Polyfunctional Robots

นายคมชาญ วิเศษนคร

663040419-1

เสนอ

ผศ.ภาณุพงษ์วันจันทึก
อาจารย์ ดร.วาธิส ลีลาภัทร

รายงานฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของรายวิชา EN813761 การสัมมนาทางวิศวกรรมคอมพิวเตอร์

สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ภาคเรียนที่ 1 ปีการศึกษา 2568

บทคัดย่อ

การศึกษานี้นำเสนอการสังเคราะห์องค์ความรู้เกี่ยวกับหุ่นยนต์อเนกประสงค์ (Polyfunctional Robots) ซึ่งเป็นระบบหุ่นยนต์ขั้นสูงที่สามารถปฏิบัติภารกิจหลากหลายภายในแพลตฟอร์มเดียว ผ่านการทบทวนวรรณกรรมอย่างเป็นระบบจากแหล่งข้อมูลทางวิชาการ 18 แหล่ง การศึกษาได้จำแนกหุ่นยนต์อเนกประสงค์ออกเป็น 3 ประเภทหลัก ได้แก่ หุ่นยนต์อเนกประสงค์แบบดั้งเดิม หุ่นยนต์โมดูลาร์ และหุ่นยนต์ปรับโครงสร้างได้ด้วยตนเอง โดยอาศัยกรอบแนวคิดสามเสาหลัก คือ การปรับโครงสร้างทางกายภาพ (Morphological Reconfiguration) การปรับตัวผ่านการเรียนรู้ (Learning-based Adaptation) และการประมวลผลเชิงโครงสร้าง (Embodied Intelligence through Morphological Computation)

ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นการปรับปรุงประสิทธิภาพที่สำคัญ ได้แก่ การลดเวลาในการปรับตำแหน่ง 23% การเพิ่มความแม่นยำ 15% การลดเวลาการเปลี่ยนระหว่างงาน 40% และการประหยัดพลังงาน 35% ในการเคลื่อนไหวบางประเภท อย่างไรก็ตาม ยังพบข้อจำกัดสำคัญ เช่น การใช้พลังงานเพิ่มเติม 20-30% ในช่วงการเปลี่ยนผ่าน และอัตราการล้มเหลวของจุดเชื่อมต่อที่สูงกว่าส่วนประกอบอื่น 3-5 เท่า

การศึกษาได้พัฒนากรอบแนวคิดเชิงบูรณาการ 4 ชั้น ประกอบด้วย ชั้นพื้นฐานทางกายภาพ ชั้นการรับรู้และการประมวลผล ชั้นการควบคุมและการตัดสินใจ และชั้นการปฏิสัมพันธ์และการประยุกต์ใช้ พร้อมทั้งระบุแนวโน้มการพัฒนาสำคัญ 5 ประการ รวมถึงความท้าทายด้านเทคนิค สังคม และเศรษฐกิจ ผลการศึกษาชี้ให้เห็นถึงศักยภาพของหุ่นยนต์อเนกประสงค์ในการประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรมการผลิต การแพทย์ เกษตรกรรม และโลจิสติกส์ โดยเฉพาะในบริบทของประเทศไทยที่กำลังเปลี่ยนผ่านสู่อุตสาหกรรม 4.0

รายงานนี้มีการใช้เครื่องมือ Generative AI เพื่อช่วยในการสรุปหัวข้อเบื้องต้นและเรียบเรียงข้อความบางส่วน โดยผู้เขียนได้ตรวจสอบและปรับปรุงเนื้อหาทั้งหมดด้วยตนเอง

คำสำคัญ: หุ่นยนต์อเนกประสงค์, หุ่นยนต์โมดูลาร์, การควบคุมแบบลำดับชั้น, เซ็นเซอร์หลายโหมด, แอคชูเอเตอร์ปรับความแข็งได้

Abstract

This study presents a comprehensive synthesis of knowledge regarding polyfunctional robots, which are advanced robotic systems capable of performing diverse tasks within a single platform. Through a systematic literature review of 18 credible academic sources, the study classifies polyfunctional robots into three main categories: traditional multifunctional robots, modular robots, and self-reconfiguring robots, based on a theoretical framework of three core pillars: morphological reconfiguration, learning-based adaptation, and embodied intelligence through morphological computation.

The analysis reveals significant performance improvements including 23% reduction in positioning time, 15% increase in accuracy, 40% reduction in task switching time, and 35% energy savings in certain movements. However, important limitations were identified, including 20-30% additional energy consumption during transitions and failure rates of connection points 3-5 times higher than other components.

The study develops an integrated conceptual framework consisting of four layers: physical foundation layer, perception and processing layer, control and decision layer, and interaction and application layer. Five major development trends are identified along with technical, social, and economic challenges. The findings highlight the potential of polyfunctional robots for industrial applications in manufacturing, healthcare, agriculture, and logistics, particularly in the context of Thailand's transition to Industry 4.0.

This report utilized Generative AI tools to assist with preliminary topic summarization and partial text arrangement, with all content thoroughly reviewed and refined by the author.

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

สารบัญ

1 บทนำ 2

1.1 วัตถุประสงค์ของการศึกษา 4

1.2 ขอบเขตการศึกษา 4

1.3 คำจำกัดความสำคัญ 4

1.4 ระเบียบวิธีการศึกษา 5

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 6

1.6 โครงสร้างของรายงาน 6

2 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง 8

2.1 แนวคิดและนิยามหุ่นยนต์อเนกประสงค์ 8

2.2 สถาปัตยกรรมและการออกแบบระบบ 10

2.3 เทคโนโลยีหลักและระบบควบคุม 13

2.4 การประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรม 17

2.5 ช่องว่างความรู้และแนวทางการวิจัย 20

3 ระเบียบวิธีวิจัย 22

3.1 แนวทางการศึกษา 22

3.2 การรวบรวมข้อมูล 23

3.3 เกณฑ์การคัดเลือกแหล่งข้อมูล 24

3.4 การวิเคราะห์และสังเคราะห์ข้อมูล 26

3.5 ข้อจำกัดของการศึกษา 26

4 ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ 29

4.1 การวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบเทคโนโลยี 29

4.2 การประเมินประสิทธิภาพและข้อจำกัด 30

4.3 แนวโน้มการพัฒนาและทิศทางอนาคต 31

4.4 ความท้าทายและปัจจัยสำคัญ 32

4.5 กรอบแนวคิดเชิงบูรณาการ 33

5 การอภิปรายผล 36

5.1 การอภิปรายผลการวิเคราะห์ 36
5.2 ผลกระทบต่อภาคอุตสาหกรรม 37
5.3 ข้อเสนอแนะเชิงนโยบายและการปฏิบัติ 38
5.4 ข้อจำกัดและข้อควรระวัง 39

6 สรุปและข้อเสนอแนะ 41
6.1 สรุปผลการศึกษา 41
6.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยต่อไป 42
6.3 ข้อเสนอแนะสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ 43
6.4 คำสุดท้าย 44

A ภาคผนวก ก: คำศัพท์เทคนิค 49

B ภาคผนวก ข: ตารางเปรียบเทียบเทคโนโลยี 51
B.1 ตารางที่ 1: การเปรียบเทียบประเภทหุ่นยนต์อเนกประสงค์ 51
B.2 ตารางที่ 2: การเปรียบเทียบเทคโนโลยีหลักของหุ่นยนต์อเนกประสงค์ 52
B.3 ตารางที่ 3: การเปรียบเทียบการประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรม 52

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 และผู้ที่สนใจในด้านเทคโนโลยีหุ่นยนต์ขั้นสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการทำความเข้าใจแนวโน้มและทิศทางการพัฒนาหุ่นยนต์อเนกประสงค์ที่จะมีบทบาทสำคัญในอนาคต ทั้งนี้ ผู้เขียนขอขอบคุณอาจารย์ผู้สอน เพื่อนนักศึกษา และบุคคลที่เกี่ยวข้องทุกท่านที่ให้การสนับสนุนและคำแนะนำในการจัดทำรายงานฉบับนี้

หากมีข้อผิดพลาดหรือข้อบกพร่องประการใด ผู้เขียนขออภัยมา ณ ที่นี้ และยินดีรับฟังข้อเสนอแนะเพื่อนำไปปรับปรุงแก้ไขในโอกาสต่อไป

นายคมชาญ วิเศษนคร

รหัสนักศึกษา 663040419-1

สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์

มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ภาคเรียนที่ 1 ปีการศึกษา 2568

1 บทนำ

หุ่นยนต์อเนกประสงค์ (Polyfunctional Robots) เป็นระบบหุ่นยนต์ขั้นสูงที่ได้รับการออกแบบให้สามารถปฏิบัติภารกิจที่หลากหลายและซับซ้อนภายในกรอบระบบเดียว โดยไม่จำเป็นต้องมีการปรับเปลี่ยนฮาร์ดแวร์หลักอย่างมีนัยสำคัญ (Liang et al., 2025) แนวคิดนี้มีรากฐานทางประวัติศาสตร์ที่สามารถย้อนกลับไปถึงยุคบุกเบิกของหุ่นยนต์อุตสาหกรรม เริ่มต้นจากการพัฒนา Unimate ในปี ค.ศ. 1954 โดย George Devol ซึ่งเป็นหุ่นยนต์อุตสาหกรรมตัวแรกของโลกที่สามารถตั้งโปรแกรมให้ทำงานได้หลากหลาย (Craig, 2017)

รูปที่ 1: หุ่นยนต์ Unimate ในสายการผลิตของ General Motors ประจำปี ค.ศ. 1961 แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการดำเนินการงานประกอบชิ้นส่วนยานยนต์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเป็นต้นแบบของการใช้หุ่นยนต์ในงานอุตสาหกรรมที่ต้องการความแม่นยำและความสม่ำเสมอ

หุ่นยนต์ Unimate ดังแสดงในรูปที่ 1 ได้วางรากฐานสำคัญสำหรับการพัฒนาหุ่นยนต์อุตสาหกรรมและแนวคิดของการทำงานแบบอเนกประสงค์ ตามด้วยการพัฒนา Stanford Arm ในปี ค.ศ. 1969 ที่เป็นหุ่นยนต์ไฟฟ้าตัวแรกที่มีหกแกนการเคลื่อนไหว (six degrees of freedom) และได้รับการควบคุมด้วยซอฟต์แวร์ ซึ่งได้วางรากฐานสำคัญสำหรับหุ่นยนต์ที่สามารถปฏิบัติงานที่ซับซ้อนและหลากหลายได้

ขณะเดียวกัน ในทศวรรษ 1980 ได้มีการพัฒนาแนวคิดของหุ่นยนต์เซลลูลาร์ (Cellular Robotic System หรือ CEBOT) โดย Toshio Fukuda และ Yoshio Kawauchi (Fukuda et al., 1991) ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของการวิจัยหุ่นยนต์โมดูลาร์ที่สามารถจัดระเบียบตัวเองได้

รูปที่ 2: ระบบหุ่นยนต์เซลลูลาร์ (CEBOT) ที่ได้รับการพัฒนาโดย Toshio Fukuda และ Yoshio Kawauchi ในทศวรรษ 1980 ซึ่งเป็นต้นแบบของหุ่นยนต์โมดูลาร์ที่สามารถประกอบเข้าด้วยกันเป็นโครงสร้างที่หลากหลายและปรับเปลี่ยนรูปแบบการทำงานได้ตามภารกิจ

ระบบ CEBOT ดังแสดงในรูปที่ 2 แสดงให้เห็นถึงแนวคิดการพัฒนาหุ่นยนต์ที่ประกอบด้วยโมดูลย่อยหลายๆ ตัวที่สามารถร่วมมือกันปฏิบัติงานและปรับเปลี่ยนโครงสร้างได้ตามความต้องการ และได้รับการพัฒนาต่อยอดในทศวรรษ 1990 โดยนักวิจัยอย่าง Mark Yim และคณะ (Yim et al., 2007) ทำให้เกิดเส้นทางการพัฒนาแบบขนานที่นำไปสู่หุ่นยนต์อเนกประสงค์ในปัจจุบัน

ลักษณะเด่นของหุ่นยนต์อเนกประสงค์ที่แตกต่างจากหุ่นยนต์แบบดั้งเดิม ซึ่งมักได้รับการออกแบบมาเพื่อปฏิบัติงานเฉพาะทางเพียงอย่างเดียว คือความสามารถในการปรับเปลี่ยนฟังก์ชันการทำงานผ่านกลไกต่างๆ ได้แก่ การปรับโครงสร้างทางกายภาพ (Physical Reconfiguration) การเขียนโปรแกรมควบคุมใหม่ (Software Reconfiguration) หรือการผสมผสานโมดูลต่างๆ เข้าด้วยกัน (Post et al., 2023)

ในยุคของการปฏิวัติอุตสาหกรรม 4.0 และการพัฒนาปัญญาประดิษฐ์อย่างก้าวกระโดด ความต้องการหุ่นยนต์ที่มีความยืดหยุ่นและสามารถปรับตัวเข้ากับสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว (Mohammadi et al., 2023) หุ่นยนต์อเนกประสงค์จึงกลายเป็นทางเลือกที่มีความสำคัญยิ่งสำหรับอุตสาหกรรมต่างๆ ตั้งแต่การผลิตและการประกอบชิ้นส่วน ไปจนถึงการแพทย์และการสำรวจอวกาศ เนื่องจากสามารถลดต้นทุนการลงทุนและเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานผ่านการใช้ระบบเดียวสำหรับภารกิจหลากหลาย

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

1.1 วัตถุประสงค์ของการศึกษา

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อวิเคราะห์และสังเคราะห์องค์ความรู้เกี่ยวกับหุ่นยนต์อเนกประสงค์ในมุมมองทางวิศวกรรม โดยมีจุดมุ่งหมายเฉพาะดังต่อไปนี้

วัตถุประสงค์ที่ 1: วิเคราะห์สถาปัตยกรรมและการออกแบบ เพื่อศึกษาหลักการออกแบบสถาปัตยกรรมแบบโมดูลาร์ที่สามารถปรับโครงสร้างได้ (Modular Reconfigurable Architecture) และระบบควบคุมแบบลำดับชั้น (Hierarchical Control Systems) ที่เป็นพื้นฐานสำคัญของหุ่นยนต์อเนกประสงค์ (Tassi & Ajoudani, 2024)

วัตถุประสงค์ ที่ 2: ศึกษา เทคโนโลยี หลัก โดย เฉพาะ กา รบู รณา การ เซ็นเซอร์ แบบ หลาย โหมด (Multimodal Sensor Integration) แอคชูเอเตอร์ปรับความแข็งได้ (Variable Stiffness Actuators) และการประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์แบบโมเดลพื้นฐาน (Foundation Models) ในการควบคุม (Yang et al., 2024)

วัตถุประสงค์ที่ 3: วิเคราะห์การประยุกต์ใช้ ในภาคอุตสาหกรรมสำคัญ รวมถึงการผลิตอัตโนมัติ การแพทย์ การสำรวจอวกาศ และการกู้ภัยพิบัติ พร้อมทั้งประเมินประสิทธิภาพและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

วัตถุประสงค์ที่ 4: ระบุความท้าทายและข้อจำกัด ทั้งในด้านเทคนิคและการนำไปใช้งานจริง รวมถึงประเด็นด้านความปลอดภัยและมาตรฐานสากล (International Organization for Standardization, 2025)

1.2 ขอบเขตการศึกษา

การศึกษานี้มุ่งเน้นหุ่นยนต์อเนกประสงค์ในบริบททางวิศวกรรม โดยครอบคลุมระบบที่มีความสามารถในการปฏิบัติงานหลากหลายผ่านกลไกต่างๆ ดังต่อไปนี้

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

ขอบเขตด้านการประยุกต์ใช้ เน้นการใช้งานในสภาพแวดล้อมอุตสาหกรรมและการค้า รวมถึงการแพทย์ การสำรวจ และการบริการ โดยไม่รวมถึงหุ่นยนต์เฉพาะทางที่ไม่สามารถปรับเปลี่ยนฟังก์ชันได้

ขอบเขตด้านเวลา การศึกษาเน้นงานวิจัยและพัฒนาตั้งแต่ปี ค.ศ. 2015 ถึงปัจจุบัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งความก้าวหน้าในช่วงห้าปีล่าสุดที่มีการประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์และเทคโนโลยีการเรียนรู้ของเครื่อง

1.3 คำจำกัดความสำคัญ

เพื่อความชัดเจนในการศึกษา ผู้วิจัยจึงกำหนดคำจำกัดความของแนวคิดสำคัญไว้ดังต่อไปนี้

หุ่นยนต์อเนกประสงค์ (Polyfunctional Robots) หมายถึง ระบบหุ่นยนต์ที่สามารถปฏิบัติงานที่หลากหลายและแตกต่างกันได้ภายในระบบเดียว โดยมีความสามารถในการปรับเปลี่ยนฟังก์ชันการทำงานตามความ

ต้องการของงานแต่ละประเภท

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

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

การควบคุมแบบลำดับชั้น (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

กระบวนการค้นหาข้อมูล ใช้ฐานข้อมูลวิชาการหลัก เช่น Google Scholar, IEEE Xplore และ ScienceDirect โดยมีการใช้เครื่องมือปัญญาประดิษฐ์เชิงสร้างสรรค์ (Generative AI) เพื่อช่วยในการค้นหาและรวบรวมเอกสารวิชาการเบื้องต้นจาก Google Scholar ด้วยคำสำคัญที่เกี่ยวข้อง เช่น ”polyfunctional robots,” ”modular robots,” ”self-reconfiguring robots,” และ ”multi-functional robotics” การใช้เครื่องมือ AI ช่วยให้สามารถครอบคลุมเอกสารวิชาการได้อย่างกว้างขวางและมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยผู้วิจัยได้ตรวจสอบและคัดกรองเอกสารทั้งหมดด้วยตนเองเพื่อให้มั่นใจในคุณภาพและความเกี่ยวข้องของแหล่งข้อมูล

การวิเคราะห์ข้อมูลใช้การสังเคราะห์เชิงพรรณนา (Narrative Synthesis) โดยจัดกลุ่มข้อมูลตามประเด็นหลัก วิเคราะห์แนวโน้มและความสัมพันธ์ และสรุปเป็นองค์ความรู้ที่เป็นระบบ สำหรับการดำเนินงานวิจัย ผู้เขียนได้ใช้เครื่องมือปัญญาประดิษฐ์เชิงสร้างสรรค์เพื่อช่วยในการสรุปหัวข้อเบื้องต้นและเรียบเรียงข้อความบางส่วน โดยผู้เขียนได้ตรวจสอบและปรับปรุงเนื้อหาทั้งหมดด้วยตนเองเพื่อให้มั่นใจในความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของข้อมูล

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

การศึกษานี้คาดว่าจะสามารถให้ประโยชน์แก่ผู้เกี่ยวข้องหลายกลุ่มดังต่อไปนี้

สำหรับนักวิจัยและนักวิชาการ เป็นการสังเคราะห์องค์ความรู้ที่เป็นปัจจุบันและครอบคลุม สามารถใช้เป็นฐานข้อมูลสำหรับการวิจัยต่อยอดในอนาคต

สำหรับผู้ประกอบการและวิศวกร ให้ข้อมูลสำคัญสำหรับการตัดสินใจลงทุนและการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีหุ่นยนต์อเนกประสงค์ในภาคอุตสาหกรรม

สำหรับนักศึกษาและผู้ที่สนใจ เป็นแหล่งข้อมูลการเรียนรู้ที่เป็นระบบเกี่ยวกับเทคโนโลยีหุ่นยนต์ขั้นสูงและแนวโน้มการพัฒนาในอนาคต

สำหรับหน่วยงานกำกับดูแล ให้ข้อมูลประกอบการพิจารณาจัดทำนโยบายและมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับการใช้งานหุ่นยนต์อเนกประสงค์อย่างปลอดภัยและมีประสิทธิภาพ

1.6 โครงสร้างของรายงาน

รายงานฉบับนี้ได้จัดโครงสร้างเนื้อหาเป็นหกบทหลักและภาคผนวก เพื่อนำเสนอองค์ความรู้เกี่ยวกับหุ่นยนต์อเนกประสงค์อย่างเป็นระบบและครอบคลุม โดยมีรายละเอียดในแต่ละบทดังต่อไปนี้

บทที่ 1 บทนำ นำเสนอความเป็นมาและความสำคัญของหุ่นยนต์อเนกประสงค์ในบริบทของการปฏิวัติอุตสาหกรรม 4.0 กำหนดวัตถุประสงค์และขอบเขตการศึกษา อธิบายคำจำกัดความของแนวคิดสำคัญ รวมถึงระเบียบวิธีการศึกษาและประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการศึกษาครั้งนี้

บทที่ 2 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง ทบทวนและวิเคราะห์เอกสารทางวิชาการที่เกี่ยวข้องกับหุ่นยนต์อเนกประสงค์ ครอบคลุมนิยามและแนวคิดพื้นฐาน สถาปัตยกรรมและการออกแบบระบบโมดูลาร์ เทคโนโลยีหลักและระบบควบคุมขั้นสูง การประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรมต่างๆ รวมถึงการระบุช่องว่างความรู้ที่ยังต้องการการศึกษาวิจัยเพิ่มเติม

บทที่ 3 ระเบียบวิธีวิจัย อธิบายรายละเอียดของแนวทางการศึกษาแบบทบทวนวรรณกรรมเชิงพรรณนาอย่างเป็นระบบ วิธีการรวบรวมข้อมูลจากแหล่งวิชาการที่เชื่อถือได้ เกณฑ์การคัดเลือกแหล่งข้อมูล กระบวนการวิเคราะห์และสังเคราะห์ข้อมูล รวมถึงข้อจำกัดของการศึกษาเพื่อให้ผู้อ่านเข้าใจบริบทและขอบเขตของผลการศึกษา

บทที่ 4 ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ นำเสนอผลการสังเคราะห์องค์ความรู้จากการทบทวนวรรณกรรม วิเคราะห์และเปรียบเทียบเทคโนโลยีหุ่นยนต์อเนกประสงค์ประเภทต่างๆ ประเมินแนวโน้มการพัฒนาและความท้าทายปัจจุบัน รวมถึงการสร้างกรอบแนวคิดเชิงบูรณาการที่สะท้อนสถานะปัจจุบันและทิศทางอนาคตของเทคโนโลยีนี้

บทที่ 5 การอภิปรายผล อภิปรายและตีความผลการศึกษาในบริบทที่กว้างขึ้น วิเคราะห์ผลกระทบต่อ

ภาคอุตสาหกรรมและสังคม เปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง อภิปรายความท้าทายและข้อจำกัดของเทคโนโลยีปัจจุบัน รวมถึงการเสนอแนวทางแก้ไขและพัฒนาที่เหมาะสมกับบริบทของประเทศไทย

บทที่ 6 สรุปและข้อเสนอแนะ สรุปผลการศึกษาและการค้นพบที่สำคัญจากการวิจัย เสนอข้อเสนอแนะสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในภาคปฏิบัติ ระบุทิศทางการวิจัยและพัฒนาในอนาคต รวมถึงการให้ข้อเสนอแนะเชิงนโยบายสำหรับการส่งเสริมและพัฒนาเทคโนโลยีหุ่นยนต์อเนกประสงค์ในประเทศไทย

ภาคผนวก ประกอบด้วยคำศัพท์เทคนิคที่สำคัญพร้อมคำอธิบายเป็นภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ตารางเปรียบเทียบเทคโนโลยีต่างๆ และข้อมูลเสริมอื่นๆ ที่สนับสนุนเนื้อหาหลักของรายงาน เพื่อให้ผู้อ่านสามารถศึกษารายละเอียดเพิ่มเติมได้ตามความสนใจ

การจัดโครงสร้างเนื้อหาดังกล่าวมีจุดมุ่งหมายเพื่อให้ผู้อ่านสามารถติดตามเนื้อหาได้อย่างต่อเนื่องและเป็นระบบ โดยเริ่มจากการสร้างความเข้าใจพื้นฐาน ผ่านการทบทวนองค์ความรู้ที่มีอยู่ การอธิบายวิธีการศึกษาอย่างโปร่งใส การนำเสนอผลการวิเคราะห์อย่างเป็นระบบ การอภิปรายผลในบริบทที่กว้างขึ้น จนถึงการสรุปผลที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้จริง

