

การควบคุมตำแหน่งของแขนกล 6 แกน ด้วยจลศาสตร์แบบผกผันผ่านระบบเน็ตเวิร์ค

Position Control of 6-axis Robot Arm Using Inverse Kinematics through Network

ชัยนเรศ แห้วเพชร^{1*} และ ปรัชญา เปรมปราณีรัชต์^๒

Chainares Haewphet^{1*} and Pradya Prempraneeerach²

¹นักศึกษาระดับปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ถนนรังสิต-นครนายก ตำบลคลองหก อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12110

²อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ถนนรังสิต-นครนายก ตำบลคลองหก อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12110

¹ Graduate student of Mechanical Engineering, Department of Engineering (Mechanical Engineering), Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi (RMUTT), Pathumthani 12120

² Lecturer of Department of Engineering (Mechanical Engineering), Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi (RMUTT), Pathumthani 12120

*Corresponding author, E-mail: chainaresh@hotmail.com

บทคัดย่อ

การควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่ของแขนกล 6 แกนนั้นเป็นสิ่งที่มีความซับซ้อนต่อการคำนวณอย่างยิ่ง ซึ่งจำเป็นต้องนำหลักการจลศาสตร์แบบผกผันของหุ่นยนต์มาประยุกต์ใช้ร่วมกับการควบคุมแบบ PID เพื่อประยุกต์ใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของตำแหน่งปลายแขนกลผ่านระบบเน็ตเวิร์ค โดยการประดิษฐ์ซอฟต์แวร์เพื่อส่งค่าตำแหน่งเป้าหมายบนพิกัด (X, Y, Z) ของปลายแขนกล ระหว่างคอมพิวเตอร์ควบคุม ซึ่งทำหน้าที่กำหนดตำแหน่งของปลายแขนกล และ คอมพิวเตอร์ประมวลผลซึ่งควบคุมการทำงานจำลองแขนกลโดยตรงที่เชื่อมโยงผ่านระบบเน็ตเวิร์ค

คำสำคัญ: แขนกล 6 แกน การควบคุมตำแหน่ง ระบบเน็ตเวิร์ค

Abstract

The motion control of 6-axis robot arm requires a complicated calculation. Thus, we need to properly apply inverse kinematics, which is one of the important robotic principles, along with PID control technique for controlling the tip of robot arm position through a network system. Moreover, we created a software for sending a desired location (X, Y, Z) of the tip of robot arm through the network from a controlling computer to a processing computer which can directly control the robot arm model.

Keywords: 6 axis robot, position control, network system

1. บทนำ

เนื่องจากปัจจุบันในระบบอุตสาหกรรมมีการนำหุ่นยนต์ไปประยุกต์ใช้งานเป็นอย่างมาก และหลากหลายรูปแบบการใช้งานตามแต่สภาพการที่เหมาะสมแก่การใช้งาน เพื่อเพิ่มขีดความสามารถของกระบวนการผลิตในระบบอุตสาหกรรม อาทิเช่น ในอุตสาหกรรมรถยนต์ได้นำหุ่นยนต์ หรือแขนกล ไปใช้เพื่อเพิ่มอัตราการผลิตชิ้นงานให้ได้เร็ว และมากยิ่งขึ้น ด้านอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ได้นำหุ่นยนต์ไปใช้ในการผลิตชิ้นงานที่มีความละเอียดสูงจนเกินกว่าขีดความสามารถของมนุษย์ที่จะทำได้ หรือนำไปผลิตชิ้นงานในระบบอุตสาหกรรมแทนแรงงานคนที่มีต้นทุนการผลิตที่สูงกว่า หรือแม้กระทั่งการนำหุ่นยนต์ไปใช้แทนมนุษย์ในงานอุตสาหกรรมที่มีสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสมกับมนุษย์ที่จะทำงานได้เช่น สายการผลิตที่มีอุณหภูมิสูง หรือที่ๆ มีอากาศไม่ถ่ายเท หรือที่ๆ มีสารเคมีอันตรายเป็นต้น รวมไปถึงจนถึงการนำแขนกลไปใช้งานทางด้านการแพทย์เพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการรักษาผู้ป่วยให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น เช่นการผ่าตัดด้วยแขนกล ซึ่งมีความผิดพลาดน้อยและมีความละเอียดสูง รวมไปถึงจนถึงเทคโนโลยีด้านอวกาศก็มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องอาศัยหุ่นยนต์ช่วยในการประกอบภารกิจต่างๆ ซึ่งเกินกว่าขีดจำกัดของมนุษย์ที่จะทำได้ ดังนั้นความรู้ในเทคโนโลยีหุ่นยนต์จึงมีความจำเป็นอย่างมากทั้งในปัจจุบันและอนาคต

อนึ่งปัจจุบันมนุษย์ได้พัฒนาเทคโนโลยีต่างๆ ขึ้นมาอย่างต่อเนื่องรวมถึงเทคโนโลยีที่ใช้ในการติดต่อสื่อสาร การส่งถ่ายข้อมูลสารสนเทศต่างๆ อย่างเช่นการส่งของมูลต่างๆ ผ่านระบบโครงข่ายเน็ตเวิร์คเป็นต้น ทั้งนี้มนุษย์ได้พัฒนาเทคโนโลยีด้านการสื่อสารมาอย่างต่อเนื่องจนถึงปัจจุบัน ทำให้ผู้คนเข้าถึงได้ง่ายและมีต้นทุนในการใช้งานที่ไม่แพงเกินไป

