

การพัฒนาระบบฝาแฝดดิจิทัลของชุดทดลองถอดประกอบชิ้นงานเพื่อการวิเคราะห์การ
ใช้พลังงานของหุ่นยนต์อุตสาหกรรม
DEVELOPMENT DIGITAL TWINS SYSTEM OF DISASSEMBLE EXPERIMENTS
FOR ENERGY CONSUMPTION ANALYZE OF INDUSTRIAL ROBOT

สงกรานต์ อุทาธง^{1*} วชรินทร์ โพธิ์เงิน²
Songkran U-thathong^{1*}, Watcharin Pongaen²

สังกัดสาขาวิชาวิศวกรรมแมคคาทรอนิกส์ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ^{1,2}

*Corresponding author. E-mail: s6202017810158@email.kmutnb.ac.th

บทคัดย่อ

การพัฒนาระบบฝาแฝดดิจิทัล (Digital Twin System) มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและพัฒนานำไปสู่การประยุกต์ใช้งานกับชุดทดลองถอดประกอบชิ้นงานของหุ่นยนต์อุตสาหกรรม เนื่องด้วยการนำหุ่นยนต์อุตสาหกรรมมาทดแทนการทำงานมนุษย์มากขึ้น ทั้งในด้านอุตสาหกรรมหรือทางการแพทย์ รวมถึงลักษณะงานที่มีความอันตรายต่อผู้ใช้งาน แต่ก็ยังต้องใช้ความแม่นยำในการควบคุม การตอบสนองการควบคุมที่รวดเร็ว การแสดงผลการทำงานแบบเรียลไทม์ (Real Time) ในรูปแบบภาพ 3 มิติ และข้อมูลหุ่นยนต์ การวิเคราะห์การปรับปรุงกระบวนการทำงานของหุ่นยนต์อุตสาหกรรมในส่วนของการใช้พลังงาน ผู้วิจัยจึงเล็งเห็นว่าการควบคุมทางไกลนั้นเป็นส่วนสำคัญของกระบวนการทำงานจึงได้ศึกษาพัฒนาระบบฝาแฝดดิจิทัลเพื่อประยุกต์ใช้งานกับชุดทดลองถอดประกอบชิ้นงานและการวิเคราะห์การใช้พลังงานของหุ่นยนต์อุตสาหกรรม ในการเคลื่อนที่ทั้ง 8 รูปแบบของหุ่นยนต์ โดยผลการดำเนินการวิจัยพบว่าโมเดลพยากรณ์การใช้พลังงานการเคลื่อนที่ทั้งหมด 5 ตำแหน่ง พยากรณ์ถูกต้อง 3 ตำแหน่งคิดเป็น 60% โดยมีค่าความผิดพลาดของการพยากรณ์ค่าพลังงานงานที่ใช้มากที่สุดอยู่ที่ ตำแหน่งที่ 5 ท่าทางที่ 2 ที่ -2.8609W และน้อยที่สุดอยู่ที่ตำแหน่งที่ 1 ท่าทางที่ 2 ที่ 0.1317W

คำสำคัญ: ฝาแฝดดิจิทัล หุ่นยนต์อุตสาหกรรม

Abstract

The Development Digital Twin System aims to study and develop to be applied for disassemble experiments of industrial robot. Humans rely more on robots in industrial and medical fields including dangerous work but require accuracy, quick response, real-time 3D visualization and sensor data, power consumption analyze. The researcher saw that tele operate control is one of the crucial parts of the work process has therefore been studied and developed a digital twins system to apply for disassemble experiments and Energy consumption analyze of industrial robot in the movement of 8 gestures of the robot. The study found Energy Consumption Model forecast



all 5 position the forecast is correct, 3 places account for 60%. The most used power forecasting error was at position 5, gesture 2 at -2.8609W, and the least at position 1, gesture 2 at 0.1317W

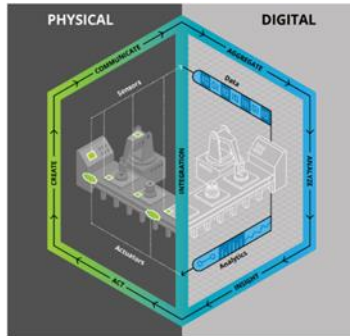
Keywords: Digital Twins, Industrial Robot