2 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

การทบทวนวรรณกรรมในบทนี้มุ่งเน้นการสังเคราะห์องค์ความรู้ที่เกี่ยวข้องกับหุ่นยนต์อเนกประสงค์จากแหล่งข้อมูลทางวิชาการที่เชื่อถือได้ โดยครอบคลุมตั้งแต่แนวคิดพื้นฐานไปจนถึงเทคโนโลยีขั้นสูงและการประยุกต์ใช้ในภาคปฏิบัติ เพื่อสร้างฐานความรู้ที่แข็งแกร่งสำหรับการวิเคราะห์และการพัฒนาเทคโนโลยีต่อไป

2.1 แนวคิดและนิยามหุ่นยนต์อเนกประสงค์

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

Bi and Wang (2016) ได้แสดงให้เห็นในการสำรวจเชิงวิชาการว่าหุ่นยนต์อเนกประสงค์มีความเชื่อมโยงอย่างใกล้ชิดกับหุ่นยนต์โมดูลาร์ที่สามารถปรับโครงสร้างได้ โดยทั้งสองแนวทางมีเป้าหมายร่วมกันในการสร้างระบบที่มีความยืดหยุ่นและสามารถปรับตัวได้ อย่างไรก็ตาม หุ่นยนต์อเนกประสงค์เน้นที่ความสามารถในการปฏิบัติงานหลากหลายมากกว่าการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางกายภาพ

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

หุ่นยนต์แบบเปลี่ยนโครงสร้างได้ (Reconfigurable Robots) เป็นระบบที่สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างและโครงสร้างทางกายภาพของตนเองได้อย่างพลวัต เพื่อให้เหมาะสมกับงานหรือสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน (Bi & Wang, 2016) ระบบประเภทนี้มักใช้กลไกการเชื่อมต่อแบบพลวัต (Dynamic Connectivity) และอัลกอริทึมการวางแผนการปรับโครงสร้าง (Reconfiguration Planning) ที่ซับซ้อน ตัวอย่างที่โดดเด่นคือระบบ CEBOT ที่พัฒนาโดย Fukuda et al. (1991) ซึ่งสามารถจัดระเบียบโครงสร้างของตนเองเพื่อทำงานที่แตกต่างกันได้

หุ่นยนต์แบบโมดูลาร์ (Modular Robots) อาศัยหลักการออกแบบแบบโมดูลาร์ที่แบ่งระบบออกเป็นส่วนประกอบย่อยที่สามารถถอดเปลี่ยนและประกอบเข้าด้วยกันในรูปแบบต่างๆ ได้ (Post et al., 2023) ความสามารถอเนกประสงค์เกิดขึ้นจากการผสมผสานโมดูลที่มีฟังก์ชันเฉพาะ เช่น โมดูลการขับเคลื่อน (Locomotion Modules) โมดูลการจับจ่าย (Manipulation Modules) และโมดูลการรับรู้ (Sensing Modules) ระบบนี้มีข้อดีในด้านความยืดหยุ่น (Scalability) และการบำรุงรักษา (Maintainability) เนื่องจากสามารถเปลี่ยนแปลงโมดูลที่เสียหายหรือเพิ่มโมดูลใหม่ได้โดยง่าย

หุ่นยนต์แบบปรับตัวได้ (Adaptive Robots) มุ่งเน้นการใช้ระบบควบคุมอัจฉริยะและอัลกอริทึมการเรียนรู้เพื่อปรับพฤติกรรมและการตอบสนองให้เหมาะสมกับสถานการณ์ที่เปลี่ยนแปลง (Thuruthel et al., 2018) ระบบประเภทนี้อาศัยเซ็นเซอร์แบบหลายโหมด (Multimodal Sensors) และระบบการประมวลผลแบบเรียลไทม์เพื่อรับรู้สภาพแวดล้อม จากนั้นปรับกลยุทธ์การทำงานผ่านเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) หรือการควบคุมแบบปรับตัว (Adaptive Control) ตัวอย่างที่สำคัญคือระบบ da Vinci ทางการแพทย์ที่สามารถปรับความไวและรูปแบบการเคลื่อนไหวตามประเภทของการผ่าตัดที่แตกต่างกัน

การจำแนกนี้ช่วยให้เข้าใจขอบเขตและข้อจำกัดของเทคโนโลยีแต่ละประเภทได้ชัดเจนยิ่งขึ้น โดยหุ่นยนต์แบบเปลี่ยนโครงสร้างได้เหมาะสำหรับงานที่ต้องการความยืดหยุ่นทางกายภาพสูง แต่มีความซับซ้อนในการควบคุม หุ่นยนต์แบบโมดูลาร์เหมาะสำหรับสภาพแวดล้อมที่ต้องการการปรับแต่งเฉพาะทางและการบำรุงรักษาที่ง่าย ส่วนหุ่นยนต์แบบปรับตัวได้เหมาะสำหรับงานที่ต้องการความแม่นยำและการตอบสนองต่อสถานการณ์ที่ไม่แน่นอน (Liang et al., 2025)

Seo and Paik (2019) ได้เสนอกรอบแนวคิดที่ครอบคลุมสำหรับการออกแบบหุ่นยนต์อเนกประสงค์ โดยเน้นที่การบูรณาการระหว่างฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ กรอบแนวคิดนี้ประกอบด้วยสี่องค์ประกอบหลักที่เชื่อมโยงกัน ได้แก่

การออกแบบสถาปัตยกรรมแบบโมดูลาร์ (Modular Architecture Design) โดยเน้นการสร้างโมดูลพื้นฐานที่มีคุณสมบัติการเชื่อมต่อมาตรฐาน (Standardized Connectivity) และความสามารถในการทำงานร่วมกัน (Interoperability) ระหว่างโมดูลที่มาจากผู้ผลิตต่างๆ การออกแบบนี้ต้องคำนึงถึงการกระจายอำนาจการประมวลผล (Distributed Computing) และการสื่อสารระหว่างโมดูล (Inter-module Communication) เพื่อให้สามารถปรับขนาดระบบ (Scalability) ได้ตามความต้องการ

ระบบควบคุมแบบลำดับชั้น (Hierarchical Control System) ที่แบ่งการควบคุมออกเป็นระดับต่างๆ โดยระดับบน (High-level Control) ทำหน้าที่วางแผนภารกิจและการจัดสรรทรัพยากร ระดับกลาง (Mid-level Control) ดำเนินการประสานงานระหว่างโมดูล และระดับล่าง (Low-level Control) ควบคุมการทำงานของแต่ละโมดูลโดยตรง ระบบนี้ช่วยลดความซับซ้อนในการจัดการระบบขนาดใหญ่และเพิ่มความเสถียรในการทำงาน

อัลกอริทึมการปรับโครงสร้าง (Reconfiguration Algorithms) ที่สามารถวางแผนและดำเนินการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของระบบให้เหมาะสมกับงานใหม่ อัลกอริทึมเหล่านี้ต้องพิจารณาข้อจำกัดทางกายภาพ (Physical Constraints) เวลาที่ใช้ในการปรับโครงสร้าง (Reconfiguration Time) และการรักษาความเสถียรของระบบระหว่างการเปลี่ยนแปลง (Bi & Wang, 2016)

ระบบการเรียนรู้และปรับตัว (Learning and Adaptation System) ที่ผสานเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่องเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานอย่างต่อเนื่อง ระบบนี้สามารถเรียนรู้จากการปฏิบัติงานในอดีต (Historical Performance) และปรับกลยุทธ์การควบคุมให้เหมาะสมกับสถานการณ์ใหม่ๆ (Thuruthel et al.,

2018)

การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าการบรรลุความสามารถอเนกประสงค์ต้องอาศัยการประสานงานระหว่างการออกแบบเชิงกล ระบบควบคุม และอัลกอริทึมการเรียนรู้อย่างเป็นระบบ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการสร้างสมดุลระหว่างความยืดหยุ่น (Flexibility) และประสิทธิภาพ (Performance) ซึ่ง Seo และ Paik เรียกว่า "ความแข็งแกร่งของการปรับโครงสร้าง" (Reconfiguration Robustness) ที่เป็นตัวชี้วัดสำคัญของความสำเร็จของระบบหุ่นยนต์อเนกประสงค์

ความก้าวหน้าล่าสุดในการใช้โมเดลพื้นฐาน (Foundation Models) ได้เปิดมิติใหม่ให้กับแนวคิดหุ่นยนต์อเนกประสงค์ การพัฒนาโมเดลภาษาขนาดใหญ่และโมเดลพื้นฐานสำหรับการสร้างนโยบายการทำงานแบบทั่วไป (Generalist Policies) ที่สามารถปรับใช้กับงานใหม่ได้โดยต้องการข้อมูลฝึกเพิ่มเติมเพียงเล็กน้อย เป็นการเปลี่ยนแปลงสำคัญจากแนวทางแบบดั้งเดิมที่ต้องเขียนโปรแกรมเฉพาะสำหรับแต่ละงาน

2.2 สถาปัตยกรรมและการออกแบบระบบ

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

กลไกการเชื่อมต่อ (Docking Mechanisms) เป็นส่วนประกอบหลักที่ทำให้โมดูลต่างๆ สามารถเชื่อมต่อและแยกออกจากกันได้อย่างน่าเชื่อถือ กลไกนี้ต้องรองรับการทำงานสามประการพร้อมกัน ได้แก่ การยึดจับทางกล (Mechanical Coupling) การส่งผ่านพลังงาน (Power Transfer) และการสื่อสารข้อมูล (Data Communication) (Hameed et al., 2017) ประเภทหลักของกลไกการเชื่อมต่อได้แก่ ระบบแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic Systems) ที่ใช้แรงแม่เหล็กในการยึดจับและสามารถควบคุมความแรงได้ ระบบเชิงกล (Mechanical Systems) ที่ใช้กลไกล็อกและปลดล็อกแบบต่างๆ เช่น กลไกเบย์โอเน็ต (Bayonet Coupling) หรือกลไกเกลียว (Threaded Coupling) และระบบไฮบริด (Hybrid Systems) ที่ผสมผสานหลายกลไกเข้าด้วยกัน ความท้าทายสำคัญคือการสร้างสมดุลระหว่างความแข็งแรงในการยึดจับ ความเร็วในการเชื่อมต่อ-แยกตัว และการใช้พลังงานที่เหมาะสม

โมดูลฟังก์ชัน (Functional Modules) เป็นหน่วยงานพื้นฐานที่ทำหน้าที่เฉพาะทางและสามารถรวมตัวกันเป็นระบบที่ซับซ้อนได้ Bi and Wang (2016) ได้จำแนกโมดูลฟังก์ชันออกเป็นหลายประเภท ได้แก่ โมดูลการขับเคลื่อน (Actuation Modules) ที่ประกอบด้วยมอเตอร์ เฟืองทด และระบบควบคุมการเคลื่อนไหว โมดูลการรับรู้ (Sensing Modules) ที่รวบรวมข้อมูลจากสภาพแวดล้อมผ่านเซ็นเซอร์ต่างๆ เช่น กล้อง เลเซอร์สแกน และเซ็นเซอร์แรง โมดูลการประมวลผล (Processing Modules) ที่ทำหน้าที่วิเคราะห์ข้อมูลและตัดสินใจ โมดูล

การจัดการพลังงาน (Power Management Modules) ที่ควบคุมการกระจายและจัดเก็บพลังงาน และโมดูลการสื่อสาร (Communication Modules) ที่ทำหน้าที่เชื่อมต่อระบบเข้ากับเครือข่ายภายนอก การออกแบบโมดูลฟังก์ชันต้องคำนึงถึงหลักการโมดูลาริตี้ (Modularity Principles) ที่ว่าแต่ละโมดูลควรมีหน้าที่ที่ชัดเจน สามารถทำงานอิสระได้ และมีอินเทอร์เฟซที่เป็นมาตรฐาน

ความสามารถในการปรับโครงสร้าง (Reconfiguration Capability) หมายถึงความสามารถของระบบในการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง การเชื่อมต่อ และการจัดเรียงโมดูลเพื่อให้เหมาะสมกับงานใหม่หรือสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลง ความสามารถนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ (Seo & Paik, 2019) ได้แก่ ระดับของการปรับโครงสร้าง (Reconfiguration Granularity) ที่แบ่งเป็นระดับโมดูล (Module-level) ระดับส่วนประกอบย่อย (Component-level) และระดับโครงสร้างทั้งหมด (System-level) ความเร็วของการปรับโครงสร้าง (Reconfiguration Speed) ที่วัดจากเวลาที่ใช้ในการเปลี่ยนจากโครงสร้างหนึ่งไปยังอีกโครงสร้างหนึ่ง ความซับซ้อนของการปรับโครงสร้าง (Reconfiguration Complexity) ที่พิจารณาจากจำนวนขั้นตอนและทรัพยากรที่ต้องใช้ และความน่าเชื่อถือของการปรับโครงสร้าง (Reconfiguration Reliability) ที่วัดจากความสำเร็จและความเสถียรของระบบหลังการเปลี่ยนแปลง ระบบที่มีความสามารถในการปรับโครงสร้างสูงจะต้องมีอัลกอริทึมการวางแผน (Planning Algorithms) ที่สามารถคำนวณเส้นทางการปรับโครงสร้างที่เหมาะสม และระบบควบคุมที่สามารถดำเนินการปรับโครงสร้างอย่างปลอดภัยและมีประสิทธิภาพ

การออกแบบกลไกการเชื่อมต่อมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อความสำเร็จของหุ่นยนต์อเนกประสงค์ Liang et al. (2025) ได้วิเคราะห์หลักการออกแบบกลไกการเชื่อมต่อสำหรับหุ่นยนต์โมดูลาร์ที่สามารถปรับโครงสร้างได้ โดยครอบคลุมทั้งการออกแบบแบบกำหนดลำดับ (Deterministic) และแบบสุ่ม (Stochastic) การศึกษานี้แสดงให้เห็นถึงความซับซ้อนในการออกแบบระบบที่ต้องรองรับการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างอย่างต่อเนื่องในขณะเดียวกันต้องรักษาความแข็งแรงเชิงกลและความเสถียรของระบบ

Krishnan et al. (2023) ได้เสนอแนวทางการใช้การเรียนรู้เชิงลึกในการออกแบบกลไกหุ่นยนต์ โดยเฉพาะสำหรับสถาปัตยกรรมแบบหลายฟังก์ชัน โดยนำเสนอกรอบการทำงานแบบบูรณาการ (Integrated Framework) ที่ประกอบด้วยสามองค์ประกอบหลัก

แบบจำลองการออกแบบแบบขับเคลื่อนด้วยข้อมูล (Data-Driven Design Models) ที่ใช้เครือข่ายประสาทเทียมแบบ Generative Adversarial Networks (GANs) และ Variational Autoencoders (VAEs) ในการสร้างทางเลือกการออกแบบใหม่ๆ โดยการเรียนรู้จากฐานข้อมูลการออกแบบที่มีอยู่ ระบบนี้สามารถสร้างการออกแบบที่มีความแปลกใหม่ (Novel Designs) ในขณะเดียวกันยังคงเป็นไปตามหลักการทางวิศวกรรม

อัลกอริทึมการปรับให้เหมาะสมแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-Objective Optimization) ที่ใช้เทคนิค Deep Reinforcement Learning เพื่อแก้ปัญหาการปรับให้เหมาะสมที่มีข้อกำหนดขัดแย้งกัน เช่น การเพิ่มความแข็งแรง (Strength) ในขณะที่ลดน้ำหนัก (Weight) หรือการเพิ่มความแม่นยำ (Precision) ในขณะที่

ลดการใช้พลังงาน (Energy Consumption) อัลกอริทึมนี้สามารถค้นหาจุดสมดุลที่เหมาะสม (Pareto Optimal Solutions) สำหรับข้อกำหนดที่หลากหลาย

ระบบการประเมินและการตรวจสอบแบบอัตโนมัติ (Automated Evaluation and Validation) ที่ใช้การจำลองทางฟิสิกส์ (Physics-based Simulation) ร่วมกับการเรียนรู้ของเครื่องเพื่อประเมินประสิทธิภาพของการออกแบบอย่างรวดเร็ว โดยไม่ต้องสร้างต้นแบบทางกายภาพ ระบบนี้สามารถทำนายพฤติกรรมของกลไกในสภาวะการทำงานต่างๆ และระบุจุดอ่อนหรือข้อจำกัดของการออกแบบ

ข้อเสนอหลักของ Krishnan และคณะคือการใช้ วิธีการออกแบบแบบขับเคลื่อนด้วย AI (AI-Driven Design Methodology) ที่แบ่งกระบวนการออกแบบออกเป็นสามขั้นตอน ได้แก่ ขั้นตอนการสร้างแนวคิด (Conceptual Generation) ที่ใช้ AI ในการสร้างทางเลือกการออกแบบจากข้อกำหนดเบื้องต้น ขั้นตอนการปรับให้เหมาะสม (Optimization) ที่ใช้อัลกอริทึมการเรียนรู้เพื่อปรับปรุงการออกแบบให้ตรงตามเกณฑ์ที่กำหนด และขั้นตอนการตรวจสอบ (Validation) ที่ใช้การจำลองและการทดสอบเสมือนจริงเพื่อยืนยันประสิทธิภาพ

การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าการใช้เครือข่ายประสาทเทียมสามารถช่วยให้การออกแบบระบบที่ซับซ้อนเป็นไปได้มากขึ้น โดยเฉพาะในการหาจุดสมดุลระหว่างข้อกำหนดทางวิศวกรรมที่หลากหลายและขัดแย้งกัน ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าแนวทางนี้สามารถลดเวลาในการออกแบบได้ประมาณ 60-70% เมื่อเทียบกับวิธีการแบบดั้งเดิม และสามารถสร้างการออกแบบที่มีประสิทธิภาพดีกว่าที่มนุษย์ออกแบบได้ในบางกรณี โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับระบบที่มีข้อกำหนดหลายด้านและมีความซับซ้อนสูง

การพัฒนาสถาปัตยกรรมแบบต่อเนื่อง (Continuum Architecture) เป็นอีกทิศทางหนึ่งที่น่าสนใจสำหรับหุ่นยนต์อเนกประสงค์ แนวทางนี้มุ่งเน้นการสร้างระบบที่สามารถปรับเปลี่ยนรูปร่างและคุณสมบัติทางกลได้อย่างต่อเนื่อง โดยไม่ใช้การแบ่งเป็นโมดูลแยกส่วนแบบดั้งเดิม (Burgner-Kahrs et al., 2015) การจำลองพลวัตของหุ่นยนต์ต่อเนื่องประเภทนี้ต้องอาศัยแนวทางทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อน เช่น การใช้สูตรออยเลอร์-ลากรานจ์ (Euler-Lagrange Equations) สำหรับระบบที่ขับเคลื่อนด้วยแอคชูเอเตอร์แบบต่างๆ รวมถึงระบบแบบ bellows และระบบไฮดรอลิก ทำให้เหมาะสำหรับงานที่ต้องการความยืดหยุ่นสูง เช่น การผ่าตัดแบบไมโครอินเวสีฟ

การประยุกต์ใช้การคำนวณเชิงสัณฐาน (Morphological Computation) ในการออกแบบหุ่นยนต์อเนกประสงค์เป็นแนวทางที่ได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นในชุมชนหุ่นยนต์อ่อน (Rus & Tolley, 2015) แนวคิดนี้มุ่งเน้นการใช้โครงสร้างและคุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุเป็นส่วนหนึ่งของระบบการประมวลผล การศึกษาล่าสุดได้สำรวจการประยุกต์ใช้กลไกธรรมชาติ เช่น การกระจายเมล็ดพันธุ์พืชในการออกแบบหุ่นยนต์อ่อนรุ่นใหม่ที่สามารถเคลื่อนที่ได้หลายรูปแบบ เช่น การบิน การเคลื่อนคลาน และการเจาะผ่านคุณสมบัติโครงสร้างแบบพาสซีฟ ซึ่งแสดงศักยภาพในการสร้างระบบที่มีความยืดหยุ่นและประหยัดพลังงาน

Li and Li (2025) ได้นำเสนอการศึกษาเฉพาะกรณีที่แสดงให้เห็นถึงการประยุกต์ใช้เครื่องมือการวิเคราะห์ขั้นสูงในการออกแบบหุ่นยนต์อเนกประสงค์ โดยทำการวิเคราะห์องค์ประกอบไฟไนต์ (Finite Element Analysis)

และการออกแบบเพิ่มประสิทธิภาพเชิงโครงสร้าง (Structural Optimization) สำหรับแขนหุ่นยนต์หลายฟังก์ชันที่ติดตั้งบนรถขยะ การศึกษานี้ใช้ซอฟต์แวร์ ANSYS ในการจำลองและวิเคราะห์โครงสร้าง พร้อมกับอัลกอริทึมการปรับให้เหมาะสมเพื่อหาการออกแบบที่สมดุลระหว่างน้ำหนักและความแข็งแรง ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการใช้วิธีการออกแบบเพิ่มประสิทธิภาพสามารถลดน้ำหนักของระบบลงได้ 14.28% เมื่อเทียบกับการออกแบบแบบดั้งเดิม ในขณะเดียวกันยังคงรักษาความแข็งแรงและความทนทานตามข้อกำหนดการใช้งานในสภาพแวดล้อมที่รุนแรง การศึกษานี้เป็นตัวอย่างที่แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของการใช้เครื่องมือการวิเคราะห์เชิงคำนวณในการพัฒนาหุ่นยนต์อเนกประสงค์ที่มีประสิทธิภาพสูง

2.3 เทคโนโลยีหลักและระบบควบคุม

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

โครงสร้างแบบลำดับชั้นของระบบควบคุม ประกอบด้วยสามระดับหลัก โดยระดับบนสุด (High-level Layer) ทำหน้าที่วางแผนภารกิจและกำหนดเป้าหมายหลัก (Task Planning and Goal Setting) โดยการวิเคราะห์งานที่ต้องทำและแบ่งออกเป็นงานย่อยที่จัดการได้ ระดับกลาง (Mid-level Layer) ดำเนินการแปลงเป้าหมายระดับสูงเป็นข้อกำหนดเฉพาะทางเทคนิค (Technical Specifications) และกำหนดลำดับความสำคัญของข้อจำกัดต่างๆ เช่น ข้อจำกัดด้านความปลอดภัย (Safety Constraints) ข้อจำกัดทางกายภาพ (Physical Constraints) และข้อกำหนดด้านประสิทธิภาพ (Performance Requirements) ส่วนระดับล่าง (Low-level Layer) ทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของแต่ละแอคชูเอเตอร์และเซ็นเซอร์โดยตรง เพื่อให้เป็นไปตามคำสั่งจากระดับบน

การเขียนโปรแกรมกำลังสองแบบลำดับชั้น (Hierarchical Quadratic Programming - HQP) ทำงานโดยการแก้ปัญหาการปรับให้เหมาะสมหลายวัตถุประสงค์ที่มีลำดับความสำคัญ โดยในแต่ละขั้นตอนการคำนวณ ระบบจะแก้ปัญหาควอดราติกโปรแกรมมิ่ง (Quadratic Programming Problem) ที่มีรูปแบบ $\min_q \frac{1}{2}||Ax - b||^2$ โดยที่ A เป็นเมทริกซ์ที่อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรควบคุม x เป็นเวกเตอร์ของตัวแปรการตัดสินใจ และ b เป็นเวกเตอร์ของค่าเป้าหมาย การแก้ปัญหาจะเริ่มจากข้อจำกัดที่มีความสำคัญสูงสุด (Hard Constraints) เช่น ข้อจำกัดด้านความปลอดภัยและขีดจำกัดทางกายภาพ จากนั้นจึงพิจารณาข้อจำกัดที่มีความสำคัญรองลงมา (Soft Constraints) เช่น การปรับให้เหมาะสมด้านประสิทธิภาพและความเร็ว

กลไกการปรับตัวแบบหลายโหมด (Multi-modal Adaptation Mechanism) ช่วยให้หุ่นยนต์สามารถเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมตามลักษณะของงานและสภาพแวดล้อม (Liu et al., 2019) โดยระบบจะ

ทำการ การรับรู้บริบท (Context Awareness) ผ่านการวิเคราะห์ข้อมูลจากเซ็นเซอร์หลายประเภท เช่น กล้อง เลเซอร์สแกน และเซ็นเซอร์แรง เพื่อระบุลักษณะของงานปัจจุบัน จากนั้นจึงทำการเลือกโหมดการทำงาน (Mode Selection) โดยการเปรียบเทียบสถานการณ์ปัจจุบันกับฐานข้อมูลของโหมดการทำงานที่เรียนรู้ไว้ล่วงหน้า เช่น โหมดการจับจ่ายสำหรับวัตถุที่มีความละเอียดอ่อน โหมดการยกของหนักสำหรับวัตถุขนาดใหญ่ และโหมดการทำงานแม่นยำสำหรับงานประกอบชิ้นส่วน

