

## การวางแผนเส้นทางที่ใช้เวลาเหมาะสมที่สุดโดยใช้ขั้นตอนวิธีเชิงวิวัฒนาการ Time-Optimal Path Planning Using a Multi-Objective Evolutionary Algorithm

นันท์วัฒน์ วีระยุทธ<sup>1</sup> ณชล ไชยรัตน์<sup>2</sup>

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ถ.สกลมารค อ.วารินชำราบ จ.อุบลราชธานี 34190

โทร 0-45288400-3 ต่อ 3815 โทรสาร 0-45288378 E-mail: weerayuth\_sn@yahoo.co.uk<sup>1</sup>

Nantawatana Weerayuth<sup>1</sup>

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ubonratchathani University

Satholamark Rd, Varinchamrab Ubonratchathani 34190 Thailand

Tel: 0-45288400-3 Ext. 3815 Fax: 0-45288378 E-mail: weerayuth\_sn@yahoo.co.uk<sup>1</sup>

Nachol Chaiyaratana<sup>2</sup>

Research and Development Center for Intelligent Systems

King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok

1518 Piboolsongkram Road, Bangkok, Thailand 10800 Email: nchl@kmitnb.ac.th<sup>2</sup>

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการใช้อัลกอริทึมวิวัฒนาการแบบหลายเป้าหมายมาใช้ในการแก้ปัญหาค่าเหมาะสมที่สุด ซึ่งปัญหานี้จะเกี่ยวข้องกับการเลือกค่าขอบเขตของแรงบิดใช้งานที่เหมาะสมของแอกชูเอเตอร์และวางแผนเลือกเส้นทางในการเคลื่อนที่ของ End-effector ของแขนกล เพื่อเป็นอินพุตให้กับขั้นตอนวิธีควบคุมการเคลื่อนที่โดยใช้เวลาน้อยที่สุด และอยู่ภายใต้เงื่อนไขบังคับของเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่และค่าคลาดเคลื่อนของการติดตาม โดยใช้รูปแบบการเข้ารหัสโครโมโซมที่แตกต่างกัน 3 รูปแบบคือการเข้ารหัสแบบเลขฐานสอง การเข้ารหัสแบบเลขจำนวนเต็ม และการเข้ารหัสแบบเลขจำนวนจริง นอกจากนี้ได้ศึกษาถึงการใช้การควบคุมความแตกต่างในปัญหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบหลายเป้าหมายกับโครโมโซมที่มีการเข้ารหัสที่แตกต่างกัน ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้คือโครโมโซมที่เข้ารหัสแบบเลขจำนวนเต็มมีความเหมาะสมมากกว่าโครโมโซมรูปแบบอื่น

### Abstract

This paper presents the use of a multi-objective evolutionary algorithm (MOEA) for solving a closed-loop time-optimal path planning problem. The MOEA is a result of the integration between three types of chromosome coding schemes: Gray, Real-value and integer-based coding schemes in conjunction with a multi-objective Evolutionary algorithm (MEGA). The MOEA is

benchmarked against the MOEA and a random search in the path planning problem which is treated as a multi-objective optimization problem. In this case, the planning problem is represented by a position control task which is given to a 3-dof revolute joint robot. From the optimization viewpoint, the decision variables consist of the magnitude of torque limits for each joint and the initial and final positions of a fixed length path at which the robot end effector has to track. The corresponding search objectives are thus expressed in terms of the position tracking error and trajectory time. The simulation results suggest that the integer-based coding scheme is more suitable at representing the decision variables and the real-valued Chromosome coding scheme is more suitable to improve the search results when using a more effective Crossover and Mutation Methods.

### 1. บทนำ

เนื่องจากแขนกลมีความสามารถในการทำงานที่เหนือกว่ามนุษย์ในบางแง่มุม โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเรื่องของการทำงานที่ต้องการความละเอียดสูง หรืองานที่ต้องมีการทำงานแบบเดียวกันซ้ำกันหลายครั้ง โดยที่แขนกลจะสามารถคงประสิทธิภาพการผลิตซึ่งความสามารถในข้อนี้เป็นผลจากการที่ประสิทธิภาพการทำงานของแขนกลไม่แปรผันไปตามปัจจัยแวดล้อมที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของมนุษย์ ดังนั้น

เพื่อให้การใช้งานแขนกลเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุดในสายงานการผลิต กลไกการเคลื่อนที่ของแขนกลจึงควรจะเป็นไปในลักษณะที่การเคลื่อนไหวมียลัษณะ ราบรื่นและมีความเร็วมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ เพื่อให้การเคลื่อนที่ของแขนกลใช้เวลาเหมาะสมที่สุด ซิลเลอร์และคณะ[10] ได้อาศัยข้อมูลทางกายภาพของแขนแขนกล ในการพัฒนาขั้นตอนวิธี ที่สามารถใช้ระบุโพรไฟล์ของการเคลื่อนที่ (Trajectory Profile) ของแต่ละข้อต่อของแขนกล เพื่อให้แขนกลเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางที่ระบุไว้โดยใช้เวลาเหมาะสมที่สุด ขั้นตอนวิธีนี้มีชื่อเรียกในทางเทคโนโลยีหุ่นยนต์ว่า ขั้นตอนวิธีควบคุมการเคลื่อนที่โดยใช้เวลาเหมาะสมที่สุด (Time-Optimal Control Algorithm)