จึงเป็นที่ใช้งานกันอย่างแพร่หลายทั่วประเทศ ทั่วโลก ทั้งนี้ผู้วิจัยจึงได้ตระหนักเห็นถึงคุณค่าและประโยชน์ของการบูรณาการเทคโนโลยีระบบเน็ตเวิร์คและเทคโนโลยีด้านหุ่นยนต์เข้าด้วยกัน เพราะเป็นสิ่งที่เข้าถึงได้ง่ายและมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลาย ซึ่งจะนำประโยชน์ในการส่งถ่ายข้อมูลผ่านระบบเน็ตเวิร์คเพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการควบคุมแขนกล 6 แกนผ่านระบบโครงข่ายเน็ตเวิร์ค ซึ่งจะเป็ประโยชน์และความรู้พื้นฐานสู่การพัฒนาเพื่อการควบคุมอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อื่น ที่อยู่ทั่วทุกมุมโลกผ่านทางระบบเน็ตเวิร์ค

ซึ่งงานวิจัยนี้จะรวบรวมองค์ความรู้ที่เกี่ยวข้องกับความรู้ทางการควบคุมตำแหน่งของแขนกล 6 แกนไว้ในหัวข้อที่ 3 โดยจะอธิบายถึงหลักการคำนวณทางจลศาสตร์ของระบบหุ่นยนต์ โดยเฉพาะแขนกลแบบอนุกรม อาทิเช่น ทฤษฎีจลศาสตร์แบบไปข้างหน้า (Forward Kinematic) จลศาสตร์แบบผกผัน (Inverse Kinematic) และจาโคเบียน (Jacobian) เป็นต้น ซึ่งเป็นหลักการสำคัญที่ใช้ในการควบคุมตำแหน่งของแขนกลให้เคลื่อนที่ไปในตำแหน่งที่ต้องการ โดยได้พัฒนาระบบจลศาสตร์ในซอฟต์แวร์ MATLAB เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการคำนวณให้มีความรวดเร็วและแม่นยำเพื่อใช้ในการศึกษาการควบคุมการเคลื่อนที่ไปสู่ตำแหน่งๆ และในหัวข้อที่ 4 นั้นได้อธิบายเรื่องการส่งถ่ายข้อมูลผ่านระบบเน็ตเวิร์ค โดยการประดิษฐ์ซอฟต์แวร์เพื่อใช้ในการส่งค่าข้อมูลระหว่างคอมพิวเตอร์ของผู้ควบคุม และแขนกล 6 แกนผ่านโครงข่ายเน็ตเวิร์ค และยังได้รวบรวมข้อมูลพร้อมกับการประดิษฐ์โปรแกรมเพื่อควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่ของแขนกล 6 แกน โดยใช้ซอฟต์แวร์ Visual Studio.NET มาประยุกต์เข้ากับการส่งข้อมูลตำแหน่งของแขนกล 6 แกนผ่านระบบเน็ตเวิร์คซึ่งประกอบด้วยคอมพิวเตอร์ควบคุมซึ่งผู้ปฏิบัติการ (User) จะเป็นผู้

ป้อนคำสั่งของตำแหน่งแกนกลบนพิกัด (X,Y,Z) และส่งคำสั่งไปยังคอมพิวเตอร์ที่ควบคุมแกนกล 6 แกนผ่านระบบโครงข่ายเน็ตเวิร์คด้วยซอฟต์แวร์ และในหัวข้อที่ 5 และ 6 ได้แสดงผลการทดสอบและวิเคราะห์การควบคุมการเคลื่อนที่ของแกนกลแบบ 6 แกนผ่านระบบโครงข่ายเน็ตเวิร์ค ซึ่งเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ (2551) ได้เสนอระบบแกนกลแบบนำ-ตาม หรือระบบควบคุมระยะไกล 6 องศาอิสระ สำหรับทำงานขนาดเล็กทั่วไป ซึ่งการออกแบบโดยใช้โครงสร้างแบบอนุกรม และสามารถปรับเปลี่ยนรูปแบบการทำงานได้เป็นสองแบบคือ การเคลื่อนที่แบบหยาบ และแบบละเอียดเพื่อให้สามารถปรับเลือกให้เหมาะสมกับการใช้งาน ผู้วิจัยได้ใช้แกนกลนำแฟนทอม ออมนิ (Phantom Omni) ซึ่งมีอุปกรณ์ตรวจวัดมุมของการเคลื่อนที่ 6 องศาอิสระได้ ซึ่งเพียงพอต่อการระบุตำแหน่ง เพื่อควบคุมแกนกลตาม ซึ่งความแม่นยำมีความแตกต่างกันตามลักษณะการเคลื่อนที่ของแกนกล โดยมีความผิดพลาดไม่เกิน 1 มิลลิเมตร และความผิดพลาดดังกล่าวอาจชดเชยได้โดยการบังคับของผู้ใช้งาน

พรพต จันทรรัต (2555) ได้เสนอการพัฒนาซอฟต์แวร์สำหรับการควบคุมแกนกลแบบ 5 องศาอิสระติดตั้งบนรถเข็นคนพิการ ซึ่งผู้พิการสามารถควบคุมการทำงานผ่านสวิทช์ ซึ่งจะแบ่งการทำงานเป็นสามส่วน คือส่วนแรกเป็นการระบุตำแหน่ง ส่วนที่สองเป็นการกำหนดแผนการเคลื่อนที่ และส่วนที่สามคือการออกแบบเพื่อความปลอดภัย ซึ่งแกนกลสามารถเคลื่อนเข้าหาตำแหน่งเป้าหมายได้ โดยมีค่าความผิดพลาดไม่เกิน 5.5 มิลลิเมตร

