

การใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมในการปรับระบบควบคุมของหุ่นยนต์ ช่วยเหลือการเดิน

Using Genetic Algorithm for Tuning the Control System of Exoskeleton Robot

ศิวกร ปันกระจำง ยูทธานา ปิติธรรภาพ* มนัส สังวรศิลป์ และ พิชิตพล โชติกุลนันท์

สาขาวิชาวิศวกรรมชีวการแพทย์
วิทยาลัยวิศวกรรมชีวการแพทย์
มหาวิทยาลัยรังสิต
* ผู้รับผิดชอบบทความ
yutthana.p@rsu.ac.th

Received: 30 May 2024

Revised: 10 Jul 2024

Accepted: 16 Jul 2024

บทคัดย่อ

เนื่องด้วยจำนวนผู้ป่วยที่มีความบกพร่องทางการเคลื่อนไหวมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นทุกปี ชุดโครงหุ่นยนต์สำหรับรองรับรับน้ำหนักข้อเท้าได้รับความสนใจมากขึ้น เพื่อให้หุ่นยนต์ช่วยเหลือในการเดินสามารถทำการเดินได้อย่างเหมาะสม ระบบควบคุมการเดินของหุ่นยนต์ต้องสามารถควบคุมให้ข้อต่อต่าง ๆ เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งของขาระหว่างการเดินได้ โดยระบบควบคุมแบบ PID เป็นระบบควบคุมที่นิยมใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เนื่องจากความน่าเชื่อถือและความเรียบง่ายในการใช้งาน ประสิทธิภาพในการทำงานของระบบควบคุมแบบ PID นั้นขึ้นอยู่กับค่าการปรับค่าของระบบควบคุม การปรับอัตราขยายในระบบควบคุมในหุ่นยนต์ที่มีความซับซ้อนด้วยวิธีการทั่วไปนั้นมีความยุ่งยากและขาดความแม่นยำ จึงมีการใช้ขั้นตอนวิธีเข้ามาช่วยเหลือในการปรับค่าของระบบควบคุม PID ในงานวิจัยนี้ ทำการใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm) ในการปรับค่าของระบบควบคุม PID สำหรับควบคุมการเดินของชุดโครงหุ่นยนต์สำหรับช่วยเหลือการเดิน โดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหุ่นยนต์ช่วยเหลือการเดินที่ได้จากระบบเพนดูลัมในการจำลองการทำงานของหุ่นยนต์ การปรับอัตราขยายของระบบควบคุม PID นั้นใช้การปรับค่าด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมเพื่อลดค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้น การทำงานของหุ่นยนต์ถูกจำลองโดยใช้ MATLAB Simulink เพื่อทดสอบการทำงานและเปรียบเทียบกับระบบควบคุมที่ปรับค่าโดยใช้วิธีการของ Ziegler-Nichols ผลการทดสอบด้วย MATLAB Simulink พบว่า เมื่อเปรียบเทียบกับระบบควบคุมที่ใช้การปรับค่าด้วยวิธีการของ Ziegler-Nichols ในการปรับค่านั้น การใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมในการปรับค่าให้ระบบควบคุมที่มีช่วงเวลาเข้าที่ที่ต่ำกว่า (1.46 และ 3.56 วินาทีในส่วนต้นขา และ 1.60 และ 3.68 วินาทีในส่วนปลายขา) และส่วนพ่วงเกินที่ต่ำกว่าในส่วนปลายขา (0.67 และ 22.21 องศาในส่วนปลายขา) สอดคล้องกับผลการทดสอบกับแบบจำลองหุ่นยนต์ซึ่งพบว่าให้อินทิกรัลของเวลาและความผิดพลาดสมบูรณ์ที่น้อยกว่า (124.1 และ 125.9 ในส่วนต้นขา และ 105.0 และ 106.2 ในส่วนปลายขา)

คำสำคัญ: หุ่นยนต์ช่วยเหลือเดิน ระบบควบคุม PID ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

Abstract

The increase in lower-limb impaired patients prompt the increased interests in lower extremities exoskeleton. To allow these exoskeletons to assist in walking, the control system need to be able to move both hip and knee joint to their position during walking. Due to its ease of use and reliability, PID controller has been use in many robots. The performance of a PID controller is highly dependent on adjusting the gain value of the three controllers within PID controller, and

the more commonly use method of PID tuning became more difficult and lack precision in a more complex robot. Thus, algorithm-based tuning, such as Genetic Algorithm, has been studied to assist in PID tuning. In this research, we proposed using Genetic Algorithm for tuning the PID controller of a lower limb exoskeleton. The mathematical model of each link of the exoskeleton, calculated from a pendulum model, are used to simulate the close-loop control system of the exoskeleton. Genetic Algorithm is used to tune the PID controller. The optimized control system is simulated with MATLAB Simulink, the result of which is compared to a PID controller tuned by Ziegler-Nichols method. The result from MATLAB Simulink simulation shows that, when compared to control system tuned by Ziegler-Nichols method, a control system tuned by Genetic Algorithm has lower settling time (1.46 and 3.56 seconds for upper leg, and 1.60 and 3.68 seconds for lower leg) and less overshoot (0.67 and 22.21 degree in lower legs), which corresponded with experiment with replica of exoskeleton, which indicated that control system tuned with Genetic Algorithm has less integral time-absolute error (124.1 and 125.9 for upper leg, and 105.0 and 106.2 for lower leg).

Keywords: Exoskeleton, Proportional-Integral-Derivation, Genetic Algorithm

1. บทนำ

ชุดโครงหุ่นยนต์สำหรับรองรับรับร่างกายท่อนล่าง (Lower Extremities Exoskeleton) กล่าวถึงหุ่นยนต์ที่ผู้ใช้สามารถสวมเข้ากับร่างกายของผู้ใช้ เพื่อช่วยในการเคลื่อนไหวของร่างกาย [1] ในช่วงหลายสิบปีที่ผ่านมา มีการพัฒนาชุดโครงหุ่นยนต์สำหรับร่างกายท่อนล่างจำนวนมาก โดยสามารถแบ่งออกตามการใช้งานได้เป็นสามกลุ่ม ได้แก่ หุ่นยนต์สำหรับช่วยเหลือในการใช้แรงงาน หุ่นยนต์สำหรับ

การช่วยเหลือการเดินทางสำหรับผู้พิการหรือผู้ที่มีความบกพร่องในการเดิน และหุ่นยนต์สำหรับช่วยเหลือในการทำกายภาพบำบัดร่างกายท่อนล่าง [2] ดังแสดงในรูปที่ 1 เพื่อการรองรับปริมาณผู้ป่วยที่มีอาการบกพร่องทางการเดินที่เพิ่มขึ้นในปัจจุบัน จึงมีการพัฒนาชุดโครงหุ่นยนต์สำหรับช่วยเหลือในการฟื้นฟูการเดินหรือการออกกำลังกายบำบัดเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 1 ตัวอย่าง Lower Limb Exoskeleton ที่มีการพัฒนา (ก) BLEEX [2] (ข) ReWalk [2] (ค) Lokomat [2]

