

## การออกแบบและทดลองจริงของแขนกลหุ่นยนต์สำหรับเส้นทางการเคลื่อนที่ด้วยการ หาค่าเหมาะสมที่สุดแบบหลายฟังก์ชันวัตถุประสงค์

กิตติศักดิ์ แสนประสิทธิ์<sup>1\*</sup> นัฐพงษ์ เนินชิต<sup>2</sup> ปกรณ์เกียรติ ภูทองพลอย<sup>3</sup> คมยุทธ์ ไชยวงษ์<sup>4</sup>

คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเลย<sup>1\* 3 4</sup>

คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์<sup>2</sup>

อีเมล : kittisak.san@lru.ac.th<sup>1\*</sup>

วันที่รับบทความ 26 เมษายน 2568

วันแก้ไขบทความ 26 พฤษภาคม 2568

วันตอบรับบทความ 4 มิถุนายน 2568

### บทคัดย่อ

การเคลื่อนที่ของแขนกลหุ่นยนต์ (Robot Manipulator) สำหรับหยิบจับสิ่งของนั้น ได้รับความนิยมนิยมและถูกใช้ในอุตสาหกรรมมาอย่างยาวนาน งานวิจัยนี้ได้มีวัตถุประสงค์ 2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือ ฟังก์ชัน วัตถุประสงค์ที่ 1 คือ ค่าการกระตุก (jerk) ของข้อต่อ (joint) หุ่นยนต์แขนกลรวมน้อยที่สุด และฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 2 คือ ตำแหน่งสุดปลายในการหยิบจับวัตถุให้มีตำแหน่งหยิบใกล้วัตถุมากที่สุด โดยได้เปรียบเทียบวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบหลายฟังก์ชันวัตถุประสงค์จำนวน 3 วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดคือ 1) การหาค่าเหมาะสมที่สุดของขั้นตอนวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดของปลาวาฬแบบหลายฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Multi-objective Whale optimization Algorithm : MOWOA) 2) การหาค่าเหมาะสมที่สุดของขั้นตอนวิธีหมาป่าสีเทาแบบหลายฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Multi-objective Grey Wolf Optimizer: MOGWO) 3) การหาค่าเหมาะสมที่สุดของขั้นตอนของการค้นหาความบรรสานแบบหลายฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Multi-objective Harmony Search Optimization : MOHS) ซึ่งใช้การประเมินสมรรถนะของวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดโดยใช้ตัวบ่งชี้ขอบหน้าพาเรโต (pareto front indicator) ด้วยวิธีการปริมาตรหลายมิติ (hypervolume : HV) พร้อมกับแสดงค่าต่ำสุด, ค่าสูงสุด, ค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ตามหลักสถิติ ซึ่งได้ปริมาตรหลายมิติที่สูงสุดมีค่าเท่ากับ 192,877.48 ของวิธี MOWOA แสดงว่าวิธีการ MOWOA เป็นวิธีการที่ดีที่สุด และได้ทดลองจริงกับหุ่นยนต์ รุ่น RS020N ของบริษัท Kawasaki สามารถลดการกระตุกจากวิธีการลองผิดลองถูกของหุ่นยนต์จริง (Trial-and-error) ได้ 32.33 %

**คำสำคัญ :** การหาค่าเหมาะสมที่สุดของปลาวาฬ การหาค่าเหมาะสมที่สุดของขั้นตอนวิธีหมาป่าสีเทา การหาค่าเหมาะสมที่สุดของขั้นตอนของการค้นหาความบรรสาน วิธีการปริมาตรหลายมิติ

# The Design and Experimentation for Robot Manipulator by Multi-Objective Optimization Algorithm

Kittisak Sanprasit<sup>1\*</sup>, Nattapong Nernchad<sup>2</sup>, Pakonkiad Poogungploy<sup>3</sup>, Khomyuth Chaiwong<sup>4</sup>

Faculty of Industrial Technology, Loei Rajabhat University<sup>1\*,3,4</sup>

Faculty of Industrial Technology, Uttaradit Rajabhat University<sup>2</sup>

E – mail : kittisak.san@lru.ac.th<sup>1\*</sup>

Received 26 April 2025

Revised 26 May 2025

Accepted 4 June 2025

## Abstract

This research proposes an optimal path design for robot manipulator in picking up and holding things in the industry for a long time. Two objective functions are employed; 1) minimal jerk and 2) the minimum error oscillating of the object. The multi-objective optimization was used solving robot manipulator by comparing two algorithms: Multi-objective Whale optimization Algorithm (MOWOA), Multi-objective Grey Wolf Optimizer (MOGWO), Multi-objective Harmony Search Optimization (MOHS). The performance comparison was made based on the hypervolume (HV) indicator, minimum, maximum, average and standard deviation values according to statistics. MOWOA is superior to the other (HV : 192,877.48) and Experimentation in RS020N of Kawasaki Robot. It can reduce the jerk 32.33%.

**Keywords :** MOWOA, MOGWO, MOHS, hypervolume

## 1. บทนำ

การเคลื่อนที่ของแขนกลหุ่นยนต์ (Robot Manipulator) สำหรับหยิบจับสิ่งของนั้น ได้รับความนิยมนิยมและถูกใช้ในอุตสาหกรรมมาอย่างยาวนาน ซึ่งการออกแบบการเคลื่อนที่ของแขนกลหุ่นยนต์นั้น จะถูกออกแบบโดยใช้ความเชี่ยวชาญของมนุษย์ โดยมีเป้าหมายของการเคลื่อนที่ของส่วนปลาย (end of effector) เป็นสำคัญในการออกแบบการเคลื่อนที่หุ่นยนต์ ซึ่งบางครั้งไม่ได้คำนึงถึงการเคลื่อนที่ของข้อต่อหุ่นยนต์ที่เป็นอุปกรณ์มอเตอร์ เมื่อหุ่นยนต์มีการทำงานที่ต่อเนื่องและยาวนาน จะทำให้ข้อต่อหุ่นยนต์ได้รับความเสียหายและชำรุดได้ ซึ่งเป็นผลจากการเคลื่อนที่ของข้อต่อที่ไม่เหมาะสม อาจเกิดจากการกระตุก (jerk) ของข้อต่อนำมาซึ่งความเสียหายแก่มอเตอร์ได้

จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าการออกแบบเส้นทางการเคลื่อนที่ของส่วนปลาย (end of effector) ของแขนกลหุ่นยนต์จะต้องคำนึงถึงการเคลื่อนที่ของข้อต่อแขนกลหุ่นยนต์ประกอบเพื่อลดการกระตุก (jerk) ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดลดการกระตุกของแขนกลหุ่นยนต์โดย เริ่มจากสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหุ่นยนต์แขนกล ด้วยวิธีจลนศาสตร์ข้างหน้าของเดนาวิตและฮาร์เทนเบอร์เกอร์ (forward kinematics by Denavit-Hartenberg) (Reza N.Jazar, 2010) ในการคำนวณการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์นั้นจะต้องใช้วิธีการทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อนเป็นอย่างมาก ทำให้ผู้วิจัยต้องมีความสามารถทางคณิตศาสตร์ขั้นสูงและใช้เวลาค่อนข้างมาก ในการนี้ผู้วิจัยใช้วิธีการศึกษาสำนึกขั้นสูง (meta-heuristic algorithm) ซึ่งเป็นวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่ได้รับความนิยม โดยใช้แนวคิดการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบหลายฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (สุจินต์ บุรีรัตน์, 2556) ในการออกแบบการเคลื่อนที่ของแขนกลหุ่นยนต์ให้สอดคล้องกับฟังก์ชันวัตถุประสงค์จำนวน 2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 คือ ตำแหน่งสุดท้ายในการหยิบจับวัตถุให้มีตำแหน่งหยิบใกล้วัตถุมากที่สุด และฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 2 คือ ค่าการกระตุก (jerk) ของข้อต่อ (joint) รวมน้อยที่สุด โดยได้เปรียบเทียบวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบหลายฟังก์ชันวัตถุประสงค์จำนวน 3 วิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดคือ 1) การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของขั้นตอนวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของปลาฉลามแบบหลายฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Multi-objective Whale optimization Algorithm : MOWOA) 2) การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของขั้นตอนวิธีหมาป่าสีเทาแบบหลายฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Multi-objective Grey Wolf Optimizer: MOGWO) 3) การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของขั้นตอนของการค้นหาความบรรสานแบบหลายฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Multi-objective Harmony Search Optimization : MOHS) และการหาขอบหน้าพาเรโต (Pareto front) ของวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบหลายฟังก์ชันวัตถุประสงค์ จะดำเนินการหาวิธีผลเฉลยที่ไม่ถูกครอบงำ (non-dominated solution) และทำการประเมินสมรรถนะของวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยใช้ตัวบ่งชี้ขอบหน้าพาเรโต (Pareto front indicator) ด้วยวิธีการปริมาตรหลายมิติ (hypervolume : HV) จากนั้นทำการเลือกจุดที่เหมาะสมที่สุด (Optimum point) ด้วยวิธีการตัดสินใจ (decision making) ซึ่งใช้วิธีผลรวมถ่วงน้ำหนัก (weighted-sum method) และนำตัวแปรออกแบบจากจุดที่เหมาะสมที่สุด (Optimum point) (Kasem Nuaekaeuw et al., 2017 ; Kittisak Sanprasit, 2020, July ; Kittisak Sanprasit, 2020, December) ไปทดลองจริงกับแขนกลหุ่นยนต์รุ่น RS020N ของบริษัท Kawasaki

## 2. วัตถุประสงค์

- 2.1 ออกแบบการเคลื่อนที่ของแขนกลหุ่นยนต์โดยวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบหลายฟังก์ชันวัตถุประสงค์
- 2.2 ทดลองจริงกับหุ่นยนต์แขนกล

## 3. วิธีการวิจัย

วิธีการวิจัยแบ่งออกเป็น จำนวน 3 ส่วนคือ จลนศาสตร์ (Kinematics) ขั้นตอนวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบหลายฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Multi-objective) การสร้างแนววิถี (trajectory)

### 3.1 จลนศาสตร์ (Kinematics)

ผู้วิจัยใช้จลนศาสตร์ข้างหน้าด้วยวิธีการของเดนาวิตและฮาร์เทนเบอร์ก (Denavit-Hartenberg) ในรูปแบบมาตรฐาน (Reza N.Jazar, 2010) เนื่องจากมีจำนวนตัวแปรที่น้อย คือจำนวน 4 ตัวแปร คือ  $\theta_i, d_i, a_i, \alpha_i$  เรียกว่า มุมข้อต่อ (Joint angle) ระยะเลื่อนขนานของข้อต่อ (Joint displacement) ความยาวก้านต่อ (Link length) และมุมบิดก้านต่อ (Link twist) ตามลำดับ ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ตารางพารามิเตอร์ DH (DH parameter table)

| Frame No. | $\theta_i$ | $d_i$ | $a_i$ | $\alpha_i$ |
|-----------|------------|-------|-------|------------|
| 1         | $\theta_1$ | $d_1$ | $a_1$ | $\alpha_1$ |
| 2         | $\theta_2$ | $d_2$ | $a_2$ | $\alpha_2$ |
| ...       | ...        | ...   | ...   | ...        |
| j         | $\theta_j$ | $d_j$ | $a_j$ | $\alpha_j$ |
| ...       | ...        | ...   | ...   | ...        |
| n         | $\theta_n$ | $d_n$ | $a_n$ | $\alpha_n$ |

เมื่อได้ตารางพารามิเตอร์ DH ตามเงื่อนไขของ (DH1) และ (DH2) นำมาสร้างเมทริกซ์การแปลงเอกพันธ์ (homogeneous transformation matrix) ตามสมการที่ 1 (วโรตม ตูจินดา, 2559) เพื่ออธิบายการหมุนและการเลื่อนของแต่ละ ก้านต่อและอธิบายการเคลื่อนที่ของแต่ละเฟรมสำหรับแต่ละข้อต่อมีเมทริกซ์ขนาด 4x4 ได้ดังนี้

$$A_i = \begin{bmatrix} c_{\theta_i} & -s_{\theta_i}c_{\alpha_i} & s_{\theta_i}s_{\alpha_i} & a_ic_{\theta_i} \\ s_{\theta_i} & c_{\theta_i}c_{\alpha_i} & -c_{\theta_i}s_{\alpha_i} & a_is_{\theta_i} \\ 0 & s_{\alpha_i} & c_{\alpha_i} & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

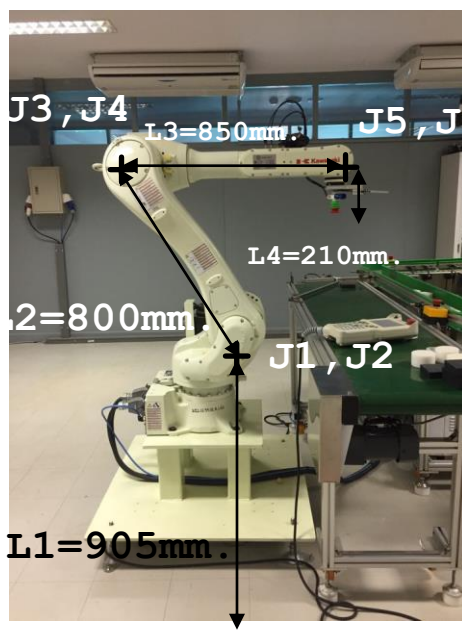
เมื่อ  $s_{\theta_i} = \sin(\theta_i), c_{\theta_i} = \cos(\theta_i), s_{\alpha_i} = \sin(\alpha_i), c_{\alpha_i} = \cos(\alpha_i)$