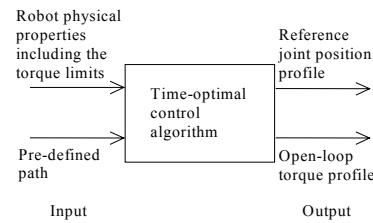
งานวิจัยในอดีตเกี่ยวข้องกับการใช้งานขั้นตอนวิธีสำหรับการเคลื่อนที่โดยใช้เวลาเหมาะสมที่สุดในระบบควบคุมเปิด (Open-Loop Control) ซึ่งแตกต่างจากการใช้งานแขนกลในโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งจะอยู่ในรูปแบบของระบบควบคุมปิด (Closed-Loop Control) ในส่วนของงานวิจัยที่ใช้ขั้นตอนวิธีในระบบแขนกลซึ่งเป็นระบบปิดนั้น ซิลเลอร์และลู[9] ได้ใช้ขั้นตอนวิธีควบคุมการเคลื่อนที่โดยใช้เวลาเหมาะสมที่สุดควบคู่ไปกับเทคนิคการปรับปรุงเส้นทางการเคลื่อนที่ (Trajectory Pre-Shaping) ต่อมาไชยรัตน์และชาซาลลา[3] ก็ได้พิสูจน์ให้เห็นว่า การใช้ข่ายงานระบบประสาท (Neural Networks) ที่ได้รับการฝึกสอนโดยใช้การเรียนรู้แบบการป้อนกลับของค่าคลาดเคลื่อน (Feedback Error Learning) เป็นตัวควบคุมในระบบปิด ควบคู่ไปกับการใช้ขั้นตอนวิธีควบคุมการเคลื่อนที่โดยใช้เวลาในการเคลื่อนที่ที่เหมาะสมที่สุดนั้น มีประสิทธิภาพเหนือกว่าการใช้เทคนิคการปรับปรุงเส้นทางการเคลื่อนที่ในเชิงของความแม่นยำของแขนแขนกลในการเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางที่กำหนด

งานวิจัยที่นำเสนอนี้ จึงเกี่ยวข้องกับการใช้ข่ายงานระบบประสาทซึ่งได้รับการฝึกสอนโดยใช้การเรียนรู้แบบเสริมสร้าง (Reinforcement Learning) มาเป็นหน่วยควบคุมในระบบควบคุมแขนกลเพื่อเพิ่มความยืดหยุ่นในการใช้งาน และการวางแผนเลือกเส้นทางการเคลื่อนที่ของแขนกล (Path Planning) ควบคู่ไปกับการกำหนดขอบเขตแรงบิดของแอกชูเอเตอร์ ซึ่งนำไปสู่ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบหลายเป้าหมาย (Multi-Objective Optimization) โดยจะทำการแก้ไขปัญหามาโดยใช้การคำนวณเชิงวิวัฒนาการ (Evolutionary Algorithms) ซึ่งเป็นการใช้โครโมโซมรูปแบบต่าง ๆ กัน เข้ามาใช้ในการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุด งานวิจัยเพิ่มเติมที่ได้กล่าวมาข้างต้นนี้จะช่วยขยายขอบเขตการใช้งานขั้นตอนวิธีควบคุมการเคลื่อนที่โดยใช้เวลาเหมาะสมที่สุดในระบบควบคุมแขนกลที่เป็นระบบปิด ซึ่งจะนำไปสู่ความสามารถในการพัฒนาการใช้งานขั้นตอนวิธีในระบบแขนกลที่ใช้ในอุตสาหกรรมจริง

## 2. ขั้นตอนวิธีควบคุมโดยใช้เวลาเหมาะสมที่สุดและตัวควบคุมแบบข่ายงานระบบประสาท

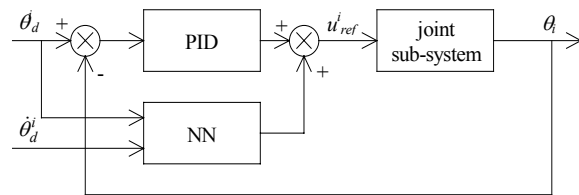
ตัวแปรหลักที่สำคัญที่มีผลกระทบต่อเวลา ที่ใช้ในการเคลื่อนที่ที่สามารถคำนวณได้จากขั้นตอนวิธีนี้ คือแรงบิดสูงสุดที่แอกชูเอเตอร์หรือมอเตอร์ที่ข้อต่อของแขนกลสามารถทำได้ ดังได้กล่าวไว้ในข้างต้นที่ว่า การเคลื่อนที่โดยใช้เวลาที่เหมาะสมที่สุด จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อหนึ่งในบรรดาของแอกชูเอเตอร์ทั้งหมดต้องทำงานโดยให้แรงบิดสูงสุดตลอด

