บทที่ 4

การควบคุมขับแขนกลด้วยระบบกล้องดิจิตัล

4.1 นำเรื่อง

หุ่นยนต์อุตสาหกรรมมีบทบาทสำคัญมากขึ้นในอุตสาหกรรมการผลิตในปัจจุบัน หุ่นยนต์ช่วยให้มั่นใจว่ากรรมวิธีการผลิตจะมีความสม่ำเสมอซึ่งเป็นเรื่องที่สำคัญมากในเรื่องการประกันคุณภาพของการผลิต นอกจากนี้ แม้ว่าหุ่นยนต์จะมีราคาแพง แต่ก็มีราคาถูกลงไปเรื่อยๆ ในขณะที่ประสิทธิภาพก็สูงขึ้น ค่าใช้จ่ายในการทำงานโดยทั่วไปมีราคาถูกกว่าการจ้างพนักงานบุคคล ประกอบกับหุ่นยนต์สามารถทำงานได้เกือบตลอดเวลา ไม่มีการลาพักร้อน ลาคลอด หรือต้องเข้ารับการเกณฑ์ทหาร ทำให้ผู้ประกอบการวางใจในเรื่องของความแน่นอนในการทำงาน

การทำงานของหุ่นยนต์อุตสาหกรรมทั่วไปจะมีลักษณะการทำงานแบบควบคุมตำแหน่ง โดยจะโปรแกรมทางเดินของหุ่นยนต์ไว้ก่อนล่วงหน้าและวางชิ้นงานในตำแหน่งที่แน่นอน ชิ้นงานจะวางอยู่บนอุปกรณ์จับยึดเพื่อรับประกันความแน่นอนของตำแหน่ง หุ่นยนต์จะอาศัยความจำของตัวหุ่นเพื่อเดินทางไปถึงชิ้นงาน การทำงานในลักษณะดังกล่าวจำกัดการใช้งานหุ่นยนต์เฉพาะกับงานที่มีตำแหน่งที่แน่นอนเท่านั้น

เพื่อเพิ่มศักยภาพของหุ่นยนต์ให้ทำงานได้เมื่อตำแหน่งของชิ้นงานไม่มีความแน่นอน หุ่นยนต์จะต้องมีความสามารถในการรับรู้ตำแหน่งของชิ้นงาน ในงานวิจัยนี้ ได้ใช้กล้องดิจิตัลเข้ามาเพิ่มขีดความสามารถเพื่อให้หุ่นยนต์สามารถรับรู้ตำแหน่งของวัตถุ และเข้าไปจัดการชิ้นงานได้ หุ่นยนต์จะมีโสตในการรับภาพทำให้สามารถทำงานคล้ายกับการรับรู้ด้วยดวงตาของมนุษย์ เมื่อประมวลผลรูปภาพ ก็จะได้ข้อมูลของตำแหน่งชิ้นงานตามที่ต้องการ การเพิ่มความสามารถในการรับรู้ภาพของหุ่นยนต์จะทำให้หุ่นยนต์ทำงานได้หลากหลายมากขึ้น และจะมีความยืดหยุ่นสูงต่อสภาพแวดล้อมที่ไม่คงที่

ในบทนี้ จะแนะนำวิธีการควบคุมหุ่นยนต์ด้วยรูปภาพ ซึ่งจะใช้กล้องดิจิตัลเป็นอุปกรณ์ตรวจรู้เพื่อระบุตำแหน่งของวัตถุ แล้วจึงนำข้อมูลตำแหน่งนี้ไปใช้ในการขับควบคุมแขนกล กล้องดิจิตัลจะติดอยู่ที่ปลายแขนหุ่นยนต์และจะบันทึกภาพในตำแหน่งที่สัมพัทธ์กับปลายแขน ความผิดพลาดก็จะเป็นค่าสัมพัทธ์กับปลายแขน และได้วิเคราะห์การควบคุมทั้งการจำลองในคอมพิวเตอร์และการทดสอบกับหุ่นยนต์อุตสาหกรรมจริง

4.2 วิธีการควบคุมแขนกลด้วยกล้องดิจิตัล

การควบคุมแขนกลด้วยกล้องดิจิตัลมีหลายวิธีการ ถ้าแบ่งประเภทตามลักษณะในการใช้ข้อมูลจากรูปภาพเพื่อใช้ในการควบคุม จะแบ่งได้สองวิธี คือ การควบคุมโดยใช้ตำแหน่ง และการควบคุมโดยใช้พารามิเตอร์รูปภาพ โดยมีรายละเอียดดังนี้

การควบคุมโดยใช้ตำแหน่ง: การควบคุมแบบนี้ จะนำภาพที่บันทึกได้มาคำนวณหาตำแหน่งและทิศทางของวัตถุ เมื่อทราบตำแหน่งของวัตถุหรือหาแกนอ้างอิงของวัตถุเทียบกับกล้อง ก็จะขับเคลื่อนหุ่นยนต์เข้าไปจัดการกับวัตถุได้ หรืออีกนัยหนึ่งคือ ระบบควบคุมจะแปลงข้อมูลที่ได้จากระบบกล้องดิจิตัลเป็นตำแหน่งเทียบกับแกนอ้างอิงที่กำหนดขึ้น จากนั้นก็ใช้ข้อมูลตำแหน่งนี้ในการขับหุ่นยนต์

การควบคุมโดยใช้พารามิเตอร์รูปภาพ: การควบคุมในลักษณะนี้ จะไม่มีการแปลงข้อมูลในรูปภาพเป็นตำแหน่งของวัตถุ แต่จะใช้พารามิเตอร์รูปภาพในการควบคุมหุ่นยนต์โดยตรง จุดเด่นของวิธีการนี้ก็คือไม่ต้องหาคณิตศาสตร์ความสัมพันธ์ในการแปลงระหว่างพารามิเตอร์รูปภาพไปเป็นข้อมูลตำแหน่ง ซึ่งคณิตศาสตร์ความสัมพันธ์นี้โดยทั่วไปจะมีความสลับซับซ้อนและเกี่ยวข้องกับพารามิเตอร์ของหุ่นยนต์และระบบกล้องดิจิตัลมากมาย อย่างไรก็ตาม วิธีการนี้ก็มีจุดด้อยตรงที่เข้าใจได้ยาก และระบบควบคุมอาจมีความสลับซับซ้อนมาก

การควบคุมหุ่นยนต์ด้วยกล้องดิจิตัลยังสามารถแบ่งตามลักษณะในการนำข้อมูลไปใช้ในการควบคุมข้อต่อของแขนกลเป็น 2 ประเภท คือ การควบคุมแบบมองแล้วเคลื่อนที่ (Dynamic Look and Move) และ การควบคุมแบบขับด้วยระบบกล้องดิจิตัล (Direct Visual Servo) โดยมีรายละเอียดดังนี้

การควบคุมแบบมองแล้วเคลื่อนที่: การควบคุมในลักษณะนี้ ระบบกล้องดิจิตัลจะทำการประมวลผลรูปภาพเพื่อหาตำแหน่งหรือพารามิเตอร์ของวัตถุ จากนั้นก็จะส่งข้อมูลนี้ให้กับตัวควบคุมของข้อต่อ ตัวควบคุมข้อต่อก็จะควบคุมให้แขนกลทำงานเพื่อให้บรรลุตามเป้าหมาย การทำงานในลักษณะนี้ จึงเป็นแบบมองแล้วเคลื่อนที่ กล่าวคือใช้ระบบกล้องดิจิตัลในการมองและคำนวณหาตำแหน่ง จากนั้นตัวควบคุมของข้อต่อจะทำงานโดยใช้ข้อมูลตำแหน่งนี้

การควบคุมแบบขับด้วยระบบกล้องดิจิตัล: การควบคุมในลักษณะนี้ ข้อมูลสัญญาณที่ได้จากระบบกล้องดิจิตัล จะนำไปใช้ในการขับมอเตอร์ข้อต่อโดยตรง หรืออีกนัยหนึ่ง วงรอบในการควบคุมจะมีวงเดียว ระบบกล้องดิจิตัลจะทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมด้วย และจะส่งสัญญาณแรงดันไปขับข้อต่อหุ่นยนต์โดยตรง

การควบคุมด้วยระบบกล้องดิจิตัล สามารถแบ่งได้ตามการเฝ้าดูลักษณะวัตถุเป้าหมาย โดยแบ่งออกเป็นการเฝ้าดูแบบเปิด (End Point Open Loop: EOL) และ การเฝ้าดูแบบปิด (End Point Closed Loop: ECL)

การเฝ้าดูแบบเปิด: ระบบกล้องดิจิตัลในลักษณะนี้ จะเฝ้าดูเฉพาะวัตถุเป้าหมายเท่านั้น โดยจะต้องทราบตำแหน่งของปลายแขนที่สัมพัทธ์กับตัวกล้องล่วงหน้า

การเฝ้าดูแบบปิด: ระบบกล้องดิจิตัลในลักษณะนี้ จะเฝ้าดูทั้งวัตถุเป้าหมายและปลายแขนกล ทำให้ทราบถึงความผิดพลาดที่เกิดขึ้นในขณะเวลาที่จับภาพ โดยไม่จำเป็นต้องทราบตำแหน่งของปลายแขนที่สัมพัทธ์กับตัวกล้องล่วงหน้า

ในงานวิจัยนี้ใช้ระบบควบคุมหุ่นยนต์แบบใช้พารามิเตอร์รูปภาพ และขับควบคุมด้วยระบบกล้องดิจิตัล และจะยึดกล้องดิจิตัลไว้ที่ปลายแขนของหุ่นยนต์ ซึ่งรูปแบบนี้เป็นรูปแบบการทำงานที่คล้ายกับมนุษย์ การเฝ้าดูเป็นแบบเปิด

4.3 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
- โปรแกรม HLImage++ จากบริษัท Western Vision Software: ใช้เป็นโปรแกรมสำหรับประมวลผลรูปภาพ
- โปรแกรม Visual Studio 5.0 จากบริษัท Microsoft Corporation: ใช้เป็นโปรแกรมกลางเพื่อติดต่อกับอุปกรณ์ต่างๆ และทำการประมวลผลรูปภาพ คำนวณหาอัตราการปรับข้อต่อแขนกล
- โปรแกรม Matlab จากบริษัท MathWork: ใช้เป็นโปรแกรมในการจำลองการทำงานและสนับสนุนการคำนวณทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อนให้กับโปรแกรมกลาง

4.4 ภาพรวมของการทดลอง

ในการศึกษานี้ ได้ทำการจำลองวิธีการควบคุมแขนกลด้วยระบบกล้องดิจิตัลกับแขนกลแบบ SCARA โดยจะควบคุมเฉพาะสองข้อต่อแรก เป้าหมายมีความอิสระเท่ากับ 2 กล่าวคือ ควบคุมให้วัตถุอยู่กลางรูปภาพ (พารามิเตอร์รูปภาพคือจุดศูนย์กลางของวัตถุต้องอยู่กลางภาพที่บันทึกได้จากกล้องดิจิตัล) และได้วิเคราะห์สมรรถนะต่างๆ ของระบบควบคุม ซึ่งรวมถึงความไวของประสิทธิภาพการควบคุมต่อพารามิเตอร์ต่างๆ ของแขนกล และความไวต่อความยาวช่วงก้าวเดิน รายละเอียดผลการวิเคราะห์ได้นำเสนอในบทนี้ จากนั้น ได้นำระบบควบคุมนี้ไปทดสอบจริงกับแขนกลอุตสาหกรรมของบริษัท CRS Robotics Inc รุ่น A255 ซึ่งเป็นแขนกลแบบ Articulated Type แบบ 5 แกน โดยพิจารณาควบคุมเฉพาะ 2 ข้อต่อแรกเพื่อให้มีความอิสระของระบบเท่ากับ 2 ซึ่งเท่ากับที่ใช้ในการจำลอง โครงสร้างของระบบควบคุมของระบบจำลองกับระบบจริงมีลักษณะเหมือนกัน จะต่างกันก็เฉพาะความยาวช่วงก้าวเดินเท่านั้น และเนื่องจากว่าระบบควบคุมไม่มีพารามิเตอร์ของแขนกลและพารามิเตอร์ของกล้องอยู่ภายใน จึงน่าที่จะใช้ได้กับแขนกลทุกประเภท รวมทั้งแบบ SCARA และ Articulated การทดลองกับแขนกลจริงก็เพื่อพิสูจน์ว่าระบบควบคุมนี้มีความยืดหยุ่นเพียงพอ และสามารถใช้ได้กับระบบจริงที่มีแรงเสียดทานและความไม่แน่นอนต่างๆ การทดลองได้แสดงถึงสมรรถนะการควบคุมเมื่อวัตถุอยู่ในตำแหน่งต่างๆ ผลลัพธ์และข้อสรุปได้นำเสนอในบทนี้

