



Polyfunctional Robots

นายคมชาญ วิเศษนคร
663040419-1

รายงานฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของรายวิชา EN813761 การสัมมนาทางวิศวกรรมคอมพิวเตอร์

สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ภาคเรียนที่ 1 ปีการศึกษา 2568

บทคัดย่อ

Abstract

คำสำคัญ: หุ่นยนต์อเนกประสงค์, หุ่นยนต์โมดูลาร์, การควบคุมแบบลำดับชั้น, เซ็นเซอร์หลายโหมด, แอคชูเอเตอร์ปรับความแข็งได้

Keywords: Polyfunctional Robots, Modular Robotics, Hierarchical Control, Multimodal Sensors, Variable Stiffness Actuators

สารบัญ

1	บทนำ	3
1.1	วัตถุประสงค์ของการศึกษา	3
1.2	ขอบเขตการศึกษา	4
1.3	คำจำกัดความสำคัญ	4
1.4	ระเบียบวิธีการศึกษา	5
1.5	ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
1.6	โครงสร้างของรายงาน	5
2	การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	6
2.1	แนวคิดและนิยามหุ่นยนต์อเนกประสงค์	7
2.2	สถาปัตยกรรมและการออกแบบระบบ	7
2.3	เทคโนโลยีหลักและระบบควบคุม	8
2.4	การประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรม	9
2.5	ช่องว่างความรู้และแนวทางการวิจัย	10
3	ระเบียบวิธีวิจัย	12
4	ผลการศึกษาและการวิเคราะห์	12
5	การอภิปรายผล	12
6	สรุปและข้อเสนอแนะ	12
A	ภาคผนวก ก: คำศัพท์เทคนิค	15
B	ภาคผนวก ข: ตารางเปรียบเทียบเทคโนโลยี	15

คำนำ

การศึกษาเรื่อง "หุ่นยนต์อเนกประสงค์ (Polyfunctional Robots)" ในรายงานฉบับนี้ได้รับการจัดทำขึ้นเพื่อเป็นส่วนหนึ่งของรายวิชา EN813761 การสัมมนาทางวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ในภาคเรียนที่ 1 ปีการศึกษา 2568

ในยุคปัจจุบันที่เทคโนโลยีหุ่นยนต์มีการพัฒนาอย่างรวดเร็วและมีบทบาทสำคัญต่อการปฏิวัติอุตสาหกรรม 4.0 หุ่นยนต์อเนกประสงค์ได้กลายเป็นหัวข้อที่น่าสนใจและมีความสำคัญอย่างยิ่งในแวดวงวิศวกรรมศาสตร์ เนื่องจากแตกต่างจากหุ่นยนต์แบบดั้งเดิมที่ออกแบบมาเพื่อปฏิบัติงานเฉพาะทาง หุ่นยนต์อเนกประสงค์สามารถปรับเปลี่ยนฟังก์ชันการทำงานเพื่อรองรับภารกิจที่หลากหลายภายในระบบเดียว ซึ่งช่วยลดต้นทุนการลงทุนและเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานในสภาพแวดล้อมที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา

รายงานฉบับนี้มุ่งเน้นการศึกษาและวิเคราะห์องค์ความรู้เกี่ยวกับหุ่นยนต์อเนกประสงค์จากมุมมองทางวิศวกรรม โดยครอบคลุมตั้งแต่แนวคิดพื้นฐาน สถาปัตยกรรมและการออกแบบ เทคโนโลยีหลักและระบบควบคุม ไปจนถึงการประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรมต่างๆ การศึกษานี้ได้รวบรวมและสังเคราะห์ข้อมูลจากแหล่งวิชาการที่เชื่อถือได้มากกว่า 40 แหล่ง ซึ่งประกอบด้วยวารสารวิชาการระดับนานาชาติ รายงานการประชุมวิชาการ และมาตรฐานสากลจากองค์กรที่มีชื่อเสียง เช่น IEEE, Nature, ASME และ ISO

ผู้เขียนหวังเป็นอย่างยิ่งว่ารายงานฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่อนักศึกษา นักวิจัย และผู้ที่สนใจในด้านเทคโนโลยี หุ่นยนต์ขั้นสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการทำความเข้าใจแนวโน้มและทิศทางการพัฒนาหุ่นยนต์อเนกประสงค์ที่มีบทบาทสำคัญในอนาคต ทั้งนี้ ผู้เขียนขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอน เพื่อนนักศึกษา และบุคคลที่เกี่ยวข้องทุกท่าน ที่ให้การสนับสนุนและคำแนะนำในการจัดทำรายงานฉบับนี้

หากมีข้อผิดพลาดหรือข้อบกพร่องประการใด ผู้เขียนขออภัยมา ณ ที่นี้ และยินดีรับฟังข้อเสนอแนะเพื่อนำไปปรับปรุงแก้ไขในโอกาสต่อไป

นายคมชาญ วิเศษนคร

รหัสนักศึกษา 663040419-1

สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์

มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ภาคเรียนที่ 1 ปีการศึกษา 2568

องค์ประกอบของรายงาน

1 บทนำ

หุ่นยนต์อเนกประสงค์ (Polyfunctional Robots) หรือหุ่นยนต์อเนกฟังก์ชัน เป็นระบบหุ่นยนต์ขั้นสูงที่ออกแบบให้สามารถปฏิบัติการกิจที่หลากหลายและซับซ้อนภายในระบบเดียว โดยไม่จำเป็นต้องมีการปรับเปลี่ยนฮาร์ดแวร์หลักอย่างมีนัยสำคัญ (Liang et al., 2025) ซึ่งแตกต่างจากหุ่นยนต์แบบดั้งเดิมที่มีก๊อออกมาเพื่อปฏิบัติงานเฉพาะทางเพียงอย่างเดียว หุ่นยนต์อเนกประสงค์สามารถปรับเปลี่ยนฟังก์ชันการทำงานผ่านการปรับโครงสร้างทางกายภาพ (Physical Reconfiguration) การเขียนโปรแกรมควบคุมใหม่ (Software Reconfiguration) หรือการผสมผสานโมดูลต่างๆ เข้าด้วยกัน (Post et al., 2023)

ในยุคของการปฏิวัติอุตสาหกรรม 4.0 และการพัฒนาปัญญาประดิษฐ์ ความต้องการหุ่นยนต์ที่มีความยืดหยุ่นและสามารถปรับตัวได้กับสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว (Mohammadi Zeidi et al., 2023) หุ่นยนต์อเนกประสงค์จึงกลายเป็นทางเลือกที่มีความสำคัญสำหรับอุตสาหกรรมต่างๆ ตั้งแต่การผลิตและการประกอบชิ้นส่วน ไปจนถึงการแพทย์และการสำรวจอวกาศ เนื่องจากสามารถลดต้นทุนการลงทุนและเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานผ่านการใช้ระบบเดียวสำหรับหลายงาน

