

แขนหุ่นยนต์เลียนแบบแขนคน Rubber muscle for humanoid arm

สาทิสส์ ทรงชน¹, สถาพร ลักษณะเจริญ²

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล และ สถาบันวิทยาการหุ่นยนต์ภาคสนาม

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

91 ถ.ประชาธิปไตย แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

โทร 0-2470-9286 Fax: 0-2470-9111 Email: songschon@fibo.kmutt.ac.th

²ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

1518 ถ.พิบูลสงคราม เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800

โทร 0-2913-2500 ต่อ 8308 Fax: 0-2586-9541 Email: STL@kmitnb.ac.th

บทคัดย่อ

แขนหุ่นยนต์เลียนแบบแขนคนได้รับการออกแบบการสร้างและขึ้นโดยใช้ตัวขับเคลื่อนแบบกล้ามเนื้อเทียม งานวิจัยและพัฒนาเริ่มจากการศึกษาระดับขั้นความเสถียรของแขนมนุษย์และขีดจำกัดในการเคลื่อนไหวของแต่ละข้อต่อเมื่อมีการเคลื่อนไหว กล้ามเนื้อเทียมที่นำมาใช้งานคือ MAS-10-N600-AA-MCFK ผลิตโดยบริษัท เฟสโต้ทำงานโดยใช้ความดันอากาศ 0-8 บาร์ แขนหุ่นยนต์สามารถเคลื่อนไหวได้โดยใช้การขับเคลื่อนแบบสองทิศทางคือการหดและคลายตัวของกล้ามเนื้อเทียมที่อยู่กับกลไกของท่อนแขนแต่ละส่วน การควบคุมความดันเพื่อการยืดหรือหดของกล้ามเนื้อนั้นทำได้โดยใช้วาล์วสัดส่วน (proportional valve) ส่วนของการวัดระยะเชิงมุมนั้นทำได้โดยออกแบบและติดตั้งตัวเข้ารหัสแบบดิจิทัล(digital encoder)ไว้ที่แต่ละระดับขั้นความเสถียรซึ่งมีอยู่ทั้งหมด 7 ระดับขั้น เพื่อเป็นสัญญาณป้อนกลับ หลังจากอุปกรณ์ทางกลได้ถูกประกอบเข้าเป็นระบบแขนหุ่นยนต์เลียนแบบแขนคนแล้ว เราจึงได้ออกแบบและสร้างระบบการควบคุมป้อนกลับแบบพีดี โดยใช้การเขียนโปรแกรมผ่าน LABVIEW PXI Module จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อเลือกเส้นทางการเคลื่อนที่(desired trajectory)เลียนแบบการเหวี่ยงแขนจากด้านล่าง แขนหุ่นยนต์เคลื่อนไหวในแต่ละข้อต่อมีค่าผิดพลาดจากค่ากำหนดอยู่ในช่วงไม่เกิน ± 1 องศา ซึ่งเป็นผลที่น่าสนใจมากสำหรับระบบตัวอย่างที่มีความไม่เชิงเส้นขั้นสูงอันนี้

คำหลัก แขนหุ่นยนต์เลียนแบบแขนคน, กล้ามเนื้อเทียม

Abstract

Rubber muscle humanoid arm are designed and constructed with rubber muscles as actuators. This work studied human arm

degrees of freedom and its joint limitation while moving. The rubber muscles used in this work is MAS-10-N600-AA-MCFK model manufactured by FESTO company. Working air pressure varies from 0-8 bars. This robot arm is able to move bidirectional which are flexion and extension installed at each joint. Pressure was controlled by proportional valve. The feedback signal was obtained by digital encoder at each joint. After the mechanical parts were assembled into humanoid arm, this work developed PD controller via Labview PXI module. The experimental results showed that the desired trajectory for robot arm movement within the error of ± 1 degree. This has shown very interesting results for this nonlinear system.

