

บทที่ 5

การควบคุมแรงของหุ่นยนต์อุตสาหกรรม

5.1 นำเรื่อง

หุ่นยนต์โดยทั่วไปจะมีการควบคุมแบบตำแหน่ง การควบคุมแบบนี้จะเหมาะสมเฉพาะเมื่อหุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปตามทางเดินที่กำหนดในที่อิสระ ในกรณีที่มีสิ่งขวางกั้นทางเดิน และหุ่นยนต์เกิดสัมผัสกับสิ่งแวดลอม ซึ่งจะเป็นผลทำให้หุ่นยนต์ไม่สามารถเคลื่อนที่ได้ในทิศทางที่สิ่งแวดลอมขวางกั้นอยู่ การควบคุมตำแหน่งอาจไม่ดีเพียงพอในการควบคุมการเคลื่อนที่ที่มีข้อจำกัดเช่นนี้เนื่องจากการเคลื่อนที่ไม่สามารถเป็นไปตามที่ตัวควบคุมต้องการ การนำแรงมาร่วมคิดในการควบคุมจะทำให้การควบคุมมีประสิทธิภาพขึ้น

ให้พิจารณาการนำแขนกลมาเช็ดกระจกโดยมีฟองน้ำที่ปลายแขน เนื่องจากฟองน้ำมีความยืดหยุ่นสูงมาก จึงมีความเป็นไปได้ที่เราจะควบคุมแรงในการเช็ดกระจกจากการควบคุมตำแหน่ง ไม่เช่นนั้นแล้ว เราจะต้องรู้ตำแหน่งของกระจกอย่างละเอียดมาก อย่างไรก็ตาม ถ้าปลายแขนกลหรือสิ่งแวดลอมมีความแข็งมาก การทำงานด้วยการควบคุมตำแหน่งจะกระทำได้ยากมากเมื่อแขนกลสัมผัสกับสิ่งแวดลอม ให้พิจารณาแขนกลที่ทำการขัดกระจก ถ้ามีความไม่แน่นอนของตำแหน่งอยู่ หรือตำแหน่งของระบบควบคุมแขนกลไม่มีความแม่นยำเพียงพอ แขนกลอาจทำกระจกแตกหรือไม่ก็อุปกรณ์ขัดผิวไม่สัมผัสกับกระจกในบางจุด เพื่อให้การควบคุมแขนกลมีประสิทธิภาพมากขึ้น จึงใช้การควบคุมแรงในทิศทางที่ตั้งฉากกับผิวสัมผัสแทนการควบคุมด้วยตำแหน่งในกรณีที่แขนกลสัมผัสกับสิ่งแวดลอม การควบคุมแรงจะเป็นผลทำให้สามารถใช้หุ่นยนต์กับงานกดอัดประกอบ งานขัดผิว งานเจียรระไน งานบด และงานขัดเงา ซึ่งเป็นงานที่จำเป็นต้องควบคุมแรงสัมผัสให้เป็นตามที่ต้องการ

ในบทนี้ เราทดลองควบคุมแรงสัมผัสของหุ่นยนต์ด้วยวิธีการต่างๆ รวมถึงการควบคุมแรงทางตรงและทางอ้อม การทดลองกระทำบนหุ่นยนต์ตัวเดียวกันและเราปรับพารามิเตอร์ควบคุมของวิธีการต่างๆ เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมได้ ผลลัพธ์ที่ได้จะทำให้สามารถเข้าใจธรรมชาติในการควบคุมแรงได้อย่างลึกซึ้ง และทำให้สามารถควบคุมแรงได้อย่างมีประสิทธิภาพ จากนั้นเราได้เลือกวิธีการที่เหมาะสมที่สุดมาทดลองควบคุมแรงผ่านทางชุดควบคุมหุ่นยนต์อุตสาหกรรมเพื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพในการนำไปใช้จริง ผลลัพธ์และรายละเอียดการวิเคราะห์ได้แสดงอยู่ในบทนี้

5.2 การทดลอง

การควบคุมแรงของหุ่นยนต์โดยทั่วไปมีสองวิธี คือการควบคุมแรงทางตรง (Explicit Force Control) และการควบคุมแรงทางอ้อม (Implicit Force Control) เราได้ทดลองควบคุมแรงของหุ่นยนต์ด้วยวิธีการต่างๆ โดยติดอุปกรณ์วัดแรงที่ปลายแขนของหุ่นยนต์จากบริษัท CRS Robotics Inc และสร้างชุดควบคุมแขนกลขึ้นเพื่อให้สามารถควบคุมในระดับล่างหรือระดับแรงดันที่ข้อต่อแขนกลได้ (ชุดควบคุมที่มาพร้อมกับหุ่นยนต์สามารถควบคุมได้เฉพาะตำแหน่งของแขนกลเท่านั้น ไม่สามารถควบคุมในระดับแรงดันที่ข้อต่อได้) ชุดควบคุมที่สร้างขึ้นจะมีวงจรรอบเพื่อรับสัญญาณจาก Encoder ของหุ่นยนต์ และส่งค่าตำแหน่งไปที่การ์ด ETT 8255 และจะมีอุปกรณ์ขยายกำลัง Power Amplifier สำหรับรับแรงดันจากการ์ด Advantech 726 และขยายกำลังเพื่อไปขับข้อต่อหุ่นยนต์ การ์ด ETT 8255 และ การ์ด Advantech 726 จะติดตั้งอยู่บนคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล PC Pentium Pro 200 MHz เพื่อให้คอมพิวเตอร์จะสามารถรับรู้ข้อมูลแรงและตำแหน่งของหุ่นยนต์และสามารถส่งสัญญาณแรงดันออกเพื่อขับข้อต่อหุ่นยนต์ได้

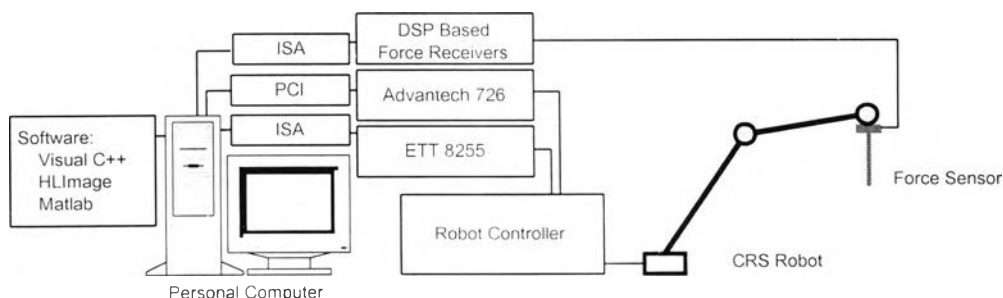
เราได้ทดลองควบคุมแรงแขนกลทั้งแบบทางตรงและทางอ้อม โดยที่ในทางตรงก็ได้ทดลองตัวควบคุมแบบต่างๆ รวมถึง การควบคุมแบบสัดส่วนที่มีตัวชดเชย การควบคุมแบบอินทิกรัล และการควบคุมแบบอินทิกรัลที่มีตัวชดเชย ในส่วนการควบคุมแบบทางอ้อมหรือการควบคุมแรงผ่านทาง การควบคุมตำแหน่งจะทดลองทั้งแบบสัดส่วนและแบบอินทิกรัล การศึกษานี้จะแสดงถึงผลลัพธ์การควบคุมแรงของวิธีการต่างๆ บนหุ่นยนต์ตัวเดียวกัน โดยปรับค่าพารามิเตอร์ควบคุมต่างๆ ให้เทียบเท่ากัน เป็นผลทำให้สามารถเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมรวมถึงจุดเด่นและข้อจำกัดของแต่ละวิธีการได้ เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบสมรรถนะการควบคุมของแต่ละวิธีการ เราจะใช้ค่าการหน่วง $K_v = 10$ และใช้ค่า $g = 0.4$ โวลท์เท่ากัน และทดสอบการควบคุมแรงเมื่อกำหนดทางเดินของแรงเป็นสัญญาณสี่เหลี่ยม (Square wave) สัญญาณสามเหลี่ยม (Triangular wave) และสัญญาณไซน์ (Sine wave) ความถี่ในการควบคุมของแต่ละวิธีการมีค่าประมาณ 6 มิลลิวินาที พื้นสัมผัสเป็นกระดาษอัดแข็งวางบนรองรับซึ่งเป็นโฟมและปลายแขนกลเป็นแท่งอลูมิเนียมที่มีแบริ่งที่ปลาย ในการทดลองจะควบคุมเฉพาะข้อต่อหุ่นยนต์ที่สามเท่านั้น ข้อต่อที่หนึ่งและสองจะไม่มีเคลื่อนที่

จากนั้น เราได้ทดสอบการควบคุมแรงทางอ้อมแบบอินทิกรัลกับหุ่นยนต์อุตสาหกรรมผ่านทางชุดควบคุมของหุ่นยนต์ การควบคุมแรงผ่านทางชุดควบคุมหุ่นยนต์จะทำให้ไม่จำเป็นที่จะต้องสร้างชุดควบคุมหุ่นยนต์ขึ้นมาใหม่ ทำให้มีความเป็นไปได้ในทางปฏิบัติที่จะนำหุ่นยนต์ที่มีในปัจจุบันมาดัดแปลงเพื่อให้สามารถควบคุมแรงได้ การทดลองใช้สัญญาณแรงอ้างอิงแบบไซน์และแบบขั้นบันได และเช่นเดียวกับการทดลองก่อนหน้านี้ เราจะควบคุมเฉพาะข้อต่อหุ่นยนต์ที่สามเท่านั้น ส่วนข้อต่อที่หนึ่งและสองจะไม่มีเคลื่อนที่

การทดลองในบทนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาวิธีการควบคุมแรงแบบต่างๆ และผลลัพธ์เมื่อนำไปใช้จริง ซึ่งจะเป็นพื้นฐานที่สำคัญในการควบคุมแรง และในงานวิจัยนี้ได้นำความรู้ที่ได้จากการทดลองควบคุมแรงในบทนี้ ไปใช้ในการควบคุมแรงและรูปภาพพร้อมกันในบทต่อไป