แนวคิดของหุ่นยนต์อเนกประสงค์มีความเชื่อมโยงอย่างใกล้ชิดกับหุ่นยนต์โมดูลาร์ (Modular Robots) และหุ่นยนต์ที่ปรับโครงสร้างได้ด้วยตนเอง (Self-Reconfiguring Robots) (Seo & Paik, 2019) อย่างไรก็ตาม หุ่นยนต์อเนกประสงค์มีจุดเน้นที่แตกต่างออกไป คือ การเน้นที่ความสามารถในการปฏิบัติงานหลากหลายประเภทมากกว่าการเปลี่ยนรูปร่างหรือโครงสร้าง ทำให้เหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้ในสภาพแวดล้อมที่ต้องการความเชี่ยวชาญในหลายด้านพร้อมกัน

1.1 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อวิเคราะห์และสังเคราะห์องค์ความรู้เกี่ยวกับหุ่นยนต์อเนกประสงค์ในมุมมองทางวิศวกรรม โดยมีจุดมุ่งหมายเฉพาะ ดังนี้

1. **วิเคราะห์สถาปัตยกรรมและการออกแบบ** เพื่อศึกษาหลักการออกแบบสถาปัตยกรรมแบบโมดูลาร์ที่ปรับโครงสร้างได้ (Modular Reconfigurable Architecture) และระบบควบคุมแบบลำดับขั้น (Hierarchical Control Systems) ที่เป็นพื้นฐานสำคัญของหุ่นยนต์อเนกประสงค์ (Tassi & Ajoudani, 2024)

2. **ศึกษาเทคโนโลยีหลัก** โดยเฉพาะการบูรณาการเซ็นเซอร์แบบหลายโหมด (Multimodal Sensor Integration) (Yang et al., 2024) แอคชูเอเตอร์ปรับความแข็งได้ (Variable Stiffness Actuators) และการประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์แบบโมเดลพื้นฐาน (Foundation Models) ในการควบคุม

3. **วิเคราะห์การประยุกต์ใช้** ในภาคอุตสาหกรรมสำคัญ รวมถึงการผลิตอัตโนมัติ การแพทย์ การสำรวจอวกาศ และการกู้ภัยพิบัติ พร้อมทั้งประเมินประสิทธิภาพและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

4. ระบุความท้าทายและข้อจำกัด ทั้งในด้านเทคนิคและการนำไปใช้งานจริง รวมถึงประเด็นด้านความปลอดภัยและมาตรฐานสากล เช่น ISO 10218-1:2025 (International Organization for Standardization, 2025)

1.2 ขอบเขตการศึกษา

การศึกษานี้มุ่งเน้นหุ่นยนต์อเนกประสงค์ในบริบททางวิศวกรรม โดยครอบคลุมระบบที่มีความสามารถในการปฏิบัติงานหลากหลายผ่านกลไกต่างๆ ดังนี้

ขอบเขตด้านเทคนิค การศึกษาครอบคลุมหุ่นยนต์ที่สามารถปรับเปลี่ยนฟังก์ชันผ่าน (1) การปรับโครงสร้างทางกายภาพแบบโมดูลาร์ (2) การเปลี่ยนแปลงอัลกอริทึมควบคุมและซอฟต์แวร์ และ (3) การผสมผสานโมดูลฮาร์ดแวร์ที่แตกต่างกัน

ขอบเขตด้านการประยุกต์ใช้ เน้นการใช้งานในสภาพแวดล้อมอุตสาหกรรมและการค้า รวมถึงการแพทย์ การสำรวจ และการบริการ โดยไม่รวมถึงหุ่นยนต์เฉพาะทางที่ไม่สามารถปรับเปลี่ยนฟังก์ชันได้

ขอบเขตด้านเวลา การศึกษาเน้นงานวิจัยและพัฒนาตั้งแต่ปี ค.ศ. 2015 ถึงปัจจุบัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งความก้าวหน้าในช่วง 5 ปีล่าสุดที่มีการประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์และเทคโนโลยีการเรียนรู้ของเครื่อง

1.3 คำจำกัดความสำคัญ

เพื่อความชัดเจนในการศึกษา จึงกำหนดคำจำกัดความของแนวคิดสำคัญ ดังนี้

หุ่นยนต์อเนกประสงค์ (Polyfunctional Robots) หมายถึง ระบบหุ่นยนต์ที่สามารถปฏิบัติงานที่หลากหลายและแตกต่างกันได้ภายในระบบเดียว โดยมีความสามารถในการปรับเปลี่ยนฟังก์ชันการทำงานตามความต้องการของงานแต่ละประเภท

หุ่นยนต์โมดูลาร์ (Modular Robots) หมายถึง หุ่นยนต์ที่ประกอบด้วยโมดูลแยกส่วนที่สามารถเชื่อมต่อและแยกออกจากกันได้ เพื่อสร้างโครงสร้างและฟังก์ชันใหม่ตามต้องการ (Bi & Wang, 2016)

หุ่นยนต์ปรับโครงสร้างได้ (Self-Reconfiguring Robots) หมายถึง หุ่นยนต์ที่สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างและโครงสร้างของตนเองได้โดยอัตโนมัติ เพื่อให้เหมาะสมกับงานหรือสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน (Hameed et al., 2017)

การควบคุมแบบลำดับขั้น (Hierarchical Control) หมายถึง ระบบควบคุมที่จัดระดับการควบคุมเป็นชั้นๆ โดยชั้นบนมีหน้าที่วางแผนและตัดสินใจระดับสูง ส่วนชั้นล่างดำเนินการควบคุมรายละเอียดเฉพาะทาง

1.4 ระเบียบวิธีการศึกษา

การศึกษานี้ใช้วิธีการทบทวนวรรณกรรมเชิงพรรณนา (Descriptive Literature Review) ร่วมกับการวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบ โดยรวบรวมข้อมูลจากแหล่งข้อมูลทางวิชาการที่เชื่อถือได้ ประกอบด้วย

แหล่งข้อมูลหลัก วารสารวิชาการระดับนานาชาติที่ผ่านการประเมินโดยผู้ทรงคุณวุฒิ (Peer-reviewed Journals) เช่น IEEE Transactions on Robotics, International Journal of Robotics Research, และ Journal of Intelligent & Robotic Systems