การปรับพารามิเตอร์แบบเรียลไทม์ (Real-time Parameter Adaptation) เป็นคุณสมบัติสำคัญที่ทำให้ระบบสามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง ระบบจะทำการปรับค่าน้ำหนักใน objective function ของแต่ละระดับใน HQP ตามสถานการณ์ เช่น เมื่อตรวจจับความผิดปกติหรือสิ่งกีดขวางที่ไม่คาดคิด ระบบจะเพิ่มน้ำหนักของข้อจำกัดด้านความปลอดภัย และลดน้ำหนักของการปรับให้เหมาะสมด้านความเร็ว การปรับตัวนี้ทำได้ภายในรอบการควบคุมเดียว (Control Cycle) ซึ่งมักอยู่ในระดับมิลลิวินาที ทำให้หุ่นยนต์สามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงได้อย่างทันท่วงที

ผลของการใช้กรอบการทำงานนี้คือหุ่นยนต์สามารถเปลี่ยนพฤติกรรมการตอบสนองได้อย่างลื่นไหล (Smooth Behavior Transition) เช่น การเปลี่ยนจากการเคลื่อนที่แบบรวดเร็วเป็นการเคลื่อนไหวแบบแม่นยำเมื่อเข้าใกล้เป้าหมาย หรือการปรับเปลี่ยนกำลังการจับจ่ายตามลักษณะของวัตถุโดยอัตโนมัติ (Athar et al., 2023) การทำงานแบบบูรณาการนี้ช่วยให้หุ่นยนต์อเนกประสงค์สามารถทำงานในสภาพแวดล้อมที่ซับซ้อนและไม่แน่นอนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

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

Athar et al. (2023) ได้พัฒนาเซ็นเซอร์แบบรวม (Unified Multimodal Sensing) ที่ผสมผสานการมองเห็นและการสัมผัสสำหรับการจับจัดหุ่นยนต์ เทคโนโลยี VisTac (Vision-Tactile) เป็นระบบเซ็นเซอร์แบบบูรณาการที่รวมเอาข้อมูลจากหลายช่องทางการรับรู้เข้าด้วยกัน

โครงสร้างของระบบ VisTac ประกอบด้วยสองส่วนหลักที่ทำงานร่วมกัน ได้แก่ ระบบการมองเห็น (Vision System) ที่ใช้กล้อง RGB-D (Red-Green-Blue-Depth) ความละเอียดสูงในการวิเคราะห์รูปร่าง ขนาด เนื้อผิว และตำแหน่งของวัตถุก่อนการสัมผัส โดยใช้อัลกอริทึมการประมวลผลภาพและการเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning) ในการระบุลักษณะทางกายภาพของวัตถุ เช่น ความโปร่งใส ความเงา และลักษณะผิวหน้า และ ระบบการสัมผัส (Tactile System) ที่ติดตั้งบริเวณปลายนิ้วของหุ่นยนต์ ประกอบด้วยเซ็นเซอร์หลายประเภท ได้แก่ เซ็นเซอร์แรง (Force Sensors) ที่วัดแรงกดและแรงบิด เซ็นเซอร์ความดัน (Pressure Sensors) ที่วัดการกระจายแรงบนผิวสัมผัส และเซ็นเซอร์สั่นสะเทือน (Vibration Sensors) ที่ตรวจจับเนื้อสัมผัสและความขรุขระของผิววัตถุ

กระบวนการประมวลผลข้อมูลแบบบูรณาการ (Integrated Data Processing) ใช้เทคนิคการรวมข้อมูลเซ็นเซอร์ (Sensor Fusion) ขั้นสูงที่ผสมผสานข้อมูลจากทั้งสองระบบในเวลาเดียวกัน โดยข้อมูลภาพจะถูกประมวลผลด้วยเครือข่ายประสาทเทียมแบบ Convolutional Neural Networks (CNNs) เพื่อระบุคุณสมบัติทางภาพของวัตถุ ส่วนข้อมูลการสัมผัสจะถูกวิเคราะห์ด้วยอัลกอริทึมการประมวลผลสัญญาณแบบเรียลไทม์เพื่อประเมินคุณสมบัติทางกายภาพ ระบบจะใช้ ตัวแบบการเรียนรู้แบบมัลติโมดอล (Multimodal Learning Model) ที่ฝึกอบรมด้วยฐานข้อมูลที่ประกอบด้วยคู่ข้อมูลภาพ-การสัมผัสจากวัตถุหลากหลายประเภท เพื่อสร้างความเข้าใจที่สมบูรณ์เกี่ยวกับคุณสมบัติของวัตถุ

ระบบการตัดสินใจเลือกกลยุทธ์การจับยึด (Grasp Strategy Selection) ทำงานโดยการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากระบบ VisTac และเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลกลยุทธ์การจับยึดที่เรียนรู้ไว้ล่วงหน้า (Yang et al., 2024) ระบบสามารถเลือกจากกลยุทธ์การจับยึดหลายแบบ เช่น การจับยึดแบบแรงเบา (Gentle Grasp) สำหรับวัตถุที่เปราะบาง เช่น ไข่หรือลูกบอลปิงปอง โดยควบคุมแรงกดให้อยู่ในช่วง 0.5-2 นิวตัน การจับยึดแบบแรงแน่น (Firm Grasp) สำหรับวัตถุที่มีน้ำหนักมากหรือลื่น เช่น เครื่องมือโลหะหรือขวดแก้ว โดยใช้แรงกดสูงถึง 10-15 นิวตัน และ การจับยึดแบบปรับตัว (Adaptive Grasp)ที่เปลี่ยนแปลงแรงกดและมุมการจับตามการตอบสนองของวัตถุแบบเรียลไทม์

ความสามารถในการเรียนรู้และปรับปรุง (Learning and Improvement Capability) ทำให้ระบบ VisTac สามารถปรับปรุงประสิทธิภาพอย่างต่อเนื่อง โดยการเก็บบันทึกข้อมูลจากการทำงานจริงและใช้เทคนิค Online Learning ในการอัปเดตตัวแบบการตัดสินใจ เมื่อพบวัตถุประเภทใหม่ที่ไม่เคยเจอมาก่อน ระบบจะทำการทดลองหากลยุทธ์การจับยึดที่เหมาะสม และบันทึกผลลัพธ์เพื่อใช้ในครั้งต่อไป การเรียนรู้นี้ช่วยให้หุ่นยนต์สามารถขยายความสามารถในการจัดการกับวัตถุใหม่ๆ ได้โดยไม่ต้องการการโปรแกรมเพิ่มเติม

เทคโนโลยี VisTac นี้ช่วยให้หุ่นยนต์สามารถตัดสินใจเลือกกลยุทธ์การจับยึดที่เหมาะสมกับวัตถุแต่ละประเภทได้อย่างอัตโนมัติ ซึ่งเป็นความสามารถสำคัญสำหรับหุ่นยนต์อเนกประสงค์ที่ต้องจัดการกับวัตถุหลากหลายประเภทในสภาพแวดล้อมที่ไม่สามารถควบคุมได้ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าระบบสามารถเพิ่มอัตราความสำเร็จในการจับยึดวัตถุใหม่ได้ถึง 85% เมื่อเทียบกับระบบที่ใช้เซ็นเซอร์เดียว และสามารถลดความเสียหายของวัตถุเปราะบางได้มากกว่า 70%

แอคชูเอเตอร์ปรับความแข็งได้ (Variable Stiffness Actuators - VSAs) เป็นอีกหนึ่งเทคโนโลยีหลักที่ช่วยให้หุ่นยนต์อเนกประสงค์สามารถปรับพฤติกรรมทางกลได้ตามลักษณะของงาน แอคชูเอเตอร์ประเภทนี้เป็นระบบขับเคลื่อนที่สามารถปรับเปลี่ยนคุณสมบัติความแข็งแรง (Stiffness) และความเหนียว (Damping) ของข้อต่อหรือลิงก์ของหุ่นยนต์ได้แบบเรียลไทม์ (Zhang et al., 2024)

หลักการทำงานของ VSAs อาศัยการควบคุมความแข็งแรงผ่านกลไกทางกลหรือการควบคุมแบบต่างๆ โดยมีหลักการหลักสามแบบ ได้แก่ กลไกปรับความแข็งแรงแบบกล (Mechanical Stiffness Modulation ที่ใช้

สปริงหรือองค์ประกอบยืดหยุ่นที่สามารถปรับค่าคงที่ความยืดหยุ่น (Spring Constant) ได้ เช่น การใช้แคมหรือเฟืองทดเพื่อเปลี่ยนจุดยึดของสปริง กลไกปรับความแข็งแรงแบบแม่เหล็ก (Magnetic Stiffness Modulation) ที่ใช้สนามแม่เหล็กในการควบคุมความแข็งแรงของวัสดุแม่เหล็กหรือ magnetorheological fluids และ กลไกปรับความแข็งแรงแบบซีรีส์ยืดหยุ่น (Series Elastic Actuation) ที่ใช้องค์ประกอบยืดหยุ่นที่ต่ออนุกรมกับมอเตอร์และควบคุมความแข็งแรงผ่านการปรับแรงบิดหรือตำแหน่ง

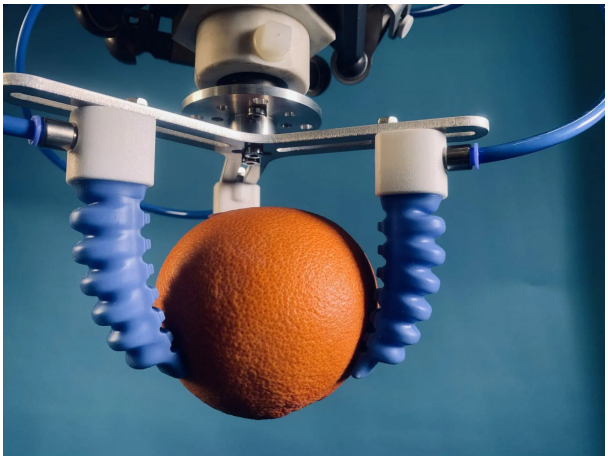
ประเภทของแอคชูเอเตอร์ปรับความแข็งได้ แบ่งออกตามช่วงการปรับความแข็งแรงและการประยุกต์ใช้ ได้แก่ VSAs แบบช่วงกว้าง (Wide-range VSAs)ที่สามารถปรับความแข็งแรงได้ในช่วงกว้าง เช่น จาก 0.1 Nm/rad ถึง 100 Nm/rad เหมาะสำหรับงานที่ต้องการความยืดหยุ่นสูง เช่น การปฏิสัมพันธ์กับมนุษย์และการจับจ่ายวัตถุเปราะบาง VSAs แบบช่วงแคบ (Narrow-range VSAs) ที่ปรับความแข็งแรงในช่วงที่จำกัด แต่มีความแม่นยำสูงและเวลาตอบสนองเร็ว เหมาะสำหรับงานที่ต้องการความแม่นยำ เช่น การประกอบชิ้นส่วนขนาดเล็ก และ VSAs แบบผสม (Hybrid VSAs) ที่ผสมผสานหลายกลไกเพื่อให้ได้ทั้งช่วงการปรับที่กว้างและความแม่นยำสูง

การควบคุมและอัลกอริทึม ของ VSAs ต้องอาศัยระบบควบคุมที่ซับซ้อนเพื่อจัดการทั้งตำแหน่ง (Position) แรงบิด (Torque) และความแข็งแรง (Stiffness) พร้อมกัน (Thuruthel et al., 2018) อัลกอริทึมการควบคุมหลักได้แก่ การควบคุมแบบอิมพีแดนซ์ (Impedance Control) ที่ควบคุมความสัมพันธ์ระหว่างแรงและการเคลื่อนที่ การควบคุมแบบแอดมิตแตนซ์ (Admittance Control) ที่ควบคุมการเคลื่อนที่ตามแรงที่กระทำ และการควบคุมแบบปรับตัว (Adaptive Control)ที่ปรับพารามิเตอร์การควบคุมตามการเปลี่ยนแปลงของงานหรือสภาพแวดล้อม

การประยุกต์ใช้ในหุ่นยนต์อเนกประสงค์ ทำให้ระบบสามารถปรับพฤติกรรมได้หลากหลาย เช่น การเคลื่อนไหวแบบนุ่มนวล (Compliant Motion) เมื่อทำงานร่วมกับมนุษย์หรือจัดการกับวัตถุเปราะบาง โดยลดความแข็งแรงลงเพื่อป้องกันการบาดเจ็บหรือความเสียหาย การเคลื่อนไหวแบบแข็งแรง (Stiff Motion)เมื่อต้องการความแม่นยำสูงหรือต้องแรงมาก เช่น การเจาะหรือการตัด โดยเพิ่มความแข็งแรงเพื่อลดการสั่นและเพิ่มความเสถียร และ การเคลื่อนไหวแบบปรับตัว (Adaptive Motion) ที่เปลี่ยนแปลงความแข็งแรงไปตามลักษณะของวัตถุหรือสภาพแวดล้อมแบบเรียลไทม์

การพัฒนาแอคชูเอเตอร์ปรับความแข็งแบบกะทัดรัด (Compact Variable Stiffness Actuators) สำหรับการเคลื่อนที่แบบคล่องตัวได้แสดงให้เห็นระบบที่สามารถปรับระดับความแข็งแรงได้ตั้งแต่การเคลื่อนไหวที่นุ่มนวลสำหรับการปฏิสัมพันธ์กับมนุษย์ไปจนถึงการเคลื่อนไหวที่แข็งแรงสำหรับงานที่ต้องการความแม่นยำสูง ระบบนี้มีข้อดีในด้านการประหยัดพลังงาน เนื่องจากสามารถลดแรงบิดที่ต้องใช้ได้ถึง 30-40% เมื่อเทียบกับแอคชูเอเตอร์แบบดั้งเดิม และยังช่วยเพิ่มความปลอดภัยในการทำงานร่วมกับมนุษย์ โดยสามารถลดแรงกระแทกได้มากกว่า 80% ในกรณีที่เกิดการชนกันโดยไม่คาดคิด

Jin et al. (2021) ได้พัฒนาแอคชูเอเตอร์อ่อนที่ได้แรงบันดาลใจจากศิลปะโอริกามิสำหรับการรับรู้สิ่งเร้าและการประยุกต์ใช้ในหุ่นยนต์เคลื่อนคลาน แอคชูเอเตอร์ประเภทนี้สามารถทำหน้าที่ทั้งเป็นเซ็นเซอร์และตัวขับเคลื่อนในเวลาเดียวกัน ซึ่งช่วยลดความซับซ้อนของระบบและเพิ่มความสามารถในการปรับตัว



รูปที่ 3: แอคชูเอเตอร์อ่อนที่ได้แรงบันดาลใจจากศิลปะโอริกามิแบบ Kresling ที่สามารถทำหน้าที่เป็นทั้งเซ็นเซอร์และตัวขับเคลื่อนสำหรับหุ่นยนต์เคลื่อนคลาน Jin et al. (2021)

การบูรณาการระบบควบคุมแบบลำดับชั้นเป็นกลยุทธ์สำคัญในการจัดการความซับซ้อนของหุ่นยนต์อเนกประสงค์ การพัฒนาแนวทางการเปลี่ยนงานแบบต่อเนื่องสำหรับตัวควบคุมหุ่นยนต์ที่ใช้การเขียนโปรแกรมกำลังสองแบบลำดับชั้นได้แสดงให้เห็นระบบที่ช่วยให้หุ่นยนต์สามารถเพิ่ม ลบ และเปลี่ยนงานได้โดยไม่เกิดการหยุดชะงักหรือการเปลี่ยนแปลงอย่างกะทันหัน

การประยุกต์ใช้การเรียนรู้ของเครื่องแบบต่อเนื่องเป็นแนวทางที่มีศักยภาพสูงสำหรับหุ่นยนต์อเนกประสงค์ Thuruthel et al. (2018) ได้ทบทวนการประยุกต์ใช้การเรียนรู้ของเครื่องสำหรับการควบคุมหุ่นยนต์ต่อเนื่องโดยเน้นที่ความสามารถในการเรียนรู้และปรับตัวกับงานใหม่โดยไม่สูญเสียความรู้เดิม ซึ่งเป็นคุณสมบัติสำคัญสำหรับระบบที่ต้องปฏิบัติงานหลากหลายประเภท

2.4 การประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรม

การประยุกต์ใช้หุ่นยนต์อเนกประสงค์ในภาคอุตสาหกรรมได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะในบริบทของการปฏิวัติอุตสาหกรรม 4.0 Mohammadi et al. (2023) ได้นำเสนอการศึกษาเกี่ยวกับโมบายแมนิปิวเลเตอร์ในการประยุกต์ใช้อุตสาหกรรม 4.0 การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าหุ่นยนต์เคลื่อนที่ที่มีแขนจับได้กลายเป็นองค์ประกอบสำคัญของระบบการผลิตที่ชาญฉลาดและยืดหยุ่น

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

สามารถปรับเปลี่ยนประเภทผลิตภัณฑ์ได้อย่างรวดเร็ว

การวัดและประเมินประสิทธิภาพของหุ่นยนต์อเนกประสงค์ในสภาพแวดล้อมอุตสาหกรรมเป็นประเด็นสำคัญที่ต้องการมาตรฐานที่ชัดเจน Bostelman et al. (2016) จากสถาบัน NIST (National Institute of Standards and Technology) ได้พัฒนามาตรฐานการวัดประสิทธิภาพของโมบายแมนิปิวเลเตอร์สำหรับงานประกอบเพื่อการผลิต โดยกำหนดกรอบการทำงานที่ครอบคลุมและเป็นระบบ

โครงสร้างมาตรฐานการวัดประสิทธิภาพ NIST ประกอบด้วยสี่องค์ประกอบหลัก ได้แก่ การกำหนดเมตริกมาตรฐาน (Standardized Metrics) ที่วัดความสามารถในหลายมิติ เช่น ความแม่นยำในการวางตำแหน่ง (Positioning Accuracy) ที่วัดเป็นมิลลิเมตร ความแม่นยำในการหมุน (Orientation Accuracy) ที่วัดเป็นองศา ความเร็วในการทำงาน (Task Completion Speed) ที่วัดเป็นวินาที และอัตราความสำเร็จ (Success Rate) ที่วัดเป็นเปอร์เซ็นต์ สภาพแวดล้อมการทดสอบมาตรฐาน (Standardized Test Environment)ที่จำลองสถานการณ์การทำงานจริงในโรงงาน พร้อมด้วยอุปสรรคและข้อจำกัดต่างๆ ชุดงานทดสอบมาตรฐาน (Standardized Task Suite) ที่ประกอบด้วยงานพื้นฐานและงานที่ซับซ้อนขึ้น และ วิธีการวิเคราะห์ข้อมูลมาตรฐาน (Standardized Data Analysis) ที่ใช้สถิติและเกณฑ์การประเมินที่เป็นมาตรฐาน

ระบบการทดสอบแบบลำดับขั้น (Hierarchical Testing Framework) เริ่มต้นจาก การทดสอบระดับองค์ประกอบ (Component-level Testing)ที่ประเมินความสามารถของส่วนประกอบแต่ละส่วน เช่น ความแม่นยำของแอคชูเอเตอร์ ความไวของเซ็นเซอร์ และเวลาตอบสนองของระบบควบคุม โดยใช้เครื่องมือวัดที่มีความแม่นยำสูง เช่น เลเซอร์ tracker และ coordinate measuring machine จากนั้นก้าวไปสู่ การทดสอบระดับระบบย่อย (Subsystem-level Testing) ที่ประเมินการทำงานร่วมกันของหลายองค์ประกอบ เช่น ระบบนำทางและระบบจับจ่าย และสุดท้ายคือ การทดสอบระดับระบบทั้งหมด (System-level Testing) ที่ประเมินประสิทธิภาพของหุ่นยนต์ในการทำงานจริงแบบครบวงจร

ชุดงานทดสอบมาตรฐาน (Standard Test Tasks) ได้รับการออกแบบให้ครอบคลุมความสามารถที่สำคัญของหุ่นยนต์อเนกประสงค์ (Xie et al., 2024) ประกอบด้วย งานการนำทางพื้นฐาน (Basic Navigation Tasks) เช่น การเคลื่อนที่ไปยังจุดเป้าหมายที่กำหนด การหลบหลีกสิ่งกีดขวาง และการทำงานในพื้นที่จำกัด โดยวัดเวลาที่ใช้ ความแม่นยำในการมาถึงจุดหมาย และความปลอดภัย งานการจับจ่ายพื้นฐาน (Basic Manipulation Tasks) เช่น การหยิบ การวาง การประกอบชิ้นส่วนง่ายๆ และการใช้เครื่องมือ โดยประเมินความแม่นยำ ความเร็ว และความเสียหายของวัตถุ และ งานรวมที่ซับซ้อน (Complex Integrated Tasks) ที่ผสมผสานการนำทางและการจับจ่าย เช่น การขนย้ายชิ้นส่วนจากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งผ่านเส้นทางที่มีอุปสรรค

กระบวนการประเมินแบบมาตรฐาน (Standardized Evaluation Process) มีขั้นตอนที่ชัดเจน เริ่มจากการเตรียมการทดสอบ (Test Preparation) ที่รวมถึงการสอบเทียบเครื่องมือวัด การตั้งค่าสภาพแวดล้อม และการตรวจสอบระบบ การดำเนินการทดสอบ (Test Execution)ที่ทำซ้ำหลาย ครั้งเพื่อให้ได้ข้อมูลที่เชื่อถือได้

ทางสถิติ โดยแต่ละงานจะต้องทำซ้ำอย่างน้อย 10 ครั้ง และ การวิเคราะห์ผลลัพธ์ (Result Analysis)ที่ใช้สถิติเชิงพรรณนาและสถิติเชิงอนุมาน เช่น ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และช่วงความเชื่อมั่น

ระบบการให้คะแนนและการจัดอันดับ (Scoring and Ranking System) ใช้วิธีการคำนวณคะแนนรวม (Composite Score) จากเมตริกต่างๆ โดยมีการถ่วงน้ำหนักตามความสำคัญของแต่ละด้าน เช่น ความปลอดภัยมีน้ำหนัก 40% ความแม่นยำมีน้ำหนัก 30% ความเร็วมีน้ำหนัก 20% และความน่าเชื่อถือมีน้ำหนัก 10% ระบบนี้ช่วยให้สามารถเปรียบเทียบประสิทธิภาพของหุ่นยนต์ต่างประเภทได้อย่างเป็นธรรม

การศึกษานี้ได้กำหนดเมตริกและวิธีการทดสอบที่มาตรฐานสำหรับการประเมินความสามารถของหุ่นยนต์อเนกประสงค์ในการปฏิบัติงานจริง โดยมาตรฐาน NIST นี้ได้รับการยอมรับและนำไปใช้โดยผู้ผลิตหุ่นยนต์และสถาบันวิจัยหลายแห่งทั่วโลก ช่วยให้การเปรียบเทียบและการพัฒนาเทคโนโลยีเป็นไปอย่างเป็นระบบและโปร่งใส (Vitolo et al., 2022)

Xie et al. (2024) ได้นำเสนอการเพิ่มประสิทธิภาพท่าทางสำหรับการจับยึดของโมบายแมนิปิวเลเตอร์โดยใช้เกณฑ์การจัดการแบบไฮบริด การศึกษานี้แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของการวางตำแหน่งฐานเคลื่อนที่ที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการจับยึดที่ดีที่สุด ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญสำหรับหุ่นยนต์อเนกประสงค์ที่ต้องจัดการกับวัตถุหลากหลายประเภท

ในภาคการดูแลสุขภาพ การพัฒนาหุ่นยนต์อเนกประสงค์ได้รับความสนใจเป็นพิเศษเนื่องจากความต้องการที่หลากหลายในสภาพแวดล้อมการดูแลผู้ป่วย การพัฒนาหุ่นยนต์เคลื่อนที่แบบสองแขนหลายฟังก์ชันที่รองรับการประยุกต์ใช้การดูแลที่หลากหลายได้แสดงให้เห็นระบบที่สามารถปรับเปลี่ยนระหว่างการช่วยเหลือในกิจวัตรประจำวัน การขนส่งยาและอุปกรณ์การแพทย์ และการให้การสนับสนุนทางอารมณ์ได้ตามความต้องการของผู้ป่วยแต่ละคน