ทวีเดช ศิริธนาพิพัฒน์ (2552) ได้ศึกษาเปรียบเทียบการควบคุมระบบแบบเปิด-ปิด และ แบบ PID ในชุดฝึกระบบควบคุม ซึ่งพบว่า การควบคุมกระบวนการด้วยการควบคุมแบบ PID จะสามารถ

รักษาเสถียรภาพของอัตราการไหล และอุณหภูมิ ได้ดีกว่าการควบคุมกระบวนการแบบเปิด-ปิด

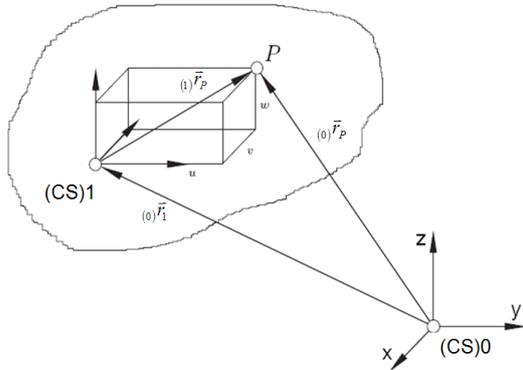
Prempraneerach (2010) ได้ทำการศึกษาการควบคุมแกนกล OWI-353 แบบ 5 แกน โดยการประยุกต์ใช้ Jacobian pseudo-inverse ($J^{\#}$) และ Jacobian singularity robust inverse (J^*) ซึ่งพบว่า การใช้ Jacobian pseudo-inverse เพื่อกำหนดจลศาสตร์แบบผกผันของแกนกล 5 แกนนั้น อาจมีบางจุดที่ทำให้เกิด Singularity ได้ แต่จะสามารถป้องกันการเกิด Singularity ได้โดยการประยุกต์ใช้ Jacobian singularity robust inverse กับแกนกล 5 แกน

2. วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาและออกแบบการควบคุมตำแหน่งการเคลื่อนที่ของปลายแกนกล 6 แกน โดยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และประยุกต์ใช้สมการจลศาสตร์แบบผกผันร่วมกับการควบคุมแบบ PID เพื่อให้ปลายแกนกลเคลื่อนที่เข้าหาจุดพิกัดที่ต้องการ และประดิษฐ์โปรแกรมเพื่อกำหนดตำแหน่งของปลายแกนกล 6 แกนผ่านระบบเน็ตเวิร์ค

3. สมการเพื่อการคำนวณตำแหน่งของแกนกล

เนื่องจากการที่จะควบคุมแกนกลให้ปลายแกนสามารถเคลื่อนที่ไปสู่ตำแหน่งต่างๆ ที่ต้องการ ได้นั้นจะต้องอาศัยหลักการทางจลศาสตร์ และพลศาสตร์ เมื่อการเคลื่อนที่นั้นใช้ความเร็วต่ำ และสูงตามลำดับ เพื่อคำนวณหาตำแหน่งต่างๆ ของแต่ละแกนของหุ่นยนต์ที่เคลื่อนที่ไปในระบบพิกัด (X, Y, Z) โดยใช้เวกเตอร์เพื่อจะช่วยระบุได้ทั้งขนาดและทิศทางในการเคลื่อนที่ของแกนกล



รูปที่ 1 การบอกตำแหน่งในการเคลื่อนที่ด้วยเวกเตอร์

จากรูปที่ 1 สามารถเขียนความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบเวกเตอร์ได้ดังนี้

$${}^{(0)}\vec{r}_P = {}^{(0)}\vec{r}_1 + {}^{(0)}\vec{r}_{1P} \quad (1)$$

$${}^{(0)}\vec{r}_P = {}^{(0)}\vec{r}_1 + {}^{01}R_{(1)}\vec{r}_P \quad (2)$$

$${}^{01}R = [{}^{(0)}e_x \times {}^{(0)}e_y \times {}^{(0)}e_z] \quad (3)$$

$$({}^{01}R)^{-1} = ({}^{01}R)^T = ({}^{10}R) \quad (4)$$

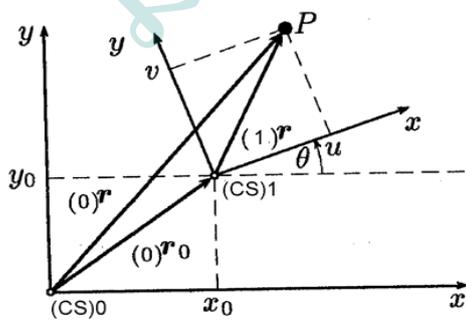
เมื่อ

R คือ เมตริกซ์การหมุน (Rotation Matrix)

\vec{r} คือ เวกเตอร์ระยะกระจัด

e คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วย

เมื่อหุ่นยนต์มีการเคลื่อนที่ทั้งแบบเลื่อนและแบบหมุน ในการอธิบายการเคลื่อนที่ในระบบพิกัด (X,Y,Z) ด้วยเมตริกซ์ จะช่วยลดความซับซ้อนในการคำนวณ โดยจะสามารถจัดให้อยู่ในรูปแบบเมตริกซ์การแปลงพิกัดได้ ดังแสดงในสมการที่ (5) และในรูปที่ 2 นี้



รูปที่ 2 การระบุตำแหน่ง และการหมุน

โดยสามารถระบุตำแหน่งของจุด P ใดๆ เทียบกับจุดอ้างอิงเมื่อคูณด้วยเมตริกซ์การแปลงพิกัด (T) ได้ดังนี้ (Bruno Siciliano, Lorenzo, Luigi Villani & Giuseppe Oriolo, 2009)

$$T_1^0 = \begin{bmatrix} R_{3 \times 3} & \vec{r}_{3 \times 1} \\ f_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^{01}R & {}^{(0)}\vec{r}_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

