ

การควบคุมแรงและรูปภาพโดยทั่วไปจะมีผังการทำงานตามรูปที่ 6.1 การควบคุมตามผังการทำงานนี้จะมีตัวควบคุม PID และตัวชดเชยแรงโน้มถ่วงในวงรอบใน นั่นก็คือสามารถสั่งการแขนกลด้วยตำแหน่งแขนกล ตัวควบคุมแรงและรูปภาพจะรับสัญญาณแรงและพารามิเตอร์รูปภาพมาเปรียบเทียบกับค่าที่ต้องการ ผลต่างก็คือความผิดพลาดในตำแหน่งเวลาปัจจุบัน เมื่อนำความผิดพลาดมาผ่านสมการของตัวควบคุม C(t) ก็จะได้สัญญาณควบคุม u(t) จากนั้น นำสัญญาณนี้ไปคูณกับส่วนกลับของจาโคเบียนก็จะได้มุมในการปรับตำแหน่งข้อต่อ ซึ่งเมื่อปรับตามนี้แล้ว ความผิดพลาดจะมีค่าลดลง ความแตกต่างของแต่ละวิธีการควบคุมอยู่ที่สมการของตัวควบคุม C(t) ซึ่งจะได้กล่าวถึงต่อไป

6.3 การควบคุมแบบสลับ

จุดเด่นหลักสองอย่างในการใช้การควบคุมด้วยรูปภาพและแรงร่วมกันก็คือ จุดแรก การควบคุมด้วยรูปภาพมีผลอย่างมากในการปรับปรุงประสิทธิภาพการควบคุมในขณะที่แขนกลยังไม่สัมผัสกับสิ่งแวดล้อม ซึ่งจะทำให้สามารถเลือกใช้ค่าเกนต่ำในการควบคุมแรง เป็นผลทำให้แขนกลเคลื่อนที่เร็วในขณะที่การควบคุมแรงมีเสถียรภาพ และไม่เกิดแรงกระแทกที่มากเกินควร จุดที่สอง การควบคุมด้วยรูปภาพจะทำให้แขนกลอยู่ในทิศทางที่ถูกต้องก่อนการเข้าจับชิ้นงาน

การควบคุมแบบสลับใช้ประโยชน์จากจุดเด่นทั้งสองนี้ โดยที่การควบคุมแบบสลับจะมีสมการในการควบคุมคือ

$$u(k)=\begin{cases}-(J_v^{T}(k)QJ_v(k)+L)^{-1}J_v^{T}(k)Q[x(k)-x_D(k+1), & \|x_D(k)-x(k)\|>\varepsilon\\ S_F G_F(F_r(k)-F_m(k)), & \|x_D(k)-x(k)\|\le\varepsilon\end{cases}$$

ในระหว่างที่ทำการควบคุมแบบสลับ แขนกลจะเริ่มจากการควบคุมด้วยรูปภาพ จากนั้นจะสลับเป็นการควบคุมด้วยแรงหลังจากที่การควบคุมด้วยรูปภาพนำแขนกลเข้าใกล้ผิวสัมผัสถึงระดับหนึ่ง สถานะเป้าหมายของแขนกลในรูปภาพคือ X_D ซึ่งจะเป็นสถานะที่ใกล้กับผิวสัมผัส S_F เป็นเมตริกซ์ที่ระบุแกนในการควบคุมแรง G_F เป็นเมตริกซ์ของค่าเกน และ F_r และ F_m หมายถึงค่าแรงอ้างอิงและค่าแรงที่วัดได้ตามลำดับ จุดเด่นของวิธีการนี้คือจะทำให้แขนกลเข้าถึงผิวสัมผัสได้เร็วโดยใช้การควบคุมด้วยรูปภาพ จากนั้นการควบคุมจะสลับเป็นการควบคุมแรงที่ค่าเกนต่ำซึ่งจะทำงานได้มีประสิทธิภาพมากเมื่อแขนกลเข้าใกล้ผิวงาน ทำให้ไม่เกิดการกระแทกของปลายแขนมากเกินไปนัก

โดยใช้การควบคุมแรงเพียงอย่างเดียว แขนกลอาจไม่มีเสถียรภาพ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในระหว่างที่เกิดการกระแทกชนกับผิวงาน ทางแก้ไขก็คือปรับค่าเกนของการควบคุมแรงให้ต่ำ แต่ก็จะเป็นผลให้แขนกลเคลื่อนที่ช้ามาก ด้วยเหตุผลนี้ วิธีการควบคุมแขนกลโดยทั่วไปจะใช้การเคลื่อนที่แบบระวัง (Guarded Move) ในระหว่างที่แขนกลเริ่มสัมผัสกับพื้นผิว ในระหว่างการเคลื่อนที่แบบระวัง แขนกลจะเข้าถึงผิวสัมผัสโดยใช้การควบคุมแบบตำแหน่งโดยที่ทำการเฝ้าดูแรงที่เกิดขึ้นตลอดเวลา ถ้าตรวจพบว่าเกิดแรงขึ้นมากกว่าค่าที่กำหนด การเคลื่อนที่ก็จะหยุด และการควบคุมก็จะสลับเป็นการควบคุมแรง ข้อจำกัดของการควบคุมแบบนี้ก็คืออาจเกิดแรงสัมผัสที่สูงมากยกเว้นว่าแขนกลมีมวลประสิทธิผลน้อยเพียงพอที่แขนกลจะหยุดได้ทันก่อนที่จะเกิดแรงเพิ่มขึ้นอย่างกระทันหัน

6.4 การควบคุมแบบผสม

การควบคุมแบบผสมเป็นวิธีการในการรวมการควบคุมด้วยรูปภาพกับการป้อนกลับด้วยอุปกรณ์ตรวจรู้แบบอื่น สำหรับการควบคุมแบบผสมระหว่างแรงกับรูปภาพ ระบบจะทำการควบคุมด้วยรูปภาพและแรงพร้อมกัน ทั้งนี้ การควบคุมจะแยกแกนกันอย่างชัดเจน กล่าวคือจะใช้เมตริกซ์เลือกแกน (Diagonal Selection Matrix) ในการระบุว่าแกนใดเป็นแกนที่ควบคุมแรงและแกนใดเป็นแกนที่ควบคุมด้วยรูปภาพ การควบคุมลักษณะนี้มีจุดอ่อนตรงที่ระบบจะไม่คำนึงถึงข้อมูลรูปภาพและแรงในแกนที่ควบคุมด้วยแรงและรูปภาพตามลำดับ รูปภาพสามารถให้ข้อมูลการเคลื่อนที่ทั้งหกทิศทาง และอุปกรณ์วัดแรงจะให้ข้อมูลของแรงทั้งหกทิศทางเช่นกัน

เมตริกซ์เลือกแกนจะกำจัดข้อมูลในแกนที่ไม่เกี่ยวข้องออก อีกข้อจำกัดหนึ่งของการควบคุมแบบนี้ก็คือแกนในการควบคุมด้วยรูปภาพและแกนในการควบคุมด้วยแรงจะต้องตั้งฉากกัน เพื่อให้การควบคุมด้วยรูปภาพและแรงแยกอิสระจากกันอย่างชัดเจน

อย่างไรก็ตาม มีงานในบางลักษณะที่เหมาะสมมากในการควบคุมด้วยวิธีการแบบนี้ เช่น การจับถือสายไฟโดยใช้การควบคุมจากระยะไกล ซึ่งรูปภาพจะทำให้สามารถรักษาทิศทางของปลายแขนให้อยู่ในแนวของสายไฟ และใช้อุปกรณ์ตรวจรู้แบบอื่นเช่นอุปกรณ์วัดแรงในการบังคับการบีบจับสายไฟ