Keywords: humanoid arm , rubber muscle

1. บทนำ

งานทางด้านวิศวกรรมหุ่นยนต์ หรืองานวิจัยด้านแขนกลส่วนใหญ่ต้องใช้อุปกรณ์ขับเคลื่อนซึ่งโดยทั่วไปมักกล่าวถึงมอเตอร์ไฟฟ้าเป็นชุดขับเคลื่อนข้อต่อต่างๆ ซึ่งมักจะมีข้อจำกัดคือน้ำหนักของมอเตอร์ และแรงบิดที่ใช้ในการเคลื่อนไหวจะต้องแบกรับภาระน้ำหนักนั้นด้วย ทำให้อัตราส่วนของแรงบิดต่อน้ำหนักมีค่าต่ำเพราะมอเตอร์มีน้ำหนักสูง

ลักษณะเด่นของแขนหุ่นยนต์เลียนแบบแขนคน นี้ใช้กล้ามเนื้อเทียมเป็นชุดขับเคลื่อนซึ่งกล้ามเนื้อเทียมนี้มีน้ำหนักเบา ทำให้อัตราส่วนของแรงบิดต่อน้ำหนักมีค่าสูง น้ำหนักที่เบาลงนี้ยังช่วยให้แขนของหุ่นยนต์ตอบสนองได้รวดเร็วขึ้นกว่าการใช้มอเตอร์

ได้มีงานวิจัยที่ผ่านมาได้นำกล้ามเนื้อเทียมนี้มาเป็นตัวขับเคลื่อนของหุ่นยนต์ ดังเช่น งานวิจัยของ Cerda [6] ที่ได้ศึกษาถึงการควบคุมของ

ระบบควบคุมตำแหน่งแบบปรับตัว adaptive position control ของกล้ามเนื้อเทียม

งานวิจัยของ Noritsugu [7] ได้ปรับปรุงวิธีการควบคุมให้มีประสิทธิภาพดีขึ้นโดยใช้ electroreological fluid damper และงานวิจัยของ Colbrunn [4,5] ได้ออกแบบสร้างขาหุ่นยนต์โดยใช้กล้ามเนื้อเทียม

งานวิจัยก่อนหน้าของ Kenji และคณะ [1] ได้สร้างแบบจำลองของแขนหุ่นยนต์ที่ขับเคลื่อนด้วยกล้ามเนื้อเทียมและมีการควบคุมระยะไกล (remote control) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้ในงานที่เสี่ยงอันตรายต่อชีวิตมนุษย์ งานก่อสร้าง ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้งานกล้ามเนื้อเทียมมาเป็น ชุดขับเคลื่อนของแขนหุ่นยนต์ และคณะวิจัยของ Tsagarakis ได้ศึกษาและพัฒนาแบบจำลองของกล้ามเนื้อเทียมที่จะนำมาใช้เป็นชุดขับเคลื่อนในงานวิศวกรรม [2] และในประเทศไทยได้มีคณะวิจัยของสถาพรได้ออกแบบแขนเทียมโดยใช้ชุดขับเคลื่อนกล้ามเนื้อเทียม [3]

งานวิจัยนี้ทางคณะผู้วิจัยได้ออกแบบ และสร้างแขนหุ่นยนต์เลียนแบบแขนคนขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์เบื้องต้นที่ต้องการให้แขนกลนี้สามารถนำไปปรับใช้งานการช่วยเหลือมนุษย์ แขนหุ่นยนต์นี้ใช้ตัวขับเคลื่อนแบบกล้ามเนื้อเทียมซึ่งทำจากยางยืดหดได้และเส้นใยที่มีความยาวคงตัว กล้ามเนื้อเทียมที่เลือกใช้ผลิตโดยบริษัท FESTO ซึ่งมีการทำงานคล้ายคลึงกับกระบอกสูบลิวแมติกส์ ทำงานด้วยอากาศอัด โดยกล้ามเนื้อเทียมนี้จะหดตัวที่ปลายทั้งสองด้านเมื่อมีการจ่ายลมอัดเข้าไปที่กล้ามเนื้อเทียมนี้ และมีระยะหดตัวจากความยาวปกติถึง 20% และให้แรงดึงจากการหดตัวได้ถึง 400 นิวตันที่ความดัน 8 บาร์ ซึ่งลักษณะการยืดหดตัวของกล้ามเนื้อเทียมนี้แสดงดังรูปที่ 1