จากนั้น ได้วิเคราะห์จำลองการควบคุมกับแขนกลแบบต่างๆ รวมถึงแขนกล PUMA 560 และ Stanford Arm โดยจำลองควบคุมเฉพาะ 3 ข้อต่อแรก และเป้าหมายมีความอิสระเท่ากับ 3 กล่าวคือนอกจากวัตถุจะต้องอยู่กลางรูปภาพแล้ว ยังจะต้องมีขนาดเท่ากับที่กำหนดด้วย (กล้องดิจิตัลจะต้องมองเห็นวัตถุอยู่กลางภาพและมีขนาดที่มองเห็นเท่ากับที่กำหนด) ผลลัพธ์ที่ได้แสดงถึงเสถียรภาพของระบบควบคุม ซึ่งสามารถทำงานได้ดีแม้ว่าพารามิเตอร์ของรูปภาพทั้ง 3 ตัวจะมีความไวแตกต่างกัน อนึ่ง ระบบควบคุมที่ใช้มีโครงสร้างเหมือนกันกับในการทดลองกับเป้าหมายที่มีความอิสระเท่ากับ 2 ต่างกันเพียงแต่ระบบควบคุมได้รับการพัฒนาให้สามารถรองรับพารามิเตอร์ได้ 3 ตัว และได้นำระบบควบคุมที่สามารถรองรับพารามิเตอร์ได้ 3 ตัวนี้ ไปทดสอบกับแขนกลอุตสาหกรรมของบริษัท CRS Robotics Inc รุ่น A255 โดยทำการควบคุมเฉพาะ 3 ข้อต่อแรก ผลลัพธ์และข้อสรุปแสดงอยู่ในรายงาน

ในส่วนนี้ของรายงานได้อธิบายการจำลองและทดลองต่างๆ อย่างคร่าวๆ เพื่อให้เห็นการทดสอบระบบควบคุมโดยใช้พารามิเตอร์รูปภาพในภาพรวม และจะได้อธิบายแต่ละการทดลองอย่างละเอียดต่อไป

4.5 ทฤษฎีของการควบคุมโดยใช้พารามิเตอร์รูปภาพ

การควบคุมแขนกลด้วยระบบกล้องดิจิตัลแบ่งออกเป็นสองประเภทคือ การควบคุมโดยใช้ตำแหน่ง และการควบคุมโดยใช้พารามิเตอร์รูปภาพ สำหรับระบบควบคุมที่ใช้พารามิเตอร์รูปภาพนั้น ระบบจะสังเกตความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของตำแหน่งของแขนกลเทียบกับการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์รูปภาพ จากนั้นจึงใช้ความสัมพันธ์นี้ในการควบคุมให้แขนกลเคลื่อนที่เข้าสู่จุดหมาย เมตริกซ์ที่เก็บความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของตำแหน่งของแขนกลเทียบกับการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์รูปภาพ จะเรียกว่าจาโคเบียนรูปภาพและค่าพารามิเตอร์รูปภาพอาจเป็นค่าพารามิเตอร์ในการวัดใดๆ ก็ได้ในรูปภาพ เช่น ตำแหน่ง ขนาด ระยะทาง หรือพื้นที่ของวัตถุในรูปภาพ

ถ้าทำการปรับเทียบแขนกลและตำแหน่งกล้องอย่างสมบูรณ์ ก็จะทำให้สามารถคำนวณหาจาโคเบียนรูปภาพที่ตำแหน่งใดๆ ของแขนกลได้ อย่างไรก็ตาม การปรับเทียบโดยทั่วไปมักมีความยุ่งยากและมักมีความผิดพลาดเกิดขึ้น แนวทางหนึ่งในการแก้ปัญหาดังกล่าวก็คือการเลือกใช้เทคนิคการควบคุมที่ไม่ต้องทำการปรับเทียบ และจากบทความของ Weiss และคณะ [24] ระบุว่าสามารถประมาณหาจาโคเบียนรูปภาพได้ โดยไม่ต้องทำการปรับเทียบ ถ้าเลือกชุดพารามิเตอร์รูปภาพที่ถูกต้อง ซึ่งต่อไปนี้จะกล่าวถึงกรรมวิธีในการประมาณหาจาโคเบียนรูปภาพและการนำมาใช้ในการควบคุมแขนกลเพื่อให้บรรลุตามจุดหมาย

4.5.1 จาโคเบียนรูปภาพ

สมมติว่าแขนกลมี n ข้อต่อ และมีความอิสระของระบบ (DOF) เท่ากับ n และสมมติว่าตัวกล้องยึดติดอยู่ที่ปลายของแขนกล เป้าหมายของการควบคุมนิยามในเทอมของค่าพารามิเตอร์รูปภาพ m ตัว ให้ $\bar{q}$ เป็นเวคเตอร์ขนาด n ซึ่งแสดงตำแหน่งของข้อต่อแขนกล และ $\bar{r}$ เป็นเวคเตอร์ขนาด p ซึ่งแสดงตำแหน่งของปลายแขนกลเทียบกับแกนอ้างอิงคาทีเซียน และให้ $\bar{f}$ เป็นเวคเตอร์ขนาด m ซึ่งแสดงค่าพารามิเตอร์รูปภาพ ความสัมพันธ์ระหว่างเวคเตอร์ของความเร็วข้อต่อแขนกล $\dot{q}$ กับเวคเตอร์ของความเร็วของปลายแขน $\dot{r}$ จะอยู่ในเทอมของ จาโคเบียนของแขนกล J (Robot Jacobian) และเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$\dot{r} = J \cdot \dot{q}$$

โดยที่

I19254116

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial r_1}{\partial q_1} & \frac{\partial r_1}{\partial q_2} & \cdots & \frac{\partial r_1}{\partial q_n} \\ \frac{\partial r_2}{\partial q_1} & \frac{\partial r_2}{\partial q_2} & \cdots & \frac{\partial r_2}{\partial q_n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \frac{\partial r_m}{\partial q_1} & \frac{\partial r_m}{\partial q_2} & \cdots & \frac{\partial r_m}{\partial q_n} \end{bmatrix}$$

การเปลี่ยนตำแหน่งของปลายแขนกล จะเป็นผลทำให้ค่าพารามิเตอร์รูปภาพเปลี่ยนไป และจะสามารถใช้การคำนวณโปรเจคชันแบบเพอสเปคทีฟ เพื่อหาความสัมพันธ์นี้ และดังนั้น ค่าอนุพันธ์ของค่าพารามิเตอร์เทียบกับเวลา $\dot{f}$ จะสัมพันธ์กับความเร็วของปลายแขน $\dot{r}$ ดังนี้

$$\dot{f} = J_r \cdot \dot{r}$$

โดยที่ J_r เป็นเมตริกซ์ขนาด $m \times p$ ที่ตำแหน่งของแขนกล $\bar{q}$ และ

$$J_r = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial r_1} & \frac{\partial f_1}{\partial r_2} & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial r_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial r_1} & \frac{\partial f_2}{\partial r_2} & \cdots & \frac{\partial f_2}{\partial r_n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \frac{\partial f_m}{\partial r_1} & \frac{\partial f_m}{\partial r_2} & \cdots & \frac{\partial f_m}{\partial r_n} \end{bmatrix}$$

ดังนั้น จะสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเร็วของค่าพารามิเตอร์รูปภาพ $\dot{f}$ กับความเร็วของข้อต่อแขนกล $\dot{q}$ ในเทอมของ จาโคเบียนผสม และจะเรียกจาโคเบียนนี้ว่า จาโคเบียนรูปภาพ

$$\dot{f} = J_q \cdot \dot{q}$$

โดยที่ $J_q = J_r \cdot J$ และดังนั้น

$$J_q = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial q_1} & \frac{\partial f_1}{\partial q_2} & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial q_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial q_1} & \frac{\partial f_2}{\partial q_2} & \cdots & \frac{\partial f_2}{\partial q_n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \frac{\partial f_m}{\partial q_1} & \frac{\partial f_m}{\partial q_2} & \cdots & \frac{\partial f_m}{\partial q_n} \end{bmatrix}$$

4.5.2 การประมาณจาโคเบียนรูปภาพโดยการเคลื่อนข้อต่อแขนกล

จากความสัมพันธ์ $\dot{f} = J_q \cdot \dot{q}$ ซึ่งความเร็วของค่าพารามิเตอร์รูปภาพ $\dot{f}$ จะสัมพันธ์กับความเร็วของข้อต่อ $\dot{q}$ ในลักษณะเชิงเส้น ณ ที่ตำแหน่งของข้อต่อ $\bar{q}$ ทำให้สามารถสร้างกลไกการขับแขนกลได้ดังนี้

สมมติว่าต้องการที่จะควบคุมปลายของแขนกลให้เคลื่อนที่เพื่อให้ค่าพารามิเตอร์รูปภาพมีค่าเท่ากับ f^g ในขณะที่ตำแหน่งปัจจุบันของแขนกลนั้น ค่าพารามิเตอร์รูปภาพ มีค่าเท่ากับ f^c ที่ตำแหน่งนี้ จะมีค่าความผิดพลาดเท่ากับ $\Delta f = f^g - f^c$ จะสามารถลดค่าความผิดพลาดนี้ได้โดยการเคลื่อนข้อต่อแขนกล Δq ดังนี้

$$\Delta q = J_q^{-1} \Delta f$$

เนื่องจากโดยทั่วไปแล้ว ค่าของจาโคเบียนรูปภาพ J_q จะมีค่าขึ้นอยู่กับตำแหน่งของข้อต่อแขนกล หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือไม่ได้มีค่าคงที่ ดังนั้น จึงควรที่จะใช้ Δq เพียงเพื่อที่จะบอกถึงทิศทางในการปรับควบคุมการเปลี่ยนค่าตำแหน่งข้อต่อแขนกลเท่านั้น

ในกรณีที่ไม่สามารถหาจาโคเบียนรูปภาพที่ทุกตำแหน่งของข้อต่อแขนกลได้อย่างแม่นยำ ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการปรับเทียบแขนกลทำได้ยาก ก็สามารถประมาณหาจาโคเบียนรูปภาพได้จากการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของข้อต่อต่างๆ เทียบกับการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์รูปภาพ พิจารณาตำแหน่งเวลาที่ j ซึ่งในขณะเวลาดังกล่าวระบบสามารถหาได้ว่ามีค่าพารามิเตอร์รูปภาพเท่ากับ f^j และขณะนี้ แขนกลที่ตำแหน่งข้อต่อคือ q^j จากข้อมูลนี้ ระบบสามารถหาการเปลี่ยนแปลงของพารามิเตอร์รูปภาพได้เท่ากับ $\Delta f^j = f^j - f^{j-1}$ และแขนกลมีการเปลี่ยนตำแหน่งข้อต่อเท่ากับ $\Delta q^j = q^j - q^{j-1}$ ซึ่งจะใช้ข้อมูลทั้งสองนี้ มาประมาณหาค่าจาโคเบียนรูปภาพต่อไป