การควบคุมแบบผสม โดยทั่วไปจะมีสมการการควบคุมคือ

$$u(k) = -S_v (J_v^{\dagger}(k) Q J_v(k) + L)^{-1} J_v^{\dagger}(k) Q [x(k) - x_D(k+1) + S_r \dot{x}_r + S_F G_F (F_r(k) - F_m(k))$$

โดยที่ S_V, S_r และ S_F เป็นเมตริกซ์เลือกแกน ซึ่งมีสมาชิกเป็น 0 กับ 1 และรวมกันได้เท่ากับเมตริกซ์เอกลักษณ์ กล่าวคือ $S_V + S_r + S_F = I$ และ $\dot{x}_r$ แสดงความเร็วของปลายแขนที่กำหนด

6.5 การควบคุมแบบร่วมกัน

ลักษณะการควบคุมแบบนี้จะควบคุมแรงและรูปภาพในแกนเดียวกัน ซึ่งจะใช้สำหรับในกรณีที่ระบบกล้องดิจิตัลไม่มีความแม่นยำในการตรวจหาผิวสัมผัส ทำให้ต้องควบคุมแรงไปด้วยพร้อมกันในทิศทางที่ควบคุมด้วยรูปภาพ ให้พิจารณาในการควบคุมหุ่นยนต์จากระยะไกลผ่านสายเคเบิล ผู้ใช้งานจะควบคุมหุ่นยนต์ผ่านทางการมองเห็นจากระบบกล้องดิจิตัล เมื่อหุ่นยนต์เคลื่อนที่ถึงเป้าหมายและต้องเข้าไปจับชิ้นงาน ผู้ใช้อาจต้องเคลื่อนปลายแขนเข้าไปสัมผัสกับผิวชิ้นงาน และอาจเป็นผลให้เกิดความเสียหายขึ้นและการควบคุมหุ่นยนต์ก็ไม่มีเสถียรภาพ ถ้าการควบคุมจากระยะไกลนี้ ผู้ใช้สามารถรู้สึกถึงแรงที่เกิดขึ้นที่ปลายแขนได้ และนำมาพิจารณาประกอบในการควบคุม ปัญหาดังกล่าวก็จะหมดไป การควบคุมดังกล่าวพิจารณาข้อมูลแรงและรูปภาพที่อยู่ในแกนเดียวกันเพื่อทำการควบคุม หากมองอีกแง่มุมหนึ่ง การควบคุมแบบร่วมกันนี้จะคล้ายกันกับการควบคุมความหน่วงซึ่งควบคุมแรงและตำแหน่งในแนวแกนเดียวกัน

ในรายงานนี้ได้กล่าวถึงวิธีในการควบคุมแรงและรูปภาพทั้ง 3 วิธีแบบหยาบๆ เพื่อให้เห็นแนวคิดในการควบคุมในอดีตที่ผ่านมา การควบคุมแรงและรูปภาพมีประวัติสั้นและเป็นเรื่องที่ค่อนข้างใหม่ มีรายงานแสดงผลลัพธ์ในการควบคุมแบบต่างๆ ออกมาไม่มากนัก

6.6 การควบคุมแบบเรียนรู้

งานวิจัยนี้ ได้นำเสนอวิธีการใหม่ในการควบคุมรูปภาพและแรงร่วมกัน ในปัจจุบัน หุ่นยนต์อุตสาหกรรมยังจำกัดอยู่กับงานที่ใช้การควบคุมด้วยตำแหน่งเป็นหลัก งานเหล่านี้เช่นงานประกอบชิ้นส่วน หรือเคลื่อนย้ายชิ้นงานจากจุดหนึ่งไปอีกจุดหนึ่ง การควบคุมลักษณะนี้จะต้องให้แขนกลทำงานในสภาพแวดล้อมที่เหมาะสม ในหลายปีที่ผ่านมา หลายห้องปฏิบัติการวิจัยมีความพยายามที่จะพยายามควบคุมหุ่นยนต์ให้ทำงานโดยมีปฏิสัมพันธ์กับสิ่งแวดล้อมเพื่อให้แขนกลทำงานได้หลากหลายมากขึ้น ความพยายามนี้รวมถึงการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจรู้แบบต่างๆ เพื่อให้หุ่นยนต์มีความสามารถมากขึ้น และการพัฒนาสมอง (Neural Network) หรือปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligent) เพื่อให้หุ่นยนต์มีความฉลาดมากขึ้น

การควบคุมแบบเรียนรู้ออกแบบขึ้นในงานวิจัยนี้โดยมีพื้นฐานจากกรรมวิธีการควบคุมแบบผสมและจากระเบียบวิธีเชิงตัวเลขในการหาค่าสุดขีด ทั้งนี้วิธีการควบคุมพัฒนาขึ้นเพื่อลดข้อจำกัดต่างๆ ของวิธีการควบคุมแบบที่มีอยู่ในปัจจุบัน ให้พิจารณาการใช้หุ่นยนต์ในการยาแนวกาวเพื่อเชื่อมยึดรอยต่อชิ้นงาน การควบคุมตำแหน่งแขนกลไม่ให้ประสิทธิภาพที่ดีนักเนื่องจากว่าตำแหน่งที่คลาดเคลื่อน (ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากความไม่แน่นอนของตำแหน่งชิ้นงาน) จะทำให้หุ่นยนต์ใส่กาวไม่ตรงกับรอยต่อชิ้นงาน และปริมาณกาวอาจไม่สม่ำเสมอและเท่ากับปริมาณที่ควรเป็น ทำให้การยึดไม่ดีเท่าที่ควร เพื่อรับประกันว่ารอยยึดจะมีประสิทธิภาพดี จะต้องควบคุมแรงและรูปภาพพร้อมกัน กล่าวคือควบคุมด้วยรูปภาพเพื่อให้มั่นใจว่าใส่กาวได้ตรงกับแนวรอยต่อและควบคุมด้วยแรงเพื่อให้มั่นใจว่าปริมาณกาวที่รอยเชื่อมเป็นตามที่ต้องการ การควบคุมแบบสลับไม่สามารถทำงานนี้ได้เนื่องจากว่าไม่สามารถควบคุมพารามิเตอร์รูปภาพและแรงพร้อมกัน ส่วนวิธีการควบคุมแบบผสมแม้ว่าจะมีความเป็นไปได้ในหลักการ แต่ก็มีปัญหามากมายในทางปฏิบัติ กล่าวคือวิธีการนี้ต้องการคณิตศาสตร์ของระบบกล้องดิจิตัล แขนกล และระบบการวัดแรงที่ถูกต้อง คณิตศาสตร์ของระบบเหล่านี้จะใช้เพื่อหาจาโคเบียนซึ่งเป็นหัวใจของการควบคุม ซึ่งจะเห็นได้ว่าจาโคเบียนจะประกอบไปด้วยพารามิเตอร์ต่างๆ มากมาย ค่าพารามิเตอร์ที่คลาดเคลื่อนเพียงไม่กี่ตัวอาจทำให้การควบคุมไม่มีเสถียรภาพได้ หรือแม้ว่าจะสามารถหาพารามิเตอร์ทุกตัวได้อย่างแม่นยำ แต่การใช้งานหุ่นอาจทำให้พารามิเตอร์บางตัวเปลี่ยนค่าไป ตัวอย่างเช่น ความหลวมของสกรูยึดกล้องดิจิตัลทำให้ตำแหน่งของกล้องดิจิตัลเปลี่ยนไป หรือแรงเสียดทานที่เพิ่มขึ้นทำให้พลศาสตร์ของแขนกลเปลี่ยนไป ปัญหาดังกล่าวนี้จำกัดการควบคุมแบบผสมให้ใช้งานได้เฉพาะในห้องปฏิบัติการวิจัยเท่านั้น ได้มีความพยายามมากมายเพื่อลดปัญหาดังกล่าวเช่นทำการปรับเทียบหุ่นยนต์ทุกครั้งอย่างอัตโนมัติเมื่อเริ่มใช้งาน (หรือขณะใช้งาน) แต่การออกแบบระบบปรับเทียบก็ต้องใช้ความพยายามมากและจะใช้งานได้เฉพาะกับหุ่นยนต์รุ่นที่ออกแบบไว้ นอกจากนี้ยังอาจมีปัญหาในเรื่องการรับประกันการลู่เข้าของการปรับเทียบเนื่องจากว่าหุ่นยนต์มีพารามิเตอร์มากและมีความไม่เชิงเส้นสูง อีกข้อจำกัดหนึ่ง