หนึ่งในวิธีการควบคุมการเดินที่นิยมใช้ในหุ่นยนต์ช่วยเดิน คือการควบคุมด้วยการจัดเส้นทางเคลื่อนที่ (Trajectory-based control strategy) ซึ่งกล่าวถึงระบบควบคุมที่มีการกำหนดลักษณะการเคลื่อนที่ผ่านชุดข้อมูลของตำแหน่งหรือแรงของข้อต่อที่บันทึกไว้ในระบบควบคุมในการกำหนดมุมของข้อต่อของหุ่นยนต์เพื่อทำการเลียนแบบการเดินของมนุษย์ [3] เนื่องจากการเดินเป็นการเคลื่อนที่ที่มีการเคลื่อนไหวของขาที่มีลักษณะเฉพาะเพื่อทำการพุงและขับเคลื่อนร่างกายไปได้ [4] เพื่อให้หุ่นยนต์ช่วยเหลือในการเดินสามารถทำการเดินได้อย่างเหมาะสม ระบบควบคุมการเดินของหุ่นยนต์ต้องสามารถควบคุมให้ข้อต่อต่าง ๆ ของหุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งของขา ระหว่างการเดินได้ โดยระบบควบคุมแบบ PID เป็นระบบควบคุมที่นิยมใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ เนื่องจากความน่าเชื่อถือของระบบและความเรียบง่ายในการใช้งาน ระบบควบคุม PID ประกอบด้วยระบบควบคุม 3 ส่วนที่ทำงานร่วมกัน ได้แก่ ระบบควบคุมแบบสัดส่วน (Proportional control) ระบบควบคุมแบบบูรณาการรวมหน่วย (Integral control) และระบบควบคุมแบบอนุพันธ์ (Derivative control) [5] อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพในการทำงานของระบบควบคุมแบบ PID นั้นขึ้นอยู่กับ การปรับอัตราค่าการขยายของระบบควบคุมทั้ง 3 ส่วน โดยมี

วิธีการปรับอัตราการขยายระบบควบคุมหลายวิธี เช่น วิธีการปรับค่าด้วยวิธีการของ Ziegler-Nichols, วิธีการปรับค่าด้วยวิธีของ Chien-Hrones-Reswick, การใช้ Fuzzy method เป็นต้น วิธีการปรับค่าเหล่านี้ผู้ที่ทำการปรับค่าจำเป็นต้องมีความรู้เกี่ยวกับการทำงานของระบบควบคุม และอาศัยการปรับค่ากับระบบควบคุมและวัดการตอบสนองโดยตรงเพื่อคำนวณหาอัตราการขยายที่เหมาะสม ในการออกแบบระบบควบคุมของระบบที่มีความซับซ้อนเช่นหุ่นยนต์ช่วยเหลือการเดิน การปรับค่าด้วยวิธีการทั่วไปนั้นมีความยุ่งยากและขาดความแม่นยำ [6] จึงมีการศึกษาวิธีการปรับอัตราการขยายแบบอื่นที่ทำการปรับอัตราการขยายของระบบควบคุมโดยอัตโนมัติ โดยอาศัยการทำงานของขั้นตอนวิธีต่าง ๆ (Algorithm) มาใช้ช่วยในการปรับค่า โดยหนึ่งในขั้นตอนวิธีที่ได้รับความนิยมมากคือการใช้อนุกรมวิธีเชิงพันธุกรรม ซึ่งเป็นขั้นตอนวิธีที่อาศัยการเลียนแบบกระบวนการคัดเลือกทางธรรมชาติของวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิตในการทำการปรับอัตราการขยายของระบบควบคุม ซึ่งพบว่ามีประสิทธิภาพที่สูงขึ้นกว่าการปรับค่าของระบบควบคุม PID ด้วยวิธีการอื่น ๆ [7-8] ในงานวิจัยนี้ จึงมีความประสงค์ที่จะใช้ ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมในการปรับค่าของระบบควบคุม PID สำหรับควบคุมการเดินของชุดโครงหุ่นยนต์สำหรับช่วยเหลือการเดิน โดยในงานวิจัยนี้ จะทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของชุดโครงหุ่นยนต์ขึ้นมา โดยพิจารณาโครงสร้างของหุ่นยนต์ด้วยระบบเพนดูลัมที่ควบคุมการเคลื่อนที่ด้วยระบบควบคุมแบบ PID แล้วทำการจำลองการทำงานของระบบควบคุมโดยใช้โปรแกรม MATLAB Simulink โดยเปรียบเทียบการทำงานของระบบควบคุมระหว่างระบบควบคุมที่ใช้การปรับค่าด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมและระบบควบคุมที่ใช้การปรับค่าด้วยวิธีการของ Ziegler-Nichols

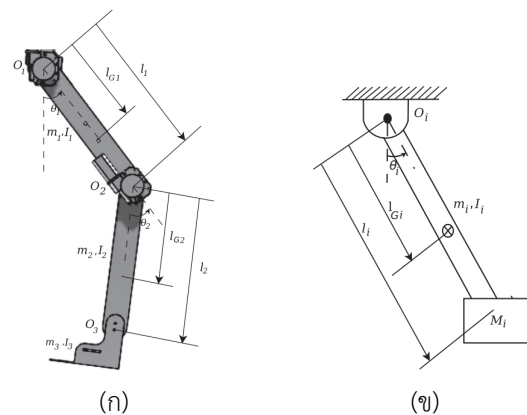
2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของขาชุดโครงหุ่นยนต์

ชุดโครงหุ่นยนต์ (Exoskeleton) กล่าวถึงหุ่นยนต์ที่ออกแบบให้มีการเคลื่อนไหวในลักษณะเดียวกับร่างกายของมนุษย์ [9] ชุดโครงหุ่นยนต์สำหรับการช่วยเหลือในการฟื้นฟูการเดินนั้น จะต้องคำนึงถึงคุณสมบัติหลายประการ เช่น หุ่นยนต์ต้องมี

ความสามารถในการออกแรงช่วยเหลือการเคลื่อนไหวสำหรับร่างกายท่อนล่าง และหุ่นยนต์นั้นต้องมีน้ำหนักที่และขนาดที่ไม่มากเกินไป เพื่อไม่ให้เกิดภาระต่อผู้สวมใส่จนเป็นอุปสรรคต่อการใช้งาน ทำให้โครงสร้างของชุดโครงหุ่นยนต์จำนวนมาก โดยเฉพาะหุ่นยนต์ที่ออกแบบให้สวมใส่เดินบนพื้นได้เสมือนจริงนั้น ถูกออกแบบมาให้ครอบคลุมการเคลื่อนไหวเพียง 3-4 Degree of Motion ต่อขาหนึ่งข้าง โดยนิยมควบคุมให้ข้อต่อส่วนเข่าและสะโพกเป็นข้อต่อที่มีการให้แรงเสริมเข้าไป (Active Joint) ในระนาบแบ่งซ้ายขวา (Sagittal plane) ในขณะที่ข้อต่อที่เท้าเป็นข้อต่อที่ไม่มีการให้แรงเพิ่ม (Passive Joint) เพื่อให้โครงสร้างไม่ซับซ้อนและน้ำหนักไม่มากเกินไป [3]