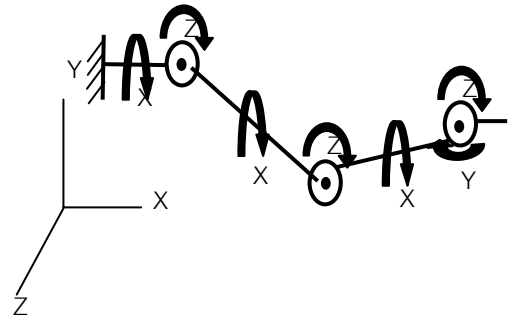
รูปที่ 1 แสดงการยืดหดตัวของกล้ามเนื้อเทียม

การใช้กล้ามเนื้อเทียมเป็นชุดขับเคลื่อนแขนหุ่นยนต์จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ ถึงแม้ข้อดีจะเป็นแรงบิดต่อน้ำหนักที่สูง แต่ก็มีข้อด้อยคือความยากในการควบคุมการยืดหดตัวเพราะต้องใช้ระบบอากาศอัด หรือระบบนิวแมติกส์ ซึ่งทำได้ยากกว่าการควบคุมด้วยระบบมอเตอร์ไฟฟ้า เนื่องจากความไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear) ของชุดระบบกล้ามเนื้อเทียม อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้ได้แสดงให้เห็นว่าการใช้ตัวควบคุมแบบ PD พื้นฐาน สามารถนำมาใช้งานกับระบบนี้ได้เป็นอย่างดี

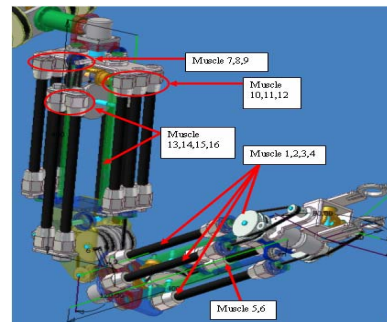
2. การออกแบบและสร้าง

การออกแบบสร้างแขนหุ่นยนต์นี้ยึดหลักการจากทางธรรมชาติ (Biologically Inspired) ของแขนมนุษย์ อันประกอบไปด้วย 7 ระดับขั้นความเสรี (degree of freedom) ซึ่งสามารถแสดงเป็นแผนภาพทาง

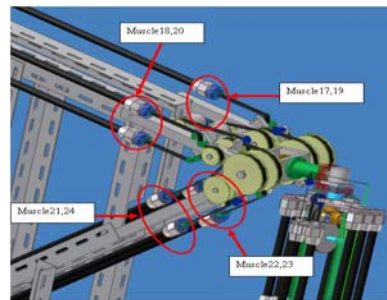
จลนศาสตร์ (Kinematics diagram) ได้ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แสดงแผนภาพจลนศาสตร์ของแขนมนุษย์ งานวิจัยนี้ได้นำกล้ามเนื้อเทียมมาติดตั้งเป็นคู่สองทิศทาง และมีการทำงานตรงข้ามกันเพื่อใช้ขับเคลื่อนข้อต่อแบบหมุน (revolute joint) ทั้งไปและกลับ การออกแบบแขนกลนี้มีการติดตั้งกล้ามเนื้อเทียมแสดงได้ดังรูปที่ 3 และ 4



