

การหาค่าตัวควบคุมSMCที่เหมาะสมสำหรับระบบไม่เป็นเชิงเส้นด้วยวิธีGA Optimization of Sliding Mode Controller of Nonlinear System by Using Genetic Algorithm Technique

สมพร เตียเจริญ^{1*}, ธีรยุทธ ซาติชนะยืนยง²

¹ ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ จ.ขอนแก่น 40000

² ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม จ.มหาสารคาม 44150

* E-mail: tiacharoen@yahoo.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบตัวควบคุมที่ไม่เป็นเชิงเส้นแบบ SMC ตั้งเดิมเทียบเคียงกับตัวควบคุม SMC ที่มีการปรับปรุงให้เหมาะสมโดยใช้วิธี GA โดยสร้างด้วยภาษาโปรแกรม Matlab ซึ่งระบบไม่เป็นเชิงเส้นในการควบคุมคือการควบคุมลูกตุ้มผกผันที่ใช้สมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของลากรองจ์ ผลที่ได้รับจากการจำลองเมื่อทำการหาค่าที่เหมาะสมด้วยวิธี GA โดยที่มีฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือให้มีค่า ITAE น้อยที่สุดได้ค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์เท่ากับ 0.185 และได้ค่าตัวแปรที่เหมาะสมคือ $\beta = 43.333, \delta = 9.333$ ผลการตอบสนองของตัวควบคุมแบบ SMC ที่หาค่าเหมาะสมด้วยวิธี GA มีการตอบสนองชั่วขณะที่รวดเร็วกว่าตัวควบคุมแบบ SMC ที่ออกแบบด้วยขั้นตอนพื้นฐาน บทสรุปคือการนำปัญญาประดิษฐ์มาใช้ร่วมกับตัวควบคุมแบบไม่เชิงเส้นสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุมให้ดีขึ้นได้และมีความเป็นไปได้ในการที่จะนำกรรมวิธีปัญญาประดิษฐ์อื่นๆมาใช้อีก

คำหลัก: ปัญญาประดิษฐ์, วิธีพันธุกรรม, การควบคุมแบบสไลด์ดิ้งโหมด, ระบบไม่เป็นเชิงเส้น

Abstract

This paper present the conventional Sliding Mode Control compared to the Sliding Mode Control using the Genetic Algorithm to find optimal Sliding Mode Controller. Those controllers are developing in Matlab. Nonlinear system to control is inverted pendulum; its implementation is Lagrange's equations. The simulation results show that when using the GA to find optimal parameters with fitness function is defined as Integral Time Absolute Error (ITAE), which results is 0.185 and the optimal parameter are $\beta = 43.333, \delta = 9.333$. Output response of GA optimized SMC has transient response faster than conventional SMC. Summarize of Artificial Intelligent optimized nonlinear controller is improved controller output and show potentials of other Algorithm to controller design.

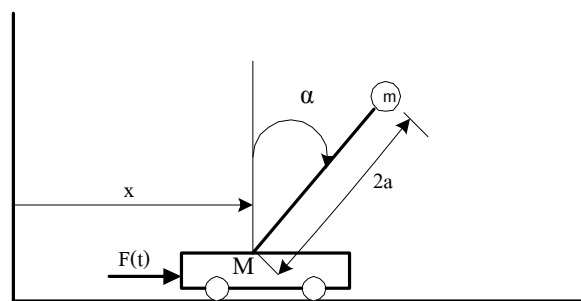
Keywords: Artificial Intelligent (AI), Genetic Algorithm (GA), Sliding Mode Control (SMC), Nonlinear System.