Amiri, Ramli, และ Ibrahim [10] ได้ทำการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหุ่นยนต์ชุดโครงหุ่นยนต์สำหรับช่วยเหลือการเดินโดยใช้ระบบเพนดูลัมในการคำนวณหาฟังก์ชันถ่ายโอนของขาของหุ่นยนต์แต่ละข้างสามารถแสดงอยู่ในรูปของ Free Body Diagram ได้ดังรูปที่ 2 (ก) ในส่วนต้นขาและปลายขาแต่ละท่อน สามารถแสดงออกมาในรูปแบบระบบเพนดูลัมได้ดังรูปที่ 2 (ข)



รูปที่ 2 (ก) Free Body Diagram ของขาแต่ละข้าง (ข) Pendulum model ของแต่ละส่วนของขา [5]

ฟังก์ชันถ่ายโอนของขาแต่ละส่วนสามารถแสดงเป็นสมการพหุนามกำลังสองได้ว่า

$$G_i(s) = \frac{\theta_i(s)}{\tau_i(s)} = \frac{1}{s^2 + \frac{b_i}{I_i}s + \frac{(M_i + m_i)gl_{Gi}}{I_i}} \quad (1)$$

เมื่อ θ_i แทนมุมของข้อขาที่กำลังพิจารณา τ_i แทนแรงบิดรอบข้อต่อ b_i แทนสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน m_i แทนมวลของ Link ก่อนที่กำลังพิจารณา M_i แทนมวลของ Link ที่อยู่ถัดจากข้อที่กำลังพิจารณา I_i แทนโมเมนต์ความเฉื่อยของ Link และ L_{Gi} แทนความยาวจากข้อต่อไปยังศูนย์กลางมวลของ link นั้น ๆ

2.2 ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมเป็นกระบวนการที่ใช้การเลียนแบบกระบวนการคัดเลือกทางธรรมชาติของสิ่งมีชีวิตในการหาทางออกของปัญหาที่กำหนด โดยกระบวนการทั้งหมดสามารถแบ่งออกเป็น 5 ส่วน ได้แก่

- การสร้างประชากรของข้อมูล หรือ “ยีน” การสร้างข้อมูลรุ่นแรกนี้ข้อมูลจะถูกสร้างโดยการสุ่ม
- การประเมินค่าความเหมาะสมของข้อมูล (Fitness) ระบบจะใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในการประเมินค่าความเหมาะสมของข้อมูลแต่ละตัวของชุดข้อมูลรุ่นแรกต่อปัญหาที่กำหนดไว้
- การคัดเลือกข้อมูลที่ให้คำตอบที่เหมาะสมต่อปัญหา โดยใช้ค่าความเหมาะสมของข้อมูลที่คำนวณในขั้นก่อนหน้าในการคัดเลือกประชากรสำหรับสร้างประชากรรุ่นต่อไป
- การสร้างข้อมูลสำหรับประชากรรุ่นต่อไป โดยใช้ข้อมูลจากขั้นตอนที่ 3 เพื่อใช้ในการสร้างข้อมูลรุ่นต่อไป ขั้นตอนนี้อาศัยกระบวนการไขว้เปลี่ยนและการกลายพันธุ์ในการเพิ่มความหลากหลายของข้อมูล
- ประเมินค่าความเหมาะสมของข้อมูลในประชากรรุ่นใหม่ ถ้าข้อมูลรุ่นนี้มีความเหมาะสมมากกว่าประชากรรุ่นแรก ข้อมูลรุ่นแรกจะถูกแทนที่ด้วยข้อมูลรุ่นใหม่

กระบวนการไขว้เปลี่ยน (Crossover) เป็นการเพิ่มความหลากหลายของข้อมูลโดยทำการแลกเปลี่ยนชิ้นส่วนของข้อมูลระหว่างข้อมูลรุ่นแรก 2 ข้อมูล ซึ่งจะให้ข้อมูลรุ่นต่อมาที่มีลักษณะผสมจากข้อมูลรุ่นแรกทั้งสองตัว หลังจากการเกิดการไขว้เปลี่ยนแล้วจะเกิดกระบวนการกลายพันธุ์ (Mutation) ต่อมา ซึ่งเป็นการเปลี่ยนบิตภายในข้อมูล เพื่อให้ได้ข้อมูลชิ้นใหม่ที่ต่างจากเดิม กระบวนการทั้งหมดนี้จะเกิดวนซ้ำไปเรื่อย ๆ ในแต่ละรอบ ข้อมูลของประชากรจะถูกคัดเลือกโดยการประเมินค่าความเหมาะสม ประชากรที่เหลืออยู่จะให้ค่าที่มีความเหมาะสมต่อ

ปัญหามากขึ้นเรื่อย ๆ จนกระทั่งสิ้นสุดการทำ ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมซึ่งอาจสิ้นสุดได้จากการวนรอบครบตามจำนวนรุ่นที่กำหนดไว้ หรือได้คำตอบที่มีความเหมาะสมต่อปัญหาที่มากถึงระดับที่ผู้ใช้กำหนด [6]

Suseno และ Ma'arif [7] ได้ทำงานวิจัยเกี่ยวกับการใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมในการปรับอัตราขยายของระบบควบคุม PID สำหรับควบคุมการทำงานของมอเตอร์ไฟฟ้า กระแสตรงผ่านบอร์ดพัฒนา Arduino Uno โดยสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของมอเตอร์ไฟฟ้า และสร้างระบบควบคุม PID ที่ปรับค่าของระบบควบคุมด้วยการใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม เปรียบเทียบกับการปรับค่าด้วยการลองผิดลองถูก แล้วทำการทดสอบทั้งจากการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์และจากการทดลองกับมอเตอร์ไฟฟ้า ได้ผลสรุปว่าการใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมนั้นให้ระบบควบคุมที่มีผลลัพธ์ดีกว่าการปรับค่าด้วยการลองผิดลองถูก

Elbayomy, Zongxia และ Huaqing [8] ได้ทำงานวิจัยเกี่ยวกับการใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมในการปรับค่าของระบบควบคุม PID สำหรับควบคุมการทำงานของ Electro-hydraulic servo actuation system (EHSAS) โดยใช้อัตราขยายเดิมของระบบควบคุม PID ที่ได้จากการลองผิดลองถูกมาใช้ในการกำหนดช่วงข้อมูลสำหรับการสร้างประชากรรุ่นแรกในการทำขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม และใช้การหาอนุพันธ์ของความผิดพลาดผสมเป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์แล้วทำการทดสอบผ่าน MATLAB Simulink และแบบจำลองระบบ EHSAS ผลการวิจัยพบว่า การใช้ ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม ในการปรับค่าของระบบควบคุมแบบ PID ทำให้ระบบควบคุมมีความแม่นยำสูงกว่าการใช้ PID แบบทั่วไป และสามารถนำผลลัพธ์จากการจำลองในคอมพิวเตอร์ไปใช้ในทางปฏิบัติได้

