

การใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมในการแก้ปัญหา การควบคุมการทรงตัวของดาวเทียมแบบใช้เวลาน้อยที่สุด Using a Genetic Algorithm to Solve a Minimum-Time Satellite Attitude Control Problem

กิตติพงศ์ บุญโล่ง¹ ณชล ไชยรัตน์² และ สุวัฒน์ กุลธนปรีดา³

ศูนย์วิจัยและพัฒนาระบบอัจฉริยะ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

กรุงเทพฯ 10800 โทร 02-9132500 โทรสาร 02-5870026

Kittipong Boonlong, Nachol Chaiyaratana, and Suwat Kuntanapreeda

Research and Development Center for Intelligent Systems (RSIC)

Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok

Bangkok 10800, Thailand, Tel: 02-9132500, Fax: 02-5870026

บทคัดย่อ

บทความนี้เสนอผลลัพธ์การใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (GA) ในการแก้ปัญหาการควบคุมการทรงตัวของดาวเทียมเล็กที่มีการเคลื่อนที่ทั้งสามแกนพร้อมกันโดยใช้เวลาน้อยที่สุด การศึกษากระทำโดยการจำลองการทำงานในคอมพิวเตอร์เพื่อเปรียบเทียบกับกฎการควบคุมแบบ bang-bang (BB) ซึ่งเป็นกฎการควบคุมที่รู้จักกันดีว่าใช้เวลาน้อยที่สุดในกรณีของการเคลื่อนที่เพียงแกนเดียว ผลการศึกษาพบว่าขั้นตอนการควบคุมที่วิธีเชิงพันธุกรรมหาได้สามารถควบคุมการทรงตัวของดาวเทียมสู่ตำแหน่งเป้าหมายได้ด้วยเวลาที่น้อยกว่าการใช้กฎการควบคุม BB ผลลัพธ์โดยรวมเป็นไปอย่างน่าพอใจ

Abstract

This paper presents the use of a genetic algorithm (GA) to solve a minimum-time three-axis satellite attitude control problem. The studies are conducted through computer simulations. The results are then compared with a minimum time solution for the single-axis problem produced by the well-known single-axis bang-bang (BB) control law. The results show that the GA is able to produce a control solution which drives the attitude of the satellite to the desired state in less time than that when the BB is used. The overall results are very satisfactory.

1. บทนำ

ระบบควบคุมการทรงตัว (attitude control system) ถือว่าเป็นระบบย่อยที่สำคัญระบบย่อยหนึ่งที่จะทำให้ภาระกิจของดาวเทียมบรรลุซึ่งจุดประสงค์ตามที่ต้องการ หน้าที่หลักของระบบควบคุมการทรงตัว คือ การหันตัวของดาวเทียมให้ชี้ไปในทิศทางที่ต้องการ เช่น การหันตัวเพื่อให้อานส่งสัญญาณชี้มาที่ตำแหน่งที่ต้องการบนพื้นโลกเพื่อส่งถ่ายสัญญาณ การหันตัวเพื่อให้กล้องวัดรังสีชี้ไปทางดวงอาทิตย์เพื่อวัดการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของดวงอาทิตย์ การหันตัวเพื่อให้ลำตัวอยู่ในทิศทางที่เหมาะสมก่อนจะทำการปรับเปลี่ยนวงโคจร เป็นต้น ระบบควบคุมการทรงตัวมีด้วยกันหลายประเภทขึ้นอยู่กับภาระกิจ (mission) เป็นหลัก การควบคุมแบบ Minimum-time Pointing Control โดยใช้ on/off gas thrusters เป็นตัวอย่างหนึ่งที่มีใช้กันทั่วไป ซึ่งต้องการให้ดาวเทียมสามารถหันชี้ตัวด้วยเวลาที่น้อยที่สุด โดยที่กฎการควบคุม Single-axis minimum-time Bang-Bang ที่ทำงานครั้งละแกนอย่างอิสระค่อนข้างจะรู้จักกันดี [1-2] แต่อย่างไรก็ตาม กฎการควบคุมการทรงตัวนี้ถ้านำมาประยุกต์ใช้ในการหันตัวพร้อมกันสามแกน ยังไม่ใช่ว่ากฎการควบคุมที่ใช้เวลาน้อยที่สุด ผลเฉลยของการทรงตัวที่ใช้เวลาน้อยที่สุดแบบสามแกนสามารถหาได้จากการแก้ปัญหา optimization โดยตรง เช่น ใช้วิธี Dynamics Programming ซึ่งจะมีค่าซับซ้อนสูง และใช้เวลาของคอมพิวเตอร์ในการคำนวณที่มาก

