

Received: May 31, 2022

Revised: Oct 25, 2022

Accepted: Nov 4, 2022

การศึกษาจลนศาสตร์และการสร้างแบบจำลองของหุ่นยนต์แขนกลอุตสาหกรรมด้วยโปรแกรมแมทแลป

A STUDY OF KINEMATICS AND MODELING OF INDUSTRIAL ROBOT ARM USING MATLAB

สุรัชชัย เหมหิรัญ กิตติคม นนทประสาธ พงษ์นรินทร์ สว่างวงศ์
 กลุ่มวิจัยด้านการควบคุมอัตโนมัติและการจัดการพลังงาน สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

Surachai Hemhirun Kittikom Nantprasat Pongnarin Savangvong

Research Section: Automatic Control and Energy Management, Department of Mechanical Engineering,
 Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Krungthep (RMUTK)

E-mail: surachai.h@mail.rmutk.ac.th

บทคัดย่อ

การฝึกอบรมและจัดประสบการณ์ให้กับผู้เรียนเข้าใจการทำงานของหุ่นยนต์แขนกลอุตสาหกรรมด้วยแบบจำลองก่อนที่จะลงมือปฏิบัติจริงมีความสำคัญอย่างมาก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาจลนศาสตร์ไปข้างหน้า จลนศาสตร์ผกผัน และการสร้างแบบจำลองหุ่นยนต์แขนกลอุตสาหกรรมด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ โดยการดำเนินงานมี 3 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนแรกเป็นการสร้างต้นแบบหุ่นยนต์แขนกลจำลองที่มี 5 แกนอิสระด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยออกแบบ ขั้นตอนต่อไปสร้างเมทริกซ์เอกพันธ์ตามหลักการของเดนาวิตและฮาเทนเบิร์ก และใช้โปรแกรมแมทแลปซิมูเลชันสร้างแบบจำลองทางจลนศาสตร์ของหุ่นยนต์แขนกล และขั้นตอนสุดท้ายเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองด้วยการเปรียบเทียบการแสดงผลค่าตำแหน่งปลายแขนกลระหว่างโปรแกรมแมทแลปกับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยออกแบบ พบว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นแสดงผลค่าตำแหน่งปลายแขนกลเช่นเดียวกับโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยออกแบบ ซึ่งที่ระดับการแสดงผลเป็น 2 จุดทศนิยม ผลการคำนวณมีความถูกต้องสมบูรณ์ นอกจากนี้การแสดงผลของแบบจำลองที่สร้างขึ้นสามารถเป็นสื่อการสอนเสมือนจริงให้กับผู้เรียนได้อีกทางเลือกหนึ่งด้วย

คำสำคัญ: หุ่นยนต์แขนกลอุตสาหกรรม จลนศาสตร์ไปข้างหน้า จลนศาสตร์ผกผัน การสร้างแบบจำลองหุ่นยนต์

Abstract

Training aims to provide an experience for learners in order to understand how industrial robots function using simulated robots prior to performing with the one in real world is fairly crucial. Therefore, this research is conducted to study forward kinematics, invert kinematics, and robot modeling using the widely used software, MATLAB. The study consists of three steps: (1) to create a simulated 5-Degree of Freedom (DOF) robot arm using computer-aided design (CAD), (2) to transform the transformation matrix of the robotic arm based on the principles of Denavit-Hartenberg and MATLAB Simulink has been used for kinematics modeling, (3) to validate the model by comparing the end-effector (EE) display between the results from MATLAB and CAD program. The study finds that the created model renders the position of the EE which is consistent with the result yielded by the CAD. Furthermore, with the two-decimal-points display, the result is found to be more accurate. Finally, the displayed results from the model can be used as an effective virtual learning tool for the learners.

Keywords: Industrial robot arm, Forward kinematics, Inverse kinematics, Robot modeling

บทนำ

อุตสาหกรรมหุ่นยนต์ภายใต้กลุ่มอุตสาหกรรมใหม่ (The New S-Curve) ของประเทศไทยจากการเปลี่ยนถ่ายเข้าสู่ยุคอุตสาหกรรม 4.0 ที่ขับเคลื่อนด้วยเครื่องจักรและระบบอัตโนมัติที่ทันสมัยอย่างหุ่นยนต์แขนกลที่เข้ามาทดแทนการใช้แรงงานจากมนุษย์ ตลอดจนการพัฒนาวัตกรรมการพัฒนาหุ่นยนต์แขนกลอุตสาหกรรมที่ใช้ตัวรับรู้ (Sensors) เพื่อรับรู้สัมผัสต่างๆ ร่วมกับเทคโนโลยีการเรียนรู้ของเครื่องจักร (Machine Learning) ทำให้หุ่นยนต์มีการเคลื่อนที่เช่นเดียวกับมนุษย์ (Rahul, Ankush, Ashish, & Ajay, 2017) ซึ่งความก้าวหน้าของเทคโนโลยีสมัยใหม่ดังกล่าวข้างต้นนั้น แรงงานจะต้องมีการพัฒนาสมรรถนะในการทำงานที่มีความรู้ (Knowledge) และทักษะ (Skill) ในการปฏิบัติงานที่สูงขึ้น (Thanyrat & et al., 2021) นั้นเป็นเรื่องที่สำคัญอย่างมาก เพื่อเป็นกำลังขับเคลื่อนอุตสาหกรรมในอนาคต

ทำให้หลายสถาบันการศึกษาพัฒนาหลักสูตรหรือเพิ่มหน่วยการเรียนรู้เพิ่มเติม รวมถึงจัดหลักสูตรระยะสั้นที่สอดคล้องกับหลักสูตรพัฒนาฝีมือแรงงาน กระทรวงแรงงานให้กับนักศึกษาและผู้สนใจเข้ามาเรียนรู้ เพื่อให้ความรู้และจัดประสบการณ์ให้กับผู้เรียนเข้าใจในภาคทฤษฎีที่ต้องเชื่อมโยงความรู้กับการความคุมการทำงานของหุ่นยนต์ก่อนการจบการศึกษาหรือก่อนการได้ลงมือปฏิบัติงานกับหุ่นยนต์แขนกลอุตสาหกรรมจริง แต่หากสถานศึกษาที่ไม่มีครุภัณฑ์หุ่นยนต์แขนกลอาจทำได้เพียงการสอนในภาคทฤษฎีเบื้องต้นเท่านั้น เช่นนี้อาจทำให้ผู้เรียนไม่เกิดความเข้าใจและไม่เห็นภาพความเชื่อมโยงความรู้ระหว่างภาคทฤษฎี (Theoretical) กับภาคปฏิบัติ (Practical) ซึ่งหากขาดความรู้ความเข้าใจอาจเป็นสาเหตุให้เกิดอันตรายต่อผู้เรียนหรือเกิดความเสียหายต่อหุ่นยนต์แขนกลอุตสาหกรรมที่มีราคาต่อหนึ่งหน่วยสูงได้

ดังนั้นผู้วิจัยขอเสนอแนวทางการสอนด้วยสื่อเสมือนจริงด้วยการประยุกต์ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบร่วมกับโปรแกรมแม่เหล็ก เพื่อทำให้การศึกษาด้านจลนศาสตร์ รวมถึงการสร้างแบบจำลองแสดงผลการควบคุมตำแหน่งของปลายแขนกล ที่ประกอบด้วยการสร้างต้นแบบหุ่นยนต์แขนกลอุตสาหกรรม การศึกษาจลนศาสตร์ไปข้างหน้า จลนศาสตร์ผกผัน และการแสดงผลการควบคุมแขนกล ทั้งหมดนี้จะทำให้ผู้เรียนและผู้สนใจด้านวิทยาการหุ่นยนต์เข้าใจการสั่งการควบคุมหุ่นยนต์แขนกลเบื้องต้นได้

วัตถุประสงค์

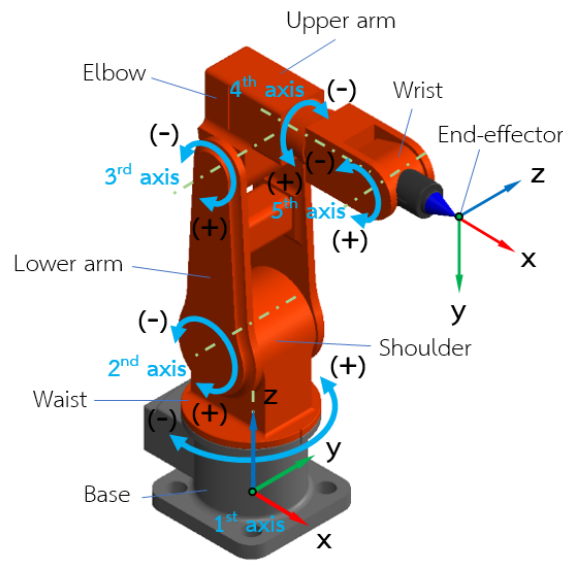
เพื่อศึกษาจลนศาสตร์ของหุ่นยนต์และสร้างแบบจำลองแสดงผลการควบคุมแขนกล