เวลาในขณะที่แอกชูเอเตอร์ตัวที่เหลือต้องปรับเปลี่ยนค่าแรงบิดให้อยู่ในช่วงที่ไม่เกินขอบเขตสูงสุดที่สามารถทำได้ แผนผังแสดงสัญญาณเข้าและสัญญาณออกที่เกิดจากการใช้ขั้นตอนวิธีควบคุมการเคลื่อนที่ ที่ใช้เวลาเหมาะสมที่สุดสามารถแสดงด้วยรูปที่ 1 ซึ่งจะพบว่าขั้นตอนวิธีนี้จำเป็นต้องรู้ข้อมูลที่เป็นคุณสมบัติทางกายภาพของแขนกลและจำเป็นต้องรู้ว่าเส้นทางที่จะให้แขนกลเคลื่อนที่นั้น คือตำแหน่งใดเมื่อผ่านกระบวนการคำนวณแล้วจะได้ผลลัพธ์ที่เป็นโพรไฟล์ของตำแหน่งอ้างอิงของการเคลื่อนที่เชิงมุมให้กับแขนกล และให้โพรไฟล์ของแรงบิดของแอกชูเอเตอร์ที่ใช้ในการควบคุมแบบเปิด และนำไปใช้ในการควบคุมแบบปิดต่อไป



รูปที่ 1 Schematic diagram แสดงการทำงานของ time-optimal control algorithm.

อย่างไรก็ตามผลลัพธ์ที่ได้ก็นำไปใช้เป็นสัญญาณเข้าให้กับระบบควบคุมแบบปิดจะทำให้เกิดค่าคลาดเคลื่อนในระบบ Tracking Control ของแขนกล[8]. ทั้งนี้เนื่องจากผลลัพธ์ที่ได้จากขั้นตอนวิธีควบคุมที่ใช้เวลาเหมาะสมที่สุด ซึ่งคำนวณจากระบบพลศาสตร์แบบเปิดของแขนกล ไชยรัตน์และชาซาลลา[3],[4] ได้นำเสนอการประยุกต์ใช้ข่ายงานระบบประสาท (neural networks) มาทำหน้าที่เป็นตัวควบคุมในระบบควบคุมแบบปิด โดยตัวควบคุมแบบข่ายงานระบบประสาทจะถูกนำมาใช้ เพื่อชดเชยความผิดพลาดที่เกิดจากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบพลศาสตร์ของแขนกลที่ตัวควบคุมแบบพีไอดี ไม่สามารถจะควบคุมได้ ดังแสดงได้จากรูปที่ 2

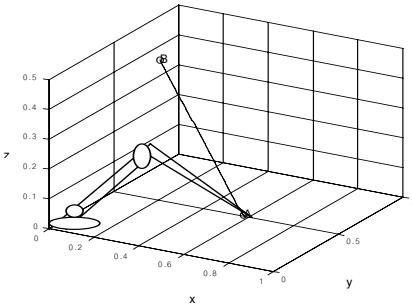


รูปที่ 2 แสดงการทำงานร่วมกันของตัวควบคุมแบบข่ายงานระบบประสาทและตัวควบคุมแบบพีไอดี

ในรูปที่ 2 จะอธิบายถึงระบบของข้อต่อของแขนกล ซึ่งเป็นระบบอันดับสองแบบเชิงเส้นที่ได้จากการ de-coupling แบบจำลองของแขนกลให้แยกเป็นอิสระต่อกันโดยใช้ non-linear de-coupled feedback control scheme [7]

### 3. การวางแผนเส้นทางแบบปิดที่ใช้เวลาเหมาะสมที่สุด (CLOSED-LOOP TIME-OPTIMAL PATH PLANNING)

งานที่แขนกลต้องทำคือให้เคลื่อนที่ไปตามเส้นทางที่กำหนด ในที่นี้เลือกใช้เส้นทางเดินแบบเส้นตรงซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 3 โดยมีจุดเริ่มต้นที่จุด A ที่พิกัด (0.736, 0.226, 0.093) และตำแหน่งสุดท้ายที่ End-effector จะต้องเคลื่อนที่ไปถึงคือจุด B ซึ่งอยู่ที่พิกัด (0.0, 0.854, 0.354) จากนั้นจึงทำการคำนวณหา Trajectory Time History โดยใช้ขั้นตอนวิธีการควบคุมการเคลื่อนที่โดยใช้เวลาน้อยที่สุด (Time-optimal Control Algorithm: TOCA) [8] หลังจากนั้นจึงนำ Trajectory Time History ที่ได้ซึ่งประกอบด้วยข้อมูลของ มุมการหมุนและความเร็วเชิงมุมอ้างอิงในระบบแขนกลที่สอดคล้องกับเส้นทางการเคลื่อนที่ และนำไปใช้เป็นข้อมูลที่ใช้ในการฝึกสอนตัวควบคุมแบบข่ายงานระบบประสาท