จลนศาสตร์ข้างหน้าที่อธิบายการเคลื่อนที่ของส่วนปลาย (end of effector) เทียบกับฐานหุ่นยนต์นั้น สามารถเขียนได้ดังนี้

$${}^0T_n = A_1(q_1)A_2(q_2)...A_n(q_n) \quad (2)$$

งานวิจัยนี้ใช้แขนกลหุ่นยนต์ รุ่น RS020N ของบริษัท Kawasaki ซึ่งมีข้อต่อ (joint) จำนวน 6 ข้อต่อ และมีความยาวของก้านต่อจำนวน 4 ก้านต่อ คือ  $L_1=905$  mm.,  $L_2=800$  mm.,  $L_3=850$  mm.,  $L_4=210$  mm. ตามภาพที่ 1 ในกรณีนี้มีระบบสายพานลำเลียงหลักสำหรับหยิบจับชิ้นงานและสายพานลำเลียงรองสำหรับรองรับชิ้นงาน โดยตำแหน่งอ้างอิงของหุ่นยนต์นั้นเริ่มจากพื้นห้องทดลองไปยังส่วนปลาย (end of effector) ของหุ่นยนต์

จากนั้นดำเนินการเขียนตารางพารามิเตอร์ DH (DH parameter table) ตามหลักการตารางที่ 1 เป็นตาราง DH ของหุ่นยนต์ รุ่น RS020N ของบริษัท Kawasaki แสดงในตารางที่ 2



รูปที่ 1 แขนกลหุ่นยนต์ รุ่น RS020N ของบริษัท Kawasaki

ตารางที่ 2 ตารางพารามิเตอร์ DH (DH parameter table) จากตำแหน่งเฟรมอ้างอิงถึงส่วนปลาย (end of effector) ของหุ่นยนต์

| Frame No. | $\theta_i$              | $d_i$ | $a_i$ | $\alpha_i$ |
|-----------|-------------------------|-------|-------|------------|
| 1         | $q_1 - \pi / 2$         | L1    | 0     | $\pi / 2$  |
| 2         | $q_2 + \pi / 2 - 54.25$ | 0     | L2    | 0          |
| 3         | $q_3 + 54.25$           | 0     | 0     | $\pi / 2$  |
| 4         | $-q_4$                  | L3    | 0     | $-\pi / 2$ |
| 5         | $-q_5 - \pi / 2$        | 0     | 0     | $\pi / 2$  |
| 6         | $q_6$                   | L4    | 0     | 0          |

เมื่อได้ตารางพารามิเตอร์ DH ในแต่ละส่วนแล้วต่อไปเป็นการหาจลนศาสตร์ข้างหน้าที่อธิบายการเคลื่อนที่ของส่วนปลาย (end of effector) เทียบกับตำแหน่งเริ่มต้นของหุ่นยนต์ซึ่งมีเมทริกซ์การแปลงเอกพันธ์ (homogeneous transformation matrix) ดังนี้

เมทริกซ์การแปลงเอกพันธ์ตามสมการที่ 2 จากตำแหน่งเฟรมอ้างอิงเริ่มต้น(A) ถึงอ้างอิงถึงส่วนปลาย (end of effector) ของหุ่นยนต์รุ่น RS020N ของบริษัท Kawasaki สามารถเขียนได้ดังนี้

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

จากนั้นได้สร้างแบบจำลองจากโปรแกรม MATLAB ด้วยวิธีการจลนศาสตร์ข้างหน้าด้วยเดนาวิตและฮาร์เทนเบิร์ก (forward kinematics by Denavit-Hartenberg) และคำนวณการหมุนและการเลื่อนของแต่ละก้านต่อด้วยเมทริกซ์การแปลงเอกพันธ์

### 3.2 ขั้นตอนวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดแบบหลายฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Multi-objective)

เนื่องจากการออกแบบท่าทางของแขนกลหุ่นยนต์ มีตัวแปรที่เกี่ยวข้องจำนวนมาก ทำให้การคำนวณมีความซับซ้อนเป็นอย่างมาก เพื่อลดความซับซ้อนในการคำนวณและให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ที่ต้องการกับงานวิจัย จึงได้นำวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดเป็นกระบวนการในการค้นหาคำตอบ ในงานวิจัยนี้ได้เปรียบเทียบวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดจำนวน 3 วิธีการหาค่าเหมาะที่สุดคือ 1) WOA 2) GWO 3) MOHS [4] โดยมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์จำนวน 2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือ การกระตุก (Jerk) รวมของข้อต่อหุ่นยนต์น้อยที่สุด และตำแหน่งสุดท้ายในการหยิบจับวัตถุให้มีตำแหน่งหยิบใกล้วัตถุมากที่สุด มีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ดังนี้

#### 3.2.1 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective function)

งานวิจัยนี้มีเป้าหมายในการออกแบบการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ จำนวน 2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือ ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 คือ การกระตุก (Jerk) รวมของข้อต่อหุ่นยนต์น้อยที่สุด และฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 2 คือ ตำแหน่งสุดท้ายในการหยิบจับวัตถุให้มีตำแหน่งหยิบใกล้วัตถุมากที่สุด มีรายละเอียดดังนี้

1) ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 คือ การกระตุก (Jerk) รวมของข้อต่อหุ่นยนต์น้อยที่สุด

ข้อต่อของหุ่นยนต์นั้น ได้ใช้เซอร์โวมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสสลับเป็นอุปกรณ์ขับเคลื่อนข้อต่อ หากกระตุกของข้อต่อมีจำนวนมากเกินไปจะส่งผลเสียต่ออุปกรณ์ต่อรวม จึงได้นำการกระตุกเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ให้มีค่าน้อยที่สุด โดยการกระตุกนั้นเป็นการอนุพันธ์ของความเร่งเชิงมุมของข้อต่อ ซึ่งฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 1 สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$FOBJ1 = \min \sum_{j=1}^N \int_{t_{m0}}^{t_{mf}} |\ddot{q}(t)| dt \quad \text{มีหน่วย degree/sec}^3 \quad (4)$$

ภายใต้เงื่อนไขบังคับดังนี้

$$q_{le_i} - 5 \leq q_i \leq q_{le_i} + 5 \quad (5)$$

ตำแหน่งมุมของข้อต่อในแต่ละช่วงเวลาน้อยอยู่ระหว่าง +5 ถึง -5 จากตำแหน่งข้อต่อ  $q_{le_i}$  ในการทดลองลองผิดลองถูก (Trial-and-error) จากหุ่นยนต์จริง ตามตารางที่ 3