วิธีดำเนินการวิจัย

เพื่อให้ได้แบบจำลองที่สามารถแสดงผลการควบคุมเสมือนจริง มีลำดับการดำเนินการ 3 ขั้นตอน คือ 1) การสร้างต้นแบบหุ่นยนต์แขนกลอุตสาหกรรมจำลอง 2) การศึกษาทางจลนศาสตร์และการสร้างแบบจำลองสำหรับแสดงผลการควบคุมแขนกล และ 3) การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่สร้างขึ้น โดยในแต่ละขั้นตอนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. การสร้างต้นแบบหุ่นยนต์แขนกลอุตสาหกรรมจำลอง

งานวิจัยฉบับนี้นำเสนอการสร้างหุ่นยนต์แขนกลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกล (Computer-Aided Design, CAD) จากซอฟต์แวร์ SolidWorks สามารถวาดขึ้นพร้อมกำหนดขนาดและลักษณะของหุ่นยนต์ได้ตามความต้องการหรือสามารถโหลด (Download) ต้นแบบหุ่นยนต์อุตสาหกรรมจากสังคมออนไลน์ (Farial, 2020) โดยหุ่นยนต์แขนกลอุตสาหกรรมจำลองที่ศึกษาเป็นชนิดข้อต่อ (Articulated Robot Arm) ที่เลียนแบบร่างกายมนุษย์ช่วงแขนประกอบด้วยข้อต่อหมุน (Revolute Joints) หรือแกนหมุนอิสระ (Degree of freedom, DOF) จำนวน 5 แกน (5-DOF) นับตามลำดับจากฐาน (Base) หรือส่วนสะเอว (Waist) หัวไหล่ (Shoulder) ข้อศอก (Elbow) ท่อนแขน (Upper arm) และข้อมือ (Wrist) รวมถึงการกำหนดทิศทางการหมุน ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 หุ่นยนต์แขนกลจำลองแบบ 5 แกนอิสระ จากซอฟต์แวร์ SolidWorks

2. จลนศาสตร์ และการสร้างแบบจำลอง

ในส่วนนี้ประกอบด้วย พารามิเตอร์ จลนศาสตร์ของหุ่นยนต์แขนกล และการสร้างแบบจำลองสำหรับแสดงผลการควบคุมแขนกล แต่ละส่วนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 พารามิเตอร์ของหุ่นยนต์แขนกล (Definition of Robot arm's Parameters) หุ่นยนต์แขนกลอุตสาหกรรมจำลอง จากภาพที่ 1 นำชิ้นส่วน (links) มาประกอบ (Assembly) กันแบบอนุกรม (Serial link) รวม 6 ชิ้น ดังตารางที่ 1 พร้อมระบุพารามิเตอร์ (Parameter) ตามหลักวิธีของเดนาวิทและฮาเทนเบิร์ก (Denavit–Hartenberg, D-H) สำหรับการศึกษาทางจลนศาสตร์ ในแนวทางเดียวกับงานวิจัยของ (Varhegyi, Melik-Merkumians, Steinegger, Halmetschlager-Funek, & Schitter, 2017) ที่ได้นำเสนอพารามิเตอร์ของหุ่นยนต์อุตสาหกรรม รุ่น ABB IRB 120 ซึ่งเหมาะสมกับหุ่นยนต์ที่มีลักษณะข้อต่อใน 2 รูปแบบ คือแบบข้อต่อหมุน (Revolute Joint) กับแบบข้อต่อเลื่อนเข้า-ออก (Prismatic Joint) เท่านั้น โดยพารามิเตอร์ และการกำหนดทิศทางของแกนอ้างอิงหรือกรอบอ้างอิง (frame, \mathcal{F}_i) มีดังนี้

1. ข้อต่อหมุนหรือแกนหมุน (Joint angle, θ_i) คือ มุมระหว่างแกน x_{i-1} กับ x_i ที่หมุนรอบแกน z_i
2. ชิ้นส่วนแขนกลที่เอียง (Link offset, d_i) คือ ระยะห่างระหว่างแกน x_{i-1} กับ x_i ที่วัดตามแกน z_i
3. ความยาวชิ้นส่วนแขนกล (Link length, a_i) คือ ระยะเยื้องระหว่างกรอบอ้างอิง \mathcal{F}_{i-1} กับ \mathcal{F}_i ที่วัดตามแกน x_i
4. ชิ้นส่วนแขนกลบิด (Link twist, α_i) คือ มุมระหว่างแกน z_{i-1} กับ z_i ที่หมุนรอบแกน x_i

โดยที่ตัวห้อย (Subscript, i) เริ่มจากฐานนับลำดับเป็น 0 ตามลำดับ ดังตารางที่ 2 นอกจากนี้การกำหนดทิศทางแกน x , y และ z มีกฎ 4 ข้อ คือ 1) ต้องวางแกน z_i ตามแกนหมุนของข้อต่อแขนกล 2) วางแกน x_i ให้ตั้งฉากกับแกน z_{i-1} 3) กำหนดแกน y_i ตามกฎมือขวา (Right-hand rule) และ 4) แนวของแกน x_i ที่กำหนดตามข้อ 2) ต้องตัดกับแนวแกน z_{i-1} (Intersect) ดังภาพที่ 2

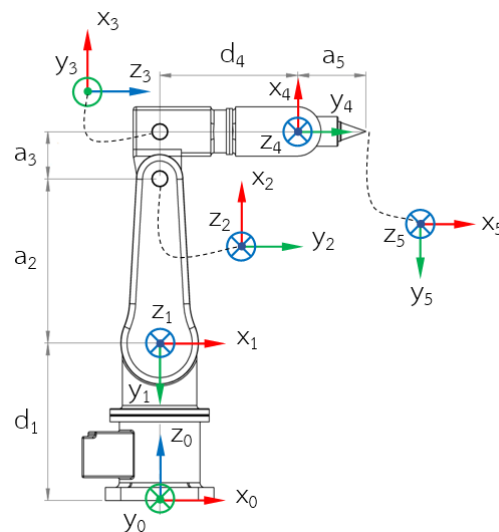
2.2 จลนศาสตร์ (Kinematics) หมายถึงการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างพิกัดการหมุนของข้อต่อต่างๆ (Joints Coordinate, q) กับพิกัดฉาก (Cartesian Coordinate, p) ซึ่งเป็นพื้นฐานของการศึกษาศาสตร์ทางวิทยาการหุ่นยนต์ เพื่อระบุ ตำแหน่ง (Position) ความเร็ว (Velocity) ความเร่ง (Acceleration) และเวลา (Time) ของการเคลื่อนที่ส่วนปลายแขนกล (End-Effector, EE) โดยไม่พิจารณาแรงที่มากระทำต่อแขนกลหรือแรงที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของแขนกลเอง การศึกษาจลนศาสตร์ มี 2 ส่วน คือการสร้างสมการจลนศาสตร์ไปข้างหน้า และการวิเคราะห์หาสมการจลนศาสตร์ย้อนกลับ โดยงานวิจัยฉบับนี้เป็นการศึกษาจลนศาสตร์เพื่อระบุตำแหน่งของการเคลื่อนที่ส่วนปลายแขนกล เท่านั้น

ตารางที่ 1 ความยาวของชิ้นส่วนแขนกล (Link distance)

Links	Parameters	Distance (mm)
Link 1: Base or waist	-	-
Link 2: Waist to the shoulder	d_1	480
Link 3: Lower arm	a_2	500
Link 4: Upper arm	a_3 ,	145
Link 5: Elbow to the wrist	d_4	445
Link 6: Wrist to the end-effector	a_5	220