บทนำ

อุตสาหกรรมในปัจจุบันได้มีการพัฒนามาตามลำดับตามเทคโนโลยีของยุคสมัยเริ่มจากอุตสาหกรรม 1.0 (Industry 1.0) จนมาถึงทุกวันนี้อุตสาหกรรมได้ก้าวเข้าสู่อุตสาหกรรม 4.0 ด้วยเทคโนโลยีที่มีการพัฒนาขีดความสามารถเพิ่มขึ้น ระบบต่าง ๆ ถูกเชื่อมต่อเข้าด้วยกันผ่านโปรโตคอลโดยมีโครงสร้างระบบอินเทอร์เน็ตมาใช้งาน โดยการนำแนวคิด IoT (Internet of things) เข้าร่วมด้วย (Chaiwat Assawaarakul และ คณ, 2562) กระบวนการต่าง ๆ ในอุตสาหกรรมมีความเป็นดิจิทัลมากขึ้น ในหลายบริษัทมีแนวโน้มมากขึ้นที่จะพัฒนารูปแบบของอุตสาหกรรมให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นเช่น การแก้ปัญหาทางด้านกลไกการทำงานของเครื่องจักรให้ดีขึ้น การทำนายผลลัพธ์ในอนาคตที่มีความแม่นยำ เพื่อปรับปรุงการทำงานของกระบวนการต่าง ๆ ภายในอุตสาหกรรม และลดข้อบกพร่องในการทำงานของกระบวนการ (Aaron Parrott และคณะ, 2560) โครงสร้างพื้นฐานของอุตสาหกรรมแบบอัจฉริยะ ต้องอาศัยความเสถียรภาพของระบบเครือข่ายสูง ประสิทธิภาพของระบบฉุกเฉินและระบบรักษาความปลอดภัย กระบวนการประหยัดพลังงาน อย่างไรก็ตามการปฏิวัติอุตสาหกรรมครั้งที่ 4 เพิ่มความซับซ้อนของระบบมากขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งการนำระบบอุตสาหกรรมที่มีความซับซ้อนมาประเมินหาประสิทธิภาพการวิเคราะห์หาผลเสียที่จะเกิดขึ้นในอนาคต รวมถึงการตรวจสอบความปลอดภัยของระบบแบบเดิมนั้นเกิดความสิ้นเปลืองต่อเวลา และทรัพยากร นอกจากนี้ระบบฉุกเฉินของบางส่วนนั้นมีความซับซ้อนที่จะตรวจสอบในเชิงปฏิบัติได้ การแก้ปัญหาโดยวิธีที่มีความน่าเชื่อถือนั้น เนื่องจากระบบมีทั้งลักษณะของกระบวนการทำงานต่าง ๆ ที่เป็นส่วนของทางกล รวมถึงซอฟต์แวร์ทั้งหมดนั้นสามารถใช้เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ที่มีความน่าเชื่อถือได้ (Mohsin Raza และคณะ : 2563)

เทคโนโลยีที่สำคัญในยุคของอุตสาหกรรม 4.0 Digital Twin ได้ถูกพัฒนาควบคู่มาพร้อมกับการกำเนิดของแนวคิด IoT ซึ่งมีประสิทธิภาพของกระบวนการในการตรวจสอบของข้อมูลได้แบบเรียลไทม์ และยังสามารถที่จะป้องกันปัญหาที่คาดว่าจะเกิดขึ้น รวมถึงการวางแผนพัฒนาในอนาคต ซึ่งยังช่วยลดต้นทุนในการตรวจสอบระบบแบบดั้งเดิม (V.V. Makarov และคณะ, 2563) แนวคิดฝาแฝดดิจิทัลคือโมเดลเสมือนจริงของระบบทางกายภาพที่แสดงแบบจำลองแบบ 3 มิติ โดยนำไปใช้ประโยชน์การมองเห็นในภาพรวมของระบบ (Mathias Minos-Stensrud และคณะ, 2561) ส่วนของระบบการสื่อสารโดยพื้นฐานแล้วประกอบด้วยเครือข่ายของอุปกรณ์ไร้สาย เช่น เซอร์ และเกตเวย์เครือข่ายเซิร์ฟเวอร์ไร้สายรวมถึงการเก็บข้อมูลผ่านคลาวด์เซิร์ฟเวอร์อาศัยอินเทอร์เน็ตความเร็วสูงของการสื่อสารแบบเรียลไทม์ (Jeehyeong Kim และคณะ, 2562) เพื่อรองรับการปรับปรุงกระบวนการในอนาคตด้วยเทคโนโลยีฝาแฝดดิจิทัลรูปแบบของกระบวนการทำงานที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด จึงจำเป็นต้องมีการคาดการณ์ที่แม่นยำ การวิเคราะห์เชิงข้อมูลแบบเรียลไทม์ ซึ่งส่วนนี้เป็นจุดแข็งของโมเดลฝาแฝดดิจิทัลเพื่อที่จะปรับปรุงกระบวนการรวมถึงปริมาณงาน (Heqing Sun และคณะ, 2017)

งานวิจัยฉบับนี้ ผู้วิจัยจึงมีความสนใจ และความคิดที่จะพัฒนาให้กับอุตสาหกรรมในส่วนของ การถอดประกอบชิ้นงาน ในลักษณะที่เป็นการทำงานนอกสถานที่ที่มีสภาวะแวดล้อมซับซ้อนและอันตราย



ภาพที่ 1 ภาพรวมของระบบฝาแฝดดิจิทัล

ที่มา: <https://forum.universal-robots.com/t/select-pattern-of-pose-for-variable-position-on-movej/8313>

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อออกแบบและสร้างแบบจำลองเสมือนด้วยโปรแกรมยูนิตี้ของชุดทดลองถอดประกอบชิ้นงาน
2. เพื่อออกแบบและสร้างระบบเชื่อมต่อแบบไอโอทีในการเก็บข้อมูลทางกายภาพและข้อมูลจากอุปกรณ์ของชุดทดลองถอดประกอบชิ้นงาน
3. เพื่อพัฒนาระบบการวิเคราะห์การใช้พลังงานของหุ่นยนต์อุตสาหกรรมในการเคลื่อนที่ในท่าทางที่ใช้พลังงานน้อยที่สุด

กรอบแนวคิดการวิจัย

1. จลนศาสตร์ผกผัน (Inverse Kinematics)

หุ่นยนต์อุตสาหกรรมแบบ 6 แกน การเคลื่อนที่จากตำแหน่งปัจจุบัน ไปถึงตำแหน่งปลายทางที่ต้องการตามหลักการจลนศาสตร์ผกผัน หุ่นยนต์จะมีวิธีการเคลื่อนที่สูงสุดทั้งหมด 8 รูปแบบซึ่งจะมีความแตกต่างกันของตำแหน่งข้อต่อทั้ง 6 แกนของหุ่นยนต์ทางผู้วิจัยเล็งเห็นว่ารูปแบบทั้ง 8 แบบนั้นมีความต่างของการเคลื่อนที่ของข้อต่อและความแตกต่างนี้ส่งผลให้การใช้พลังงานขับเคลื่อนข้อต่อทั้งหมดที่ต่างกัน