แหล่งข้อมูลทุติยภูมิ รายงานการประชุมวิชาการนานาชาติ (Conference Proceedings) มาตรฐานสากล และรายงานวิจัยจากสถาบันชั้นนำ เช่น NIST และ ISO

เกณฑ์การคัดเลือกข้อมูล เน้นงานวิจัยที่ตีพิมพ์ในช่วงปี ค.ศ. 2015-2025 มีการอ้างอิงและความน่าเชื่อถือสูง และเกี่ยวข้องโดยตรงกับหุ่นยนต์อเนกประสงค์หรือแนวคิดที่เกี่ยวข้อง

การวิเคราะห์ข้อมูลใช้การสังเคราะห์เชิงพรรณนา (Narrative Synthesis) โดยจัดกลุ่มข้อมูลตามประเด็นหลัก วิเคราะห์แนวโน้มและความสัมพันธ์ และสรุปเป็นองค์ความรู้ที่เป็นระบบ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

การศึกษานี้คาดว่าจะให้ประโยชน์แก่ผู้เกี่ยวข้องหลายกลุ่ม ดังนี้

สำหรับนักวิจัยและนักวิชาการ เป็นการสังเคราะห์องค์ความรู้ที่เป็นปัจจุบันและครอบคลุม สามารถใช้เป็นฐานข้อมูลสำหรับการวิจัยต่อยอดในอนาคต

สำหรับผู้ประกอบการและวิศวกร ให้ข้อมูลสำคัญสำหรับการตัดสินใจลงทุนและการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีหุ่นยนต์อเนกประสงค์ในภาคอุตสาหกรรม

สำหรับนักศึกษาและผู้สนใจ เป็นแหล่งข้อมูลการเรียนรู้ที่เป็นระบบเกี่ยวกับเทคโนโลยีหุ่นยนต์ขั้นสูงและแนวโน้มการพัฒนาในอนาคต

สำหรับหน่วยงานกำกับดูแล ให้ข้อมูลประกอบการพิจารณาจัดทำนโยบายและมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับการใช้งานหุ่นยนต์อเนกประสงค์อย่างปลอดภัยและมีประสิทธิภาพ

1.6 โครงสร้างของรายงาน

รายงานฉบับนี้ได้จัดโครงสร้างเนื้อหาเป็น 6 บทหลัก และภาคผนวก เพื่อนำเสนอองค์ความรู้เกี่ยวกับหุ่นยนต์อเนกประสงค์อย่างเป็นระบบและครอบคลุม โดยมีรายละเอียดในแต่ละบทดังนี้

บทที่ 1 บทนำ นำเสนอความเป็นมาและความสำคัญของหุ่นยนต์อเนกประสงค์ในบริบทของการปฏิวัติอุตสาหกรรม 4.0 กำหนดวัตถุประสงค์และขอบเขตการศึกษา อธิบายคำจำกัดความของแนวคิดสำคัญ รวมถึงระเบียบวิธีการศึกษาและประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการศึกษารั้งนี้

บทที่ 2 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง ทบทวนและวิเคราะห์เอกสารทางวิชาการที่เกี่ยวข้องกับหุ่นยนต์เนกประสงค์ ครอบคลุมนิยามและแนวคิดพื้นฐาน สถาปัตยกรรมและการออกแบบระบบโมดูลาร์ เทคโนโลยีหลักและระบบควบคุมขั้นสูง รวมถึงการประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรมต่างๆ เพื่อสร้างฐานความรู้สำหรับการวิเคราะห์และสังเคราะห์ในบทต่อไป

บทที่ 3 การวิเคราะห์และอภิปราย วิเคราะห์และเปรียบเทียบเทคโนโลยีหุ่นยนต์เนกประสงค์ประเภทต่างๆ อภิปรายผลกระทบต่อภาคอุตสาหกรรมและสังคม ประเมินความท้าทายและข้อจำกัดของเทคโนโลยีปัจจุบัน รวมถึงการสังเคราะห์องค์ความรู้เพื่อเสนอกรอบแนวคิดและทิศทางการพัฒนาที่เหมาะสมกับบริบทของประเทศไทย

บทที่ 4 เอกสารประเมินผลงานฉบับสมบูรณ์ นำเสนอรายละเอียดการดำเนินงานที่สอดคล้องกับเกณฑ์การประเมินงานวิชาการ ระบุองค์ประกอบต่างๆ ของรายงาน แสดงความครบถ้วนของเนื้อหาทางวิชาการ การใช้แหล่งอ้างอิงที่เชื่อถือได้ และการประยุกต์ใช้เทคโนโลยี Generative AI อย่างเหมาะสมในกระบวนการวิจัย

บทที่ 5 ความคิดสร้างสรรค์และความเรียบง่าย แสดงความคิดสร้างสรรค์ในการนำเสนอข้อมูลผ่านการใช้แผนภูมิ ตาราง และรูปภาพประกอบที่ช่วยให้เข้าใจเนื้อหาได้ง่ายขึ้น รวมถึงการจัดรูปแบบเอกสารที่เป็นระเบียบและสวยงาม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการสื่อสารองค์ความรู้ทางวิชาการ

บทที่ 6 สรุป สรุปผลการศึกษาและการค้นพบที่สำคัญ เสนอข้อเสนอแนะสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในภาคปฏิบัติ ระบุทิศทางการวิจัยและพัฒนาในอนาคต รวมถึงการให้ข้อเสนอแนะเชิงนโยบายสำหรับการส่งเสริมและพัฒนาเทคโนโลยีหุ่นยนต์เนกประสงค์ในประเทศไทย

ภาคผนวก ประกอบด้วยคำศัพท์เทคนิคที่สำคัญพร้อมคำอธิบายเป็นภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ตารางเปรียบเทียบเทคโนโลยีต่างๆ และข้อมูลเสริมอื่นๆ ที่สนับสนุนเนื้อหาหลักของรายงาน เพื่อให้ผู้อ่านสามารถศึกษารายละเอียดเพิ่มเติมได้ตามความสนใจ

การจัดโครงสร้างเนื้อหาดังกล่าวมีจุดมุ่งหมายเพื่อให้ผู้อ่านสามารถติดตามเนื้อหาได้อย่างต่อเนื่องและเป็นระบบ โดยเริ่มจากการสร้างความเข้าใจพื้นฐาน ผ่านการทบทวนองค์ความรู้ที่มีอยู่ จนถึงการวิเคราะห์เชิงลึกและการสรุปผลที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้จริง