ตารางที่ 2 D-H พารามิเตอร์ของหุ่นยนต์ 5 แกนอิสระและช่วงการหมุนของข้อต่อ

Joint(i)	θ_i (deg)	d_i (mm)	a_i (mm)	α_i (deg)	Range(deg)
1	θ_1	d_1	0	-90	-180 to 180
2	$\theta_2 - 90$	0	a_2	0	-90 to 90
3	θ_3	0	a_3	-90	
4	θ_4	d_4	0	90	
5	$\theta_5 + 90$	0	a_5	0	



ภาพที่ 2 แกนอ้างอิงของหุ่นยนต์

2.2.1 จลนศาสตร์ไปข้างหน้า (Forward Kinematics, FK) หมายถึงการหาค่าตำแหน่งปลายแขนกลในระบบพิกัดฉาก (Position: p_x , p_y และ p_z) และท่าทางของปลายแขนกล (Orientations: θ_x , θ_y และ θ_z) จากการกำหนดมุมการหมุนที่ข้อต่อต่างๆ ในระบบพิกัดเชิงขั้ว โดยใช้การแปลงเมทริกซ์เอกพันธ์ (Homogeneous transformation matrices, T_i^{i-1}) ดังสมการ (1) และ (2) (Iliukhin, Mitkovskii, Bizyanova, & Akopyan, 2017) ทำให้สามารถแทนค่าการเปลี่ยนตำแหน่งระหว่างกรอบอ้างอิงจากฐาน (Base frame, \mathcal{S}_0) จนถึงส่วนปลายแขนกล ด้วยการคูณแปลงเมทริกซ์เอกพันธ์ตามลำดับชั้นข้อต่อหมุน (Joints, i) ดังสมการที่ (3) ซึ่งผลการแปลงเมทริกซ์ในหลักที่ 4 แถวที่ 1, 2 และ 3 ของสมการที่ (4) แสดงสมการสำหรับคำนวณหาตำแหน่งพิกัดที่ส่วนปลายแขนกล ดังสมการที่ (5), (6) และ (7) ตามลำดับ

เมื่อ $c\theta_i = \cos\theta_i$, $s\theta_i = \sin\theta_i$, $c\alpha_i = \cos\alpha_i$, $s\alpha_i = \sin\alpha_i$ $c\theta_{23} = \cos(\theta_2 + \theta_3)$ และ $s\theta_{23} = \sin(\theta_2 + \theta_3)$

$$T_i^{i-1} = Rot_{z_{i-1}, \theta_i} Trans_{z_{i-1}, d_i} Trans_{x_i, a_i} Rot_{x_i, \alpha_i} \quad (1)$$

$$T_i^{i-1} = \begin{bmatrix} R_i^{i-1} & p_i^{i-1} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c\theta_i & -c\alpha_i \cdot s\theta_i & s\alpha_i \cdot s\theta_i & a_i \cdot c\theta_i \\ s\theta_i & c\alpha_i \cdot c\theta_i & -s\alpha_i \cdot c\theta_i & a_i \cdot s\theta_i \\ 0 & s\alpha_i & c\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$T_1^0 = \begin{bmatrix} c\theta_1 & 0 & -s\theta_1 & 0 \\ s\theta_1 & 0 & c\theta_1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad T_2^1 = \begin{bmatrix} s\theta_2 & c\theta_2 & 0 & a_2 s\theta_2 \\ -c\theta_2 & s\theta_2 & 0 & -a_2 c\theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad T_3^2 = \begin{bmatrix} c\theta_3 & 0 & -s\theta_3 & a_3 c\theta_3 \\ s\theta_3 & 0 & c\theta_3 & a_3 s\theta_3 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$T_4^3 = \begin{bmatrix} c\theta_4 & 0 & s\theta_4 & 0 \\ s\theta_4 & 0 & -c\theta_4 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad T_5^4 = \begin{bmatrix} -s\theta_5 & -c\theta_5 & 0 & -a_5 s\theta_5 \\ c\theta_5 & -s\theta_5 & 0 & a_5 c\theta_5 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$T_5^0 = T_1^0 T_2^1 T_3^2 T_4^3 T_5^4 = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_{5x}^0 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_{5y}^0 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_{5z}^0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$p_{5x}^0 = c\theta_1 (a_2 s\theta_2 + d_4 c\theta_{23} + a_3 s\theta_{23}) + a_5 c\theta_1 (c\theta_5 c\theta_{23} - s\theta_5 c\theta_4 s\theta_{23}) - a_5 s\theta_1 s\theta_4 s\theta_5 \quad (5)$$

$$p_{5y}^0 = s\theta_1 (a_2 s\theta_2 + d_4 c\theta_{23} + a_3 s\theta_{23}) + a_5 s\theta_1 (c\theta_5 c\theta_{23} - s\theta_5 c\theta_4 s\theta_{23}) + a_5 c\theta_1 s\theta_4 s\theta_5 \quad (6)$$

$$p_{5z}^0 = a_2 c\theta_2 + a_3 c\theta_{23} - d_4 s\theta_{23} - a_5 (s_{23} c\theta_5 + c\theta_{23} c\theta_4 s\theta_5) + d_1 \quad (7)$$

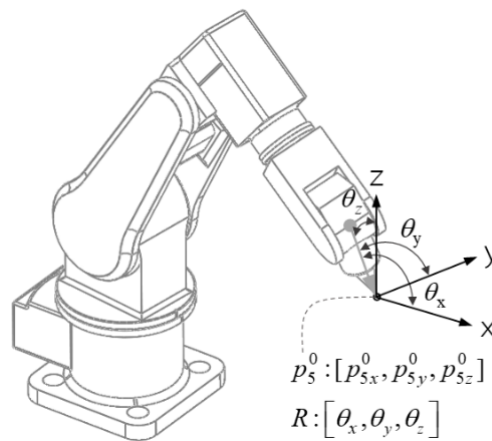
2.2.2 จลนศาสตร์ย้อนกลับ (Inverse Kinematics, IK) หมายถึงการหาค่ามุมการหมุนของข้อต่อต่างๆ ในระบบพิกัดเชิงขั้ว จากการกำหนดพิกัดปลายแขนกลในระบบพิกัดฉาก และท่าทางของปลายแขนกล ดังภาพที่ 3 ด้วยวิธีการวิเคราะห์ด้วยวิธีทางเรขาคณิต (Geometrical Solution Approach) ตามขั้นตอน ดังนี้

- การหาค่ามุมข้อต่อหมุนที่ 1 (θ_1) เริ่มจากปรับมุมมองของหุ่นยนต์ทางด้านข้าง (Side view) กับการหาค่าการแปลงเมทริกซ์ย้อนกลับ (Inverse Transformation Matrix, $inv(T_i^{i-1})$) จากแกนอ้างอิงที่ 5 ย้อนกลับ

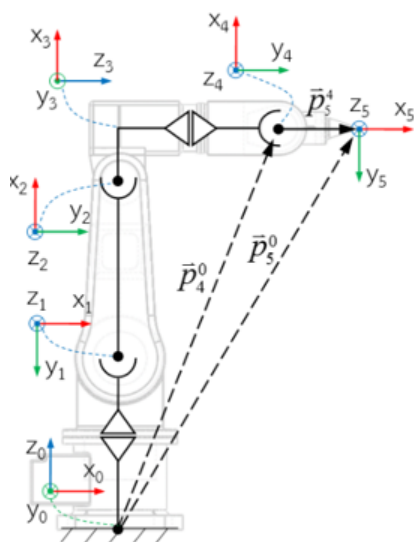
มายังแกนอ้างอิงที่ 4 ที่ข้อต่อหมุน (T_4^0) สมการที่ (8) เพื่อหาค่าตำแหน่งพิกัดที่แกนอ้างอิงที่ 4 เทียบกับแกนอ้างอิงที่ 0 ทำให้สามารถคำนวณค่ามุมข้อต่อหมุนที่ 1 ได้ ดังภาพที่ 5 ด้วยสมการที่ (9)

$$T_4^0 = \text{inv}(T_5^4)T_5^0 = T_4^5T_5^0 = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_{4x}^0 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_{4y}^0 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_{4z}^0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

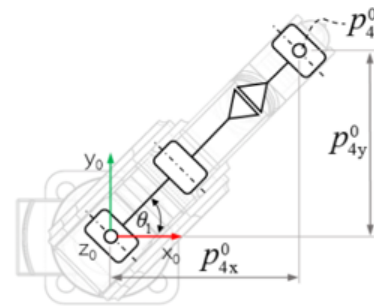
$$\theta_1 = a \tan 2(p_{4y}^0, p_{4x}^0) \quad (9)$$