**ตารางที่ 3** ค่าตำแหน่งข้อต่อ (Joint) ด้วยวิธีลองผิดลองถูก (Trial-and-error)

| Joint | t1<br>(0 วินาที) | t2<br>(2.048<br>วินาที) | t3<br>(2.816<br>วินาที) | t4<br>(3.328<br>วินาที) | t5<br>(4.864<br>วินาที) | t6<br>(5.632<br>วินาที) |
|-------|------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| $q_1$ | 0                | -4.367                  | -6.589                  | -5.488                  | -7.856                  | -7.727                  |
| $q_2$ | -30              | 14.956                  | 22.515                  | 16.738                  | -7.535                  | -0.774                  |
| $q_3$ | -119.904         | -99.203                 | -102.7                  | -98.593                 | -124.981                | -130.134                |

### ตารางที่ 3 (ต่อ)

| Joint | t1<br>(0 วินาที) | t2<br>(2.048<br>วินาที) | t3<br>(2.816<br>วินาที) | t4<br>(3.328<br>วินาที) | t5<br>(4.864<br>วินาที) | t6<br>(5.632<br>วินาที) |
|-------|------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| $q_4$ | 0                | 0                       | 0                       | 0                       | 0                       | 0                       |
| $q_5$ | -90              | -65.840                 | -54.767                 | -64.663                 | -62.562                 | -50.639                 |
| $q_6$ | -45              | -40.639                 | -38.478                 | -39.514                 | -37.138                 | -37.274                 |

2) ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ 2 คือ ตำแหน่งสุดท้ายในการหิบบั้ววัตถุให้มีตำแหน่งหิบบั้ววัตถุมากที่สุด  
ผู้วิจัยกำหนดตำแหน่งในการหิบบั้ววัตถุ (End ref) ทั้งแกน x แกน y และแกน z จากนั้นคำนวณหาตำแหน่งจุดปลาย (End) ให้สอดคล้องกับตำแหน่งในการหิบบั้ววัตถุดังกล่าว สามารถคำนวณฟังก์ชันวัตถุประสงค์ได้ดังนี้

$$FOBJ2 = \min \sum_{t=t_1}^{t=t_6} \left( \left| END_X - END_{Xref} \right| + \left| END_Y - END_{Yref} \right| + \left| END_Z - END_{Zref} \right| \right) \quad (6)$$

ภายใต้เงื่อนไขบังคับ จุดปลายจะต้องไม่ชนกับสิ่งกีดขวาง (obstruct) ของระบบลำเลียงวัตถุ

$$P_{END} \notin Ob$$

ในการนี้ได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ให้กับ ตามตารางที่ 4 สำหรับวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดแบบหลายฟังก์ชันวัตถุประสงค์

### ตารางที่ 4 กำหนดค่าพารามิเตอร์

| ลำดับ | ตัวแปร                                                          | ค่าพารามิเตอร์ |
|-------|-----------------------------------------------------------------|----------------|
| 1     | ขนาดประชากรหรือตัวแปรออกแบบ (Number of population : $N_{pop}$ ) | 108            |
| 2     | มิติ (dimensionality) เมทริกซ์                                  | 30             |
| 3     | จำนวนรอบคำนวณสูงสุด (Iteration : $\max_{iter}$ )                | 500            |
| 4     | จำนวนหน่วยเก็บผลเฉลย (Allowable archive : $N_{Arc}$ )           | 300            |
| 5     | เวกเตอร์ $\vec{a}$                                              | 0 - 2          |
| 6     | จำนวนกริดต่อขนาดมิติ (number of grid per each dimension)        | 10             |
| 7     | ค่าการขยายตัวของกริด (grid inflation parameter : $\alpha$ )     | 0.1            |

### 3.3 การสร้างแนววิถี (trajectory)

การสร้างแนววิถี เป็นการสร้างลำดับการเคลื่อนที่ของข้อต่อหุ่นยนต์ โดยแนววิถีนั้นจะมีความเร็วและความเร่ง เริ่มต้นและสิ้นสุดเท่ากับ 0 พร้อมกับมีการเคลื่อนที่ต่อเนื่องกัน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีความสอดคล้องกับเงื่อนไขของ การประมาณค่าในช่วงด้วยเส้นโค้งกำลังสาม (Cubic Spline Interpolation) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

สามารถสรุปสมการ หาดำแหน่ง ความเร็ว ความเร่ง และการกระตุก ในช่วงเวลา  $t_i \leq t \leq t_{i+1}$  ได้ดังนี้ ( Kittisak Sanprasit. 2020)

ตำแหน่ง

$$Q_{j,i}(t) = \frac{\ddot{Q}_{j,i}(t_i)}{6h_i}(t_{i+1}-t)^3 + \frac{\ddot{Q}_{j,i}(t_{i+1})}{6h_i}(t-t_i)^3 + \left( \frac{q_{j,i}}{h_i} - \frac{\ddot{Q}_{j,i}(t_i)}{6}h_i \right)(t_{i+1}-t) + \left( \frac{q_{j,i+1}}{h_i} - \frac{\ddot{Q}_{j,i}(t_{i+1})}{6}h_i \right)(t-t_i) \quad (7)$$

ความเร็ว

$$\dot{Q}_{j,i}(t) = -\frac{\ddot{Q}_{j,i}(t_i)}{2h_i}(t_{i+1}-t)^2 + \frac{\ddot{Q}_{j,i}(t_{i+1})}{2h_i}(t-t_i)^2 - \left( \frac{q_{j,i}}{h_i} - \frac{\ddot{Q}_{j,i}(t_i)}{6}h_i \right) + \left( \frac{q_{j,i+1}}{h_i} - \frac{\ddot{Q}_{j,i}(t_{i+1})}{6}h_i \right) \quad (8)$$

ความเร่ง

$$\ddot{Q}_{j,i}(t) = \frac{\ddot{Q}_{j,i}(t_i)}{h_i}(t_{i+1}-t) + \frac{\ddot{Q}_{j,i}(t_{i+1})}{h_i}(t-t_i) \quad (9)$$

การกระตุก

$$\ddot{\ddot{Q}}_{j,i}(t) = \frac{\ddot{Q}_{j,i}(t_{i+1}) - \ddot{Q}_{j,i}(t_i)}{h_i} \quad (10)$$