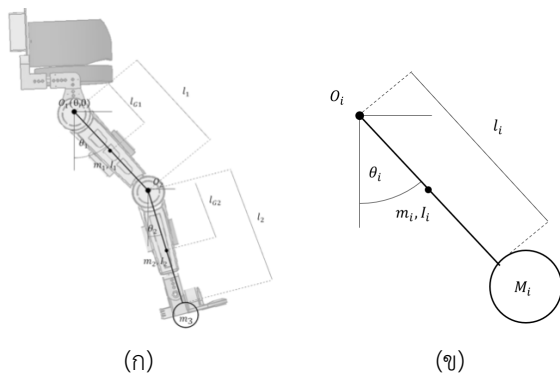
3. วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหุ่นยนต์ช่วยเหลือการเดินรูปที่ 3 แสดงภาพของหุ่นยนต์ช่วยเหลือการเดินที่ออกแบบโดยใช้ CATIA V5R21 ที่นำมาใช้เป็นต้นแบบของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของหุ่นยนต์ช่วยเหลือการเดิน โดยเป็นชุดโครงหุ่นยนต์ที่ออกแบบใช้งานบนพื้นราบที่มี 4 Degree of freedom

ควบคุมการเคลื่อนไหวที่ข้อสะโพกและข้อเข่าในแนวระนาบแบ่งซ้ายขวา ขาแต่ละข้างออกแบบให้มีข้อต่อ 2 ข้อ ที่สะโพกและข้อเข่า ขาของหุ่นยนต์แต่ละข้างสามารถแสดงอยู่ในรูปของ Free Body Diagram ได้ดังรูปที่ 4 (ก) โดยที่จุด O_1 และ O_2 แทนตำแหน่งข้อสะโพกและข้อเข่าตามลำดับ l_1 และ l_2 แทนความยาวของต้นขาและปลายขาตามลำดับ และ l_{G1} และ l_{G2} แทนระยะทางของต้นขาและปลายขาหาระหว่างข้อต่อและจุดศูนย์กลางมวล ตามลำดับ ในส่วนต้นขาและปลายขาแต่ละท่อน สามารถแสดงออกมาในรูปแบบระบบเพนดูลัมได้ดังรูปที่ 4 (ข)



รูปที่ 3 ชุดโครงหุ่นยนต์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้



รูปที่ 4 ก) Free Body Diagram ของขาแต่ละข้าง ข) Pendulum model ของแต่ละส่วนของขา

ผู้จัดทำได้ใช้โปรแกรม CATIA V5R21 ในการวัดขนาดและคำนวณมวลและโมเมนต์ความเฉื่อยของขาแต่ละท่อน โดยได้ค่าดังแสดงในตารางที่ 1

จากสมการที่ (1) และข้อมูลจากตารางที่ 1 สามารถสร้าง

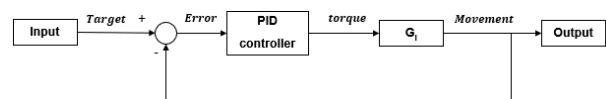
ฟังก์ชันถ่ายโอนสำหรับส่วนต้นขา (G_1) และปลายขา (G_2) ของขาของหุ่นยนต์ช่วยเดินได้ว่า

$$G_1(s) = \frac{\theta_1(s)}{\tau_1(s)} = \frac{1}{s^2 + 7.55s + 677.48} \quad (2)$$

$$G_2(s) = \frac{\theta_2(s)}{\tau_2(s)} = \frac{1}{s^2 + 22.22s + 414.10} \quad (3)$$

ตารางที่ 1 ข้อมูลของขาหุ่นยนต์แต่ละส่วน

	ท่อนขา		
	ต้นขา	ปลายขา	เท้า
มวล (kg)	2.263	1.468	0.750
ความยาว (m)	0.412	0.512	0.100
โมเมนต์ความเฉื่อย (kgm^2)	0.053	0.0018	0.004



รูปที่ 5 ระบบควบคุมการเดินของหุ่นยนต์ช่วยเหลือการเดิน

3.2 ระบบควบคุมการเดินของหุ่นยนต์

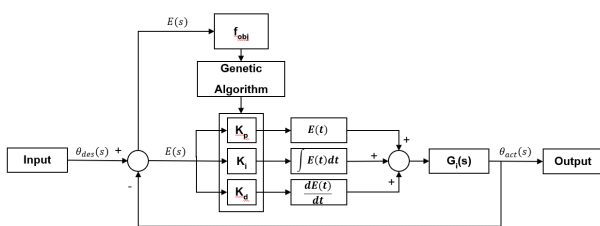
รูปที่ 5 แสดงแผนผังของระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ช่วยเหลือการเดิน ซึ่งเป็นระบบควบคุมแบบ PID ระบบปิด โดยสัญญาณเข้าของระบบคือมุมของข้อต่อที่ระบบต้องการ และสัญญาณออกคือมุมของข้อต่อในขณะนั้น โดยสัญญาณเข้าของระบบควบคุม PID เป็นผลต่างระหว่างมุมของข้อต่อในรูปที่ 5 แสดงแผนผังของระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ช่วยเหลือการเดิน ซึ่งเป็นระบบควบคุมแบบ PID ระบบปิด โดยสัญญาณเข้าของระบบคือมุมของข้อต่อที่ระบบต้องการ และสัญญาณออกคือมุมของข้อต่อในขณะนั้น โดยสัญญาณเข้าของระบบควบคุม PID เป็นผลต่างระหว่างมุมของข้อต่อในขณะนั้นและมุมของข้อต่อที่ระบบต้องการ ซึ่งระบบควบคุม PID จะให้สัญญาณออกมาเป็นแรงบิดให้มอเตอร์กระทำต่อข้อต่อนั้น ๆ

3.3 การปรับอัตราขยายของระบบควบคุมด้วย Genetic Algorithm

การปรับอัตราขยายของระบบควบคุม PID จะใช้การหาค่าขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมในการหาอัตราขยายของระบบควบคุมทั้ง 3 ค่าที่เหมาะสม โดยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (f_{obj}) ในการหาค่าขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมนี้ คือการปรับความผิดพลาดของระบบควบคุม PID ให้มีค่าที่น้อยที่สุด โดยจะใช้วิธีการประเมินความผิดพลาดด้วยการอินทิกรัลของเวลาและความผิดพลาดสมบูรณ์ (Integral time absolute error – ITAE) เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในการปรับอัตราขยายของระบบควบคุม [11] ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ 4 ดังนี้

$$f_{obj} = \int_0^{\infty} t(E(t))dt \quad (4)$$

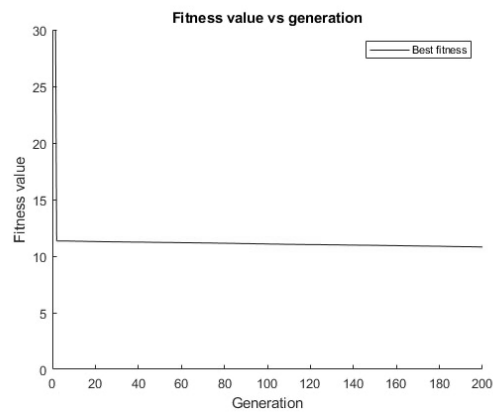
การดำเนินการขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมนั้น ดำเนินการด้วยฟังก์ชัน ga ภายใน MATLAB โดยในขั้นตอนแรกของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมนั้น ระบบจะสร้างชุดข้อมูลที่ประกอบด้วย K_p , K_i , และ K_d ทั้ง 3 ค่าขึ้นมาด้วยการสุ่ม โดยชุดข้อมูลเริ่มต้นนี้จะถูกนำไปจำลองผ่านระบบควบคุมที่ได้ออกแบบไว้เพื่อทำการประเมินฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของระบบควบคุมจากการใช้ค่าต่างๆ ของระบบควบคุม PID จากข้อมูลชุดแรก ดังรูปที่ 6 โดยนำค่าที่ได้มาใช้จัดเรียงข้อมูลตามขนาดของฟังก์ชันวัตถุประสงค์เพื่อคัดเลือกข้อมูลที่จะนำมาใช้ในการสร้างชุดข้อมูลรุ่นต่อไป