ภาพที่ 3 การระบุพิกัดและท่าทางของปลายแขนกล



ภาพที่ 4 ภาพฉายด้านข้างของหุ่นยนต์แขนกล



ภาพที่ 5 ภาพฉายด้านบนของหุ่นยนต์แขนกล

- การหาค่ามุมข้อต่อหมุนที่ 2 และ 3 (θ_2 และ θ_3) จากขนาดทางเรขาคณิตของภาพที่ 6 โดยใช้ค่าเวกเตอร์ตำแหน่ง (r_4) นำมาหาขนาดระยะระหว่างแกนอ้างอิงที่ 4 เทียบกับแกนอ้างอิงที่ 0 จากสามเหลี่ยมด้วยกฎของโคไซน์ (law of cosine) และกฎของไซน์ (law of sine) ดังสมการที่ (10) และ (11) ตามลำดับ ทำให้คำนวณหาค่ามุมข้อต่อหมุนที่ 2 และ 3 จากสมการที่ (13) และสมการที่ (14) ตามลำดับ

$$\gamma_1 = a \cos \left[\frac{\left(|p_4^1| \right)^2 + (d_1)^2 - \left(|p_4^0| \right)^2}{2d_1 \left(|p_4^1| \right)} \right] \quad (10)$$

$$\beta_2 = a \cos \left[\frac{(a_2)^2 + (l_1)^2 - \left(|p_4^1| \right)^2}{2(a_2)(l_1)} \right] \quad (11)$$

$$\frac{l_1}{\sin \beta_1} = \frac{|p_4^1|}{\sin \beta_2} = \frac{a_2}{\sin \beta_3}; \beta_1 = \sin^{-1} \left[\frac{l_1 \sin \beta_2}{|p_4^1|} \right] \quad (12)$$

$$\theta_2 = 180^\circ - \gamma_1 - \beta_1 \quad (13)$$

$$\theta_3 = 180^\circ - \alpha_1 - \beta_2 \quad (14)$$

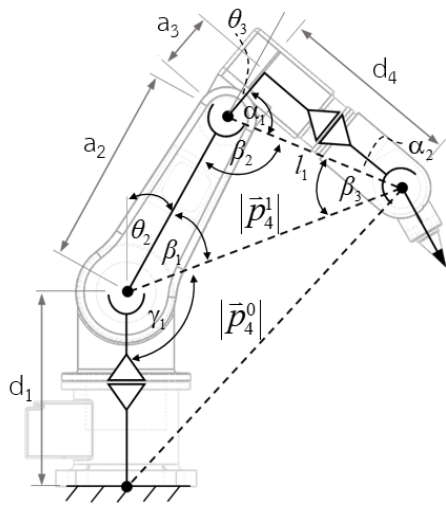
- การหาค่ามุมข้อต่อหมุนที่ 4 และ 5 (θ_4 และ θ_5) จากขนาดของเวกเตอร์ตำแหน่งแกนอ้างอิงที่ 5 เทียบกับแกนอ้างอิงที่ 3 (r_{51}) ดังภาพประกอบที่ 7 ด้วยการคูณเมทริกซ์เอกพันธ์ ดังสมการที่ (15) ทั้งนี้ในกรณีมุมข้อต่อหมุนที่ 5 ไม่ได้อยู่ที่มุมศูนย์องศา ทำให้สามารถคำนวณหาค่ามุมข้อต่อหมุนที่ 4 และ 5 ได้จากสมการที่ (16), (17) และ (18) ตามลำดับ

$$T_5^3 = T_4^3 T_5^4 \quad (15)$$

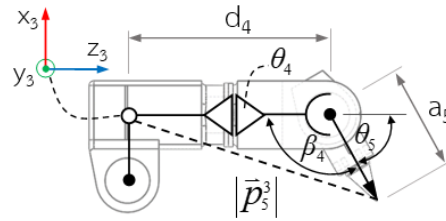
$$\beta_4 = a \cos \left[\frac{(d_4)^2 + (a_5)^2 - \left(|p_5^3| \right)^2}{2(d_4)(a_5)} \right] \quad (16)$$

$$\theta_4 = a \tan 2(p_{5y}^4, p_{5x}^4) \quad (17)$$

$$\theta_5 = 180^\circ - \beta_4 \quad (18)$$



ภาพที่ 6 ขนาดทางเรขาคณิตของแขนกล แกนอ้างอิงที่ 4 เทียบกับแกนอ้างอิงที่ 0



ภาพที่ 7 ขนาดทางเรขาคณิตของแขนกล แกนอ้างอิงที่ 5 เทียบกับแกนอ้างอิงที่ 3

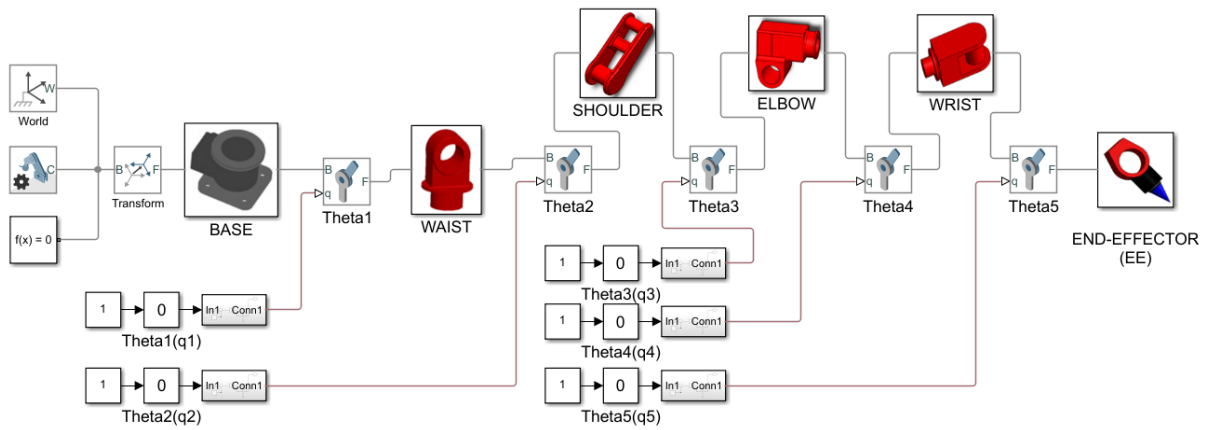
2.2.3 การสร้างแบบจำลองจากซอฟต์แวร์คอมพิวเตอร์ประเภทโปรแกรมช่วยคำนวณทางวิศวกรรม (Computer Aided Engineering, CAE) เช่น โปรแกรมแมทแลป (MATLAB) ภายใต้โปรแกรมย่อยแมทแลปซิมูลิงค์ (MALAB/Simulink) นำมาประยุกต์ช่วยในการแสดงผลการควบคุมขณะผู้ควบคุม (User) แขนกล มี 2 ขั้นตอน คือ 1) การนำเข้าต้นแบบและการสร้างสั่งการควบคุม และ 2) การสร้างแบบจำลองสำหรับแสดงผลการวิเคราะห์ทางจลนศาสตร์

1. การนำเข้าต้นแบบและการสั่งการควบคุม เริ่มจากการออกแบบหุ่นยนต์แขนกลจำลองหรือต้นแบบหุ่นยนต์ จากนั้นนำออกต้นแบบ (Export) จากโปรแกรม CAD นำเข้า (Import) สู้อุปกรณ์แมทแลป (MATLAB) และสร้างการสั่งการควบคุมตั้งแผนภาพบล็อกไดอะแกรม ดังภาพที่ 8