รูปที่ 3. แสดงเส้นทางการเคลื่อนที่ของแขนกล

ในส่วนนี้เป็นการนำเอาระบบควบคุมแบบข่ายงานระบบประสาทที่ทำงานร่วมกับตัวควบคุมแบบพีไอดีมาประยุกต์ใช้ในการควบคุมแบบจำลองของแขนกล โดยให้หุ่นยนต์ทำงานโดยเคลื่อนที่ไปตามเส้นตรงที่มีความยาวเท่ากันที่ 1 เมตร และโดยการเปลี่ยนแปลงจุดเริ่มต้นและจุดสุดท้ายของเส้นตรง การทำงานของแขนกลจะคล้ายคลึงกันทุกคู่อันดับของจุดเริ่มต้นและจุดสุดท้ายของเส้นตรง สิ่งที่แตกต่างกันจึงเป็นเพียง Angular Trajectory ซึ่งความแตกต่างกันของ Angular Trajectory จะนำไปสู่การมีค่าคลาดเคลื่อนของการติดตามที่แตกต่างกันของแต่ละเส้นทาง เมื่อรวมปัญหาการหากลุ่มของแรงบิดที่เหมาะสมและปัญหาการค้นหาเส้นทางที่เหมาะสมเข้าด้วยกัน ดังนั้นวัตถุประสงค์คือการหาแรงบิดที่ใช้ไขแอกชูเอเตอร์แต่ละตัวของแขนกลที่ไม่เกินค่าสูงสุดที่แอกชูเอเตอร์สามารถทำได้จริงและจุดเริ่มต้นและจุดสุดท้ายของ End-effector โดยที่คำตอบของปัญหานี้สอดคล้องกับความมุ่งหมายที่ต้องการคือการใช้เวลาในการเคลื่อนที่อยู่ในระดับที่ยอมรับได้ รวมทั้งค่าคลาดเคลื่อนที่เกิดจากการติดตามเส้นทางการเคลื่อนที่นั้นไม่เกินขอบเขตที่กำหนด ปัญหานี้จึงเป็นการหาคำตอบที่เหมาะสมที่มีสองความมุ่งหมาย ซึ่งจะแตกต่างจากการหาคำตอบที่เหมาะสมในปัญหาแบบมีความมุ่งหมายเดียว ดังนั้นขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมในการหาคำตอบที่เหมาะสมแบบหลายความมุ่งหมาย (MOGA) ที่นำเสนอโดยฟอนเซนกาและเฟลมมิง[6] จึงถูกนำมาใช้ในการแก้ปัญหาการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดในงานวิจัยนี้

### 4. รายละเอียดของปัญหาการหาคำตอบที่เหมาะสมแบบหลายความมุ่งหมาย

#### 4.1 ตัวแปรตัดสินใจ (Decision Variable)

4.1.1 กลุ่มของค่าจำกัดแรงบิด โดยการสมมุติให้แรงบิดสูงสุดและแรงบิดต่ำสุดมีขนาดเท่ากันสำหรับแอกชูเอเตอร์แต่ละตัว และในงานวิจัยนี้จะกำหนดช่วงของขนาดแรงบิดบนข้อต่อที่ 1 มีค่าเป็น 15.0-30.0 นิวตัน.เมตร ส่วนข้อต่อที่สองมีขนาดแรงบิดตั้งแต่ 25.0-40.0 นิวตัน.เมตร และข้อต่อที่สามสามารถทำงานได้ตั้งแต่ 5.0-20.0 นิวตัน.เมตร ซึ่งจะพบว่าขอบเขตล่างของแรงบิดทั้งสามข้อต่อคือ (15, 25, 5) ในขณะที่ขอบเขตบนมีค่าเป็น (30, 40, 20)ตามลำดับ

4.1.2 ตำแหน่งของ End-effector โดยการกำหนดตัวแปรค้นหา (Search Variable) ขึ้นมาสองตัวแปร ตัวแปรแรกคือตำแหน่งเริ่มต้นของ End-effector ส่วนตัวแปรที่สองคือจุดอื่นๆในปริภูมิการทำงาน (Workspace) ของแขนกล โดยที่สามารถคำนวณหาเวกเตอร์แสดงทิศทางที่ชี้จากจุดเริ่มต้นมายังจุดสิ้นสุดนี้ได้ ในงานวิจัยนี้ใช้พิกัดในการค้นหาตำแหน่งเริ่มต้นของ End-effector เป็น (0.721-0.751, 0.211-0.241, 0.078-0.108) ซึ่งแสดงค่า x y และ z บนปริภูมิคาร์ทีเซียนตามลำดับ ตำแหน่งสุดท้ายที่เป็นไปได้ในปริภูมิการทำงานของ End-effector จะกำหนดให้อยู่ในช่วง (-0.015-0.015, 0.839-0.869, 0.339-0.369) และแสดงค่า x y และ z บนปริภูมิคาร์ทีเซียนตามลำดับเช่นกัน

#### 4.2 ตัวแปรเป้าหมาย (Objective Variables)

ตัวแปรเป้าหมายของการหาค่าเหมาะสมที่สุดในงานวิจัยนี้ มีสองตัวแปรคือ ค่าคลาดเคลื่อนของการติดตาม (Tracking Error) และเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ (Trajectory Time) โดยค่าคลาดเคลื่อนของการติดตามจะอยู่ในรูปผลรวมของค่าเฉลี่ยสัมบูรณ์ของข้อต่อทั้งสาม ซึ่งคำนวณตลอดเส้นทางการเคลื่อนที่ ดังนั้นฟังก์ชันแสดงค่าคลาดเคลื่อนของการติดตามเป้าหมาย (Tracking Error Objective) จึงแสดงได้ดังสมการที่ (1)

$$Tracking \ Error \ Objective = \sum_{i=1}^3 \left( \frac{\sum_{j=1}^{N_f} |\theta_d^i(j) - \theta_i(j)|}{N_f} \right) \quad (1)$$