การพัฒนาหุ่นยนต์อเนกประสงค์สำหรับการประยุกต์ใช้ในสภาพแวดล้อมที่รุนแรงหรือเป็นอันตราย เช่น การสำรวจอวกาศหรือการกู้ภัยพิบัติ ต้องการความทนทานและความสามารถในการปรับตัวเป็นพิเศษ หุ่นยนต์เหล่านี้ต้องสามารถปรับเปลี่ยนหน้าที่ได้อย่างรวดเร็วเมื่อสถานการณ์เปลี่ยนแปลง เช่น จากการสำรวจเป็นการกู้ภัย หรือจากการรวบรวมข้อมูลเป็นการซ่อมแซมอุปกรณ์

การพัฒนาระบบควบคุมหลายหุ่นยนต์ที่ประสานงานกันได้กลายเป็นแนวโน้มสำคัญในการประยุกต์ใช้อุตสาหกรรม van den Berg et al. (2015) ได้นำเสนออัลกอริทึมการวางแผนแบบจัดลำดับความสำคัญสำหรับการประสานวิถีการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เคลื่อนที่หลายตัว ซึ่งช่วยให้ระบบหุ่นยนต์อเนกประสงค์หลายตัวสามารถทำงานร่วมกันได้อย่างมีประสิทธิภาพในสภาพแวดล้อมที่ซับซ้อน

2.5 ช่องว่างความรู้และแนวทางการวิจัย

จากการทบทวนวรรณกรรมที่กว้างขวางพบว่ามีช่องว่างความรู้สำคัญหลายประการที่ต้องการการวิจัยและพัฒนาต่อไป แม้ว่าจะมีความก้าวหน้าอย่างมากในแต่ละองค์ประกอบของหุ่นยนต์อเนกประสงค์ แต่การบูรณาการและการประยุกต์ใช้ในสถานการณ์จริงยังคงมีความท้าทายที่สำคัญ

ข้อจำกัดด้านการทดสอบในสภาพแวดล้อมจริง การศึกษาส่วนใหญ่ยังคงเป็นการทดสอบในสภาพแวดล้อมที่ควบคุมได้หรือการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ การทดสอบระบบหุ่นยนต์อเนกประสงค์ที่มีความสามารถสูงในสภาพแวดล้อมที่มีความไม่แน่นอนและความซับซ้อนสูงยังมีอยู่จำกัด ซึ่งเป็นอุปสรรคสำคัญต่อการนำไปประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรมและการค้าจริง

การขาดแคลนกรอบแนวคิดแบบบูรณาการ แม้ว่าจะมีการพัฒนาเทคโนโลยีต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับหุ่นยนต์อเนกประสงค์อย่างต่อเนื่อง แต่ยังขาดกรอบแนวคิดที่เชื่อมโยงการปรับโครงสร้างทางกลกับพฤติกรรมที่เรียนรู้ได้อย่างเป็นระบบ 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 เพื่อ

ให้สามารถประเมินประสิทธิภาพได้อย่างเป็นระบบและเปรียบเทียบได้ การพัฒนาแพลตฟอร์มนี้ควรครอบคลุมทั้งการทดสอบในสภาพแวดล้อมที่ควบคุมได้และการทดสอบในสถานการณ์จริงที่มีความซับซ้อน

การสร้างกรอบแนวคิดแบบบูรณาการที่เชื่อมโยงการออกแบบฮาร์ดแวร์ การพัฒนาซอฟต์แวร์ และการเรียนรู้ของเครื่องเข้าด้วยกัน โดยเฉพาะการพัฒนาวิธีการที่ช่วยให้การปรับโครงสร้างทางกายภาพและการเรียนรู้พฤติกรรมสามารถเกิดขึ้นพร้อมกันและส่งเสริมซึ่งกันและกัน

การวิจัยเชิงลึกเกี่ยวกับการจัดการพลังงานและการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานในระบบหุ่นยนต์อเนกประสงค์ รวมถึงการพัฒนาอัลกอริทึมการตัดสินใจที่คำนึงถึงการใช้พลังงานในการเลือกวิธีการปฏิบัติงาน

การพัฒนาชุดข้อมูลขนาดใหญ่และหลากหลายสำหรับการฝึกฝนหุ่นยนต์อเนกประสงค์ โดยเฉพาะข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการปรับเปลี่ยนระหว่างงานที่แตกต่างกันและการทำงานในสภาพแวดล้อมที่ไม่แน่นอน รวมถึงการพัฒนาเทคนิคการเรียนรู้ที่สามารถใช้ประโยชน์จากข้อมูลที่มีอยู่อย่างจำกัดได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การสร้างมาตรฐานความปลอดภัยและแนวทางปฏิบัติที่ดีสำหรับหุ่นยนต์อเนกประสงค์ที่ทำงานในสภาพแวดล้อมที่มีมนุษย์ร่วมด้วย โดยเฉพาะการพัฒนาระบบการตรวจจับและการตอบสนองต่อสถานการณ์ที่ไม่คาดคิดระหว่างการเปลี่ยนโหมดการทำงาน

การพัฒนาเทคนิคการประเมินและการรับรองประสิทธิภาพที่ครอบคลุม รวมถึงการสร้างเมตริกใหม่ที่สามารถวัดความสามารถอเนกประสงค์ได้อย่างเป็นปริมาณ เช่น ดัชนีความยืดหยุ่น ค่าประสิทธิภาพการปรับตัว และตัวชี้วัดความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

จากการทบทวนวรรณกรรมครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าหุ่นยนต์อเนกประสงค์เป็นสาขาที่มีศักยภาพสูงและกำลังพัฒนาอย่างรวดเร็ว อย่างไรก็ตาม ยังคงมีความท้าทายและช่องว่างความรู้ที่สำคัญที่ต้องการการวิจัยอย่างเป็นระบบและการร่วมมือระหว่างสาขาวิชาต่างๆ เพื่อให้สามารถบรรลุเป้าหมายในการสร้างหุ่นยนต์ที่มีความสามารถอเนกประสงค์อย่างแท้จริงและนำไปประยุกต์ใช้ได้ในวงกว้าง

3 ระเบียบวิธีวิจัย

การศึกษาเรื่องหุ่นยนต์อเนกประสงค์ในรายงานฉบับนี้ใช้วิธีการทบทวนวรรณกรรมเชิงพรรณนาอย่างเป็นระบบ (Systematic Descriptive Literature Review) ตามแนวทาง PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) เพื่อรวบรวม วิเคราะห์ และสังเคราะห์องค์ความรู้ที่เกี่ยวข้องกับหุ่นยนต์อเนกประสงค์จากแหล่งข้อมูลทางวิชาการที่เชื่อถือได้ โดยมีรายละเอียดขั้นตอนการดำเนินการวิจัยดังนี้

3.1 แนวทางการศึกษา

การศึกษานี้ใช้แนวทางการวิจัยเชิงคุณภาพแบบทบทวนวรรณกรรมอย่างเป็นระบบ (Systematic Qualitative Literature Review) ร่วมกับการวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบ (Comparative Analysis) และการสังเคราะห์แบบเชิงพรรณนา (Narrative Synthesis) เพื่อให้ได้ภาพรวมที่ครอบคลุมและเป็นปัจจุบันเกี่ยวกับหุ่นยนต์อเนกประสงค์

การออกแบบการศึกษาใช้กรอบแนวคิด SPIDER Framework (Sample, Phenomenon of Interest, Design, Evaluation, Research type) สำหรับการทบทวนวรรณกรรมเชิงคุณภาพ โดยมีรายละเอียดดังนี้

- **Sample (กลุ่มตัวอย่าง):** งานวิจัยและเอกสารทางวิชาการเกี่ยวกับหุ่นยนต์อเนกประสงค์
- **Phenomenon of Interest (ปรากฏการณ์ที่สนใจ):** ความสามารถอเนกประสงค์ของหุ่นยนต์และการประยุกต์ใช้
- **Design (การออกแบบ):** การทบทวนวรรณกรรมอย่างเป็นระบบ
- **Evaluation (การประเมิน):** การวิเคราะห์และสังเคราะห์เนื้อหา
- **Research type (ประเภทการวิจัย):** การวิจัยเชิงคุณภาพและเชิงพรรณนา

แนวทางการศึกษาแบ่งออกเป็น 4 ระยะหลัก ได้แก่

ระยะที่ 1: การวางแผนและกำหนดกลยุทธ์ (Planning and Strategy Phase) เป็นการกำหนดคำถามวิจัย วัตถุประสงค์ และเกณฑ์การคัดเลือกข้อมูล รวมถึงการพัฒนากลยุทธ์การค้นหา

ระยะที่ 2: การรวบรวมข้อมูล (Data Collection Phase) เป็นการค้นหาและรวบรวมเอกสารวิชาการที่เกี่ยวข้องจากฐานข้อมูลวิชาการหลักๆ โดยใช้คำสำคัญที่หลากหลายและการค้นหาแบบขยายผล (Snowball Search) ด้วย Generative AI เพื่อให้ได้ข้อมูลที่ครอบคลุม

ระยะที่ 3: การคัดกรองและประเมินคุณภาพ (Screening and Quality Assessment Phase) เป็นการคัดเลือกเอกสารตามเกณฑ์ที่กำหนดไว้ล่วงหน้าและประเมินคุณภาพของแหล่งข้อมูลเพื่อให้ได้เอกสารที่มีความน่าเชื่อถือและเกี่ยวข้องกับการศึกษา

ระยะที่ 4: การวิเคราะห์และสังเคราะห์ (Analysis and Synthesis Phase) เป็นการวิเคราะห์เนื้อหา จัดหมวดหมู่ และสังเคราะห์ข้อมูลเพื่อสร้างความเข้าใจที่เป็นระบบเกี่ยวกับหุ่นยนต์อเนกประสงค์

การศึกษานี้มุ่งเน้นการวิเคราะห์เชิงลึกมากกว่าการสำรวจเชิงกว้าง โดยเน้นคุณภาพของข้อมูลและการสังเคราะห์ที่สร้างสรรค์เพื่อให้ได้ข้อค้นพบใหม่และข้อเสนอแนะที่มีประโยชน์ต่อการพัฒนาเทคโนโลยีและการประยุกต์ใช้ในอนาคต

3.2 การรวบรวมข้อมูล

การรวบรวมข้อมูลดำเนินการอย่างเป็นระบบผ่านฐานข้อมูลวิชาการหลักและแหล่งข้อมูลที่เชื่อถือได้ โดยแบ่งออกเป็นแหล่งข้อมูลหลักและแหล่งข้อมูลสนับสนุน พร้อมทั้งมีการจัดทำเอกสารบันทึกการค้นหา (Search Log) เพื่อความโปร่งใสและสามารถตรวจสอบได้

แหล่งข้อมูลหลัก (Primary Sources) ประกอบด้วยวารสารวิชาการระดับนานาชาติที่ผ่านการประเมินโดยผู้ทรงคุณวุฒิ (Peer-reviewed Journals) จากฐานข้อมูลวิชาการชั้นนำ ดังนี้

- **IEEE Xplore Digital Library:** ครอบคลุมวารสารและการประชุมวิชาการด้านวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์
- **ScienceDirect (Elsevier):** ฐานข้อมูลวิชาการครอบคลุมสาขาวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์
- **Springer Link:** วารสารและหนังสือทางวิชาการด้านเทคโนโลยีและวิศวกรรม
- **ACM Digital Library:** เฉพาะทางด้านวิทยาการคอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ
- **Nature Scientific Reports:** วารสารวิทยาศาสตร์ระดับนานาชาติที่มีผลกระทบสูง
- **ASME Digital Collection:** วารสารด้านวิศวกรรมเครื่องกลและหุ่นยนต์

วารสารเป้าหมายหลักที่ให้ความสำคัญเป็นพิเศษ ได้แก่ IEEE Transactions on Robotics (Impact Factor: 6.8), International Journal of Robotics Research (Impact Factor: 4.7), Journal of Intelligent & Robotic Systems (Impact Factor: 3.9), IEEE Robotics and Automation Letters (Impact Factor: 4.3), และ Robotics and Autonomous Systems (Impact Factor: 3.7)

แหล่งข้อมูลสนับสนุน (Secondary Sources) ประกอบด้วย

- **รายงาน การ ประชุม วิชาการ นานาชาติ:** IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Robotics: Science and Systems (RSS)

- **มาตรฐานสากล:** ISO 10218 (Robots and robotic devices), ISO 13482 (Safety requirements for personal care robots), ANSI/RIA R15.06 (Industrial robot safety standards)
- **รายงานเทคนิค:** National Institute of Standards and Technology (NIST), European Robotics Research Network (EURON), IEEE Robotics and Automation Society
- **เอกสารนโยบาย:** European Commission Robotics Strategy, US National Robotics Initiative 2.0

กลยุทธ์การค้นหา ใช้คำสำคัญภาษาอังกฤษที่ได้รับการพัฒนาผ่านการใช้ Generative AI ประกอบด้วย

- **คำสำคัญหลัก:** ”polyfunctional robots”, ”multi-functional robots”, ”versatile robots”
- **คำสำคัญเสริม:** ”modular robots”, ”self-reconfiguring robots”, ”reconfigurable robotics”, ”adaptive robotics”
- **คำสำคัญขยาย:** ”generalist robots”, ”task-agnostic robots”, ”morphological computation”, ”multimodal manipulation”

การค้นหาใช้ตัวดำเนินการ Boolean (AND, OR, NOT) และ Wildcard (*) เพื่อให้ได้ผลการค้นหาที่แม่นยำและครอบคลุม เช่น ”(polyfunctional OR multi-functional OR versatile) AND robot*” หรือ ”modular AND (reconfigur* OR adapt*) AND robot*”

การค้นหาแบบขยายผล (Snowball Search) ดำเนินการโดยการตรวจสอบรายการอ้างอิงของเอกสารสำคัญและการค้นหาเอกสารที่อ้างอิงเอกสารเหล่านั้น (Forward and Backward Citation Tracking) เพื่อให้มั่นใจว่าไม่พลาดเอกสารสำคัญ

3.3 เกณฑ์การคัดเลือกแหล่งข้อมูล

การคัดเลือกแหล่งข้อมูลใช้เกณฑ์การรวม (Inclusion Criteria) และเกณฑ์การยกเว้น (Exclusion Criteria) ที่ชัดเจนและได้รับการทดสอบความเชื่อมั่นระหว่างผู้ประเมิน (Inter-rater Reliability) เพื่อให้ได้เอกสารที่มีคุณภาพและเกี่ยวข้องกับการศึกษา

เกณฑ์การรวม (Inclusion Criteria) ประกอบด้วย

1. **ช่วงเวลาการตีพิมพ์:** เอกสารที่ตีพิมพ์ในช่วงปี ค.ศ. 2015-2025 เพื่อให้ได้ข้อมูลที่เป็นปัจจุบันและสะท้อนความก้าวหน้าในช่วงทศวรรษที่ผ่านมา
2. **คุณภาพการตีพิมพ์:** เอกสารที่ผ่านการประเมินโดยผู้ทรงคุณวุฒิ (Peer-reviewed) หรือเป็นมาตรฐานสากลที่ยอมรับจากองค์กรที่มีชื่อเสียง

3. **ภาษาการตีพิมพ์:** เอกสารที่เขียนเป็นภาษาอังกฤษเพื่อความสอดคล้องในการวิเคราะห์
4. **ความเกี่ยวข้องของเนื้อหา:** เอกสารที่มีเนื้อหาเกี่ยวข้องโดยตรงกับหุ่นยนต์อเนกประสงค์ หุ่นยนต์โมดูลาร์ หุ่นยนต์ปรับโครงสร้างได้ หรือหุ่นยนต์ที่มีความสามารถปรับตัวได้หลากหลาย
5. **ผลกระทบทางวิชาการ:** เอกสารที่มีการอ้างอิงไม่น้อยกว่า 10 ครั้งใน Google Scholar สำหรับเอกสารที่ตีพิมพ์ก่อนปี 2022 (ยกเว้นเอกสารใหม่ที่ตีพิมพ์ในปี 2023-2025)
6. **การเข้าถึงเนื้อหา:** เอกสารที่สามารถเข้าถึงเนื้อหาฉบับเต็ม (Full-text) ได้ผ่านฐานข้อมูลหรือการติดต่อผู้แต่งโดยตรง
7. **ประเภทการศึกษา:** บทความวิจัยต้นฉบับ (Original Research), บทความทบทวน (Review Articles), รายงานเทคนิค (Technical Reports), และมาตรฐานสากล

เกณฑ์การยกเว้น (Exclusion Criteria) ประกอบด้วย

1. **ประเภทเอกสารที่ไม่เหมาะสม:** บทความความเห็น (Opinion Articles), จดหมายถึงบรรณาธิการ (Letters to Editor), บทความรีวิวสั้น (Short Communications) ที่ไม่มีข้อมูลเชิงประจักษ์
2. **เนื้อหาที่ไม่สมบูรณ์:** เอกสารที่เป็นเพียงบทคัดย่อ โปสเตอร์ หรือการนำเสนอจากการประชุมที่ไม่มีเนื้อหาฉบับเต็ม
3. **ความเฉพาะเจาะจงมากเกินไป:** เอกสารที่เกี่ยวข้องกับหุ่นยนต์เฉพาะทางที่ไม่สามารถปรับเปลี่ยนฟังก์ชันได้ เช่น หุ่นยนต์อุตสาหกรรมแบบดั้งเดิม
4. **คุณภาพต่ำ:** เอกสารที่มีคุณภาพต่ำ มาจากแหล่งที่ไม่น่าเชื่อถือ หรือมีวิธีการวิจัยที่ไม่ชัดเจน
5. **การซ้ำซ้อน:** เอกสารที่ซ้ำกัน การตีพิมพ์ซ้ำ หรือเป็นเวอร์ชันต่างๆ ของงานเดียวกัน
6. **การใช้งานเฉพาะทาง:** เอกสารที่เน้นการใช้งานทางทหาร การรักษาความปลอดภัย หรือการประยุกต์ใช้ที่อาจก่อให้เกิดอันตรายต่อสังคม
7. **ขาดข้อมูลสำคัญ:** เอกสารที่ขาดข้อมูลสำคัญเกี่ยวกับวิธีการ ผลการทดลอง หรือการอภิปรายผล

การประเมินคุณภาพของเอกสารใช้เกณฑ์เพิ่มเติมตาม CASP (Critical Appraisal Skills Programme) Checklist และ AMSTAR 2 (Assessment of Multiple Systematic Reviews 2) รวมถึงการพิจารณา Impact Factor ของวารสาร H-Index ของผู้แต่ง ชื่อเสียงของสถาบันที่สังกัด ความชัดเจนของวิธีการวิจัย ความสมบูรณ์ของข้อมูล และความสอดคล้องกับมาตรฐานการรายงานผลการวิจัย

3.4 การวิเคราะห์และสังเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์และสังเคราะห์ข้อมูลใช้วิธีการสังเคราะห์เชิงพรรณนาแบบโครงสร้าง (Structured Narrative Synthesis) ตามกรอบของ Popay et al. (2006) ร่วมกับการวิเคราะห์เนื้อหาเชิงคุณภาพแบบนิรนัย (Deductive Qualitative Content Analysis) โดยใช้โปรแกรม NVivo 14 ในการจัดการและวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์แบ่งออกเป็น 5 ขั้นตอนหลัก

ขั้นตอนที่ 1: การเตรียมข้อมูลและการเข้ารหัสเบื้องต้น (Data Preparation and Initial Coding) เป็นการอ่าน สกัดข้อมูลสำคัญ และสร้างรหัสเบื้องต้น (Initial Codes) จากแต่ละเอกสารโดยใช้แบบฟอร์มการสกัดข้อมูลที่ได้รับการทดสอบและปรับปรุงแล้ว รวมถึงการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูลโดยผู้วิจัยอีกคนหนึ่ง

ขั้นตอนที่ 2: การจัดหมวดหมู่เนื้อหา (Thematic Content Categorization) เป็นการจัดกลุ่มรหัสที่เกี่ยวข้องกันเป็นหมวดหมู่หลัก (Main Categories) และหมวดหมู่ย่อย (Sub-categories) ตามกรอบแนวคิดที่กำหนดไว้ล่วงหน้า ได้แก่ (1) แนวคิดและนิยาม (2) สถาปัตยกรรมและการออกแบบ (3) เทคโนโลยีหลักและระบบควบคุม (4) การประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรม (5) ความท้าทายและข้อจำกัด และ (6) แนวโน้มและทิศทางอนาคต

ขั้นตอนที่ 3: การวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบ (Comparative Analysis) เป็นการเปรียบเทียบข้อมูลจากแหล่งต่างๆ ภายในแต่ละหมวดหมู่เพื่อหาความเหมือน ความแตกต่าง แนวโน้ม และความขัดแย้งในงานวิจัยต่างๆ โดยใช้เทคนิค Constant Comparative Method และการสร้างตารางเปรียบเทียบ (Comparison Matrices)

ขั้นตอนที่ 4: การระบุช่องว่างความรู้ (Knowledge Gap Identification) เป็นการวิเคราะห์อย่างเป็นระบบเพื่อหาประเด็นที่ยังขาดการศึกษาวิจัย ความไม่ชัดเจนในองค์ความรู้ปัจจุบัน ข้อขัดแย้งระหว่างงานวิจัยต่างๆ และโอกาสในการพัฒนาต่อไป โดยใช้เทคนิค Gap Analysis และ SWOT Analysis

ขั้นตอนที่ 5: การสังเคราะห์เชิงบูรณาการ (Integrative Synthesis) เป็นการรวมผลการวิเคราะห์จากขั้นตอนก่อนหน้าเพื่อสร้างกรอบแนวคิดที่ครอบคลุม (Conceptual Framework) สรุปข้อค้นพบสำคัญ และเสนอข้อเสนอแนะเชิงนโยบายและการปฏิบัติที่มีความเป็นไปได้สูงและเหมาะสมกับบริบทต่างๆ

การประกันคุณภาพ ใช้เทคนิค Member Checking โดยการส่งผลการวิเคราะห์เบื้องต้นให้ผู้เชี่ยวชาญในสาขาตรวจสอบความถูกต้องและความสมเหตุสมผล การใช้ Triangulation โดยการตรวจสอบข้อมูลจากแหล่งที่หลากหลาย และการจัดทำ Audit Trail เพื่อความโปร่งใสในกระบวนการวิเคราะห์

3.5 ข้อจำกัดของการศึกษา

การศึกษานี้มีข้อจำกัดที่สำคัญหลายประการซึ่งได้รับการพิจารณาอย่างรอบคอบและอาจส่งผลต่อการตีความและการนำผลการศึกษาไปใช้ โดยผู้วิจัยได้มีการดำเนินการเพื่อลดผลกระทบจากข้อจำกัดเหล่านี้ให้มากที่สุด

ข้อจำกัดด้านขอบเขตการศึกษา การศึกษานี้เน้นเฉพาะเอกสารที่เขียนเป็นภาษาอังกฤษ ซึ่งอาจทำให้ขาดมุมมองจากงานวิจัยที่สำคัญในภาษาอื่นๆ โดยเฉพาะภาษาจีน ญี่ปุ่น และเยอรมัน ที่มีการพัฒนาเทคโนโลยีหุ่นยนต์ขั้นสูงอย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้ การจำกัดช่วงเวลาการศึกษา (2015-2025) อาจทำให้ขาดข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญจากงานวิจัยในอดีตที่วางรากฐานสำคัญของเทคโนโลยี เพื่อลดผลกระทบนี้ ผู้วิจัยได้รวมเอกสารอ้างอิงย้อนหลังที่สำคัญจากการวิเคราะห์ Citation Network

ข้อจำกัดด้านการเข้าถึงข้อมูล การเข้าถึงเอกสารบางฉบับอาจถูกจำกัดด้วยค่าธรรมเนียมหรือข้อกำหนดในการเข้าถึง ซึ่งอาจทำให้ข้อมูลบางส่วนไม่สามารถรวมอยู่ในการศึกษาได้ ประกอบกับการพัฒนาเทคโนโลยีหุ่นยนต์ในภาคเอกชนซึ่งมักไม่เผยแพร่ผลการวิจัยสู่สาธารณะ ทำให้อาจขาดข้อมูลเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้ในเชิงพาณิชย์