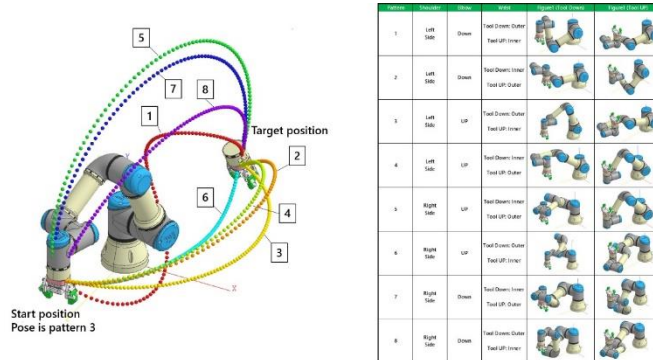


ภาพที่ 2 วิธีการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์อุตสาหกรรมทั้ง 8 รูปแบบ

ที่มา: <https://www2.deloitte.com/cn/en/pages/consumer-industrial-products/articles/industry-4-0-and-the-digital-twin.html>

1. จลนศาสตร์ผกผัน (Inverse Kinematics)

หุ่นยนต์อุตสาหกรรมแบบ 6 แกน การเคลื่อนที่จากตำแหน่งปัจจุบัน ไปถึงตำแหน่งปลายทางที่ต้องการ ตามหลักการจลนศาสตร์ผกผัน หุ่นยนต์จะมีวิธีการเคลื่อนที่สูงสุดทั้งหมด 8 รูปแบบซึ่งจะมีความแตกต่างกันของ ตำแหน่งข้อต่อทั้ง 6 แกนของหุ่นยนต์ทางผู้วิจัยเล็งเห็นว่ารูปแบบทั้ง 8 แบบนั้นมีความต่างของการเคลื่อนที่ของ ข้อต่อและความต่างนี้ส่งผลให้การใช้พลังงานขับเคลื่อนข้อต่อทั้งหมดที่ต่างกัน



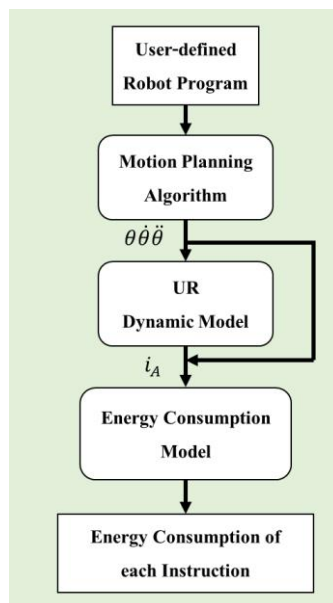
ภาพที่ 2 วิธีการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์อุตสาหกรรมทั้ง 8 รูปแบบ

ที่มา: <https://www2.deloitte.com/cn/en/pages/consumer-industrial-products/articles/industry-4-0-and-the-digital-twin.html>

2. แนวคิดระบบการวิเคราะห์การใช้พลังงานของหุ่นยนต์อุตสาหกรรม

หุ่นยนต์อุตสาหกรรมเป็นระบบแมคคาทรอนิกส์ที่ประกอบไปด้วยวิศวกรรมเครื่องกล ไฟฟ้าและระบบย่อยของซอฟต์แวร์ วิธีการวิเคราะห์การใช้พลังงานแสดงดังรูปภาพที่ 3

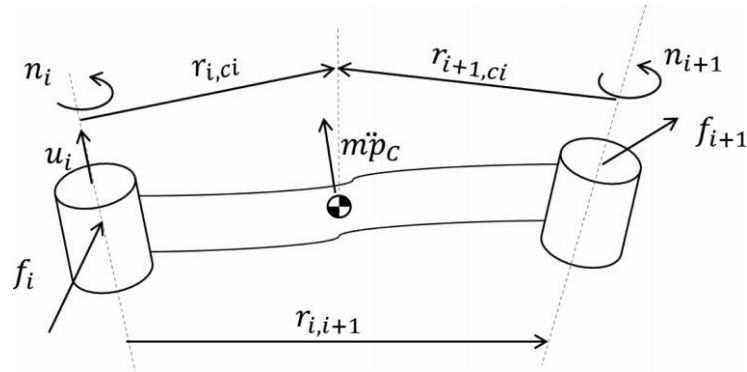
ผู้ใช้งานกำหนดรูปแบบตำแหน่งเป้าหมายการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ในตำแหน่งที่ต้องการ User-define Robot Program



ภาพที่ 3 ภาพรวมวิธีการสำหรับการวิเคราะห์การใช้พลังงานของหุ่นยนต์อุตสาหกรรม

ส่วนของ Motion Planning Algorithm ทำหน้าที่สร้างวิถีการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์อุตสาหกรรมตามตำแหน่งที่ผู้ใช้งานต้องการเคลื่อนที่ไปทั้ง 8 รูปแบบการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ โดยเครื่องมือการสร้างวิถีการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ผู้วิจัยได้ใช้เครื่อง Trajectory Generation ในโปรแกรม MATLAB