โดยที่  $\theta_d^i(j)$  เป็นตัวอย่างลำดับที่ j ของตำแหน่งเชิงมุมที่ต้องการของข้อต่อที่ i ที่ถูกซึกเข้ามา ในขณะที่สัญลักษณ์  $\theta_i(j)$  หมายถึงตำแหน่งเชิงมุมจริงของข้อต่อที่ i และ  $N_f$  คือจำนวนตัวอย่างของเส้นทางการเคลื่อนที่ ที่มีเวลาเหมาะสมที่สุดในเวลาแบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Time) ตัวแปรเป้าหมายตัวที่สองคือเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ซึ่งคำนวณได้จากขั้นตอนวิธีการควบคุมการเคลื่อนที่โดยใช้เวลาน้อยที่สุด

### 4.3 การเข้ารหัสโครโมโซม (Chromosome Encoding)

โครโมโซมของแต่ละสมาชิกของประชากรจะแสดงถึงตัวแปรตัดสินใจทั้ง 9 ตัวแปร ซึ่งประกอบด้วยขอบเขตของขนาดแรงบิดของแอกชูเอเตอร์ที่ขั้วต่อทั้งสามของแขนกล และพิกัดของตำแหน่งเริ่มต้นและตำแหน่งสุดท้ายของ End-effector ตามแกนทั้งสามคือแกน x แกน y และแกน z ซึ่งเมื่อนำเข้ามารวมกันจะกลายเป็นหนึ่งโครโมโซม ในงานวิจัยนี้ จะใช้แบบแผนของการเข้ารหัสโครโมโซมสามแบบที่แตกต่างกันคือโครโมโซมที่เป็นแบบเกรย์ (Gray Code) แบบจำนวนเต็ม (Integer Code) และโครโมโซมแบบจำนวนจริง (Real Code). พิสัยของขนาดแรงบิดสำหรับขั้วต่อทั้งสามจะถูกแบ่งออกเป็น 31 จุดค้นหา (Search Point) โดยมี ขั้นตอนค้นหา (Search Step) เป็น 0.50 นิ้วตัน-เมตร ในทำนองเดียวกันพิสัยของการค้นหา (Search Range) ตำแหน่งที่แสดงจุดเริ่มต้นและจุดสุดท้ายที่แสดงเส้นทางการเคลื่อนที่ในปริภูมิคาร์ทีเซียน ก็ถูกแบ่งโดยมี ขั้นตอนค้นหาเป็น 0.001 เมตร จึงเป็นผลให้มี 31 จุดค้นหาของแต่ละพิกัดสำหรับแต่ละแกน ดังนั้นถ้าใช้รูปแบบโครโมโซมแบบเกรย์ ซึ่งการเข้ารหัสแบบเกรย์ต้องใช้ความยาว 5 บิต เพื่อแสดงตัวแปรตัดสินใจเพียงหนึ่งตัว ความยาวทั้งหมดของโครโมโซมแบบเกรย์ในปัญหานี้จึงมีค่าเป็น 45 บิต และจะสังเกตได้ว่าในกรณีที่ใช้ เลขฐานสองจำนวน 5 บิตแทนตัวแปรตัดสินใจที่แบ่งออกเป็น 31 จุด แต่จะมีค่าที่เกินกว่าช่วงที่พิจารณาเกิดขึ้น จึงมีการส่งค่ากลับให้อยู่ในปริภูมิค้นหาที่เราสนใจโดยการเปลี่ยนค่าตัวเลขที่บิตที่สำคัญ ปัญหานี้จึงหมดไป

ส่วนกรณีของการใช้โครโมโซมแบบจำนวนเต็ม จะไม่มีปัญหาแบบนี้เกิดขึ้น เนื่องจากยีนหนึ่งตัวสามารถนำมาแสดงถึงตัวแปรตัดสินใจได้ โดยยีนแต่ละตัวจะมีค่าอัลลีลอยู่ในกลุ่มของจำนวนเต็ม 31 ค่าตั้งแต่ 0 ถึง 30 จึงเป็นผลให้ โครโมโซมแบบนี้มีความยาวเท่ากับจำนวนตัวแปรตัดสินใจ ซึ่งในที่นี้มีค่าเท่ากับ 9 นั่นเอง

พิจารณาการใช้โครโมโซมที่มีรูปแบบเป็นเลขจำนวนจริง ลักษณะพิเศษของโครโมโซมรูปแบบนี้คือ ยีนแต่ละตัวจะมีค่าอัลลีลเป็นตัวเลขจำนวนจริงที่แสดงถึงค่าของตัวแปรตัดสินใจความยาวของโครโมโซมจะเท่ากับกรณีที่ใช้โครโมโซมแบบจำนวนเต็มคือมีค่าเท่ากับจำนวนตัวแปรตัดสินใจเช่นกัน