¹ นักศึกษามัธยมศึกษา ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

² อาจารย์ประจำ ภาควิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

³ อาจารย์ประจำหลักสูตรวิศวกรรมการบินและอวกาศ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ในปัจจุบันได้มีการนำความรู้ทางด้านปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligent) โดยเฉพาะ โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Networks) ฟัซซี่ลอจิก (Fuzzy Logics) และขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm) มาประยุกต์ใช้ในการควบคุมอย่างกว้างขวาง ตัวโครงข่ายประสาทเทียมมีข้อดีที่มีค่า Nonlinear Mapping ที่มีความ Generalization ที่สูง ทำให้สามารถใช้ในการประมาณการและควบคุมระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นได้ดี [3-4] แต่โดยทั่วไปยังคงมีปัญหาของเวลาที่ต้องใช้ในการเรียนรู้ อยู่ ถึงแม้ว่าจะมีโครงข่ายประสาทหลายประเภทที่ได้รับการพัฒนาในขีดความสามารถในการเรียนรู้ที่เร็วขึ้นก็ตาม

ฟัซซี่ลอจิกทำงานในลักษณะเลียนแบบการคิดของมนุษย์ [5-6] ทำให้มีข้อดีในความสามารถที่สร้างกฎการควบคุมจากแนวคิดและคำตอบของมนุษย์ได้โดยตรง ในทางกลับกันก็เป็นข้อด้อยด้วย เพราะบางปัญหาที่มีความซับซ้อนสูงซึ่งต้องใช้ความชำนาญมากที่มนุษย์จะหาแนวคิดและคำตอบได้ ดังนั้นถ้าคำตอบไม่สามารถหาได้จะทำให้ไม่สามารถใช้ฟัซซี่ลอจิกได้โดยตรงเช่นกัน

ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมเป็นวิธีการที่เลียนแบบกระบวนการวิวัฒนาการของมนุษย์ [7-8] ซึ่งในปัจจุบันค่อนข้างจะได้รับการยอมรับกันอย่างมากในการใช้เป็นเครื่องมือคณิตศาสตร์สำหรับทำ Optimization ของปัญหาที่มีความซับซ้อนและขัดจำกัด (constraints) สูง ในงานระบบควบคุมได้มีการนำขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมนี้มาใช้หาเส้นทางการเคลื่อนที่และกฎการควบคุมกันอย่างแพร่หลาย โดยเฉพาะในด้านที่เกี่ยวข้องกับ Robotics [9-10]

บทความวิจัยนี้เสนอผลลัพธ์ของการนำขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมมาใช้หาผลเฉลยของการควบคุมการทรงตัวของดาวเทียมเล็กสำหรับการหันชี้ตัวพร้อมกันสามแกนด้วยเวลาที่น้อยที่สุด โดยที่แรงบิดที่ใช้ในการหมุนตัวดาวเทียมได้มาจาก on-off ตัว gas thrusters ที่ติดตั้งอยู่บนดาวเทียม ซึ่งผลลัพธ์ได้เปรียบเทียบกับการใช้กฎการควบคุม Single-axis Bang-Bang (BB) พบว่าผลลัพธ์ที่ได้จากขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมใช้เวลาในการหันชี้ตัวดาวเทียมที่น้อยกว่าของ BB และมี cycle ของการ on-off ตัว thrusters เพียงแกนละหนึ่งครั้งเท่านั้น ซึ่งเป็นข้อดีในเรื่องอายุการใช้งานของอุปกรณ์

2. สมการคณิตศาสตร์ของดาวเทียม

เนื่องจากการศึกษาการออกแบบตัวควบคุมการทรงตัวในงานวิจัยนี้ ดำเนินการโดยการจำลองการทำงานในคอมพิวเตอร์ ดังนั้นสิ่งแรกที่ต้องดำเนินการ คือ การหาสมการคณิตศาสตร์แบบจำลองของดาวเทียม เพื่อใช้ในการจำลองการทำงานต่อไป แบบจำลองนี้สามารถหาได้จากกฎการเคลื่อนที่ ดังนี้

$$M = \frac{dH}{dt} = \frac{dH}{dt} \Big|_B + \omega \times H$$

โดยที่ M คือแรงบิดภายนอกที่กระทำกับดาวเทียม ซึ่งในที่นี้ได้จากการ on ตัว thruster, $H = I\omega$ คือ ค่าโมเมนตัมเชิงมุม, ω คือ ค่าความเร็วเชิงมุม, I คือ เมตริกโมเมนต์ความเฉื่อย, และ subscript $|_B$ แสดงถึงการ derivative เทียบกับ body coordinate และจากการสมมุติให้ดาวเทียมเป็น rigid body และกำหนดให้แกนของ body coordinate ติดตั้ง