1. บทนำ

เนื่องจากในปัจจุบันมีการออกแบบเครื่องจักรสมัยใหม่ที่มีความซับซ้อนและมีคุณสมบัติไม่เป็นเชิงเส้นจำนวนมาก ทำให้ในการออกแบบตัวควบคุมเพื่อให้ระบบมีคุณสมบัติตามต้องการจำเป็นจะต้องอาศัยการออกแบบตัวควบคุมที่ซับซ้อนตามไปด้วย วัตถุประสงค์หลักคือนำเสนอการออกแบบตัวควบคุมที่สามารถควบคุมระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นแบบดั้งเดิม พร้อมทั้งได้นำเสนอแนวทางในการปรับปรุงให้เหมาะสมต่อการใช้งานจริงด้วยขบวนการทางปัญญาประดิษฐ์ ระบบที่ทำการศึกษาเพื่อเทียบเคียงคือการศึกษาค้นคว้าควบคุมลูกตุ้มผกผันเพราะเป็นแบบจำลองที่ดีของการควบคุมกระบวนการที่ไม่มีเสถียรภาพและไม่เป็นเชิงเส้น ในที่นี้จะบังคับให้ลูกตุ้มเคลื่อนที่ได้เฉพาะแกนเดียวเท่านั้น ตัวควบคุมที่จะนำมาควบคุมการทำงานของลูกตุ้มผกผันนี้จะใช้การควบคุมแบบ SMC เพราะว่าเหมาะสำหรับระบบที่เป็นหลายอินพุตหลายเอาต์พุตและออกแบบค่าที่เหมาะสมของ SMC อีกครั้งโดยใช้วิธี GA เนื่องจากตัวควบคุมแบบสไลด์ดิ้งใหม่จนถึงผลการควบคุมจะเป็นอิสระจากสิ่งรบกวนภายนอกและคุณสมบัติไม่เป็นเชิงเส้นของระบบ แต่อย่างไรก็ตามในการที่จะได้มาซึ่งผลการตอบสนองที่เหมาะสมจำเป็นจะต้องลองผิดลองถูกในการปรับค่าในระบบควบคุมจริง[1] โดยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของลูกตุ้มผกผันจะใช้สมการของลากรองจ์ (Lagrange's equations) เพื่อแสดงการเคลื่อนที่ของระบบและสร้างแบบจำลองด้วยภาษาโปรแกรม Matlab ในการออกแบบตัวควบคุม SMC จะแบ่งออกเป็นสองส่วนคือ ส่วนที่หนึ่งจะเป็นการออกแบบตามหลักการพื้นฐานของระบบควบคุม SMC และในส่วนที่สองจะเป็นการประยุกต์ใช้ GA เพื่อหาค่าตัวแปรของการควบคุมแบบ SMC ให้เหมาะสมโดยที่มีฟังก์ชันวัตถุประสงค์คือให้มีค่าความผิดพลาด ITAE น้อยที่สุด

2. แบบจำลองของลูกตุ้มผกผัน

ลูกตุ้มผกผันเป็นระบบทางกายภาพที่แสดงถึงความไม่มีเสถียรภาพและระบบที่มีอินพุตเดียวหลายเอาต์พุต (Single Input Multi Output) แบบจำลองมีความคล้ายกับลูกตุ้มนาฬิกาแต่กลับหัว มีจุดหมุนติดกับฐานที่ประกบกับตัวรถ โดยจะบังคับให้ลูกตุ้มเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระแกนเดียวเท่านั้น ตัวรถเคลื่อนที่ในแนวราบด้วยดีซีมอเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 1 สามารถสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ได้ด้วยสมการของลากรองจ์



รูปที่ 1 แบบจำลองลูกตุ้มผกผัน

เมื่อ M คือ มวลของทั้งตัวรถ มีหน่วยเป็นกิโลกรัม(kg), m คือ มวลของลูกตุ้ม มีหน่วยเป็นกิโลกรัม (kg) , $2a$ คือ ความยาวของแท่งลูกตุ้ม มีหน่วยเป็นเมตร (m), C คือ ค่าคงที่แข็งตัวของสปริง x คือ ตำแหน่งของตัวรถ และ α คือ มุมของลูกตุ้ม เมื่อพิจารณาพลังงานจลน์(kinetic energy)และพลังงานศักย์(potential energy) ในการเคลื่อนที่ของตัวรถและลูกตุ้มทั้งในแนวนอน(horizontal)และแนวตั้ง (vertical) ฟังก์ชันของลากรองจ์จะได้

$$L = \left[\frac{1}{2}(M + m)\dot{y}^2 + ml \cos \theta \dot{y} \dot{\theta} + \frac{1}{2}ml^2 \dot{\theta}^2 - mgl \cos \theta \right] \quad (1)$$