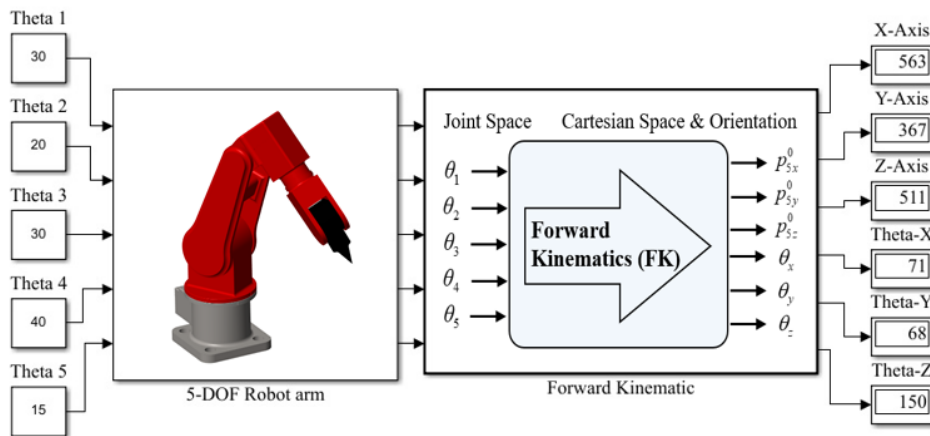
2. การสร้างแบบจำลองแสดงผลการวิเคราะห์จลนศาสตร์ แบ่งเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นการคำนวณค่าจลนศาสตร์ไปข้างหน้า เริ่มจากการสร้างบล็อกย่อยของระบบ (Subsystem) ที่รับค่าจากผู้ใช้งาน (User) จากการป้อนค่ามุมการหมุนของข้อต่อทั้ง 5 ($\theta_1 - \theta_5$) ร่วมกับบล็อกชนิดแมทแลปฟังก์ชัน (MATLAB Function) ที่ภายในบรรจุสมการจลนศาสตร์ไปข้างหน้า ดังภาพที่ 9 และส่วนที่สองเป็นการวิเคราะห์ค่าจลนศาสตร์ย้อนกลับ เพื่อแปลงค่าย้อนกลับจากระบบพิกัดฉากของปลายแขนกลกลับไปเป็นค่ามุมการหมุนของข้อต่อทั้ง 5 ดังภาพที่ 10

2.3 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองหุ่นยนต์แขนกล

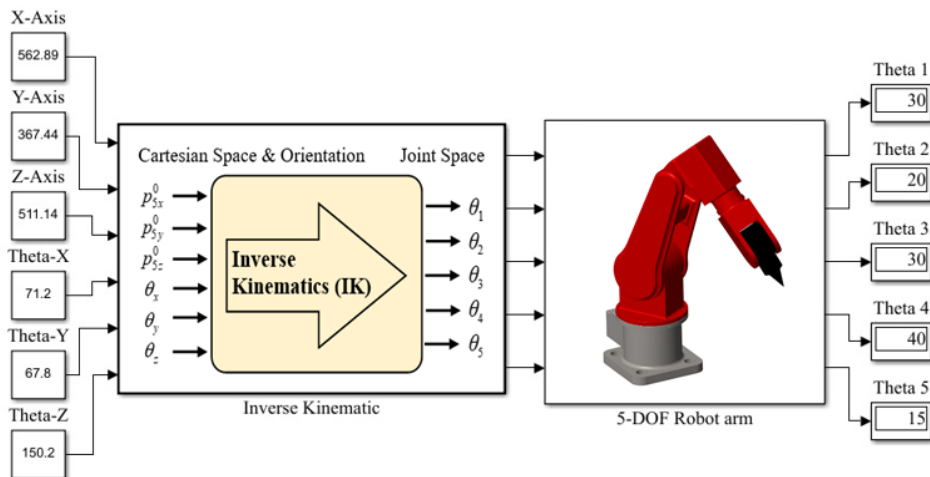
สมการจลนศาสตร์ไปข้างหน้าใช้คำนวณหาพิกัดที่ส่วนปลายแขนกล (End-effector, EE) จากการระบุค่ามุมการหมุนของข้อต่อต่าง ๆ และในทางกลับกันการวิเคราะห์จลนศาสตร์ย้อนกลับเป็นการหาค่ามุมการหมุนของข้อต่อต่าง ๆ ($\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$ และ θ_5) จากการระบุค่าพิกัดที่ส่วนปลายแขนกลและท่าทางของหุ่นยนต์แขนกล ซึ่งจลนศาสตร์ทั้งสองนี้เป็นส่วนสำคัญสำหรับการนำไปประยุกต์สร้างส่วนควบคุมของหุ่นยนต์อุตสาหกรรม ดังนั้นเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองที่สร้างขึ้น ผู้วิจัยใช้การแสดงผลของโปรแกรม CAD แทนการใช้หุ่นยนต์อุตสาหกรรมจริง (Shah, Osman, & Zainuddin, 2020) ซึ่งการทดสอบจะระบุค่ามุมการหมุนของข้อต่อต่าง ๆ ให้กับแบบจำลอง ดังภาพที่ 11 และเก็บข้อมูลการแสดงผลดังตารางที่ 3 (นำเสนอ จำนวน 4 ชุดข้อมูล) จากทั้งหมด 10 ชุดข้อมูล เพื่อเปรียบเทียบกับแสดงผลจากแบบจำลองของหุ่นยนต์แขนกลที่สร้างขึ้นด้วยโปรแกรมแมทแลป ต่อไป



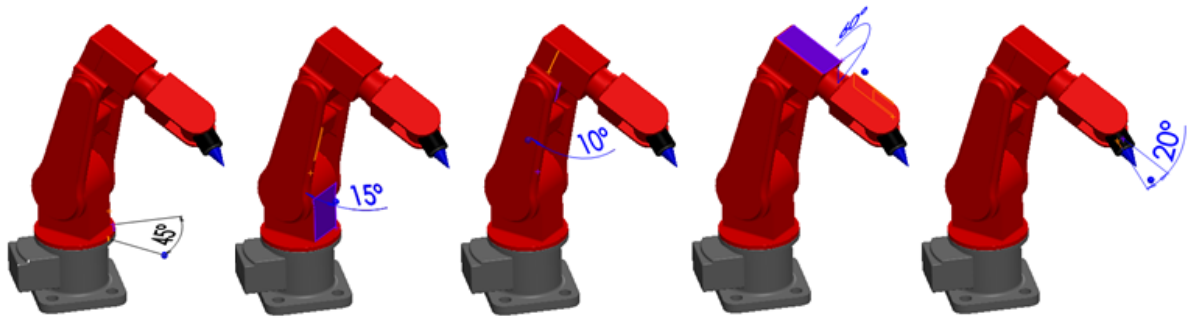
ภาพที่ 8 แผนภาพบล็อกไดอะแกรมหุ่นยนต์



ภาพที่ 9 แผนภาพบล็อกการวิเคราะห์จลนศาสตร์ไปข้างหน้า

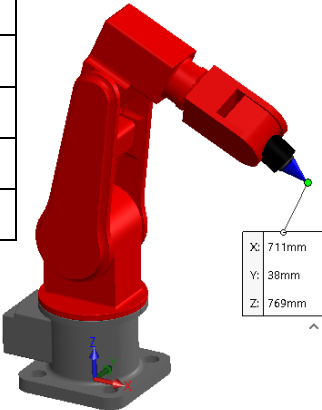
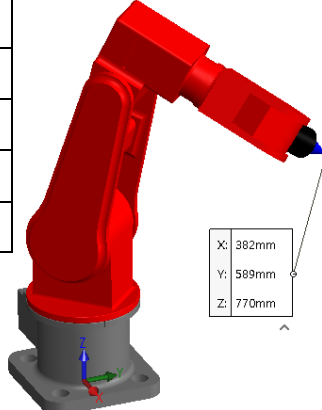
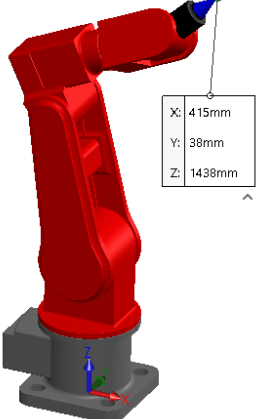
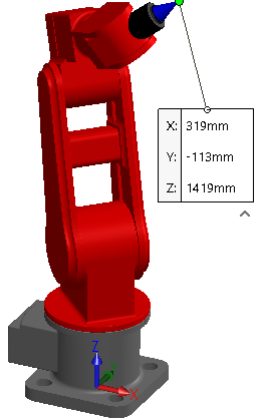