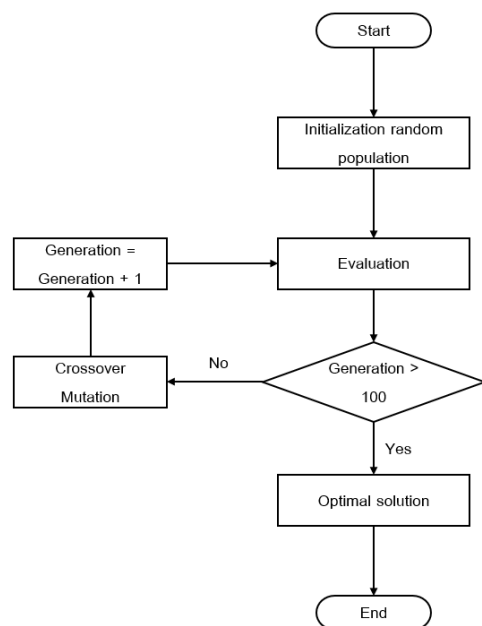
รูปที่ 6 กระบวนการใช้ Genetic Algorithm ในการปรับค่าระบบควบคุม PID

การสร้างชุดข้อมูลรุ่นต่อมานั้น จะอาศัยกระบวนการไขว้เปลี่ยนและการกลายพันธุ์ โดยในกลุ่มข้อมูลที่ถูกคัดเลือกมา ข้อมูลที่ได้ค่า ITAE ต่ำที่สุดของประชากรทั้งหมดจะถูกจัดว่าเป็น Elite เพื่อรักษาชุดข้อมูลที่ได้ผลลัพธ์ดีที่สุดไว้ สำหรับชุดข้อมูลที่เหลือนั้น จะถูกนำมาทำกระบวนการไขว้เปลี่ยนและการ

กลายพันธุ์ในอัตราที่ระบบกำหนดไว้ ซึ่งเนื่องจากการดำเนินการขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมในครั้งนี้ดำเนินการด้วยฟังก์ชัน ga ของ MATLAB อัตราการเกิดการไขว้เปลี่ยน การกลายพันธุ์ และการเก็บยีน elite นั้นจึงเป็นไปตามค่าเริ่มต้นของ MATLAB ซึ่งกำหนดให้เก็บข้อมูลที่ได้ค่าความเหมาะสมดีที่สุด 5% ของประชากรแต่ละรุ่นเป็นยีน Elite และกำหนดอัตราการเกิดการไขว้เปลี่ยนและการกลายพันธุ์ อยู่ที่ 80% และ 1% ของประชากรที่ไม่ใช่ยีน Elite ตามลำดับ ชุดข้อมูลใหม่ที่ได้จะใช้เป็นข้อมูลตั้งต้นชุดใหม่ที่จะผ่านกระบวนการนี้ซ้ำ ๆ จนกระทั่งครบจำนวนรุ่นที่กำหนดไว้ [6-8]

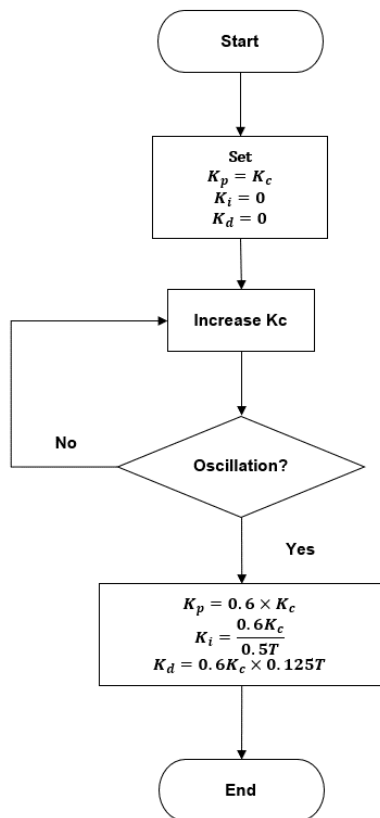


รูปที่ 7 ค่าความเหมาะสมจากการดำเนินการขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมที่ได้ต่อจำนวนรุ่น



รูปที่ 8 แผนผังแสดงการดำเนินการขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

ในงานวิจัยนี้ กำหนดให้จำนวนรอบของการทำขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมมีขนาดประชากรของข้อมูลต่อรุ่นที่ 50 ประชากร และกำหนดจำนวนรุ่นของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมที่ 100 รุ่น ซึ่งจากการทดลองซึ่งได้ผลลัพธ์ดังรูปที่ 7 พบว่าจำนวนรุ่นของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมที่ 100 รุ่นใช้เวลาในการทำงานไม่นานเกินไปและให้ผลลัพธ์ที่มีค่าความเหมาะสมไม่ต่างจากการปล่อยให้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมทำงานไปมากกว่านั้น ในรูปที่ 8 แสดงแผนผังแสดงการทำงานของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมที่ใช้ในงานวิจัยนี้



รูปที่ 9 flowchart ของการการปรับอัตราขยายด้วยวิธีการของ Ziegler-Nichole

3.4 การปรับอัตราขยายของระบบควบคุมด้วยวิธีการของ Ziegler-Nichols

เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับการหาอัตราขยายของระบบควบคุมด้วยวิธีทั่วไป จึงทำการปรับอัตราขยายด้วยวิธีการของ Ziegler-Nichols ไว้สำหรับการเปรียบเทียบ โดยเริ่มต้นด้วยการกำหนด Ki และ Kd เป็น 0 และแทนค่า Kp ด้วย

Kc โดยเพิ่มค่าของ Kc ขึ้นจนเกิดการแกว่งในสัญญาณออกของระบบควบคุม นำสัญญาณออกที่ได้หาคาบของการสั่น (T) ออกมา ค่า Kp, Ki, และ Kd ของระบบควบคุม PID นั้น สามารถหาได้จากสมการที่ (5) ถึง (7) แผนผังของการปรับอัตราขยายของระบบควบคุมวิธีนี้แสดงในรูปที่ 9 [12]