เมื่อ

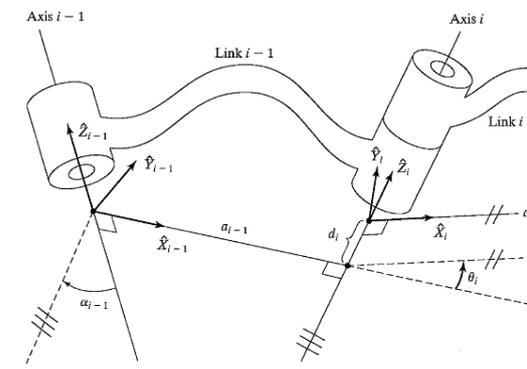
${}^{01}R$ คือ เมตริกซ์การหมุน (Rotation matrix) จากแกนที่ 0 ไปยังแกนที่ 1

${}^{(0)}\vec{r}_1$ คือ เวกเตอร์การเลื่อน (Translation Vector) จากแกนที่ 0 ไปยังแกนที่ 1

$f_{1 \times 3} = [0 \ 0 \ 0]$ คือ เวกเตอร์มิติที่ 4 ช่วยการแปลงพิกัด และระบบที่มีจุดอ้างอิงอยู่หลายจุด จะสามารถที่จะใช้หลักการแปลงพิกัดแบบ Homogeneous ดังแสดงในสมการที่ (6) มาใช้เพื่อระบุตำแหน่งของปลายก้านโยงสุดท้ายเมื่อเทียบกับกรอบอ้างอิงเริ่มต้น

$$T_i^0 = T_1^0 T_2^1 \dots T_{i-1}^{i-2} T_i^{i-1} \quad (6)$$

จากนั้นจะต้องอาศัยหลักการนำเสนอพารามิเตอร์ของ Denavit Hartenberg มาช่วยในการวิเคราะห์หาเมตริกซ์การแปลงพิกัด เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณหาตำแหน่งของแต่ละก้านโยงของแขนกล ซึ่งจำเป็นที่จะต้องตั้งแกนของแต่ละจุดต่อที่กำหนดเป็นจุด i และ i-1 พร้อมกับการสร้างตาราง Denavit Hartenberg เพื่อกำหนดค่า α_i, a_i, d_i และ θ_i ในแต่ละแกนการหมุนของแขนกล



รูปที่ 3 การตั้งแกนโดยใช้การนำเสนอแบบ Denavit Hartenberg (John J. Craig, 2004)

เมตริกซ์การแปลงพิกัด ระหว่างแกน โยงที่ i และ $i-1$ โดยอาศัยหลักการของ Denavit Hartenberg ได้ดังนี้

$$T_i^{i-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \alpha_i & \sin \theta_i \sin \alpha_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \cos \alpha_i & -\cos \theta_i \sin \alpha_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

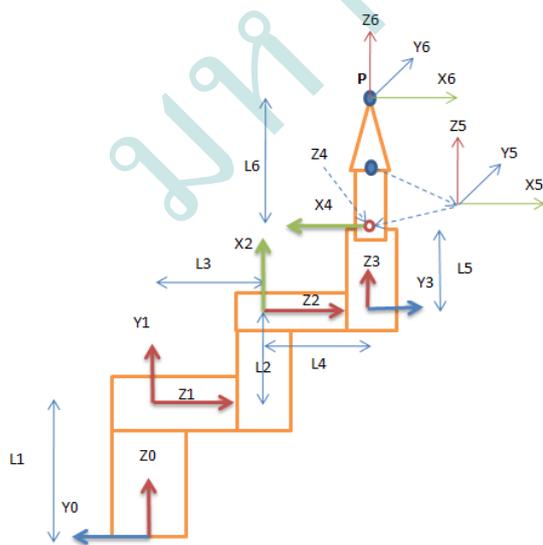
เมื่อ a_i คือ ระยะห่างระหว่างแกน Z_i และ Z_{i-1} ตามแนวแกน X_i

d_i คือ ระยะห่างระหว่างแกน X_i และ X_{i-1} ตามแนวแกน Z_{i-1}

α_i คือ มุมระหว่างแกน Z_i และ Z_{i-1}

θ_i คือ มุมระหว่างแกน X_i และ X_{i-1}

ในรูปที่ 4 ได้แสดงการตั้งแกนของแขนกลแบบ 6 แขนที่ใช้ในการทดลอง โดยใช้หลักการของ Denavit Hartenberg เพื่อสร้างแบบจำลองทางจลศาสตร์ของแขนกล 6 แขน โดยกำหนดให้แกน Z ของแต่ละแกนเป็นแกนหมุน และนำข้อมูลที่ได้จากการตั้งแกนไปวิเคราะห์เพื่อทำการสร้างตาราง Denavit Hartenberg ดังในตารางที่ 1



รูปที่ 4 การกำหนดแกนของแขนกล 6 แขน

ตารางที่ 1 Denavit-Hartenberg สำหรับแขนกล 6 แขน

i	α_i	a_i	d_i	θ_i
1	90	0	L_1	q_1
2	0	L_2	L_3	q_2
3	90	0	L_4	q_3
4	90	0	L_5	q_4
5	-90	0	0	q_5
6	0	0	L_6	q_6