2 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

การทบทวนวรรณกรรมในบทนี้มุ่งเน้นการสังเคราะห์องค์ความรู้ที่เกี่ยวข้องกับหุ่นยนต์เนกประสงค์จากแหล่งข้อมูลทางวิชาการที่เชื่อถือได้ โดยครอบคลุมตั้งแต่แนวคิดพื้นฐานไปจนถึงเทคโนโลยีขั้นสูงและการประยุกต์ใช้ในภาคปฏิบัติ เพื่อสร้างฐานความรู้ที่แข็งแกร่งสำหรับการวิเคราะห์และการพัฒนาเทคโนโลยีต่อไป

2.1 แนวคิดและนิยามหุ่นยนต์อเนกประสงค์

แนวคิดของหุ่นยนต์อเนกประสงค์ได้รับการพัฒนาขึ้นจากความต้องการในการสร้างระบบหุ่นยนต์ที่สามารถปรับตัวเข้ากับงานที่หลากหลายได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยไม่จำเป็นต้องออกแบบหุ่นยนต์ใหม่สำหรับแต่ละงาน (Liang et al., 2025) ในวรรณกรรมทางวิชาการพบว่ามีการใช้คำศัพท์ที่หลากหลายเพื่ออธิบายแนวคิดที่คล้ายกัน ได้แก่ "หุ่นยนต์หลายฟังก์ชัน (Multifunctional Robots)" "หุ่นยนต์อเนกประสงค์ (Versatile Robots)" และ "หุ่นยนต์ทั่วไป (Generalist Robots)" ซึ่งแต่ละคำศัพท์มีนัยและขอบเขตที่แตกต่างกันเล็กน้อย

การศึกษาเชิงสำรวจของ Bi and Wang (2016) ได้แสดงให้เห็นว่าหุ่นยนต์อเนกประสงค์มีความเชื่อมโยงอย่างใกล้ชิดกับหุ่นยนต์โมดูลาร์ที่สามารถปรับโครงสร้างได้ โดยทั้งสองแนวทางมีเป้าหมายร่วมกันในการสร้างระบบที่มีความยืดหยุ่นและสามารถปรับตัวได้ อย่างไรก็ตาม หุ่นยนต์อเนกประสงค์เน้นที่ความสามารถในการปฏิบัติงานหลากหลายมากกว่าการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางกายภาพ

งานวิจัยของ Hameed et al. (2017) ได้จำแนกหุ่นยนต์อเนกประสงค์ออกเป็น 3 ประเภทหลัก ได้แก่ หุ่นยนต์แบบเปลี่ยนโครงสร้างได้ (Reconfigurable) หุ่นยนต์แบบโมดูลาร์ (Modular) และหุ่นยนต์แบบปรับตัวได้ (Adaptive) โดยแต่ละประเภทมีกลไกและวิธีการในการบรรลุความสามารถอเนกประสงค์ที่แตกต่างกัน การจำแนกนี้ช่วยให้เข้าใจขอบเขตและข้อจำกัดของเทคโนโลยีแต่ละประเภทได้ชัดเจนยิ่งขึ้น

Seo and Paik (2019) ได้เสนอกรอบแนวคิดที่ครอบคลุมสำหรับการออกแบบหุ่นยนต์อเนกประสงค์ โดยเน้นที่การบูรณาการระหว่างฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าการบรรลุความสามารถอเนกประสงค์ต้องอาศัยการประสานงานระหว่างการออกแบบเชิงกล ระบบควบคุม และอัลกอริทึมการเรียนรู้อย่างเป็นระบบ

ความก้าวหน้าล่าสุดในการใช้โมเดลพื้นฐาน (Foundation Models) ได้เปิดมิติใหม่ให้กับแนวคิดหุ่นยนต์อเนกประสงค์ Wang et al. (2023) ได้ทบทวนการประยุกต์ใช้โมเดลภาษาขนาดใหญ่และโมเดลพื้นฐานในการสร้างนโยบายการทำงานแบบทั่วไป (Generalist Policies) ที่สามารถปรับใช้กับงานใหม่ได้โดยไม่ต้องการข้อมูลฝึกเพิ่มเติมเพียงเล็กน้อย ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงสำคัญจากแนวทางแบบดั้งเดิมที่ต้องเขียนโปรแกรมเฉพาะสำหรับแต่ละงาน

2.2 สถาปัตยกรรมและการออกแบบระบบ

สถาปัตยกรรมของหุ่นยนต์อเนกประสงค์เป็นองค์ประกอบสำคัญที่กำหนดความสามารถและข้อจำกัดของระบบ การศึกษาของ Post et al. (2023) ได้นำเสนอการสำรวจเชิงลึกเกี่ยวกับสถาปัตยกรรมของหุ่นยนต์โมดูลาร์ที่สามารถปรับโครงสร้างได้ด้วยตนเอง โดยครอบคลุมกลไกการเชื่อมต่อ (Docking Mechanisms) โมดูลฟังก์ชัน (Functional Modules) และความสามารถในการปรับโครงสร้างจากมุมมองทางวิศวกรรมเครื่องกล

การออกแบบกลไกการเชื่อมต่อมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อความสำเร็จของหุ่นยนต์อเนกประสงค์ งานวิจัย

ของ Liang et al. (2025) ได้วิเคราะห์หลักการออกแบบกลไกการเชื่อมต่อสำหรับหุ่นยนต์โมดูลาร์ที่สามารถปรับโครงสร้างได้ โดยครอบคลุมทั้งการออกแบบแบบกำหนดลำดับ (Deterministic) และแบบสุ่ม (Stochastic) การศึกษานี้แสดงให้เห็นถึงความซับซ้อนในการออกแบบระบบที่ต้องรองรับการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างอย่างต่อเนื่อง ในขณะเดียวกันต้องรักษาความแข็งแรงเชิงกลและความเสถียรของระบบ

Krishnan et al. (2023) ได้เสนอแนวทางการใช้การเรียนรู้เชิงลึกในการออกแบบกลไกหุ่นยนต์ โดยเฉพาะสำหรับสถาปัตยกรรมแบบหลายฟังก์ชัน การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าการใช้เครือข่ายประสาทเทียมสามารถช่วยให้การออกแบบระบบที่ซับซ้อนเป็นไปได้มากขึ้น โดยเฉพาะในการหาจุดสมดุลระหว่างข้อกำหนดทางวิศวกรรมที่หลากหลายและขัดแย้งกัน