ส่วนของ UR Dynamic Model การประมาณการใช้งานกระแสไฟฟ้าของแต่ละข้อต่อของหุ่นยนต์อุตสาหกรรมโดยวิธีนิวตันออยเลอร์ กระแสของมอเตอร์แต่ละตัวขึ้นอยู่กับโครงสร้างของหุ่นยนต์ (ความยาวและน้ำหนักของความยาวข้อต่อ) ลักษณะการรับภาระแขน และวิถีการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์

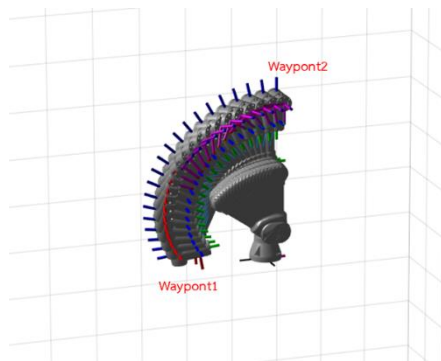


ภาพที่ 4 ชื่อและสัญลักษณ์ของข้อต่อแขนหุ่นยนต์

ส่วนของ Energy Consumption Model วิเคราะห์ประมาณการใช้พลังงานของแขนหุ่นยนต์ โดยใช้ค่ากระแสของมอเตอร์แต่ละข้อต่อ ความเร็วเชิงมุมของข้อต่อ รวมถึงพลังงานในส่วนของวงจรถอนิกส์ ทั้งในส่วนของชุดควบคุมหลักของหุ่นยนต์ ชุดวงจรถับเคลื่อนมอเตอร์แต่ละข้อต่อ

วิธีดำเนินการวิจัย

- เก็บข้อมูลจากทดลองจะแบ่งเป็น 2 ชุด ข้อมูลชุดที่ 1 จะเป็นข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์หากระแสของข้อต่อหุ่นยนต์อุตสาหกรรม 6 แกน เป็นตัวแปร $(q_1 \dots q_6)$, $(\dot{q}_1 \dots \dot{q}_6)$, $(\ddot{q}_1 \dots \ddot{q}_6)$, $(i_1 \dots i_6)$ ข้อมูลชุดที่ 2 จะเป็นข้อมูลสำหรับการวิเคราะห์หาการใช้พลังงานของหุ่นยนต์อุตสาหกรรม 6 แกน เป็นตัวแปร i_{robot} , v_{robot} โดยข้อมูลทั้งหมดจะถูกบันทึกขณะหุ่นยนต์ทำงานเคลื่อนที่จากจุดที่ 1 ไปจุดที่ 2 แล้วความถี่การเก็บข้อมูลอยู่ที่ 100 เฮิร์ตซ์



ภาพที่ 5 วิถีการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์อุตสาหกรรม



2. การสร้างโมเดลการวิเคราะห์จะมีอยู่ 2 ส่วนที่ใช้ร่วมกันในการทดลองคือ

2.1 โมเดลพลวัตผกผัน (Inverse Dynamic Model) เป็นโมเดลที่ใช้ในการคำนวณย้อนกลับค่าแรงบิดที่กระทำต่อข้อต่อของหุ่นยนต์ทั้ง 6 ข้อต่อซึ่งจะใช้ชุดข้อมูลชุดที่ 1 ในการหาโดยมีสมการตั้งต้นของโมเดลดังนี้ $\tau = M(\theta)\ddot{\theta} + C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + g(\theta)$ และทำการคำนวณหาค่ากระแสกระชากที่เกิดขึ้นที่ข้อต่อของหุ่นยนต์ทั้ง 6 ข้อต่อ โดยมีสมการตั้งต้น $i_i = \frac{1}{k_m}(n_i \cdot u_i + k_{vi}\theta_i + k_{si} \text{sgn}(\dot{\theta}_i))$ โดยใช้โปรแกรม MATLAB ในการทำการคำนวณ

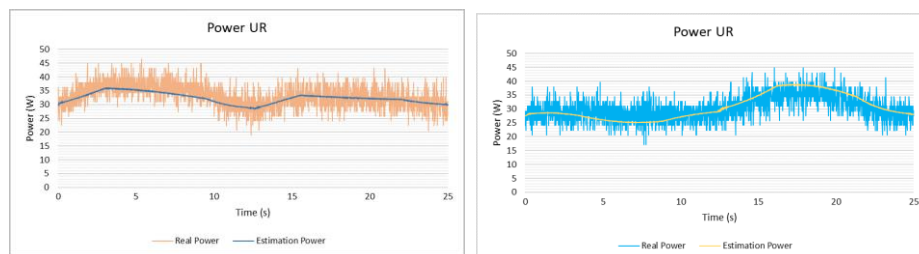
ตารางที่ 1 ชุดข้อมูลฝึกกับชุดข้อมูลทดสอบ RMSE ของพลวัตผกผัน

Joint (RMSE)	i_{train} [A]	RMSE%	i_{test} [A]	RMSE%
Base	0.11	0.22%	0.164	0.22%
Shoulder	0.129	0.073%	0.171	0.08%
Elbow	0.201	0.164%	0.241	0.237%
Wrist1	0.0693	0.125%	0.0917	0.139%
Wrist2	0.0584	0.163%	0.0583	0.158%
Wrist3	0.197	0.3%	0.215	0.3%

2.2 โมเดลการใช้พลังงาน (Energy Consumption Model) เป็นโมเดลที่ใช้ในการคำนวณหาค่าพลังงานที่ใช้ของหุ่นยนต์โดยมีสมการในการตั้งต้น $P_{UR} = P_c + \sum_{i=1}^6 \left(L_i i_i \frac{di_i}{dt} + R_i i_i^2 + k_{vi} \dot{i}_i + k_{MDi} |i_i| \right)$ โดยใช้โปรแกรม MATLAB ในการทำการคำนวณ