5.3 อุปกรณ์ที่ใช้

- คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล PC Pentium Pro 200 MHz, 64 MB Ram: สำหรับเป็นอุปกรณ์รับข้อมูลแรงจาก JR3 DSP based Force Sensor และข้อมูลตำแหน่งแขนกลจากการ์ด ETT 8255 ประมวลผลข้อมูล และส่งค่าแรงดันเพื่อควบคุมแขนกลผ่านการ์ด Advantech 726 ไปที่ชุดควบคุมแขนกล
- แขนกลแบบ Articulated ของบริษัท CRS Robotic Inc รุ่น A255: สำหรับเป็นตัวอย่างแขนกลอุตสาหกรรม เพื่อทดสอบระบบควบคุมแรง
- อุปกรณ์วัดแรงรุ่น 67M25A-140 และการ์ดควบคุมจากบริษัท JR3 Inc: เป็นอุปกรณ์วัดแรง 6 แกนแบบผลึก Piezoelectric
- การ์ด ETT 8255: สำหรับรับข้อมูลตำแหน่งแขนกลจากชุดควบคุมแขนกล สามารถรับข้อมูลดิจิทัลได้ 72 บิต
- การ์ด Advantech 726: สำหรับส่งสัญญาณแรงดันออกไปควบคุมแขนกล สามารถส่งสัญญาณระดับแรงดันในช่วง ± 10 โวลต์ได้ 8 ช่องสัญญาณ มีความละเอียด 12 บิต
- ชุดควบคุมแขนกลที่สร้างขึ้น สามารถควบคุมแขนกลได้ 3 ข้อต่อพร้อมกัน ภายในประกอบด้วยตัวขยายกำลังจากบริษัท M Control Inc และวงจรรันรอบ ทั้งหมด 3 ชุด มีส่วนแสดงผลตำแหน่งข้อต่อแขนกล และสามารถควบคุมระบบเบรกของหุ่นยนต์ ชุดควบคุมนี้จะมีข้อต่อเพื่อเชื่อมวงจรเข้ากับหุ่นยนต์ และสามารถเชื่อมวงจรกับ ETT 8255 เพื่อส่งข้อมูลตำแหน่งเข้าสู่เครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล
- โปรแกรม Visual Studio 5.0 จากบริษัท Microsoft Corporation: ใช้เป็นโปรแกรมกลางเพื่อติดต่อกับอุปกรณ์ต่างๆ และทำหน้าที่เป็นตัวควบคุม



รูปที่ 5.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองควบคุมแรง

5.4 ผลลัพธ์

5.4.1 การควบคุมแรงทางตรง (Explicit Force Control)

การควบคุมแรงทางตรงจะอาศัยการเปรียบเทียบค่าแรงที่ต้องการกับแรงที่เกิดขึ้นจริง และนำค่าความแตกต่างนี้ไปคำนวณหาสัญญาณเพื่อขับข้อต่อแขนกล เราอาจใช้ค่าแรงที่ต้องการป้อนชดเชย (Feedforward) และบวกเข้ากับสัญญาณที่จะไปขับแขนกล การควบคุมแรงทางตรงโดยทั่วไปจะมีประสิทธิภาพมากกว่าการควบคุมทางอ้อมเนื่องจากแรงจะให้ข้อมูลตำแหน่งที่มีความละเอียดมากกว่าอุปกรณ์วัดตำแหน่งมาก สำหรับการทดลองในส่วนนี้ เราทดสอบตัวควบคุมแบบสัดส่วนที่มีตัวชดเชย การควบคุมแบบอินทิกรัล และการควบคุมแบบอินทิกรัลที่มีตัวชดเชย ซึ่งจะได้อภิปรายถึงสมรรถนะของตัวควบคุมแต่ละชนิดต่อไป

5.4.2 การควบคุมแบบสัดส่วนที่มีตัวชดเชย (Proportional Control with Feedforward)

ตัวควบคุมแบบแรกที่จะอภิปรายนี้เป็นตัวควบคุมแบบการควบคุมแบบสัดส่วนที่มีตัวชดเชย รูปแบบของกฎการควบคุมจะอยู่ในรูป

$$\tau = J^{-1} [f_c + K_{fp} (f_c - f_m) - K_v \dot{x}_m] + g$$

โดยที่ τ	คือ ค่าแรงบิดที่ใช้ในการขับข้อต่อแขนกล
J	คือ จาโคเบียนของแขนกล
K_{fp}	คือ ค่าเกนของการควบคุมแบบสัดส่วน
f_c	คือ ค่าแรงที่ต้องการ
f_m	คือ ค่าแรงที่เกิดขึ้นจริง
K_v	คือ ค่าเกนของความหน่วง
x_m	คือ ตำแหน่งของข้อต่อแขนกล
g	คือ ค่าชดเชยแรงบิดจากแรงโน้มถ่วง

เมื่อพิจารณาแขนกลที่หยุดนิ่งและสัมผัสกับสิ่งแวดล้อม พบว่าแรงบิดที่ข้อต่อแขนกลจะเป็นสัดส่วนตรงกับแรงที่เกิดขึ้น ค่าคงที่สำหรับความสัมพันธ์ระหว่างแรงบิดที่ข้อต่อแขนกลกับแรงที่เกิดขึ้นก็คือจาโคเบียนของแรงนั่นเอง จะเห็นว่าถ้าจาโคเบียนมีความแม่นยำ เราก็จะสามารถคำนวณหาแรงบิดที่จำเป็นเพื่อให้เกิดแรงที่ปลายแขนตามที่ต้องการได้ อย่างไรก็ตามโดยทั่วไปจาโคเบียนจะมีความคลาดเคลื่อนในระดับหนึ่ง ประกอบกับหุ่นยนต์เป็นระบบที่มีแรงเสียดทานและมีความไม่พอดีของเฟือง (Backlash) เป็นผลทำให้แรงที่เกิดขึ้นไม่เป็นไปตามที่ต้องการ ตัวควบคุมแรงโดยทั่วไปจะมีตัวป้อนชดเชยเพื่อทำหน้าที่ตามที่กล่าวมานี้ ความผิดพลาดที่คงเหลืออยู่ก็จะนำมาผ่านวิธีการควบคุมแบบสัดส่วน และ/หรือ อินทิกรัล

การควบคุมแบบสัดส่วนจะทำให้ความผิดพลาดมีค่าลดลง ระบบรวมจะมีลักษณะเป็นประเภทที่ 0 (Type 0 system) กล่าวคือ จะมีความผิดพลาดสถานะคงที่ระดับหนึ่งเมื่อสัญญาณป้อนเข้าเป็นแบบขั้นบันได (Step) และความผิดพลาดจะมีค่าเพิ่มขึ้นแบบไม่มีขอบเขตสำหรับสัญญาณสามเหลี่ยม (Ramp)

จากการทดลองควบคุมแรงแขนกลอุตสาหกรรมโดยใช้ตัวชดเชยเพียงอย่างเดียว ซึ่งวิธีการนี้ ตัวควบคุมจะคำนวณแรงบิดจากผลคูณของส่วนกลับของจาโคเบียนกับค่าแรงบิดที่ต้องการ และบวกชดเชยแรงบิดจากแรงโน้มถ่วงของนาหนักแขนกล โดยมีสมการดังนี้

$$\tau = J^{-1} f_c + g$$

ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 5.2 รูปที่ 5.8 และ รูปที่ 5.14 พบว่าแรงที่เกิดขึ้นมีความคลาดเคลื่อนจากแรงที่ต้องการในระดับหนึ่ง การตอบสนองของตัวควบคุมเร็วมาก และพบการสั่นกลับไปมาในบริเวณที่มีการเปลี่ยนค่าแรงอ้างอิงอย่างกะทันหัน การควบคุมลักษณะนี้จะ เป็นแบบเปิด กล่าวคือไม่มีการนำค่าแรงจริงที่เกิดขึ้นมาปรับแรงบิดที่ข้อต่อเพื่อให้ค่าแรงเป็นไปตามที่ต้องการ เมื่อจาโคเบียนไม่แม่นยำ ก็มีความผิดพลาดเกิดขึ้น

เมื่อทดสอบการควบคุมแรงแขนกลอุตสาหกรรมโดยใช้การควบคุมแบบสัดส่วนที่มีตัวชดเชย ซึ่งจะเพิ่มการควบคุมแบบสัดส่วนเข้ามาเพื่อนำค่าแรงที่เกิดขึ้นจริงมาช่วยปรับค่าแรงบิดที่ข้อต่อเพื่อให้แรงที่เกิดขึ้นใกล้เคียงกับค่าแรงที่ต้องการมากขึ้น ตัวควบคุมแบบสัดส่วนจะพิจารณาความแตกต่างระหว่างแรงที่เกิดขึ้นจริงกับค่าแรงที่ต้องการ ซึ่งก็คือความผิดพลาดที่เกิดขึ้น จากนั้นนำค่าความผิดพลาดนี้มาคูณกับค่าเกน แล้วจึงป้อนกลับเข้าไปควบคุมระบบ การควบคุมได้ใส่ตัวหน่วงเข้ามาเพื่อชดเชยการเคลื่อนที่ที่อาจมีขึ้น พบว่าตัวควบคุมแบบชดเชยทำให้ความผิดพลาดมีค่าลดลงตามที่คาดการณ์ไว้ดังแสดงในรูปที่ 5.2 รูปที่ 5.8 และ รูปที่ 5.14 แต่ไม่สามารถควบคุมให้ความผิดพลาดลู่เข้าจนเป็นศูนย์ได้ทั้ง 3 รูปแบบของสัญญาณอ้างอิง และยังเพิ่มขนาดของการสั่นกลับไปมาโดยเฉพาะบริเวณที่มีการเปลี่ยนขนาดสัญญาณอ้างอิงอย่างกะทันหัน

5.4.3 การควบคุมแบบอินทิกรัล (Integral Control)

การควบคุมแรงทางตรงแบบอินทิกรัลจะมีกฎการควบคุมดังนี้

$$\tau = J^{-1} [K_{\int} \int (f_c - f_m) dt - K_v \dot{x}_m] + g$$

โดยที่ τ	คือ ค่าแรงบิดที่ใช้ในการขับเคลื่อน
J	คือ จาโคเบียนของแขนกล
K_{ff}	คือ ค่าเกณฑ์ของการควบคุมแบบอินทิกรัล
f_c	คือ ค่าแรงที่ต้องการ
f_m	คือ ค่าแรงที่เกิดขึ้นจริง
K_v	คือ ค่าเกณฑ์ของความหน่วง
x_m	คือ ตำแหน่งของข้อต่อแขนกล
g	คือ ค่าชดเชยแรงบิดจากแรงโน้มถ่วง