รูปที่ 3 แสดงกล้ามเนื้อเทียมที่ควบคุมแขนหุ่นยนต์ที่อ่อนลง

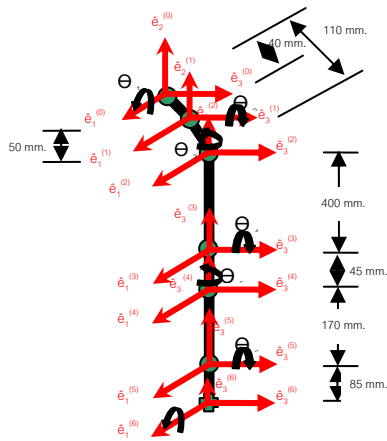


รูปที่ 4 แสดงกล้ามเนื้อเทียมที่ควบคุมแขนหุ่นยนต์ที่อ่อนบน

แขนกลนี้ได้มีการติดตั้งกล้ามเนื้อเทียมทั้งหมดจำนวน 24 ชุด และขนาดความยาวของแขนหุ่นยนต์แต่ละส่วนแสดงได้ดังรูปที่ 5

พลศาสตร์เคลื่อนที่ของแต่ละข้อต่อได้ออกแบบให้ของแขนหุ่นยนต์ มีพลศาสตร์เคียงกับแขนมนุษย์ ซึ่งมีการวัดมุมจากตำแหน่งอ้างอิงพื้นฐาน (home position) ดังแสดงไว้ในรูปที่ 5 เนื่องจากข้อจำกัดในการออกแบบชิ้นส่วนทางกลที่มีการเคลื่อนไหวให้ใกล้เคียงพลศาสตร์ของแขนมนุษย์ทำให้ต้องมีการติดตั้งระบบเฟืองทด และเฟืองดอกจอก ส่วนมุมที่วัดอ่านได้จากชุดวัดมุม encoder ที่มีขนาดความละเอียดสูง จึง

ไม่ใช่ค่ามุมที่ปรากฏตามแผนภาพจนศาสตร์



รูปที่ 5 แสดงขนาดและตำแหน่งอ้างอิงพื้นฐานของแขนหุ่นยนต์

3. การควบคุมแขนหุ่นยนต์

การควบคุมแขนหุ่นยนต์ เพื่อให้แขนในแต่ละข้อต่อเคลื่อนไหวตามมุมที่ต้องการได้อย่างถูกต้องจึงต้องใช้ตัวควบคุมแบบป้อนกลับ (Feedback control) โดยเลือกใช้ตัวควบคุมเชิงสัดส่วนบวกอนุพันธ์ (Proportional-plus-Derivative Controllers, PD-Control) ซึ่งมีสมการดังนี้

$$y_d(t) = K_p e(t) + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

$y_d(t)$ = ค่าเป้าหมาย (Set point) ที่ต้องการ

K_p = ค่าอัตราขยายสัดส่วนโดยตรง

K_d = ค่าอัตราขยายอนุพันธ์

$e(t)$ = ค่าความแตกต่างระหว่าง อินพุตและเอาต์พุต

แต่ในกรณีของแขนหุ่นยนต์นี้ค่าอินพุตนั้นเป็นแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ใช้ควบคุมการเปิด-ปิดวาล์วนิวแมติกส์ แต่ค่าเอาต์พุตเป็นค่ามุมในหน่วยองศาจึงจำเป็นต้องหาความสัมพันธ์ของทั้งสองค่านี้เสียก่อนโดยกำหนดเส้นทางการเคลื่อนที่ของแขนในแต่ละข้อต่อในรูปแบบความสัมพันธ์ของเวลา แรงเคลื่อนไฟฟ้า และมุมการเคลื่อนไหว คือ กำหนดให้มุมกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าอยู่ในช่วงเวลาที่กำหนด จากผลการทดลองสมการความสัมพันธ์ระหว่างมุมการเคลื่อนไหว กับเวลา คือ