เมื่อนำค่าที่ได้จากตารางที่ 1 ไปแทนลงในเมตริกการแปลงพิกัดจะได้ดังนี้

$$T_1^0 = \begin{bmatrix} \cos q_1 & 0 & \sin q_1 & 0 \\ \sin q_1 & 0 & -\cos q_1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & L_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_2^1 = \begin{bmatrix} \cos q_2 & -\sin q_2 & 0 & L_2 \cos q_2 \\ \sin q_2 & \cos q_2 & 0 & L_2 \sin q_2 \\ 0 & 0 & 1 & L_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_3^2 = \begin{bmatrix} \cos q_3 & 0 & \sin q_3 & 0 \\ \sin q_3 & 0 & -\cos q_3 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & L_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_4^3 = \begin{bmatrix} \cos q_4 & 0 & \sin q_4 & 0 \\ \sin q_4 & 0 & -\cos q_4 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & L_5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_5^4 = \begin{bmatrix} \cos q_5 & 0 & -\sin q_5 & 0 \\ \sin q_5 & 0 & \cos q_5 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_6^5 = \begin{bmatrix} \cos q_6 & -\sin q_6 & 0 & 0 \\ \sin q_6 & \cos q_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & L_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

โดยอาศัยหลักการ Homogeneous transformation จะได้สมการจลศาสตร์ไปข้างหน้า (Forward Kinematic) ของปลายแขนกล 6 แกน ซึ่งตำแหน่งของปลายแขนกลจะเป็นฟังก์ชันที่แสดงโดยเมตริกซ์ ดังในสมการที่ (7) (Reza N.Jazar, 2010)

$$T_6^0 = T_1^0 T_2^1 T_3^2 T_4^3 T_5^4 T_6^5 \quad (7)$$

ในส่วนการคำนวณจลศาสตร์แบบผกผัน (Inverse Kinematic) ของแขนกล 6 แกน จะอาศัยหลักการคำนวณหาจาโคเบียน (Jacobian) ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วเชิงเส้นของปลายแขนและความเร็วเชิงมุมของแต่ละข้อต่อ ดังแสดงในสมการที่ (8) (Mark W. Spong, Seth Hutchinson, and M.Vidyasagar, 2005)

$$\dot{x}_6 = J(q)\dot{q} \quad (8)$$

โดยที่

$$J(q) = \frac{\partial f}{\partial q} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial q_1} & \frac{\partial f}{\partial q_2} & \dots & \frac{\partial f}{\partial q_6} \end{bmatrix} \quad (9)$$

เมื่อ

$f = T_6^0 [x_0 \ y_0 \ z_0]^T$ คือ เวกเตอร์ตำแหน่งปลายแขนกลหรือก้านโยงที่ 6

$\dot{q} = \begin{bmatrix} \dot{q}_1 & \dot{q}_2 & \dots & \dot{q}_6 \end{bmatrix}^T$ คือ เวกเตอร์ความเร็ว

เชิงมุมของแต่ละข้อต่อ

$\dot{x}_6 = \begin{bmatrix} \dot{x}_6 & \dot{y}_6 & \dot{z}_6 \end{bmatrix}^T$ คือ เวกเตอร์ความเร็ว

เชิงเส้นของปลายแขนกลหรือปลายก้านโยงที่ 6

เพื่อหาจลศาสตร์แบบผกผันในเชิงตัวเลข (Numerical Inverse Kinematic) นั้นจะสามารถกระทำได้ โดยการหาเมตริกซ์ผกผันของจาโคเบียน (J^{-1}) แล้วนำมาคูณกับการเปลี่ยนแปลงของตำแหน่งปลายแขนกล (Δx_6) เพื่อคำนวณหาการเปลี่ยนแปลงมุมการหมุนของแต่ละข้อต่อ (Δq) ดังในสมการที่ (10)

$$dq = J^{-1}(q)dx_6 \quad (10)$$

หรือ

$$\Delta q \approx J^{-1}(q)\Delta x_6 \quad (11)$$

โดยที่

$$\Delta x_6 = (x_6(t+1) - x_6(t)) \quad (12)$$

เมื่อ

$x_6(t+1)$ คือ ตำแหน่งของปลายแขนกลที่เวลา $t+1$

$x_6(t)$ คือ ตำแหน่งของปลายแขนกลที่เวลาปัจจุบัน t

จากสมการ (11) การคำนวณหา J^{-1} สามารถใช้ Jacobian pseudo-inverse ($J^\#$) ในสมการที่ (13) แต่อาจมีบางตำแหน่งที่ไม่สามารถหาค่า J^{-1} ได้ เนื่องจากเกิดสภาวะเอกฐาน (Singularity) ในบางรูปแบบในการเคลื่อนที่ของก้านโยงต่างๆ แต่จะสามารถป้องกันการเกิด Singularity ได้โดยการใช้ Jacobian singularity robust inverse (J^*) ในกรณีที่ไม่สามารถหาค่า $J^\#$ ได้ ดังแสดงในสมการที่ (14) (Prempraneerach, P., 2010)

$$J^\# = J^T (JJ^T)^{-1} \quad (13)$$

$$J^* = J^T (JJ^T + kI)^{-1} \quad (14)$$

เมื่อ

J^* คือ Jacobian singularity robust inverse

k คือ ค่าคงตัวที่เป็นบวกและมีค่าน้อยๆ

I คือ เมตริกเอกลักษณ์

การควบคุมตำแหน่งของปลายแขนกลด้วยการควบคุมแบบ PID เป็นการรวมการควบคุมแบบสัดส่วน (K_p) แบบอินทิกรัล (K_i) และแบบอนุพันธ์เข้าด้วยกัน (K_d) โดยนำค่าความผิดพลาด $e(t)$ มาใช้เพื่อปรับค่าสัญญาณขาเข้า โดยตัวควบคุมจะพยายามลดค่าผิดพลาดให้เหลือน้อยลงด้วยการปรับค่าสัญญาณขาเข้าของกระบวนการ ดังแสดงในสมการ (15) (Karl Johan Aström & Richard M. Murray, 2009)