การควบคุมแรงแบบนี้ ระบบจะอินทิเกรตค่าความผิดพลาดของแรงและนำมาคูณกับค่าเกณฑ์ และป้อนกลับเพื่อควบคุมระบบ การใช้อินทิกรัลของความผิดพลาดจะเป็นผลทำให้ความผิดพลาดที่สถานะคงตัวมีค่าเป็นศูนย์ ทำให้ระบบมีพฤติกรรมเป็นประเภทที่ 1 (Type 1 System) อินทิกรัลของความผิดพลาดจะทำหน้าที่เป็นตัวกรองความถี่สูง ทำให้ทำงานได้ดีมากกับการควบคุมแรงซึ่งโดยธรรมชาติจะมีค่าไม่คงที่ในระดับหนึ่ง การสั่นของแรงจะถูกกรองทิ้งเมื่อผ่านการอินทิเกรต

เมื่อทดสอบตัวควบคุมนี้กับแขนกลอุตสาหกรรม พบว่าความผิดพลาดมีแนวโน้มเข้าสู่ศูนย์ดังแสดงในรูปที่ 5.3 รูปที่ 5.9 และ รูปที่ 5.15 เมื่อรูปแบบแรงอ้างอิงมีลักษณะเป็นขั้นบันไดสามเหลี่ยม และไซน์ ตามลำดับ ผลลัพธ์ในการควบคุมแรงดีมาก กล่าวคือระบบควบคุมสามารถติดตามค่าแรงอ้างอิงได้ดี อย่างไรก็ตาม ความเร็วในการตอบสนองจะช้ากว่าการควบคุมแบบสัดส่วน ซึ่งจะสังเกตได้จากบริเวณที่มีการเปลี่ยนสัญญาณแรงอ้างอิงอย่างกะทันหัน

5.4.4 การควบคุมแบบอินทิกรัลที่มีตัวชดเชย (Integral Control with Feedforward)

การควบคุมแบบนี้เพิ่มตัวชดเชยเข้ามาในการควบคุมแบบอินทิกรัล ตัวชดเชยจะใช้ในการหาค่าแรงบิดในเบื้องต้นตามที่ได้อธิบายในเรื่องการควบคุมแบบสัดส่วนที่มีตัวชดเชย รูปแบบของกฎการควบคุมเป็นดังนี้

$$\tau = J^T [f_c + K_{ff} \int (f_c - f_m) dt - K_v \dot{x}_m] + g$$

โดยที่ τ	คือ ค่าแรงบิดที่ใช้ในการขับเคลื่อน
J	คือ จาโคเบียนของแขนกล
K_{ff}	คือ ค่าเกณฑ์ของการควบคุมแบบอินทิกรัล
f_c	คือ ค่าแรงที่ต้องการ
f_m	คือ ค่าแรงที่เกิดขึ้นจริง

- K_v คือ ค่าเกณฑ์ของความหน่วง
 x_m คือ ตำแหน่งของข้อต่อแขนกล
 g คือ ค่าชดเชยแรงบิดจากแรงโน้มถ่วง

ตัวชดเชยที่เพิ่มเข้ามาทำให้ตัวควบคุมตอบสนองได้เร็วขึ้น ส่วนเรื่องความผิดพลาดที่สถานะคงตัวจะมีพฤติกรรมเหมือนกับการควบคุมแบบอินทิกรัล ผลลัพธ์ของการควบคุมแรงด้วยวิธีการนี้แสดงในรูปที่ 5.4 รูปที่ 5.10 และ รูปที่ 5.16 ซึ่งจะเห็นว่าผลลัพธ์ในการควบคุมแรงมีลักษณะใกล้เคียงกับการควบคุมแบบอินทิกรัลมาก จะสังเกตเห็นจุดต่างกันก็เฉพาะบริเวณที่มีการเปลี่ยนสัญญาณแรงอ้างอิงอย่างกะทันหัน ซึ่งการเพิ่มตัวชดเชยจะทำให้การควบคุมมีการตอบสนองในบริเวณนี้ได้เร็วขึ้น แต่ก็อาจทำให้เกิดการสั่นของแรงในบริเวณนี้เช่นกันดังจะเห็นได้อย่างชัดเจนในรูปที่ 5.4

5.4.5 การควบคุมแรงทางอ้อม (Implicit Force Control)

การควบคุมแรงทางตรงแม้ว่าจะให้ประสิทธิภาพในการควบคุมที่ดี แต่มีจุดอ่อนตรงที่ไม่สามารถรับประกันความมีเสถียรภาพของระบบได้ การควบคุมแรงทางอ้อมจะอาศัยการควบคุมตำแหน่งเพื่อให้เกิดแรงตามที่กำหนด บางครั้งเรียกว่าการควบคุมความยืดหยุ่น (Impedance) หรือการควบคุมความแข็ง (Stiffness) การควบคุมจะมีสองส่วนคือส่วนควบคุมตำแหน่งที่อยู่ชั้นใน และส่วนควบคุมแรงที่อยู่ชั้นนอก และจะไม่ควบคุมแรงโดยตรงแต่จะควบคุมผ่านการควบคุมตำแหน่ง การควบคุมแบบนี้จะเพิ่มเสถียรภาพของระบบขึ้นเนื่องจากส่วนควบคุมตำแหน่งจะกรองสัญญาณความถี่สูงออก และจะมีความทนต่อการเปลี่ยนค่าของพารามิเตอร์และความไม่แน่นอนของระบบ อย่างไรก็ตามการควบคุมทางอ้อมนี้ก็ยังมีจุดอ่อนก็คือความสัมพันธ์ระหว่างแรงและตำแหน่งอาจมีค่าไม่แม่นยำ และการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงที่ความถี่สูงจะลดลง รูปแบบสมการควบคุมคือ

การควบคุมแรง

$$x_c = J^{-1} [f_c + K_{fp} (f_c - f_m)]$$

การควบคุมตำแหน่ง

$$\tau = K_p (x_c - x_m) + K_i \int (x_c - x_m) dt + K_d (\dot{x}_c - \dot{x}_m) + g$$

- โดยที่ τ คือ ค่าแรงบิดที่ใช้ในการขับเคลื่อนข้อต่อแขนกล
 J คือ จาโคเบียนของแขนกล
 K_{fp} คือ ค่าเกณฑ์ของการควบคุมแบบอินทิกรัล
 f_c คือ ค่าแรงที่ต้องการ

f_m	คือ ค่าแรงที่เกิดขึ้นจริง
K_v	คือ ค่าเกนของความหน่วง
K_p	คือ ค่าเกนของตัวควบคุมแบบสัดส่วน
K_i	คือ ค่าเกนของตัวควบคุมแบบอินทิกรัล
x_c	คือ ตำแหน่งอ้างอิงของข้อต่อแขนกล
x_m	คือ ตำแหน่งของข้อต่อแขนกล
g	คือ ค่าชดเชยแรงบิดจากแรงโน้มถ่วง

ในการทดลองการควบคุมจะเลือกค่า $K_p = 1$ และ $K_i = 0$ และเลือกพารามิเตอร์อื่นๆ ให้เหมาะสม เพื่อให้ตัวควบคุมมีลักษณะเหมือนกับการควบคุมแรงทางตรงแบบสัดส่วนที่มีตัวชดเชย สาเหตุที่เลือก $K_i = 0$ ก็เพื่อให้สามารถนำไปเทียบเคียงกับวิธีการควบคุมแบบอื่นได้ ความแตกต่างก็คือการควบคุมแรงทางตรงจะวัดแรงเพื่อใช้ในการควบคุม ส่วนการควบคุมแรงทางอ้อมจะสามารถเขียนเทียบเท่ากับการควบคุมแรงทางตรง จุดต่างก็คือการควบคุมแรงทางอ้อมจะมีการวัดตำแหน่งปัจจุบันเข้ามาในวงควบคุมตำแหน่ง ถ้าพื้นและแขนกลมีความแข็งเกร็งมาก วิธีการควบคุมทั้งสองก็จะเทียบเท่ากัน ผลการทดลองในรูปที่ 5.5 รูปที่ 5.11 และ รูปที่ 5.17 แสดงความสอดคล้องกันระหว่างการควบคุมแรงทางอ้อมกับการควบคุมแรงทางตรงแบบสัดส่วนที่มีตัวชดเชย อย่างไรก็ตาม การควบคุมแรงทางอ้อมอาจเกิดยอดของแรงที่สูงในบางช่วง ดังแสดงในรูปที่ 5.11 และรูปที่ 5.17 ทั้งนี้เป็นเพราะการวัดตำแหน่งมีความละเอียดน้อยกว่าการวัดแรงมาก เมื่อแขนกลมีการเคลื่อนที่ จะเป็นผลทำให้ระบบเข้าใจว่าเป็นค่าแรงที่สูงมาก และเป็นผลทำให้เกิดยอดสูงของแรงขึ้น การควบคุมแรงทางอ้อมนี้ยังคงให้ค่าความผิดพลาดที่สถานะคงตัวในระดับหนึ่งเช่นเดียวกันกับการควบคุมแรงทางตรงแบบสัดส่วนที่มีตัวชดเชย

5.4.6 การควบคุมแรงทางอ้อมแบบอินทิกรัล (Integral Impedance Control)

การควบคุมแรงทางอ้อมแบบนี้จะเทียบเท่ากับการควบคุมแรงทางตรงแบบอินทิกรัล การควบคุมจะมีสองส่วนคือชั้นนอกเป็นการควบคุมแรง และชั้นในเป็นการควบคุมตำแหน่ง เพื่อต้องการให้ค่าความผิดพลาดที่สถานะคงตัวเป็นศูนย์ วิธีนี้จะหาใช้อินทิกรัลของค่าความผิดพลาดของแรง โดยจะเขียนในรูปของตำแหน่งอ้างอิง และเมื่อใช้ตำแหน่งอ้างอิงนี้ในการควบคุมตำแหน่งที่มีค่าเกนที่เหมาะสม ระบบควบคุมโดยรวมก็จะมีพฤติกรรมคล้ายกันกับการควบคุมแรงทางตรงแบบอินทิกรัล