ของการควบคุมแบบผสมก็คือแกนที่ควบคุมด้วยรูปภาพและแกนที่ควบคุมด้วยแรงต้องตั้งฉากกัน ซึ่งเมื่อใช้งานกับปัญหาการใช้หุ่นยนต์ยาแนวกาวเพื่อเชื่อมยึดรอยต่อชิ้นงานอาจมีข้อจำกัด ตัวอย่างเช่นบางครั้งอาจไม่สามารถให้ระนาบในการบันทึกภาพตั้งฉากกับทิศในการป้อนกาว ซึ่งอาจมีสาเหตุจากมุมมองดังกล่าวไม่ให้ภาพรอยต่อที่ชัดเจนหรือมีสิ่งกีดขวางในขณะทำงาน

การควบคุมแบบเรียนรู้ออกแบบขึ้นโดยอาศัยเทคนิคในการเรียนรู้เพื่อหาค่าสุดขีดกับปัญหาที่มีความอิสระมากกว่าหนึ่ง เมื่อพิจารณาสมการของ Taylor รอบจุด θ_c สำหรับหุ่นยนต์ที่มีจำนวนข้อต่อ n ข้อต่อ และมีความอิสระในการเคลื่อนที่เท่ากับ m ซึ่งเขียนอยู่ในรูปดังนี้

$$F(\theta_c + \Delta\theta_c) = F(\theta_c) + g^T \Delta\theta_c + \frac{1}{2} \Delta\theta_c^T H \Delta\theta_c + O\left(\|\Delta\theta_c\|^3\right)$$

โดยที่ $g = \left[\frac{\partial F}{\partial \theta_{c1}} \quad \frac{\partial F}{\partial \theta_{c2}} \quad \cdots \quad \frac{\partial F}{\partial \theta_{cm}} \right]$

คือค่า Gradient และ H คือเมตริกซ์เชิงอนุพันธ์อันดับสองขนาด m×m เรียกว่า Hessian Matrix ซึ่งนิยามในรูป

$$H_{ij} = \frac{\partial^2 F}{\partial \theta_{ci} \partial \theta_{cj}}$$

เพื่อให้เป้าหมายลู่เข้าสู่ค่าที่ต้องการ ทำได้โดยการปรับข้อต่อในทิศทางตรงกันข้ามกับ Gradient ตามสมการ

$$\Delta\theta_c = -\alpha_k g \cdot F$$

โดยที่ α คือความยาวของช่วงก้าวเดิน ถ้า α มีค่าที่เหมาะสม จะสามารถรับประกันการลู่เข้าไปสู่ค่าที่ต้องการได้

เมื่อนำหลักการนี้มาใช้กับระบบกลที่มีความอิสระมากกว่าหนึ่งเช่นหุ่นยนต์อุตสาหกรรม จะทำให้ Gradient อยู่ในรูปของจาโคเบียน

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial \theta_{c1}} & \frac{\partial F_1}{\partial \theta_{c2}} & \cdots & \frac{\partial F_1}{\partial \theta_{cm}} \\ \frac{\partial F_2}{\partial \theta_{c1}} & \frac{\partial F_2}{\partial \theta_{c2}} & \cdots & \frac{\partial F_2}{\partial \theta_{cm}} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \frac{\partial F_n}{\partial \theta_{c1}} & \frac{\partial F_n}{\partial \theta_{c2}} & \cdots & \frac{\partial F_n}{\partial \theta_{cm}} \end{bmatrix}$$

และสมการควบคุมก็เปลี่ยนรูปไปเป็น

$$\Delta\theta_c = -\alpha_1 J^{\dagger} \cdot F$$

เมื่อนำวิธีการดังกล่าวมาใช้ในการควบคุมหุ่นยนต์ก็จะมีลักษณะที่ระบบควบคุมจะพยายามปรับข้อต่อแขนกลเพื่อให้ความผิดพลาดมีค่าลดลง ความผิดพลาดอาจกำหนดในรูปของค่าแรงหรือพารามิเตอร์รูปภาพหรือทั้งสองอย่างผสมกัน เทคนิคการปรับข้อต่ออาศัยการประมาณหาจาโคเบียนผสม (Hybrid Jacobian) ในขณะที่แขนกลเคลื่อนที่ จาโคเบียนผสมนี้จะใช้เพื่อหาทิศทางในการปรับข้อต่อ โดยที่เมื่อปรับข้อต่อตามนี้แล้ว ความผิดพลาดควรจะมีค่าลดลง และเพื่อไม่ให้การเรียนรู้และปรับข้อต่อทำให้แขนกลเคลื่อนที่แบบไม่มีทิศทาง (Jerky motion) ช่วงของก้าวเดินจะต้องมีค่าเล็กมากพอ จุดนี้เป็นการนำเทคนิคการหาค่าสุดขีดมาปรับแต่งเพื่อให้เหมาะสมกับการควบคุมหุ่นยนต์

โครงสร้างของการควบคุมจะเทียบเท่ากับการควบคุมพารามิเตอร์รูปภาพด้วยวิธีการประมาณค่าจาโคเบียนรูปภาพตามที่ได้นำเสนอในบทที่ 3 รวมกับการควบคุมแรงทางอ้อมแบบอินทิกรัลตามที่ได้นำเสนอในบทที่ 4 ทั้งนี้เนื่องจากในกรณีที่พารามิเตอร์ควบคุมทั้งหมดเป็นพารามิเตอร์รูปภาพ จาโคเบียนก็จะเป็นจาโคเบียนรูปภาพ และในกรณีที่พารามิเตอร์ควบคุมทั้งหมดเป็นแรง จาโคเบียนก็จะเป็นจาโคเบียนของแรง การควบคุมแบบเรียนรู้นอกจากจะมีโครงสร้างที่ง่ายแล้ว ยังสามารถรวมวิธีการควบคุมพารามิเตอร์รูปภาพกับการควบคุมแรงพร้อมกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ ประกอบกับการใช้งานได้ง่ายและมีความไวต่อพารามิเตอร์ของระบบต่างๆ น้อยมาก