ในแนวเดียวกันกับ principal axes ของดาวเทียม จะได้สมการแบบจำลองใหม่ที่รู้จักกันในชื่อ "Euler's moment Equation" ดังนี้

$$M_x = I_{xx}\dot{\omega}_x - (I_{yy} - I_{zz})\omega_y\omega_z$$

$$M_y = I_{yy}\dot{\omega}_y - (I_{zz} - I_{xx})\omega_z\omega_x$$

$$M_z = I_{zz}\dot{\omega}_z - (I_{xx} - I_{yy})\omega_x\omega_y$$

โดยที่ในที่นี้สัญลักษณ์ $\dot{\omega}_i$ หมายถึง $\frac{d\omega_i}{dt} \Big|_B$ และ I_{ij} คือ พจน์ที่ ij

ของเมตริก I จากนั้นทำการแปลงค่า ω ที่หาได้ไปเป็นค่าการทรงตัวเทียบกับ fixed coordinate เขียนในรูปของมุม Euler (roll: ϕ , pitch: θ , yaw: ψ) โดยใช้สมการการแปลง (transformation) ดังนี้

$$\begin{pmatrix} d\phi/dt \\ d\theta/dt \\ d\psi/dt \end{pmatrix} = \frac{1}{\sin\theta} \begin{bmatrix} \sin\psi & \cos\psi & 0 \\ \cos\psi \sin\theta & -\sin\psi \sin\theta & 0 \\ -\sin\psi \cos\theta & -\cos\psi \cos\theta & \sin\theta \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \dot{\omega}_x \\ \dot{\omega}_y \\ \dot{\omega}_z \end{pmatrix}$$

สุดท้ายจะได้สมการคณิตศาสตร์แบบจำลองของดาวเทียมเล็กโดยการรวมสมการ Euler's moment และสมการการแปลงข้างต้นเข้าด้วยกัน ซึ่งมีข้อสังเกตว่าผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นสมการ 6-order nonlinear ODE โดยค่าสเกลประกอบด้วยมุม (ϕ , θ , ψ) และค่าการเปลี่ยนแปลงมุม ($d\phi/dt$, $d\theta/dt$, $d\psi/dt$) นอกจากนี้แล้ว เนื่องจากเราใช้ on/off gas thrusters เป็น actuators ในการสร้างแรงบิด ดังนั้นจะได้ว่า $M_i = u_i T$ โดยที่ $u_i = \{-1, 0, 1\}$ คือ control command และ T คือขนาดของแรงบิดที่เกิดขึ้นจากการ on ตัว thruster และมีข้อสังเกตว่า $u_i = 0$ ก็ต่อเมื่อดาวเทียมมีค่าการทรงตัวเป็นศูนย์ตามที่ต้องการ

3. ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm : GA) ได้รับการพัฒนาขึ้นครั้งแรกในปี 1975 [7] ซึ่งเป็นวิธีการหรือเทคนิคใช้หาค่าที่เหมาะสมที่สุดที่มีลักษณะการทำงานในรูปแบบของการค้นหาคำตอบแบบขั้นตอนเชิงฮิวริสติก (Heuristic) ซึ่งขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมมีรากฐานแนวคิดมาจากทฤษฎีการวิวัฒนาการของ Charles Darwin โดยอิงแนวคิดเรื่องการอยู่รอดของผู้ที่แข็งแรงที่สุด

การทำงานของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมจะเป็นไปในลักษณะของการค้นหาคำตอบแบบคู่ขนาน (Parallel search) โดยคำตอบที่ได้จากการหาคำตอบในรอบหนึ่ง (Generation) นั้นจะผ่านการแปลงเพื่อที่จะนำไปสู่การค้นหาคำตอบที่ดีขึ้นในรอบถัดไป การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นกับคำตอบหรือสมาชิกของประชากรภายในกลุ่มประชากร (Population) หนึ่งรอบนั้นจะเป็นไปเพื่อการสำรวจพื้นที่ในการค้นหา (Search Space) และส่งเสริมให้มีการถ่ายทอดคุณลักษณะที่ดีของคำตอบที่ค้นพบในรอบปัจจุบันไปยังรุ่นถัดไป ซึ่งสุดท้ายจะนำไปสู่คำตอบที่มีค่าเหมาะสมที่สุด (Optimum solution) ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแตกต่างจากเทคนิคการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบมาตรฐานใน 4 กรณีคือ

1. ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมจะทำการค้นหาคำตอบในพื้นที่การค้นหา (Search Space) ของตัวแปรตัดสินใจ (Decision Variable) ของปัญหาของค่าที่เหมาะสมที่สุด (Optimization Problem) โดยที่ตัวแปรตัดสินใจจะถูกเข้ารหัสเป็นสายรหัส ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

จะทำการหาคำตอบจากหลายจุดในพื้นที่ที่เป็นไปได้ในการหาคำตอบไปพร้อมๆกัน

2. การค้นหาคำตอบโดยวิธีนี้จะทำให้โอกาสที่การค้นหานั้นนำไปสู่คำตอบที่เป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดเฉพาะที่ (Local Optimum) ลดน้อยลง
3. ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมจะใช้ข้อมูลที่เป็นผลที่เกิดจากค่าจุดประสงค์ (Objective Value) ในการกำหนดทิศทางในการค้นหาคำตอบในพื้นที่การค้นหานั้น ในขณะที่เทคนิคการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดแบบมาตรฐานนั้นมักจะใช้ข้อมูลที่ได้มาจากอนุพันธ์ (Derivative) ของฟังก์ชันจุดประสงค์ในการกำหนดทิศทางของการหาคำตอบ
4. ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมจะใช้กฎการส่งผ่านเชิงความน่าจะเป็น (Probabilistic Transmission Rule) ในกระบวนการหาคำตอบ ในขณะที่เทคนิคการหาคำตอบที่ดีที่สุดแบบมาตรฐานจะใช้กฎการส่งผ่านเชิงกำหนด (Deterministic Transmission Rule) ในกระบวนการหาคำตอบ

4. วิธีเชิงพันธุกรรมสำหรับควบคุมการทรงตัวดาวเทียม

ในการใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมหาผลลัพธ์ในการควบคุมการทรงตัวดาวเทียมในงานวิจัยนี้ จะเป็นการหาตำแหน่งเวลาที่ดียิ่งที่สุดที่ thrusters ของแต่ละแกนจะทำการเปลี่ยนสภาวะการทำงานจาก +on เป็น -on หรือในทิศทางกลับกัน เพื่อให้เวลาที่ใช้ในการหันตัวซีกกลับไปที่ตำแหน่งการทรงตัวเท่ากับศูนย์น้อยที่สุด ดังนั้นปัญหาจะเป็นแบบ multi-objective ซึ่งมีจำนวน objective functions เท่ากับ 6 ดังนี้

$$\begin{aligned} f_1 &= \sqrt{\phi^2 + \dot{\phi}^2} & f_2 &= \sqrt{\theta^2 + \dot{\theta}^2} \\ f_3 &= \sqrt{\psi^2 + \dot{\psi}^2} & f_4 &= T_\phi \\ f_5 &= T_\theta & f_6 &= T_\psi \end{aligned}$$

โดยที่ ϕ , θ และ ψ คือ ค่ามุมการทรงตัว roll, pitch และ yaw ตามลำดับ เครื่องหมายจุด เหนือตัวแปรหมายถึงค่า time-derivative ของตัวแปรนั้น และ T_i คือ ค่าคาบเวลาที่ใช้ในการหันตัวซีกกลับไปที่ตำแหน่งศูนย์ของการทรงตัวแกน i

ตัวแปรตัดสินใจประกอบขึ้นจากค่าตำแหน่งเวลาของการเปลี่ยนสภาวะของสัญญาณอินพุตของ thrusters แกน roll, pitch และ yaw ซึ่งในที่นี้กำหนดให้ค่าความยาวสายรหัสรวมเท่ากับ 48 โดยที่ความยาวของสายรหัสของตำแหน่งเวลาของแต่ละแกนมีค่าเท่ากัน คือเท่ากับ 16 และมีค่าอยู่ระหว่าง -10.0 และ 10.0 โดยที่ค่าลบหมายถึงการเปลี่ยนสภาวะของ thruster จาก -on เป็น +on และค่าบวกแสดงว่าเปลี่ยนสภาวะจาก +on เป็น -on