การควบคุมแรง

$$x_c = J^T \int K_f (f_c - f_m) dt$$

การควบคุมตำแหน่ง

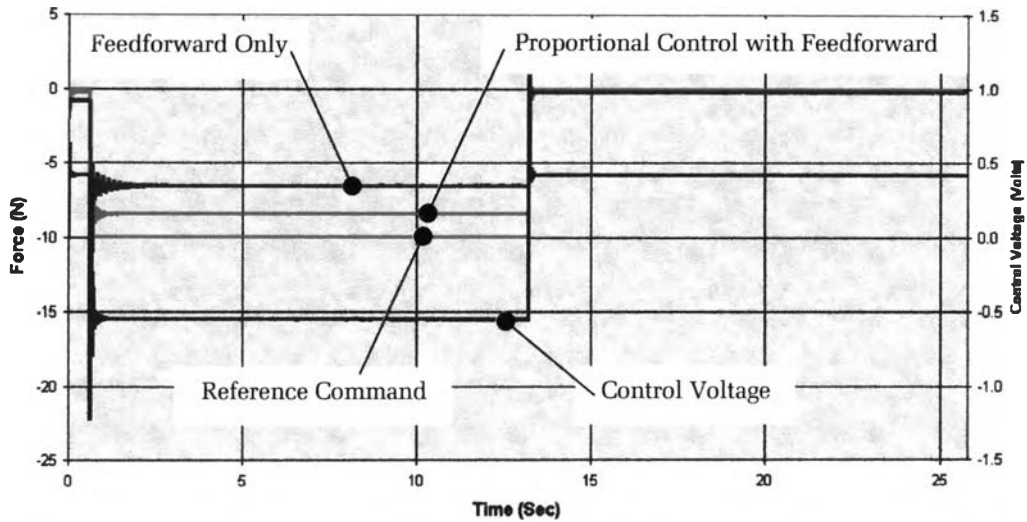
$$\tau = K_p(x_c - x_m) + K_i \int (x_c - x_m) dt + K_v(\dot{x}_c - \dot{x}_m) + g$$

โดยที่ τ	คือ ค่าแรงบิดที่ใช้ในการขับเคลื่อนแกนกล
J	คือ จาโคเบียนของแกนกล
K_f	คือ ค่าเกณฑ์ของการควบคุมแบบอินทิกรัล
f_c	คือ ค่าแรงที่ต้องการ
f_m	คือ ค่าแรงที่เกิดขึ้นจริง
K_v	คือ ค่าเกณฑ์ของความหน่วง
K_p	คือ ค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมแบบสัดส่วน
K_i	คือ ค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมแบบอินทิกรัล
x_c	คือ ตำแหน่งอ้างอิงของข้อต่อแขนกล
x_m	คือ ตำแหน่งของข้อต่อแขนกล
g	คือ ค่าชดเชยแรงบิดจากแรงโน้มถ่วง

ในการทดลองการควบคุมจะเลือกค่า $K_p = 1$ และ $K_i = 0$ และเลือกพารามิเตอร์อื่นๆ ให้เหมาะสม เพื่อให้ตัวควบคุมมีลักษณะเหมือนกับการควบคุมแรงทางตรงแบบอินทิกรัล ผลลัพธ์ที่ได้แสดงอยู่ในรูปที่ 5.6 รูปที่ 5.12 และ รูปที่ 5.18 ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับผลลัพธ์จากการควบคุมแรงทางตรงแบบอินทิกรัล จุดแตกต่างก็คือการควบคุมแรงทางอ้อมจะเกิดยอดของแรงที่สูงในบางช่วง ดังจะเห็นได้อย่างชัดเจนในรูปที่ 5.12 และ 5.18 เพื่อพิจารณาพบว่าความต่างของการควบคุมแรงทางตรงกับทางอ้อมก็คือในการควบคุมแรงทางอ้อมจะวัดตำแหน่งเข้ามาเพื่อใช้ในส่วนควบคุมตำแหน่ง ถ้าแขนกลไม่มีการเคลื่อนที่ การควบคุมด้วยวิธีการทั้งสองก็จะเทียบเท่ากัน ในการทดลอง วงรอบการควบคุมแรงและวงรอบการควบคุมตำแหน่งมีความถี่เท่ากัน ซึ่งจะทำให้การควบคุมแรงทางตรงและทางอ้อมเทียบเท่ากัน เมื่อความถี่ในการควบคุมแรงลดลง ซึ่งเป็นกรณีที่ควบคุมแรงทางอ้อมผ่านทางชุดควบคุมของหุ่นยนต์ วงรอบการควบคุมตำแหน่งจะกรองความถี่สูงของแรงออก ทำให้การควบคุมแรงมีเสถียรภาพมากขึ้น แต่ก็จะทำให้ความเร็วในการควบคุมลดลง

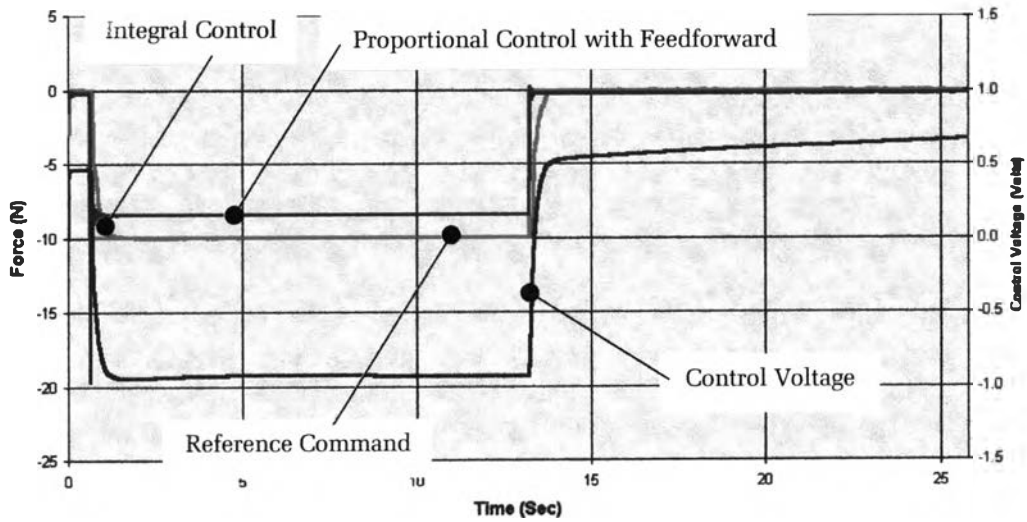
รูปที่ 5.7 รูปที่ 5.13 และ รูปที่ 5.19 แสดงเปรียบเทียบผลการควบคุมแรงด้วยวิธีการต่างๆ เมื่อสัญญาณแรงอ้างอิงเป็นแบบสัญญาณสี่เหลี่ยม สัญญาณสามเหลี่ยม และสัญญาณไซน์ ตามลำดับ เพื่อแสดงให้เห็นความแตกต่างที่ชัดเจนขึ้น

**Force Tracking Performance using Proportional Feedforward Control
(Square Trajectory)**



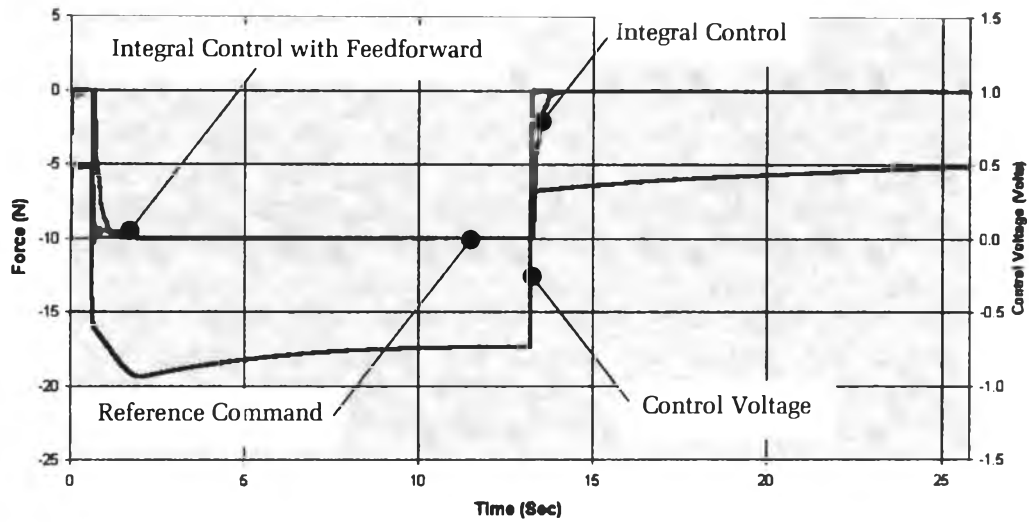
รูปที่ 5.2 การควบคุมแรงแบบสัดส่วนที่มีตัวชดเชย โดยมีสัญญาณอ้างอิงเป็นแบบสี่เหลี่ยม

**Force Tracking Performance using Integral Control
(Square Trajectory)**



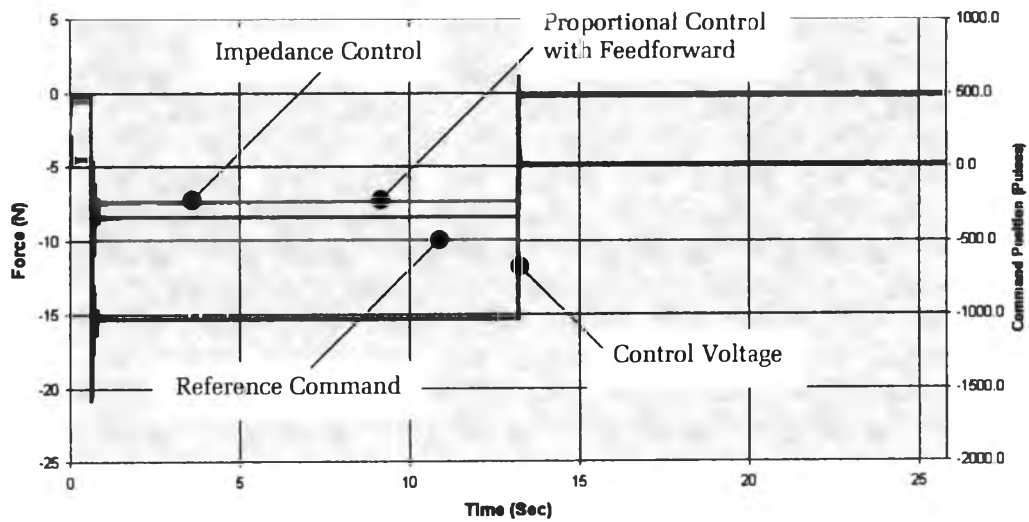
รูปที่ 5.3 การควบคุมแรงแบบอินทิกรัล โดยมีสัญญาณอ้างอิงเป็นแบบสี่เหลี่ยม