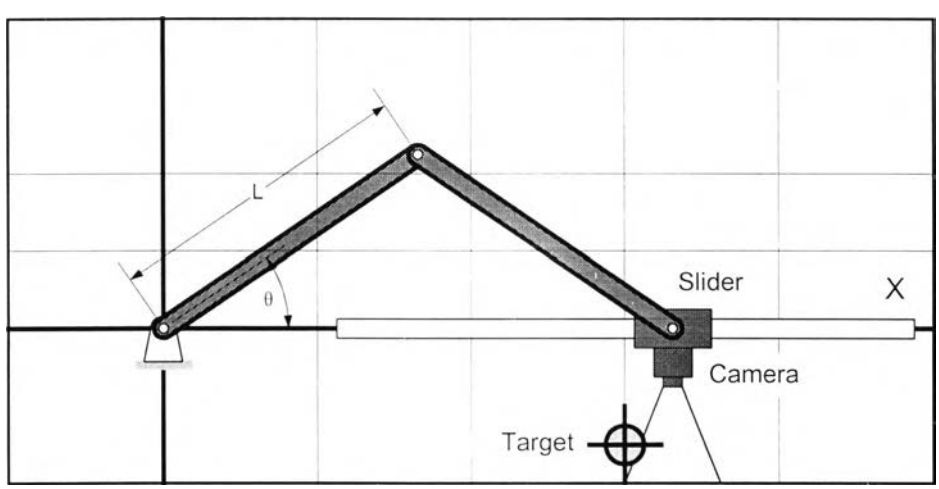
ในงานวิจัยนี้ ได้นำเสนอตัวควบคุมแขนกลแบบเรียนรู้พร้อมกับทำการจำลองการควบคุมและทดสอบตัวควบคุมกับหุ่นยนต์อุตสาหกรรมจริง ผลลัพธ์ที่ได้ยืนยันความเป็นไปได้ของการควบคุมวิธีนี้ พร้อมกับแสดงจุดเด่นเทียบกับวิธีการที่มีอยู่ในปัจจุบัน

6.7 อุปกรณ์ที่ใช้

- คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล PC Pentium II 266 MHz, 128 MB Ram: สำหรับเป็นอุปกรณ์รับข้อมูลรูปภาพจากการ์ด DT3155 ประมวลผล และส่งคำสั่งควบคุมตำแหน่งข้อต่อไปที่ชุดควบคุมแขนกล
- แขนกลแบบ Articulated ของบริษัท CRS Robotic Inc รุ่น A255 พร้อมชุดควบคุม: สำหรับเป็นตัวอย่างแขนกลอุตสาหกรรม เพื่อทดสอบระบบควบคุม

- การ์ด DT3155 จากบริษัท Data Translation Inc: สำหรับเป็นการ์ดรับภาพ ซึ่งจะรับสัญญาณภาพจากกล้อง CCD และส่งข้อมูลรูปภาพให้กับเครื่องคอมพิวเตอร์ผ่านทาง PCI Bus
- กล้อง CCD จากบริษัท Camstar รุ่น CIC 741: เป็นกล้องขาวดำ 8 บิต แบบปรับโฟกัสและหน้ากล้องด้วยมือ มีความละเอียด 768 × 576 จุดสี
- อุปกรณ์วัดแรงรุ่น 67M25A-140 และการ์ดควบคุมจากบริษัท JR3 Inc: เป็นอุปกรณ์วัดแรง 6 แกนแบบผลึก Piezoelectric
- โปรแกรม HLImage++ จากบริษัท Western Vision Software: ใช้เป็นโปรแกรมสำหรับประมวลผลรูปภาพ
- โปรแกรม Visual Studio 5.0 จากบริษัท Microsoft Corporation: ใช้เป็นโปรแกรมกลางเพื่อติดต่อกับอุปกรณ์ต่างๆ และทำการประมวลผลรูปภาพ คำนวณหาอัตราการปรับข้อต่อแขนกล
- โปรแกรม Matlab จากบริษัท MathWork: ใช้เป็นโปรแกรมในการจำลองการทำงานและสนับสนุนการคำนวณทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อนให้กับโปรแกรมกลาง

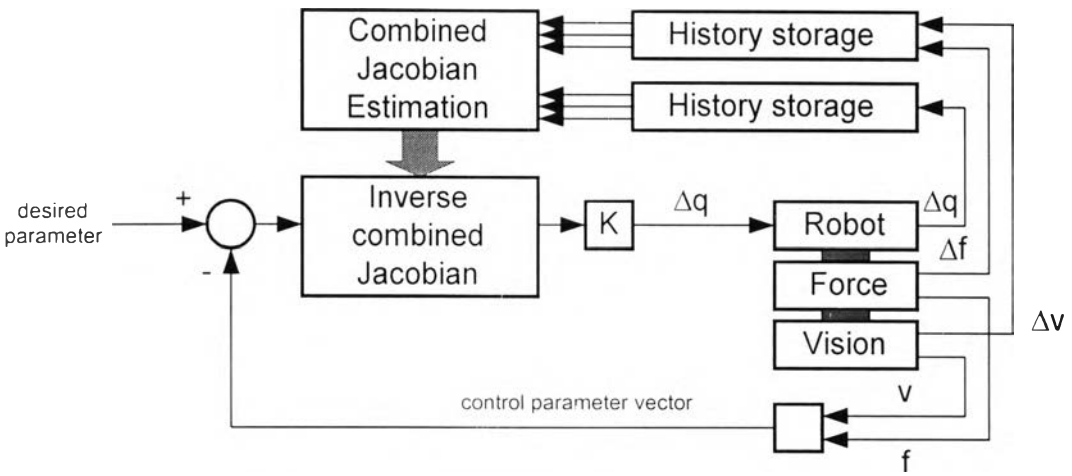
6.8 การจำลองการควบคุมแบบเรียนรู้



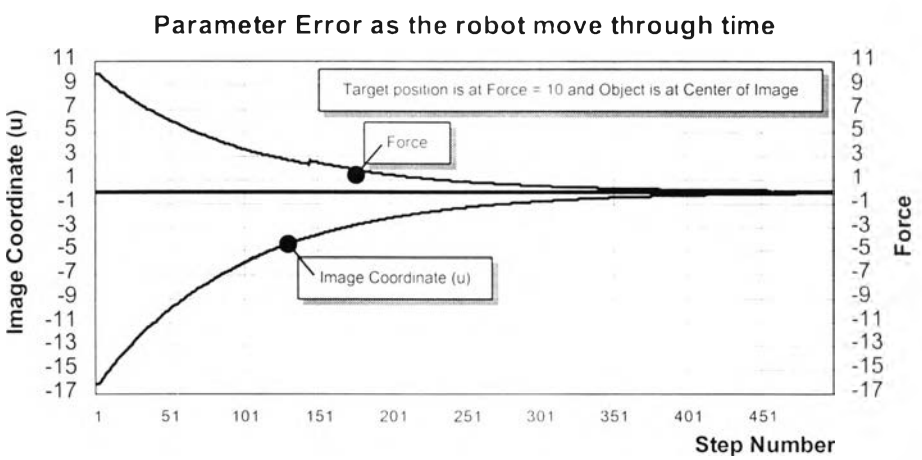
รูปที่ 6.2 แขนกลที่ใช้ในการจำลองการควบคุมแรงและพารามิเตอร์รูปภาพพร้อมกัน

ส่วนนี้ของงานวิจัย ได้จำลองการควบคุมแบบเรียนรู้เพื่อควบคุมแรงและพารามิเตอร์รูปภาพพร้อมกัน แขนกลมีลักษณะตามรูปที่ 6.2 ซึ่งเป็นแขนกลแบบสองชิ้นต่อ ยึดกันด้วยข้อต่อหมุนได้ ปลายแขนวิ่งอยู่บนรางแบบไร้แรงเสียดทาน ที่ปลายแขนมีกล้องดิจิตัลติดอยู่ กล้องมีทิศทางตั้งฉากกับแกน x และมองลงมาที่พื้น แขนกลนี้มีความอิสระเท่ากับหนึ่งแต่เคลื่อนที่โดยการควบคุมแรงบิดที่สองข้อต่อแรก (ข้อต่อที่ปลายแขนเป็นข้อต่อเปล่า) แรงบิดที่ข้อต่อทั้งสองนี้จะทำให้ปลายแขนเคลื่อนที่ในแนวแกน x และทำให้เกิดแรงในแนวตั้งฉากกับแกน x ขึ้นที่ปลาย