ตารางที่ 2 ชุดข้อมูลฝึกกับชุดข้อมูลทดสอบ RMSE ของการประมาณค่าการใช้พลังงาน

RMSE	Training Dataset P_{UR} [W]	RMSE%	Test Dataset P_{UR} [W]	RMSE%
Robot	3.408	0.1233%	3.7167	0.1348%

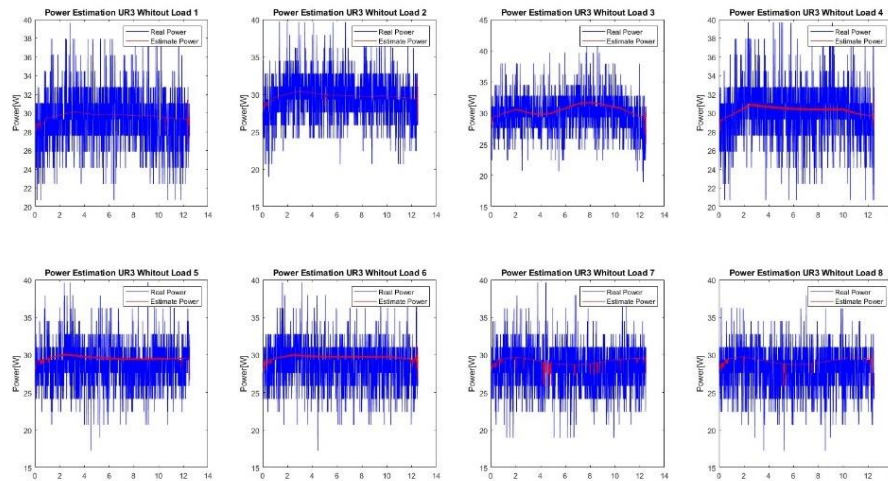


ภาพที่ 6 (ซ้าย) กราฟการใช้พลังงานของชุดข้อมูลฝึก (ขวา) กราฟการใช้พลังงานของชุดข้อมูลทดสอบ

สรุปผลการวิจัย

การวิจัยนี้จะเก็บผลการพยากรณ์การใช้พลังงานของท่าทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์อุตสาหกรรมทั้ง 8 รูปแบบ ว่ารูปแบบใดใช้พลังงานน้อยที่สุดเทียบกับชุดข้อมูลจริง ใช้ตำแหน่งการทดสอบทั้งหมด 5 ตำแหน่ง โดยมีผลการทดลองดังต่อไปนี้

ผลการทดลองในตำแหน่งที่ 1 จุดเริ่มต้นที่ตำแหน่ง Joint = [0 -90 0 -90 0 0] ตำแหน่งปลายทางในพิกัด XYZ = [0.3, -0.3 0.3], RX,RY,RZ = [PI/2, 0, 0]



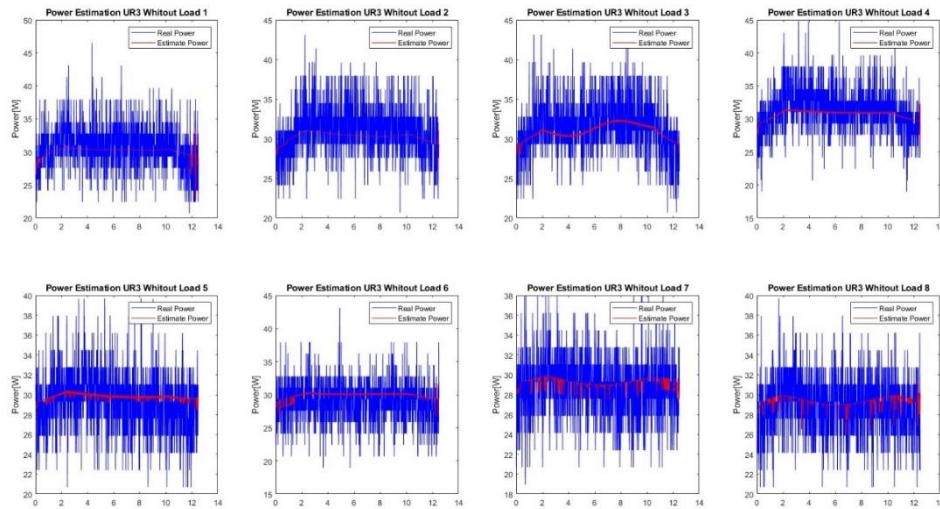
ภาพที่ 7 กราฟแสดงผลการใช้พลังงานระหว่างข้อมูลจริงกับข้อมูลที่ทำการประมาณการตำแหน่งที่ 1

ตารางที่ 3 การใช้พลังของหุ่นยนต์อุตสาหกรรมตำแหน่งที่ 1

EC Model	Real [W]	Estimation [W]	%Error
Instruction 1	29.3679	29.6703	1.0297%
Instruction 2	29.6513	29.783	0.4442%
Instruction 3	29.9747	30.4628	1.6284%
Instruction 4	30.1105	30.2839	0.5759%
Instruction 5	28.7069	29.5592	2.969%
Instruction 6	28.6854	29.6778	3.4596%
Instruction 7	28.3321	29.1262	2.8028%
Instruction 8	28.1239	29.1792	3.7523%