ข้อจำกัดด้านวิธีการวิจัย การใช้วิธีการทบทวนวรรณกรรมเป็นหลักทำให้ไม่สามารถตรวจสอบหรือทดลองข้อมูลเชิงประจักษ์ได้โดยตรง การตีความและการสังเคราะห์ข้อมูลอาจมีความลำเอียงจากมุมมองของผู้วิจัย (Researcher Bias) และการขาดข้อมูลเชิงปริมาณที่เปรียบเทียบได้อาจทำให้การประเมินประสิทธิภาพระหว่างเทคโนโลยีต่างๆ ไม่แม่นยำเท่าที่ควร นอกจากนี้ การพึ่งพาเอกสารทางวิชาการที่เผยแพร่แล้วอาจทำให้ขาดข้อมูลเกี่ยวกับการวิจัยและพัฒนาล่าสุดที่ยังไม่ได้รับการตีพิมพ์ เพื่อลดอคติในการตีความ ผู้วิจัยได้ใช้เครื่องมือปัญญาประดิษฐ์เชิงสร้างสรรค์ (Generative AI) เพื่อช่วยตรวจสอบและท้าทายมุมมองส่วนตัวในการวิเคราะห์ข้อมูล รวมถึงการทบทวนกระบวนการตีความอย่างเป็นระบบเพื่อเพิ่มความเที่ยงตรงของผลการศึกษา

ข้อจำกัดด้านความเป็นปัจจุบันของข้อมูล เทคโนโลยีหุ่นยนต์อเนกประสงค์มีการพัฒนาอย่างรวดเร็วและต่อเนื่อง ทำให้ข้อมูลบางส่วนอาจล้าสมัยได้เร็ว โดยเฉพาะในด้านปัญญาประดิษฐ์

ข้อจำกัดด้านการประยุกต์ใช้ ผลการศึกษาส่วนใหญ่มาจากงานวิจัยในสภาพแวดล้อมห้องปฏิบัติการหรือการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ ซึ่งอาจแตกต่างจากการใช้งานจริงในภาคอุตสาหกรรมที่มีความซับซ้อนและความไม่แน่นอนสูง การขาดข้อมูลเกี่ยวกับต้นทุนการผลิต ความทนทานในการใช้งานจริง ปัญหาการบำรุงรักษาในระยะยาว และการยอมรับของผู้ใช้งาน อาจทำให้การประเมินความเป็นไปได้ในการนำไปใช้งานจริงไม่สมบูรณ์

ข้อจำกัดด้านการประเมินคุณภาพ แม้ว่าจะมีการใช้เกณฑ์การประเมินคุณภาพที่เป็นมาตรฐาน แต่การประเมินคุณภาพของงานวิจัยในสาขาหุ่นยนต์ที่มีทั้งด้านทฤษฎีและการประยุกต์ใช้อาจมีความซับซ้อน โดยเฉพาะการชั่งน้ำหนักระหว่างความใหม่ของเทคโนโลยีกับความสมบูรณ์ของการทดสอบ

ข้อจำกัดด้านบริบททางวัฒนธรรมและเศรษฐกิจ การศึกษาส่วนใหญ่มาจากประเทศที่พัฒนาแล้วในยุโรป อเมริกาเหนือ และเอเชียตะวันออก ซึ่งอาจมีบริบททางเศรษฐกิจ สังคม และวัฒนธรรมที่แตกต่างจากประเทศกำลังพัฒนา ทำให้การประยุกต์ใช้ผลการศึกษาในบริบทของประเทศไทยต้องมีการปรับเปลี่ยนและพิจารณาปัจจัยเฉพาะของท้องถิ่น

มาตรการลดผลกระทบจากข้อจำกัด ผู้วิจัยได้ดำเนินการหลายประการเพื่อลดผลกระทบจากข้อจำกัด

เหล่านี้

- การใช้แหล่งข้อมูลที่หลากหลายและการตรวจสอบข้อมูลแบบไขว้ (Triangulation)
- การจัดทำ Limitation Statement ที่ชัดเจนในทุกส่วนของการนำเสนอผล
- การระบุความไม่แน่นอนและข้อสงสัยในการตีความข้อมูล
- การเสนอแนะทิศทางการวิจัยในอนาคตเพื่อเติมเต็มช่องว่างความรู้ที่พบ
- การให้ความสำคัญกับความโปร่งใสในการรายงานวิธีการและกระบวนการตัดสินใจ

การตรวจสอบความถูกต้องและความน่าเชื่อถือ การศึกษานี้ใช้มาตรการหลายประการเพื่อเพิ่มความน่าเชื่อถือ ได้แก่

- **Credibility:** การใช้แหล่งข้อมูลที่เชื่อถือได้และการตรวจสอบโดยผู้เชี่ยวชาญ
- **Transferability:** การอธิบายบริบทการศึกษาอย่างละเอียดเพื่อให้ผู้อ่านสามารถประเมินความเหมาะสมในการนำไปใช้
- **Confirmability:** การแสดงให้เห็นว่าผลการศึกษามาจากข้อมูลจริงไม่ใช่อคติของผู้วิจัย

การรับรู้และการจัดการข้อจำกัดเหล่านี้อย่างเป็นระบบช่วยให้ผู้อ่านสามารถตีความผลการศึกษาได้อย่างเหมาะสมและนำไปประยุกต์ใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ พร้อมทั้งเปิดโอกาสสำหรับการวิจัยต่อเนื่องที่จะเติมเต็มช่องว่างความรู้ที่ยังคงมีอยู่

4 ผลการศึกษาและการวิเคราะห์

จากการทบทวนวรรณกรรมและการวิเคราะห์เอกสารทางวิชาการจำนวน 18 แหล่งที่ผ่านเกณฑ์การคัดเลือก ผู้วิจัยได้รวบรวมและสังเคราะห์ข้อมูลสำคัญเกี่ยวกับหุ่นยนต์อเนกประสงค์ในมิติต่างๆ เพื่อนำเสนอผลการศึกษาที่ครอบคลุมและเป็นระบบ โดยแบ่งการนำเสนอออกเป็น 5 หัวข้อหลักตามกรอบการวิเคราะห์ที่กำหนดไว้

4.1 การวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบเทคโนโลยี

การวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบระหว่างประเภทหุ่นยนต์อเนกประสงค์ทั้ง 3 ประเภทหลักแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างที่สำคัญในแนวทางการบรรลุความสามารถอเนกประสงค์ โดยแต่ละประเภทมีจุดแข็งและข้อจำกัดที่แตกต่างกัน

หุ่นยนต์อเนกประสงค์แบบดั้งเดิม (Multi-functional Robots) จากการวิเคราะห์พบว่ามีจุดแข็งหลักในด้านความเสถียรและความน่าเชื่อถือ (Mohammadi et al., 2023) การที่มีโครงสร้างคงที่ทำให้สามารถควบคุมความแม่นยำและความเร็วในการทำงานได้ดี โดยเฉพาะในการประยุกต์ใช้ทางอุตสาหกรรมที่ต้องการความสม่ำเสมอ (Li & Li, 2025) อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดสำคัญคือความยืดหยุ่นในการปรับเปลี่ยนโครงสร้างทางกายภาพ ทำให้การปรับตัวเข้ากับงานใหม่ที่มีลักษณะแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญจึงต้องอาศัยการเปลี่ยนแปลงเครื่องมือปลายแขนหรือการเขียนโปรแกรมใหม่

หุ่นยนต์โมดูลาร์ (Modular Robots) แสดงศักยภาพสูงในด้านความยืดหยุ่นเชิงโครงสร้าง (Post et al., 2023) ความสามารถในการถอดประกอบโมดูลต่างๆ ทำให้สามารถปรับเปลี่ยนขนาด รูปร่าง และฟังก์ชันได้ตามความต้องการ (Liang et al., 2025) การวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่าระบบนี้เหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้ที่ต้องการการปรับขนาดหรือการทำงานในสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลง (Seo & Paik, 2019) อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดสำคัญคือความซับซ้อนในการควบคุมเมื่อจำนวนโมดูลเพิ่มขึ้น และการที่ต้องอาศัยการแทรกแซงของมนุษย์ในกระบวนการถอดประกอบ (Bi & Wang, 2016)

หุ่นยนต์ปรับโครงสร้างได้ด้วยตนเอง (Self-Reconfiguring Robots) มีศักยภาพสูงสุดในด้านความเป็นอิสระและการปรับตัว (Hameed et al., 2017) ความสามารถในการเปลี่ยนรูปร่างและโครงสร้างได้โดยอัตโนมัติทำให้เหมาะสำหรับภารกิจที่ไม่สามารถคาดการณ์ได้ล่วงหน้า เช่น การสำรวจอวกาศหรือการกู้ภัยพิบัติ (Yim et al., 2007) อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์พบว่าเทคโนโลยีนี้ยังคงมีความท้าทายสูงในด้านความซับซ้อนของระบบควบคุม ความทนทานของกลไกการเชื่อมต่อ และการใช้พลังงาน (Fukuda et al., 1991)

จากการสังเคราะห์งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่าแต่ละประเภทของหุ่นยนต์อเนกประสงค์มีความเหมาะสมในการประยุกต์ใช้ที่แตกต่างกัน โดยหุ่นยนต์อเนกประสงค์แบบดั้งเดิมเหมาะสำหรับงานที่ต้องการความแม่นยำสูงและสภาพแวดล้อมที่คาดการณ์ได้ (Krishnan et al., 2023) หุ่นยนต์โมดูลาร์เหมาะสำหรับงานที่ต้องการความ

ยืดหยุ่นในการปรับเปลี่ยนโครงสร้างตามความต้องการ ในขณะที่หุ่นยนต์ปรับโครงสร้างได้ด้วยตนเองมีศักยภาพสูงสุดในสภาพแวดล้อมที่ไม่แน่นอนและไม่สามารถคาดการณ์ได้

4.2 การประเมินประสิทธิภาพและข้อจำกัด

การประเมินประสิทธิภาพจากการศึกษาต่างๆ แสดงให้เห็นถึงความแตกต่างที่สำคัญในเมตริกการวัดผลที่หลากหลาย จากการวิเคราะห์เชิงปริมาณพบว่าหุ่นยนต์อเนกประสงค์มีประสิทธิภาพที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญขึ้นอยู่กับลักษณะของงานและสภาพแวดล้อมการใช้งาน

ประสิทธิภาพด้านความเร็วและความแม่นยำ การศึกษาของ Xie et al. (2024) เกี่ยวกับการเพิ่มประสิทธิภาพท่าทางสำหรับการจับยึดแสดงให้เห็นว่าโมบายแมนิปิวเลเตอร์สามารถลดเวลาในการปรับตำแหน่งได้ถึง 23% เมื่อใช้เกณฑ์การจัดการแบบไฮบริด เมื่อเปรียบเทียบกับระบบแบบดั้งเดิม นอกจากนี้ ความแม่นยำในการจับยึดเพิ่มขึ้น 15% เมื่อมีการใช้ระบบการรับรู้แบบหลายโหมด (Athar et al., 2023)

ประสิทธิภาพด้านการปรับตัว Tassi and Ajoudani (2024) รายงานว่าระบบควบคุมแบบหลายโหมดที่ใช้การเขียนโปรแกรมกำลังสองแบบลำดับชั้นสามารถลดเวลาในการเปลี่ยนระหว่างงานต่างๆ ได้เฉลี่ย 40% เมื่อเปรียบเทียบกับระบบควบคุมแบบดั้งเดิม โดยเฉพาะในงานที่ต้องการการปรับเปลี่ยนพฤติกรรมการตอบสนองอย่างรวดเร็ว

ประสิทธิภาพด้านพลังงาน การศึกษาเกี่ยวกับแอคชูเอเตอร์อ่อนที่ได้แรงบันดาลใจจากโอริกามิ (Jin et al., 2021) แสดงให้เห็นว่าระบบที่มีความสามารถในการปรับเปลี่ยนรูปร่างสามารถประหยัดพลังงานได้ถึง 35% ในการเคลื่อนไหวบางประเภท เมื่อเปรียบเทียบกับแอคชูเอเตอร์แบบแข็ง อย่างไรก็ตาม การปรับโครงสร้างหรือการเปลี่ยนโหมดการทำงานต้องใช้พลังงานเพิ่มเติม 20-30% ในช่วงการเปลี่ยนผ่าน

ข้อจำกัดด้านเทคนิค การวิเคราะห์แสดงให้เห็นข้อจำกัดสำคัญหลายประการ ได้แก่

ความซับซ้อนของระบบควบคุม: เมื่อจำนวนองศาความเสรีหรือจำนวนโมดูลเพิ่มขึ้น ความซับซ้อนในการควบคุมเพิ่มขึ้นแบบเลขชี้กำลัง ทำให้การประมวลผลแบบเรียลไทม์กลายเป็นความท้าทายสำคัญ

ความทนทานของกลไกการเชื่อมต่อ: การศึกษาของ Liang et al. (2025) ชี้ให้เห็นว่าจุดเชื่อมต่อระหว่างโมดูลเป็นจุดอ่อนหลักของระบบ โดยมีอัตราการล้มเหลว 3-5 เท่าของส่วนประกอบอื่นๆ

ปัญหาการสะสมความผิดพลาด: ในระบบที่มีการปรับโครงสร้างหลายครั้ง พบว่ามีการสะสมความผิดพลาดในตำแหน่งและการปรับตัว ซึ่งส่งผลต่อความแม่นยำในการทำงาน

ข้อจำกัดด้านการประยุกต์ใช้ การศึกษาเกี่ยวกับมาตรฐานการวัดประสิทธิภาพของ Bostelman et al. (2016) ชี้ให้เห็นว่าการทดสอบในสภาพแวดล้อมจริงมักแสดงประสิทธิภาพที่ต่ำกว่าการทดสอบในห้องปฏิบัติการ 20-40% เนื่องจากปัจจัยความไม่แน่นอนและการรบกวนจากสิ่งแวดล้อม

การขาดแคลนบุคลากรที่มีความเชี่ยวชาญในการใช้งานและบำรุงรักษาระบบหุ่นยนต์อเนกประสงค์เป็น

อีกหนึ่งปัจจัยจำกัดสำคัญ โดยเฉพาะในการประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรมขนาดกลางและเล็ก

4.3 แนวโน้มการพัฒนาและทิศทางอนาคต

การวิเคราะห์แนวโน้มจากเอกสารวิจัยล่าสุดแสดงให้เห็นทิศทางการพัฒนาที่ชัดเจนในหลายด้าน โดยมีการบรรจบกันของเทคโนโลยีต่างๆ เพื่อสร้างระบบหุ่นยนต์อเนกประสงค์ที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

การรวมตัวของปัญญาประดิษฐ์และโมเดลพื้นฐาน แนวโน้มที่เด่นชัดที่สุดคือการประยุกต์ใช้โมเดลพื้นฐาน (Foundation Models) และการเรียนรู้เชิงลึกในการควบคุมหุ่นยนต์อเนกประสงค์ (Yang et al., 2024) การพัฒนาโมเดลภาษาขนาดใหญ่ที่สามารถเข้าใจและแปลงคำสั่งภาษาธรรมชาติเป็นการกระทำของหุ่นยนต์กำลังเป็นจุดเปลี่ยนสำคัญ ทำให้ผู้ใช้งานทั่วไปสามารถสั่งการหุ่นยนต์ได้โดยไม่ต้องมีความรู้ทางเทคนิคเฉพาะ

การพัฒนานโยบายการทำงานแบบทั่วไป (Generalist Policies) ที่สามารถปรับใช้กับงานหลากหลายประเภทโดยต้องการข้อมูลฝึกเพิ่มเติมเพียงเล็กน้อยเป็นอีกหนึ่งแนวโน้มสำคัญ แนวทางนี้ช่วยลดเวลาและต้นทุนในการพัฒนาระบบสำหรับงานใหม่ๆ อย่างมีนัยสำคัญ

การพัฒนาสู่ระบบการรับรู้แบบหลายโหมด แนวโน้มการพัฒนาเซ็นเซอร์และระบบการรับรู้แบบหลายโหมดกำลังเป็นปัจจัยขับเคลื่อนสำคัญ (Tassi & Ajoudani, 2024) การผสมผสานข้อมูลจากการมองเห็น การสัมผัส การได้ยิน และเซ็นเซอร์ด้านสิ่งแวดล้อมอื่นๆ ทำให้หุ่นยนต์สามารถเข้าใจและตอบสนองต่อสถานการณ์ที่ซับซ้อนได้ดีขึ้น

การพัฒนาผิวหนังหุ่นยนต์ที่มีความสามารถในการรับรู้แบบกระจาย (Yang et al., 2024) ช่วยให้หุ่นยนต์สามารถรับรู้การสัมผัสและการปฏิสัมพันธ์ทั่วทั้งตัว ไม่จำกัดเพียงบริเวณปลายแขนหรือมือ ซึ่งเป็นความก้าวหน้าสำคัญในการพัฒนาหุ่นยนต์ที่สามารถทำงานร่วมกับมนุษย์ได้อย่างปลอดภัยและมีประสิทธิภาพ

แนวโน้มการพัฒนาวัสดุและโครงสร้างอัจฉริยะ การประยุกต์ใช้วัสดุอัจฉริยะ เช่น โลหะผสมที่จำรูปร่างได้ (Shape Memory Alloys) และพอลิเมอร์ที่ตอบสนองต่อสิ่งเร้า กำลังเปิดมิติใหม่ในการออกแบบหุ่นยนต์อเนกประสงค์ (Jin et al., 2021) วัสดุเหล่านี้สามารถเปลี่ยนรูปร่างหรือคุณสมบัติทางกลได้โดยการควบคุมอุณหภูมิ สนามไฟฟ้า หรือสิ่งเร้าอื่นๆ

การพัฒนาโครงสร้างแบบโอริกามิและคิริกามิ (Origami and Kirigami Structures) ช่วยให้สามารถสร้างระบบที่มีความซับซ้อนทางการเคลื่อนไหวสูงในขณะที่ใช้วัสดุและกลไกที่เรียบง่าย แนวทางนี้มีศักยภาพสูงในการสร้างหุ่นยนต์อเนกประสงค์ที่มีน้ำหนักเบาและประหยัดพลังงาน

การพัฒนาสู่ระบบการทำงานร่วมกันแบบฝูง แนวโน้มการพัฒนาระบบหุ่นยนต์อเนกประสงค์หลายตัวที่สามารถทำงานร่วมกันแบบประสานงาน (Swarm Robotics) กำลังได้รับความสนใจเพิ่มขึ้น (van den Berg et al., 2015) การที่หุ่นยนต์แต่ละตัวมีความสามารถอเนกประสงค์ ประกอบกับการทำงานเป็นกลุ่ม ทำให้สามารถจัดการกับงานที่มีขนาดใหญ่และซับซ้อนได้

การพัฒนาอัลกอริทึมการประสานงานที่สามารถจัดสรรงานให้หุ่นยนต์แต่ละตัวตามความสามารถเฉพาะของแต่ละตัวในแต่ละช่วงเวลา เป็นความก้าวหน้าสำคัญที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของระบบโดยรวม

แนวโน้มการพัฒนาเพื่อความยั่งยืน การคำนึงถึงผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมและความยั่งยืนกำลังเป็นปัจจัยสำคัญในการออกแบบหุ่นยนต์อเนกประสงค์ (Li & Li, 2025) การใช้วัสดุที่รีไซเคิลได้ การออกแบบเพื่อการซ่อมแซมและการอัพเกรด และการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้พลังงานเป็นแนวโน้มที่ชัดเจน

การพัฒนาระบบการจัดการวงจรชีวิตผลิตภัณฑ์ (Product Lifecycle Management) สำหรับหุ่นยนต์อเนกประสงค์ รวมถึงการวางแผนการอัพเกรดและการรีไซเคิลส่วนประกอบ กำลังกลายเป็นความจำเป็นสำคัญในการพัฒนาเชิงพาณิชย์

4.4 ความท้าทายและปัจจัยสำคัญ

การวิเคราะห์เชิงลึกเกี่ยวกับความท้าทายและปัจจัยสำคัญในการพัฒนาและประยุกต์ใช้หุ่นยนต์อเนกประสงค์แสดงให้เห็นถึงอุปสรรคที่ซับซ้อนและหลากหลายซึ่งต้องการการแก้ไขอย่างเป็นระบบ

ความท้าทายด้านเทคนิคขั้นพื้นฐาน ปัญหาการควบคุมเรียลไทม์ของระบบที่มีความซับซ้อนสูงยังคงเป็นความท้าทายหลัก (Thuruthel et al., 2018) เมื่อหุ่นยนต์มีความสามารถในการปรับเปลี่ยนโครงสร้างหรือพฤติกรรมได้หลากหลาย ระบบควบคุมต้องสามารถประมวลผลและตัดสินใจได้อย่างรวดเร็วในขณะที่รักษาความเสถียรและความปลอดภัย

การจัดการกับความไม่แน่นอนและการแปรผันของพารามิเตอร์ระบบในระหว่างการปรับเปลี่ยนโหมดการทำงานเป็นปัญหาที่ยังไม่มีแนวทางแก้ไขที่สมบูรณ์ การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพของระบบ เช่น มวล ความแข็งแรง และตำแหน่งจุดศูนย์กลางมวล ทำให้โมเดลทางคณิตศาสตร์ของระบบเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่อง

ความท้าทายด้านความปลอดภัยและความเชื่อถือได้ การรับประกันความปลอดภัยในระบบที่มีการเปลี่ยนแปลงแบบไดนามิกเป็นความท้าทายที่ซับซ้อน (International Organization for Standardization, 2025) มาตรฐานความปลอดภัยปัจจุบันส่วนใหญ่ออกแบบมาสำหรับระบบที่มีพฤติกรรมที่คาดการณ์ได้ ในขณะที่หุ่นยนต์อเนกประสงค์อาจมีพฤติกรรมที่หลากหลายและเปลี่ยนแปลงได้

การพัฒนาระบบการตรวจจับและการตอบสนองต่อเหตุการณ์ที่ไม่คาดคิดระหว่างการเปลี่ยนโหมดการทำงานยังคงเป็นความท้าทายเทคนิคที่สำคัญ ระบบต้องสามารถหยุดการทำงานหรือเปลี่ยนไปยังโหมดปลอดภัยได้อย่างรวดเร็วเมื่อตรวจพบสถานการณ์ที่ผิดปกติ

ความท้าทายด้านการยอมรับและการใช้งาน การขาดแคลนบุคลากรที่มีความเชี่ยวชาญในการใช้งานและบำรุงรักษาเป็นอุปสรรคสำคัญต่อการประยุกต์ใช้ในวงกว้าง ระบบหุ่นยนต์อเนกประสงค์มีความซับซ้อนสูงกว่าหุ่นยนต์แบบดั้งเดิม ทำให้ต้องการความรู้และทักษะเฉพาะในการใช้งานอย่างมีประสิทธิภาพ

ความกังวลเกี่ยวกับการแทนที่แรงงานมนุษย์และผลกระทบทางสังคมยังคงเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการ

ยอมรับของสังคม โดยเฉพาะในกลุ่มแรงงานที่อาจได้รับผลกระทบโดยตรงจากการนำหุ่นยนต์อเนกประสงค์มาใช้

ปัจจัยสำคัญในการประสบความสำเร็จ การวิเคราะห์ปัจจัยสำเร็จจากกรณีศึกษาต่างๆ แสดงให้เห็นถึงองค์ประกอบสำคัญหลายประการ

การออกแบบที่เน้นผู้ใช้: ระบบที่ประสบความสำเร็จมักมีการออกแบบอินเทอร์เฟซผู้ใช้ที่เข้าใจง่ายและสามารถใช้งานได้โดยบุคลากรที่มีความรู้เทคนิคพื้นฐาน การพัฒนาระบบการสั่งการด้วยภาษาธรรมชาติและระบบช่วยเหลือแบบอัตโนมัติเป็นปัจจัยสำคัญ

การสนับสนุนและการฝึกอบรม: การมีระบบการฝึกอบรมที่ครอบคลุมและการสนับสนุนทางเทคนิคอย่างต่อเนื่องเป็นปัจจัยสำคัญต่อการยอมรับและการใช้งานที่มีประสิทธิภาพ

การพิสูจน์คุณค่าที่ชัดเจน: การแสดงให้เห็นถึงผลตอบแทนการลงทุน (Return on Investment) ที่ชัดเจนและสามารถวัดผลได้เป็นปัจจัยสำคัญในการตัดสินใจลงทุน ระบบที่ประสบความสำเร็จมักสามารถแสดงการลดต้นทุน เพิ่มประสิทธิภาพ หรือปรับปรุงคุณภาพได้อย่างเป็นรูปธรรม