$$A = -1.047t^2 + 12.114t - 2.2601 \quad (2)$$

และสมการความสัมพันธ์ระหว่างแรงเคลื่อนไฟฟ้ากับมุมการเคลื่อนไหว คือ

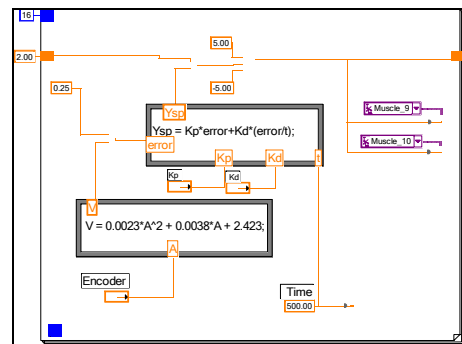
$$V = 0.0023A^2 + 0.0038A + 2.423 \quad (3)$$

แต่สมการที่ 2 ไม่สามารถนำไปใช้งานได้โดยตรงเนื่องจาก ไม่อาจนำค่าเวลาไปใช้งานได้ แต่สามารถกำหนดการจ่ายแรงเคลื่อนไฟฟ้าให้เป็นไปตามช่วงเวลาที่กำหนดได้ ดังนั้นจึงนำค่ามุมการเคลื่อนไหว ซึ่งเป็นค่าเอาต์พุตของระบบมา ทำให้เป็นค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าตามสมการที่ 3 เช่นกำหนดค่ามุมที่ 30 องศาจะได้ค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้า

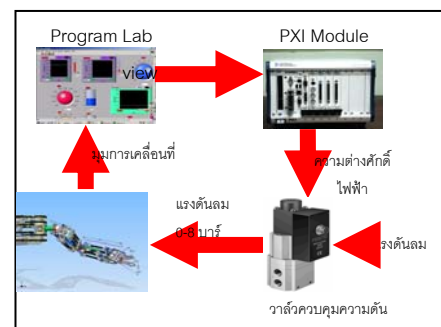
$(0.0023)(30^2) + (0.0038)(30) + 2.423 = 4.798$ volts จากนั้น นำค่าแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่ได้ไปเป็นตัวควบคุมการทำงานของแขนตามสมการ 3 ดังนี้

$$y_d(t) = K_p (y_d - 4.798) + K_d \frac{d}{dt} (y_d - 4.798) \quad (4)$$

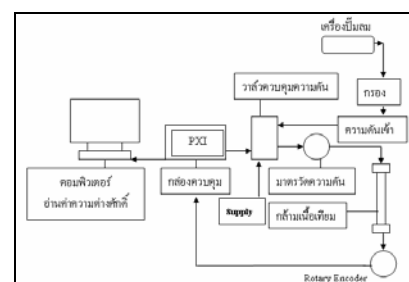
เมื่อ K_p และ K_d เป็นค่าอัตราขยายที่ทำให้แขนเคลื่อนไหวเข้าสู่ค่ามุมที่กำหนดได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว ซึ่งมีลักษณะของแผนผังการทำงานและโปรแกรมที่ใช้สั่งงานตามรูปที่ 6 เป็นการนำค่า เอาต์พุต คือ สัญญาณ Pulse ของ Encoder ที่ใช้วัดมุมการเคลื่อนไหวของแขนกลับเข้ามาในกระบวนการที่ใช้สั่งให้แขนเคลื่อนไหวโดยจ่ายแรงเคลื่อนไฟฟ้าแบบ Unit step response แล้วใช้ Block PID ซึ่งเป็น Function ของโปรแกรม Lab VIEW มาควบคุมให้แขนในแต่ละข้อต่อเคลื่อนไหวไปยังมุมที่กำหนดอย่างถูกต้องโดยไม่สนใจว่าจะใช้เวลาเท่าไร มีแผนผังและผลการทดลองดังในรูปที่ 7