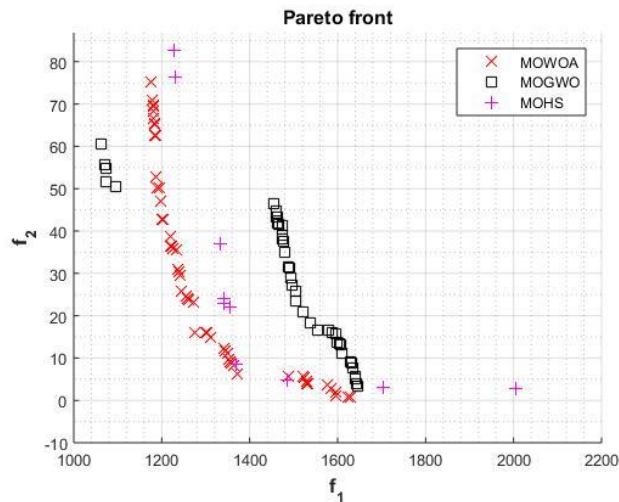
## 4. ผลการวิจัย

### 4.1 ผลการวิจัยตามวัตถุประสงค์ข้อที่ 1

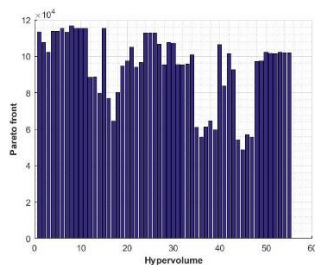
เมื่อได้แบบจำลองของหุ่นยนต์ด้วยวิธีจลนศาสตร์ข้างหน้า (forward kinematics) โดยใช้วิธีการของเดนาวิตและฮาร์เทนเบอร์ก (forward kinematics by Denavit-Hartenberg) ต่อไปจะใช้แบบจำลองดังกล่าวเพื่อค้นหาคำตอบซึ่งเป็นท่าทางของแขนกลหุ่นยนต์ด้วยกระบวนการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบหลายฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ซึ่งมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์จำนวน 2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือการกระตุก (Jerk) ของข้อต่อ (Joint) รวมน้อยที่สุดและตำแหน่งสุดท้ายในการหยิบจับวัตถุให้มีตำแหน่งหยิบใกล้วัตถุมากที่สุดโดยใช้วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบหลายฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (multi-objective) จำนวน 2 วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุด และทำการประเมินสมรรถนะของวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดโดยใช้ตัวบ่งชี้ขอบหน้าพาเรโต (pareto front indicator) ด้วยวิธีการปริมาตรหลายมิติ (hypervolume : HV) จากนั้นทำการเลือกจุดเหมาะสมที่สุด (optimum point) จากวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบหลายฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุดด้วยวิธีการตัดสินใจ (decision making) ซึ่งใช้วิธีผลรวมถ่วงน้ำหนัก (weighted-sum method) และนำตัวแปรออกแบบจากจุดเหมาะสมที่สุด (optimum point) ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

#### 4.1.1 การเปรียบเทียบวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบหลายฟังก์ชันวัตถุประสงค์

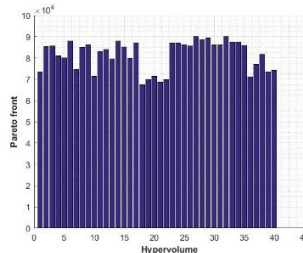
จากการทดลองหาค่าเหมาะสมที่สุด ได้ดำเนินการหาวิธีผลเฉลยที่ไม่ถูกรอบงำ (non-dominated solution) จะได้ขอบหน้าพาเรโต (Pareto front) ของวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบหลายฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของแต่ละวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุด ในขั้นตอนนี้จะเป็นการเปรียบเทียบวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบหลายฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อเลือกวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่ดีที่สุดในงานวิจัยนี้ได้เปรียบเทียบวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบหลายฟังก์ชันวัตถุประสงค์จำนวน 3 วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดตามที่กล่าวมาข้างต้น ดำเนินการทดลองจำนวน 5 ครั้งของแต่ละวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดพร้อมนำผลขอบหน้าพาเรโตดังกล่าว ดำเนินการกระบวนการหาวิธีผลเฉลยที่ไม่ถูกรอบงำรวมอีกครั้งในแต่ละวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดอีกครั้ง และได้มีขอบหน้าพาเรโต (pareto front) ตามภาพที่ 2 ดังกล่าวจากนั้นโดยทำการประเมินสมรรถนะของวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดโดยใช้ตัวบ่งชี้ขอบหน้าพาเรโต (pareto front indicator) ด้วยวิธีการปริมาตรหลายมิติ (hypervolume : HV) ได้สร้างจุดอ้างอิงโดยการหาตำแหน่งที่มากที่สุดของแต่ละฟังก์ชันเป้าหมาย ให้มีค่ามากกว่า 1.5 เท่าในแต่ละฟังก์ชันเป้าหมายเป็นจุดอ้างอิง จากนั้นทำการคำนวณปริมาตรหลายมิติของขอบหน้าพาเรโตในแต่ละวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบหลายฟังก์ชันวัตถุประสงค์จำนวน 3 วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุด ตามภาพที่ 3 พร้อมกับแสดงค่าต่ำสุด, ค่าสูงสุด, ค่าเฉลี่ย และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ในตารางที่ 5 จะเห็นได้ว่าค่าปริมาตรหลายมิติที่สูงสุดมีค่าเท่ากับ 192,877.48 ของวิธี MOWOA แสดงว่าขอบหน้าพาเรโต (pareto front) ของวิธี MOWOA เป็นวิธีการที่ดีที่สุด



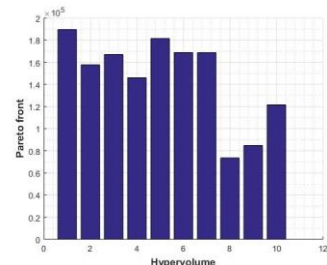
รูปที่ 2 ขอบหน้าพาเรโต (pareto front) ของ MOWOA, MOGWO, MOHS



(ก)



(ข)



(ค)

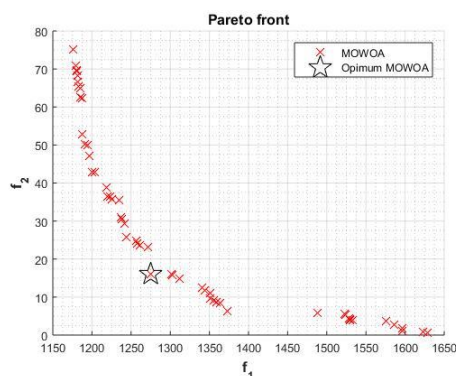
รูปที่ 3 ปริมาตรหลายมิติ (hypervolume : HV) ก) MOWOA ข) MOGWO ค) MOHS

ตารางที่ 5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพทางสถิติปริมาตรหลายมิติของ

| ขั้นตอนวิธี | ค่าต่ำสุด  | ค่าสูงสุด         | ค่าเฉลี่ย  | ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน |
|-------------|------------|-------------------|------------|---------------------|
| MOWOA       | 89,623.85  | <b>192,877.48</b> | 158,780.61 | 30,412.99           |
| MOGWO       | 120,855.59 | 164,533.36        | 144,708.06 | 13,791.55           |
| MOHS        | 73,628.32  | 189,598.01        | 145,951.58 | 39,939.38           |