**Force Tracking Performance using Integral Feedforward Control
(Square Trajectory)**

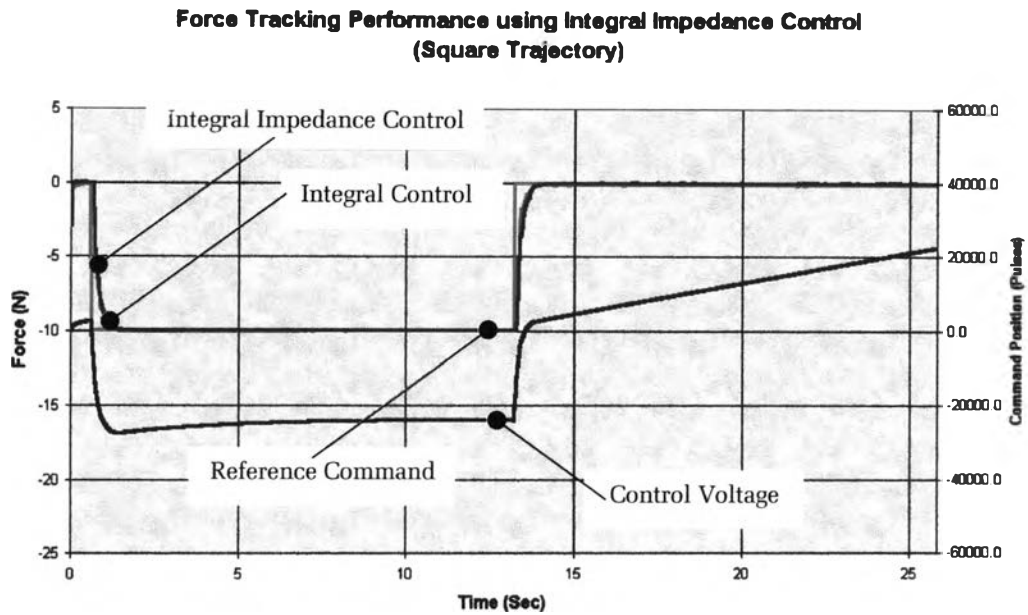


รูปที่ 5.4 การควบคุมแรงแบบอินทิกรัลที่มีตัวชดเชย โดยมีสัญญาณอ้างอิงเป็นแบบสี่เหลี่ยม

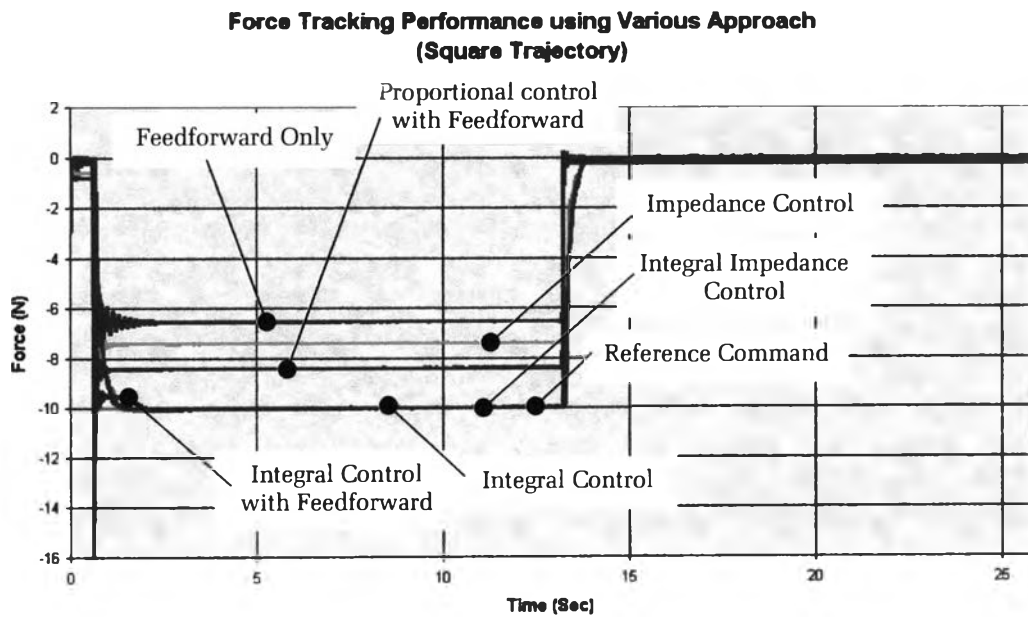
**Force Tracking Performance using Impedance Control
(Square Trajectory)**



รูปที่ 5.5 การควบคุมแรงทางอ้อม โดยมีสัญญาณอ้างอิงเป็นแบบสี่เหลี่ยม

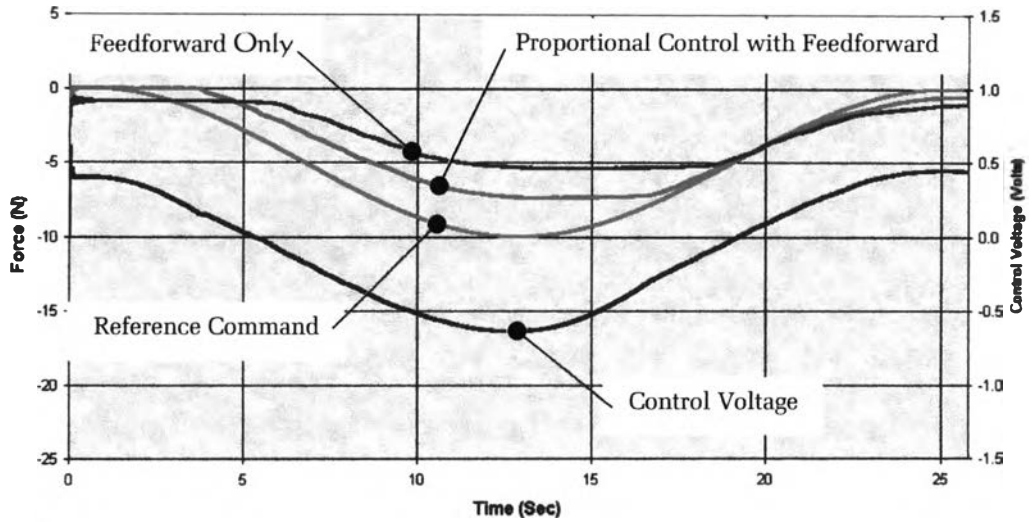


รูปที่ 5.6 การควบคุมแรงทางอ้อมแบบอินทิกรัล โดยมีสัญญาณอ้างอิงเป็นแบบสี่เหลี่ยม



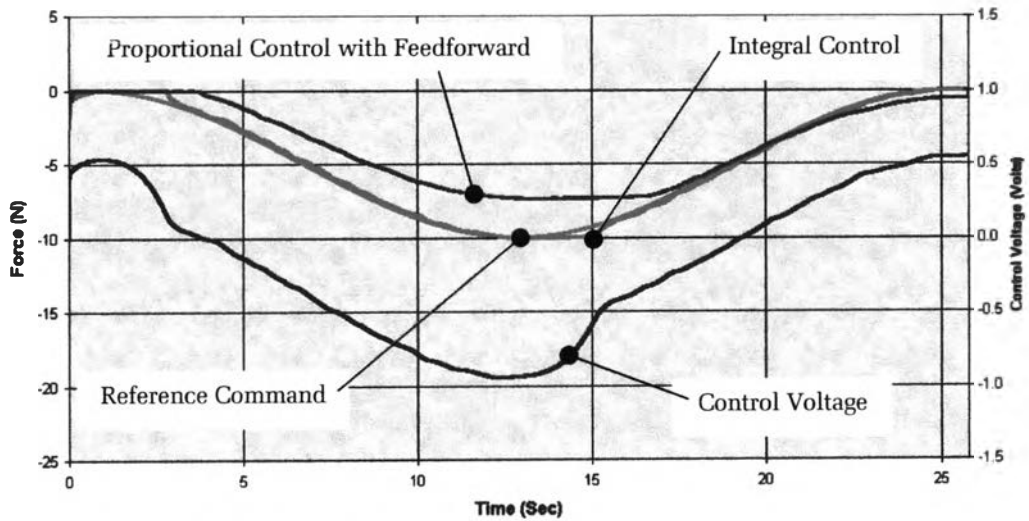
รูปที่ 5.7 เปรียบเทียบการควบคุมแรงด้วยวิธีต่างๆ โดยมีสัญญาณอ้างอิงเป็นแบบสี่เหลี่ยม

**Force Tracking Performance using Proportional Feedforward Control
(Sine Trajectory)**



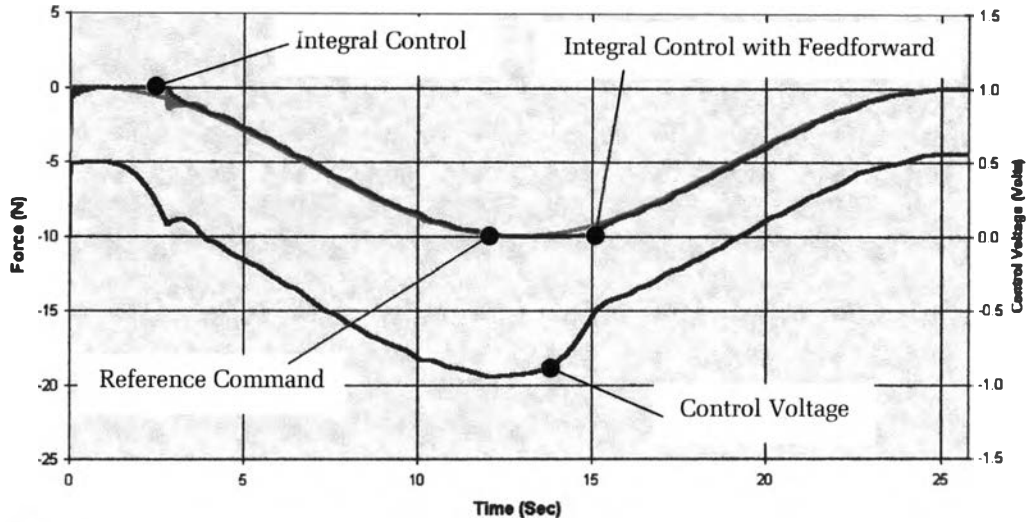
รูปที่ 5.8 การควบคุมแรงแบบสัดส่วนที่มีตัวชดเชย โดยมีสัญญาณอ้างอิงเป็นแบบซายน์