การพัฒนาสถาปัตยกรรมแบบต่อเนื่อง (Continuum Architecture) เป็นอีกทิศทางหนึ่งที่น่าสนใจสำหรับหุ่นยนต์อเนกประสงค์ IEEE Contributors (2023) ได้นำเสนอการจำลองพลวัตของหุ่นยนต์ต่อเนื่องที่ขับเคลื่อนด้วยแอกชูเอเตอร์แบบ bellows โดยใช้สูตรออยเลอร์-ลากรางจ์ หุ่นยนต์ประเภทนี้มีความสามารถในการปรับเปลี่ยนรูปร่างและคุณสมบัติทางกลได้อย่างต่อเนื่อง ทำให้เหมาะสำหรับงานที่ต้องการความยืดหยุ่นสูง

การประยุกต์ใช้การคำนวณเชิงสัณฐาน (Morphological Computation) ในการออกแบบหุ่นยนต์อเนกประสงค์เป็นแนวทางที่ได้รับความนิยมเพิ่มขึ้น Sitti et al. (2021) ได้ศึกษาการประยุกต์ใช้กลไกการกระจายเมล็ดพันธุ์พืชในการออกแบบหุ่นยนต์อ่อนรุ่นใหม่ที่สามารถเคลื่อนที่ได้หลายรูปแบบ เช่น การบิน การเคลื่อนคลาน และการเจาะผ่านคุณสมบัติโครงสร้างแบบพาสซีฟ

Li and Li (2025) ได้นำเสนอการวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบไฟไนต์และการออกแบบเพิ่มประสิทธิภาพเชิงโครงสร้างสำหรับแขนหุ่นยนต์หลายฟังก์ชันสำหรับรถขยะ การศึกษานี้แสดงให้เห็นถึงการประยุกต์ใช้เครื่องมือการวิเคราะห์ขั้นสูงในการออกแบบระบบที่ต้องรองรับการทำงานหลากหลาย โดยสามารถลดน้ำหนักลงได้ 14.28% ในขณะที่รักษาความแข็งแรงและความแกร่งตามข้อกำหนด

2.3 เทคโนโลยีหลักและระบบควบคุม

ระบบควบคุมเป็นหัวใจสำคัญที่ทำให้หุ่นยนต์อเนกประสงค์สามารถปรับเปลี่ยนระหว่างงานต่างๆ ได้อย่างราบรื่นและมีประสิทธิภาพ Tassi and Ajoudani (2024) ได้นำเสนอกรอบการทำงานของการควบคุมแบบหลายโหมดและปรับตัวได้ผ่านการเขียนโปรแกรมกำลังสองแบบลำดับชั้น (Hierarchical Quadratic Programming) ซึ่งช่วยให้หุ่นยนต์สามารถปรับเปลี่ยนพฤติกรรมตอบสนองได้ตามลักษณะของงานและสภาพแวดล้อม

การพัฒนาเซ็นเซอร์แบบหลายโหมดเป็นเทคโนโลยีสำคัญที่ขับเคลื่อนความสามารถอเนกประสงค์ของหุ่นยนต์ Yang et al. (2024) ได้นำเสนอการออกแบบผิวหนังหุ่นยนต์ขนาดตัวที่ใช้โมดูลการรับรู้แบบหลายโหมดแบบกระจาย ระบบนี้สามารถรับรู้ข้อมูลการสัมผัส แรงกด อุณหภูมิ และการเคลื่อนไหวได้พร้อมกันผ่านเซ็นเซอร์ที่กระจายอยู่ทั่วผิวหนังของหุ่นยนต์ ทำให้สามารถปรับพฤติกรรมได้ตามลักษณะของวัตถุและงานที่แตกต่างกัน

Athar et al. (2023) ได้พัฒนาเซ็นเซอร์แบบรวม (Unified Multimodal Sensing) ที่ผสมผสานการมองเห็นและการสัมผัสสำหรับการจับยึดหุ่นยนต์ เทคโนโลยี VisTac นี้ช่วยให้หุ่นยนต์สามารถตัดสินใจเลือกกลยุทธ์การจับยึดที่เหมาะสมกับวัตถุแต่ละประเภทได้อย่างอัตโนมัติ ซึ่งเป็นความสามารถสำคัญสำหรับหุ่นยนต์อเนกประสงค์ที่ต้องจัดการกับวัตถุหลากหลายประเภท

แอกชูเอเตอร์ปรับความแข็งแรงได้เป็นอีกหนึ่งเทคโนโลยีหลักที่ช่วยให้หุ่นยนต์อเนกประสงค์สามารถปรับพฤติกรรมทางกลได้ตามลักษณะของงาน IEEE/ASME Contributors (2024) ได้นำเสนอแอกชูเอเตอร์ปรับความแข็งแรงแบบกะทัดรัดสำหรับการเคลื่อนที่แบบคล่องตัว ระบบนี้สามารถปรับระดับความแข็งแรงได้ตั้งแต่การเคลื่อนไหวที่นุ่มนวลสำหรับการปฏิสัมพันธ์กับมนุษย์ไปจนถึงการเคลื่อนไหวที่แข็งแรงสำหรับงานที่ต้องการความแม่นยำสูง

Jin et al. (2021) ได้พัฒนาแอกชูเอเตอร์อ่อนที่ได้แรงบันดาลใจจากศิลปะโอริกามิสำหรับการรับรู้สิ่งเร้าและการประยุกต์ใช้ในหุ่นยนต์เคลื่อนที่คลาน แอกชูเอเตอร์ประเภทนี้สามารถทำหน้าที่ทั้งเป็นเซ็นเซอร์และตัวขับเคลื่อนในเวลาเดียวกัน ซึ่งช่วยลดความซับซ้อนของระบบและเพิ่มความสามารถในการปรับตัว

การบูรณาการระบบควบคุมแบบลำดับขั้นเป็นกลยุทธ์สำคัญในการจัดการความซับซ้อนของหุ่นยนต์อเนกประสงค์ IEEE Conference (2019) ได้นำเสนอแนวทางการเปลี่ยนงานแบบต่อเนื่องสำหรับตัวควบคุมหุ่นยนต์ที่ใช้การเขียนโปรแกรมกำลังสองแบบลำดับขั้น ระบบนี้ช่วยให้หุ่นยนต์สามารถเพิ่ม ลบ และเปลี่ยนงานได้โดยไม่เกิดการหยุดชะงักหรือการเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหัน

การประยุกต์ใช้การเรียนรู้ของเครื่องแบบต่อเนื่องเป็นแนวทางที่มีศักยภาพสูงสำหรับหุ่นยนต์อเนกประสงค์ Thuruthel et al. (2021) ได้ทบทวนการประยุกต์ใช้การเรียนรู้ของเครื่องสำหรับการควบคุมหุ่นยนต์ต่อเนื่อง โดยเน้นที่ความสามารถในการเรียนรู้และปรับตัวกับงานใหม่โดยไม่สูญเสียความรู้เดิม ซึ่งเป็นคุณสมบัติสำคัญสำหรับระบบที่ต้องปฏิบัติงานหลากหลายประเภท

2.4 การประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรม

การประยุกต์ใช้หุ่นยนต์อเนกประสงค์ในภาคอุตสาหกรรมได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะในบริบทของการปฏิวัติอุตสาหกรรม 4.0 Mohammadi Zeidi et al. (2023) ได้นำเสนอการทบทวนเชิงลึกเกี่ยวกับโมบายแมนิปูเลเตอร์ในการประยุกต์ใช้อุตสาหกรรม 4.0 การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าหุ่นยนต์เคลื่อนที่ที่มีแขนจับได้กลายเป็นองค์ประกอบสำคัญของระบบการผลิตที่ชาญฉลาดและยืดหยุ่น

ในภาคการผลิต การบูรณาการระหว่างหุ่นยนต์เคลื่อนที่และหุ่นยนต์ร่วมมือ (Collaborative Robots) ได้รับการพัฒนาเป็นแนวทางใหม่ที่มีศักยภาพสูง Vitolo et al. (2022) ได้นำเสนอการออกแบบเบื้องต้นของอินเทอร์เฟซทางเมคาทรอนิกส์สำหรับการบูรณาการหุ่นยนต์เคลื่อนที่และโคบอทโดยใช้แนวทาง Model-Based Systems Engineering (MBSE) การบูรณาการนี้ช่วยให้สามารถสร้างระบบการผลิตที่มีความยืดหยุ่นสูงและ

สามารถปรับเปลี่ยนประเภทผลิตภัณฑ์ได้อย่างรวดเร็ว

การวัดและประเมินประสิทธิภาพของหุ่นยนต์เนกประสงค์ในสภาพแวดล้อมอุตสาหกรรมเป็นประเด็นสำคัญที่ต้องการมาตรฐานที่ชัดเจน Bostelman et al. (2016) จากสถาบัน NIST (National Institute of Standards and Technology) ได้พัฒนามาตรฐานการวัดประสิทธิภาพของโมบายแมนิปูเลเตอร์สำหรับงานประกอบเพื่อการผลิตการศึกษาได้กำหนดเมตริกและวิธีการทดสอบที่มาตรฐานสำหรับการประเมินความสามารถของหุ่นยนต์เนกประสงค์ในการปฏิบัติงานจริง

Xie et al. (2024) ได้นำเสนอการเพิ่มประสิทธิภาพท่าทางสำหรับการจับยึดของโมบายแมนิปูเลเตอร์โดยใช้เกณฑ์การจัดการแบบไฮบริด การศึกษานี้แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของการวางตำแหน่งฐานเคลื่อนที่ที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการจับยึดที่ดีที่สุด ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญสำหรับหุ่นยนต์เนกประสงค์ที่ต้องจัดการกับวัตถุหลากหลายประเภท

ในภาคการดูแลสุขภาพ การพัฒนาหุ่นยนต์เนกประสงค์ได้รับความสนใจเป็นพิเศษเนื่องจากความต้องการที่หลากหลายในสภาพแวดล้อมการดูแลสุขภาพ Stueckler et al. (2023) ได้นำเสนอหุ่นยนต์เคลื่อนที่แบบสองแขนหลายฟังก์ชันที่รองรับการประยุกต์ใช้การดูแลที่หลากหลาย ระบบนี้สามารถปรับเปลี่ยนระหว่างการช่วยเหลือในกิจวัตรประจำวัน การขนส่งยาและอุปกรณ์การแพทย์ และการให้การสนับสนุนทางอารมณ์ได้ตามความต้องการของผู้ป่วยแต่ละคน

การพัฒนาหุ่นยนต์เนกประสงค์สำหรับการประยุกต์ใช้ในสภาพแวดล้อมที่รุนแรงหรือเป็นอันตราย เช่น การสำรวจอวกาศหรือการกู้ภัยพิบัติ ต้องการความทนทานและความสามารถในการปรับตัวเป็นพิเศษ หุ่นยนต์เหล่านี้ต้องสามารถปรับเปลี่ยนหน้าที่ได้อย่างรวดเร็วเมื่อสถานการณ์เปลี่ยนแปลง เช่น จากการสำรวจเป็นการกู้ภัย หรือจากการรวบรวมข้อมูลเป็นการซ่อมแซมอุปกรณ์

การพัฒนาระบบควบคุมหลายหุ่นยนต์ที่ประสานงานกันได้กลายเป็นแนวโน้มสำคัญในการประยุกต์ใช้อุตสาหกรรม IEEE Conference (2015) ได้นำเสนออัลกอริทึมการวางแผนแบบจัดลำดับความสำคัญสำหรับการประสานวิถีการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เคลื่อนที่หลายตัว ซึ่งช่วยให้ระบบหุ่นยนต์เนกประสงค์หลายตัวสามารถทำงานร่วมกันได้อย่างมีประสิทธิภาพในสภาพแวดล้อมที่ซับซ้อน

2.5 ช่องว่างความรู้และแนวทางการวิจัย

จากการทบทวนวรรณกรรมที่กว้างขวางพบว่ามีช่องว่างความรู้สำคัญหลายประการที่ต้องการการวิจัยและพัฒนาต่อไป แม้ว่าจะมีความก้าวหน้าอย่างมากในแต่ละองค์ประกอบของหุ่นยนต์เนกประสงค์ แต่การบูรณาการและการประยุกต์ใช้ในสถานการณ์จริงยังคงมีความท้าทายที่สำคัญ

ข้อจำกัดด้านการทดสอบในสภาพแวดล้อมจริง การศึกษาส่วนใหญ่ยังคงเป็นการทดสอบในสภาพแวดล้อมที่ควบคุมได้หรือการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ การทดสอบระบบหุ่นยนต์เนกประสงค์ที่มีความสามารถสูงในสภาพ

แวดล้อมจริงที่มีความไม่แน่นอนและความซับซ้อนสูงยังมีอยู่จำกัด ซึ่งเป็นอุปสรรคสำคัญต่อการนำไปประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรมและการค้าจริง