#### 4.1.2 การตัดสินใจ (Decision making)

วิธีของ MOWOA เป็นวิธีการที่ดีที่สุดตามที่กล่าวมาข้างต้น ดังนั้นจึงนำขอบหน้าพาเรโต (Pareto front) มาทำการคัดเลือกผลเฉลยของพาเรโตด้วยวิธีการตัดสินใจ (decision making) ในงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีผลรวมถ่วงน้ำหนัก (weighted-sum method) ซึ่งมีค่าตัวประกอบถ่วงน้ำหนัก (weighting factors) ของตัว  $w_1=0.5$  และ  $w_2=0.5$  และได้จุดเหมาะสมที่สุด (Optimum point) ตามภาพที่ 4 มีค่าฟังก์ชันเป้าหมายที่ 1 เท่ากับ 1,274.45 degree/sec<sup>3</sup> และมีค่าฟังก์ชันเป้าหมายที่ 2 เท่ากับ 16.05 mm. จะได้ตัวแปรออกแบบที่เป็นข้อต่อของหุ่นยนต์ทั้ง 6 ข้อต่อตามช่วงเวลาตามตารางที่ 6 จะเห็นได้ว่าข้อต่อหุ่นยนต์ข้อที่ 4 ไม่มีการเปลี่ยนแปลง



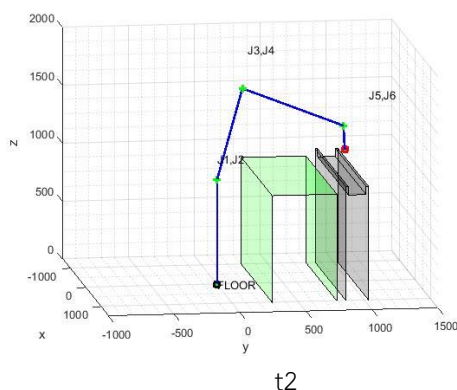
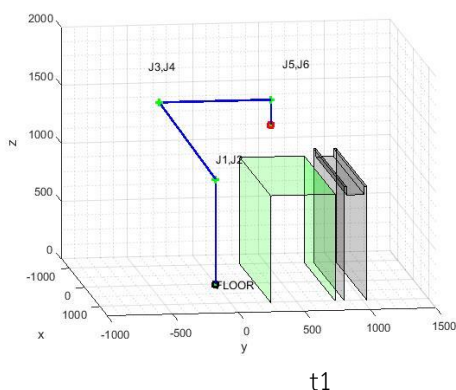
ภาพที่ 4 ตำแหน่งจุดเหมาะสมที่สุด (optimum point) ของวิธีของ MOWOA

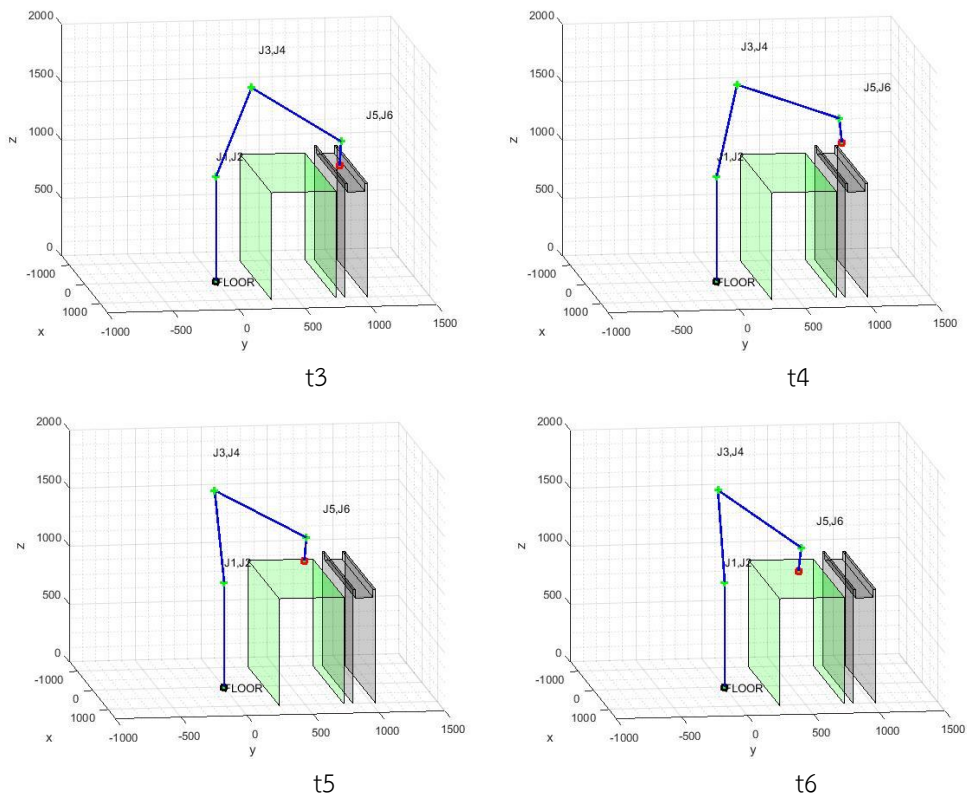
ตารางที่ 6 ค่าตำแหน่งข้อต่อ (Joint) ตามช่วงเวลาของแบบจำลอง(Simulation) วิธีการทดลองจากขั้นตอนวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดด้วยวิธี MOWOA

| Joint | t1<br>(0 วินาที) | t2<br>(2.048 วินาที) | t3<br>(2.816 วินาที) | t4<br>(3.328 วินาที) | t5<br>(4.864 วินาที) | t6<br>(5.632 วินาที) |
|-------|------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| q1    | 0                | -3.769               | -6.275               | -4.424               | -10.607              | -11.340              |
| q2    | -30              | 16.426               | 22.468               | 13.737               | -2.912               | -1.391               |
| q3    | -119.990         | -97.912              | -103.092             | -98.561              | -124.629             | -130.386             |
| q4    | 0                | 0                    | 0                    | 0                    | 0                    | 0                    |
| q5    | -90              | -61.407              | -55.546              | -61.369              | -58.269              | -52.492              |
| q6    | -45              | -36.857              | -37.733              | -39.708              | -32.176              | -32.140              |

4.1.3 แบบจำลองท่าทางของแขนกลหุ่นยนต์ตามการหาค่าเหมาะที่สุดขั้นตอนวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดของปลาวาฬแบบหลายฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (MOWOA)