**Force Tracking Performance using Integral Control
(Sine Trajectory)**



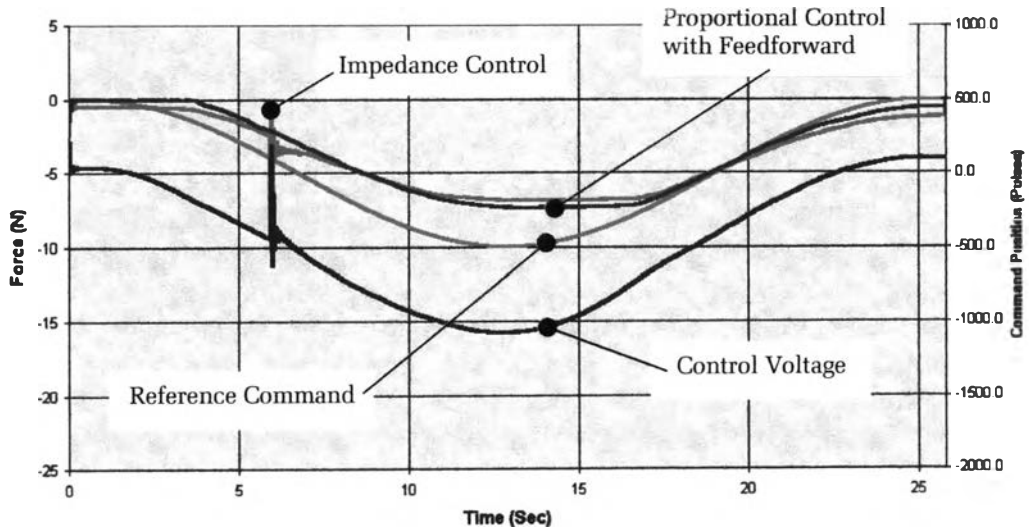
รูปที่ 5.9 การควบคุมแรงแบบอินทิกรัล โดยมีสัญญาณอ้างอิงเป็นแบบซายน์

**Force Tracking Performance using Integral Feedforward Control
(Sine Trajectory)**

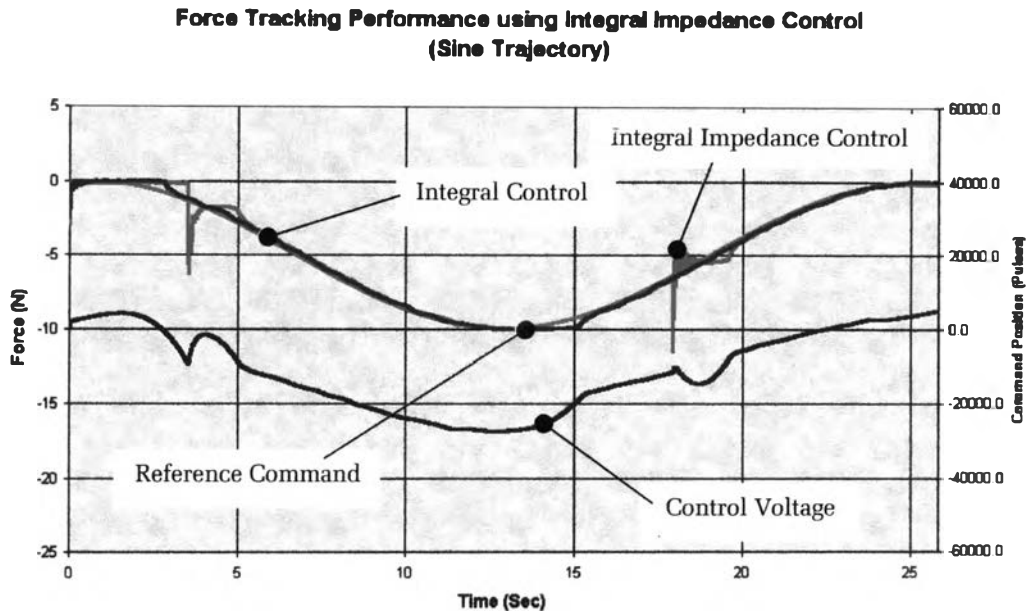


รูปที่ 5.10 การควบคุมแรงแบบอินทิกรัลที่มีตัวชดเชย โดยมีสัญญาณอ้างอิงเป็นแบบไซน์

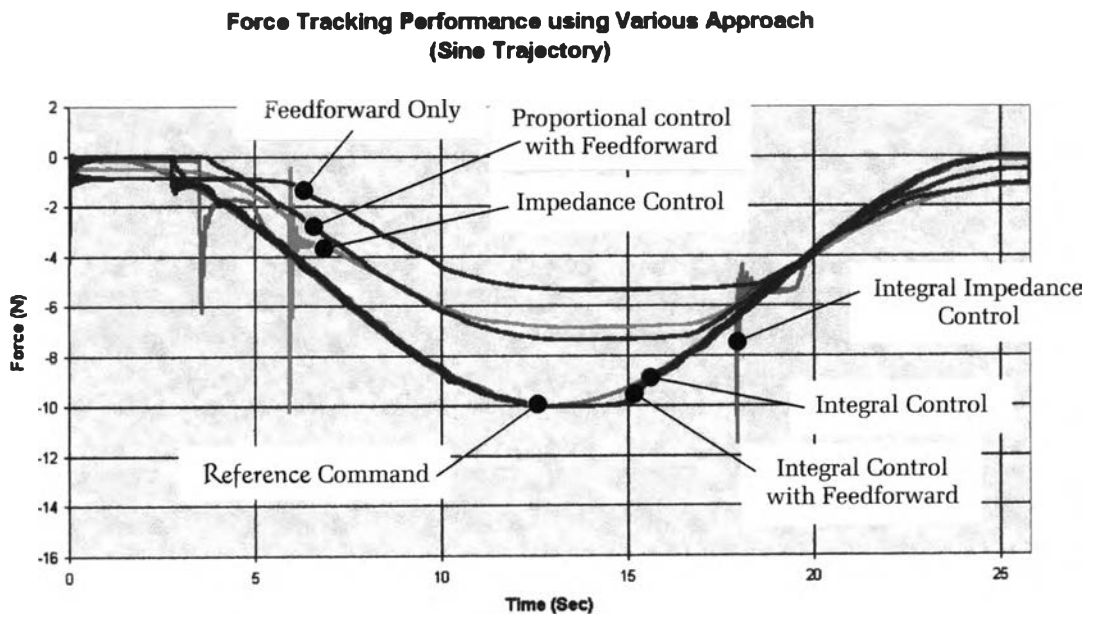
**Force Tracking Performance using Impedance Control
(Sine Trajectory)**



รูปที่ 5.11 การควบคุมแรงทางอ้อม โดยมีสัญญาณอ้างอิงเป็นแบบไซน์

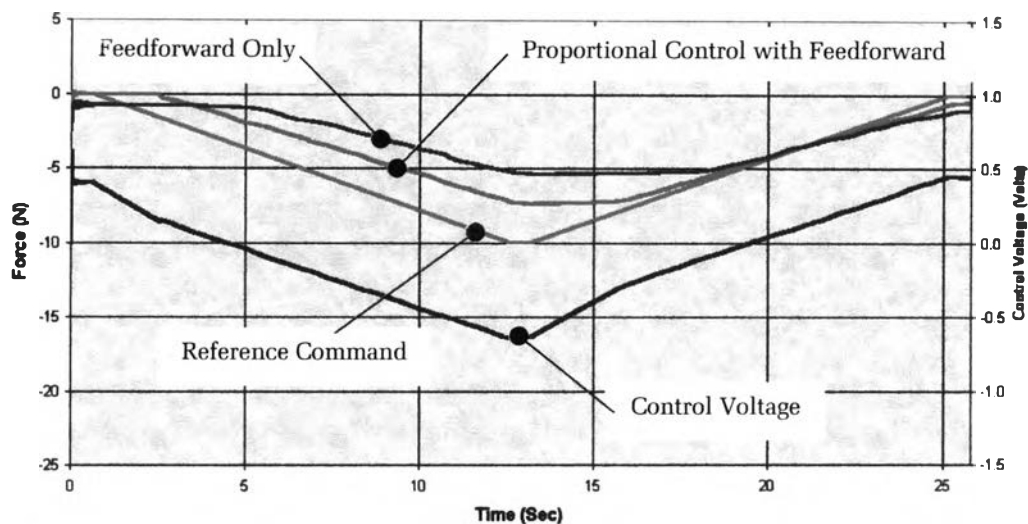


รูปที่ 5.12 การควบคุมแรงทางอ้อมแบบอินทิกรัล โดยมีสัญญาณอ้างอิงเป็นแบบไซน์



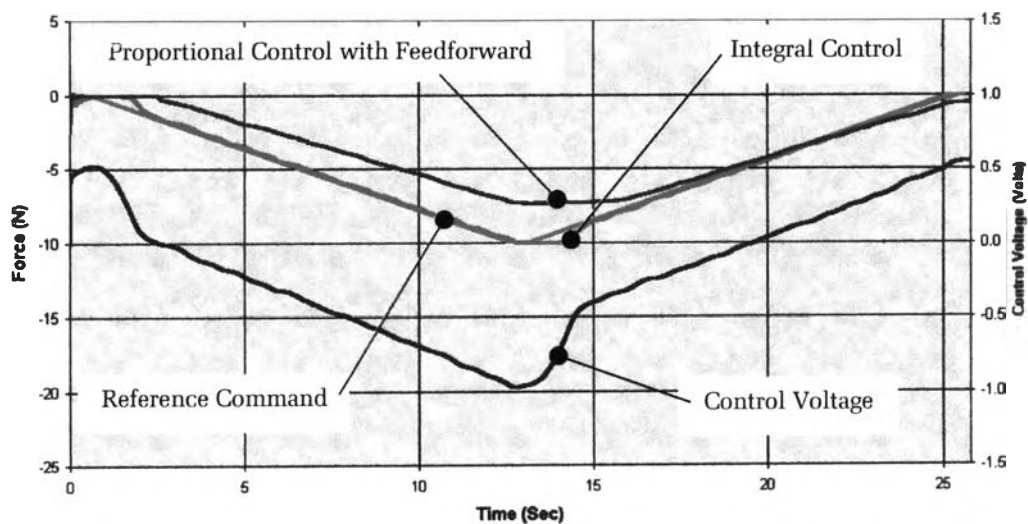
รูปที่ 5.13 เปรียบเทียบการควบคุมแรงด้วยวิธีต่างๆ โดยมีสัญญาณอ้างอิงเป็นแบบไซน์