$$K_p = 0.6 \times K_c \quad (5)$$

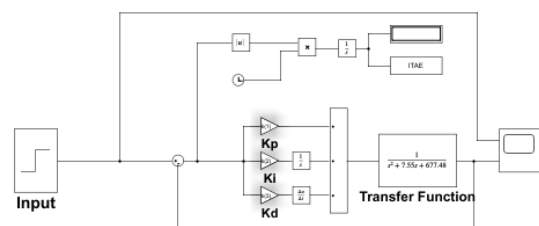
$$K_i = 0.6K_c / 0.5T \quad (6)$$

$$K_d = 0.6K_c \times 0.125T \quad (7)$$

4. ผลการวิจัย

4.1 การจำลองด้วย MATLAB Simulink

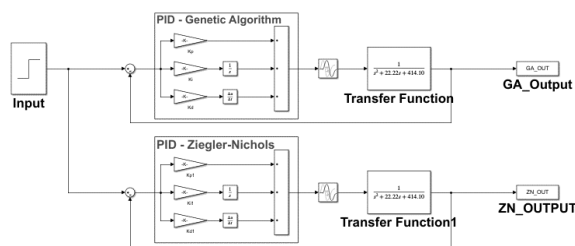
ผู้จัดทำทำการหาอัตราขยายสำหรับระบบควบคุม PID ของหุ่นยนต์ช่วยเหลือการเดินทั้งส่วนสะโพกและเข่าโดยใช้วิธีของ Ziegler-Nichols (ZN) และขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (GA) การปรับอัตราขยายของระบบควบคุมด้วยวิธีการของ Ziegler-Nichols นั้น เริ่มด้วยการเพิ่มอัตราขยายจนเกิดการสั่นในระบบควบคุมส่วนสะโพกเกิดการสั่นขึ้นเมื่อตั้งอัตราขยายไว้ที่ 245 ซึ่งได้คาบของการสั่นที่ 0.273 วินาที และในระบบควบคุมส่วนเข่า เกิดการสั่นขึ้นเมื่อตั้งอัตราขยายไว้ที่ 530 ซึ่งได้คาบของการสั่นที่ 0.344 วินาที ซึ่งนำไปคำนวณหาอัตราขยายของระบบควบคุม PID ด้วยสมการที่ (5), (6), และ (7) ได้ค่าดังตารางที่ 2 ในการปรับอัตราขยายของระบบควบคุมด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม ดำเนินการตามขั้นตอนที่แสดงในตอนที่ 3.3 โดยใช้อินทิกรัลของเวลาและความผิดพลาดสมบูรณ์ (ITAE) จากแบบจำลองภายใน Simulink ดังรูปที่ 10 เป็นฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ซึ่งได้อัตราขยายของระบบควบคุมดังแสดงในตารางที่ 2



รูปที่ 10 การจำลองระบบควบคุมด้วย MATLAB Simulink

ตารางที่ 2 อัตราการขยายของระบบควบคุม PID ที่ได้จากการปรับค่าแต่ละวิธี

Tuning Method	Parameter		
	Kp	Ki	Kd
ต้นขา			
ZN	147	1075.6	5.0225
GA	8.1563	2782.2	0.0572
ปลายขา			
ZN	318	1848.837	13.674
GA	152.42	2042.6	4.1054



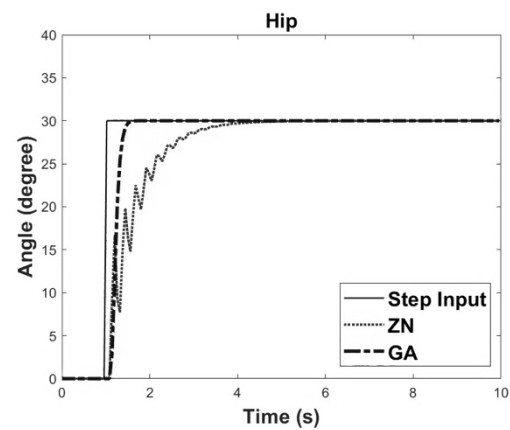
รูปที่ 11 การจำลองระบบควบคุมด้วย MATLAB Simulink

ตารางที่ 3 ประสิทธิภาพของระบบควบคุมจากการปรับค่าแต่ละวิธีที่ประเมินด้วย MATLAB Simulink

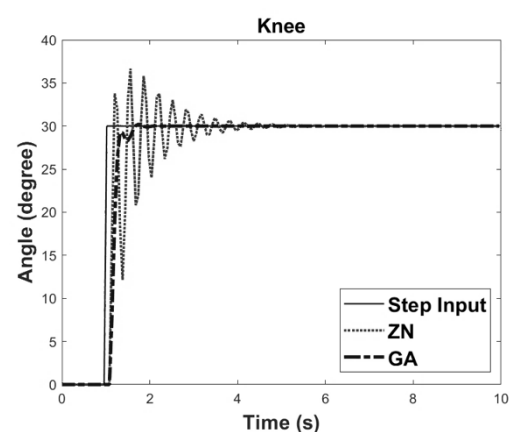
วิธีการปรับค่า	Rise Time (s)	Settling Time (s)	Over-shoot	Steady-state Error
ต้นขา				
ZN	1.2939	3.5691	0.0000	0.0000
GA	0.2180	1.4642	0.0000	0.0000
ปลายขา				
ZN	0.0846	3.6801	22.2142	0.0000
GA	0.1732	1.6074	0.6769	0.0000

ระบบควบคุมที่ออกแบบมาถูกจำลองและทดสอบโดยใช้ MATLAB Simulink ดังแสดงในรูปที่ 11 โดยค่า Kp, Ki, และ Kd ของระบบควบคุม PID นั้นใช้ค่าที่คำนวณมาได้ตามตารางที่ 2 และใช้สมการที่ (2) และ (3) เป็นฟังก์ชันถ่ายโอนสำหรับจำลองการทำงานของข้อเข้าและข้อสะโพกตามลำดับ การทดสอบจะ

กระทำสองขั้นตอน ในขั้นตอนแรกจะใช้สัญญาณเข้าเป็น step response และบันทึกสัญญาณออกจากระบบควบคุมทั้งสอง ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้แสดงในรูปที่ 12 และ 13 และประเมินประสิทธิภาพของระบบควบคุมทั้งสองวิธีด้วยการเปรียบเทียบขนาดของช่วงเวลาขึ้น (Rise time), ช่วงเวลาเข้าที่ (Settling Time), ส่วนพุงเกิน (Overshoot), และความคลาดเคลื่อนในสภาวะคงตัว (Steady-state error) ของสัญญาณออกจากระบบควบคุมที่ได้จากการปรับค่าแต่ละวิธี โดยแสดงผลในตารางที่ 3 และในตอนที่สองจะใช้สัญญาณเข้าเป็นข้อมูลการเดินจากการศึกษาการเดินของมนุษย์ [13] ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้แสดงในรูปที่ 14 และ 15



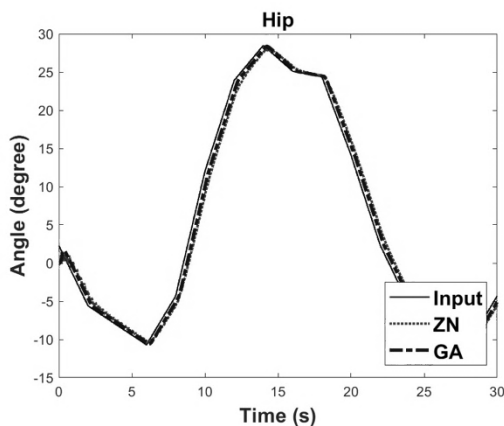
รูปที่ 12 Output ของระบบควบคุมส่วนสะโพกเมื่อ Input คือ step response