เพื่อที่จะทำให้สามารถควบคุมแขนกลได้ ขนาดของเวคเตอร์พารามิเตอร์รูปภาพ $\bar{f}$ ควรมีค่ามากกว่าหรือเท่ากับขนาดของเวคเตอร์ข้อต่อแขนกล q $(n \le m)$ เพื่อที่จะประมาณหาค่าของจาโคเบียนรูปภาพ จำเป็นต้องใช้การเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์รูปภาพและการเปลี่ยนแปลงของข้อต่อแขนกลทั้งหมด n คู่ และจะสามารถสร้างเมตริกซ์ DQ และ DF ได้ดังนี้

$$DQ = \begin{bmatrix} dq_1^{\,j-n+1} & .. & dq_1^{\,j} \\ .. & .. & .. \\ dq_n^{\,j-n+1} & .. & dq_n^{\,j} \end{bmatrix}$$

$$DF = \begin{bmatrix} df_1^{j-n+1} & .. & df_1^{j} \\ .. & .. & .. \\ df_m^{j-n+1} & .. & df_m^{j} \end{bmatrix}$$

เมื่อพิจารณาจะพบว่า $\Delta q^j = \left[\Delta q_1^j \quad .... \quad \Delta q_n^j\right]^T$ และ $\Delta f^j = \left[\Delta f_1^j \quad ... \quad \Delta f_m^j\right]^T$ จะเป็นเวคเตอร์ขนาด n และ m ตามลำดับ ดังนั้น DQ จะเป็นเมตริกซ์ขนาด $n \times n$ และ DF จะเป็นเมตริกซ์ขนาด $m \times n$ และจาโคเบียนรูปภาพจะหาได้ดังนี้

$$\hat{J}_q = DF \cdot DQ^{-1}$$

ค่าจาโคเบียนรูปภาพที่ประมาณได้นี้ จะทำให้สามารถคำนวณการการเปลี่ยนแปลงของข้อต่อแขนกล Δq ที่จะทำให้ค่าความผิดพลาดมีขนาดลดลง เมื่อแขนกลเคลื่อนที่ในทิศทางดังกล่าว ระบบก็จะทำการสังเกตและเก็บค่า Δf^{j+1} ค่า Δq^{j+1} และ Δf^{j+1} คู่ใหม่นี้ ก็จะถูกนำไปสร้างเป็น DQ และ DF อันใหม่ แล้วจึงทำการประมาณหา $\hat{J}_q$ ขึ้นมาใหม่ จะเห็นได้ว่า คู่ของข้อมูลชุดล่าสุดจะให้ข้อมูลที่แม่นยำที่สุดในการประมาณหาค่าจาโคเบียนรูปภาพ และวิธีการที่ง่ายที่สุดในการหาค่า DQ และ DF ก็ทำได้โดยการเปลี่ยน Δq^{j-n+1} และ Δf^{j-n+1} ด้วย Δq^{j+1} และ Δf^{j+1} อันใหม่

4.5.3 การประมาณหาจาโคเบียนรูปภาพในจุดเริ่มต้น

ในตำแหน่งเริ่มต้นเคลื่อนที่ สามารถหาค่า DQ และ DF ได้จากการเริ่มเคลื่อนข้อต่อแขนกลแบบสุ่มในตำแหน่งเริ่มต้นจนกระทั่งมีข้อมูลเพียงพอ หรืออีกวิธีหนึ่งก็คือทำการเคลื่อนทีละหนึ่งข้อต่อและทำการสังเกตการเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์ที่เกิดขึ้น โดยทั่วไปแล้ว จะนิยมใช้ตามแบบหลังมากกว่า เนื่องจากวิธีนี้จะเป็นระบบมากกว่าและสามารถรับประกันว่าสามารถหา DQ และ DF ได้

4.5.4 ทิศทางในการปรับตำแหน่งข้อต่อแขนกล

จากที่กล่าวมาแล้วจะเห็นว่าสามารถใช้ข้อมูลของจาโคเบียนรูปภาพ J_q และค่าความผิดพลาด Δf ที่ตำแหน่งข้อต่อแขนกล $\bar{q}$ ปัจจุบัน เพื่อคำนวณหาทิศทางในการปรับตำแหน่งข้อต่อแขนกล $\Delta\bar{q}$ เพื่อให้มีค่าความผิดพลาดลดลง ค่า $\Delta\bar{q}$ จะหาได้จาก

$$\Delta\bar{q} = k \cdot J_q^{-1} \Delta\bar{f}$$

โดยที่ k คือช่วงของก้าวเดิน (Step size) โดยที่จะมีค่าไม่เกิน 1 ทั้งนี้เนื่องมาจากว่าถ้าจาโคเบียนรูปภาพมีลักษณะคงที่ ค่า k เท่ากับ 1 จะหมายถึงการควบคุมจะพยายามเดินถึงจุดหมายในก้าวเดินเดียว ในทางปฏิบัติ จาโคเบียนรูปภาพไม่คงที่ ค่า k จึงต้องมีขนาดเล็กมากพอที่จะทำให้มั่นใจได้ว่าจาโคเบียนรูปภาพมีความแม่นยำเพียงพอในขณะที่ก้าวเดิน

4.5.5 การเลือกช่วงของก้าวเดิน

ช่วงของก้าวเดินนี้ ถ้ามีขนาดเล็กก็จะทำให้การควบคุมมีเสถียรภาพมาก แต่ก็จะเป็นผลทำให้การเคลื่อนข้อต่อเพื่อให้บรรลุตามจุดมุ่งหมายเป็นไปอย่างช้าๆ เมื่อช่วงของก้าวเดินมากขึ้น ก็จะทำให้ระบบเคลื่อนที่เร็วขึ้น แต่ก็จะทำให้เสถียรภาพลดลง อย่างไรก็ตาม ค่าของช่วงก้าวเดินไม่ควรมีค่าเกิน 1 ทั้งนี้เนื่องจากถ้าจาโคเบียนรูปภาพมีค่าคงที่แล้ว ช่วงก้าวเดินที่มีค่าเท่ากับ 1 จะทำให้แขนกลเคลื่อนเข้าสู่เป้าหมายภายในก้าวเดินเดียว ก้าวเดินที่มากกว่านี้จะทำให้แขนกลเคลื่อนเลยจุดเป้าหมาย และเป็นผลให้ต้องเคลื่อนแขนกลกลับ และเป็นผลต่อเนื่องทำให้ระบบไม่มีเสถียรภาพ อย่างไรก็ตาม จาโคเบียนรูปภาพมักมีค่าไม่คงที่ ก้าวเดินจึงไม่ควรมีค่ามากเกินไปนัก และในการศึกษานี้ ใช้ช่วงของก้าวเดินแบบคงที่ และทำการศึกษาถึงผลของก้าวเดินที่มีต่อการควบคุม

4.6 การจำลองควบคุมขับแขนกลกับปัญหาที่มีความอิสระเท่ากับสอง

4.6.1 การทดลองและผลลัพธ์

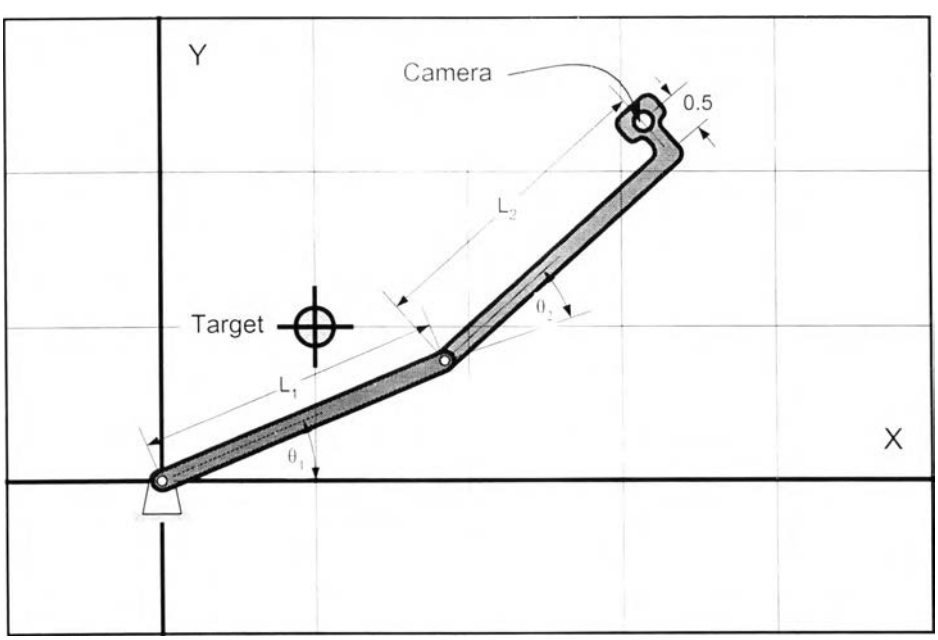
ในการทดลองนี้ ได้จำลองการขับเคลื่อนแขนกลด้วยระบบกล้องดิจิตัล โดยทำการสร้างแบบจำลองแขนกลแบบ SCARA ที่มี 2 ข้อต่อ และติดตั้งกล้องดิจิตัลที่ปลายแขนดังแสดงในรูปที่ 4.1 กำหนดให้แกนอ้างอิงมีจุดกำเนิดอยู่ที่ฐานของแขนกล เป้าหมายของการควบคุมก็คือขับเคลื่อนแขนกลให้ตำแหน่งวัตถุอยู่กลางภาพ หรือพารามิเตอร์รูปภาพก็คือตำแหน่งจุดศูนย์กลางของวัตถุจะต้องอยู่กลางรูปภาพ จากลักษณะการวางกล้องดังกล่าวนี้ กล้องจะวัดตำแหน่งของวัตถุสัมพัทธ์กับปลายแขนกล เมื่อแขนกลเคลื่อนที่เข้าสู่เป้าหมาย ปลายแขนจะต้องอยู่ในตำแหน่งเดียวกันกับวัตถุ

ตัวควบคุมอาศัยหลักการปรับตำแหน่งแขนกลตามที่ได้อธิบายก่อนหน้านี้ ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 4.2 ในวงควบคุม ระบบจะเปรียบเทียบพารามิเตอร์รูปภาพ ณ ปัจจุบันกับพารามิเตอร์รูปภาพที่ต้องการ ผลต่างก็คือความผิดพลาดของพารามิเตอร์ จากนั้นนำเวคเตอร์ความผิดพลาดนี้ไปคูณกับผลกลับของจาโคเบียนรูปภาพ สิ่งที่ได้คือทิศทางในการปรับตำแหน่งแขนกลเพื่อให้ความผิดพลาดของพารามิเตอร์รูปภาพมีค่าลดลง เมื่อนำทิศทางนี้ไปคูณกับช่วงของก้าว

เดิน k ก็จะได้ขนาดในการปรับตำแหน่งแขนกล เมื่อปรับแขนกลตามขนาดที่คำนวณได้นี้ จะทำให้พารามิเตอร์รูปภาพมีค่าเข้าใกล้พารามิเตอร์ที่ต้องการมากขึ้น เมื่อทำซ้ำวงรอบนี้ไปเรื่อยๆ แขนกลจะเคลื่อนเข้าสู่เป้าหมาย อย่างไรก็ตาม วงรอบนี้ต้องอาศัยจาโคเบียนรูปภาพที่แม่นยำ