ตำแหน่งที่ 1 ค่าเฉลี่ยการใช้พลังงานน้อยที่สุดของข้อมูลจริงอยู่ในท่าทางที่ 8 โดยมีค่าเฉลี่ยพลังงานที่ใช้อยู่ที่ 28.1239 W และค่าเฉลี่ยการใช้พลังงานน้อยที่สุดของข้อมูลที่ทำการพยากรณ์อยู่ในท่าทางที่ 7 อยู่ที่ 29.1792 W ผลการทดลองในตำแหน่งที่ 2 จุดเริ่มต้นที่ตำแหน่ง Joint = [0 -90 0 -90 0 0] ตำแหน่งปลายทางในพิกัด X,Y,Z = [0.25 , 0.25 0.35] , RX,RY,RZ = [$\pi/2$, 0 , $\pi/2$]

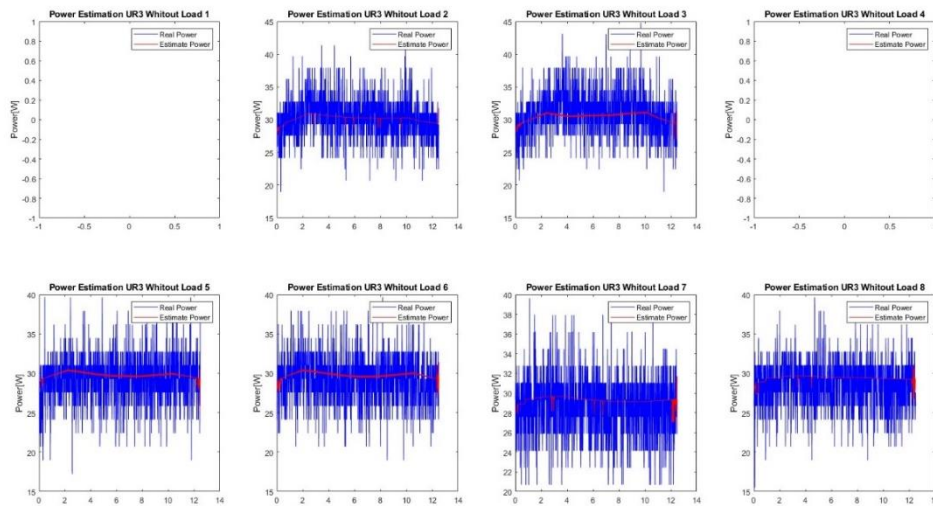


ภาพที่ 8 กราฟแสดงผลการใช้พลังงานระหว่างข้อมูลจริงกับข้อมูลที่ทำการประมาณการตำแหน่งที่ 2

ตารางที่ 4 การใช้พลังของหุ่นยนต์อุตสาหกรรมตำแหน่งที่ 2

EC Model	Real [W]	Estimation [W]	%Error
Instruction 1	30.8448	30.1111	2.3787%
Instruction 2	31.1067	30.2384	2.7914%
Instruction 3	31.5252	30.8957	1.9968%
Instruction 4	31.435	30.6501	2.497%
Instruction 5	29.3837	29.7059	1.0965%
Instruction 6	29.0471	29.8083	2.6205%
Instruction 7	28.9303	29.1808	0.8659%
Instruction 8	28.9566	29.3293	1.2871%

ตำแหน่งที่ 2 ค่าเฉลี่ยการใช้พลังงานน้อยที่สุดของข้อมูลจริงอยู่ในท่าทางที่ 7 โดยมีค่าเฉลี่ยพลังงานที่ใช้อยู่ที่ 28.9303 W และค่าเฉลี่ยการใช้พลังงานน้อยที่สุดของข้อมูลที่ทำการพยากรณ์อยู่ในท่าทางที่ 7 อยู่ที่ 29.1808 W ผลการทดลองในตำแหน่งที่ 3 จุดเริ่มต้นที่ตำแหน่ง Joint = [0 -90 0 -90 0 0] ตำแหน่งปลายทางในพิกัด X,Y,Z = [0.3 , 0.1 0.35] , RX,RY,RZ = [-PI/2 , 0 , -PI]



ภาพที่ 9 กราฟแสดงผลการใช้พลังงานระหว่างข้อมูลจริงกับข้อมูลที่ทำการประมาณการตำแหน่งที่ 3

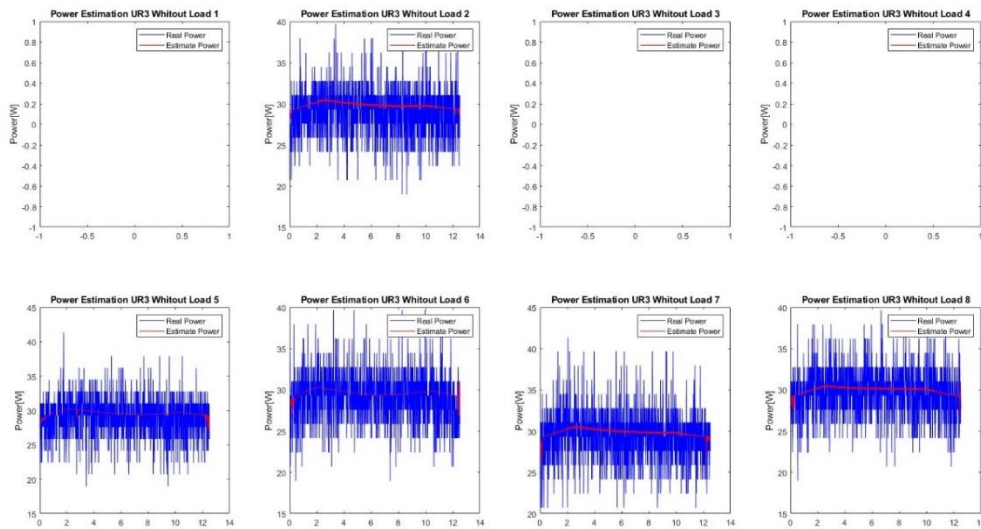
ตารางที่ 5 การใช้พลังของหุ่นยนต์อุตสาหกรรมตำแหน่งที่ 3