เมื่อได้ตัวแปรออกแบบตามตารางที่ 6 แล้วนั้น นำตำแหน่งข้อต่อดังกล่าวเข้าสู่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ เพื่อสังเกตการเคลื่อนที่ของแขนกลหุ่นยนต์ ซึ่งแสดงตามภาพที่ 5 จะเห็นได้ว่าการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์แขนกลจากตำแหน่งเริ่มต้น t1 ไปยังตำแหน่งสิ้นสุด t6 เส้นทางการเคลื่อนที่ที่หุ่นยนต์ไม่ได้ชนสิ่งกีดขวางที่เป็นสายพานลำเลียงเลย และนำตัวแปรออกแบบไปทดลองจริงกับหุ่นยนต์ต่อไป





รูปที่ 5 แบบจำลองทางของหุ่นยนต์ของตำแหน่งจุดเหมาะสมที่สุด

#### 4.2 ผลการวิจัยตามวัตถุประสงค์ข้อที่ 2

เมื่อได้ผลของตัวแปรออกแบบ ตามตารางที่ 6 นำผลดังกล่าวมาใช้ทดลองจริงกับหุ่นยนต์จริงระบบแขนกลหุ่นยนต์ รุ่น RS020N ของบริษัท Kawasaki และใช้วิธีการหีบจับด้วยแรงดันลม หุ่นยนต์สามารถที่จะหีบจับขึ้นได้จริง ไม่ได้ชนกับสิ่งกีดขวางตลอดเส้นทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ ตามภาพที่ 6 และจากนั้นทำการเปรียบเทียบตำแหน่งข้อต่อ (Joint) ในการทดลองกับหุ่นยนต์ ซึ่งจะประกอบด้วย 3 วิธีดังนี้คือ 1) ตำแหน่งของข้อต่อ (Joint) ด้วยแบบจำลองด้วยวิธี MOWOA (Simulation) ตามตารางที่ 6 2) ตำแหน่งของข้อต่อ (Joint) ด้วยวิธีการลองผิดลองถูกของหุ่นยนต์จริง (Trial-and-error) ตามตารางที่ 3 3) ตำแหน่งของข้อต่อ (Joint) ด้วยวิธี MOWOA ของหุ่นยนต์จริง (Actual) ซึ่ง การเคลื่อนที่ของข้อต่อจากข้อต่อที่ 1 ถึงข้อต่อที่ 6 ตามภาพที่ 10 ตามลำดับ โดยที่ข้อต่อที่ 4 มีค่าเท่ากับ 0 ตลอดเส้นทางการเคลื่อนที่ จะเห็นได้ว่าแนวโน้มการเคลื่อนที่ข้อหุ่นยนต์ไปในทิศทางเดียวกัน และได้นำตำแหน่งข้อต่อของวิธีการต่างๆ ทำการหาค่าการกระตุกด้วยวิธีการประมาณค่าในช่วงด้วยเส้นโค้งกำลังสาม (Cubic Spline Interpolation) ตามสมการที่ 10 และได้ค่าการกระตุกของวิธีการลองผิดลองถูกของหุ่นยนต์จริง (Trial-and-error) มีค่าเท่ากับ  $1,529.03 \text{ degree/sec}^3$  วิธีการทดลองจากขั้นตอนวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดด้วยวิธี MOWOA ของหุ่นยนต์จริง (Actual) มีค่าเท่ากับ  $1,034.77 \text{ degree/sec}^3$  ดังแสดงในตารางที่ 7 จะเห็นว่าการทดลองจริงกับหุ่นยนต์ด้วยวิธีการทดลองจากขั้นตอนวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดด้วยวิธี MOWOA ของหุ่นยนต์จริง (Actual) สามารถลดการกระตุกจากวิธีการลองผิดลองถูกของหุ่นยนต์จริง (Trial-and-error) ได้ 32.33 %



t1



t2



t3



t4

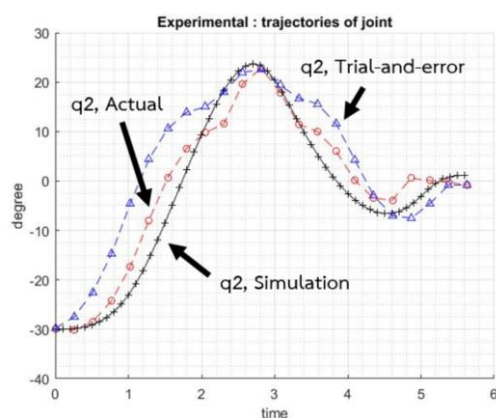
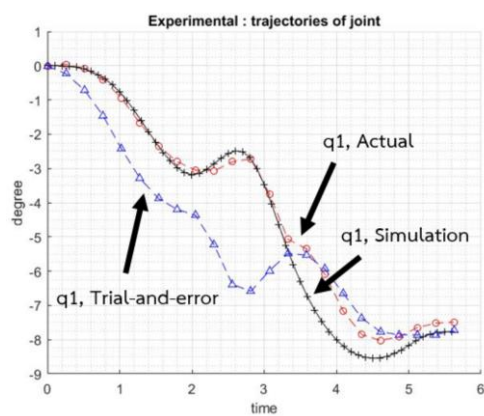