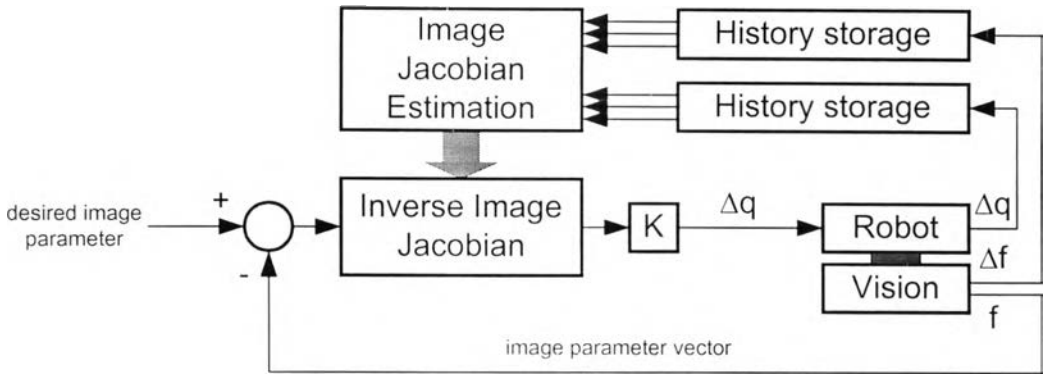
ในวิธีการที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้ประมาณจาโคเบียนรูปภาพจากการสังเกตการเปลี่ยนตำแหน่งข้อต่อแขนกลและการเปลี่ยนพารามิเตอร์รูปภาพ กล่าวคือเมื่อสั่งการให้แขนกลเคลื่อนที่ไประยะทาง $\Delta q'$ ผลปรากฏว่าแขนกลเคลื่อนที่ไปจริง Δq ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากความไม่สมบูรณ์ของตัวควบคุมแขนกล การเคลื่อนที่ข้อต่อแขนกล Δq จะเป็นผลทำให้พารามิเตอร์รูปภาพเปลี่ยนไปเท่ากับ Δf เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของตัวแปรทั้งสองนี้ในจำนวนจุดเวลาเท่ากับความอิสระของระบบ ก็จะสามารถประมาณจาโคเบียนรูปภาพ ณ ตำแหน่งที่พิจารณาได้ ให้สังเกตว่าจาโคเบียนรูปภาพมีพฤติกรรมไม่เชิงเส้น และมีค่าเปลี่ยนแปรตามตำแหน่งของแขนกล ถ้าต้องการจาโคเบียนรูปภาพที่มีค่าแม่นยำ ก็จะต้องประมาณจาโคเบียนรูปภาพขึ้นจากความสัมพันธ์ ณ ตำแหน่งแขนกลที่อยู่ใกล้กัน นั่นก็คือช่วงของก้าวเดินต้องมีขนาดเล็กมากพอ

เมื่อพิจารณาถึงวิธีการควบคุม พบว่าแม้ว่าตัวควบคุมตำแหน่งแขนกลจะทำงานไม่สมบูรณ์ กล่าวคือไม่สามารถควบคุมแขนกลให้เคลื่อนที่ไปในตำแหน่งที่ต้องการโดยไม่มีความผิดพลาด ก็ยังสามารถประมาณจาโคเบียนรูปภาพได้อย่างแม่นยำ ทั้งนี้เพราะได้ใช้ข้อมูลตำแหน่งแขนกลที่เคลื่อนไปจริงในการประมาณ หลักการนี้ เป็นผลทำให้ระบบควบคุมสามารถทำงานได้ดีแม้ว่าตัวควบคุมตำแหน่งแขนกลจะไม่สมบูรณ์

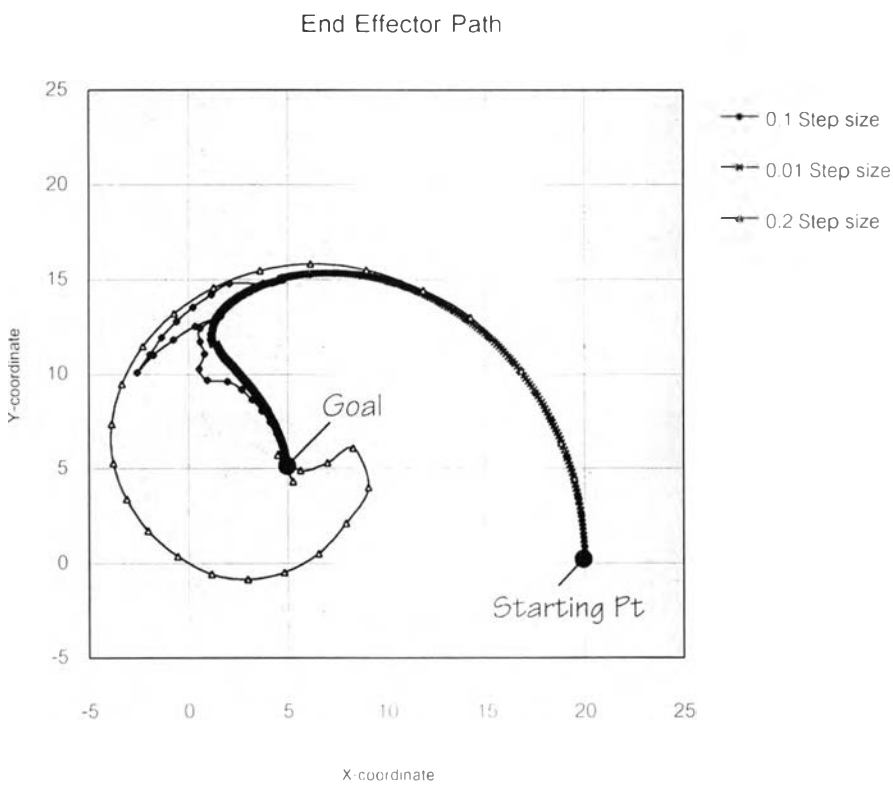


รูปที่ 4.1 ลักษณะของแขนกลที่ใช้ในการศึกษา

ในการจำลองระบบ กำหนดให้วัตถุอยู่ในตำแหน่ง (5,5) และแขนกลมีความยาว L_1 และ L_2 เท่ากับ 10 และตำแหน่งเริ่มต้นของแขนกล คือ θ_1 และ θ_2 เท่ากับศูนย์



รูปที่ 4.2 ผังการทำงานควบคุมแขนกลด้วยระบบกล้องดิจิตัล

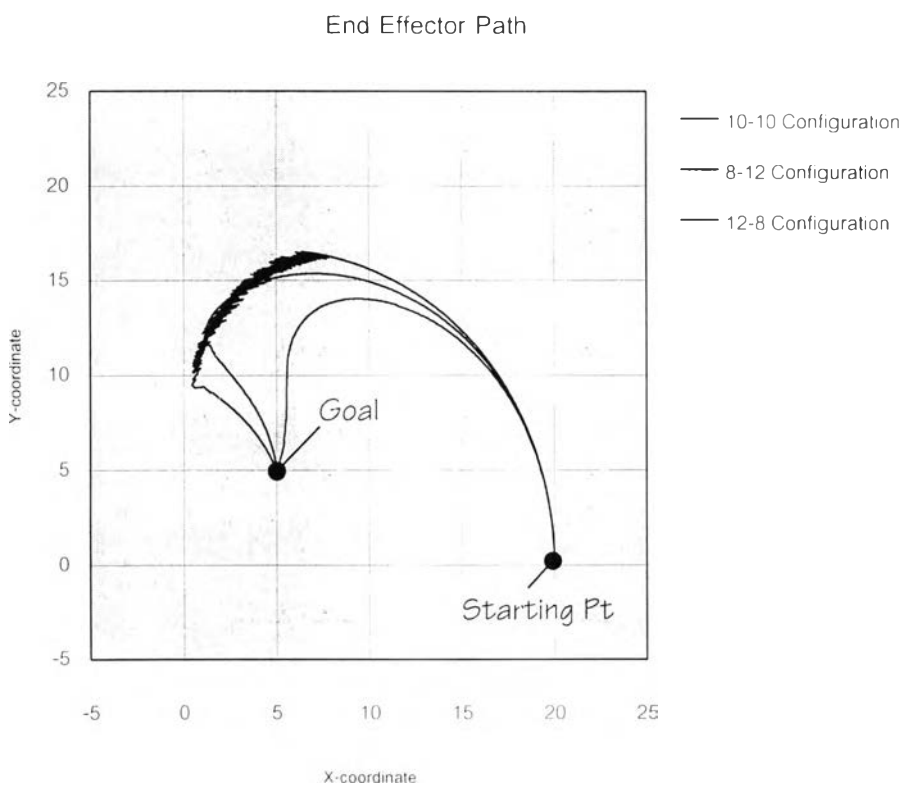


รูปที่ 4.3 ผลของช่วงของก้าวเดินที่มีผลต่อทางเดินของปลายแขนกล

เมื่อทำการจำลองระบบแขนกลโดยใช้โปรแกรม MatLAB® (แสดงรายละเอียดในภาคผนวก) และทำการศึกษาถึงทางเดินของปลายแขนกล เมื่อช่วงของก้าวเดินมีค่า 0.01, 0.1 และ 0.2 ได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 4.3 ที่ช่วงของก้าวเดินเท่ากับ 0.01 พบว่า ใช้จำนวนครั้งในการก้าวมากที่สุดคือ 314 ก้าวเดิน แต่ให้ทางเดินที่ค่อนข้างเรียบ เมื่อช่วงของก้าวเดินมีค่ามากขึ้นเป็น 0.1 และ 0.2 จำนวนครั้งที่ใช้ในการก้าวจะลดลงเป็น 42 และ 27 ตามลำดับ แต่ก็จะเป็นผลทำให้

เสถียรภาพของการควบคุมลดลงด้วย โดยสังเกตจากที่ปลายแขนจะเริ่มเดินอ้อมจุดเป้าหมาย และเกิดการเคลื่อนที่กลับไป-มาบริเวณจุดเป้าหมาย

เมื่อนำระบบควบคุมที่มีช่วงของก้าวเดินเท่ากับ 0.01 ไปใช้กับแขนกลที่มีความยาวเปลี่ยนไป โดยในการศึกษานี้ได้ทำการจำลองให้แขนกลชุดที่ 1 มีความยาว L_1 และ L_2 เท่ากับ 10 ชุดที่ 2 มีความยาว L_1 และ L_2 เท่ากับ 8 และ 12 ตามลำดับ และชุดที่ 3 มีความยาว L_1 และ L_2 เท่ากับ 12 และ 8 ตามลำดับ พบว่าตัวควบคุมตัวเดียวกันนี้ สามารถใช้ได้กับแขนกลทั้ง 3 ชุด หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือการควบคุมในลักษณะนี้ ไม่จำเป็นต้องมีการปรับเทียบพารามิเตอร์ต่างๆ และเมื่อพิจารณาลงไปถึงรายละเอียดของสมการที่ใช้ในการควบคุม จะพบว่าตัวควบคุมไม่มีข้อมูลของลักษณะแขนกลที่มันควบคุมอยู่เลย อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาถึงทางเดินที่เกิดขึ้นสำหรับแขนกลทั้ง 3 ชุด พบว่า แขนกลชุดที่ 3 มีทางเดินที่ไม่เรียบ แม้ว่าท้ายสุดจะนำปลายแขนเข้าสู่จุดเป้าหมายได้ก็ตาม ดังแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ผลของค่าความยาวของแขนที่มีผลต่อการควบคุม

ระบบควบคุมแขนกลด้วยกล้องดิจิตัลโดยทั่วไปจะมีความสลับซับซ้อนและมาพารามิเตอร์ต่างๆ เกี่ยวข้องมากมาย ดังนั้นวิธีการควบคุมควรจะมีโครงสร้างที่ง่ายและสามารถจัดการการพารามิเตอร์มากๆ ได้โดยธรรมชาติ วิธีการที่นาเสนอในงานวิจัยนี้มีโครงสร้างที่ค่อนข้าง

ง่าย ใช้งานได้ง่าย และไม่จำเป็นต้องปรับเทียบพารามิเตอร์ก่อนใช้งาน และสามารถใช้งานได้กับแขนกลหลายชนิด