รูปที่ 6 แสดงโปรแกรม Lab View ควบคุมการเคลื่อนไหวแขนหุ่นยนต์



รูปที่ 7 แสดงแผนผังการควบคุม



รูปที่ 8 แสดงการต่ออุปกรณ์หลักของแขนหุ่นยนต์

ส่วนการต่ออุปกรณ์หลักของการควบคุมแขนหุ่นยนต์แสดงดังรูปที่ 8 อันประกอบไปด้วย คอมพิวเตอร์ ต่อเข้ากับชุดควบคุม LABVIEW PXI โดยใช้โปรแกรม LABVIEW และต่อกับกล่องควบคุม ซึ่งต่อกับชุดวาล์วควบคุมความดันและต่อไปยังกล้ามเนื้อเทียม ซึ่งปลายอีกด้านหนึ่งของวาล์วควบคุมความดันต่อเข้ากับระบบนิวแมติกส์ และมีชุดวัดมุม rotary encoder ส่งค่าป้อนกลับเข้าสู่กล่องควบคุม

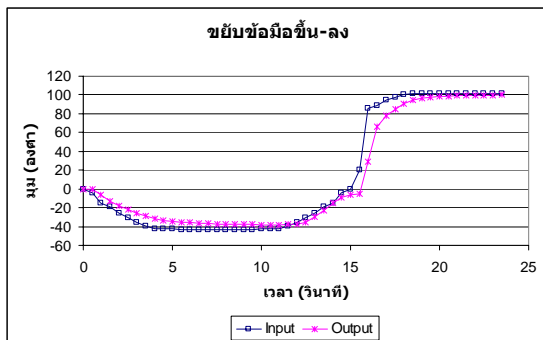
4. ผลการทดลอง

การทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลังจากที่ได้มีข้อมูลการทดลองเบื้องต้นเพื่อสอบเทียบหาความสัมพันธ์ระหว่าง มุมการเคลื่อนที่ กับ แรงเคลื่อนไฟฟ้า ดังที่ได้อธิบายในหัวข้อที่ 3 ดังนี้ ส่วนแรก ทดลองให้แต่ละข้อต่อเคลื่อนที่โดยอิสระจากกัน เริ่มจากส่วนหัวไหล่อันประกอบด้วยการเคลื่อนที่ 3 ระดับชั้นความเร็ว ข้อศอกประกอบด้วย 1 ระดับชั้นความเร็ว และ ข้อมือมี 3 ระดับชั้นความเร็ว ซึ่งผลการทดลองในบทความนี้ ได้เลือกนำเสนอไว้เพียง 2 ระดับชั้นความเร็ว คือ การขยับข้อมือขึ้นลง และการแกว่งแขนไปข้างหน้า และกลับหลังส่วนหัวไหล่ ส่วนที่สองของการทดลองได้สร้างเส้นทางการเคลื่อนที่เป็นการแกว่งแขนให้มีการเคลื่อนที่พร้อมกันทั้ง 7 ระดับชั้นความเร็ว ดังแสดงในรูป 14 และอาจลำดับผลการทดลองได้ดังต่อไปนี้

จากรูปที่ 9 และ 10 จะพบว่า การเคลื่อนที่ของข้อมือมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่กำหนดช่วงที่ผิดพลาดจะเป็นช่วงที่ขยับข้อมือขึ้นจะช้ากว่าค่าที่กำหนดเพราะในจังหวะนี้กล้ามเนื้อเทียมที่ใช้ดึงข้อมือลงยังจ่ายลมออกไม่หมดและมีความดันอยู่ค่าหนึ่งจึงเกิดการดึงกันเองระหว่างกล้ามเนื้อเทียมที่ใช้ดึงข้อมือให้ขยับขึ้นลง