สมการของลากรองจ์โดยการประมาณให้เป็นเชิงเส้น (linearized) ที่ไม่คิดเทอมของตรีโกณมิติและเทอมของควอดรatica คือ

$$\begin{aligned} (M + m)\ddot{y} + ml\ddot{\theta} &= f \\ m\ddot{y} + ml\ddot{\theta} - mg\theta &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

แบบจำลองที่สมบูรณของลูกตุ้มผกผัน สามารถเขียนในรูปเมตริกซ์[2] ได้คือ

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & a_{32} & 0 & 0 \\ 0 & a_{42} & 0 & 0 \end{bmatrix}, b = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ b_3 \\ b_4 \end{bmatrix}, x = \begin{bmatrix} x \\ \alpha \\ \dot{x} \\ \dot{\alpha} \end{bmatrix} \quad (3)$$

เมื่อ $a_{32} = -3(C - mga) / a(4M_t + m)$,

$a_{42} = -3(M_t + m)(C - mga) / a^2 m(4M_t + m)$

, $b_3 = 4 / (4M_t + m)$, $b_4 = 3 / (4M_t + m)$

และ $g = 9.81 \text{ ms}^{-2}$

3. การควบคุมแบบสไลด์ดิ้งโหมด (SMC)

วัตถุประสงค์ในการควบคุมคือต้องควบคุมไม่ให้ลูกตุ้มล้ม ($\alpha = 0$) และตัวรถหยุดนิ่งบนราง ($x = 0$) เช่นหากลูกตุ้มจะล้มไปทางซ้ายก็ควบคุมให้ตัวรถเคลื่อนที่ไปทางด้านซ้าย จนกระทั่งลูกตุ้มหันมาทางด้านขวา ก็ควบคุมให้ตัวรถเคลื่อนที่มาจากขวาซึ่งจะทำให้ลูกตุ้มแกว่งตัวด้วยมุมแคบลงจนในที่สุดลูกตุ้มจะถึงจุดหยุดนิ่งหรือมีเสถียรภาพ การควบคุมแบบสไลด์ดิ้งโหมดเป็นการคำนวณหาสัญญาณควบคุมซึ่งจะอยู่บนเงื่อนไขที่ว่าสัญญาณของผลตอบสนองจะต้องสไลด์อยู่บนระนาบที่มีค่าความคลาดเคลื่อนเป็นศูนย์ (sliding surface) ที่กระทำได้โดยการสลับ (switching function) สัญญาณควบคุมให้อยู่บนระนาบการสไลด์จากหลักการนี้ค่าความผิดพลาดจะถูกกำหนดให้เข้าสู่ศูนย์ด้วยฟังก์ชันของเลียปูนอฟ (Lyapunov)[1,3]

การออกแบบตัวควบคุมด้วยสูตรของแอกเคอร์มัน (Ackermann's formula) พิจารณาระบบควบคุมที่แทนด้วยสมการ $\dot{x} = Ax + Bu$ โดยที่เมตริกซ์ $A = n \times n$, $B = n \times m$, $X = n \times 1$, $U = m \times 1$ กำหนดให้ค่าคงที่ของแบบจำลองของลูกตุ้มผกผันคือ $M_t = 5, m = 1, a = 1, C = 1$

ขั้นตอนที่ 1 หาค่าสัญญาณควบคุมของกระบวนการ $u = k^T x$ โดยพารามิเตอร์ k^T คือเวกเตอร์ของค่าคงที่ หาได้ด้วยวิธีการกำหนดค่าเจาะจง (Eigenvalue placement) ซึ่งได้เลือกค่าเป็น $k_1 = -1, k_2 = -2, k_3 = -3$