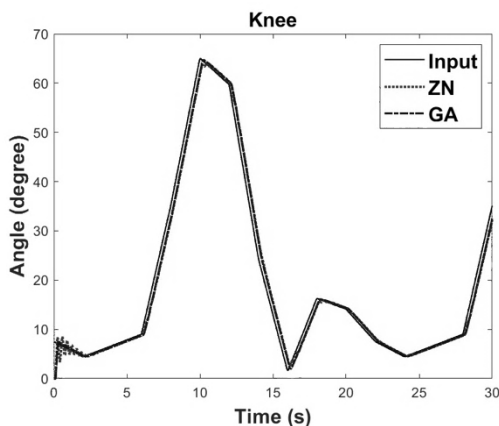
รูปที่ 13 Output ของระบบควบคุมส่วนเข่าเมื่อ Input คือ step response

จากผลลัพธ์จากตารางที่ 3 และรูปที่ 12 ถึง 15 พบว่าระบบควบคุมที่ทำการปรับค่าโดยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมนั้นใช้

เวลาในการเข้าสู่ช่วงเวลาที่เข้าที่ที่น้อยกว่าระบบควบคุมที่ใช้การปรับตั้งค่าด้วยวิธีการของ Ziegler-Nichols และมีค่าส่วนพุงเกินที่น้อยกว่าด้วยเช่นกัน นอกจากนี้ เนื่องด้วยคุณสมบัติของการปรับค่าด้วยวิธีการของ Ziegler-Nichols ที่ทำให้ได้ระบบควบคุมที่มีอัตราการขยายที่สูงกว่าวิธีการอื่น [12] ระบบควบคุมที่ปรับค่าด้วย Ziegler-Nichols จึงมีขนาดของช่วงเวลาขึ้นที่เร็ว แต่เกิดการสั่นก่อนเข้าสู่สภาวะคงตัวได้มาก ในขณะที่ระบบควบคุมที่ปรับค่าด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมนั้นให้สัญญาณออกที่มีการสั่นน้อยกว่า และเข้าสู่สภาวะคงตัวเร็วกว่า จึงสามารถระบุได้ว่าระบบควบคุมที่ใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมในการปรับอัตราขยายของระบบควบคุม สามารถช่วยให้ระบบควบคุมการทำงานของหุ่นยนต์ช่วยเหลือการเดินทำงานได้แม่นยำกว่าระบบควบคุมที่ใช้วิธีการ Ziegler-Nichols ในการปรับค่าของระบบควบคุม



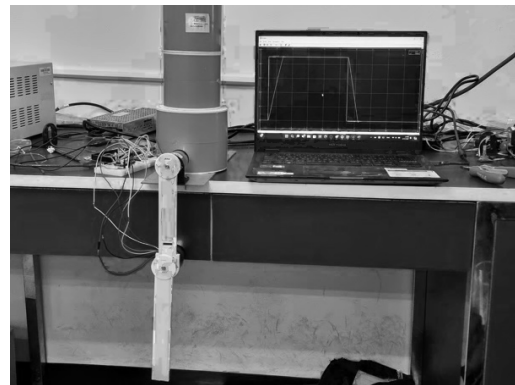
รูปที่ 14 Output ของระบบควบคุมส่วนสะโพกเมื่อ Input คือ ข้อมูลการเดิน



รูปที่ 15 Output ของระบบควบคุมส่วนเข่าเมื่อ Input คือ ข้อมูลการเดิน

4.2 การจำลองกับแบบจำลองขาหุ่นยนต์ช่วยเดิน

ผู้จัดทำได้ทดสอบการทำงานของระบบควบคุมกับแบบจำลองขาหุ่นยนต์ ซึ่งเป็นหุ่นยนต์ 2 Degree of Freedom ที่เคลื่อนไหวที่ข้อเข่าและข้อสะโพกในแนว Sagittal plane ด้วยมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ดังแสดงในรูปที่ 16 โดยใช้ MATLAB Simulink ในการสร้างระบบควบคุม โดยผลการทดสอบเมื่อใส่สัญญาณเข้าเป็น Step Input แสดงดังรูปที่ 17 และผลการทดสอบเมื่อใส่สัญญาณเข้าเป็นข้อมูลการเดินของมนุษย์แสดงในรูปที่ 18 ตารางที่ 4 แสดงอินทิกรัลของเวลาและความผิดพลาดสมบูรณ์ (ITAE) ของระบบควบคุมในแต่ละส่วน



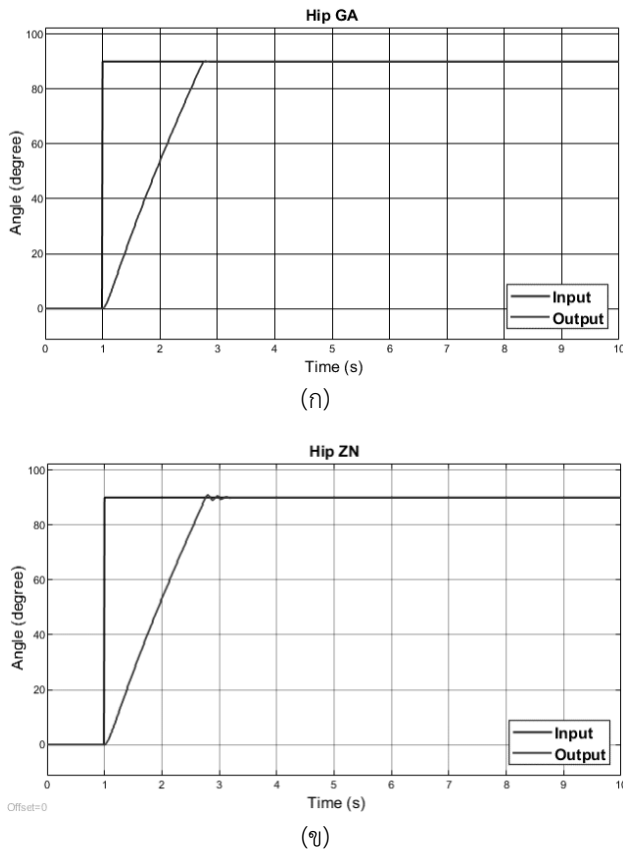
รูปที่ 16 แบบจำลองขาหุ่นยนต์ช่วยเดิน

ตารางที่ 4 อินทิกรัลของเวลาและความผิดพลาดสมบูรณ์ของระบบควบคุมแต่ละชนิด

วิธีการปรับค่า	ITAE
ต้นขา	
ZN	125.9
GA	124.1
ปลายขา	
ZN	106.2
GA	105.0

ผลการทดสอบในตารางที่ 4 และรูปที่ 17 และ 18 พบว่าระบบควบคุม PID ที่ปรับอัตราขยายโดยใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมให้ระบบควบคุมที่มีอินทิกรัลของเวลาและความผิดพลาดสมบูรณ์ที่น้อยกว่าระบบควบคุมที่ปรับอัตราขยายด้วย

วิธีการของ Ziegler-Nichols ทั้งในส่วนสะโพก (124.1 และ 125.9 ตามลำดับ) และส่วนเข่า (105.0 และ 106.2 ตามลำดับ)