4.6.2 สรุปผลการทดลอง

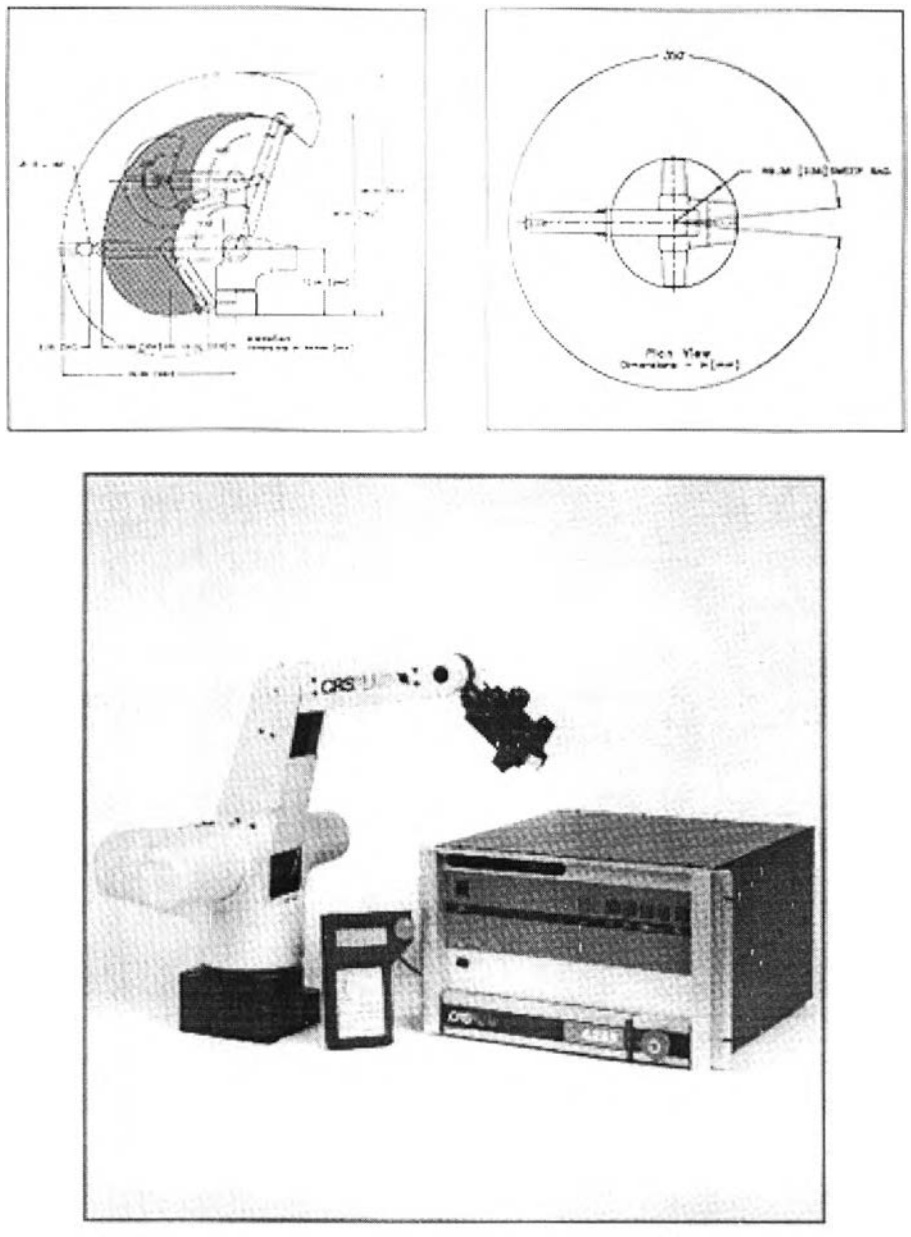
จากผลการทดลองนี้ สรุปได้ว่าการควบคุมพารามิเตอร์รูปภาพโดยการประมาณจาโคเบียนรูปภาพนี้มีความสัมพันธ์กับการปรับเทียบแขนกลน้อยมาก และสมการที่ใช้ในการควบคุมก็ไม่มีข้อมูลของแขนกลอยู่เลย ซึ่งเหตุผลนี้เป็นจุดเด่นของการควบคุมแบบนี้ และทำให้สามารถใช้ตัวควบคุมตัวเดียวกันกับแขนกลแบบต่างๆ ได้ โครงสร้างของตัวควบคุมมีลักษณะค่อนข้างง่าย อย่างไรก็ตาม การควบคุมในลักษณะนี้มีจุดอ่อนตรงที่ไม่อาจรับประกันเสถียรภาพได้

4.7 การทดลองกับปัญหาที่มีความอิสระเท่ากับสอง

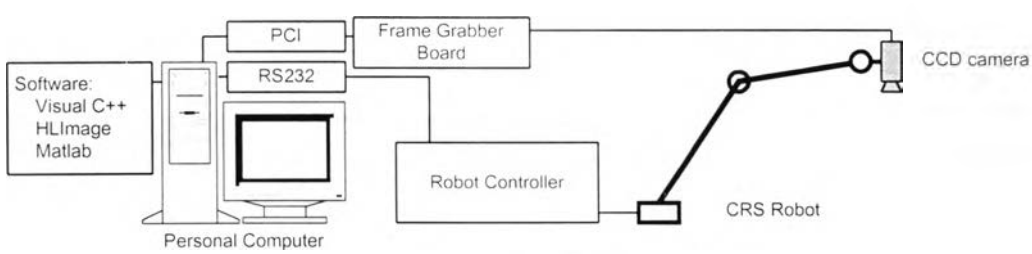
4.7.1 การทดลองและผลลัพธ์

การทดลองนี้ใช้ตัวควบคุมเดียวกันกับที่ใช้ในการจำลองกับแขนกล SCARA ที่ได้อธิบายมา แต่นำมาทดลองกับหุ่นยนต์อุตสาหกรรมของบริษัท CRS Robotic Inc รุ่น A255 (รูปที่ 4.5) ซึ่งเป็นแขนกลเป็น Articulated ที่มี 5 ข้อต่อ และมีความอิสระเท่ากับ 5 ซึ่งจะทำการขับเคลื่อนโดยใช้ระบบกล้องดิจิตัลกับสองข้อต่อแรก และยึดแน่นข้อต่อที่เหลือ ทั้งนี้เพื่อให้เป้าหมายมีความอิสระเท่ากัน ให้สังเกตุว่าหุ่นยนต์ในการทดลองนี้มีลักษณะแตกต่างกับแขนกลที่ใช้ในการจำลอง และพารามิเตอร์ต่างๆ ของแขนกลและของกล้องก็มีความแตกต่างกัน แต่จะใช้ตัวควบคุมตัวเดียวกัน ซึ่งน่าจะทำงานได้เพราะภายในโครงสร้างของตัวควบคุมไม่ได้มีพารามิเตอร์ของระบบอยู่ภายใน

สำหรับเครื่องมืออุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง ได้ติดตั้งกล้องดิจิตัลไว้ที่ปลายแขนของหุ่นยนต์ ข้อมูลรูปภาพจากกล้องจะส่งเข้าเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลผ่านทางการ์ดบันทึกภาพ DT3155 ที่ติดตั้งบน PCI bus และเครื่องคอมพิวเตอร์จะสั่งการเคลื่อนที่ข้อต่อหุ่นยนต์ไปที่ชุดควบคุมหุ่นยนต์ผ่านทางช่องอนุกรม (RS232) การเชื่อมต่ออุปกรณ์จะมีลักษณะดังรูปที่ 4.6 โปรแกรมการควบคุมเขียนขึ้นจากภาษา Visual C++ โดยเชื่อมการทำงานกับโปรแกรม HLImage เพื่อประมวลผลรูปภาพ และเชื่อมการทำงานกับ MatLAB® เพื่อคำนวณทางคณิตศาสตร์ เมื่อพิจารณาถึงลักษณะวิธีการที่ใช้ในการควบคุมจะพบว่า ระบบควบคุมที่พัฒนาขึ้นทำงานอยู่บนชุดควบคุมของหุ่นยนต์ การควบคุมลักษณะนี้ใช้ประโยชน์จากชุดควบคุมหุ่นยนต์อย่างเต็มที่ ทำให้ระบบโดยรวมมีราคาไม่แพงมากนัก และคาดว่าจะมีความเป็นไปได้สูงที่จะพัฒนาการควบคุมขับแขนกลด้วยระบบกล้องดิจิตัลให้เกิดขึ้นในภาคอุตสาหกรรม



รูปที่ 4.5 หุ่นยนต์จากบริษัท CRS Robotic Inc พร้อมชุดควบคุม



รูปที่ 4.6 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

ในการทดลอง เป้าหมายของการควบคุมคือขับเคลื่อนแขนกลให้กล้องดิจิตัลมองเห็นวัตถุอยู่กลางภาพ หรืออีกนัยหนึ่งก็คือตำแหน่งจุดศูนย์กลางของวัตถุในรูปภาพ (Image

Coordinate; (u,v)) อยู่ที่ (0,0) โดยตอนต้นจะแสดงถึงขั้นตอนในการประมาณหาจาโคเบียนรูปภาพจากการเคลื่อนที่ เริ่มต้นวัตถุปรากฏอยู่ที่มุมด้านล่างซ้าย (ตำแหน่ง u และ v เท่ากับ -162 177 ตามลำดับ) การควบคุมเริ่มจากการเคลื่อนข้อต่อแรกเท่ากับ 0.005 องศาในก้าวแรก และเคลื่อนข้อต่อที่สองเท่ากับ 0.005 องศาในก้าวที่สอง การเคลื่อนแขนกลทำให้พารามิเตอร์รูปภาพมีค่าเปลี่ยนไปเป็น (-157, 164) ในก้าวเดินแรก และ (-149, 162) ในก้าวที่สอง จากข้อมูลการเคลื่อนที่นี้ สามารถนำไปสร้าง DQ และ DF ได้ดังนี้

$$DQ = \begin{bmatrix} 0 & 0.005 \\ 0.005 & 0 \end{bmatrix} \quad DF = \begin{bmatrix} 8 & 5 \\ -2 & -13 \end{bmatrix}$$

ซึ่งสามารถนำไปประมาณหาจาโคเบียนรูปภาพจาก $\hat{J}_q = DF \cdot DQ^{-1}$ ได้เท่ากับ

$$\hat{J}_q = DF \cdot DQ^{-1} = \begin{bmatrix} 1000 & 1600 \\ -2600 & -400 \end{bmatrix}$$

ณ จุดนี้ พารามิเตอร์รูปภาพมีความผิดพลาดเท่ากับ (-149, 162) และสามารถหาขนาดในการปรับข้อต่อได้จาก $\Delta\bar{q} = k \cdot J_q^{-1} \Delta\bar{f}$ โดยที่ k เท่ากับ 0.025 ดังนี้

$$\Delta\bar{a} = J_q^{-1} \Delta\bar{f} \qquad \Delta\bar{q} = 0.025 * \frac{\Delta\bar{a}}{|\Delta\bar{a}|}$$

$$\Delta\bar{q} = \begin{bmatrix} 0.016574 \\ 0.018716 \end{bmatrix}$$

จากสมการดังกล่าวนี้ สามารถคำนวณหาการปรับข้อต่อแรกและข้อต่อที่สองได้เท่ากับ 0.016574 และ 0.018716 ตามลำดับ เมื่อปรับข้อต่อตามนี้ พบว่าพารามิเตอร์รูปภาพเปลี่ยนไปเป็น (-103, 115) ซึ่งเป็นผลให้ DQ และ DF เปลี่ยนไปเป็น

$$DQ = \begin{bmatrix} 0.016574 & 0 \\ 0.018716 & 0.005 \end{bmatrix} \quad DF = \begin{bmatrix} 46 & 8 \\ -47 & -2 \end{bmatrix}$$

ซึ่งสามารถนำไปประมาณหาจาโคเบียนรูปภาพจาก $\hat{J}_q = DF \cdot DQ^{-1}$ ได้เท่ากับ