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t)dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (15)$$

ทดลองหาค่าจลศาสตร์แบบผกผันโดยใช้ตัวควบคุมแบบสัดส่วน และให้ค่าความผิดพลาดของปลายแขนกลที่เวลาใดๆ มีค่าเป็น $e(t)$ ดังแสดงในสมการที่ (16)

$$e(t) = x_s - x_6(t) \quad (16)$$

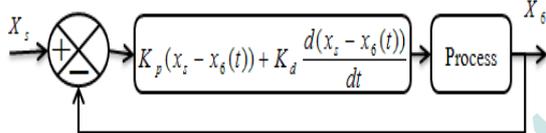
เมื่อ $x_6(t)$ คือ ตำแหน่งของปลายแขนกล

x_s คือ ตำแหน่งเป้าหมายของปลายแขนกล

ดังนั้นจะได้สัญญาณการควบคุมแขนกลในสมการที่ (17)

$$u(t) = K_p(x_s - x_6(t)) + K_d \frac{d(x_s - x_6(t))}{dt} \quad (17)$$

สามารถเขียน Flow Chart ของการควบคุมดังแสดงในรูปที่ 5



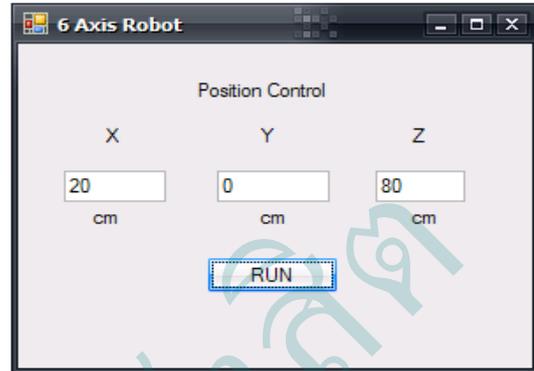
รูปที่ 5 Flow Chart การควบคุมแขนกลด้วยตัวควบคุมสัดส่วน

ทำการทดสอบการเคลื่อนที่ของแขนกลตามขั้นตอนตามรูปที่ 5 โดยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ด้วย MATLAB โดยการปรับค่าตัวควบคุมขยายสัดส่วน เพื่อศึกษาลักษณะการเคลื่อนที่ของแขนกล

4. การควบคุมแขนกล 6 แกนผ่านเน็ตเวิร์ค

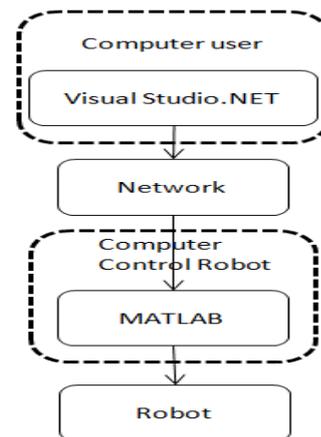
การส่งคำสั่งการควบคุมตำแหน่งของปลายแขนกล 6 แกน ผ่านระบบเน็ตเวิร์ค โดยการส่งค่าตำแหน่งของปลายแขนกล โดยอาศัยการทำงานร่วมกันระหว่างซอฟต์แวร์ Visual Studio.NET และ MATLAB ซึ่งการเชื่อมโยงการทำงานนั้น จะแบ่งส่วนของการทำงาน โดยใช้ Visual Studio.NET กำหนดและส่งค่าเป้าหมายการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลผ่านโครงข่ายเน็ตเวิร์คไปยัง MATLAB จากนั้น MATLAB จะทำการประมวลผลเพื่อคำนวณหาองศาการหมุนของแต่ละข้อต่อ

จากสมการจลศาสตร์แบบผกผันในสมการที่ (11) ภายใต้การควบคุมแบบ PID Control



รูปที่ 6 โปรแกรมควบคุมตำแหน่งของปลายแขนกลด้วย Visual Studio.NET

โดยหลักการสำคัญของการทำงานของ Visual Studio.NET จะส่งคำสั่งของตำแหน่งแขนกลไปในรูปแบบของ Text File ซึ่งจะประกอบด้วยตำแหน่งของปลายแขนกลบนพิกัด (X, Y, Z) และ MATLAB จะทำการอ่านค่าพิกัดที่ระบุไว้ใน Text File ที่ส่งมาผ่านระบบเน็ตเวิร์ค ซึ่งกระบวนการส่งถ่ายข้อมูลการควบคุมแขนกล จะทำงานตามขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 7

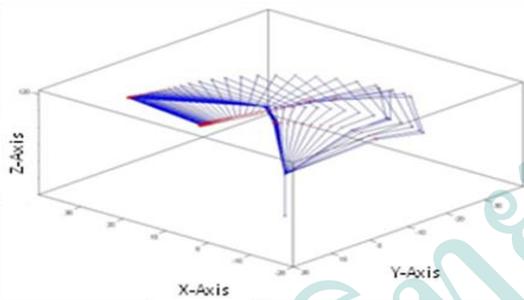


รูปที่ 7 ขั้นตอนการส่งค่าตำแหน่งแขนกลผ่านเน็ตเวิร์ค

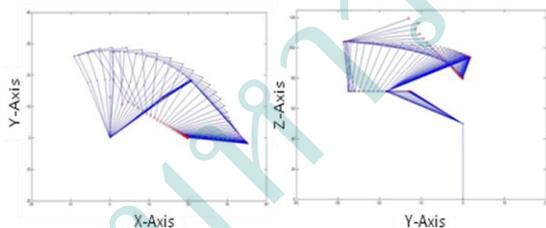
5. ผลการวิจัยและข้อวิจารณ์

จากผลการทดลองพบว่า เมื่อมีการป้อนคำสั่งให้ปลายแขนกลเคลื่อนที่ไปในพิกัด (X,Y,Z) ลงบน