EC Model	Real [W]	Estimation [W]	%Error
Instruction 1	-	-	-
Instruction 2	30.3191	30.1704	0.4904%
Instruction 3	30.9681	30.4781	1.5823%
Instruction 4	-	-	-
Instruction 5	29.3645	29.7799	1.4146%
Instruction 6	29.2821	29.7762	1.6874%
Instruction 7	28.6745	29.2828	2.1214%
Instruction 8	28.6796	29.391	2.4805%

* ในส่วนของตารางที่ไม่มีข้อมูลแสดงคือท่าทางที่มีการทับซ้อนของแขนหุ่นยนต์



ตำแหน่งที่ 3 ค่าเฉลี่ยการใช้พลังงานน้อยที่สุดของข้อมูลจริงอยู่ในท่าทางที่ 7 โดยมีค่าเฉลี่ยพลังงานที่ใช้อยู่ที่ 28.6745 W และค่าเฉลี่ยการใช้พลังงานน้อยที่สุดของข้อมูลที่ทำการพยากรณ์อยู่ในท่าทางที่ 7 อยู่ที่ 29.2828 W ผลการทดลองในตำแหน่งที่ 4 จุดเริ่มต้นที่ตำแหน่ง Joint = [0 -90 0 -90 0 0] ตำแหน่งปลายทางในพิกัด X,Y,Z = [-0.2 , -0.2 , 0.35] , RX,RY,RZ = [$\pi/2$, 0 , π]



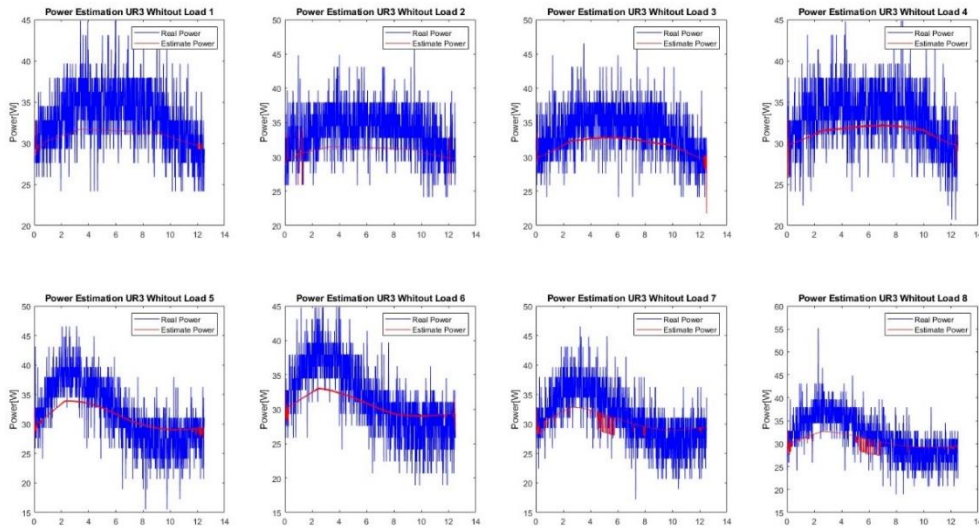
ภาพที่ 10 กราฟแสดงผลการใช้พลังงานระหว่างข้อมูลจริงกับข้อมูลที่ทำการประมาณการตำแหน่งที่ 4

ตารางที่ 5 การใช้พลังของหุ่นยนต์อุตสาหกรรมตำแหน่งที่ 4

EC Model	Real [W]	Estimation [W]	
Instruction 1	-	-	-
Instruction 2	29.0437	29.804	2.6178
Instruction 3	-	-	-
Instruction 4	-	-	-
Instruction 5	29.0802	29.6085	1.8167%
Instruction 6	29.2303	29.6236	1.3455%
Instruction 7	29.4906	29.8555	1.2373%
Instruction 8	29.7823	29.9781	0.6574%

* ในส่วนของตารางที่ไม่มีข้อมูลแสดงคือท่าทางที่มีการทับซ้อนของแขนหุ่นยนต์

ตำแหน่งที่ 4 ค่าเฉลี่ยการใช้พลังงานน้อยที่สุดของข้อมูลจริงอยู่ในท่าทางที่ 2 โดยมีค่าเฉลี่ยพลังงานที่ใช้อยู่ที่ 29.2236 W และค่าเฉลี่ยการใช้พลังงานน้อยที่สุดของข้อมูลที่ทำการพยากรณ์อยู่ในท่าทางที่ 5 อยู่ที่ 29.2828 W ผลการทดลองในตำแหน่งที่ 5 จุดเริ่มต้นที่ตำแหน่ง Joint = [0 0 0 0 0] ตำแหน่งปลายทางในพิกัด X,Y,Z = [0.3 , -0.3 0.3] , RX,RY,RZ = [PI/2 , 0 , 0]



ภาพที่ 11 กราฟแสดงผลการใช้พลังงานระหว่างข้อมูลจริงกับข้อมูลที่ทำการประมาณการตำแหน่งที่ 5