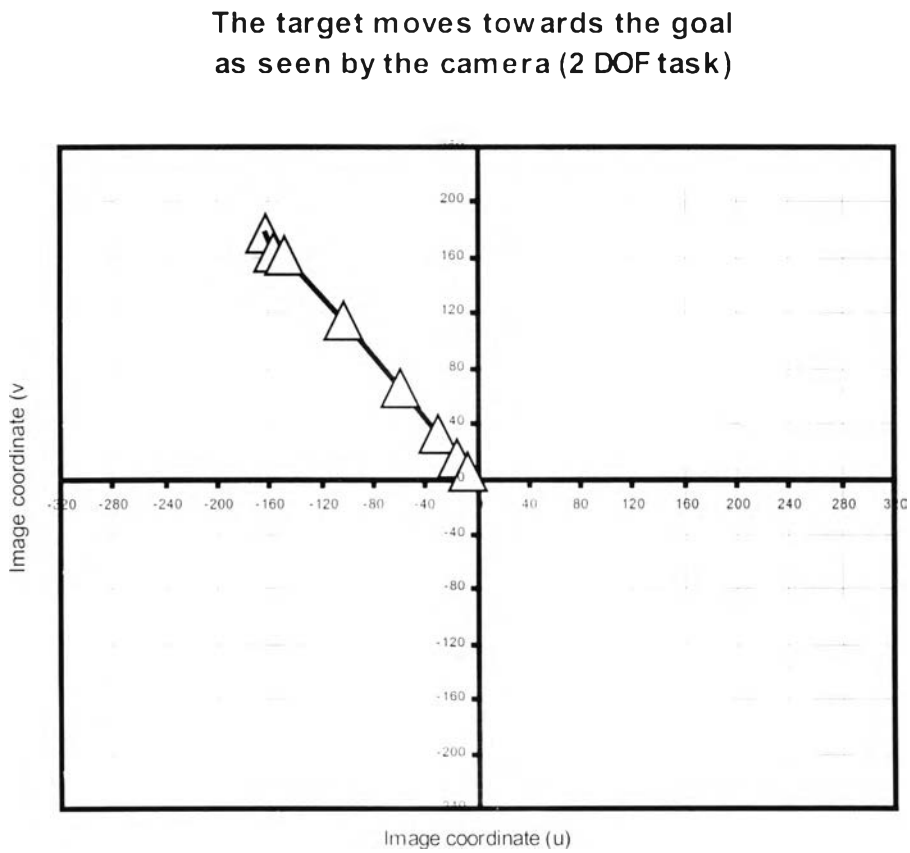
$$\hat{J}_q = DF \cdot DQ^{-1} = \begin{bmatrix} 969 & 1600 \\ -2384 & -400 \end{bmatrix}$$

ณ จุดนี้ พารามิเตอร์รูปภาพมีความผิดพลาดเท่ากับ (-103, 115) และสามารถหาขนาดในการปรับข้อต่อได้จาก $\Delta\vec{q} = k \cdot J_q^{-1} \Delta\vec{f}$ โดยที่ k เท่ากับ 0.025 ดังนี้

$$\Delta\vec{a} = J_q^{-1} \Delta\vec{f} \qquad \Delta\vec{q} = 0.025 * \frac{\Delta\vec{a}}{|\Delta\vec{a}|}$$

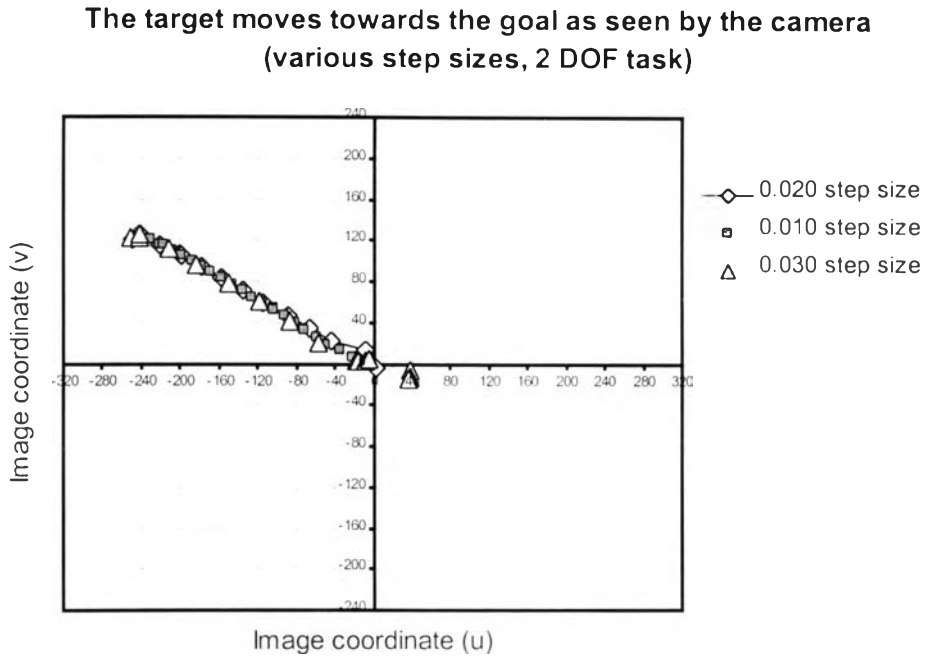
$$\Delta\vec{q} = \begin{bmatrix} 0.018042 \\ 0.017306 \end{bmatrix}$$

จากสมการดังกล่าวนี้ สามารถคำนวณหาการปรับข้อต่อแรกและข้อต่อที่สองได้เท่ากับ 0.018042 และ 0.017306 ตามลำดับ เมื่อปรับข้อต่อตามนี้ พบว่าพารามิเตอร์รูปภาพเปลี่ยนไปเป็น (-60, 65) จะเห็นว่าการปรับข้อต่อตามวิธีการที่นำเสนอจะลดความผิดพลาดของพารามิเตอร์รูปภาพลงจาก (-149, 162) เป็น (-103, 115) และเป็น (-60, 65) ตามลำดับ เมื่อทำขบวนการนี้ซ้ำไปเรื่อยๆ แขนกลก็จะลู่เข้าสู่เป้าหมายดังแสดงในรูปที่ 4.7 รายละเอียดการคำนวณสำหรับก้าวเดินอื่นๆ แสดงอยู่ในภาคผนวก

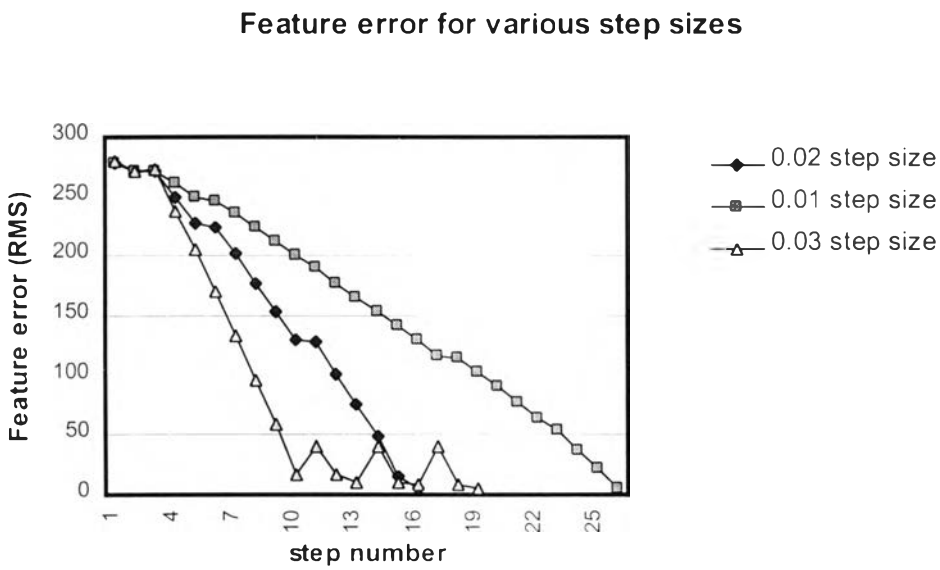


รูปที่ 4.7 การลู่เข้าของพารามิเตอร์ควบคุม

เมื่อศึกษาทดลองตัวควบคุมโดยใช้ช่วงของก้าวเดินเท่ากับ 0.01, 0.02 และ 0.03 โดยมีเป้าหมายเหมือนเดิม คือควบคุมให้จุดศูนย์กลางวัตถุปรากฏอยู่กลางภาพ

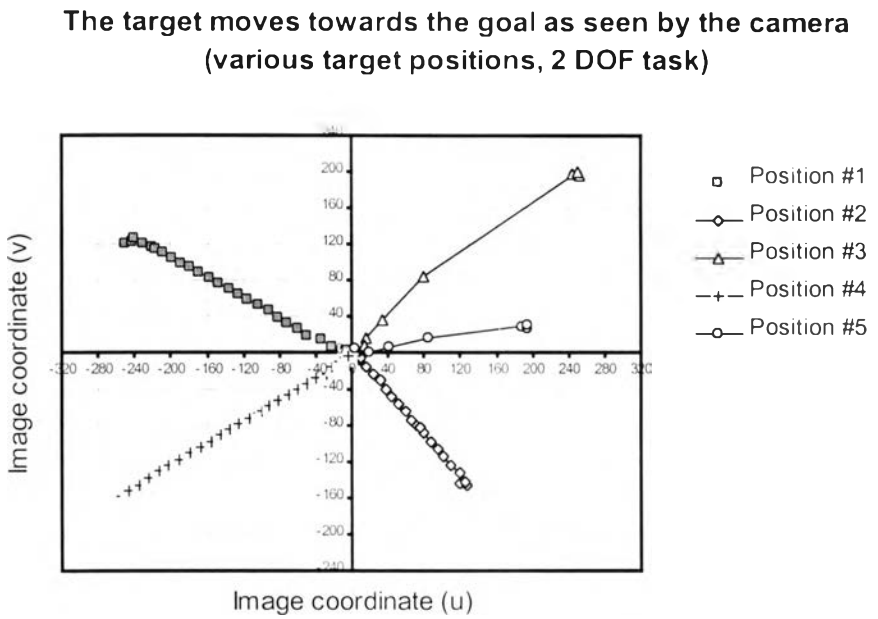


รูปที่ 4.8 ผลของช่วงก้าวเดินต่อสมรรถนะการควบคุม



รูปที่ 4.9 ผลของช่วงก้าวเดินต่อสมรรถนะการควบคุมในรูปของ RMSE

ผลลัพธ์ที่ได้ในรูปที่ 4.8 แสดงการเคลื่อนที่ของวัตถุจากมุมซ้ายบนเข้าสู่ตำแหน่งกึ่งกลางภาพ หรือเข้าสู่เป้าหมายได้ตามต้องการ (รายละเอียดของผลลัพธ์แสดงอยู่ในภาพผนวก) ทางเดินมีลักษณะตรงเข้าสู่เป้าหมาย ทั้งนี้เพราะใช้จาโคเบียนรูปภาพเพื่อหาทิศทางในการปรับตำแหน่งข้อต่อแขนกล ทิศทางนี้จะเป็นทิศที่มีความลาดชันมากที่สุด (Steepest Gradient) เมื่อพิจารณาผลลัพธ์พบว่า เมื่อช่วงก้าวเดินมีค่าเท่ากับ 0.03 (มาก) แขนกลจะเคลื่อนที่เร็ว แต่เกิดการเคลื่อนที่กลับไปมารอบจุดเป้าหมายดังแสดงในรูปที่ 4.8 และ รูปที่ 4.9 เมื่อช่วงก้าวเดินมีค่าลดลงเป็น 0.02 และ 0.01 ระบบควบคุมจะใช้จำนวนก้าวเดินที่มากขึ้นเป็นลำดับ แต่ทางเดินมีลักษณะเรียบขึ้น