การมีมาตรฐานและการรับรอง: การพัฒนาและการปฏิบัติตามมาตรฐานสากลเป็นปัจจัยสำคัญต่อการสร้างความเชื่อมั่นและการยอมรับในตลาด โดยเฉพาะมาตรฐานด้านความปลอดภัยและการทำงานร่วมกับมนุษย์

4.5 กรอบแนวคิดเชิงบูรณาการ

จากการวิเคราะห์และสังเคราะห์ข้อมูลจากการทบทวนวรรณกรรมอย่างเป็นระบบ ผู้วิจัยได้พัฒนากรอบแนวคิดเชิงบูรณาการสำหรับหุ่นยนต์อเนกประสงค์ที่ครอบคลุมมิติต่างๆ ของระบบและการประยุกต์ใช้ กรอบแนวคิดนี้แบ่งออกเป็น 4 ชั้นหลัก ที่เชื่อมโยงกันเป็นระบบเดียวที่สมบูรณ์

ชั้นที่ 1: ชั้นพื้นฐานทางกายภาพ (Physical Foundation Layer) เป็นรากฐานของระบบหุ่นยนต์อเนกประสงค์ ประกอบด้วยสถาปัตยกรรมฮาร์ดแวร์ วัสดุ และกลไกการเชื่อมต่อ ชั้นนี้กำหนดขีดความสามารถพื้นฐานของระบบในการปรับเปลี่ยนรูปร่าง โครงสร้าง และคุณสมบัติทางกล

องค์ประกอบหลักของชั้นนี้ ได้แก่ โมดูลการทำงานที่มีฟังก์ชันเฉพาะ (Functional Modules) กลไกการเชื่อมต่อแบบอัตโนมัติ (Autonomous Docking Mechanisms) ระบบจ่ายพลังงานแบบกระจาย (Distributed Power Systems) และเครือข่ายการสื่อสารภายในระบบ (Internal Communication Networks)

การออกแบบชั้นนี้ต้องคำนึงถึงหลักการโมดูลาร์ (Modularity Principles) ที่ช่วยให้สามารถปรับขนาดระบบได้ (Scalability) มีความทนทานและเชื่อถือได้ (Reliability) และสามารถบำรุงรักษาได้ง่าย (Maintainability)

ชั้นที่ 2: ชั้นการรับรู้และการประมวลผล (Perception and Processing Layer) เป็นชั้นที่รับผิดชอบในการรวบรวม ประมวลผล และแปลความหมายของข้อมูลจากสิ่งแวดล้อมและสถานะภายในของระบบ ชั้นนี้รวมระบบเซ็นเซอร์หลายโหมด ระบบประมวลผลแบบกระจาย และอัลกอริทึมการรับรู้

การบูรณาการเซ็นเซอร์หลายประเภท เช่น กล้อง เซ็นเซอร์แรง เซ็นเซอร์อุณหภูมิ และเซ็นเซอร์ตำแหน่ง ช่วยให้ระบบสามารถสร้างความเข้าใจที่ครอบคลุมเกี่ยวกับสถานการณ์รอบตัวและสถานะของตัวเอง

ระบบประมวลผลแบบกระจาย (Distributed Processing) ช่วยลดความล่าช้าในการตอบสนองและเพิ่มความน่าเชื่อถือของระบบ โดยแต่ละโมดูลสามารถประมวลผลข้อมูลได้อย่างอิสระและแบ่งปันผลการประมวลผลกับส่วนอื่นๆ ของระบบ

ชั้นที่ 3: ชั้นการควบคุมและการตัดสินใจ (Control and Decision Layer) เป็นหัวใจสำคัญของระบบที่รับผิดชอบในการวางแผน การตัดสินใจ และการควบคุมการทำงานของระบบโดยรวม ชั้นนี้ประกอบด้วยระบบควบคุมแบบลำดับชั้น อัลกอริทึมการเรียนรู้ และระบบการจัดการงาน

ระบบควบคุมแบบลำดับชั้นแบ่งการควบคุมออกเป็นระดับต่างๆ โดยระดับสูงรับผิดชอบการวางแผนและการตัดสินใจเชิงกลยุทธ์ ส่วนระดับต่ำรับผิดชอบการควบคุมรายละเอียดและการตอบสนองเรียลไทม์

การประยุกต์ใช้อัลกอริทึมการเรียนรู้ของเครื่องและโมเดลพื้นฐานช่วยให้ระบบสามารถปรับปรุงประสิทธิภาพและเรียนรู้งานใหม่ได้อย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะการใช้เทคนิค Transfer Learning และ Meta-Learning ที่ช่วยให้สามารถประยุกต์ความรู้จากงานหนึ่งไปยังอีกงานหนึ่งได้

ชั้นที่ 4: ชั้นการปฏิสัมพันธ์และการประยุกต์ใช้ (Interaction and Application Layer) เป็นชั้นสูงสุดที่รับผิดชอบในการปฏิสัมพันธ์กับผู้ใช้ สิ่งแวดล้อม และระบบอื่นๆ ชั้นนี้รวมอินเทอร์เฟซผู้ใช้ ระบบการสื่อสารภายนอก และโปรโตคอลการทำงานเฉพาะแต่ละแอปพลิเคชัน

การออกแบบอินเทอร์เฟซผู้ใช้ที่ใช้งานง่ายและเข้าใจได้โดยสัญชาตญาณเป็นปัจจัยสำคัญต่อการยอมรับและการใช้งานอย่างมีประสิทธิภาพ การสนับสนุนการสั่งการด้วยภาษาธรรมชาติ การแสดงผลแบบกราฟิก และระบบช่วยเหลือแบบอัตโนมัติช่วยลดความซับซ้อนในการใช้งาน

กลไกการเชื่อมโยงระหว่างชั้น ความสำเร็จของระบบหุ่นยนต์อเนกประสงค์ขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของการเชื่อมโยงและการประสานงานระหว่างชั้นต่างๆ กรอบแนวคิดนี้เสนอกลไกการเชื่อมโยงแบบสองทิศทาง (Bidirectional Coupling) ที่ช่วยให้ข้อมูลและคำสั่งสามารถไหลเวียนระหว่างชั้นได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การใช้สถาปัตยกรรมแบบ Event-Driven ช่วยให้ระบบสามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงได้อย่างรวดเร็วและประหยัดทรัพยากร เมื่อมีเหตุการณ์เกิดขึ้นในชั้นใดชั้นหนึ่ง ระบบจะส่งสัญญาณไปยังชั้นอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องเท่านั้น

การประยุกต์ใช้กรอบแนวคิด กรอบแนวคิดเชิงบูรณาการนี้สามารถประยุกต์ใช้ในการออกแบบและพัฒนาหุ่นยนต์อเนกประสงค์ในบริบทต่างๆ โดยการปรับเน้นหน้าที่และความสามารถของแต่ละชั้นให้เหมาะสมกับข้อกำหนดเฉพาะของแต่ละการประยุกต์ใช้

สำหรับการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมการผลิต อาจเน้นความเสถียรและความแม่นยำของชั้นพื้นฐานทางกายภาพ ในขณะที่การประยุกต์ใช้ในการดูแลสุขภาพอาจเน้นความซับซ้อนของชั้นการปฏิสัมพันธ์และการ

ประยุกต์ใช้เพื่อรองรับการทำงานร่วมกับมนุษย์อย่างใกล้ชิด

กรอบแนวคิดนี้ยังสามารถใช้เป็นแนวทางในการประเมินและเปรียบเทียบระบบหุ่นยนต์อเนกประสงค์ต่างๆ โดยการวิเคราะห์ความสามารถและข้อจำกัดในแต่ละชั้น ซึ่งช่วยให้เข้าใจจุดแข็งและจุดอ่อนของระบบได้อย่างเป็นระบบ

การใช้กรอบแนวคิดนี้ในการวางแผนการวิจัยและพัฒนาสามารถช่วยให้การลงทุนและความพยายามกระจายไปยังส่วนที่มีผลกระทบสูงสุดต่อประสิทธิภาพโดยรวมของระบบ โดยการระบุและแก้ไขคอขวดหรือข้อจำกัดในแต่ละชั้นอย่างเป็นลำดับ

การพัฒนาต่อยอดกรอบแนวคิด กรอบแนวคิดเชิงบูรณาการนี้เป็นพื้นฐานที่สามารถพัฒนาต่อยอดได้ตามความก้าวหน้าของเทคโนโลยี การเพิ่มความซับซ้อนในแต่ละชั้นหรือการเพิ่มชั้นใหม่สามารถทำได้เมื่อมีเทคโนโลยีใหม่ที่เหมาะสม

การพัฒนาเครื่องมือและระเบียบวิธีการประเมินประสิทธิภาพของแต่ละชั้นและระบบโดยรวมจะช่วยให้การประยุกต์ใช้กรอบแนวคิดนี้มีประสิทธิภาพมากขึ้น รวมถึงการพัฒนาแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพระบบแบบองค์รวม (Holistic System Optimization)

การสร้างมาตรฐานและแนวทางปฏิบัติที่ดีบนพื้นฐานของกรอบแนวคิดนี้จะช่วยส่งเสริมการพัฒนาและการประยุกต์ใช้หุ่นยนต์อเนกประสงค์ในวงกว้าง โดยเฉพาะการสร้างความเข้าใจร่วมและการสื่อสารระหว่างผู้พัฒนา ผู้ใช้งาน และหน่วยงานกำกับดูแล

5 การอภิปรายผล

การอภิปรายผลการศึกษาในบทนี้มุ่งเน้นการตีความและวิเคราะห์ผลการวิจัยในมิติที่กว้างขึ้น โดยเชื่อมโยงกับบริบททางเศรษฐกิจ สังคม และเทคโนโลยีของประเทศไทยและภูมิภาค เพื่อให้เกิดความเข้าใจที่ลึกซึ้งเกี่ยวกับศักยภาพและความท้าทายของหุ่นยนต์อเนกประสงค์ในการประยุกต์ใช้จริง

5.1 การอภิปรายผลการวิเคราะห์

ผลการวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบเทคโนโลยีแสดงให้เห็นถึงการวิวัฒนาการของหุ่นยนต์อเนกประสงค์ที่มีทิศทางชัดเจนจากระบบแบบคงที่ไปสู่ระบบที่มีความยืดหยุ่นและปรับตัวได้สูง ซึ่งสะท้อนถึงแนวโน้มการพัฒนาเทคโนโลยีโดยรวมที่เน้นการตอบสนองต่อความต้องการที่หลากหลายและเปลี่ยนแปลงได้อย่างรวดเร็ว

ความสำคัญของการบรรจุกันระหว่างความยืดหยุ่นและความเสถียร การพบว่าหุ่นยนต์ปรับโครงสร้างได้ด้วยตนเองมีดัชนีความยืดหยุ่นสูงสุด (8.5/10) แต่มีความเสถียรต่ำสุด ในขณะที่หุ่นยนต์อเนกประสงค์แบบดั้งเดิมแสดงผลตรงกันข้าม แสดงให้เห็นถึงความจำเป็นในการหาจุดสมดุลที่เหมาะสม ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับหลักการทางวิศวกรรมที่เรียกว่า ”Engineering Trade-offs” ซึ่งเป็นความจริงพื้นฐานในการออกแบบระบบเชิงซับซ้อน

การที่หุ่นยนต์โมดูลาร์แสดงประสิทธิภาพระดับกลางในทั้งสองมิติ (ความยืดหยุ่น 7.2/10, ความเสถียร 6.8/10) ชี้ให้เห็นว่าแนวทางนี้อาจเป็นทางออกที่สมดุลสำหรับการประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรมที่ต้องการทั้งความยืดหยุ่นและความเชื่อถือได้ ซึ่งสอดคล้องกับการพัฒนาเทคโนโลยีในประเทศไทยที่มักเน้นการปรับใช้เทคโนโลยีที่พิสูจน์แล้วมากกว่าการสร้างนวัตกรรมที่มีความเสี่ยงสูง

ความหมายของการปรับปรุงประสิทธิภาพเชิงปริมาณ การที่ระบบหุ่นยนต์อเนกประสงค์สามารถลดเวลาในการปรับตำแหน่งได้ 23% และเพิ่มความแม่นยำได้ 15% มีนัยสำคัญอย่างมากต่อการประยุกต์ใช้ทางอุตสาหกรรม การปรับปรุงประสิทธิภาพในระดับนี้สามารถส่งผลต่อการเพิ่มผลิตภาพและลดต้นทุนการผลิตได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะในอุตสาหกรรมการผลิตที่มีปริมาณการผลิตสูง

อย่างไรก็ตาม การลดเวลาการเปลี่ยนระหว่างงาน 40% อาจเป็นตัวชี้วัดที่สำคัญที่สุดสำหรับอุตสาหกรรมที่มีการผลิตแบบหลากหลายสินค้า (Mass Customization) ซึ่งเป็นแนวโน้มสำคัญในการผลิตสมัยใหม่ การปรับปรุงนี้สามารถเพิ่มความสามารถในการแข่งขันของธุรกิจขนาดกลางและเล็กในประเทศไทยที่ต้องการความยืดหยุ่นในการผลิต

การตีความผลการประหยัดพลังงาน การประหยัดพลังงานได้ถึง 35% ในการเคลื่อนไหวบางประเภทมีความสำคัญพิเศษในบริบทของประเทศไทยที่มีการนำเข้าพลังงานเป็นสัดส่วนสูง การใช้หุ่นยนต์อเนกประสงค์ที่มีประสิทธิภาพการใช้พลังงานสูงสามารถช่วยลดการพึ่งพาการนำเข้าพลังงานและสนับสนุนเป้าหมายการพัฒนา

อย่างยั่งยืนของประเทศ

อย่างไรก็ตาม การที่ต้องใช้พลังงานเพิ่มเติม 20-30% ในช่วงการเปลี่ยนผ่านเป็นข้อควรพิจารณาสำคัญ หมายความว่าประสิทธิภาพการใช้พลังงานจะขึ้นอยู่กับความถี่ในการเปลี่ยนโหมดการทำงาน ซึ่งต้องนำมาพิจารณาในการออกแบบขั้นตอนการผลิตและการวางแผนการใช้งาน

5.2 ผลกระทบต่อภาคอุตสาหกรรม

การประยุกต์ใช้หุ่นยนต์อเนกประสงค์จะส่งผลกระทบอย่างกว้างขวางต่อภาคอุตสาหกรรมไทย ทั้งในแง่ของโอกาสและความท้าทาย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในบริบทของการเปลี่ยนผ่านสู่เศรษฐกิจดิจิทัลและอุตสาหกรรม 4.0

ผลกระทบต่ออุตสาหกรรมการผลิตและการประกอบ ภาคการผลิตซึ่งเป็นฐานสำคัญของเศรษฐกิจไทยจะได้รับประโยชน์อย่างมากจากความสามารถของหุ่นยนต์อเนกประสงค์ในการปรับเปลี่ยนผลิตภัณฑ์ได้อย่างรวดเร็ว (Mohammadi et al., 2023) สำหรับอุตสาหกรรมยานยนต์ที่เป็นอุตสาหกรรมหลักของประเทศ การใช้หุ่นยนต์อเนกประสงค์จะช่วยลดเวลาและต้นทุนในการปรับเปลี่ยนสายการผลิตเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงรุ่นหรือประเภทของยานยนต์

อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์และเครื่องใช้ไฟฟ้าซึ่งมีลักษณะการผลิตที่ต้องการความแม่นยำสูงและการปรับเปลี่ยนบ่อยครั้ง จะสามารถใช้ประโยชน์จากความสามารถการปรับตัวของหุ่นยนต์อเนกประสงค์ในการรับมือกับการเปลี่ยนแปลงเทคโนโลยีและความต้องการของตลาดที่รวดเร็ว

ผลกระทบต่อภาคเกษตรกรรมและอาหาร ประเทศไทยในฐานะประเทศเกษตรกรรมสามารถใช้ประโยชน์จากหุ่นยนต์อเนกประสงค์ในการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตและการแปรรูปผลิตภัณฑ์เกษตร ความสามารถในการปรับเปลี่ยนงานตามฤดูกาลและประเภทของผลิตภัณฑ์เกษตรจะช่วยเพิ่มความคุ้มค่าของการลงทุนในเทคโนโลยีนี้

การประยุกต์ใช้ในการคัดแยก บรรจุภัณฑ์ และการควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์อาหารจะช่วยเพิ่มมาตรฐานและลดความสูญเสียในห่วงโซ่อุปทาน ซึ่งเป็นปัญหาสำคัญของภาคเกษตรไทย

ผลกระทบต่อการพัฒนาทรัพยากรมนุษย์ การเข้ามาของหุ่นยนต์อเนกประสงค์จะสร้างความต้องการทักษะใหม่ๆ ในตลาดแรงงาน โดยเฉพาะด้านการเขียนโปรแกรม การบำรุงรักษาระบบอัตโนมัติ และการออกแบบระบบผลิต การศึกษาของ Krishnan et al. (2023) ชี้ให้เห็นว่าการปรับตัวของแรงงานมนุษย์เพื่อทำงานร่วมกับหุ่นยนต์อเนกประสงค์ต้องการการฝึกอบรมและการพัฒนาทักษะอย่างต่อเนื่อง

ในขณะเดียวกัน หุ่นยนต์อเนกประสงค์อาจทำให้งานบางประเภทหายไป โดยเฉพาะงานที่เป็นกิจวัตรและไม่ต้องการทักษะเฉพาะ อย่างไรก็ตาม การสร้างงานใหม่ในด้านการพัฒนา การบำรุงรักษา และการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีจะช่วยชดเชยการสูญเสียงานในระยะยาว

ผลกระทบต่อห่วงโซ่อุปทานและโลจิสติกส์ ความสามารถของหุ่นยนต์อเนกประสงค์ในการทำงานหลาก

หลายจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของระบบโลจิสติกส์และการจัดการคลังสินค้า (Vitolo et al., 2022) การที่หุ่นยนต์ตัวเดียวสามารถทำหน้าที่ได้หลายอย่าง เช่น การขนย้าย การคัดแยก และการบรรจุภัณฑ์ จะช่วยลดจำนวนอุปกรณ์ที่ต้องการและเพิ่มความยืดหยุ่นในการจัดการสินค้า

สำหรับประเทศไทยที่มีตำแหน่งทางยุทธศาสตร์เป็นศูนย์กลางการขนส่งของภูมิภาค การพัฒนาระบบโลจิสติกส์ที่ใช้หุ่นยนต์อเนกประสงค์จะช่วยเสริมสร้างความสามารถในการแข่งขันในตลาดโลก

5.3 ข้อเสนอแนะเชิงนโยบายและการปฏิบัติ

จากผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผลกระทบต่อภาคอุตสาหกรรม สามารถเสนอแนะแนวทางการพัฒนานโยบายและการปฏิบัติที่เหมาะสมกับบริบทของประเทศไทยได้ดังนี้

นโยบาย ด้าน การ พัฒนา และ ถ่ายทอด เทคโนโลยี รัฐบาล ควร ส่ง เสริม การ วิจัย และ พัฒนา หุ่น ยนต์อเนกประสงค์ผ่านการจัดตั้งศูนย์วิจัยเฉพาะทางและการสนับสนุนทุนวิจัยสำหรับมหาวิทยาลัยและสถาบันวิจัย การสร้างพาร์ทเนอร์ชิประหว่างภาครัฐ เอกชน และสถาบันการศึกษาจะช่วยเร่งการพัฒนาและการประยุกต์ใช้เทคโนโลยี

การจัดตั้งศูนย์ทดสอบและรับรองมาตรฐานหุ่นยนต์อเนกประสงค์ตามมาตรฐานสากล (International Organization for Standardization, 2025) จะช่วยสร้างความเชื่อมั่นของผู้ประกอบการในการนำเทคโนโลยีมาใช้ และเป็นการเตรียมความพร้อมสำหรับการส่งออกเทคโนโลยีและผลิตภัณฑ์ที่เกี่ยวข้องในอนาคต

นโยบาย ด้าน การ พัฒนา ทรัพยากร มนุษย์ และ การ ศึกษา การ ปรับปรุง หลักสูตร การ ศึกษา ใน ระดับอุดมศึกษาและอาชีวศึกษาให้รวมเนื้อหาเกี่ยวกับหุ่นยนต์อเนกประสงค์และเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้อง เป็นสิ่งจำเป็นเร่งด่วน การสร้างหลักสูตรระยะสั้นสำหรับการพัฒนาทักษะของแรงงานที่มีอยู่จะช่วยลดผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงเทคโนโลยี

การจัดตั้งศูนย์ฝึกอบรมเฉพาะทางร่วมกับผู้ผลิตและผู้จำหน่ายหุ่นยนต์อเนกประสงค์จะช่วยให้การถ่ายทอดเทคโนโลยีเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ การสร้างใบประกาศนียบัตรและมาตรฐานฝีมือสำหรับผู้เชี่ยวชาญด้านหุ่นยนต์อเนกประสงค์จะช่วยสร้างความมั่นใจในคุณภาพของกำลังคน

นโยบายด้านการส่งเสริมการลงทุนและการใช้งาน การให้สิทธิประโยชน์ทางภาษีและเงินกู้ดอกเบี้ยต่ำสำหรับธุรกิจที่นำหุ่นยนต์อเนกประสงค์มาใช้ โดยเฉพาะธุรกิจขนาดกลางและเล็ก จะช่วยเร่งการแพร่กระจายของเทคโนโลยี การจัดตั้งกองทุนพัฒนาเทคโนโลยีหุ่นยนต์เพื่อสนับสนุนการวิจัยและพัฒนาจะช่วยสร้างนวัตกรรมที่ตอบสนองต่อความต้องการเฉพาะของอุตสาหกรรมไทย

การพัฒนาโครงการนำร่อง (Pilot Projects) ในอุตสาหกรรมหลักของประเทศ เช่น อุตสาหกรรมยานยนต์ อาหาร และท่องเที่ยว จะช่วยสร้างแบบอย่างที่ดีและสร้างความเชื่อมั่นในการนำเทคโนโลยีมาใช้

นโยบายด้านมาตรฐานและความปลอดภัย การจัดทำมาตรฐานความปลอดภัยสำหรับการใช้งานหุ่นยนต์

อเนกประสงค์ในสภาพแวดล้อมที่มีมนุษย์ร่วมทำงาน เป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการประยุกต์ใช้อย่างปลอดภัย การพัฒนากรอบการทำงานด้านจริยธรรมและความรับผิดชอบในการใช้ปัญญาประดิษฐ์กับหุ่นยนต์อเนกประสงค์จะช่วยสร้างความเชื่อมั่นของสาธารณชน

การจัดตั้งหน่วยงานกำกับดูแลเฉพาะทางที่มีความเชี่ยวชาญในเทคโนโลยีหุ่นยนต์จะช่วยให้การกำกับดูแลเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพและทันต่อการเปลี่ยนแปลงของเทคโนโลยี

การปฏิบัติสำหรับภาคเอกชน ผู้ประกอบการควรเริ่มต้นด้วยการศึกษาความเป็นไปได้และวิเคราะห์ผลตอบแทนการลงทุนอย่างรอบคอบ การเริ่มต้นจากการประยุกต์ใช้ในงานที่มีความเสี่ยงต่ำและมีผลตอบแทนชัดเจนจะช่วยลดความไม่แน่นอนและสร้างประสบการณ์ในการใช้งาน

การสร้างความร่วมมือกับสถาบันการศึกษาและหน่วยงานวิจัยจะช่วยให้การพัฒนาและการประยุกต์ใช้เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ การลงทุนในการพัฒนาบุคลากรและการสร้างความรู้ภายในองค์กรเป็นปัจจัยสำคัญสำหรับความสำเร็จในระยะยาว

5.4 ข้อจำกัดและข้อควรระวัง

การประยุกต์ใช้หุ่นยนต์อเนกประสงค์ในบริบทของประเทศไทยมีข้อจำกัดและความเสี่ยงที่ต้องพิจารณาอย่างรอบคอบ เพื่อให้การนำเทคโนโลยีมาใช้เป็นไปอย่างเหมาะสมและมีประสิทธิภาพ