ภาพที่ 10 แผนภาพบล็อกการวิเคราะห์จลนศาสตร์ย้อนกลับ



ภาพที่ 11 การระบุค่ามุมการหมุนของข้อต่อต่าง ๆ ภายในโปรแกรม CAD

ตารางที่ 3 การแสดงผลของหุ่นยนต์แขนกลตามการระบุค่ามุมการหมุนของข้อต่อต่าง ๆ

ชุดข้อมูล	การแสดงผลของหุ่นยนต์แขนกลด้วยโปรแกรม CAD (ซอฟต์แวร์ SolidWorks)																					
1, 2	<table border="1" data-bbox="395 891 552 1149"> <tr><td>q1</td><td>0°</td></tr> <tr><td>q2</td><td>10°</td></tr> <tr><td>q3</td><td>15°</td></tr> <tr><td>q4</td><td>30°</td></tr> <tr><td>q5</td><td>20°</td></tr> </table> 	q1	0°	q2	10°	q3	15°	q4	30°	q5	20°	<table border="1" data-bbox="903 898 1059 1155"> <tr><td>q1</td><td>45°</td></tr> <tr><td>q2</td><td>15°</td></tr> <tr><td>q3</td><td>10°</td></tr> <tr><td>q4</td><td>60°</td></tr> <tr><td>q5</td><td>50°</td></tr> </table> 	q1	45°	q2	15°	q3	10°	q4	60°	q5	50°
q1	0°																					
q2	10°																					
q3	15°																					
q4	30°																					
q5	20°																					
q1	45°																					
q2	15°																					
q3	10°																					
q4	60°																					
q5	50°																					
3, 4	<table border="1" data-bbox="395 1357 552 1615"> <tr><td>q1</td><td>0°</td></tr> <tr><td>q2</td><td>-10°</td></tr> <tr><td>q3</td><td>-15°</td></tr> <tr><td>q4</td><td>-30°</td></tr> <tr><td>q5</td><td>-20°</td></tr> </table> 	q1	0°	q2	-10°	q3	-15°	q4	-30°	q5	-20°	<table border="1" data-bbox="903 1357 1059 1615"> <tr><td>q1</td><td>-45°</td></tr> <tr><td>q2</td><td>-15°</td></tr> <tr><td>q3</td><td>-10°</td></tr> <tr><td>q4</td><td>-60°</td></tr> <tr><td>q5</td><td>-50°</td></tr> </table> 	q1	-45°	q2	-15°	q3	-10°	q4	-60°	q5	-50°
q1	0°																					
q2	-10°																					
q3	-15°																					
q4	-30°																					
q5	-20°																					
q1	-45°																					
q2	-15°																					
q3	-10°																					
q4	-60°																					
q5	-50°																					

เมื่อทำการระบุมุมการหมุนของแต่ละข้อต่อของหุ่นยนต์แขนกลต้นแบบเรียบร้อยแล้ว ผู้ควบคุมสามารถทราบถึงตำแหน่งส่วนปลาย (EE) ได้โปรแกรม CAD (SolidWorks) ด้วยการเลือกบนแถบคำสั่ง Evaluate จากนั้นเลือก Measure ทำให้ทราบตำแหน่งในระบบพิกัดฉาก (X, Y และ Z) เทียบกับแกนอ้างอิงที่ฐานของหุ่นยนต์แขนกล

ผลการวิจัย

แบบจำลองหุ่นยนต์แขนกลอุตสาหกรรมที่สร้างขึ้น มีการดำเนินการใน 2 หัวข้อ คือ 1) การเปรียบเทียบการแสดงผลทางจลนศาสตร์ระหว่างโปรแกรม CAD กับแบบจำลอง และ 2) แบบจำลองการควบคุมของหุ่นยนต์แขนกล

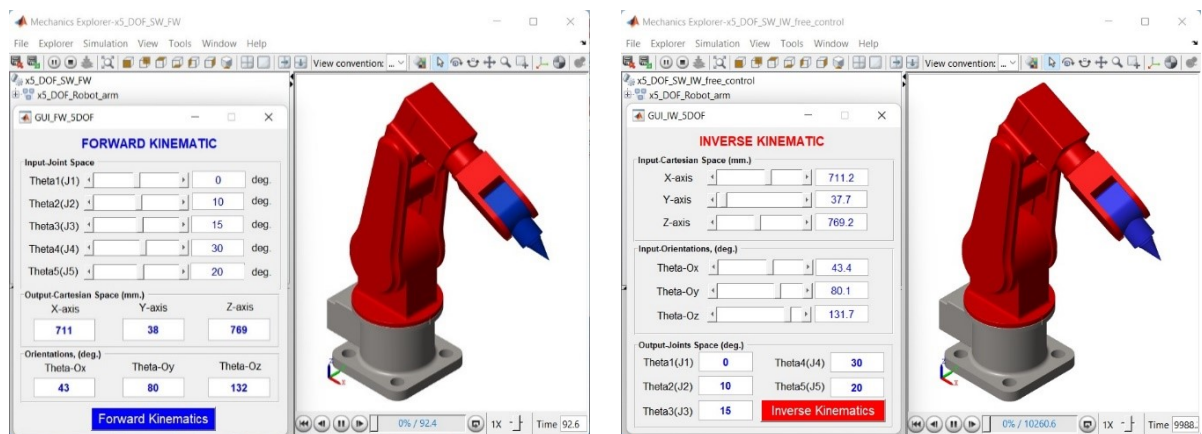
1 การเปรียบเทียบการแสดงผลทางจลนศาสตร์

1.1 แบบจำลองจลนศาสตร์ไปข้างหน้า ตรวจสอบความถูกต้องด้วยการกำหนดค่ามุมการหมุนของข้อต่อต่าง ๆ (Joints angle) ตามข้อมูลตารางที่ 3 ร่วมกับการกำหนดค่าแบบสุ่ม (random values) ด้วยฟังก์ชันของโปรแกรมแมทแลป “randi” รวมเป็น 10 ชุดข้อมูล (Ting, Hairi, Zaman, Ibrahim, & Moubark, 2021) ดังตารางที่ 4 จากนั้นนำชุดข้อมูลการหมุนของข้อต่อต่าง ๆ ป้อนลงแบบจำลอง ดังภาพที่ 13 ก) ตามลำดับ

ตารางที่ 4 ข้อมูลการทดสอบและผลการคำนวณค่าจลนศาสตร์ไปข้างหน้า

ชุดข้อมูล	การระบุค่าจากผู้ใช้ (User input)					ผลการคำนวณของแบบจำลอง (Output of modeling)					
	มุมการหมุนของข้อต่อต่าง ๆ (deg)					พิกัดปลายแขนกล (mm)			ท่าทางแขนกล (deg)		
	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	Px	Py	Pz	θ_x	θ_y	θ_z
1*	0	10	15	30	20	711	38	769	43	80	132
2*	45	15	10	60	50	382	589	770	100	40	128
3*	0	-10	-15	-30	-20	415	38	1438	43	80	48
4*	-45	-15	-10	-60	-50	319	-113	1419	40	80	52
5	108	44	-21	-41	36	-210	920	640	79	49	136
6	150	-20	48	33	-50	-371	320	927	123	37	75
7	-129	28	53	15	-44	-420	-455	371	129	119	127
8	-135	-14	54	32	28	-248	-326	598	97	118	151
9	126	32	46	-69	1	-317	442	283	96	80	168
10	166	47	38	0	71	-338	84	301	28	103	114

หมายเหตุ: *คือชุดข้อมูลจากแสดงผลของหุ่นยนต์แขนกลจำลองด้วยโปรแกรม CAD



ภาพที่ 13 แบบจำลองทางจลนศาสตร์ด้วยโปรแกรมแมทแลป ก) จลนศาสตร์ไปข้างหน้า และ ข) จลนศาสตร์ย้อนกลับ

การแสดงผลของแบบจำลองสามารถแสดงค่าพิกัดส่วนปลายแขนกลและท่าทางของแขนกล พร้อมกับแสดงภาพแบบจำลองหุ่นยนต์แขนกลอุตสาหกรรมในเวลาเดียวกัน ซึ่งเมื่อนำเข้าชุดข้อมูลการหมุนของข้อต่อ ตามตารางที่ 4 พบว่าผลการคำนวณค่าพิกัดส่วนปลายแขนกลตรงกับการแสดงผลของโปรแกรม CAD ดังตัวอย่างการแสดงผล ตารางที่ 3 ชุดข้อมูลลำดับที่ 1-4 และจากการทำการสุ่มตัวเลขค่ามุมการหมุนของข้อต่อ จึงสรุปได้ว่าการสร้างตาราง D-H พารามิเตอร์ และการคำนวณค่าการแปลงเมทริกซ์เอกพันธ์ (Homogeneous transformation matrices) เป็นขั้นตอนที่เป็นรูปแบบแน่นอนในการสร้างสมการจลนศาสตร์ไปข้างหน้าของหุ่นยนต์แขนกลอุตสาหกรรมได้ แต่มีความแตกต่างกันเล็กน้อยด้านทิศทางของแกนอ้างอิง (frame) ในแต่ละข้อต่อที่เป็นไปตามกฎการกำหนดทิศทางของแกนอ้างอิงดังที่นำเสนอแล้ว ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับงานบทความวิจัยที่มีจำนวนข้อต่อหมุนเท่ากัน (Qassem, Abuhadrous, & Elaydi, 2010), (Iliukhin et al., 2017) และ (Mehmet, 2021)