ขั้นตอนที่ 2 หาระนาบในการสไลด์ $s = c^T x = 0$

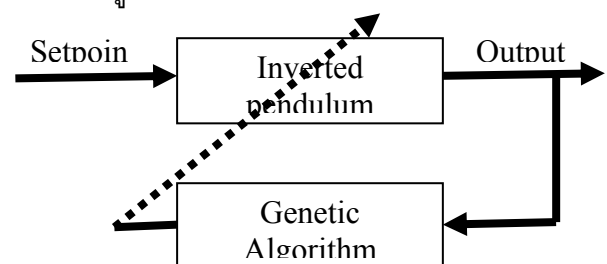
$c^T = [0 \ 0 \ 0 \ 1][b \ Ab \ A^2b \ A^3b]^{-1}(A+I)(A+2I)(A+3I)$ เมื่อ I เป็นเมตริกซ์เอกลักษณ์ จากค่าคงที่เมตริกซ์ A และเมตริกซ์ B ของระบบลูกตุ้มผกผันจะได้

$$c^T = [-4.77 \ 48.4 \ -8.75 \ 18.7]$$

ขั้นตอนที่ 3 คำนวณหาสัญญาณควบคุม $u = -M_0 \text{sign}(s)$, $M_0 = \text{const}$ ของการควบคุมแบบสไลด์ดิ้งโหมด

4. การประยุกต์วิธีพันธุกรรมเพื่อหาค่าการควบคุมแบบสไลด์ดิ้งโหมด

ในงานศึกษาส่วนนี้จะพิจารณาการหาค่าที่เหมาะสมด้วยกรรมวิธีพันธุกรรม เพื่อหาค่า β และ δ ของตัวควบคุมแบบสไลด์ดิ้งโหมดแทนการลองผิดลองถูกในการปรับค่าของตัวควบคุมในระบบควบคุมจริง โดยบังคับให้ระบบมีเสถียรภาพเชิงเส้นกำกับ (Asymptotically stable) ที่กำหนดค่าสัญญาณควบคุมของระบบลูกตุ้มผกผันให้มีค่าเป็น $u = -\beta(|x| + |\dot{x}| + |\alpha| + |\dot{\alpha}| + \delta) \text{sign}(s)$ ซึ่งฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของกรรมวิธีพันธุกรรมคือค่าความผิดพลาด (Integral Time Absolute Error, ITAE) เพื่อวิเคราะห์ตัวควบคุมที่นำเสนอได้สร้างแบบจำลองของระบบควบคุมลูกตุ้มผกผันด้วย m-file โดยมีตัวควบคุมเป็นแบบแบบสไลด์ดิ้ง หลังจากนั้นได้เขียนโปรแกรม m-file พัฒนาการวิธีพันธุกรรมเพื่อเชื่อมโยงและปรับค่าของตัวควบคุมให้สอดคล้องกับฟังก์ชันวัตถุประสงค์ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 แสดงโครงสร้างการปรับตัวควบคุมแบบสไลด์ดิ้งโหมดด้วยกรรมวิธีพันธุกรรม

4.1 วิธีพันธุกรรม (GA)

John Holland ได้เสนอกรอบความคิดของวิธีพันธุกรรม (Genetic algorithm: GA) ในปี ค.ศ. 1975 โดยมีพื้นฐานว่าสิ่งมีชีวิตประกอบด้วยคุณลักษณะที่ดี

และไม่ดี คุณลักษณะที่ดีจะทำให้สิ่งมีชีวิตรอดอยู่ได้ และดำรงเผ่าพันธุ์ถ่ายทอดพันธุกรรมต่อไปยังรุ่นถัดไป [4] การนำวิธีพันธุกรรมมาใช้ในการแก้ปัญหาที่เหมาะสมที่สุด (Optimization problem) จะอาศัยแนวความคิดการถ่ายทอดพันธุกรรม โดยการอยู่รอดของของรุ่นถัดไป (Generation) จะแทนด้วยค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีขึ้น ซึ่งสามารถใช้หาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดได้อย่างมีประสิทธิภาพ

วิธีพันธุกรรมจะแทนคำตอบในรูปแบบของโครโมโซม (Chromosome) แต่ละโครโมโซมหากแทนด้วยระบบเลขฐานสองจะประกอบด้วยบิต (bit) ที่ใช้แทนยีน (Gene) โดยเลือกโครโมโซมที่มีค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ดีจากกลุ่มของโครโมโซมทั้งหมด จากนั้นผ่านการคัดเลือกเลียนแบบการคัดเลือกทางพันธุกรรม เพื่อหาโครโมโซมที่มีความสามารถในการอยู่รอดดีที่สุด (ตามฟังก์ชันวัตถุประสงค์)