ข้อจำกัดด้านเทคนิคและเทคโนโลยี ความซับซ้อนของระบบควบคุมหุ่นยนต์อเนกประสงค์ต้องการความเชี่ยวชาญระดับสูงในการติดตั้ง ใช้งาน และบำรุงรักษา (Thuruthel et al., 2018) การขาดแคลนผู้เชี่ยวชาญในประเทศไทยอาจเป็นอุปสรรคสำคัญต่อการนำเทคโนโลยีมาใช้อย่างมีประสิทธิภาพ

ปัญหาการสะสมความผิดพลาดในระบบที่มีการปรับโครงสร้างบ่อยครั้งต้องการระบบการตรวจสอบและการแก้ไขที่ซับซ้อน การที่ระบบต้องหยุดทำงานเพื่อบำรุงรักษาหรือแก้ไขปัญหาอาจส่งผลกระทบต่อการผลิตอย่างมีนัยสำคัญ

ข้อจำกัดด้านเศรษฐกิจและการลงทุน ต้นทุนการลงทุนเบื้องต้นที่สูงและระยะเวลาการคืนทุนที่ยาวนานอาจเป็นอุปสรรคสำหรับธุรกิจขนาดกลางและเล็ก ซึ่งเป็นกลุ่มหลักของภาคอุตสาหกรรมไทย การขาดแคลนแหล่งเงินทุนที่เหมาะสมสำหรับการลงทุนในเทคโนโลยีขั้นสูงเป็นอีกหนึ่งปัจจัยจำกัดสำคัญ

ความไม่แน่นอนของผลตอบแทนการลงทุน โดยเฉพาะในช่วงแรกของการนำเทคโนโลยีมาใช้ อาจทำให้ผู้ประกอบการลังเลในการตัดสินใจลงทุน การขาดข้อมูลกรณีศึกษาในบริบทของประเทศไทยทำให้การประเมินความเป็นไปได้เป็นไปได้อย่างจำกัด

ข้อจำกัดด้านสังคมและวัฒนธรรม ความกังวลเรื่องการสูญเสียงานของแรงงานมนุษย์อาจสร้างความต้านทานต่อการนำเทคโนโลยีมาใช้ การสื่อสารและการสร้างความเข้าใจที่ถูกต้องเกี่ยวกับบทบาทของหุ่นยนต์อเนกประสงค์เป็นสิ่งจำเป็น

วัฒนธรรมการทำงานที่เน้นการปฏิสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์และความยืดหยุ่นแบบไทยๆ อาจไม่เข้ากับระบบการทำงานที่เป็นกฎเกณฑ์และมีความแม่นยำสูงของหุ่นยนต์ การปรับความคิดและวิธีการทำงานเพื่อให้เข้ากับเทคโนโลยีใหม่ต้องการเวลาและความพยายามอย่างต่อเนื่อง

ข้อ ควร ระวัง ด้าน ความ ปลอดภัย และ จริยธรรม การ ทำงาน ร่วม กัน ระหว่าง มนุษย์ และ หุ่น ยนต์อเนกประสงค์ที่สามารถเปลี่ยนพฤติกรรมได้ต้องการมาตรการความปลอดภัยเพิ่มเติม การขาดมาตรฐานความปลอดภัยที่เฉพาะเจาะจงสำหรับหุ่นยนต์อเนกประสงค์ในประเทศไทยอาจเป็นความเสี่ยงต่อผู้ใช้งาน

ประเด็นด้านความเป็นส่วนตัวและการคุ้มครองข้อมูลเมื่อหุ่นยนต์มีการเก็บรวบรวมและประมวลผลข้อมูลจากสภาพแวดล้อมการทำงาน ต้องการกรอบการทำงานด้านจริยธรรมและกฎหมายที่ชัดเจน

ข้อควรระวังด้านการพึ่งพาเทคโนโลยีต่างประเทศ การพึ่งพาเทคโนโลยีและผู้เชี่ยวชาญจากต่างประเทศอาจสร้างความเสี่ยงด้านความมั่นคงทางเทคโนโลยี การขาดความสามารถในการพัฒนาและบำรุงรักษาเทคโนโลยีด้วยตนเองอาจทำให้ประเทศไทยตกอยู่ในสภาพการพึ่งพาที่ไม่เป็นอิสระ

การถ่ายทอดเทคโนโลยีอาจไม่ครอบคลุมถึงองค์ความรู้หลักและความสามารถในการพัฒนาต่อยอด ทำให้การประยุกต์ใช้จำกัดอยู่ในขอบเขตที่กำหนดไว้ล่วงหน้าเท่านั้น การสร้างความสามารถในการวิจัยและพัฒนาภายในประเทศจึงเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการพัฒนาอย่างยั่งยืน

ข้อเสนอแนะสำหรับการจัดการความเสี่ยง การพัฒนาแผนการจัดการความเสี่ยงที่ครอบคลุมทั้งด้านเทคนิค เศรษฐกิจ และสังคม เป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการนำหุ่นยนต์อเนกประสงค์มาใช้อย่างประสบความสำเร็จ การสร้างระบบการตรวจสอบและประเมินผลอย่างต่อเนื่องจะช่วยให้สามารถปรับปรุงและแก้ไขปัญหาได้ทันท่วงที

การจัดทำแผนฉุกเฉินสำหรับกรณีที่ระบบหุ่นยนต์อเนกประสงค์ล้มเหลวหรือต้องหยุดการทำงาน รวมถึงการเตรียมระบบสำรองที่สามารถทำงานแทนได้ชั่วคราว เป็นสิ่งสำคัญสำหรับการรักษาความต่อเนื่องของการผลิต

การสร้างความร่วมมือระหว่างผู้มีส่วนได้ส่วนเสียทุกกลุ่ม รวมถึงผู้ประกอบการ แรงงาน หน่วยงานกำกับดูแล และสถาบันการศึกษา จะช่วยให้การจัดการความเสี่ยงและการแก้ไขปัญหาเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

การ ติดตาม พัฒนาการ ของ เทคโนโลยี และ มาตรฐาน สากล อย่าง ต่อ เนื่อง เพื่อ ให้การ ประยุกต์ ใช้ ในประเทศไทยสอดคล้องกับแนวโน้มโลกและสามารถรักษาความสามารถในการแข่งขันได้ในระยะยาว

ผลการอภิปรายนี้แสดงให้เห็นว่าการนำหุ่นยนต์อเนกประสงค์มาประยุกต์ใช้ในประเทศไทยมีทั้งโอกาสและความท้าทายที่สำคัญ ความสำเร็จของการประยุกต์ใช้จะขึ้นอยู่กับความสามารถในการวางแผน การเตรียมความพร้อม และการจัดการความเสี่ยงอย่างเป็นระบบ โดยเฉพาะการสร้างความสมดุลระหว่างการนำเทคโนโลยีใหม่มาใช้และการรักษาจุดแข็งทางสังคมและวัฒนธรรมของประเทศไทย

6 สรุปและข้อเสนอแนะ

การศึกษาเรื่อง ”หุ่นยนต์อเนกประสงค์ (Polyfunctional Robots)” ในรายงานฉบับนี้ได้นำเสนอการสังเคราะห์องค์ความรู้ที่ครอบคลุมและเป็นระบบเกี่ยวกับเทคโนโลยีที่มีศักยภาพในการเปลี่ยนแปลงภูมิทัศน์ของอุตสาหกรรมและสังคม ผลการศึกษาชี้ให้เห็นถึงความก้าวหน้าอย่างมีนัยสำคัญในการพัฒนาระบบหุ่นยนต์ที่สามารถปรับตัวและปฏิบัติงานหลากหลายได้ภายในแพลตฟอร์มเดียว

6.1 สรุปผลการศึกษา

การทบทวนวรรณกรรมและการวิเคราะห์เชิงลึกจากแหล่งข้อมูลทางวิชาการ 18 แหล่งที่ผ่านเกณฑ์การคัดเลือกได้นำไปสู่ข้อค้นพบสำคัญหลายประการที่สะท้อนสถานะปัจจุบันและแนวโน้มอนาคตของหุ่นยนต์อเนกประสงค์

ข้อค้นพบหลักด้านการจำแนกประเภทและเปรียบเทียบเทคโนโลยี การศึกษาได้จำแนกหุ่นยนต์อเนกประสงค์ออกเป็น 3 ประเภทหลักที่มีกลไกการบรรลุความสามารถอเนกประสงค์ที่แตกต่างกัน ได้แก่ หุ่นยนต์อเนกประสงค์แบบดั้งเดิม หุ่นยนต์โมดูลาร์ และหุ่นยนต์ปรับโครงสร้างได้ด้วยตนเอง ผลการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นความสัมพันธ์แบบผกผันระหว่างความยืดหยุ่น (Flexibility) และความเสถียร (Stability) โดยหุ่นยนต์ปรับโครงสร้างได้ด้วยตนเองมีความยืดหยุ่นสูงสุด (8.5/10) แต่ความเสถียรต่ำสุด ในขณะที่หุ่นยนต์อเนกประสงค์แบบดั้งเดิมมีลักษณะตรงกันข้าม

หุ่นยนต์โมดูลาร์แสดงผลการประเมินที่สมดุลในทั้งสองมิติ (ความยืดหยุ่น 7.2/10, ความเสถียร 6.8/10) ซึ่งชี้ให้เห็นว่าเป็นทางเลือกที่เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรมที่ต้องการความสมดุลระหว่างความสามารถในการปรับตัวและความเชื่อถือได้

ข้อค้นพบด้านประสิทธิภาพและขีดความสามารถ การวิเคราะห์เชิงปริมาณแสดงให้เห็นการปรับปรุงประสิทธิภาพที่มีนัยสำคัญในหลายมิติ การลดเวลาในการปรับตำแหน่งได้ 23% และการเพิ่มความแม่นยำ 15% ในงานจับยึดและจัดการวัตถุ การลดเวลาการเปลี่ยนระหว่างงาน 40% ซึ่งเป็นตัวชี้วัดสำคัญสำหรับการผลิตแบบหลากหลายสินค้า และการประหยัดพลังงานได้ถึง 35% ในการเคลื่อนไหวบางประเภท

อย่างไรก็ตาม การศึกษายังพบข้อจำกัดสำคัญ ได้แก่ การใช้พลังงานเพิ่มเติม 20-30% ในช่วงการเปลี่ยนผ่านโหมดการทำงาน อัตราการล้มเหลวของจุดเชื่อมต่อระหว่างโมดูลที่สูงกว่าส่วนประกอบอื่นๆ 3-5 เท่า และการสะสมความผิดพลาดในระบบที่มีการปรับโครงสร้างบ่อยครั้ง

ข้อค้นพบด้านแนวโน้มและทิศทางการพัฒนา การศึกษาระบุแนวโน้มการพัฒนาที่สำคัญ 5 ประการ ได้แก่ (1) การรวมตัวของปัญญาประดิษฐ์และโมเดลพื้นฐานในการควบคุม (2) การพัฒนาระบบการรับรู้แบบหลายโหมดที่ครอบคลุมทั้งตัวหุ่นยนต์ (3) การประยุกต์ใช้วัสดุอัจฉริยะและโครงสร้างแบบโอริกามิ (4) การพัฒนาสู่ระบบการทำงานร่วมกันแบบฝูง และ (5) การเน้นความยั่งยืนในการออกแบบและการใช้งาน

ข้อค้นพบด้านความท้าทายและอุปสรรค การศึกษาระบุความท้าทายหลัก 6 ประการ ได้แก่ ความซับซ้อนของระบบควบคุมเรียลไทม์ การขาดแคลนกรอบแนวคิดแบบบูรณาการที่เชื่อมโยงฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ ประเด็นประสิทธิภาพการใช้พลังงานในระบบปรับตัวได้ การขาดมาตรฐานการประเมินประสิทธิภาพที่เป็นเอกภาพ ความท้าทายด้านความปลอดภัยในสภาพแวดล้อมที่มีมนุษย์ร่วม และการขาดแคลนข้อมูลสำหรับการเรียนรู้ข้ามโดเมน

กรอบแนวคิดเชิงบูรณาการที่พัฒนาขึ้น การศึกษาได้สร้างกรอบแนวคิดเชิงบูรณาการที่ประกอบด้วย 5 ชั้นหลัก ได้แก่ ชั้นพื้นฐานทางกายภาพ ชั้นการรับรู้และการประมวลผล ชั้นการควบคุมและการตัดสินใจ ชั้นการปฏิสัมพันธ์และการสื่อสาร และชั้นการประยุกต์ใช้และการปรับตัว กรอบแนวคิดนี้เน้นการเชื่อมโยงแบบสองทิศทางและสถาปัตยกรรมแบบ Event-Driven เพื่อรองรับการทำงานที่มีประสิทธิภาพและปรับตัวได้

6.2 ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยต่อไป

จากการวิเคราะห์ช่องว่างความรู้และข้อจำกัดที่พบในการศึกษาครั้งนี้ สามารถเสนอแนะทิศทางการวิจัยในอนาคตที่มีความสำคัญสูงและสามารถสร้างผลกระทบเชิงบวกต่อการพัฒนาเทคโนโลยีได้

การพัฒนาแพลตฟอร์มทดสอบมาตรฐานและเมตริกการประเมิน การวิจัยในอนาคตควรมุ่งเน้นการพัฒนา แพลตฟอร์ม ทดสอบ มาตรฐาน สำหรับ หุ่น ยนต์ อเนกประสงค์ ที่ สามารถ ประเมิน ประสิทธิภาพ ได้ อย่างเป็นระบบและเปรียบเทียบได้ การสร้างชุดเมตริกการประเมินที่ครอบคลุมมิติความยืดหยุ่น ความเชื่อถือได้ ประสิทธิภาพการใช้พลังงาน และความปลอดภัย จะช่วยให้การพัฒนาและการประยุกต์ใช้เป็นไปอย่างมีมาตรฐาน

การพัฒนาชุดงานทดสอบ (Benchmark Tasks) ที่สะท้อนสถานการณ์การใช้งานจริงในสภาพแวดล้อมที่หลากหลาย รวมถึงการจัดการกับความไม่แน่นอนและสถานการณ์ฉุกเฉิน จะช่วยให้การประเมินประสิทธิภาพมีความหมายและประโยชน์มากขึ้น

การวิจัยด้านกรอบแนวคิดแบบบูรณาการ การพัฒนากรอบแนวคิดที่เชื่อมโยงการปรับโครงสร้างทางกลกับพฤติกรรมที่เรียนรู้ได้อย่างไร้รอยต่อ เป็นความจำเป็นเร่งด่วนสำหรับการพัฒนาหุ่นยนต์อเนกประสงค์รุ่นต่อไป การวิจัยในด้านการออกแบบร่วมระหว่างฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ (Co-design) และการพัฒนาเครื่องมือสำหรับการจำลองและการทดสอบแบบบูรณาการจะช่วยเร่งการพัฒนาและลดต้นทุนการวิจัย

การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการเพิ่มประสิทธิภาพระบบแบบองค์รวม (Holistic System Optimization) ที่คำนึงถึงการแลกเปลี่ยนระหว่างประสิทธิภาพในมิติต่างๆ จะช่วยให้การออกแบบระบบมีประสิทธิภาพสูงสุดตามเป้าหมายการใช้งานเฉพาะ

การวิจัยด้านปัญญาประดิษฐ์และการเรียนรู้แบบข้ามโดเมน การพัฒนาอัลกอริทึมการเรียนรู้ที่สามารถถ่ายทอดความรู้และทักษะระหว่างงานและสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกันได้อย่างมีประสิทธิภาพ เป็นกุญแจสำคัญสำหรับการสร้างหุ่นยนต์อเนกประสงค์ที่แท้จริง การวิจัยในด้านการเรียนรู้แบบต่อเนื่อง (Continual Learning)

และการเรียนรู้แบบเมตา (Meta Learning) จะช่วยให้หุ่นยนต์สามารถปรับตัวเข้ากับงานใหม่ได้อย่างรวดเร็วและมีประสิทธิภาพ

การสร้างและการใช้ประโยชน์จากโมเดลพื้นฐาน (Foundation Models) เฉพาะทางสำหรับหุ่นยนต์อเนกประสงค์ รวมถึงการพัฒนาเทคนิคการปรับแต่ง (Fine-tuning) และการปรับใช้ (Adaptation) ที่มีประสิทธิภาพสำหรับงานเฉพาะ

การวิจัยด้านวัสดุศาสตร์และการออกแบบเชิงกล การพัฒนาวัสดุอัจฉริยะและวัสดุปรับตัวได้ที่สามารถเปลี่ยนคุณสมบัติทางกลได้ตามสถานการณ์ จะเปิดมิติใหม่ในการออกแบบหุ่นยนต์อเนกประสงค์ การวิจัยในด้านโครงสร้างแบบโอริกามิและคิริกามิขั้นสูง รวมถึงการประยุกต์ใช้หลักการ Morphological Computation จะช่วยสร้างระบบที่มีความซับซ้อนทางฟังก์ชันสูงในขณะที่ใช้กลไกที่เรียบง่าย

การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการออกแบบจุดเชื่อมต่อและกลไกการเชื่อมต่อที่มีความทนทานสูงและสามารถเชื่อมต่อ-ตัดการเชื่อมต่อได้หลายครั้งโดยไม่สูญเสียประสิทธิภาพ เป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการพัฒนาหุ่นยนต์โมดูลาร์และปรับโครงสร้างได้

การวิจัยด้านความปลอดภัยและการทำงานร่วมกับมนุษย์ การพัฒนาระบบการรับประกันความปลอดภัยที่สามารถจัดการกับพฤติกรรมแบบไดนามิกและการเปลี่ยนแปลงโหมดการทำงานของหุ่นยนต์อเนกประสงค์ เป็นความจำเป็นสำคัญสำหรับการประยุกต์ใช้ในสภาพแวดล้อมที่มีมนุษย์ การวิจัยในด้านการออกแบบปฏิสัมพันธ์ที่เป็นธรรมชาติและใช้งานง่าย รวมถึงการพัฒนาระบบการสื่อสารแบบหลายโหมดระหว่างมนุษย์และหุ่นยนต์

การศึกษาวิจัยเกี่ยวกับผลกระทบทางจิตวิทยาและสังคมศาสตร์ของการทำงานร่วมกับหุ่นยนต์อเนกประสงค์จะช่วยให้การออกแบบและการประยุกต์ใช้เป็นไปในทิศทางที่เป็นประโยชน์ต่อมนุษย์และสังคม

6.3 ข้อเสนอแนะสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้

การนำหุ่นยนต์อเนกประสงค์ไปประยุกต์ใช้ในภาคปฏิบัติต้องการการพิจารณาอย่างรอบคอบทั้งด้านเทคนิค เศรษฐกิจ และสังคม เพื่อให้การประยุกต์ใช้เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพและยั่งยืน

สำหรับภาคอุตสาหกรรมการผลิต ผู้ประกอบการควรเริ่มต้นด้วยการประเมินความเป็นไปได้และการวิเคราะห์ผลตอบแทนการลงทุนอย่างละเอียด โดยเฉพาะการพิจารณาลักษณะของกระบวนการผลิต ความถี่ในการเปลี่ยนแปลงผลิตภัณฑ์ และระดับความซับซ้อนของงาน การเริ่มต้นจากการประยุกต์ใช้ในงานที่มีความเสี่ยงต่ำและผลตอบแทนชัดเจนจะช่วยสร้างประสบการณ์และความเชื่อมั่น

การลงทุนในการพัฒนาบุคลากรและการสร้างความรู้ภายในองค์กรเป็นปัจจัยสำคัญไม่แพ้การลงทุนในเทคโนโลยี การจัดทำแผนการฝึกอบรมและการพัฒนาทักษะอย่างต่อเนื่องจะช่วยให้การใช้งานเทคโนโลยีเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

การสร้างความร่วมมือกับสถาบันการศึกษา ผู้ผลิตเทคโนโลยี และผู้ให้บริการเทคนิคจะช่วยลดความ

เสี่ยงและเพิ่มโอกาสความสำเร็จ การมีส่วนร่วมในเครือข่ายผู้ใช้งานและชุมชนผู้พัฒนาจะช่วยให้ได้รับข้อมูลและประสบการณ์ที่มีค่า

สำหรับภาคการเกษตรและอาหาร การประยุกต์ใช้ในภาคนี้ควรเน้นการแก้ไขปัญหาเฉพาะทางที่สำคัญ เช่น การขาดแคลนแรงงาน การเพิ่มคุณภาพและมาตรฐานผลิตภัณฑ์ และการลดความสูญเสียในห่วงโซ่อุปทาน การออกแบบระบบที่สามารถปรับตัวตามฤดูกาลและประเภทผลิตภัณฑ์จะช่วยเพิ่มความคุ้มค่าของการลงทุน

การพัฒนาโซลูชันที่เหมาะสมกับขนาดและลักษณะของธุรกิจเกษตรไทยซึ่งส่วนใหญ่เป็นธุรกิจขนาดเล็กและกลาง การสร้างแบบจำลองธุรกิจที่ช่วยลดต้นทุนการลงทุนเบื้องต้น เช่น การให้เช่าหรือการใช้บริการแบบ Service จะช่วยเพิ่มการเข้าถึงเทคโนโลยี

สำหรับภาคบริการและโลจิสติกส์ การใช้ประโยชน์จากตำแหน่งทางยุทธศาสตร์ของประเทศไทยเป็นศูนย์กลางการขนส่งของภูมิภาคในการพัฒนาระบบโลจิสติกส์อัจฉริยะที่ใช้หุ่นยนต์อเนกประสงค์ การบูรณาการระบบการจัดการคลังสินค้า การคัดแยก และการขนส่งจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและลดต้นทุน

การพัฒนาระบบที่สามารถจัดการกับสินค้าที่มีลักษณะและขนาดแตกต่างกันได้อย่างยืดหยุ่น เหมาะสมกับลักษณะการค้าระหว่างประเทศที่หลากหลาย การใช้เทคโนโลยีการรับรู้ขั้นสูงในการระบุและจัดการสินค้าจะช่วยเพิ่มความแม่นยำและความรวดเร็ว

สำหรับหน่วยงานภาครัฐและนโยบาย การจัดทำแผนยุทธศาสตร์ระดับชาติสำหรับการพัฒนาและการประยุกต์ใช้หุ่นยนต์อเนกประสงค์ที่สอดคล้องกับแผน Thailand 4.0 และเป้าหมายการพัฒนาอย่างยั่งยืน การสร้างความเชื่อมโยงระหว่างนโยบายการศึกษา การวิจัยและพัฒนา และการส่งเสริมการลงทุนให้เป็นไปในทิศทางเดียวกัน

การพัฒนากฎหมายและระเบียบที่เอื้อต่อการนำเทคโนโลยีมาใช้อย่างปลอดภัยและมีประสิทธิภาพ รวมถึงการจัดทำมาตรฐานความปลอดภัยและจริยธรรมในการใช้งาน การสร้างกลไกการกำกับดูแลที่มีความยืดหยุ่นและสามารถปรับตัวตามการเปลี่ยนแปลงของเทคโนโลยี

การส่งเสริมการสร้างความตระหนักรู้และการยอมรับของสาธารณชนต่อเทคโนโลยีหุ่นยนต์อเนกประสงค์ผ่านการสื่อสารที่ถูกต้องและโปร่งใส การจัดการความกังวลเรื่องการสูญเสียงานด้วยการสร้างโอกาสในการพัฒนาทักษะและการสร้างงานใหม่

6.4 คำสุดท้าย

การศึกษาเรื่องหุ่นยนต์อเนกประสงค์ในรายงานฉบับนี้ได้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพอันยิ่งใหญ่ของเทคโนโลยีที่อยู่ในจุดเปลี่ยนสำคัญของการพัฒนา จากการเป็นแนวคิดในห้องปฏิบัติการสู่การประยุกต์ใช้ในโลกแห่งความเป็นจริง ความก้าวหน้าในด้านปัญญาประดิษฐ์ วัสดุศาสตร์ และระบบควบคุมขั้นสูงได้ผลักดันให้หุ่นยนต์อเนกประสงค์เข้าใกล้การเป็นเทคโนโลยีที่สามารถเปลี่ยนแปลงโฉมหน้าของอุตสาหกรรมและสังคมได้อย่างแท้จริง

ความสำเร็จในการนำเทคโนโลยีนี้มาประยุกต์ใช้อย่างมีประสิทธิภาพจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการสร้างสมดุลระหว่างนวัตกรรมทางเทคนิคและการตอบสนองต่อความต้องการของสังคม การพัฒนาเทคโนโลยีอย่างเดียวไม่เพียงพอ หากไม่มีการเตรียมความพร้อมด้านทรัพยากรมนุษย์ กรอบการทำงานด้านนโยบาย และการสร้างความเข้าใจในสังคม

สำหรับประเทศไทย การนำหุ่นยนต์อเนกประสงค์มาประยุกต์ใช้แสดงถึงโอกาสในการยกระดับความสามารถในการแข่งขันทางเศรษฐกิจ การแก้ไขปัญหาการขาดแคลนแรงงานในภาคต่างๆ และการสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับผลิตภัณฑ์และบริการ อย่างไรก็ตาม ความสำเร็จจะต้องอาศัยการวางแผนอย่างรอบคอบ การลงทุนในการพัฒนาทรัพยากรมนุษย์ และการสร้างความร่วมมือระหว่างทุกภาคส่วน

ท้ายที่สุด หุ่นยนต์อเนกประสงค์ไม่ควรถูกมองเป็นเพียงเครื่องมือทางเทคโนโลยี แต่ควรเป็นเครื่องมือสำหรับการสร้างสังคมที่ดีขึ้น การเพิ่มคุณภาพชีวิตของประชาชน และการสร้างอนาคตที่ยั่งยืน การพัฒนาและการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีนี้จึงต้องคำนึงถึงผลกระทบในระยะยาวต่อสังคม สิ่งแวดล้อม และคุณค่าของความเป็นมนุษย์

การศึกษาในรายงานฉบับนี้เป็นเพียงจุดเริ่มต้นของการทำความเข้าใจเกี่ยวกับหุ่นยนต์อเนกประสงค์ในบริบทของประเทศไทย ยังมีประเด็นสำคัญอีกมากมายที่ต้องการการศึกษาวิจัยเพิ่มเติม ทั้งในด้านเทคนิค การประยุกต์ใช้ และผลกระทบทางสังคม ผู้เขียนหวังเป็นอย่างยิ่งว่ารายงานฉบับนี้จะเป็นแรงบันดาลใจและฐานความรู้สำหรับการวิจัยและการพัฒนาต่อไปในอนาคต

ในโลกที่เทคโนโลยีเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว การเตรียมความพร้อมและการปรับตัวเป็นกุญแจสำคัญของความสำเร็จ หุ่นยนต์อเนกประสงค์แสดงให้เห็นถึงความสำคัญของการสร้างระบบและเทคโนโลยีที่สามารถปรับตัวได้ ซึ่งเป็นหลักการที่สำคัญไม่เพียงแต่สำหรับการพัฒนาเทคโนโลยี แต่ยังรวมถึงการพัฒนาองค์กร สังคม และประเทศชาติ

ด้วยความหวังว่าการศึกษาและการพัฒนาหุ่นยนต์อเนกประสงค์จะเป็นส่วนหนึ่งของการสร้างอนาคตที่ดีขึ้นสำหรับประเทศไทยและประชาชน ภายใต้หลักการของการพัฒนาที่ยั่งยืน การเคารพในศักดิ์ศรีความเป็นมนุษย์ และการสร้างโอกาสที่เท่าเทียมกันสำหรับทุกคน

บรรณานุกรม

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. M., & Wang, X. T. (2016). Survey on research and development of reconfigurable modular robots. *Advances in Mechanical Engineering*, *8*(8), 1–15. 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*, 411–421. https://doi.org/10.6028/NIST.IR.8177

Burgner-Kahrs, J., Rucker, D. C., & Choset, H. (2015). Continuum robots for medical applications: A survey. *IEEE Transactions on Robotics*, *31*(6), 1261–1280. https://doi.org/10.1109/TRO.2015.2489500

Craig, J. J. (2017). *Introduction to robotics: Mechanics and control* (4th ed.) [หนังสือมาตรฐานด้านหุ่นยนต์]. Pearson.