หน้าต่างโปรแกรม Visual Studio.NET จากนั้นคำพิกัดปลายแขนกลจะถูกส่งผ่านเน็ตเวิร์คไปยังโปรแกรม MALAB เพื่อประมวลผลการคำนวณจลศาสตร์ของแขนกล 6 แขน จากการทดลองพบว่า เมื่อมีการส่งข้อมูลจากโปรแกรม Visual Studio.NET โดยคอมพิวเตอร์เครื่องส่งไปยังโปรแกรม MATLAB ที่ได้ติดตั้งอยู่บนคอมพิวเตอร์เครื่องรับนั้น จะเริ่มประมวลผลการคำนวณสมการจลศาสตร์หลังจากที่ป้อนคำสั่งประมาณไม่เกิน 0.5 วินาที จึงแสดงให้เห็นว่าคอมพิวเตอร์ทั้งสองเครื่องสามารถทำงานร่วมกันได้ โดยการเชื่อมโยงการทำงานผ่านระบบเน็ตเวิร์คระหว่าง คอมพิวเตอร์ส่งการ กับคอมพิวเตอร์ควบคุมแขนกลได้จริง ตามที่ได้ออกแบบไว้



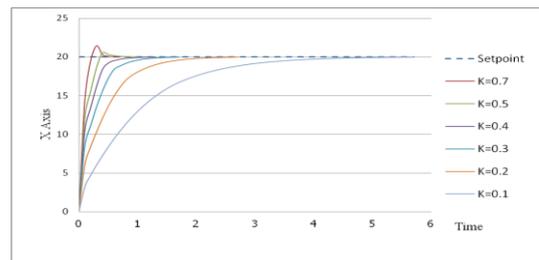
รูปที่ 8 การเคลื่อนที่ของแขนกล 6 แขนบนพิกัด XYZ



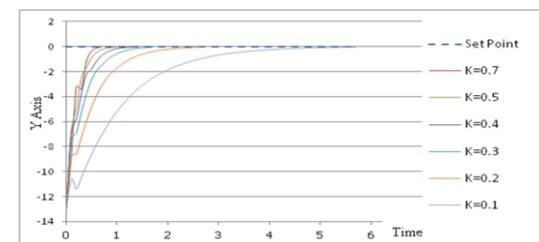
รูปที่ 9 การเคลื่อนที่ของแขนกล 6 แขนบนระนาบ XY และ YZ

ในรูปที่ 8 แสดงการเคลื่อนที่ของแขนกลในแบบสามมิติจากจุดเริ่มต้นที่พิกัด (0, -13, 119.5) ไปยังจุดสุดท้ายที่พิกัด (20, 0, 80) เมื่อพิจารณาการเคลื่อนที่ในช่วงเริ่มต้น ของการเคลื่อนที่ของแขนกล ดังในรูปที่ 8 และ 9 จะพบว่าระยะการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลที่เวลา t และ $t+1$ นั้นจะมีค่ามาก เนื่องจากค่า Δx_6 ที่มีค่ามากในช่วงเริ่มต้นของการเคลื่อนที่ จะส่งผลให้มุมการ

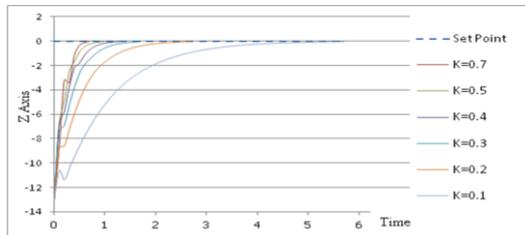
หมุนของแต่ละแกน Δq มีค่า มากตามไปด้วย ซึ่งจะสอดคล้องกับสมการ $\Delta q \approx J^{-1}(q)\Delta x$ และจากผลการจำลองทางคณิตศาสตร์พบว่า Δx_6 นั้นจะสอดคล้องกับการเคลื่อนที่ของแขนกลในแบบสามมิติ โดยจะมีค่าความผิดพลาดตอนเริ่มต้นที่มีค่ามากและตำแหน่งของปลายแขนจะลู่เข้าพิกัดเป้าหมายทั้งในแกน X, Y และ Z ดังแสดงในรูปที่ 8 และ 9 หรือการเคลื่อนที่ของแขนกลในช่วงแรกนั้นจะเข้าเป้าหมายได้รวดเร็ว และจะค่อยๆ ช้าลงเมื่อเข้าใกล้เป้าหมายมากขึ้น และตำแหน่งสุดท้ายของการเคลื่อนที่จะมีค่าความผิดพลาดจากตำแหน่งเป้าหมายไม่เกิน 1 มิลลิเมตร ซึ่งมีค่าความคลาดเคลื่อนที่น้อยกว่า เมื่อเทียบกับงานวิจัยของ พรพรด จันทรทัต (2555) ที่ได้เสนอการพัฒนาซอฟต์แวร์สำหรับการควบคุมแขนกลแบบ 5 องศาอิสระที่มีค่าความคลาดเคลื่อนจากตำแหน่งเป้าหมายอยู่ที่ 5.5 มิลลิเมตร ซึ่งความแตกต่างของความคลาดเคลื่อน อาจเป็นผลจากการประยุกต์ใช้ระบบควบคุม PID เข้ากับแขนกล 6 แขนซึ่งจะช่วยปรับค่าความผิดพลาดให้ลดลงได้อย่างมีประสิทธิภาพ