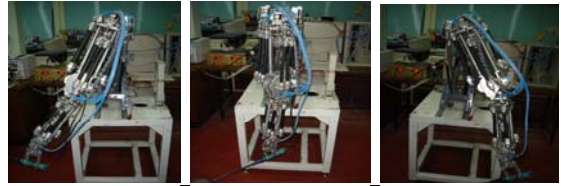
รูปที่ 9 แสดงการขยับข้อมือขึ้นลง



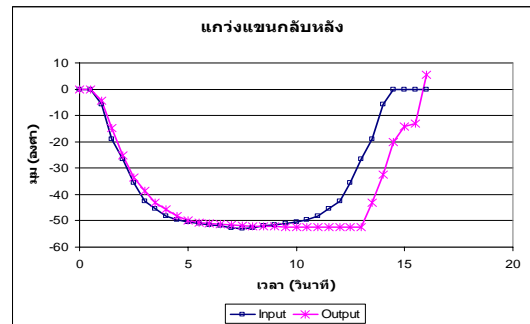
รูปที่ 10 แสดงกราฟการขยับข้อมือขึ้นลง

จากรูป 12 จะพบว่า ในช่วงเริ่มต้นจนถึง 10 วินาที (ช่วงเหยียดขึ้น) แขนสามารถเคลื่อนไหวได้ใกล้เคียงกับค่าที่กำหนด แต่ในจังหวะเหยียดลงนั้นจะช้ากว่าเพราะลมที่จ่ายออกจากกล้ามเนื้อเทียมในช่วงแรกจะมีปริมาณน้อยและเกิดแรงต้านกับลมที่จ่ายเข้าจึงทำให้กล้ามเนื้อเทียมคลายตัวช้าทำให้มุมการเคลื่อนไหวล่าช้ากว่ากำหนด

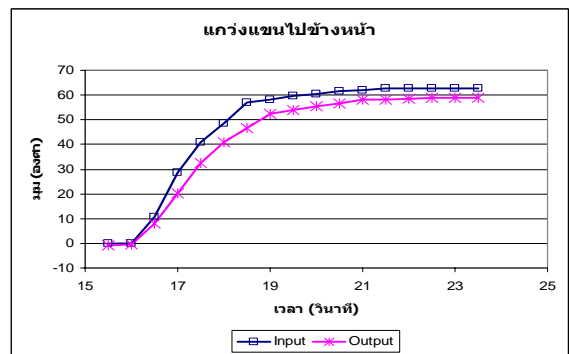
จากรูป 13 จะพบว่า เส้นทางการเคลื่อนที่ของแขนมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่กำหนดส่วนสาเหตุที่ทำให้ค่าคลาดเคลื่อนเพราะในช่วงเวลานี้แขนมีการทำงานหลายข้อต่อลมอัดที่จ่ายเข้ามาจึงไม่คงที่



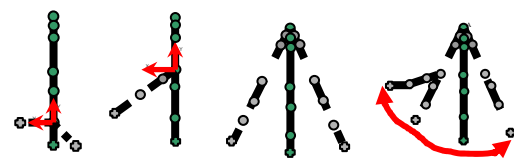
รูปที่ 11 แสดงการแกว่งแขนกลับหลังและไปข้างหน้า