t5

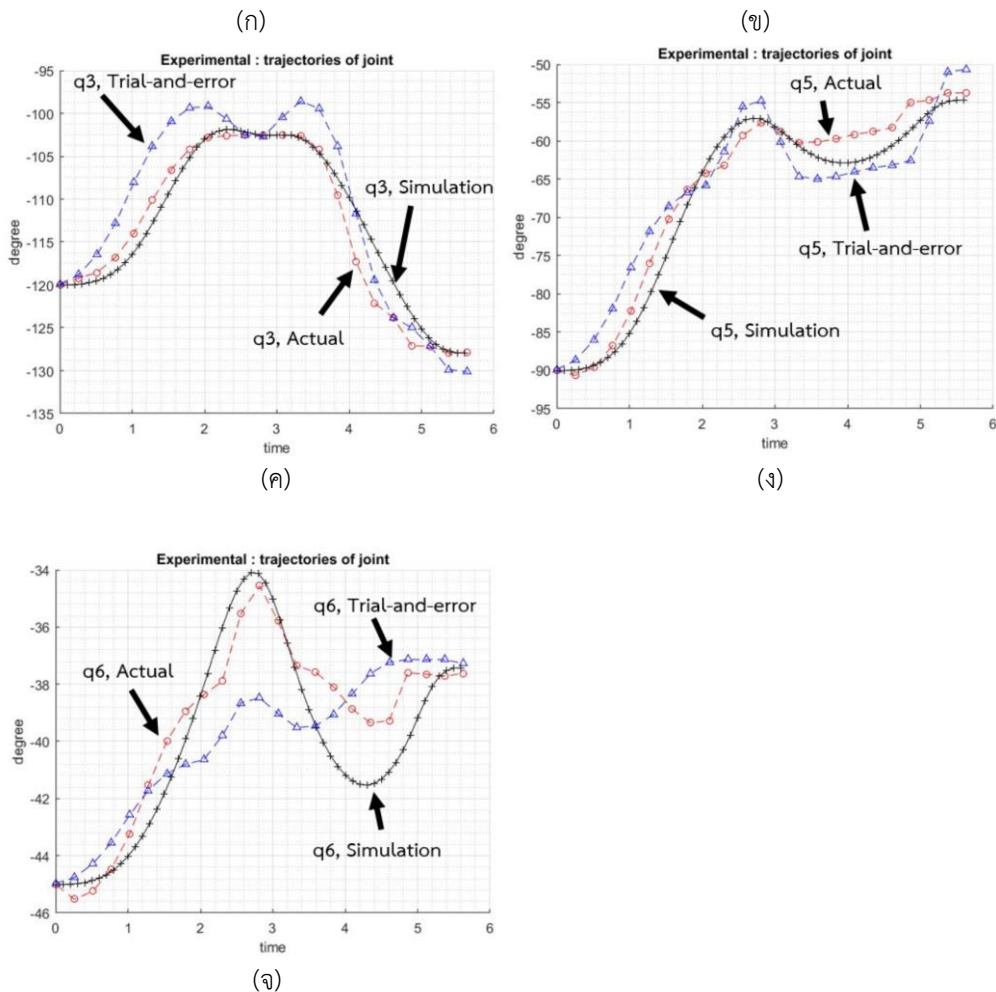


t6

รูปที่ 6 ท่าทางของหุ่นยนต์จริงของตำแหน่งจุดเหมาะสมที่สุด







รูปที่ 7 การเคลื่อนที่ของข้อต่อที่ ก) ข้อต่อที่ 1 ข) ข้อต่อที่ 2 ค) ข้อต่อที่ 3 ง) ข้อต่อที่ 5 จ) ข้อต่อที่ 6

ตารางที่ 7 ค่าการกระตุก (Jerk) รวมของข้อต่อหุ่นยนต์ของการทดลองในวิธีต่าง

| Experimental    | Jerk (degree/sec <sup>3</sup> ) |
|-----------------|---------------------------------|
| Trial-and-error | 1,529.03                        |
| Actual          | 1,034.77                        |

## 5. อภิปรายผลและสรุปผล

การออกแบบเส้นทางการเคลื่อนที่ของส่วนปลาย (end of effector) ของแขนกลหุ่นยนต์เพื่อลดการกระตุก (jerk) ที่จะส่งผลต่อความเสียหายของอุปกรณ์ที่เป็นข้อต่อ ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดลดการกระตุกของแขนกลหุ่นยนต์โดยเริ่มจากสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหุ่นยนต์แขนกล ด้วยวิธีจลนศาสตร์ข้างหน้าของเดนาวิตและฮาร์เทนเบิร์ก (forward kinematics by Denavit-Hartenberg) ในการนี้ผู้วิจัยได้นำแนวคิดการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบหลายฟังก์ชันวัตถุประสงค์ให้สอดคล้องกับฟังก์ชันวัตถุประสงค์จำนวน 2 ฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือ 1) ฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ค่าการกระตุก(Jerk) ของข้อต่อ (Joint) รวมน้อยที่สุด 2) ตำแหน่งสุดท้ายในการหยิบจับวัตถุให้มีตำแหน่งหยิบใกล้วัตถุมากที่สุด ในงานวิจัยนี้ได้เปรียบเทียบวิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบหลายฟังก์ชันวัตถุประสงค์จำนวน 3 วิธีการหาค่าเหมาะสมที่สุด ซึ่งวิธีการ MOWOA เป็นวิธีการที่ดีที่สุด และได้ทดลองจริงกับหุ่นยนต์ รุ่น RS020N ของบริษัท Kawasaki สามารถลดการกระตุกจากวิธีการลองผิดลองถูกของหุ่นยนต์จริง (Trial-and-error) ได้ 32.33 %

หากเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมา บางงานวิจัยจะใช้เพียงการทดลองกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งไม่ได้ทดลองจริงกับหุ่นยนต์ หรือบางงานวิจัยจะใช้การหาค่าเหมาะที่สุดเพียง 1 วัตถุประสงค์ซึ่งความซับซ้อนน้อยกว่าวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดแบบหลายฟังก์ชันวัตถุประสงค์

## 6. ข้อเสนอแนะ

- 6.1 ใช้เครื่องวัดการกระตุก (jerk) ทุกข้อต่อเพื่อความถูกต้องข้อมูล
- 6.2 อาจเปรียบเทียบวิธีการหาค่าเหมาะสมมากกว่านี้ เช่น NSGA-II, PSO

## 7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยความรู้ความกรุณาจาก ท่านอาจารย์ประจำสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์พร้อมท่านอาจารย์ภายในคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรมทุกท่าน ซึ่งกรุณาให้ความรู้ คำแนะนำ คำปรึกษา และตรวจแก้ไขจนเสร็จสมบูรณ์ ผู้วิจัยขอขอบพระคุณไว้ ณ โอกาสนี้ พร้อมด้วยสมาชิกทุกคนในครอบครัวของผู้วิจัย ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ช่วยเหลือในทุกด้านตลอดมา

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีมาจากการงานวิจัยฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแด่สถาบันวิจัยและพัฒนา คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเลยและมหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์ สำหรับเป็นแหล่งทุนในงานวิจัยครั้งนี้และเป็นต้นสังกัดของผู้วิจัยพร้อมกันนั้นมอบแด่สถาบันในการเผยแพร่ผลงานวิจัยครั้ง และมอบเป็นเครื่องบูชาพระคุณบิดามารดา บุรพจารย์ ผู้มีพระคุณทุกท่าน และครอบครัวของผู้วิจัย

## เอกสารอ้างอิง

วิโรตม ตูจินดา. (2559). *การวิเคราะห์และควบคุมหุ่นยนต์อุตสาหกรรม = Industrial Robot Analysis and Control*. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สุจินต์ บุรีรัตน์. (2556). การหาค่าเหมาะที่สุดของระบบทางวิศวกรรมเครื่องกล เล่ม 1.

ขอนแก่น : มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

Kasem Nuaekaw, Pramin Artrit, Nantiwat Pholdee, Sujin Bureerat. (2017). Optimal reactive power dispatch problem using a two-archive multi-objective grey wolf optimizer, *Expert Systems With Application*, vol 87. pp. 79-89.

Kittisak Sanprasit. (2020). Multi-Objective Whale Optimization Algorithm of Humanoid Robot Walking and Carry Objects on inclined planes. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, 9(7), 1031-1042.

Kittisak Sanprasit. (2020). Multi-Objective Optimization Algorithm of Humanoid Robot Walking on a Narrow Beam. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, 9(12), 1548-1559.

Reza N.Jazar. (2010). *Theory of Applied Robotics*. 2<sup>nd</sup> ed. New York : Springer. Seyedai Mirjalili.