ขั้นตอนของวิธีพันธุกรรม แสดงไว้ในรูปที่ 3

ขั้นตอนที่ 1 สร้างโครโมโซมเริ่มต้น โดยการสุ่มเลือกจากโครโมโซมต้นแบบ

ขั้นตอนที่ 2 หาค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ของแต่ละโครโมโซม

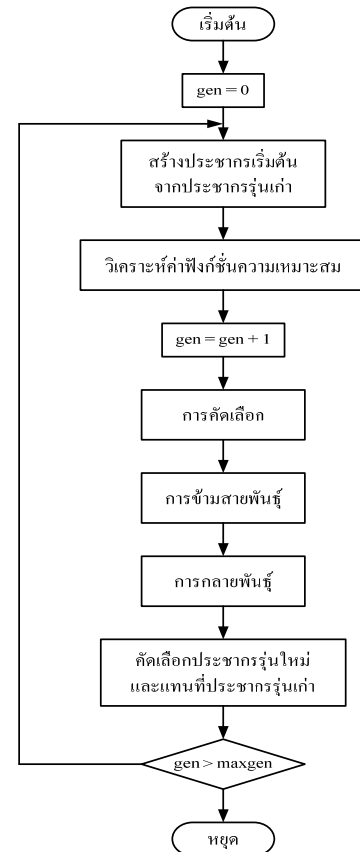
ขั้นตอนที่ 3 คัดเลือกโครโมโซมที่ดีจากค่าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ โดยมีค่าความน่าจะเป็นที่จะถูกเลือกในครั้งต่อไปสูง

ขั้นตอนที่ 4 สุ่มโครโมโซมที่ถูกเลือกมาโครโมโซมใดที่มีค่าการข้ามสายพันธุ์น้อยจะนำไปจับคู่แล้วมีการแลกเปลี่ยนยีนบางส่วนเพื่อสร้างโครโมโซมรุ่นถัดไป

ขั้นตอนที่ 5 สุ่มตำแหน่งของยีนในโครโมโซมตามค่าการกลายพันธุ์แล้วคอมพลีเมนต์บิต

ขั้นตอนที่ 6 แทนที่โครโมโซมรุ่นก่อนหน้าด้วยรุ่นใหม่ที่เกิดจากขั้นตอนทั้งหมด แล้วปฏิบัติตามขั้นตอนซ้ำจนกว่าจะถึงรุ่นที่กำหนด(จำนวนรอบ)หรือได้ค่าตามฟังก์ชันวัตถุประสงค์

ในการประยุกต์วิธีพันธุกรรมเพื่อหาค่าการควบคุมแบบสไลด์ดิงโหมด โครโมโซมจะแทนค่าของ β และ δ ของตัวควบคุมแบบสไลด์ดิงโหมด