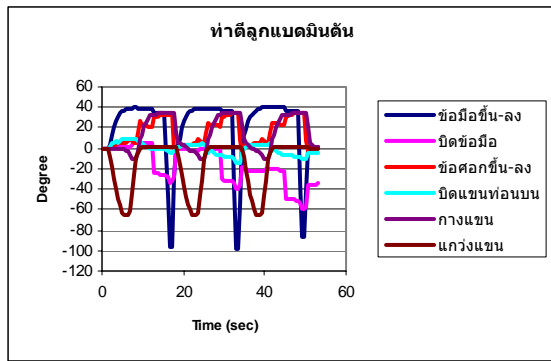
รูปที่ 12 แสดงกราฟการแกว่งแขนกลับหลัง



รูปที่ 13 แสดงกราฟการแกว่งแขนไปข้างหน้า



รูปที่ 14 แสดงการแกว่งแขนพร้อมกันทั้ง 7 ระดับชั้นความเร็ว



รูปที่ 15 แสดงกราฟการแกว่งแขนพร้อมกันทั้ง 7 ระดับชั้นความเสรี

รูปที่ 15 เป็นการแสดงผลเส้นทางการเคลื่อนที่ของการแกว่งแขน ทั้ง 7 ระดับชั้นความเสรีพร้อมกัน โดยค่าที่ปรากฏตั้งในกราฟเป็นมุมที่วัดได้จาก rotary encoder และในรูปเป็นการแกว่งแขน 3 ครั้ง ตามเส้นทางการเคลื่อนที่ในรูปที่ 14

5. สรุป

งานวิจัยนี้ได้ออกแบบและสร้างและควบคุมแขนหุ่นยนต์เลียนแบบแขนคนแล้วเสร็จ การควบคุมใช้การเขียนโปรแกรมผ่าน LABVIEW PXI Module แม้ระบบที่สร้างขึ้นที่ใช้ระบบนิวเมติกส์ซึ่งมีความไม่เชิงเส้นสูง แต่จากการทดลองพบว่า การใช้ตัวควบคุมพื้นฐาน PD สามารถให้ผล เป็นที่น่าพอใจคือมีความผิดพลาดจากค่าที่กำหนดอยู่ในช่วงไม่เกิน ± 1 องศา ซึ่งเป็นผลที่น่าสนใจมากสำหรับระบบตัวอย่างที่มีความไม่เชิงเส้นขั้นสูงอันนี้

อนึ่งผลการผิดพลาดนี้ยังอาจเกิดจากจากแรงโน้มถ่วงที่ทำให้แขนเคลื่อนไหวช้าลง และการสูญเสียเนื่องจากความผิดของกลไก และความไม่คงที่ของลมอัดที่จ่ายให้แก่เส้นกล้ามเนื้อเทียม

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากสำนักงานประมาณแห่งชาติ ประจำปีงบประมาณ 2546-2547

เอกสารอ้างอิง

- [1] Kenji Kawashima, Takahiro Sasaki, Ai Ohkubo, Toshiyuki Miyata and Toshiharu Kagawa " Application of Robot Arm Using Fiber Knitted Type Pneumatic Artificial Rubber Muscles", Proceeding of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation, New Orleans, LA, April 2004.
- [2] N. Tsagarakis, Dawin G. Caldwell, "Improved Modeling and Assessment of Pneumatic Muscle Actuators", Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Vol. 4, pp. 3641/3646 (2000)
- [3] S. Laksanacharoen and S. Wongsiri, "Design and

Construction of Rubber Pneumatic Artificial Muscles", The 17th Conference of Mechanical Engineering Network of Thailand, Prachinburi, October 15-17, 2003

- [4] Colbrunn, R.W., Nelson, G.M., and Quinn, R.D. (2001) "Design and Control of a Robotic Leg with Braided Pneumatic Actuators," International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS '01), Maui, HI.
- [5] Colbrunn, R.W., Nelson, G.M., and Quinn, R.D. (2001) "Modeling of Braided Pneumatic Actuators for Robotic Control," International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS '01), Maui, HI.
- [6] Medrano-Cerda, Gustavo A. Bowler, Colin J. Caldwell, Darwin G., "Adaptive Position Control of Antagonistic Pneumatic Muscle Actuators", IEEE International conference on Intelligent Robots and Systems, v1 1995, 378-383, 1995
- [7] Toshiro Noritsugu, Yoshio Tsuji, Kazutoshi Ito, "Improvement of Control Performance of Pneumatic Rubber Artificial Muscle Manipulator by Using Electrorheological Fluid Damper", Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, v4 1999, IV-788/IV-793, 1999