**Force Tracking Performance using Proportional Feedforward Control
(Triangular Trajectory)**



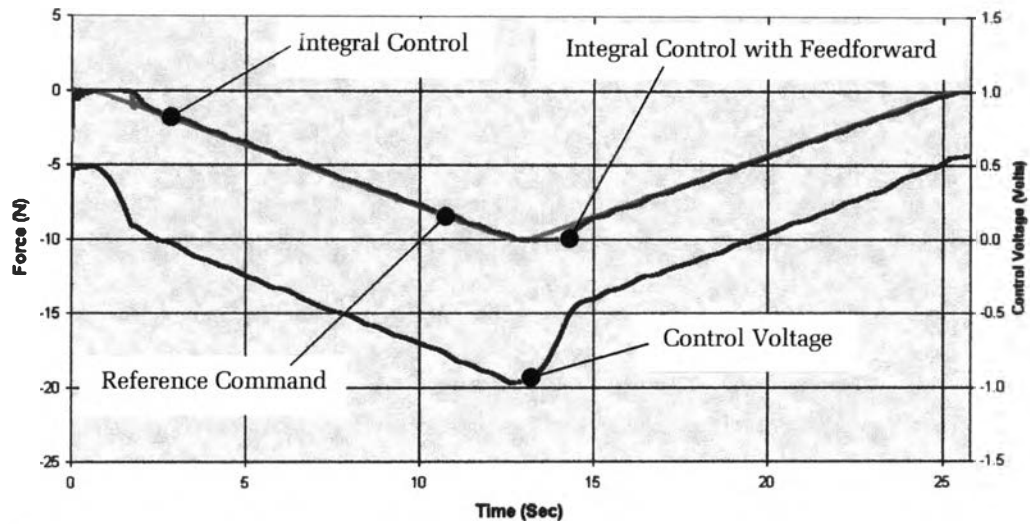
รูปที่ 5.14 การควบคุมแรงแบบสัดส่วนที่มีตัวชดเชย โดยมีสัญญาณอ้างอิงแบบสามเหลี่ยม

**Force Tracking Performance using Integral Control
(Triangular Trajectory)**



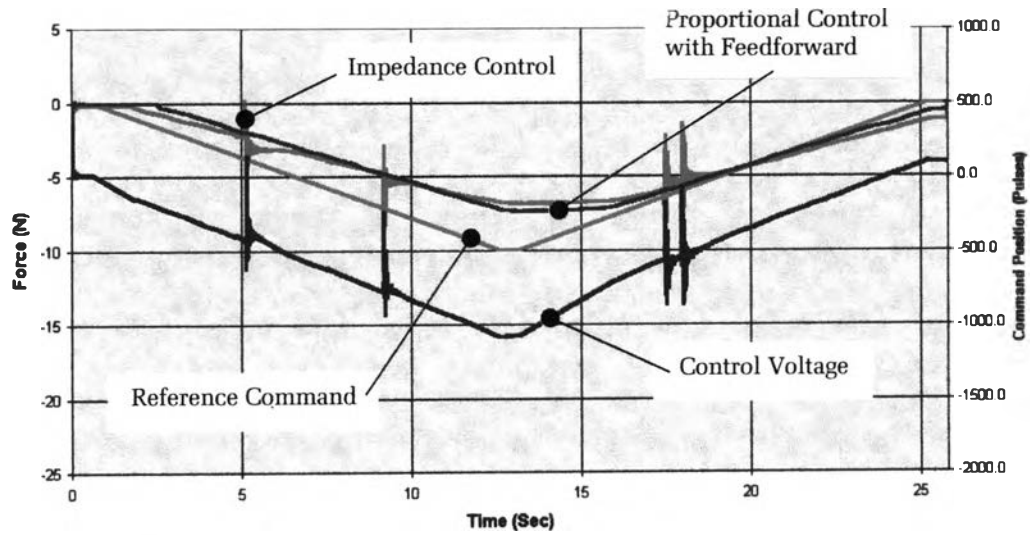
รูปที่ 5.15 การควบคุมแรงแบบอินทิกรัล โดยมีสัญญาณอ้างอิงแบบสามเหลี่ยม

**Force Tracking Performance using Integral Feedforward Control
(Triangular Trajectory)**



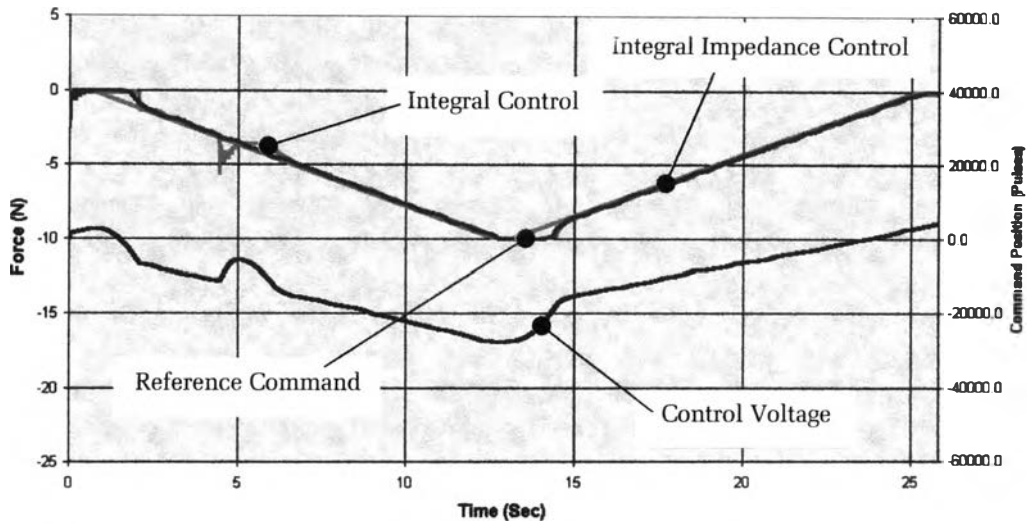
รูปที่ 5.16 การควบคุมแรงแบบอินทิกรัลที่มีตัวชดเชย โดยมีสัญญาณอ้างอิงแบบสามเหลี่ยม

**Force Tracking Performance using Impedance Control
(Triangular Trajectory)**



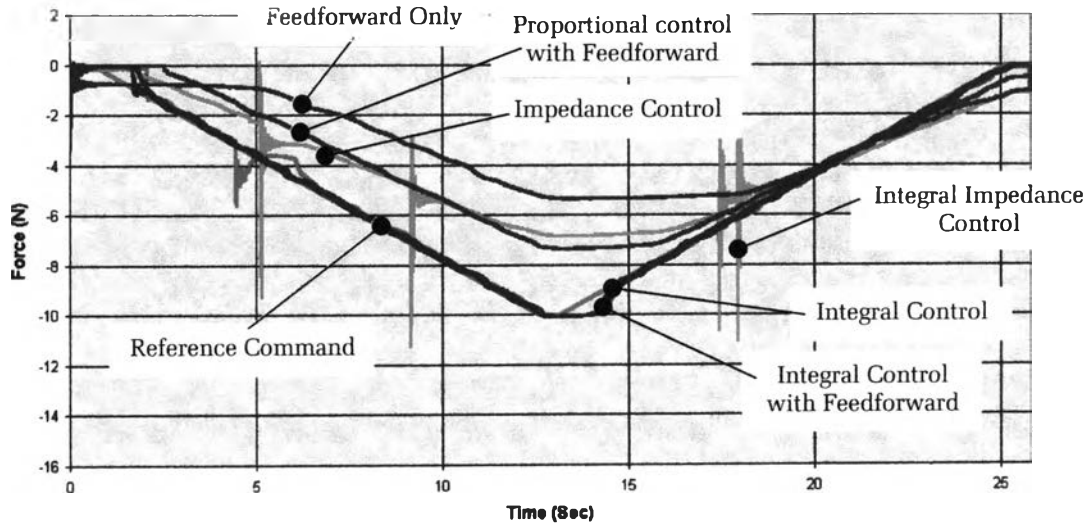
รูปที่ 5.17 การควบคุมแรงทางอ้อม โดยมีสัญญาณอ้างอิงแบบสามเหลี่ยม

**Force Tracking Performance using Integral Impedance Control
(Triangular Trajectory)**



รูปที่ 5.18 การควบคุมแรงทางอ้อมแบบอินทิกรัล โดยมีสัญญาณอ้างอิงแบบสามเหลี่ยม

**Force Tracking Performance using Various Approach
(Triangle Trajectory)**



รูปที่ 5.19 เปรียบเทียบการควบคุมแรงด้วยวิธีต่างๆ โดยมีสัญญาณอ้างอิงแบบสามเหลี่ยม

5.5 การควบคุมแรงทางอ้อมแบบอินทิกรัลกับหุ่นยนต์อุตสาหกรรม

ชุดควบคุมของหุ่นยนต์อุตสาหกรรมเกือบทั้งหมดในปัจจุบันจะใช้การควบคุมแบบตำแหน่ง การสั่งการเคลื่อนที่ด้วยตำแหน่งทำให้ผู้ใช้โปรแกรมการเคลื่อนที่ได้ง่าย และไม่ต้องการถึงพลศาสตร์และทฤษฎีการควบคุมที่ยุ่งยาก หรือจะกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือผู้ใช้จะควบคุมหุ่นยนต์ในระดับบนเท่านั้น ส่วนการควบคุมในระดับล่างหรือระดับแรงดันที่ขั้วต่อหุ่นยนต์จะกระทำโดยผู้ผลิตหุ่นยนต์ การควบคุมในลักษณะนี้ ชุดควบคุมหุ่นยนต์จะรับคำสั่งตำแหน่งเป้าหมาย จากนั้นก็จะทำการควบคุมหุ่นยนต์ในระดับล่างจนกระทั่งหุ่นยนต์เคลื่อนที่ถึงจุดหมายแล้วจึงกลับมารอรับคำสั่งใหม่