แขน การเคลื่อนที่ในแนวแกน x จะทำให้ตำแหน่งกล้องดิจิตัลเคลื่อนที่ตาม และเป็นผลทำให้พารามิเตอร์ในรูปภาพเปลี่ยนไป พารามิเตอร์รูปภาพในกรณีนี้คือตำแหน่งศูนย์กลางของวัตถุในรูปภาพ เป้าหมายของการควบคุมคือควบคุมแรงบิดที่สองข้อต่อแรกเพื่อให้แรงและพารามิเตอร์รูปภาพมีค่าตามที่กำหนด



รูปที่ 6.3 ผังการทำงานของการควบคุมแบบเรียนรู้

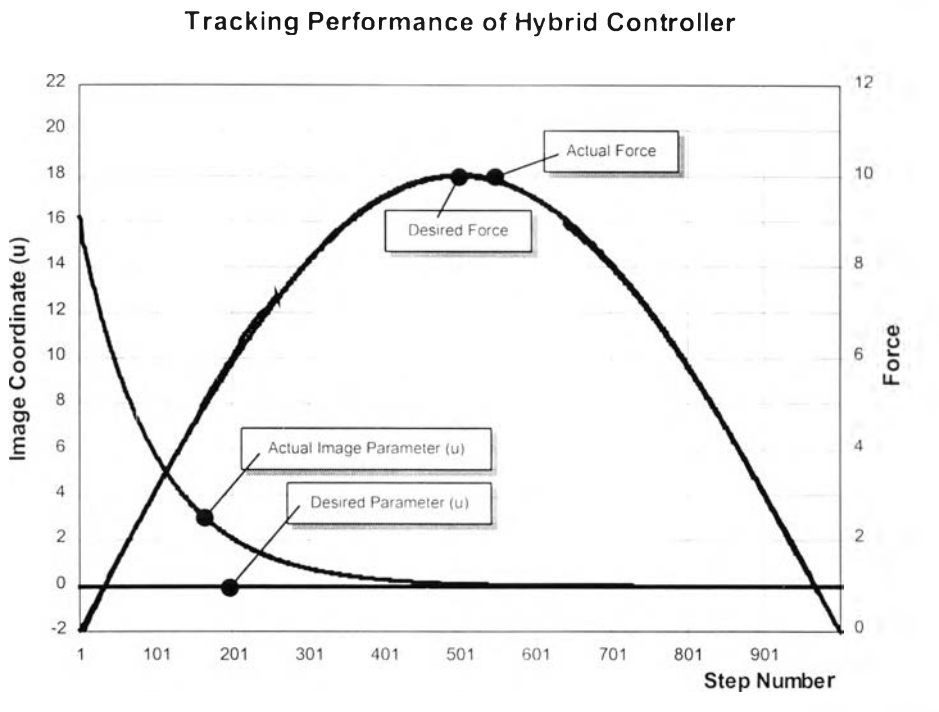


รูปที่ 6.4 ความคลาดเคลื่อนในขณะที่แขนกลเคลื่อนที่เข้าสู่เป้าหมาย

ในการจำลอง ตำแหน่งของแขนกลเริ่มต้นที่มุม θ เท่ากับ 60 องศา เป้าหมายคือควบคุมเพื่อให้แรงมีค่าเท่ากับ 10 หน่วยแรง และวัตถุอยู่กลางรูปภาพ (พารามิเตอร์รูปภาพคือจุดศูนย์กลางของวัตถุต้องอยู่กลางรูปภาพ) กรรมวิธีในการควบคุมเป็นไปตามรูปที่ 6.3 โดยเริ่มต้นข้อต่อแขนกลจะเคลื่อนไปไปในระยะทางที่กำหนด 2 ก้าวเดิน การเคลื่อนที่นี้จะทำให้สามารถประมาณหาจาโคเบียนรวมในตำแหน่งเริ่มต้นได้ และจะใช้ส่วนกลับของจาโคเบียนนี้ในการหาทิศทางในการปรับข้อต่อแขนกล ช่วงของก้าวเดินในการจำลองใช้แบบปรับค่าตามความผิดพลาดพลาดที่มี (Adaptive Step Size) กล่าวคือถ้าความผิดพลาดมีค่ามาก ช่วงก้าวเดินก็จะ

มาก และถ้าความผิดพลาดมีค่าน้อย ช่วงก้าวเดินก็จะมีค่าน้อยตาม และมีความละเอียดของก้าวเดินเท่ากับ 0.01 (หมายถึงว่า จะประมาณหาช่วงก้าวเดินที่จะเดินถึงจุดหมายใน 100 ก้าว ผลลัพธ์จากการจำลองด้วยวิธีการนี้แสดงในรูปที่ 6.4

จากผลการจำลอง จะเห็นว่าพารามิเตอร์ควบคุมมีค่าลดลงและลู่เข้าสู่เป้าหมายตามที่ต้องการ การควบคุมแบบเรียนรู้สามารถการควบคุมแรงและพารามิเตอร์รูปภาพพร้อมกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ



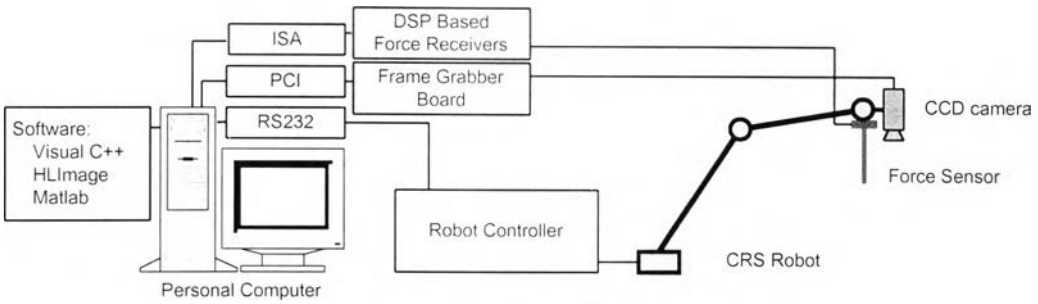
รูปที่ 6.5 ประสิทธิภาพในการติดตามแรงอ้างอิงที่ไม่คงที่

ต่อมาให้พิจารณาประสิทธิภาพในการติดตามแรงอ้างอิง โดยในการจำลองนี้จะกำหนดให้แรงอ้างอิงมีค่าไม่คงที่ กล่าวคือจะมีลักษณะเป็นฟังก์ชันซายน์ ผลลัพธ์ที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 6.5 แสดงถึงความสามารถในการติดตามสัญญาณอ้างอิง ซึ่งสามารถลู่เข้าสู่เป้าหมายได้ตามต้องการ โปรแกรมภาษา Matlab® ของการจำลองนี้แสดงอยู่ในภาคผนวก