1.2. แบบจำลองจลนศาสตร์ย้อนกลับที่สร้างขึ้นมีการตรวจสอบความถูกต้องด้วยการกำหนดค่าพิกัดปลายแขนกล (Position) และท่าทางของแขนกล (Orientations) จากผลการคำนวณจลนศาสตร์ไปข้างหน้า เมื่อนำค่าดังกล่าวป้อนเข้าสู่แบบจำลองตามตารางที่ 5 ตามลำดับ พบว่าแบบจำลองสามารถแสดงค่ามุมการหมุนของข้อต่อต่าง ๆ พร้อมกับแสดงภาพแบบจำลองหุ่นยนต์แขนกลอุตสาหกรรมในเวลาเดียวกันได้อย่างถูกต้อง และยังพบว่าการปรับตำแหน่งทศนิยม (Decimal place, DP) เช่นการปรับ DP เป็น 0 ผลการคำนวณของชุดข้อมูลที่ 2, 4 และ 10 สามารถแสดงผลการคำนวณและแสดงภาพแบบจำลองที่ถูกต้อง เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบก่อนหน้า

ตารางที่ 5 ผลการคำนวณค่าจลนศาสตร์ย้อนกลับ

ชุดข้อมูล	การระบุค่าจากผู้ใช้ (User input)						ผลการคำนวณของแบบจำลอง (Output of modeling)					ทศนิยม (DP)
	พิกัดปลายแขนกล (mm)			ท่าทางแขนกล (deg)			มุมการหมุนของข้อต่อต่าง ๆ (deg)					
	Px	Py	Pz	θ_x	θ_y	θ_z	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	
1*	711	38	769	43	80	132	0	10	15	30	<u>18</u>	0
	711.2	37.7	769.2	43.4	80.1	131.7	0	10	15	30	20	1
2*	382	589	770	100	40	128	45	15	10	60	50	0
	415	38	1438	43	80	48	0	-10	-15	-30	<u>-19</u>	0
3*	414.9	37.7	1438.4	43.4	80.1	48.3	0	-10	-15	-30	-20	1
	4* 319	-113	1419	40	80	52	-45	-15	-10	-60	-50	0
5	-210	920	640	79	49	136	108	44	-21	-41	<u>37</u>	0
	-210.2	919.5	639.7	79.0	48.5	136.4	108	44	-21	-41	36	1
6	-371	320	927	123	37	75	150	-20	48	<u>34</u>	-50	0
	-371.0	319.7	927.3	123.0	37.3	74.6	150	-20	48	33	-50	1
7	-420	-455	371	129	119	127	-129	28	53	15	<u>-45</u>	0
	-420.0	-454.9	371.2	128.9	119.2	127.3	-129	28	53	15	-44	1
8	-248	-326	598	97	118	151	-135	-14	54	<u>31</u>	28	0
	-248.3	-325.2	598.1	97.0	118.2	150.8	-135	-14	54	32	28	1
9	-317	442	283	96	80	168	126	32	46	<u>-75</u>	3	0
	-316.9	441.5	283.2	96.0	80.1	168.4	126	32	46	<u>-67</u>	1	1
	-316.92	441.49	283.24	96.04	80.08	168.35	126	32	46	-69	1	2
10	-338	84	301	28	103	114	166	47	38	0	71	0

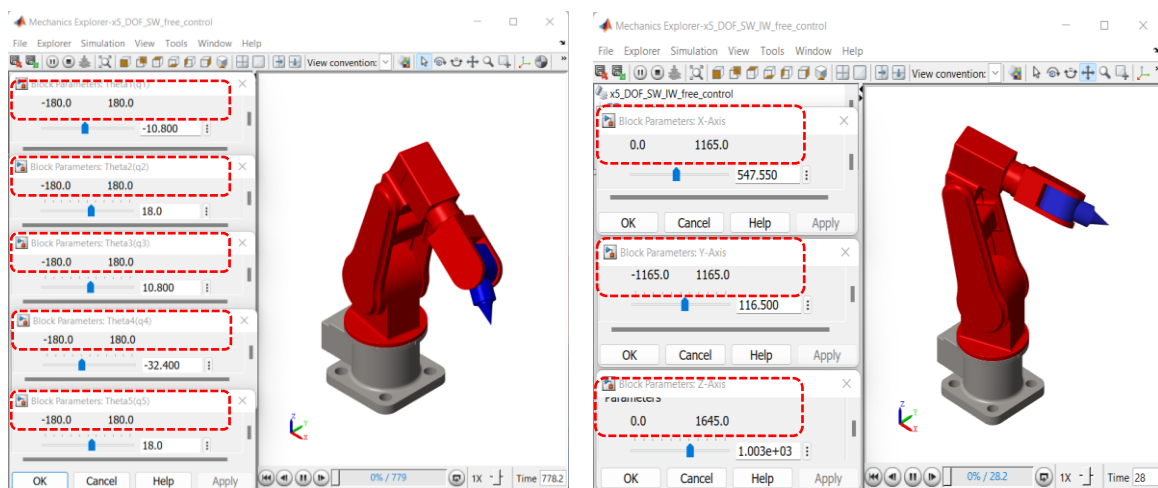
หมายเหตุ: *คือชุดข้อมูลการแสดงผลของหุ่นยนต์แขนกลจำลองด้วยโปรแกรม CAD และผลการคำนวณ xx คือข้อมูลที่คลาดเคลื่อนจากค่าที่ถูกต้อง

หากการแสดงผลของแบบจำลองไม่ปรับจำนวนตำแหน่งทศนิยมให้มีความละเอียดมากขึ้นก็จะทำให้ผลการคำนวณค่าเกิดความคลาดเคลื่อนไป 1-2 องศา และการปรับ DP เป็น 2 เพียงพอต่อการแสดงผลค่าการคำนวณของแบบจำลองจลนศาสตร์ย้อนกลับที่ให้ผลที่ถูกต้อง นอกจากนี้ค่าผลการคำนวณที่เกิดความคลาดเคลื่อนนั้นจะเกิดขึ้นที่มุมการหมุนของข้อต่อส่วนปลาย

แขนกล θ_4 และ θ_5 เนื่องจากค่าความคลาดเคลื่อนจากการบิดเศษที่มาจากรำดับของการคำนวณสอดคล้องกับ (Ting et al., 2021) และ (Hemhirun & Tanpradit, 2022)

2. แบบจำลองการควบคุมหุ่นยนต์แขนกลอุตสาหกรรม

จากแบบจำลองทางจลนศาสตร์ในขั้นตอนก่อนหน้ามาพัฒนา เพื่อให้ผู้ใช้งานสามารถเห็นการควบคุมใน 2 แบบแรก คือแบบควบคุมการหมุนของข้อต่อต่าง ๆ (Joint mode) ที่สามารถปรับแถบเลื่อนค่า (Slider bar) หรือระบุเป็นตัวเลขลงในช่องข้อมูล (ช่วงการหมุน ดังตารางที่ 2) ดังภาพที่ 14 ก) รูปแบบนี้ผู้ใช้งานแบบจำลองจะเข้าใจถึงทิศทาง การหมุนของข้อต่อแขนกลตามการศึกษาในภาคทฤษฎีการกำหนดแกนอ้างอิง และเห็นถึงขอบเขตของมุมการหมุนที่ไม่สามารถหมุนได้จากการขัดตัวของแขนกล และแบบที่สอง คือการควบคุมแบบเชิงเส้น (Linear mode) ที่ใช้การปรับแถบเลื่อน หรือระบุเป็นตัวเลข (ช่วง Px: -1165 ถึง 1165 มม., Py: -1165 ถึง 1165 มม., Pz: 0 ถึง 1645 มม.) เช่นเดียวกัน ดังภาพที่ 14 ข) แต่สำหรับรูปแบบนี้ผู้ใช้งานจะเห็นเมื่อท่าทางของปลายแขนกลอยู่ในตำแหน่งใดเมื่อปรับแถบเลื่อนในแนวแกน X-axis, Y-axis และ Z-axis แกนใดแกนหนึ่ง ที่ส่วนปลายแขนกลจะเลื่อนตามแกนพิกัดอ้างอิงที่ฐาน ทำให้ผู้ใช้งานเห็นการเคลื่อนที่แบบหมุนที่ข้อต่อต่าง ๆ พร้อมทั้งสัมพันธ์กับส่วนปลายที่เคลื่อนที่ในแนวเส้นตรงได้ นอกจากนี้ยังพบว่า การสั่งงานให้แขนกลเลื่อนตามแกนอ้างอิงผ่านจุดที่แขนกลเกิดภาวะเอกฐาน (Singularity) ผลการคำนวณของสมการจลนศาสตร์จะหาค่าตอบผิดพลาดและทำให้แบบจำลองหยุดการทำงานที่ต้องมีวิธีการหลีกเลี่ยงและแนวทางแก้ไข (Oetomo & Ang Jr, 2009) เพื่อให้เมื่อควบคุมผ่านในจุดที่เกิดภาวะเอกฐานแล้วแบบจำลองจะยังคงสามารถทำงานได้ ทั้งนี้การแสดงผลของแบบจำลองทั้งสองแบบจะแสดงผลตามเวลา (Real time) ขณะเมื่อผู้ใช้ปรับเปลี่ยนค่าการควบคุมแขนกล