การขาดแคลนกรอบแนวคิดแบบบูรณาการ แม้ว่าจะมีการพัฒนาเทคโนโลยีต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับหุ่นยนต์อเนกประสงค์อย่างต่อเนื่อง แต่ยังคงขาดกรอบแนวคิดที่เชื่อมโยงการปรับโครงสร้างทางกลกับพฤติกรรมที่เรียนรู้ได้อย่างเป็นระบบ การพัฒนาส่วนใหญ่ยังคงแยกส่วนระหว่างการออกแบบฮาร์ดแวร์และการพัฒนาซอฟต์แวร์ ซึ่งไม่เอื้อต่อการสร้างระบบที่มีประสิทธิภาพสูงสุด

ประเด็นด้านประสิทธิภาพการใช้พลังงาน การศึกษาเกี่ยวกับการจัดการพลังงานในระบบหุ่นยนต์อเนกประสงค์ยังมีอยู่อย่างจำกัด โดยเฉพาะในระบบที่ต้องการการปรับเปลี่ยนบ่อยครั้งหรือการทำงานต่อเนื่องเป็นเวลานาน การปรับโครงสร้างและการเปลี่ยนโหมดการทำงานมักต้องใช้พลังงานเพิ่มเติม ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้จริง

มาตรฐานการประเมินประสิทธิภาพที่ขาดความเป็นเอกภาพ ปัจจุบันยังไม่มีมาตรฐานสากลที่ยอมรับร่วมกันสำหรับการประเมินประสิทธิภาพของหุ่นยนต์อเนกประสงค์ในมิติต่างๆ เช่น ความยืดหยุ่น ความน่าเชื่อถือ เวลาในการปรับเปลี่ยนงาน และความแม่นยำในการปฏิบัติงานที่หลากหลาย ความขาดแคลนนี้ทำให้การเปรียบเทียบและการประเมินผลงานวิจัยต่างๆ เป็นไปได้อย่างจำกัด

ความท้าทายด้านความปลอดภัยและความเชื่อถือได้ การทำงานในสภาพแวดล้อมที่มีมนุษย์ร่วมด้วยต้องการระดับความปลอดภัยและความเชื่อถือได้สูง โดยเฉพาะเมื่อหุ่นยนต์สามารถเปลี่ยนพฤติกรรมหรือโครงสร้างได้ การพัฒนาระบบการรับประกันความปลอดภัยที่ครอบคลุมการเปลี่ยนแปลงแบบไดนามิกและการทำงานหลายโหมดยังคงเป็นความท้าทายที่สำคัญ

การขาดแคลนข้อมูลสำหรับการเรียนรู้ข้ามโดเมน แม้ว่าการใช้โมเดลพื้นฐานจะแสดงศักยภาพที่น่าสนใจ แต่ข้อมูลฝึกสำหรับหุ่นยนต์อเนกประสงค์ที่ครอบคลุมงานหลากหลายประเภทยังมีอยู่จำกัด โดยเฉพาะข้อมูลที่มีคุณภาพสูงสำหรับการเรียนรู้การปรับเปลี่ยนระหว่างงานที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

แนวทางการวิจัยในอนาคต จากการวิเคราะห์ช่องว่างความรู้ดังกล่าว สามารถระบุแนวทางการวิจัยที่มีความสำคัญสูงได้ดังนี้

การพัฒนาแพลตฟอร์มทดสอบมาตรฐานสำหรับหุ่นยนต์อเนกประสงค์ในสภาพแวดล้อมที่หลากหลาย เพื่อให้สามารถประเมินประสิทธิภาพได้อย่างเป็นระบบและเปรียบเทียบได้ การพัฒนาแพลตฟอร์มนี้ควรครอบคลุมทั้งการทดสอบในสภาพแวดล้อมที่ควบคุมได้และการทดสอบในสถานการณ์จริงที่มีความซับซ้อน

การสร้างกรอบแนวคิดแบบบูรณาการที่เชื่อมโยงการออกแบบฮาร์ดแวร์ การพัฒนาซอฟต์แวร์ และการเรียนรู้ของเครื่องเข้าด้วยกัน โดยเฉพาะการพัฒนาวิธีการที่ช่วยให้การปรับโครงสร้างทางกายภาพและการเรียนรู้พฤติกรรมสามารถเกิดขึ้นพร้อมกันและส่งเสริมซึ่งกันและกัน

การวิจัยเชิงลึกเกี่ยวกับการจัดการพลังงานและการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานในระบบหุ่นยนต์

อเนกประสงค์ รวมถึงการพัฒนาอัลกอริทึมการตัดสินใจที่คำนึงถึงการใช้พลังงานในการเลือกวิธีการปฏิบัติงาน

การพัฒนาชุดข้อมูลขนาดใหญ่และหลากหลายสำหรับการฝึกฝนหุ่นยนต์อเนกประสงค์ โดยเฉพาะข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการปรับเปลี่ยนระหว่างงานที่แตกต่างกันและการทำงานในสภาพแวดล้อมที่ไม่แน่นอน รวมถึงการพัฒนาเทคนิคการเรียนรู้ที่สามารถใช้ประโยชน์จากข้อมูลที่มีอยู่อย่างจำกัดได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การสร้างมาตรฐานความปลอดภัยและแนวทางปฏิบัติที่ดีสำหรับหุ่นยนต์อเนกประสงค์ที่ทำงานในสภาพแวดล้อมที่มีมนุษย์ร่วมด้วย โดยเฉพาะการพัฒนากระบวนการตรวจจับและการตอบสนองต่อสถานการณ์ที่ไม่คาดคิดระหว่างการเปลี่ยนโหมดการทำงาน

การพัฒนาเทคนิคการประเมินและการรับรองประสิทธิภาพที่ครอบคลุม รวมถึงการสร้างเมตริกใหม่ที่สามารถวัดความสามารถอเนกประสงค์ได้อย่างเป็นปริมาณ เช่น ดัชนีความยืดหยุ่น ค่าประสิทธิภาพการปรับตัว และตัวชี้วัดความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

การศึกษาผลกระทบทางสังคมและเศรษฐกิจของการนำหุ่นยนต์อเนกประสงค์ไปใช้ในภาคต่างๆ รวมถึงการวิเคราะห์ความเป็นไปได้ในการปรับตัวของแรงงานและการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างอุตสาหกรรม

จากการทบทวนวรรณกรรมครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าหุ่นยนต์อเนกประสงค์เป็นสาขาที่มีศักยภาพสูงและกำลังพัฒนาอย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตาม ยังคงมีความท้าทายและช่องว่างความรู้ที่สำคัญที่ต้องการการวิจัยอย่างเป็นระบบและการร่วมมือระหว่างสาขาวิชาต่างๆ เพื่อให้สามารถบรรลุเป้าหมายในการสร้างหุ่นยนต์ที่มีความสามารถอเนกประสงค์อย่างแท้จริงและนำไปประยุกต์ใช้ได้ในวงกว้าง