6.9 การทดสอบการควบคุมแบบเรียนรู้กับหุ่นยนต์อุตสาหกรรม

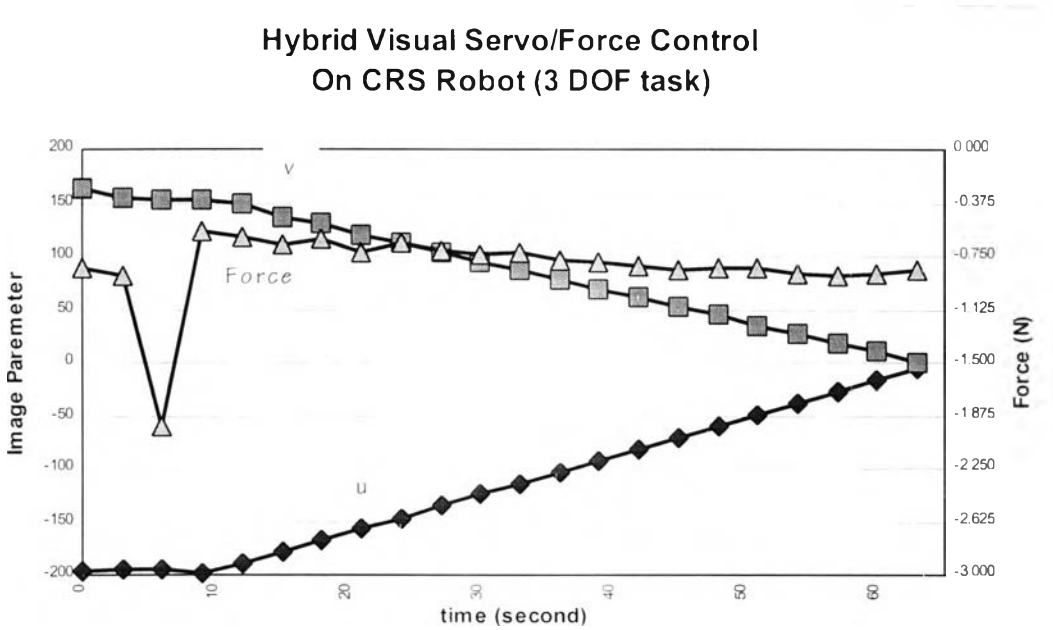
เมื่อนำวิธีการควบคุมแบบเรียนรู้มาทดสอบกับหุ่นยนต์อุตสาหกรรมแบบ Articulated รุ่น A255 ของบริษัท CRS Robotics Inc โดยติดตั้งระบบกล้องดิจิตัลและอุปกรณ์วัดแรงไว้ที่ปลายแขน ระบบกล้องดิจิตัลและอุปกรณ์วัดแรงจะต่อเชื่อมต่อเข้ากับเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วน

บุคคล เครื่องคอมพิวเตอร์นี้สามารถสั่งการหุ่นยนต์ไปที่ตัวควบคุมหุ่นยนต์ผ่านทางช่องต่ออนุกรม (RS232) โปรแกรมควบคุมเขียนขึ้นบนภาษา Visual C++ ซึ่งจะเชื่องต่อกับ MatLAB และ HLImage เพื่อใช้งานฟังก์ชันคณิตศาสตร์และการประมวลผลรูปภาพตามลำดับ



รูปที่ 6.6 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

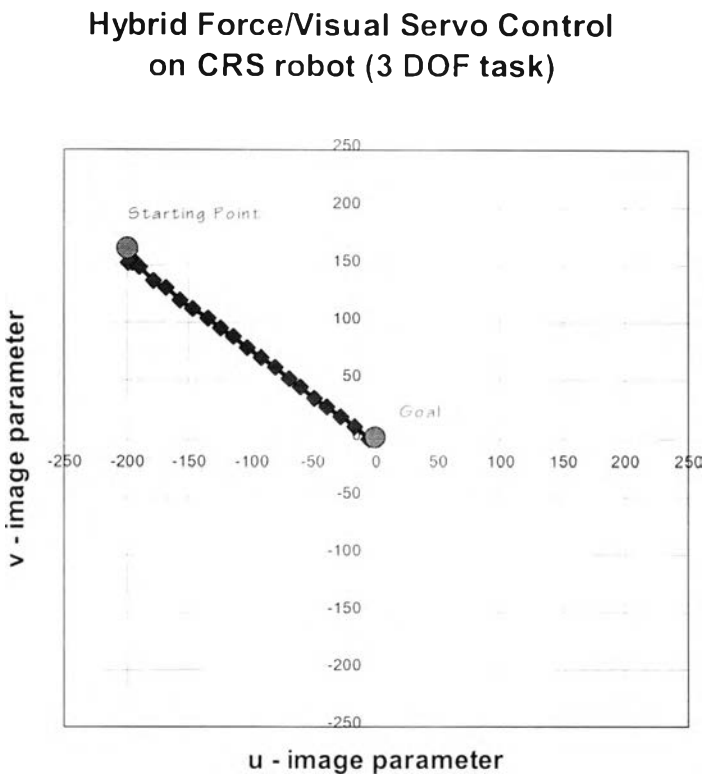
เป้าหมายการควบคุมคือขับเคลื่อนหุ่นเพื่อให้ระบบกล้องดิจิตัลมองเห็นวัตถุอยู่กลางรูปภาพ ในขณะเดียวกันก็พยายามรักษาแรงกดที่ปลายแขนให้มีค่าเท่ากับ 0.750 นิวตัน การควบคุมเริ่มต้นในขณะที่แขนกลสัมผัสกับพื้นและมีแรงกด 0.750 นิวตัน



รูปที่ 6.7 การลู่เข้าของพารามิเตอร์ควบคุม

เนื่องจากไม่มีข้อมูลจาโคเบียนรวมในตอนต้น จึงใช้การเคลื่อนที่สามจุดแรกเพื่อประมาณหาจาโคเบียนในตอนต้น หลังจากที่มีข้อมูลจาโคเบียนแล้ว พารามิเตอร์ควบคุมจะลู่เข้าสู่เป้าหมายดังแสดงในรูปที่ 6.7 และ 6.8 และจะเห็นจากรูปที่ 6.8 ว่าทางเดินของวัตถุจะมี

ลักษณะค่อนข้างตรงเข้าสู่เป้าหมาย ทั้งนี้เป็นเพราะทิศการปรับข้อต่อที่คำนวณจากส่วนกลับของจาโคเบียนจะเป็นทิศที่ลาดชันที่สุด (Steepest Gradient)



รูปที่ 6.8 ทางเดินของวัตถุเป้าหมายที่มองเห็นจากกล้องดิจิตัล

เมื่อสังเกตุเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้กับผลการทดลองการควบคุมพารามิเตอร์รูปภาพที่มีความอิสระเท่ากับ 3 ในบทที่ 4 หัวข้อ 4.9 พบว่าผลลัพธ์ที่ได้มีลักษณะคล้ายกันมาก ความจริงแล้วการทดลองทั้งสองต่างกันที่พารามิเตอร์ควบคุม แต่ปัญหามีความอิสระเท่ากัน จุดนี้เป็นข้อเด่นของวิธีการควบคุมแบบนี้ กล่าวคือจะไม่เพิ่มความยุ่งยากขึ้นเลยแม้ว่าจะควบคุมแรงและพารามิเตอร์รูปภาพพร้อมกัน นอกจากนี้ ผลการทดลองยังแสดงถึงเสถียรภาพของการควบคุม ซึ่งในการทดลองนี้ พารามิเตอรควบคุมมีทั้งพารามิเตอร์รูปภาพและแรงซึ่งมีธรรมชาติการควบคุมที่ต่างกัน ข้อมูลผลการทดลองการควบคุมแรงและพารามิเตอร์รูปภาพแบบเรียนรู้กับหุ่นยนต์ A255 ของบริษัท CRS Robotics Inc ได้แสดงในตารางที่ 6.1

การควบคุมแรงและรูปภาพกระทำผ่านทางตัวควบคุมตำแหน่งของหุ่นยนต์ ทำให้สามารถใช้งานได้กับหุ่นยนต์อุตสาหกรรมทั่วไปซึ่งมีการควบคุมแบบตำแหน่ง และจากมุมมองของการควบคุมแบบเรียนรู้ จะเห็นว่าการควบคุมมีประสิทธิภาพดีโดยที่ไม่ต้องกังวลถึงประสิทธิภาพของตัวควบคุมตำแหน่งเลย การเรียนรู้จะชดเชยความไม่สมบูรณ์ของปัจจัยอื่นๆ โดยธรรมชาติ การที่ไม่มีสมการทางคณิตศาสตร์ของระบบอยู่ในวิธีการควบคุมทำให้วิธีการนี้มีจุดเด่นทั้ง