รูปที่ 4.10 สมรรถนะการควบคุมเมื่อเป้าหมายอยู่ในตำแหน่งต่างๆ กัน

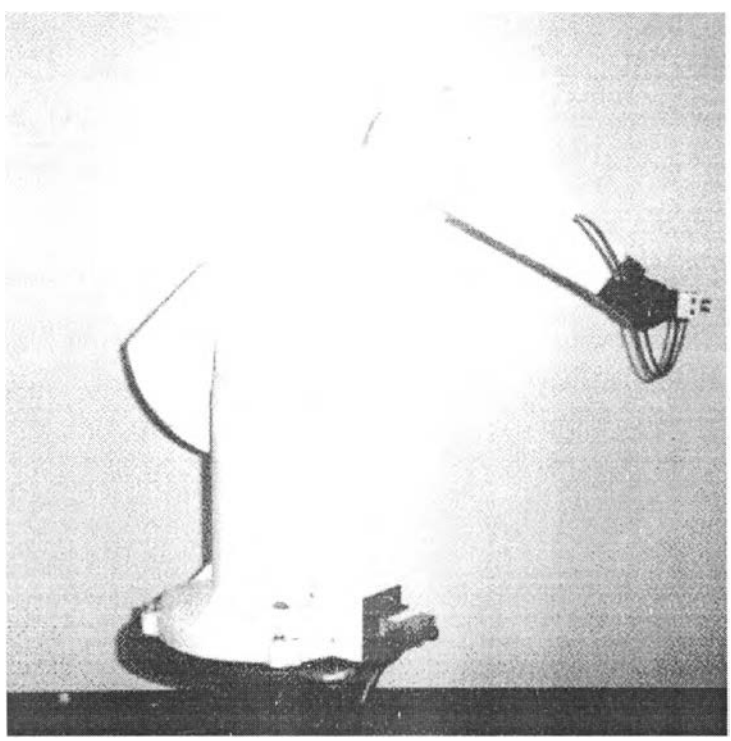
เมื่อศึกษาถึงสมรรถนะของการควบคุมเมื่อวัตถุเป็นหมายอยู่ในตำแหน่งต่างๆ กัน โดยใช้ช่วงก้าวเดินเท่ากับ 0.01 พบว่าการควบคุมบรรลุตามเป้าหมายในทุกกรณีดังแสดงในรูปที่ 4.10 กล่าวคือวัตถุจะเคลื่อนที่ตรงเข้าสู่กลางภาพ ทางเดินมีลักษณะเป็นเส้นตรง อนึ่ง เมื่อสังเกตกรณีที่วัตถุอยู่ในตำแหน่งขวาบนในตอนเริ่มต้น พบว่าการควบคุมใช้จำนวนก้าวเดินน้อยกว่ากรณีอื่นอย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้เป็นเพราะหุ่นยนต์มีลักษณะความไม่เชิงเส้นอยู่มาก การเคลื่อนข้อต่อแขนกลไปข้างหน้าและกลับหลังมีความไวต่อพารามิเตอร์รูปภาพไม่เท่ากัน อย่างไรก็ตาม ระบบควบคุมที่นำเสนอมีเสถียรภาพเพียงพอ และสามารถจัดการให้บรรลุเป้าหมายได้ทุกกรณีที่ทดลอง

4.7.2 สรุปผลการทดลอง

ผลการทดสอบตัวควบคุมที่นำเสนอกับหุ่นยนต์อุตสาหกรรมจริงแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในทางปฏิบัติที่จะทำการขับเคลื่อนหุ่นยนต์ด้วยระบบกล้องดิจิตัล ตัวควบคุมสามารถทำงานได้ดีเมื่อช่วงก้าวเดินมีค่าที่เหมาะสม และสามารถบรรลุเป้าหมายได้ทุกตำแหน่งของวัตถุ ทางเดินของพารามิเตอร์ควบคุมจะมีลักษณะตรงเข้าสู่เป้าหมาย โครงสร้างของการควบคุมเป็นแบบเดียวกันกับที่ใช้ในการจำลองก่อนหน้านี้ จะเห็นว่าวิธีการควบคุมพารามิเตอร์รูปภาพโดยการประมาณค่าจาโคเบียนรูปภาพสามารถทำงานได้แม้ว่าหุ่นยนต์จะมีลักษณะที่ต่างกัน และด้วยโครงสร้างที่ง่าย ทำให้สามารถจัดการกับความสลับซับซ้อนต่างๆ ของระบบหุ่นยนต์และระบบกล้องดิจิตัลได้ดี

4.8 การจำลองควบคุมขับแขนกลกับปัญหาที่มีความอิสระเท่ากับสาม

4.8.1 การทดลองและผลลัพธ์



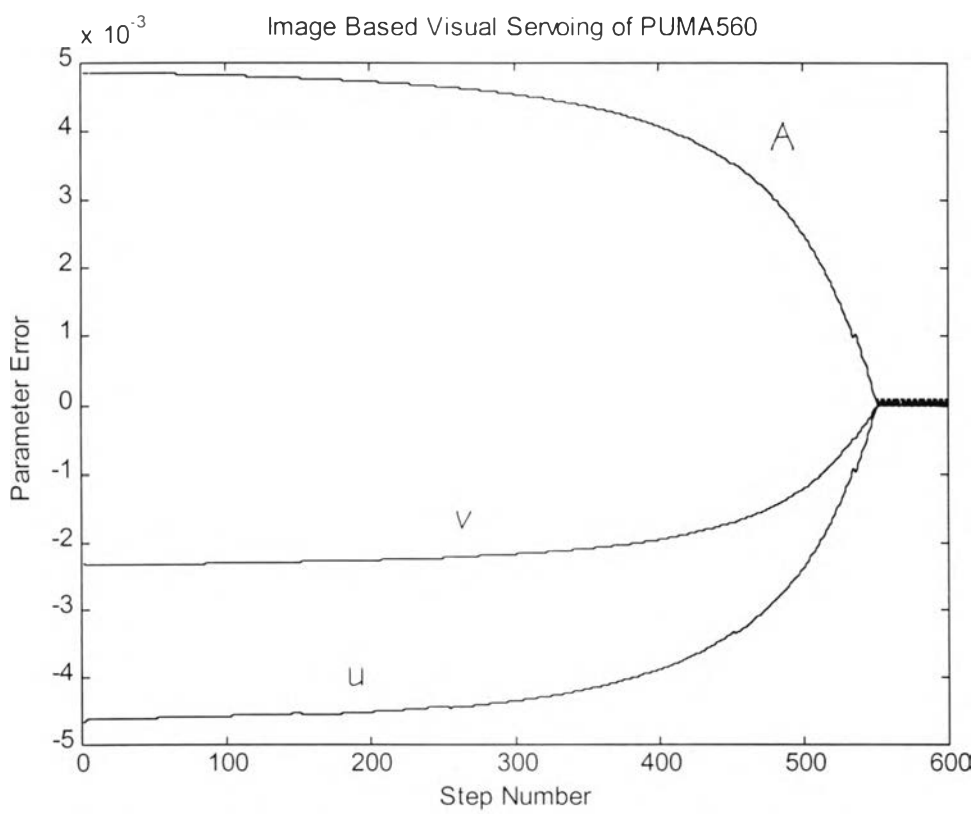
รูปที่ 4.11 หุ่นยนต์ PUMA 560

ในการทดลองนี้ ได้จำลองการขับเคลื่อนแขนกลด้วยระบบกล้องดิจิตัลกับแขนกลสองตัว ตัวแรกคือแขนกล PUMA 560 ซึ่งเป็นแขนกลแบบ Articulated ที่มีความอิสระเท่ากับหกดัง แสดงในรูปที่ 4.11 แขนกลลักษณะนี้ปลายแขนจะสามารถเข้าถึงชิ้นงานจากทิศทางใดๆ ก็ได้ ในการศึกษานี้ ได้จำลองการขับเคลื่อนแขนกลด้วยระบบกล้องดิจิตัล โดยติดกล้องดิจิตัลที่ปลาย

แขนและทำการขับ 3 ข้อต่อแรก ส่วน 3 ข้อต่อหลังซึ่งเป็นข้อมือหุ่นจะควบคุมให้ปลายแขนกลมีทิศทางคงที่ กล่าวคือกล้องจะมองลงมาที่พื้นตลอดเวลา การควบคุมดังกล่าวนี้ จะทำให้ปลายแขนเคลื่อนที่ในห้วงอวกาศ 3 มิติโดยมีมุมปลายแขนคงที่ เป้าหมายของการควบคุมจะมีความอิสระเท่ากับ 3 กล่าวคือควบคุมให้วัตถุอยู่กลางภาพ และให้มีขนาดตามที่กำหนด หรืออีกนัยหนึ่งคือพารามิเตอร์รูปภาพประกอบด้วย ตำแหน่งในแนวนอน (u) และแนวดิ่ง (v) ของจุดศูนย์กลางของวัตถุในรูปภาพและขนาดของวัตถุในรูปภาพ (A)

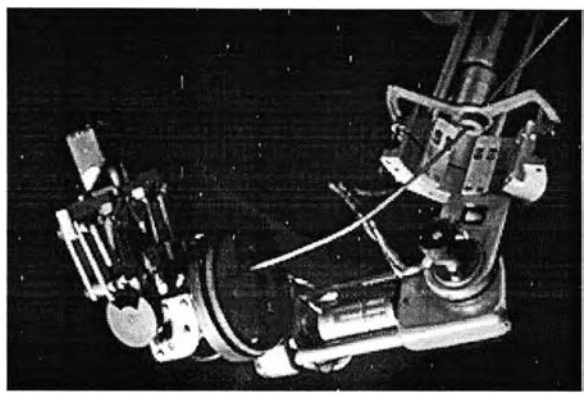
เมื่อจำลองการควบคุมกับหุ่นยนต์ PUMA 560 โดยมีช่วงความยาวก้าวเดินเท่ากับ 0.0025 เป้าหมายคือควบคุมให้หุ่นยนต์มองเห็นชิ้นงานอยู่กลางรูปภาพและมีขนาดตามที่กำหนด ผลลัพธ์การควบคุมเป็นไปตามรูปที่ 4.12 โปรแกรมภาษา MatLAB® สำหรับการทดลองนี้แสดงอยู่ในภาพผนวก อนึ่ง ตัวควบคุมจะใช้หลักการเดียวกันกับที่ได้กล่าวมาในสองการทดลองก่อน โดยพัฒนาให้ทำงานกับปัญหาที่มีความอิสระเท่ากับ 3 โดยที่จาโคเบียนรูปภาพจะแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่ของข้อต่อแขนกล 3 ข้อต่อแรก กับพารามิเตอร์รูปภาพทั้งสาม

ผลลัพธ์การจำลองแสดงถึงศักยภาพของวิธีการควบคุมแบบนี้ซึ่งสามารถควบคุมพารามิเตอร์รูปภาพได้แม้ว่าพารามิเตอร์รูปภาพทั้งสามตัวจะมีความไวแตกต่างกัน



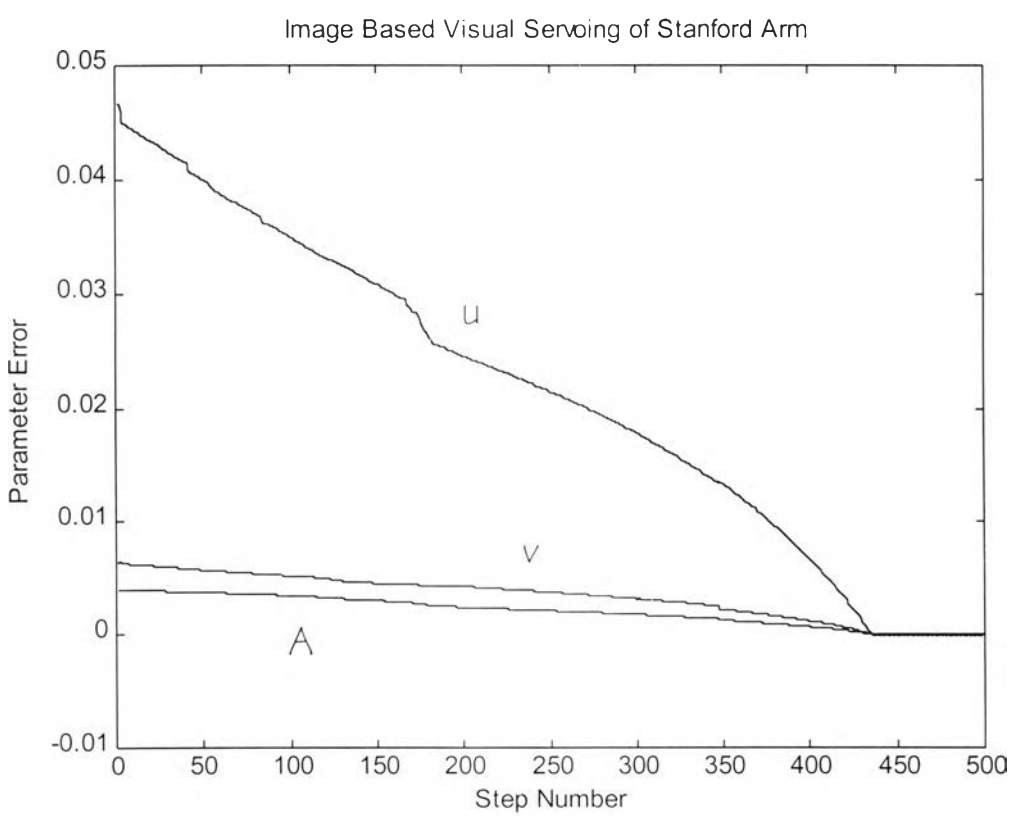
รูปที่ 4.12 ผลลัพธ์การควบคุมพารามิเตอร์รูปภาพกับหุ่นยนต์ PUMA 560