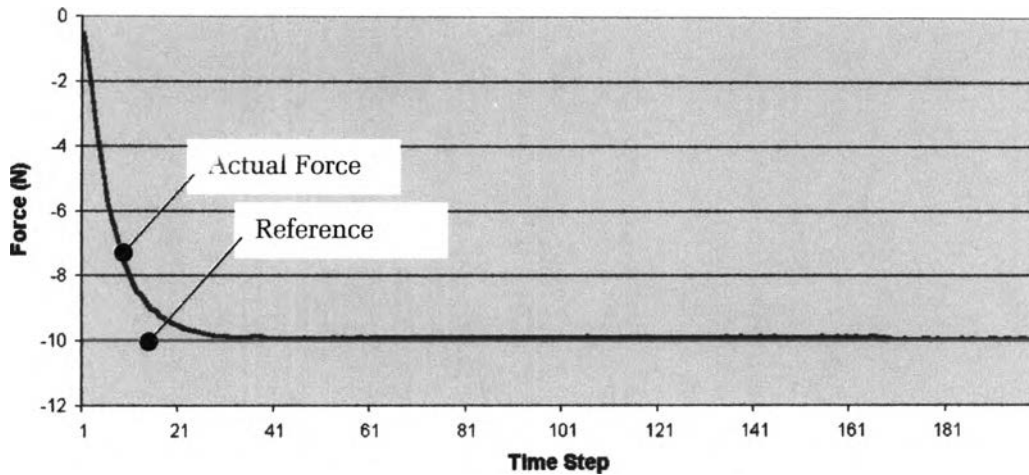
เมื่อเราควบคุมแรงทางอ้อมผ่านทางชุดควบคุมหุ่นยนต์ที่โปรแกรมได้เฉพาะในระดับบนเท่านั้น ลักษณะการควบคุมจะต่างจากการควบคุมแรงทางอ้อมในการทดลองก่อนหน้านี้ตรงที่วงรอบในการควบคุมแรงและวงรอบในการควบคุมตำแหน่งจะมีความถี่ไม่เท่ากัน ทั้งนี้เพราะเมื่อชุดควบคุมหุ่นยนต์ได้รับคำสั่งตำแหน่งเป้าหมายก็จะเริ่มดำเนินการควบคุมในระดับล่าง และจะไม่พร้อมที่จะรับคำสั่งต่อไปจนกระทั่งหุ่นยนต์เคลื่อนที่ถึงจุดหมาย วงรอบการควบคุมแรงก็จะมีค่าที่ต่ำกว่าวงรอบการควบคุมตำแหน่งมาก การควบคุมลักษณะนี้จะมีจุดเด่นตรงที่วงรอบการควบคุมตำแหน่งจะทำหน้าที่เป็นตัวกรองความถี่สูง และจะทำให้การควบคุมมีเสถียรภาพขึ้น แต่ก็จะมีจุดด้อยตรงที่ความเร็วตอบสนองในการควบคุมจะลดลง

จากผลการทดสอบการควบคุมแรงด้วยวิธีการต่างๆ ในหัวข้อก่อนหน้านี้ เราเลือกใช้การควบคุมแรงทางอ้อมแบบอินทิกรัลเพื่อใช้ในการควบคุมหุ่นยนต์อุตสาหกรรมจริง สาเหตุเพราะเราไม่สามารถควบคุมแรงทางตรงได้เนื่องจากชุดควบคุมหุ่นยนต์ไม่ยอมให้เราลงไปควบคุมหุ่นยนต์ในระดับแรงดัน และการควบคุมแบบสัดส่วนไม่สามารถจัดการให้ความผิดพลาดที่สถานะคงตัวเป็นศูนย์ได้ การควบคุมแรงทางอ้อมแบบอินทิกรัลจึงน่าที่จะเหมาะสมที่สุดในการควบคุมแรงของหุ่นยนต์อุตสาหกรรม

เราทดสอบการควบคุมแรงกับหุ่นยนต์อุตสาหกรรมของบริษัท CRS Robotics Inc โดยให้สัญญาณแรงอ้างอิงเป็นแบบซายน์และแบบขั้นบันได ผลลัพธ์การควบคุมที่ได้แสดงอยู่ในรูปที่ 5.20 และรูปที่ 5.21 ตามลำดับ ในการทดลองควบคุมแรงครั้งนี้ เราไม่พบการสั่นของการควบคุมดังที่พบในการควบคุมแรงทางอ้อมในหัวข้อก่อนหน้านี้ ทั้งนี้เป็นเพราะความถี่ในการควบคุมตำแหน่งมีค่ามากกว่าความถี่ในการควบคุมแรงมาก และค่าเกนในการควบคุมตำแหน่งก็มีประสิทธิภาพกว่า ในการทดลองก่อนหน้านี้ เราเลือกค่าเกนในการควบคุมเพื่อให้สามารถเปรียบเทียบวิธีการควบคุมแบบต่างๆ ได้ อย่างไรก็ตาม ความเร็วในการควบคุมจะลดลง ซึ่งจะเห็นได้จากค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นเมื่อสัญญาณแรงอ้างอิงเป็นแบบซายน์

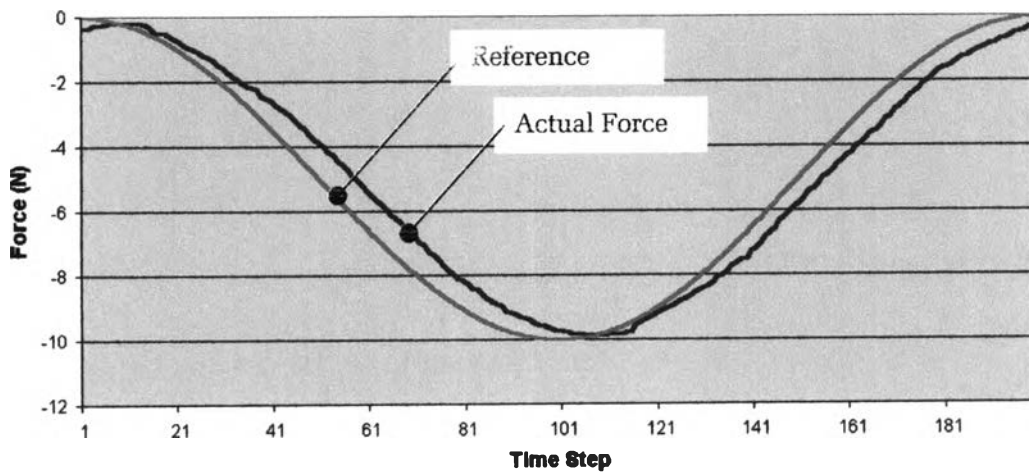
ผลการทดลองแสดงถึงความเป็นไปได้ในการควบคุมแรงของหุ่นยนต์อุตสาหกรรมผ่านทางชุดควบคุมของหุ่นยนต์เอง การควบคุมแรงทางอ้อมแบบอินทิกรัลสามารถติดตามค่าแรงอ้างอิงได้ดีในระดับที่น่าพอใจ

**Force Tracking on CRS Robotics System
using Integral Impedance Control
(Step Trajectory)**



รูปที่ 5.20 การควบคุมแรงกับหุ่นยนต์อุตสาหกรรม โดยมีสัญญาณอ้างอิงแบบขั้นบันได

**Force Tracking on CRS Robotics System
using Integral Impedance Control
(Sine Trajectory)**



รูปที่ 5.21 การควบคุมแรงกับหุ่นยนต์อุตสาหกรรม โดยมีสัญญาณอ้างอิงแบบไซน์

5.6 สรุปและอภิปราย

บทนี้แสดงถึงประสิทธิภาพในการควบคุมแรงด้วยวิธีการต่างๆ ที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน การควบคุมแรงทางตรงแบบสัดส่วนที่มีตัวชดเชยจะให้การตอบสนองเร็วแต่มีความผิดพลาดที่สถานะคงตัวในระดับหนึ่งและอาจมีการสั่นไปมาในกรณีที่สัญญาณอ้างอิงเป็นแบบขั้นบันได การควบคุมแรงทางตรงแบบอินทิกรัลจะมีการตอบสนองที่ช้ากว่าแต่จะให้ค่าความผิดพลาดที่สถานะคงตัวเป็นศูนย์ การควบคุมแรงทางตรงแบบอินทิกรัลที่มีตัวชดเชยจะมีพฤติกรรมการควบคุมคล้ายกับการควบคุมแรงทางตรงแบบอินทิกรัลแต่จะให้การตอบสนองที่เร็วกว่าเนื่องจากมีตัวชดเชยซึ่งมีการตอบสนองที่เร็ว การควบคุมแรงทางอ้อมหรือควบคุมผ่านตัวควบคุมตำแหน่งสามารถเขียนให้คล้ายกับการควบคุมทางตรงแบบสัดส่วนที่มีตัวชดเชยและการควบคุมแบบอินทิกรัลได้ ผลลัพธ์การควบคุมมีลักษณะคล้ายกัน จุดต่างคือการควบคุมทางอ้อมอาจมีการสั่นเกิดขึ้นเนื่องจากระบบควบคุมนำค่าตำแหน่งจริงของหุ่นยนต์มาใช้ในการควบคุมตำแหน่ง เมื่อหุ่นยนต์มีการเคลื่อนที่ การควบคุมแรงทางตรงและทางอ้อมก็จะแตกต่างกัน ความเข้าใจในพฤติกรรมของการควบคุมด้วยวิธีการต่างๆ ได้ใช้เป็นพื้นฐานในการสร้างตัวควบคุมแรงเพื่อใช้งานกับหุ่นยนต์อุตสาหกรรมจริงที่มีการควบคุมเป็นแบบควบคุมตำแหน่ง และเราเลือกควบคุมแรงของหุ่นยนต์อุตสาหกรรมด้วยวิธีควบคุมแรงทางอ้อมแบบอินทิกรัล ซึ่งเป็นวิธีที่สามารถทำงานบนชุดควบคุมหุ่นยนต์ได้และสามารถจัดการกับค่าความผิดพลาดที่สถานะคงตัวได้ดี และจะได้นำวิธีการควบคุมแรงวิธีนี้ ไปใช้ในการควบคุมแบบผสมระหว่างแรงและรูปภาพในบทต่อไป