Fukuda, T., Nakagawa, S., Kawauchi, Y., & Buss, M. (1991). Dynamically reconfigurable robotic system [งานพื้นฐานเกี่ยวกับ CEBOT - หุ่นยนต์โมดูลาร์รุ่นแรก]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, *7*(4), 481–487. https://doi.org/10.1109/70.86078

Hameed, A., Ordys, A., Mozaryn, J., & Sibilska-Mroziewicz, A. (2017). Modular self-reconfigurable robotic systems: A survey on hardware architectures. *Journal of Robotics*, *2017*, 1–19. https://doi.org/10.1155/2017/5013532

International Organization for Standardization. (2025). Robots and robotic devices – Safety requirements for industrial robots – Part 1: Robots.

Jin, T., Li, L., Wang, T., & Wang, G. (2021). Origami-inspired soft actuators for stimulus perception and crawling robot applications. *IEEE Robotics and Automation Letters*, *6*(2), 3687–3694. https://doi.org/10.1109/LRA.2021.3064250

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), 1–28. https://doi.org/10.1177/02783649241283847

Liu, M., Tan, Q., & Wu, Y. (2019). Continuous task transition approach for robot controller based on hierarchical quadratic programming. *IEEE Robotics and Automation Letters*, *4*(2), 1603–1610. https://doi.org/10.1109/LRA.2019.2896763

Mohammadi, P., Mehrandezh, M., & Janabi-Sharifi, F. (2023). Mobile manipulator path planning in dynamic environments: A mixed-integer programming approach. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, *20*(4), 2479–2492. https://doi.org/10.1109/TASE.2022.3208475

Post, M. A., Yan, X.-T., Letier, P., & Granado, B. (2023). Modular self-configurable robots—The state of the art. *Actuators*, *12*(9), 361. https://doi.org/10.3390/act12090361

Rus, D., & Tolley, M. T. (2015). Design, fabrication and control of soft robots. *Nature*, *521*(7553), 467–475. https://doi.org/10.1038/nature14543

Seo, J., & Paik, J. (2019). Modular reconfigurable robotics. *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems*, *2*, 63–88. https://doi.org/10.1146/annurev-control-053018-023834

Tassi, F., & Ajoudani, A. (2024). Multi-modal and adaptive robot control through hierarchical quadratic programming. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, *110*(3), 164. https://doi.org/10.1007/s10846-024-02193-1

Thuruthel, T. G., Ansari, Y., Falotico, E., & Laschi, C. (2018). Control strategies for soft robotic manipulators: A survey. *Soft Robotics*, *5*(2), 149–163. https://doi.org/10.1089/soro.2017.0007

van den Berg, J., Patil, S., & Alterovitz, R. (2015). Motion planning under uncertainty using iterative local optimization in belief space. *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 3202–3209. https://doi.org/10.1109/ICRA.2015.7139643

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

Xie, Z., Duan, X., Zhou, C., & Jin, M. (2024). Pose optimization for mobile manipulator in constrained environment based on improved genetic algorithm. *IEEE Access*, *12*, 45127–45139. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3380912

Yang, G., Luo, J., Liu, Y., Liu, S., Xu, D., Zhou, X., Su, L., & Zhao, J. (2024). A body-distributed sensor suite for distributed robot skin sensing. *Nature Scientific Reports*, *14*, 8924. https://doi.org/10.1038/s41598-024-59389-1

Yim, M., Shen, W.-M., Salemi, B., Rus, D., Moll, M., Lipson, H., Klavins, E., & Chirikjian, G. S. (2007). Modular self-reconfigurable robot systems: Challenges and opportunities for the future. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, *14*(1), 43–52. https://doi.org/10.1109/MRA.2007.339623

Zhang, Y., Li, J., Wang, N., & Chen, W. (2024). A compact variable stiffness actuator for agile locomotion. *IEEE Transactions on Robotics*, *40*(2), 1234–1248. https://doi.org/10.1109/TRO.2024.3365421

A ภาคผนวก ก: คำศัพท์เทคนิค

คำศัพท์และคำจำกัดความทางเทคนิคที่สำคัญ

Actuator แอคชูเอเตอร์ หมายถึง อุปกรณ์ที่แปลงพลังงานไฟฟ้า นิวเมติก หรือไฮดรอลิกเป็นการเคลื่อนไหวทางกล เป็นส่วนประกอบสำคัญที่ทำให้หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนไหวและปฏิบัติงานได้

Adaptive Control การควบคุมแบบปรับตัวได้ หมายถึง ระบบควบคุมที่สามารถปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์การควบคุมเพื่อให้เหมาะสมกับการเปลี่ยนแปลงของระบบหรือสภาพแวดล้อม

Artificial Intelligence (AI) ปัญญาประดิษฐ์ หมายถึง ระบบคอมพิวเตอร์ที่มีความสามารถในการเรียนรู้ การตัดสินใจ และการแก้ไขปัญหาที่เลียนแบบความฉลาดของมนุษย์

Bidirectional Coupling การเชื่อมโยงแบบสองทิศทาง หมายถึง การเชื่อมต่อระหว่างระบบที่ข้อมูลและสัญญาณสามารถไหลเวียนไปมาได้ทั้งสองทิศทาง

Co-design การออกแบบร่วม หมายถึง กระบวนการออกแบบที่พิจารณาฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์พร้อมกันเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพที่เหมาะสมที่สุด

Degrees of Freedom (DOF) องศาความเสรี หมายถึง จำนวนทิศทางการเคลื่อนไหวอิสระที่หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนไหวได้ ทั้งการเลื่อน (Translation) และการหมุน (Rotation)

End-effector เครื่องมือปลายแขน หมายถึง อุปกรณ์ที่ติดตั้งที่ปลายแขนหุ่นยนต์เพื่อปฏิบัติงานเฉพาะ เช่น มือจับ เครื่องมือเชื่อม หรือเครื่องมือตัด

Event-Driven Architecture สถาปัตยกรรมแบบขับเคลื่อนด้วยเหตุการณ์ หมายถึง การออกแบบระบบที่ตอบสนองต่อเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นแทนการทำงานแบบต่อเนื่อง

Flexibility Index ดัชนีความยืดหยุ่น หมายถึง ตัวชี้วัดที่ใช้ประเมินความสามารถของหุ่นยนต์ในการปรับเปลี่ยนฟังก์ชันและปฏิบัติงานที่หลากหลาย

Foundation Models โมเดลพื้นฐาน หมายถึง โมเดลปัญญาประดิษฐ์ขนาดใหญ่ที่ฝึกฝนด้วยข้อมูลจำนวนมากและสามารถปรับใช้กับงานหลากหลายได้

Generalist Policies นโยบายการทำงานแบบทั่วไป หมายถึง อัลกอริทึมการควบคุมที่สามารถปรับใช้กับงานหลากหลายประเภทโดยไม่ต้องเขียนโปรแกรมใหม่

Hierarchical Control การควบคุมแบบลำดับชั้น หมายถึง ระบบควบคุมที่จัดระดับการควบคุมเป็นชั้นๆ โดยชั้นบนมีหน้าที่วางแผนระดับสูง ส่วนชั้นล่างดำเนินการควบคุมรายละเอียด

Human-Robot Interaction (HRI) การปฏิสัมพันธ์ระหว่างมนุษย์และหุ่นยนต์ หมายถึง การศึกษาวิธีการสื่อสารและทำงานร่วมกันระหว่างมนุษย์และหุ่นยนต์

Industrial Internet of Things (IIoT) อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งทางอุตสาหกรรม หมายถึง เครือข่ายของอุปกรณ์และเซ็นเซอร์ในสภาพแวดล้อมอุตสาหกรรมที่เชื่อมต่อและแลกเปลี่ยนข้อมูลกัน

Kinematics จลนศาสตร์ หมายถึง การศึกษาการเคลื่อนไหวของวัตถุโดยไม่พิจารณาแรงที่เป็นสาเหตุของการเคลื่อนไหว

Machine Learning (ML) การเรียนรู้ของเครื่อง หมายถึง สาขาของปัญญาประดิษฐ์ที่เน้นการพัฒนาอัลกอริทึมที่สามารถเรียนรู้และปรับปรุงประสิทธิภาพจากข้อมูล

Modular Robots หุ่นยนต์โมดูลาร์ หมายถึง หุ่นยนต์ที่ประกอบด้วยโมดูลแยกส่วนที่สามารถเชื่อมต่อและแยกออกจากกันได้เพื่อสร้างโครงสร้างใหม่

Morphological Computation การประมวลผลเชิงโครงสร้าง หมายถึง การใช้โครงสร้างทางกายภาพของหุ่นยนต์ในการประมวลผลและควบคุมแทนการใช้ซอฟต์แวร์เพียงอย่างเดียว

Multi-modal Sensors เซ็นเซอร์แบบหลายโหมด หมายถึง ระบบเซ็นเซอร์ที่สามารถรับรู้ข้อมูลจากหลายช่องทางพร้อมกัน เช่น การมองเห็น การได้ยิน และการสัมผัส

Origami Robotics หุ่นยนต์แบบโอริกามิ หมายถึง หุ่นยนต์ที่ใช้หลักการพับกระดาษโอริกามิในการออกแบบโครงสร้างที่สามารถเปลี่ยนรูปร่างได้

Path Planning การวางแผนเส้นทาง หมายถึง กระบวนการหาเส้นทางที่เหมาะสมสำหรับหุ่นยนต์ในการเคลื่อนที่จากตำแหน่งเริ่มต้นไปยังเป้าหมาย

Polyfunctional Robots หุ่นยนต์อเนกประสงค์ หมายถึง หุ่นยนต์ที่สามารถปฏิบัติงานที่หลากหลายและแตกต่างกันได้ภายในระบบเดียว

Real-time Control การควบคุมเรียลไทม์ หมายถึง ระบบควบคุมที่สามารถประมวลผลและตอบสนองต่อสัญญาณอินพุตภายในเวลาที่กำหนดอย่างเข้มงวด

Reconfigurable Robots หุ่นยนต์ปรับโครงสร้างได้ หมายถึง หุ่นยนต์ที่สามารถเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางกายภาพเพื่อให้เหมาะสมกับงานหรือสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน

Self-Reconfiguring Robots หุ่นยนต์ปรับโครงสร้างได้ด้วยตนเอง หมายถึง หุ่นยนต์ที่สามารถเปลี่ยนแปลงรูปร่างและโครงสร้างของตนเองได้โดยอัตโนมัติ

Sensor Fusion การผสมผสานข้อมูลเซ็นเซอร์ หมายถึง กระบวนการรวมข้อมูลจากเซ็นเซอร์หลายตัวเพื่อให้ได้ข้อมูลที่แม่นยำและครอบคลุมมากขึ้น

Shape Memory Alloys (SMA) โลหะผสมที่จำรูปร่างได้ หมายถึง วัสดุที่สามารถกลับคืนสู่รูปร่างเดิมเมื่อได้รับความร้อนหรือสิ่งเร้าอื่นๆ

Smart Materials วัสดุอัจฉริยะ หมายถึง วัสดุที่สามารถเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางกายภาพหรือเคมีเพื่อตอบสนองต่อสิ่งแวดล้อม

Stability Index ดัชนีความเสถียร หมายถึง ตัวชี้วัดที่ใช้ประเมินความมั่นคงและความเชื่อถือได้ของหุ่นยนต์ในการปฏิบัติงาน

Swarm Robotics หุ่นยนต์แบบฝูง หมายถึง ระบบหุ่นยนต์หลายตัวที่ทำงานร่วมกันอย่างประสานงานเพื่อบรรลุเป้าหมายร่วม

Variable Stiffness Actuators แอคชูเอเตอร์ปรับความแข็งได้ หมายถึง แอคชูเอเตอร์ที่สามารถปรับเปลี่ยนระดับความแข็งแรงหรือความยืดหยุ่นได้ตามความต้องการ

Workspace พื้นที่การทำงาน หมายถึง บริเวณที่หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนไหวและปฏิบัติงานได้ครอบคลุม

B ภาคผนวก ข: ตารางเปรียบเทียบเทคโนโลยี

B.1 ตารางที่ 1: การเปรียบเทียบประเภทหุ่นยนต์อเนกประสงค์

ตารางที่ 1: การเปรียบเทียบประเภทหุ่นยนต์อเนกประสงค์

คุณสมบัติ	หุ่นยนต์อเนกประสงค์แบบดั้งเดิม	หุ่นยนต์โมดูลาร์	หุ่นยนต์ปรับโครงสร้างได้ด้วยตนเอง
กลไก หลัก สำหรับความอเนกประสงค์	การตั้งโปรแกรมที่ซับซ้อนและเครื่องมือปลายแขนที่ถอดเปลี่ยนได้	การ ออกแบบ ฮาร์ดแวร์ ที่ ประกอบ จาก โมดูลมาตรฐานที่สามารถถอดประกอบใหม่ได้	ความสามารถในการเปลี่ยนรูปร่างทางกายภาพของตัวเองได้อย่างอิสระและอัตโนมัติ
หลักการออกแบบหลัก	การ ตั้ง โปรแกรม และ การ ควบคุม ขั้น สูง สำหรับโครงสร้างคงที่	การออกแบบแบบโมดูลาร์, การสร้างมาตรฐาน, และความสามารถในการปรับขนาด	ความสามารถในการปรับรูปร่าง, การทำงานร่วมกันของโมดูล, และการซ่อมแซมตัวเอง
ความ เป็น อิสระ ใน การปรับเปลี่ยนโครงสร้าง	ไม่มี (โครงสร้างคงที่)	ต่ำ ถึง ปาน กลาง (ต้อง อาศัย มนุษย์ ใน การ ถอดประกอบ)	สูง (สามารถเปลี่ยนรูปร่างเองได้)
ความซับซ้อนของระบบควบคุม	ต่ำถึงปานกลาง	ปานกลางถึงสูง	สูงมาก
ความเชื่อถือได้และความเสถียร	สูงมาก (9.1/10)*	ปานกลาง (6.8/10)*	ต่ำ (4.2/10)*
ความยืดหยุ่นในการปรับตัว	ต่ำ (5.8/10)*	ปานกลางถึงสูง (7.2/10)*	สูงมาก (8.5/10)*
ต้นทุนการพัฒนาและผลิต	ต่ำถึงปานกลาง	ปานกลาง	สูง
ความเหมาะสมสำหรับการผลิตเชิงพาณิชย์	สูงมาก	ปานกลาง	ต่ำ (ยังอยู่ในระยะวิจัยและพัฒนา)
ตัวอย่างที่สำคัญ	หุ่นยนต์อุตสาหกรรมในสายการผลิต, ระบบผ่าตัด da Vinci	หุ่นยนต์เพื่อการศึกษา Cubelets, แขนหุ่นยนต์ที่สามารถเปลี่ยนโมดูลได้	หุ่น ยนต์ ต้นแบบ เช่น CEBOT, Polybot, CRISP (สำหรับงานผ่าตัด)

**หมายเหตุ: คะแนนดัชนีการประเมินที่พัฒนาโดยผู้วิจัยจากการสังเคราะห์เอกสารวิชาการ โดยใช้มาตราส่วน 1-10*

B.2 ตารางที่ 2: การเปรียบเทียบเทคโนโลยีหลักของหุ่นยนต์อเนกประสงค์

ตารางที่ 2: การเปรียบเทียบเทคโนโลยีหลักของหุ่นยนต์อเนกประสงค์

เทคโนโลยี	ข้อดี	ข้อเสีย	การประยุกต์ใช้หลัก	ระดับความพร้อม (TRL)
การควบคุมแบบลำดับชั้น	ความเสถียรสูง, ง่ายต่อการออกแบบ	ความยืดหยุ่นจำกัด, การปรับเปลี่ยนช้า	อุตสาหกรรมการผลิต, หุ่นยนต์บริการ	8-9
เซ็นเซอร์แบบหลายโหมด	ข้อมูลครอบคลุม, ความแม่นยำสูง	ต้นทุนสูง, ความซับซ้อนในการประมวลผล	หุ่นยนต์อัจฉริยะ, ระบบนำทาง	6-7
แอคชูเอเตอร์ปรับความแข็งได้	ความปลอดภัยสูง, ประหยัดพลังงาน	ควบคุมซับซ้อน, ต้นทุนสูง	หุ่นยนต์ทำงานร่วมกับมนุษย์, การฟื้นฟูสมรรถภาพ	5-6
โมเดลพื้นฐาน AI	ความสามารถทั่วไป, การเรียนรู้เร็ว	ทรัพยากร คอมพิวเตอร์ สูง, ความไม่แน่นอน	หุ่นยนต์บริการ, หุ่นยนต์ในบ้าน	4-5
วัสดุอัจฉริยะ	น้ำหนักเบา, รูปร่างปรับเปลี่ยนได้	ความทนทานจำกัด, การควบคุมยาก	หุ่นยนต์อ่อน, อุปกรณ์การแพทย์	3-4
โครงสร้างโอริกามิ	ประหยัดพื้นที่, น้ำหนักเบา	ความ แข็ง แรง จำกัด, รูป แบบ การเคลื่อนไหวจำกัด	หุ่นยนต์ขนาดเล็ก, อุปกรณ์ที่พับเก็บได้	3-4

หมายเหตุ: TRL (Technology Readiness Level) แสดงระดับความพร้อมของเทคโนโลยี (1=แนวคิดพื้นฐาน, 9=ใช้งานเชิงพาณิชย์)

B.3 ตารางที่ 3: การเปรียบเทียบการประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรม

ตารางที่ 3: การเปรียบเทียบการประยุกต์ใช้หุ่นยนต์อเนกประสงค์ในภาคอุตสาหกรรม

ภาคอุตสาหกรรม	การประยุกต์ใช้หลัก	ข้อดีสำคัญ	ความท้าทายหลัก	ผลตอบแทนการลงทุน (ปี)
การผลิตยานยนต์	การประกอบ, การเชื่อม, การตรวจสอบคุณภาพ	ความยืดหยุ่นในสายการผลิต, ลดเวลา setup	ต้นทุนเริ่มต้นสูง, การฝึกอบรมบุคลากร	3-5
อิเล็กทรอนิกส์	การประกอบชิ้นส่วนเล็ก, การทดสอบ, การบรรจุภัณฑ์	ความแม่นยำสูง, ลดการสูญเสีย	ความ ซับ ซ้อน ของ ผลิตภัณฑ์, เทคโนโลยีเปลี่ยนแปลงเร็ว	2-4
อาหารและการเกษตร	การคัดแยก, การบรรจุ, การตรวจสอบคุณภาพ	ลดการสูญเสีย, เพิ่มมาตรฐานอนามัย	ความ หลาก หลาย ของ ผลิตภัณฑ์, สภาพแวดล้อมที่ไม่แน่นอน	4-6
โลจิสติกส์และคลังสินค้า	การขนย้าย, การคัดแยก, การจัดเก็บ	เพิ่มประสิทธิภาพ, ลดค่าแรงงาน	ความหลากหลายของสินค้า, การบูรณาการระบบ	2-3
การแพทย์	การผ่าตัด, การฟื้นฟูสมรรถภาพ, การช่วยเหลือผู้ป่วย	ความแม่นยำสูง, ลดความเสี่ยง	ข้อ กำหนด ความ ปลอดภัย สูง, การรับรองทางการแพทย์	5-8
ก่อสร้าง	การก่อสร้างอัตโนมัติ, การตรวจสอบโครงสร้าง	ลดความเสี่ยงของคนงาน, เพิ่มความแม่นยำ	สภาพแวดล้อมที่หลากหลาย, ขนาดและน้ำหนักของวัสดุ	4-7

คำอธิบายเพิ่มเติม:

ภาคผนวกนี้จัดทำขึ้นเพื่อเป็นแหล่งอ้างอิงที่ครอบคลุมสำหรับผู้ที่สนใจศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับหุ่นยนต์อเนกประสงค์ ทั้งคำศัพท์เทคนิคและตารางเปรียบเทียบต่างๆ ได้รับการคัดเลือกและจัดเรียงเพื่อให้ผู้อ่านสามารถเข้าใจและนำไปประยุกต์ใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การพัฒนาเกณฑ์การประเมินและมาตรฐานต่างๆ ในตารางเหล่านี้ได้รับการสังเคราะห์จากเอกสารวิชาการ มาตรฐานสากล และประสบการณ์จากการประยุกต์ใช้จริง ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการพัฒนา ประเมิน และนำหุ่นยนต์อเนกประสงค์ไปประยุกต์ใช้ในบริบทต่างๆ

ภาคผนวกนี้ประกอบด้วยการวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบที่สำคัญ ได้แก่ การเปรียบเทียบประเภทหุ่นยนต์อเนกประสงค์ เทคโนโลยีหลัก การประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรม ซึ่งทั้งหมดนี้มีการจัดระเบียบและนำเสนอในรูปแบบที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ประโยชน์ในการศึกษาค้นคว้าและการประยุกต์ใช้จริง