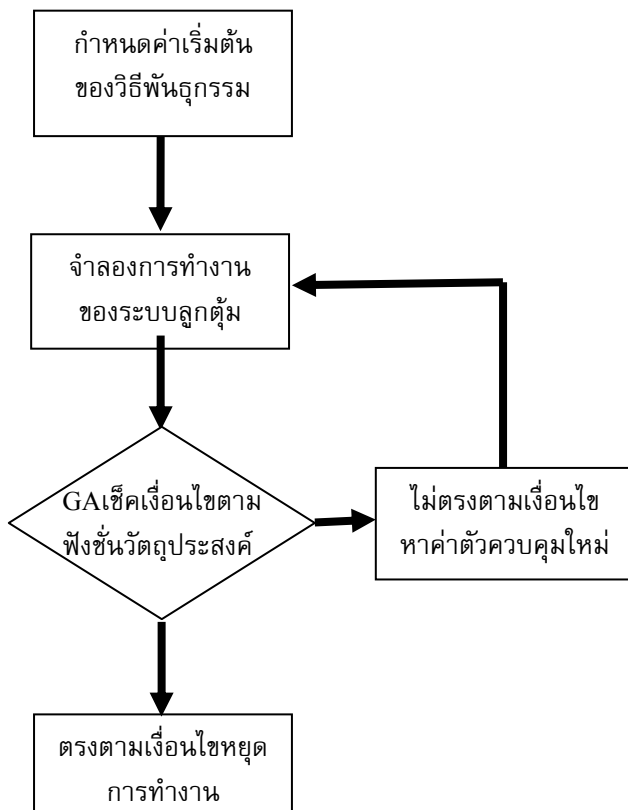


รูปที่ 3 ขั้นตอนของวิธีพันธุกรรม

การจำลองระบบควบคุมเริ่มจากสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบลูกตุ้มผกผันด้วยโปรแกรม MATLAB ในรูปแบบของ m-file จากนั้นเรียกใช้งานโปรแกรม m-file ที่ได้ทำการเขียนโปรแกรมหาค่าที่เหมาะสมด้วยกรรมวิธีพันธุกรรม ซึ่งจะเริ่มตั้งแต่การกำหนดค่าคงที่ต่างๆในการหาค่า ดังแสดงในตารางที่ 1 จากนั้นโปรแกรมจะทำการเรียกโปรแกรมแบบจำลองของระบบลูกตุ้มผกผันเพื่อจำลองการทำงานของระบบซึ่งจะทำให้ได้ค่าของผลการตอบสนองของตัวควบคุมออกมา โดยค่าดังกล่าวจะนำมาตรวจสอบตามเงื่อนไขของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ หากค่าที่ได้ตรงตามเงื่อนไขโปรแกรมก็จะหยุดทำงาน แต่หากผลการตอบสนองที่ได้ไม่ตรงตามเงื่อนไขก็จะมี การหาค่าที่เหมาะสมของตัวควบคุม แบบสไลด์ดิงโหมดตามกรรมวิธีพันธุกรรมใหม่และทำงานวนซ้ำจนกว่าจะได้ค่าตรงตามเงื่อนไขหรือจำนวนรอบการหาค่าที่กำหนด ขั้นตอนในการทำงานดังแสดงในรูปที่ 4

ตารางที่ 1 การกำหนดค่าคงที่ต่างๆในการหาค่าด้วยGA

Genetic Algorithm parameters	Symbol	Value/range
Maximum number of iteration	$t_{\max}$	50
number of chromosome	Nind	4
precision of variables	Pre	4
generation gap	Ggap	0.95
Lower limits $[\beta, \delta]$	Smin	[0,0]
Upper limits $[\beta, \delta]$	Smax	[50,10]



รูปที่ 4 แสดง Flow chart การปรับตัวควบคุมแบบสไลด์ดิงโหมดด้วยกรรมวิธีพันธุกรรม

5. ผลการจำลองระบบควบคุม

เป้าหมายในการจำลองระบบควบคุมคือทำให้ลูกตุ้มอยู่ในสมดุลและตัวรถหยุดนิ่งเมื่อกำหนดให้ค่าเริ่มต้นของระบบคือ $x(0) = 0.5, \alpha(0) = 0.3, \dot{x}(0) = 0, \dot{\alpha}(0) = 0$

5.1 การควบคุมแบบสไลด์ดิงโหมด (SMC)

ในการควบคุมแบบสไลด์ดิงโหมด กำหนดให้สัญญาณ $u = -\beta(|x| + |\dot{x}| + |\alpha| + |\dot{\alpha}| + \delta)\text{sign}(s)$ โดย $\beta = 30, \delta = 0$ ผลการจำลองแสดงในรูปที่ 5 พบว่าที่สภาวะเริ่มต้นตัวควบคุมแบบสไลด์ดิงโหมดจะทำการการสลับสัญญาณควบคุมให้อยู่บนระนาบการสไลด์ ซึ่งทำให้มุมของลูกตุ้มลดลงจนมีค่าเป็นศูนย์นั้นคือมีเสถียรภาพ