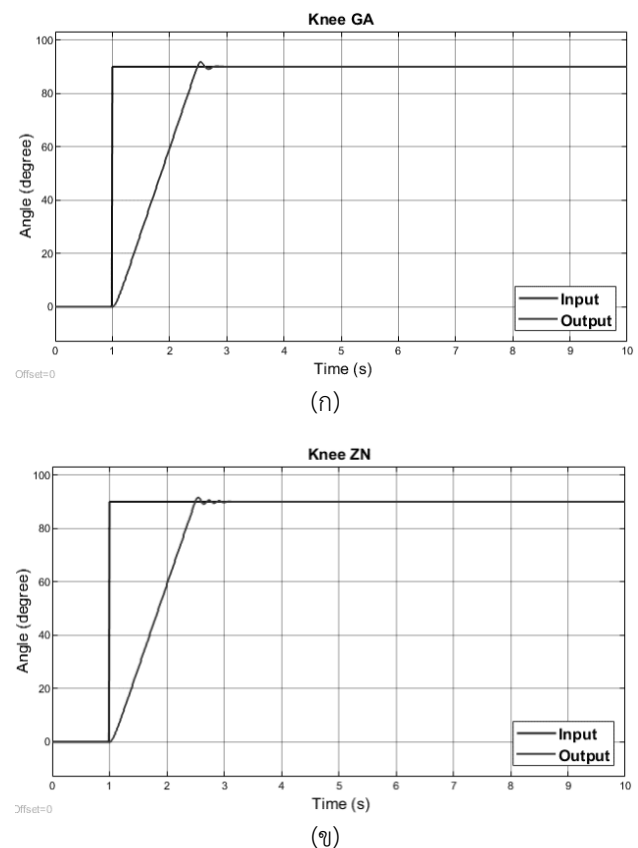


รูปที่ 17 ผลการทดสอบกับขาของหุ่นยนต์ที่ส่วนสะโพกเมื่อระบบควบคุมปรับด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (ก) และวิธีการของ Ziegler-Nichols (ข)

5. สรุป

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการปรับอัตราการขยายของระบบควบคุมแบบ PID สำหรับหุ่นยนต์ช่วยเหลือการเดิน 4 DoF ด้วยการใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมในการลดความผิดพลาดของระบบควบคุม อัตราการขยายของระบบ PID ที่ได้ (K_p , K_i , และ K_d) ถูกนำไปทดสอบด้วย MATLAB Simulink และแบบจำลองขาหุ่นยนต์ โดยมีสัญญาณเข้าเป็น Step Input และตำแหน่งของข้อต่อของขามนุษย์ในระหว่างการเดิน ผลการทดสอบด้วย MATLAB Simulink พบว่า เมื่อเปรียบเทียบกับระบบควบคุมที่ใช้การปรับค่าด้วยวิธีการของ Ziegler-Nichols ในการปรับค่านั้น การใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมในการปรับค่าให้ระบบควบคุมที่มี

ช่วงเวลาเข้าที่ต่ำกว่า (1.46 และ 3.56 วินาทีในส่วนต้นขา และ 1.60 และ 3.68 วินาทีในส่วนปลายขา) และส่วนพุงเกินที่ต่ำกว่าในส่วนปลายขา (0.67 และ 22.21 องศาในส่วนปลายขา) สอดคล้องกับผลการทดสอบกับแบบจำลองหุ่นยนต์ซึ่งพบว่าให้อินทิกรัลของเวลาและความผิดพลาดสมบูรณ์ที่น้อยกว่า (124.1 และ 125.9 ในส่วนต้นขา และ 105.0 และ 106.2 ในส่วนปลายขา)



รูปที่ 18 ผลการทดสอบกับขาของหุ่นยนต์ที่ส่วนเข่าเมื่อระบบควบคุมปรับด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (ก) และวิธีการของ Ziegler-Nichols (ข)

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] F. Hussain, R. Goecke, and M. Mohammadian, "Exoskeleton robots for lower limb assistance: A review of materials, actuation, and manufacturing methods," *Proc Inst Mech Eng H*, Vol. 235 (12), pp. 1375-1385, 2021. doi:10.1177/09544119211032010

- [2] B. Chen et al., "Recent developments and challenges of lower extremity exoskeletons," *J Orthop Translat.*, Vol. 5, pp. 26-37, 2016. doi:10.1016/j.jot.2015.09.007
- [3] G. Chen, C. K. Chan, Z. Guo, and H. Yu, "A review of lower extremity assistive robotic exoskeletons in rehabilitation therapy," *Crit Rev Biomed Eng.*, Vol. 41 (4-5), pp. 343-63, 2013. doi:10.1615/critrevbiomedeng.2014010453
- [4] E. B. Simonsen, "Contributions to the understanding of gait control," *Dan Med J.*, Vol. 61 (4), p. B4823, 2014.
- [5] M. Soleimani Amiri, R. Ramli, M. F. Ibrahim, D. Abd Wahab, and N. Aliman, "Adaptive Particle Swarm Optimization of PID Gain Tuning for Lower-Limb Human Exoskeleton in Virtual Environment," *Mathematics.*, Vol. 8 (11), p 2040, 2020. doi:10.3390/math8112040
- [6] A. Ma'arif, H. Nabila, Iswanto, and O. Wahyunggoro, "Application of Intelligent Search Algorithms in Proportional-Integral-Derivative Control of Direct-Current Motor System," *Journal of Physics: Conference Series.*, Vol. 1373 (1), p. 012039, 2019. doi:10.1088/1742-6596/1373/1/012039
- [7] E. Suseno and A. Ma'arif, "Tuning of PID Controller Parameters with Genetic Algorithm Method on DC Motor," *International Journal of Robotics and Control Systems.*, Vol. 1, pp. 41-53, 2021, doi:10.31763/ijrcs.v1i1.249
- [8] K. M. Elbayomy, J. Zongxia, and Z. Huaqing, "PID Controller Optimization by GA and Its Performances on the Electro-hydraulic Servo Control System," *Chinese Journal of Aeronautics*, Vol. 21 (4), pp. 378-384, 2008. doi: [https://doi.org/10.1016/S1000-9361\(08\)60049-7](https://doi.org/10.1016/S1000-9361(08)60049-7)
- [9] F. Molteni, G. Gasperini, G. Cannaviello, and E. Guanziroli, "Exoskeleton and End-Effector Robots for Upper and Lower Limbs Rehabilitation: Narrative Review," *PM&R.*, Vol. 10 (9), pp. S174-S188, 2018. doi:10.1016/j.pmrj.2018.06.005
- [10] M. S. Amiri, R. Ramli, and M. F. Ibrahim, "Hybrid design of PID controller for four DoF lower limb exoskeleton," *Applied Mathematical Modelling.*, Vol. 72, pp. 17-27, 2019. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apm.2019.03.002>
- [11] W. Tan, H. J. Marquez, and T. Chen, "Performance Assessment of PID Controllers," *Control and Intelligent Systems.*, Vol. 32, 2004. doi:10.2316/Journal.201.2004.3.201-1309
- [12] Microstar Laboratories, Inc. (27 December 2023). *Ziegler-Nichols Tuning Rules for PID*. [Online] Available : <https://www.mstarlabs.com/control/znrule.html>
- [13] C. A. Fukuchi, R. K. Fukuchi, and M. Duarte, "A public dataset of overground and treadmill walking kinematics and kinetics in healthy individuals," *PeerJ.*, Vol. 6, p. e4640, 2018. doi:10.7717/peerj.4640.