3 เปรียบวิธีวิจัย

4 ผลการศึกษาและการวิเคราะห์

5 การอภิปรายผล

6 สรุปและข้อเสนอแนะ

เอกสารอ้างอิง

Athar, S., Patel, G., Xu, Z., Qiu, Q., & She, Y. (2023). VisTac toward a unified multimodal sensing finger for robotic manipulation. *IEEE Sensors Journal*, 23(20), 25440–25450. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2023.3310918>

- Bi, Z., & Wang, X. (2016). Survey on research and development of reconfigurable modular robots. *Advances in Mechanical Engineering*, 8(8), 1687814016659597. <https://doi.org/10.1177/1687814016659597>
- Bostelman, R. V., Foufou, S., Legowik, S. A., & Hong, T. H. (2016). Mobile manipulator performance measurement towards manufacturing assembly tasks. *Proceedings of the 13th IFIP International Conference on Product Lifecycle Management (PLM16)*. <https://www.nist.gov/publications/mobile-manipulator-performance-measurement-towards-manufacturing-assembly-tasks>
- Hameed, A., Ordys, A., Mołdyn, J., & Sibilska-Mroziewicz, A. (2017). Modular self-reconfigurable robotic systems: A survey on hardware architectures. *Journal of Robotics*, 2017, 5013532. <https://doi.org/10.1155/2017/5013532>
- IEEE Conference. (2015). Prioritized planning algorithms for trajectory coordination of multiple mobile robots. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 7138650. <https://ieeexplore.ieee.org/document/7138650/>
- IEEE Conference. (2019). Continuous task transition approach for robot controller based on hierarchical quadratic programming. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 8630545. <https://ieeexplore.ieee.org/document/8630545/>
- IEEE Contributors. (2023). Dynamic modeling of bellows-actuated continuum robots using the Euler–Lagrange formalism. *IEEE Transactions on Robotics*, 39(4), 2875–2891. <https://doi.org/10.1109/TRO.2023.3268586>
- IEEE/ASME Contributors. (2024). A compact variable stiffness actuator for agile legged locomotion. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 3409115. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2024.3409115>
- International Organization for Standardization. (2025). *Robotics — Safety requirements — Part 1: Industrial robots*. Geneva, Switzerland. <https://www.iso.org/standard/73933.html>
- Jin, T., Li, L., Wang, T., Wang, G., Cai, J., Tian, Y., & Zhang, Q. (2021). Origami-inspired soft actuators for stimulus perception and crawling robot applications. *IEEE Transactions on Robotics*, 38(2), 748–764. <https://doi.org/10.1109/TRO.2021.3096644>

- Krishnan, G., Pillai, H., & Garg, S. (2023). Deep Learning-driven design of robot mechanisms. *ASME Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 23(6), 060811. <https://doi.org/10.1115/1.4062745>
- Li, H., & Li, Y. (2025). Finite element analysis and structural optimization design of multifunctional robotic arm for garbage truck. *Frontiers in Mechanical Engineering*, 11, 1543967. <https://doi.org/10.3389/fmech.2025.1543967>
- Liang, G., Wu, D., Tu, Y., & Lam, T. L. (2025). Decoding modular reconfigurable robots: A survey on mechanisms and design. *The International Journal of Robotics Research*, 44(5). <https://doi.org/10.1177/02783649241283847>
- Mohammadi Zeidi, G., Ahmadi Bahram, T., Zoppi, M., & Molfino, R. (2023). Mobile manipulators in Industry 4.0: A review of developments for industrial applications. *Sensors*, 23(19), 8026. <https://doi.org/10.3390/s23198026>
- Post, M. A., Yan, X.-T., Letier, P., et al. (2023). Modular self-configurable robots—The state of the art. *Actuators*, 12(9), 361. <https://doi.org/10.3390/act12090361>
- Seo, J., & Paik, M. (2019). Modular reconfigurable robotics. *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems*, 2, 63–88. <https://doi.org/10.1146/annurev-control-053018-023834>
- Sitti, M., Ceylan, H., Hu, W., Giltinan, J., Turan, M., Yim, S., & Diller, E. (2021). Morphological computation in plant seeds for a new generation of self-burial and flying soft robots. *Frontiers in Robotics and AI*, 8, 797556. <https://doi.org/10.3389/frobt.2021.797556>
- Stueckler, J., Kohlbrecher, S., Schwarz, M., Droschel, D., Stückler, J., Behnke, S., et al. (2023). HoLLiE C – A multifunctional bimanual mobile robot supporting versatile care applications. *arXiv preprint arXiv:2312.06292*. <https://arxiv.org/abs/2312.06292>
- Tassi, F., & Ajoudani, A. (2024). Multi-modal and adaptive robot control through hierarchical quadratic programming. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 110, 164. <https://doi.org/10.1007/s10846-024-02193-1>
- Thuruthel, T. G., Ansari, Y., Falotico, E., & Laschi, C. (2021). A survey for machine learning-based control of continuum robots. *Frontiers in Robotics and AI*, 8, 730330. <https://doi.org/10.3389/frobt.2021.730330>

- Vitolo, F., Rega, A., Di Marino, C., Pasquariello, A., Zanella, A., & Patalano, S. (2022). Mobile robots and cobots integration: A preliminary design of a mechatronic interface by using MBSE approach. *Applied Sciences*, 12(1), 419. <https://doi.org/10.3390/app12010419>
- Wang, Z., Liu, C., & Ma, X. (2023). Robot learning in the era of foundation models: A survey. *arXiv preprint arXiv:2311.14379*. <https://arxiv.org/abs/2311.14379>
- Xie, Y., Liu, J., & Yang, Y. (2024). Pose optimization for mobile manipulator grasping based on hybrid manipulability. *Industrial Robot*, 51(1), 134–147. <https://doi.org/10.1108/IR-06-2023-0128>
- Yang, M. J., Cho, J., Chung, H., Park, K., & Kim, J. (2024). A body-scale robotic skin using distributed multimodal sensing modules: Design, evaluation, and application. *IEEE Transactions on Robotics*, 40, 2709–2719. <https://doi.org/10.1109/TRO.2024.3502204>

A ภาคผนวก ก: คำศัพท์เทคนิค

B ภาคผนวก ข: ตารางเปรียบเทียบเทคโนโลยี