5.2 การควบคุมแบบสไลด์ดิงโหมดที่หาค่าที่เหมาะสมด้วยกรรมวิธีพันธุกรรม

ตัวควบคุมลูกตุ้มผกผันแบบสไลด์ดิงโหมดที่หาค่าที่เหมาะสมด้วยกรรมวิธีพันธุกรรม กำหนดให้สัญญาณ $u = -\beta(|x| + |\dot{x}| + |\alpha| + |\dot{\alpha}| + \delta)\text{sign}(s)$ แล้วทำการหาค่า β, δ โดยกรรมวิธีพันธุกรรม โดยตัวอย่างค่าที่หาได้ คือ

1 generation, best cost = 0.192142

2 generation, best cost = 0.191315

3 generation, best cost = 0.191315

4 generation, best cost = 0.185232

5 generation, best cost = 0.185232

ผลสุดท้ายที่ได้จากกรรมวิธีพันธุกรรมคือได้ค่า $\beta = 43.333$ และค่า $\delta = 9.333$ ผลการจำลองแสดงในรูปที่ 6 พบว่าตัวควบคุมแบบสไลด์ดิงโหมดสามารถทำให้ลูกตุ้มมีเสถียรภาพได้ เมื่อแสดงผลการควบคุมด้วย Phase Portrait ที่แสดงถึงระนาบในการควบคุมของสัญญาณควบคุม แสดงในรูปที่ 7 แสดงผลการเปรียบเทียบ Phase Portrait ที่เกิดขึ้นระหว่างสไลด์ดิงโหมดที่ปรับค่าแล้วกับตัวควบคุมแบบสไลด์ดิงโหมดปกติ ผลปรากฏว่าตัวควบคุมแบบสไลด์ดิงโหมดที่ปรับค่าแล้วจะมีการเข้าสู่ระนาบในการควบคุมได้เร็วกว่าและมีค่าความชันของระนาบในการควบคุมมากกว่า

6. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการทดลอง

เมื่อพิจารณาผลการทดลองพบว่าตัวควบคุมแบบสไลด์ดิงโหมดที่ปรับค่าแล้วจะมีการเข้าสู่ระนาบในการควบคุมได้เร็วกว่าแต่ปัจจัยที่มีผลต่อการ

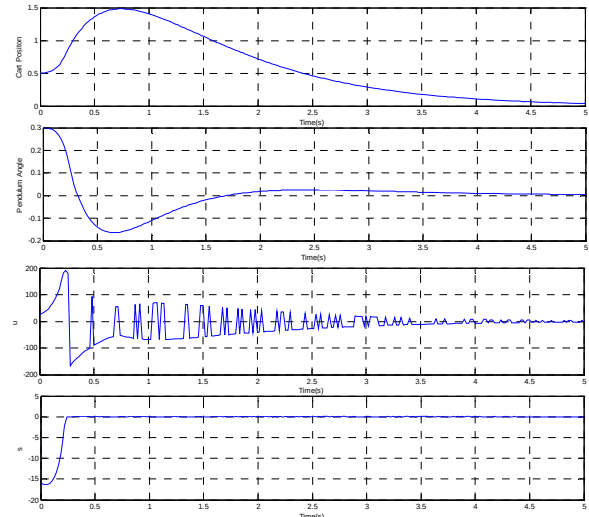
ตอบสนองของระบบก็คือค่าขนาดของสัญญาณควบคุมที่มีค่าสูงมากกว่าตัวควบคุมแบบสไลด์ดิ้งโหมดปกติ ในขณะที่เดียวกันลักษณะของสัญญาณควบคุมก็เกิดการสั่น(Chattering) ขึ้นซึ่งเป็นผลเสียอย่างมากต่อระบบ