ในเรื่องของโครงสร้างที่ง่าย และใช้งานได้กับหุ่นยนต์หลายๆ แบบ และยังรับมือกับความไม่แน่นอนของพารามิเตอร์ระบบต่างๆ ได้ดี

ตารางที่ 6.1 ข้อมูลผลการทดลอง

Step No.	u (pixel)	v (pixel)	Force (N)	Note
1	-197	163	-0.83618	Initial Movement to determine combined Jacobian at the first time.
2	-194	154	-0.88501	
3	-195	153	-1.95007	
4	-198	153	-0.57678	Learning Control updated joint angles of the robot to reduce parameter error while update combined Jacobian.
5	-189	149	-0.61340	
6	-178	137	-0.67444	
7	-168	131	-0.63171	
8	-157	120	-0.72937	
9	-147	113	-0.65002	
10	-135	104	-0.70801	
11	-124	95	-0.73547	
12	-114	88	-0.72327	
13	-103	78	-0.77209	
14	-92	70	-0.79346	
15	-81	61	-0.81177	
16	-70	52	-0.84229	
17	-60	45	-0.83008	
18	-49	35	-0.82703	
19	-39	27	-0.87585	
20	-28	19	-0.88196	
21	-17	10	-0.87280	
22	**-6**	**0**	**-0.85144**	Goal position

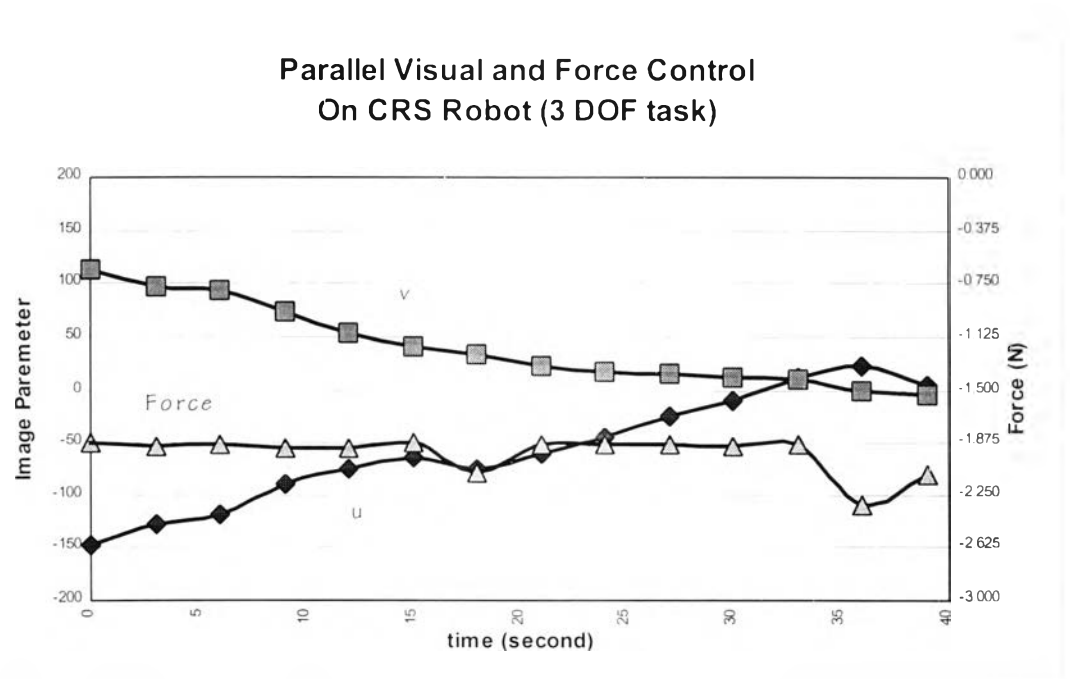
จากการจำลองควบคุมและทดลองจริงกับหุ่นยนต์อุตสาหกรรมสรุปได้ว่าการควบคุมแรงและพารามิเตอร์รูปภาพด้วยวิธีเรียนรู้สามารถควบคุมแรงและพารามิเตอร์รูปภาพได้พร้อมกัน การจำลองแสดงให้เห็นจุดเด่นของวิธีการ และการทดสอบกับหุ่นยนต์จริงแสดงความเป็นไปได้ในทางปฏิบัติ การจำลองควบคุมและทดลองจริงกับหุ่นยนต์อุตสาหกรรมได้แสดงถึงจุดเด่น

หลายๆ ของวิธีการควบคุมแบบนี้ ซึ่งผู้วิจัยเชื่อว่าวิธีการนี้จะเป็นต้นแบบสำหรับการควบคุมแรงและพารามิเตอร์รูปภาพพร้อมกันในอนาคต

6.10 การควบคุมแบบขนาน ระหว่างแรงและพารามิเตอร์รูปภาพ

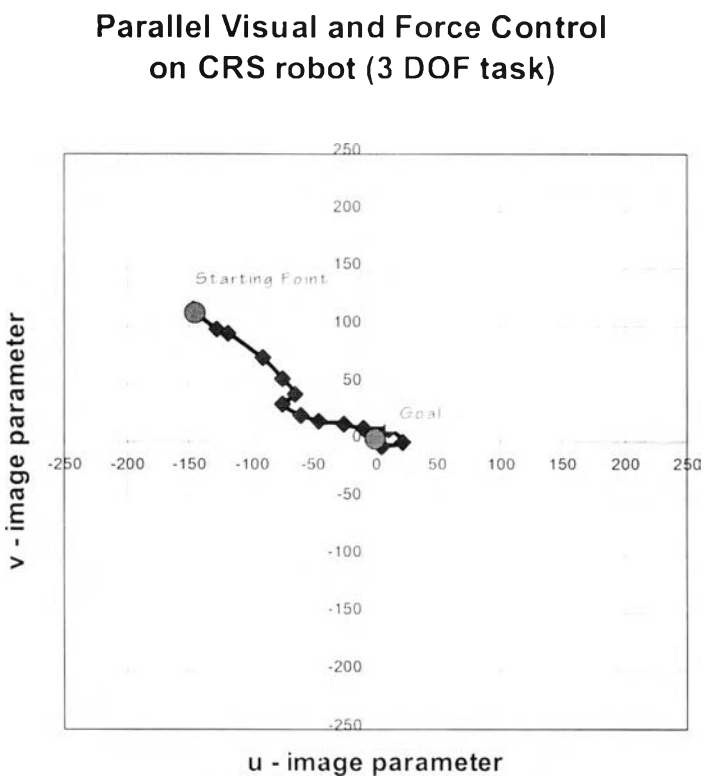
การควบคุมแบบขนานเป็นอีกวิธีการหนึ่งในการควบคุมแรงและรูปภาพที่ริเริ่มขึ้นในงานวิจัยนี้ การควบคุมแบบขนานจะมีระบบควบคุมสองชุด ชุดหนึ่งเป็นระบบควบคุมแรง อีกชุดหนึ่งเป็นระบบควบคุมรูปภาพ เมื่อพิจารณาการควบคุมหุ่นยนต์เพื่อให้วัตถุปรากฏอยู่กลางรูปภาพพร้อมกับปลายแขนออกแรงตามที่กำหนด (2 นิวตัน) ในลักษณะเดียวกันกับหัวข้อ 6.8 การควบคุมแบบขนานจะใช้ระบบควบคุมรูปภาพกับสองข้อต่อแรก และใช้ระบบควบคุมแรงกับข้อต่อที่สาม ระบบควบคุมทั้งสองชุดเมื่อทำงานพร้อมกัน ก็จะนำหุ่นยนต์เดินทางสู่เป้าหมายตามต้องการ