จากนั้น ได้นำตัวควบคุมเดียวกันมาลองควบคุมหุ่นยนต์ Stanford Arm ซึ่งเป็นแขนกลที่มีลักษณะตามรูปที่ 4.13 เช่นเดียวกัน การควบคุมจะควบคุมเฉพาะสามข้อต่อแรกเท่านั้น โดยมีเป้าหมายเหมือนเดิม กล่าวคือควบคุมให้หุ่นยนต์มองเห็นวัตถุอยู่กลางรูปภาพและมีขนาดตามที่กำหนด ผลลัพธ์ที่ได้เป็นไปตามรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.13 แขนกล Stanford Arm

ผลลัพธ์การจำลองแสดงย้ำถึงความสามารถของวิธีการ ซึ่งสามารถควบคุมพารามิเตอร์รูปภาพได้ไม่ว่าแขนกลจะเป็นแบบใดก็ตาม การประมาณค่าจาโคเบียนทำให้วิธีการนี้ใช้งานได้กับหุ่นยนต์หลายชนิดโดยไม่ต้องทำการปรับแต่งตัวควบคุมเลย



รูปที่ 4.14 ผลลัพธ์การควบคุมพารามิเตอร์รูปภาพกับแขนกล Stanford Arm

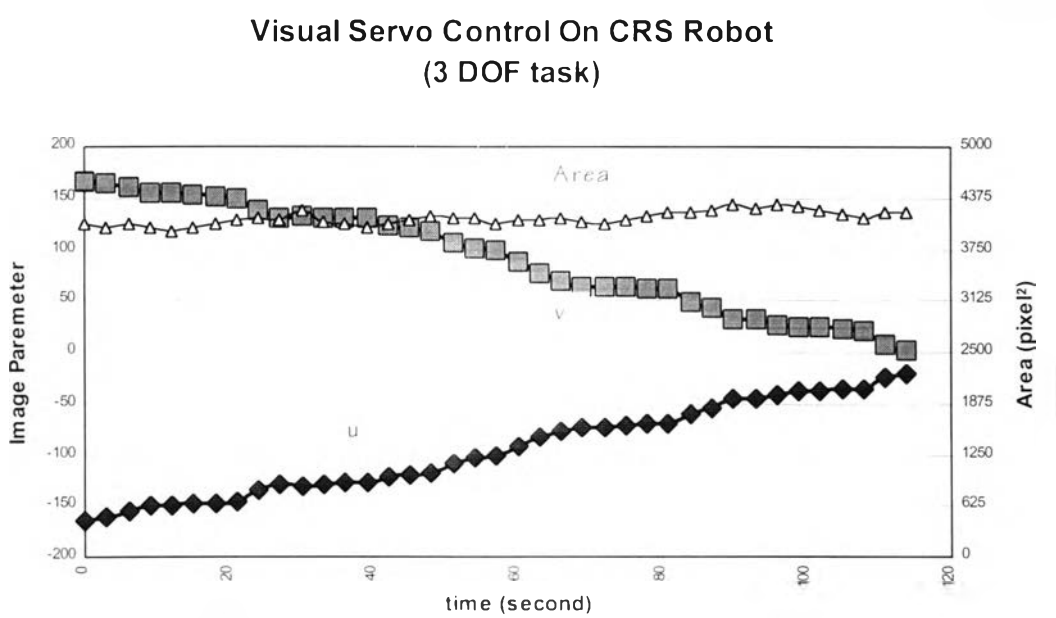
4.8.2 สรุปผลการทดลอง

การจำลองควบคุมนี้แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการควบคุมหุ่นยนต์ด้วยกล้องดิจิตัลแบบประมาณค่าจาโคเบียนรูปภาพจากการเคลื่อนที่ ซึ่งมีโครงสร้างที่ง่ายและสามารถควบคุมพารามิเตอร์รูปภาพได้แม้ว่าจำนวนพารามิเตอร์ควบคุมจะเพิ่มขึ้น และที่สำคัญก็คือพารามิเตอร์ต่างๆ ในการจำลองมีความไวต่อการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ไม่เท่ากัน การจำลองยังแสดงถึงความยืดหยุ่นต่อพารามิเตอร์หุ่นยนต์ต่างๆ ซึ่งจะเห็นได้จากการที่ใช้ตัวควบคุมตัวเดียวกันกับหุ่นยนต์สองแบบ ผลลัพธ์ก็คือก็คือตัวควบคุมสามารถนำหุ่นยนต์เคลื่อนที่เข้าสู่เป้าหมายได้

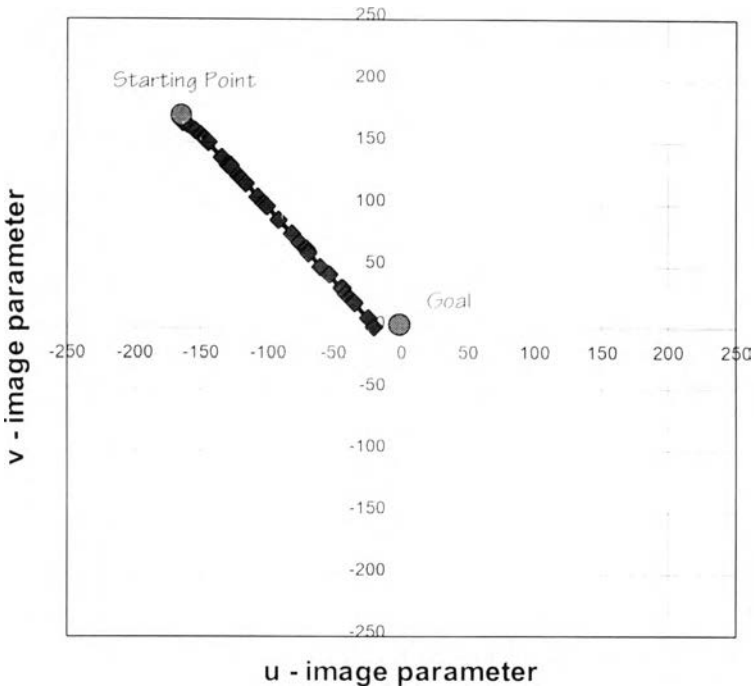
4.9 การทดลองกับปัญหาที่มีความอิสระเท่ากับสาม

4.9.1 การทดลองและผลลัพธ์

การทดลองนี้ ได้ทดลองควบคุมพารามิเตอร์รูปภาพสามตัวกับหุ่นยนต์อุตสาหกรรมของบริษัท CRS Robotic Inc รุ่น A255 วัตถุประสงค์ก็เพื่อแสดงถึงประสิทธิภาพของวิธีควบคุมแบบประมาณค่าจาโคเบียนรูปภาพกับกรณีที่พารามิเตอร์แต่ละตัวมีความไวต่อการเคลื่อนที่ไม่เท่ากัน พารามิเตอร์ทั้งสามในการควบคุมคือตำแหน่งในแนวนอน (u) และแนวดิ่ง (v) ในรูปภาพรวมกับขนาดของวัตถุที่ปรากฏในรูปภาพ (A) กล่าวคือควบคุมให้หุ่นยนต์มองเห็นวัตถุอยู่กลางรูปภาพ และมีขนาดที่กำหนด (4000 จุดสี^{2}) จะเห็นว่าพารามิเตอร์ u และ v มีความไวต่อการเปลี่ยนตำแหน่งของแขนกลน้อยกว่าพารามิเตอร์ A มาก



รูปที่ 4.15 พารามิเตอร์รูปภาพในระหว่างที่ควบคุม



รูปที่ 4.16 ทางเดินของวัตถุในรูปภาพ

ในการทดลอง กำหนดให้ตำแหน่งเริ่มต้นของหุ่นยนต์มองเห็นวัตถุมีขนาดตามที่กำหนด แต่วัตถุไม่ได้อยู่กลางรูปภาพ และต้องการควบคุมให้วัตถุอยู่กลางรูปภาพในขณะเดียวกันก็รักษาขนาดของวัตถุที่ปรากฏในรูป เมื่อทดลองใช้ตัวควบคุมแบบประมาณค่าจาโคเบียนรูปภาพกับปัญหานี้ ผลลัพธ์ที่ได้เป็นไปตามรูปที่ 4.15 (รายละเอียดผลลัพธ์อยู่ในภาพผนวก) ซึ่งแสดงถึงความสามารถในการเคลื่อนหุ่นยนต์เข้าสู่เป้าหมาย โดยที่พารามิเตอร์รูปภาพ u และ v ลู่เข้าสู่ศูนย์หรือตำแหน่งกลางภาพ ในขณะที่สามารถรักษาขนาดหรือพารามิเตอร์รูปภาพ A ให้เท่ากับ 4000 จุดสี[2] ตลอดการเคลื่อนที่ และวัตถุมีลักษณะทางเดินเป็นเส้นตรงดังแสดงในรูปที่ 4.16 ในการทดลองใช้ความถี่ในการควบคุมประมาณ 3 วินาทีต่อหนึ่งก้าวเดิน

4.9.2 สรุปผลการทดลอง

การทดลองนี้แสดงถึงประสิทธิภาพการควบคุมพารามิเตอร์รูปภาพเมื่อเป้าหมายมีจำนวนความอิสระมากขึ้น ประกอบกับพารามิเตอร์แต่ละตัวมีความไวต่อการเปลี่ยนตำแหน่งหุ่นยนต์ไม่เท่ากัน ผลการทดลองแสดงถึงประสิทธิภาพการควบคุม ซึ่งสามารถนำหุ่นยนต์เข้าสู่เป้าหมายได้ตามต้องการ

4.10 สรุปและอภิปราย

บทนี้แสดงถึงศักยภาพของการควบคุมพารามิเตอร์รูปภาพแบบประมาณค่าจาโคเบียนรูปภาพ ผลการจำลองและทดลองกับหุ่นยนต์อุตสาหกรรมจริงแสดงถึงความยืดหยุ่นของตัวควบคุมซึ่งสามารถทำงานได้แม้ว่ารูปร่างของหุ่นยนต์จะแตกต่างกัน และ/หรือพารามิเตอร์ควบคุมมีความไวต่อการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์แตกต่างกัน โครงสร้างในการควบคุมมีลักษณะง่าย และสามารถใช้งานกับหุ่นยนต์ได้หลายประเภทโดยไม่ต้องปรับแต่งเพิ่มเติม การประมาณค่าจาโคเบียนรูปภาพทำให้สามารถนำไปใช้กับหุ่นยนต์อุตสาหกรรมจริงได้ง่าย ผู้ใช้ไม่จำเป็นต้องปรับเทียบพารามิเตอร์ก่อนใช้งาน วิธีการที่ใช้ในงานวิจัยนี้ยังสามารถใช้ร่วมกับชุดควบคุมหุ่นยนต์อุตสาหกรรมได้เนื่องจากมีพื้นฐานอยู่บนการควบคุมแบบตำแหน่ง