ตารางที่ 5 การใช้พลังของหุ่นยนต์อุตสาหกรรมตำแหน่งที่ 5

EC Model	Real [W]	Estimation [W]	%Error
Instruction 1	33.1461	30.9361	6.6674%
Instruction 2	33.7463	30.8854	8.4777%
Instruction 3	33.8661	31.7352	6.2921%
Instruction 4	33.1532	31.3377	5.4761%
Instruction 5	31.8412	31.0596	2.4547%
Instruction 6	31.7579	30.5752	3.7241%
Instruction 7	31.4045	30.2453	3.6912%
Instruction 8	31.7818	30.2717	4.7515%



ตำแหน่งที่ 5 ค่าเฉลี่ยการใช้พลังงานน้อยที่สุดของข้อมูลจริงอยู่ในท่าทางที่ 7 โดยมีค่าเฉลี่ยพลังงานที่ใช้อยู่ที่ 31.4045 W และค่าเฉลี่ยการใช้พลังงานน้อยที่สุดของข้อมูลที่ทำการพยากรณ์อยู่ในท่าทางที่ 7 อยู่ที่ 30.2453 W

อภิปรายผลการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้จัดทำขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาระบบฝาแฝดดิจิทัลของชุดทดลองถอดประกอบชิ้นงานและการวิเคราะห์การใช้พลังงานของหุ่นยนต์อุตสาหกรรม โดยงานวิจัยนี้จะใช้หุ่นยนต์อุตสาหกรรมแบบ 6 แกน เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

จากผลการทำการทดลองวิเคราะห์ประมาณการใช้พลังงานของหุ่นยนต์อุตสาหกรรม ทั้งหมด 5 ตำแหน่ง พบว่าโมเดลการวิเคราะห์การใช้พลังงานสามารถพยากรณ์การใช้พลังงานน้อยที่สุดถูกต้อง 3 ตำแหน่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ความแม่นยำที่ 60% โดยมีค่าความผิดพลาดของการพยากรณ์ค่าพลังงานงานที่ใช้มากที่สุดอยู่ที่ ตำแหน่งที่ 5 ท่าทางที่ 2 ที่ -2.8609W และน้อยที่สุดอยู่ที่ตำแหน่งที่ 1 ท่าทางที่ 2 ที่ 0.1317W

การหาค่าความแม่นยำร้อยละ

$$\%Accuracy = \frac{x}{n} \times 100$$

โดยที่ x คือจำนวนครั้งที่พยากรณ์ถูกต้อง และ n คือจำนวนครั้งที่ทำการทดลอง โดยมีวิธีการคำนวณดังนี้

$$x = 3 ; n = 5$$

$$\%Accuracy = \frac{3}{5} \times 100$$

$$\%Accuracy = 60\%$$

ข้อเสนอแนะ

1. พัฒนาโมเดลการคาดการณ์การใช้พลังงาน (Energy Consumption Model) ให้สามารถเรียนรู้ข้อมูลเพื่อนำไปพยากรณ์กับหุ่นยนต์อุตสาหกรรมในรูปแบบอื่น ๆ
2. ปรับแก้ไขค่าพารามิเตอร์ของมอเตอร์เชื่อมต่อหุ่นยนต์อุตสาหกรรมให้มีค่าใกล้เคียงมากยิ่งขึ้น หรือใช้ค่าจริงจากผู้ผลิตเพื่อให้โมเดลมีความแม่นยำมากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- Juan Heredia, Christian Schlette, and Mikkel Baun Kjærgaard (2021). Data-Driven Energy Estimation of Individual Instructions in User-Defined Robot Programs for Collaborative Robots. *IEEE ROBOTICS AND AUTOMATION LETTERS*, VOL. 6, NO. 4, OCTOBER 2021.
- Paolo Boscariol, Roberto Caracciolo, Dario Richiedei, and Alberto Trevisani (2020). *Energy Optimization of Functionally Redundant Robots through Motion Design*. Applied Sciences April 2020.
- Rajul Kumar (2021). *Inverse Dynamics Analysis of 6-dof Robotic Manipulator (UR5) by Forward & Backward Recursion*. Delhi Technological University January 2021.

- Parham M. Kebria, Saba Al-wais, Hamid Abdi, and Saeid Nahavandi (2016). *Kinematic and Dynamic Modelling of UR5 Manipulator*. 2016 IEEE International Conference on System, Man, and Cybernetics SMC 2016 October 9-12, 2016 Budapest, Hungary.
- Assawaarayakul, C., Srisawat, W., Darakorn Na Ayuthaya, S., and Wattanasirichaigoon, S. Integrate (2019). *Digital Twin to Exist Production System for Industry 4.0*. 2019 4th Technology Innovation Management and Engineering Science International Conference (TIMES-iCON) (11-13 Dec 2019).
- Raza, M., Kumar, P.M., Hung, D.V., Davis, W., Nguyen, H., and Trestian, R (2020). *A Digital Twin Framework for Industry 4.0 Enabling Next-Gen Manufacturing*. 2020 9th International Conference on Industrial Technology and Management. 73 – 77 (11-13 Feb 2020).
- Makarov, V.V., Frolov, Ye.B., Parshina, I.S., and Ushakova, M.V (2019). *The Design Concept of Digital Twin*. 2019 Twelfth International Conference "Management of large-scale system development" (MLSD) (1-3 Oct 2019).
- Minos-Stensrud, M., Haakstad, O.H., Sakseid, O., Westby, B., and Alcocer A (2018). *Towards Automated 3D reconstruction in SME factories and Digital Twin Model generation*. 2018 18th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2018) 1777-1781 (17-20 Oct 2018).