รูปที่ 10 การเคลื่อนที่ของปลายแขนกลเข้าหาจุดพิกัดเป้าหมายในมิติ X



รูปที่ 11 การเคลื่อนที่ของปลายแขนกลเข้าหาจุดพิกัดเป้าหมายในมิติ Y



รูปที่ 12 การเคลื่อนที่ของปลายแขนกลเข้าหาจุดพิกัดเป้าหมายในมิติ Z

และจากการทดลองใช้ค่าการควบคุม อัตราขยายสัดส่วน เป็น 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 และ 0.6 ตามลำดับ พบว่าการใช้ค่าการควบคุมแบบสัดส่วนที่มีค่าน้อย ($k = 0.1, 0.2$) จะส่งผลให้ปลายแขนกลเคลื่อนที่เข้าหาตำแหน่งเป้าหมายได้ช้า ซึ่งจะใช้เวลาในการเข้าหาตำแหน่งเป้าหมาย ดังแสดงในรูปที่ 10, 11 และ 12 ดังนั้นจึงได้ทำการปรับค่าการควบคุมอัตราขยายสัดส่วนให้มีค่าสูงขึ้น ($k = 0.5, 0.6$) พบว่าแขนกลจะเคลื่อนที่เข้าหาเป้าหมายได้เร็วขึ้น หรือ ค่าความผิดพลาดของตำแหน่งลดลงอย่างรวดเร็ว แต่จะก่อให้เกิดการ Over Shoot ซึ่งจะทำให้แขนกลเคลื่อนที่เลยตำแหน่งเป้าหมาย และแกว่งไปมาก่อนเข้าหาตำแหน่งเป้าหมาย ซึ่งไม่เหมาะสมกับการนำไปใช้งานที่ต้องการความแม่นยำสูง จากผลการทดลองพบว่าค่าการควบคุมอัตราขยายสัดส่วนที่เหมาะสมสำหรับแขนกล ควรอยู่ระหว่าง 0.3-0.4 ซึ่งทำให้การเคลื่อนที่ไม่ช้าเกินไป และไม่ทำให้เกิดปัญหา Over Shoot ขึ้น ซึ่งปลายแขนกลจะลู่อเข้าหาตำแหน่งเป้าหมายได้อย่างรวดเร็ว แม่นยำ และลดค่าความผิดพลาดให้น้อยได้อย่างมีประสิทธิภาพ

6. บทสรุป

การควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกล 6 แกน ผ่านเน็ตเวิร์คสามารถทำได้โดยอาศัยการเชื่อมโยงการทำงานร่วมกันระหว่างคอมพิวเตอร์ตั้งการซึ่งมีโปรแกรม Visual Studio.NET ส่งค่าพิกัดเป้าหมายการ

เคลื่อนที่ผ่านระบบเน็ตเวิร์คในรูปแบบของ Text File และคอมพิวเตอร์ที่ใช้ควบคุมแขนกลจะรับค่าพิกัดเป้าหมาย และประมวลผลด้วยโปรแกรม MATLAB เพื่อควบคุมให้แขนกลเคลื่อนที่ไปยังเป้าหมายที่ระบุไว้ โดยอาศัยหลักการทางจลศาสตร์ เพื่อนำมาคำนวณหาตำแหน่งแบบเป็นขั้น (incremental position control) และควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกลด้วยระบบควบคุมแบบ PID ซึ่งทำให้แขนกลเคลื่อนที่เข้าหาตำแหน่งเป้าหมายได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งตำแหน่งสุดท้ายของการเคลื่อนที่นั้นจะมีค่าผิดพลาดไม่เกิน 1 มิลลิเมตร จากตำแหน่งเป้าหมาย

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณทางมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ได้ให้การสนับสนุนการทำวิจัยครั้งนี้

8. เอกสารอ้างอิง

- ทวีเดช ศิริธนาพิพัฒน์. (2552). การควบคุมระบบแบบเปิด-ปิด และแบบ PID ในชุดฝึกระบบควบคุม. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23 พฤศจิกายน 2552. จังหวัดเชียงใหม่.
- พรพรด จันทรรัตน์. (2555). การพัฒนาซอฟต์แวร์ควบคุมแขนกลเพื่อคนพิการ. การประชุมทางวิชาการระดับชาติ ด้านคอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ ครั้งที่ 8 ปี 2555. จังหวัดชลบุรี.
- วิบูลย์ แสงวีระพันธุ์ศิริ. (2551). ระบบแขนกลนำและตาม 6 องศาอิสระสำหรับงานขนาดเล็ก. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทยครั้งที่ 22 ประจำปี 2551. มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต.

- Bruno Siciliano, Lorenzo, Luigi Villani & Giuseppe Oriolo. (2009). Robotics Modelling Planning and Control. Springer ISBN: 978-1-84628-641-4
- John J. Cragg. (2004). Introduction to Robotics Mechanical and Control, International Edition. Third Edition. Pearson Prentice Hall, Pearson Education International. ISBN 0-13-123629-6.
- Karl Johan Aström & Richard M. Murray. (2009). Feedback Systems. Princeton University Press New Jersey. ISBN-13: 978-0-691-13576-2 .
- Mark W. Spong, Seth Hutchinson, and M.Vidyasagar. (2005). Robot Modeling and Control. JOHN WILEY & SONG,INC. ISBN: 978-0-471-64990-8
- Prempraneerach, P. (2010). Implementation of Resolved Motion Rate Controller with 5-Axis Robot Manipulator Arm. The First TSME International Conference on Mechanical Engineering 20-22 October, 2010, Ubon Ratchathani.
- Reza N.Jazar. (2010). Theory of Applied Robotics Kinematics, Dynamics and control. Springer New York Dordrecht Heidelberg London. ISBN 978-1-4419-1749-2.