### 4.4 การกำหนดความแข็งแรงและการแบ่งส่วนความแข็งแรง

#### (Fitness Assignment and Fitness Sharing)

ในงานวิจัยนี้ ใช้ระเบียบวิธีการจัดลำดับตามที่ฟอนเซกาและคณะ [5] ได้นำเสนอไว้ เพื่อใช้ในการจัดลำดับสมาชิกของประชากรแต่ละตัวแล้วใช้การประมาณค่าแบบเชิงเส้น ในการกำหนดค่าความแข็งแรงของสมาชิกในประชากรแต่ละตัว สำหรับการแบ่งส่วนความแข็งแรงจะใช้ฟังก์ชันการแบ่งส่วนแบบสามเหลี่ยม (Triangular sharing function) ระเบียบวิธีการคัดเลือก (Selection Method)

### 4.5 การคัดเลือกแบบการสุ่มตัวอย่างโดยเพื่อนสุ่มสากลหรือ SUS

(Stochastic Universal Sampling) ถูกนำมาใช้ในการคัดเลือกสมาชิก นอกจากนั้นกลยุทธ์คัดแยกส่วนที่ดีที่สุดก็ถูกนำมาใช้เพื่อทำการเก็บสมาชิกที่

มีค่าความแข็งแรงที่สูงที่สุดไว้และส่งผ่านไปเป็นสมาชิกของประชากรรุ่นลูกโดยไม่ต้องผ่านกระบวนการสลับสายพันธ์หรือการกลายพันธ์

### 4.6 ระเบียบวิธี การสลับสายพันธ์ และการกลายพันธ์ (Crossover and Mutation Method)

เนื่องจากในปัญหาการหาค่าตอบที่มีค่าเหมาะสมที่สุดของงานวิจัยนี้เกี่ยวข้องกับการทดสอบการใช้รูปแบบโครโมโซมที่แตกต่างกันด้วย และประกอบกับเทคนิคการสลับสายพันธ์มาตรฐานแบบจุดเดียว (Standard One-point Crossover) สามารถนำมาใช้ในการสลับสายพันธ์ได้ทั้งโครโมโซมที่มีรูปแบบเป็น เลขฐานสองและโครโมโซมที่มีรูปแบบเป็นเลขจำนวนเต็ม ส่วนโครโมโซมที่มีรูปแบบเป็นตัวเลขจำนวนจริงจะใช้เทคนิคการสลับสายพันธ์ที่แตกต่างออกไปจากมาตรฐานทั้งนี้เนื่องจากการมีโครงสร้างบนโครโมโซมที่แตกต่างไปจากสองรูปแบบที่กล่าวมาในข้างต้น ในที่นี้การสลับสายพันธ์แบบ  $BLX - \alpha$  ที่มีความเหมาะสมกับโครโมโซมแบบจำนวนจริงมากกว่า จะถูกนำมาใช้ในงานวิจัยนี้ โดยเลือกใช้ค่า  $\alpha = 0.50$

นอกจากนี้แล้วเพื่อเป็นการป้องกันหรือลดโอกาสที่ผู้สมาชิกที่ถูกเลือกมาเป็นต้นแบบจะสลับสายพันธ์กันแล้ว ได้สมาชิกรุ่นลูกที่มีความแข็งแรงต่ำกว่าสมาชิกที่เป็นพ่อและแม่ จึงมีการนำเทคนิคของการใช้ข้อจำกัดในการผสมพันธ์ (Mating Restriction) มาเป็นข้อกำหนดสำหรับคู่โครโมโซมพ่อ-แม่ ถ้าสอดคล้องกับข้อกำหนดถึงจะเกิดการสลับสายพันธ์กันขึ้น เพื่อเป็นการง่ายต่อการคำนวณจึงกำหนดให้รัศมีจำกัดการผสมพันธ์ (Mating Restriction Radius) มีค่าเท่ากับรัศมีการแบ่งส่วน (Sharing Radius)

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในงานใน MOEA

ตัวแปร	ค่า
ความยาวโครโมโซม	
การเข้ารหัสแบบเกรย์	45
การเข้ารหัสแบบจำนวนเต็ม	9
การเข้ารหัสแบบจำนวนจริง	9
ความน่าจะเป็นของการสลับสายพันธ์	0.8
ความน่าจะเป็นของการกลายพันธ์	
การเข้ารหัสแบบเกรย์	0.02
การเข้ารหัสแบบจำนวนเต็ม	0.10
การเข้ารหัสแบบจำนวนจริง	0.10
รัศมีการแบ่งส่วนและรัศมีจำกัดการผสมพันธ์	0.03
ขนาดประชากร	30

### 5. ผลการจำลองการทำงานของแขนกลและการใช้ MOEA ในการแก้ปัญหาค่าเหมาะสมที่สุดของเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่

ในงานวิจัยนี้จะศึกษา 2 กรณีของการหาเซตของแรงบิดสูงสุดของแอกชูเอเตอร์ และเส้นทางการเคลื่อนที่ของแขนกลที่มีค่าคลาดเคลื่อนไม่เกิน 0.15708 เรเดียน ในขณะที่ใช้เวลาในการเคลื่อนที่ไม่เกิน 0.27 วินาที ส่วนกรณีศึกษาที่ 2 จะกำหนดให้ใช้เวลาในการเคลื่อนที่ไม่เกิน