ในส่วนนี้ของงานวิจัย ได้ทดลองควบคุมหุ่นยนต์จากบริษัท CRS Robotic Inc โดยใช้วิธีการควบคุมแบบขนาน อุปกรณ์เครื่องมือจะใช้เหมือนกันกับในการทดลองควบคุมแบบเรียนรู้ (หัวข้อ 6.8) เนื่องจากมีข้อจำกัดในเรื่องอุปกรณ์การทดลอง ทำให้ผู้วิจัยไม่สามารถแยกควบคุมแต่ละข้อต่อของหุ่นยนต์ได้ ในทางปฏิบัติ จึงทำการควบคุมแบบสลับระหว่างการควบคุมแรงกับการควบคุมรูปภาพ (กล่าวคือเมื่อระบบควบคุมรูปภาพทำงาน ระบบควบคุมแรงก็จะหยุดทำงาน และเมื่อระบบควบคุมแรงทำงาน ระบบควบคุมรูปภาพก็จะหยุดทำงาน) ซึ่งน่าจะให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกัน ผลลัพธ์ในการควบคุมแสดงอยู่ในตารางที่ 6.2 และในรูปที่ 6.9



รูปที่ 6.9 การลู่เข้าของพารามิเตอร์ควบคุม

จะเห็นว่าวิธีการนี้นำหุ่นยนต์เข้าสู่เป้าหมายได้ตามต้องการ วิธีในการควบคุมรูปภาพในการทดลองนี้จะใช้เหมือนกับกับในการทดลองควบคุมขับหุ่นยนต์อุตสาหกรรมกับปัญหาที่มีความอิสระเท่ากับสอง (หัวข้อ 5.7) ทุกอย่าง ซึ่งผลการทดลองนี้ย้ำให้เห็นว่าวิธีการควบคุมรูปภาพที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีความยืดหยุ่นมาก สามารถรับมือกับปัจจัยสภาพแวดล้อมได้ในระดับหนึ่ง ในการทดลองนี้ จาโคเบียนรูปภาพที่ประมาณขึ้นในขบวนการควบคุมจะรวมปัจจัยที่เกิดขึ้นจากการควบคุมแรงเข้าไปด้วยโดยอัตโนมัติ ทำให้การควบคุมรูปภาพทำงานได้อย่างถูกต้อง รูปที่ 6.10 แสดงทางเดินของวัตถุในรูปภาพ จะเห็นว่าทางเดินอาจไม่เรียบเหมือนในการทดลองที่ 5.7 ซึ่งเป็นผลที่เกิดจากระบบควบคุมแรง ในส่วนของระบบควบคุมแรง การทดลองนี้ใช้วิธีการควบคุมแรงทางอ้อมแบบอินทิกรัล ซึ่งผลการทดลองนี้ยังแสดงถึงความสามารถในการควบคุมแรงแบบนี้ด้วย



รูปที่ 6.10 ทางเดินของวัตถุเป้าหมายที่มองเห็นจากกล้องดิจิตัล

เมื่อกลับมามองถึงแนวคิดในการควบคุมแรงและพารามิเตอร์รูปภาพพร้อมกันโดยใช้วิธีการควบคุมแบบขนาน จะเห็นว่าการควบคุมแบบขนานจะควบคุมข้อต่อแต่ละอันด้วยวิธีการที่แตกต่างกัน สำหรับในปัญหานี้ เป้าหมายมีความอิสระเท่ากับ 3 โดยที่ พารามิเตอร์ควบคุมสองตัวเป็นพารามิเตอร์รูปภาพ และพารามิเตอร์อีกตัวเป็นค่าขนาดของแรง โดยจะควบคุมพารามิเตอร์รูปภาพโดยใช้สองข้อต่อแรก และทำการควบคุมแรงโดยใช้ข้อต่อที่สาม เมื่อระบบควบคุม

ทั้งสองมีความยืดหยุ่นเพียงพอ การทำงานของระบบควบคุมทั้งสองขนานกันก็จะนำหุ่นยนต์เดินสู่เป้าหมายได้

วิธีการนี้มีจุดเด่นคือใช้งานได้ง่าย และสามารถแยกคิดการควบคุมวิธีในการควบคุมพารามิเตอร์ต่างๆ ได้ (ในขณะที่การควบคุมแบบเรียนรู้ พารามิเตอร์ควบคุมทั้งหมดจะพิจารณาพร้อมกันภายใต้กฎการควบคุมเดียวกัน) ทำให้สามารถรับมือกับการควบคุมแรงและรูปภาพที่มีธรรมชาติในการควบคุมที่แตกต่างกันได้ดี

ตารางที่ 6.2 ข้อมูลผลการทดลอง

Step No.	u (pixel)	v (pixel)	Force (N)	Note
1	-147	114	-1.8799	Initial Movement to determine combined Jacobian at the first time.
2	-128	97	-1.8951	
3	-118	94	-1.8890	
4	-90	73	-1.9135	Force and visual servoing are run simultaneously.
5	-75	54	-1.9104	
6	-65	41	-1.8799	
7	-75	33	-2.0935	
8	-60	23	-1.8860	
9	-45	18	-1.8860	
10	-25	15	-1.8829	
11	-10	12	-1.8982	
12	11	10	-1.8921	
13	22	0	-2.3163	
14	**5**	**-4**	-2.1057	Goal position

6.11 สรุปและอภิปราย

บทนี้ ได้แสดงถึงวิธีการต่างๆ ในการควบคุมแรงและพารามิเตอร์รูปภาพพร้อมกัน และได้แนะนำสองวิธีการใหม่ในการควบคุม เรียกว่าการควบคุมแบบเรียนรู้ และการควบคุมแบบขนาน วิธีการควบคุมทั้งสองวิธีนี้มีโครงสร้างที่ง่าย โดยที่วิธีการแรกจะมีจุดเด่นตรงที่ผู้ใช้ไม่จำเป็นต้องทราบพารามิเตอร์ต่างๆ ของหุ่นยนต์ ระบบกล้องดิจิตัล และระบบการวัดแรง ก่อนล่วงหน้า ทำให้สะดวกในการใช้ นอกจากนี้ยังสามารถรวมวิธีการควบคุมพารามิเตอร์รูปภาพด้วยการประมาณค่าจาโคเบียนรูปภาพเข้ากับการควบคุมแรงทางอ้อมแบบอินทิกรัลได้อย่างง่ายและ

มีประสิทธิภาพ จาโคเบียนผสมที่ประมาณขึ้นในระหว่างที่ควบคุมทำให้การควบคุมมีความยืดหยุ่นต่อพารามิเตอร์ต่างๆ สูง และนอกจากนี้ วิธีการนี้ยังสามารถนำมาใช้งานกับหุ่นยนต์อุตสาหกรรมที่มีการควบคุมเป็นแบบตำแหน่งได้ ทำให้ค่าใช้จ่ายในการปรับเปลี่ยนระบบลดลง ส่วนวิธีการที่สองมีจุดเด่นคือสามารถใช้วิธีการควบคุมแรงและรูปภาพได้เต็มศักยภาพ เนื่องจากการควบคุมแรงและรูปภาพจะแยกอิสระจากกัน เพียงแต่นำมาควบคุมพร้อมกันเท่านั้น

งานวิจัยได้ทดสอบวิธีการควบคุมทั้งสองวิธีกับหุ่นยนต์อุตสาหกรรมเพื่อแสดงถึงความเป็นไปได้ในทางปฏิบัติ ผลการทดสอบแสดงถึงความสามารถในการควบคุมของวิธีทั้งสอง ซึ่งสามารถนำหุ่นยนต์เข้าสู่เป้าหมายได้ทั้งสองวิธี