6.2 ข้อเสนอแนะ

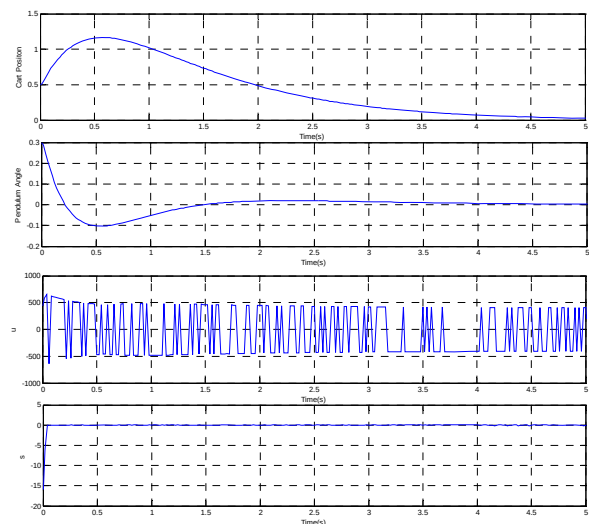
เพื่อแก้ไขข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นแนวทางในการแก้ไขคือการกำหนดขอบเขตของสัญญาณควบคุมให้เป็นข้อกำหนดเพิ่มเติมเพื่อให้กรรมวิธีพันธุกรรมพิจารณาด้วยและในทำนองเดียวกันต้องกำหนดขอบเขตของระนาบการสไลด์ดิ้งเพื่อลดการเกิดการสั่นของสัญญาณควบคุม จากผลการศึกษาสรุปได้ว่าการนำปัญญาประดิษฐ์มาใช้ร่วมกับตัวควบคุมแบบไม่เชิงเส้นสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุมให้ดีขึ้นได้และมีความเป็นไปได้ในการที่จะนำกรรมวิธีปัญญาประดิษฐ์อื่น ๆ มาใช้ในอนาคต แต่อย่างไรก็ตามการใช้วิธีทางปัญญาประดิษฐ์ให้มีประสิทธิภาพก็ควรจะต้องกำหนดเงื่อนไขและขอบเขตให้ถูกต้องชัดเจนครอบคลุมสถานการณ์ต่าง ๆ ในการควบคุมที่อาจจะเกิดขึ้นเพื่อให้ผลลัพธ์ที่ได้สามารถนำไปใช้งานได้จริง

7. เอกสารอ้างอิง

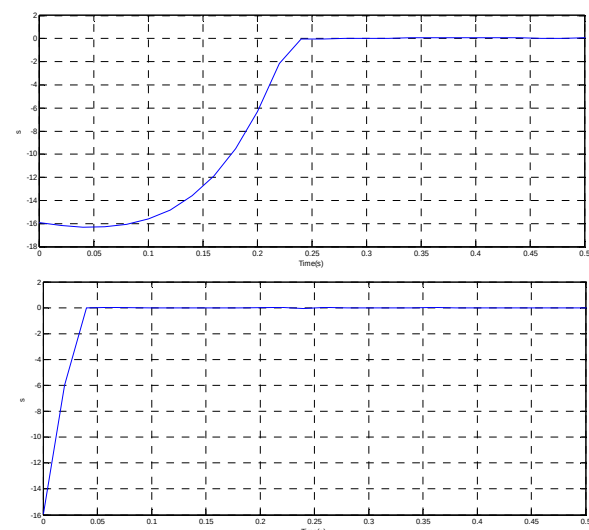
- [1] Chou, W.-D., Lin, F.-J. and Shyu, K.-K. (2003). Incremental motion control of an induction motor servo drive via a genetic-algorithm-based sliding mode controller, IEE Proc.-Control Theory Appl., Vol. 150, No. 3, May 2003, pp. 209 – 220.
- [2] Utkin, V., Guldner, J. and Shi, J. (1999). Sliding Mode Control in Electromechanical Systems, Taylor & Francis.
- [3] Charnprecharut, V., Phaithoonwattanakij, K. and Tiacharoen, S. (2005). Enhanced Variable Structure Control With Fuzzy Logic System, paper presented in the 2005 International Conference on Control, Automation and Systems, KOREA
- [4] Goldberg, D. E. (1989). Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning. Addison-Wesley.



รูปที่ 5 ผลการตอบสนองของตัวควบคุมสไลด์ดิ้งโหมด



รูปที่ 6 ผลการตอบสนองของตัวควบคุมสไลด์ดิ้งโหมด
ที่หาค่าเหมาะสมด้วยกรรมวิธีพันธุกรรม



รูปที่ 7 แสดงผลการเปรียบเทียบ Phase Portrait