0.30 วินาที และค่าคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ต้องไม่เกิน 0.07854  
 เรเดียน ผลการจำลองการทำงานในคอมพิวเตอร์สามารถแสดงได้ดัง  
 ตารางที่ 2 ถึงตารางที่ 7

ตารางที่ 2

PARETO OPTIMAL SOLUTIONS FROM CASE I - GRAY CODE

Random Search		MOEA	
$t$	SMAE	$t$	SMAE
		0.21	0.14613
0.22	0.12512	0.22	0.11324
0.23	0.10976	0.23	0.10090
0.24	0.09433	0.24	0.08179
0.25	0.07003	0.25	0.06801
0.26	0.05950	0.26	0.05544
0.27	0.05298	0.27	0.04156

ตารางที่ 5

PARETO OPTIMAL SOLUTIONS FROM CASE II - GRAY CODE

Random Search		MOEA	
$t$	SMAE	$t$	SMAE
0.25	0.07003	0.25	0.07145
0.26	0.05950	0.26	0.05799
0.27	0.05298	0.27	0.04235
0.28	0.03582	0.28	0.03104
0.29	0.02312	0.29	0.02182
0.30	0.02224	0.30	0.01649

ตารางที่ 3

PARETO OPTIMAL SOLUTIONS FROM CASE I - REAL CODE

Random Search		MOEA	
$t$	SMAE	$t$	SMAE
		0.21	0.14630
0.22	0.12512	0.22	0.11960
0.23	0.10976	0.23	0.09940
0.24	0.09433	0.24	0.09940
0.25	0.07003	0.25	0.09940
0.26	0.05950	0.26	0.01200
0.27	0.05298	0.27	0.04800

ตารางที่ 6

PARETO OPTIMAL SOLUTIONS FROM CASE II - REAL CODE

Random Search		MOEA	
$t$	SMAE	$t$	SMAE
0.25	0.07003	0.25	0.07145
0.26	0.05950	0.26	0.05849
0.27	0.05298	0.27	0.04740
0.28	0.03582	0.28	0.02950
0.29	0.02312	0.29	0.01859
0.30	0.02224	0.30	0.01840

ตารางที่ 4

PARETO OPTIMAL SOLUTIONS FROM CASE I - - INTEGER-  
 BASED CODE

Random Search		MOEA	
$t$	SMAE	$t$	SMAE
		0.21	0.14403
0.22	0.12512	0.22	0.12255
0.23	0.10976	0.23	0.10061
0.24	0.09433	0.24	0.08789
0.25	0.07003	0.25	0.06955
0.26	0.05950	0.26	0.05415
0.27	0.05298	0.27	0.04084

ตารางที่ 7

PARETO OPTIMAL SOLUTIONS FROM CASE II - INTEGER-  
 BASED CODE

Random Search		MOEA	
$t$	SMAE	$t$	SMAE
0.25	0.07003	0.25	0.06986
0.26	0.05950	0.26	0.05371
0.27	0.05298	0.27	0.04686
0.28	0.03582	0.28	0.03014
0.29	0.02312	0.29	0.01994
0.30	0.02224	0.30	0.01760

$t$  - Trajectory time (second)

SMAE - Sum of mean absolute tracking errors (rad)

## 6.สรุปผลการจำลองการทำงาน

ในกรณีศึกษาที่ 1 ที่กำหนดให้เวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ไม่เกิน 0.27 วินาที และค่า Tracking Error ที่เกิดจากการควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนกลไม่เกิน 0.15708 เรเดียน จะพบว่า MOEA ที่ใช้รูปแบบโครโมโซมหรือ Coding Scheme ทั้ง 3 แบบคือ Gray Coding , Real Coding และ Integer Coding Scheme สามารถหาคำตอบที่แตกต่างกันได้ 7 ชุดข้อมูล ในขณะที่ Random Search หาคำตอบได้เพียง 6 ชุดข้อมูล เพราะไม่สามารถระบุคำตอบที่ตำแหน่งที่ใช้เวลาในการเคลื่อนที่ 0.21 วินาทีได้ ซึ่งสามารถกล่าวโดยสรุปได้ว่า MOEA ทั้ง 3 Coding Schemes มีประสิทธิภาพในการค้นหาตำแหน่งที่เป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุดได้ดีกว่า Random Search ทั้งนี้เพราะสามารถหาเซตคำตอบที่เป็น Parato Optimal Solution Set ซึ่งก็คือเซตคำตอบที่ได้ทั้ง 7 ที่เวลา 0.21 วินาทีถึง 0.30 วินาที และทั้งหมดของคำตอบนี้เป็นคำตอบที่ตรงตามเป้าหมายทั้งสองของการหาคำตอบที่เหมาะสมในกรณีศึกษาที่ 1 และด้วยเหตุผลที่ว่าไม่มีเซตคำตอบที่ได้จาก Random Search เหมาะสมกว่าเซตคำตอบที่ได้จาก MOEA จึงกล่าวได้ว่าคำตอบที่ได้จาก MOEA เป็นคำตอบที่เหมาะสมที่สุด(Optimal Solution) เมื่อพิจารณาคำตอบที่ได้จากกรณีศึกษาที่ 2 จะพบว่าทั้ง Random Search และ MOEA ทั้ง 3 Coding Schemes สามารถหาคำตอบที่แตกต่างกันได้ 6 คำตอบ ในกรณีนี้สามารถสรุปได้ว่า จะมี Parato Optimal Solution ได้อย่างมากไม่เกิน 6 เซตคำตอบที่ต่างกัน และเมื่อพิจารณาที่ตำแหน่งเวลา 0.25 วินาทีจะพบว่า Random Search สามารถหาคำตอบที่เหมาะสมกว่า MOEA ทั้ง Gray Coding Scheme และ Real Coding Scheme กล่าวคือค่า Tracking Error ที่เกิดขึ้นจากการค้นหาคำตอบโดย Random Search จะน้อยกว่า MOEA ทั้ง 2 Coding Schemes แต่เมื่อเปรียบเทียบกันที่ตำแหน่งเวลาเดียวกันคือที่ 0.25 วินาที จะพบว่า Integer Based Coding Scheme ให้คำตอบที่เหมาะสมที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับทุกวิธีและ Coding Schemes ถ้าพิจารณาประสิทธิภาพโดยรวมทั้งหมด คือตั้งแต่ตำแหน่งเวลา 0.26 – 0.30 วินาทีจะพบว่า MOEA ทั้ง 3 Coding Schemes สามารถหาคำตอบที่เหมาะสมได้ดีกว่า Random Search