ภาพที่ 14 แบบจำลองการควบคุมหุ่นยนต์แขนกล ก) Joints Mode และ ข) Linear Mode

จากขั้นตอนการสร้างต้นแบบแขนกล การศึกษาทางจลนศาสตร์ การสร้างแบบจำลอง และสุดท้ายได้แบบจำลองที่เหมาะสมเป็นสื่อการสอนเสมือนจริงที่ยืดหยุ่น สามารถอธิบายถึงการควบคุมหุ่นยนต์แขนกลอุตสาหกรรมที่เหมาะสมกับนักศึกษา ผู้อบรม ตลอดจนผู้สนใจที่สนใจการสร้างแบบจำลอง การควบคุมหุ่นยนต์แขนกลเบื้องต้น และเป็นพื้นฐานด้านการควบคุม ตลอดจนความตระหนักถึงความปลอดภัยต่อการควบคุมหุ่นยนต์แขนกลอุตสาหกรรมจริง (Industrial robot arm) ซึ่งจุดแข็งของงานวิจัยชิ้นนี้คือ 1) การนำเสนอขั้นตอนการนำเข้าต้นแบบที่สนใจศึกษาเข้าสู่การสร้างการแสดงผลของแบบจำลองเสมือนจริง 2) แสดงขั้นตอนวิธีการทางจลนศาสตร์ที่มีภาพประกอบทุกขั้นตอนมีการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลอง และ 3) การประยุกต์ใช้งานกับโปรแกรมพื้นฐานทางวิศวกรรมที่นักศึกษาหรือผู้สนใจสามารถเข้าถึงได้ เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยในแนวทางเดียวกัน (Alani, Abbar, & Abbood, 2020), (Xia, Xiao, & Ji, 2022) ที่ประยุกต์ใช้โปรแกรมแม่แบบในการสร้างแบบจำลองแต่มีความแตกต่างกันด้านการนำเข้าต้นแบบที่ผู้สนใจต้องการศึกษา และการประยุกต์ใช้โปรแกรม CAD แทนการใช้หุ่นยนต์แขนกลจริงในการทดสอบความถูกต้องของการคำนวณทางจลนศาสตร์ในแนวทางเดียวกับ (Cristoiu & Nicolescu, 2017)

สรุปผลวิจัยและอภิปรายผล

การจำลองการควบคุมหุ่นยนต์แขนกลเสมือนจริงด้วยโปรแกรมแมทแลป จากการนำเข้าต้นแบบหุ่นยนต์อุตสาหกรรม ทำให้สามารถเชื่อมโยงองค์ความรู้จากการศึกษาจลนศาสตร์ในภาคทฤษฎีกับภาคปฏิบัติที่ต้องกำหนดทิศทางและสั่งการควบคุมให้กับข้อต่อต่าง ๆ ของหุ่นยนต์แขนกล เพื่อให้แบบจำลองไปในทิศทางที่ถูกต้องและแม่นยำ ทำให้ผู้ใช้งานเข้าใจถึงช่วงขอบเขตการสั่งการควบคุมแบบแยกข้อต่อหมุน และการสั่งการควบคุมแบบเลื่อนตามแกนอ้างอิงหรือแบบเชิงเส้น นอกจากนี้ยังทำให้ผู้ใช้งานเกิดความคุ้นเคยกับการสั่งควบคุมและเกิดความตระหนักต่อการควบคุมผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นขณะการจำลอง ดังนั้นแบบจำลองที่จัดสร้างขึ้นเหมาะเป็นสื่อการสอนทางเลือกแบบเสริมประสบการณ์ในภาคทฤษฎีก่อนการฝึกภาคปฏิบัติกับหุ่นยนต์แขนกลอุตสาหกรรมจริงอีกแนวทางหนึ่งด้วย

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ที่ให้การสนับสนุน ซอฟต์แวร์ที่มีลิขสิทธิ์ SolidWorks EDU Edition 2010- 2011 NETWORK Serial Number 25734@rmutk-4c2643252 และขอขอบพระคุณบริษัท MathWorks MATLAB R2021a License 9389346 MathWorks Trial-13 Sep 2021.

เอกสารอ้างอิง

- [1] Alani, T., Abbar, A., & Abbood, M. (2020). Inverse Kinematics Analysis and Simulation of a 5 DOF Robotic Arm using MATLAB. *Al-Khwarizmi Engineering Journal*, 16, 10. doi:10.22153/kej.2020.12.001
- [2] Cristoiu, C., & Nicolescu, A. (2017). Validation of forward geometric models for ABB robots using virtual models and the software applications CATIA and ABB Robot Studio. *Proceedings in Journal of Manufacturing Systems*, 12(4), 145-153.
- [3] Farial, T. (2020). *Robotic Arm*. Retrieved. <https://grabcad.com/library/robotic-arm-226>
- [4] Hemhirun, S., & Tanpradit, D. (2022). Kinematics and Motion Modeling of a Robotic Arm using MATLAB Program. *Srinakharinwirot University Engineering Journal*, 17(1), 40-52.
- [5] Iliukhin, V., Mitkovskii, K., Bizyanova, D., & Akopyan, A. (2017). The modeling of inverse kinematics for 5 DOF manipulator. *Procedia Engineering*, 176, 498-505.
- [6] Mehmet, G. (2021). Kinematic Analysis of Open-Source 5 DoF Robot Arm. *Journal of Soft Computing and Artificial Intelligence*, 2(1), 9-18.
- [7] Oetomo, D., & Ang Jr, M. H. (2009). Singularity robust algorithm in serial manipulators. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 25(1), 122-134.
- [8] Qassem, M. A., Abuhadrous, I., & Elaydi, H. (2010). *Modeling and Simulation of 5 DOF educational robot arm*. [Paper presentation]. ICACC, Shenyang, China.
- [9] Rahul, G., Ankush, G., Ashish, Z., & Ajay, M. (2017). Review on Development of Industrial Robotic Arm. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 4(3), 1752-1755.
- [10] Shah, N. S. E. B., Osman, K., & Zainuddin, N. (2020). *5-Axis of Mitsubishi RV-2AJ Robotics Arm Modelling Using Solidworks*. [Paper presentation]. 16th IEEE International Colloquium on Signal Processing & Its Applications (CSPA).
- [11] Thanyrat, P., & et al. (2021). Human resource competency development to support the Thailand 4.0. *Nakhon Lampang Buddhist's Journal*, 10(1), 228-243.

- [12] Ting, H. Z., Hairi, M., Zaman, M., Ibrahim, M., & Moubark, A. (2021). Kinematic analysis for trajectory planning of open-source 4-DoF robot arm. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 12(6), 769-777.
- [13] Varhegyi, T., Melik-Merkumians, M., Steinegger, M., Halmetschlager-Funek, G., & Schitter, G. (2017). A Visual Servoing Approach for a Six Degrees-of-Freedom Industrial Robot by RGB-D Sensing. *Proceedings of the OAGM&ARW Joint Workshop 2017*. DOI: 10.3217/978-3-85125-524-9-14
- [14] Xia, G., Xiao, Z., & Ji, P. (2022, January. 8-9). *ABB-IRB120 Robot Modeling and Simulation Based on MATLAB*. [Paper presentation]. the 2022 International Seminar on Computer Science and Engineering Technology (SCSET).