เมื่อทำการเปรียบเทียบคำตอบของ MOEA ทั้ง 3 Coding Schemes ที่แตกต่างกันเทียบที่ตำแหน่งเวลาเดียวกันตั้งแต่ 0.25-0.30 วินาที โดยพิจารณาค่า Tracking Error(SMAE) พบว่าโดยรวมแล้ว Integer Based Coding Scheme มีประสิทธิภาพในการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมเหนือกว่า Gray Coding Scheme และ Real Coding Scheme ตามลำดับซึ่งสามารถสรุปได้ว่าในการแก้ปัญหาการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุด ในปัญหาการควบคุมการเคลื่อนที่แบบปิดและการวางแผนเส้นทางโดยใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม(MOEA) การใช้ โครโมโซมที่มี Coding Scheme แบบ Integer Based จะมีความเหมาะสมในแง่การนำเสนอตัวแปรตัดสินใจ (Decision Variable) มากกว่าทั้ง Gray Code และ Real Code สำหรับกรณีของ Real Coding Scheme จะสะดวกและง่ายต่อการนำเสนอเป็นโครโมโซมของตัวแปรตัดสินใจมากกว่า Gray Coding Scheme และให้ความละเอียดของตัวเลขมากที่สุด การนำไปใช้จะเกิดประสิทธิภาพมากที่สุดเมื่อใช้ควบคู่กับการสลับสายพันธ์ที่เหมาะสมและควบคู่กับการควบคุมความหลากหลาย[11]

## 7.เอกสารอ้างอิง

- [1] Baker, J. E. (1989). *An analysis of the effects of selection in genetic algorithms*, Ph.D. Thesis, Computer Science Department, Vanderbilt University, Nashville, TN.
- [2] Bobrow, J. E., Dubowsky, S. and Gibson, J. S. (1985). Time-optimal control of robotic manipulators along specified paths. *International Journal of Robotics Research*, 4(3), 3-17.
- [3] Chaiyaratana, N. and Zalzala, A. M. S. (1999). Hybridisation of neural networks and genetic algorithms for time-optimal control. *The 1999 Congress on Evolutionary Computation (CEC'99)*, Washington, DC, 1, 389-396.
- [4] Chaiyaratana, N. and Zalzala, A. M. S. (2001). Time-optimal path planning and control using neural networks and a genetic algorithm. *Proceedings of the 2001 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, New York, NY, paper number DSC-24512.
- [5] Fonseca, C. M. and Fleming, P. J. (1993). Genetic algorithms for multiobjective optimization: Formulation, discussion and generalization. *Genetic Algorithms: Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Conference*, Urbana-Champaign, IL, 416-423.
- [6] Fonseca, C. M. and Fleming, P. J. (1995). Multiobjective genetic algorithms made easy: Selection, sharing and mating restriction. *The Second International Conference on Genetic Algorithms in Engineering Systems: Innovations and Applications (GALESIA'95)*, Sheffield, UK, 45-52.
- [7] Freund, E. (1982). Fast nonlinear control with arbitrary pole-placement for industrial robots and manipulators. *International Journal of Robotics Research*, 1(1), 65-78.
- [8] Shiller, Z. (1996). Time-energy optimal control of articulated systems with geometric path constraints. *Transactions of the ASME. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 118(1), 139-143.
- [9] Shiller, Z., Chang, H. and Wong, V. (1996). The practical implementation of time-optimal control for robotic manipulators. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 12(1), 29-39.
- [10] Shiller, Z. and Lu, H.-H. (1992). Computation of path constrained time optimal motions with dynamic singularities. *Transactions of the ASME. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 114(1), 34-40.
- [11] Shimodaira, H. (2001). A diversity-control-oriented genetic algorithm (DCGA): Performance in function optimization. *The 2001 Congress on Evolutionary Computation (CEC'01)*, Seoul, Korea, 1, 44-51.