ในส่วนของการกระบวนการวิวัฒนาการ จะใช้ค่าความน่าจะเป็นของการคลอสโอเวอร์ (crossover) เท่ากับ 0.75 และค่าความน่าจะเป็นของการกลายพันธุ์ (mutation) เท่ากับ 0.20 โดยมีจำนวนของรุ่นเท่ากับ 50 และจำนวนประชากรเท่ากับ 50 เท่ากัน

อย่างไรก็ตาม เนื่องจากลักษณะเฉพาะของการควบคุมการทรงตัว การเข้าสู่ค่าศูนย์ของแต่ละแกนอาจจะไม่พร้อมกัน ดังนั้นในงานวิจัย

นี้ได้ใช้กฎการควบคุมแบบแบ่งแบบแกนเดียว (Single-axis Bang-Bang) ในการดำเนินการรักษาให้แกนที่เข้าสู่ศูนย์แล้วคงสภาวะที่ตำแหน่งศูนย์ต่อไปเพื่อรอแกนอื่นที่ยังไม่เข้าสู่ศูนย์ โดยที่ทำงานเมื่อค่าความคลาดเคลื่อนของมุมมีค่าน้อยกว่า 0.05 เรเดียน และค่าความคลาดเคลื่อนของความเร็วเชิงมุมมีค่าน้อยกว่า 0.05 เรเดียนต่อวินาที

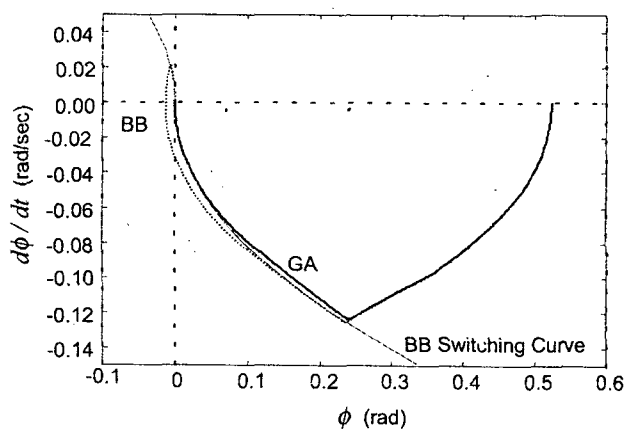
5. ผลลัพธ์การควบคุม

จากการจำลองการทำงานในคอมพิวเตอร์เพื่อเปรียบเทียบผลลัพธ์ของการควบคุมด้วยผลเฉลยที่ได้จากขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (GA) และจากกฎการควบคุมแบบแบ่งแบบแกนเดียว (BB) พบว่าขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมสามารถหาค่าผลเฉลยของการควบคุมที่ใช้เวลาน้อยที่สุดได้อย่างน่าพอใจ โดยใช้เวลาการหันตัวเข้าสู่ศูนย์น้อยกว่าการใช้กฎการควบคุม BB ดังแสดงในตารางที่ 1

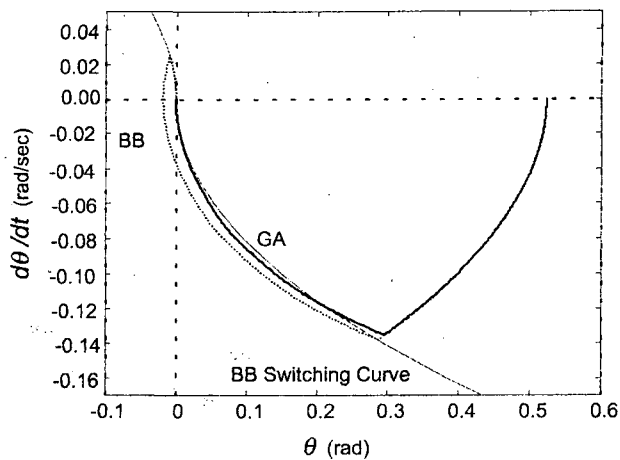
ตารางที่ 1 เปรียบเทียบค่าคาบเวลา

กฎการควบคุม	คาบเวลาที่ใช้ในการเข้าสู่ศูนย์ (วินาที)		
	Roll	Pitch	Yaw
GA	8.2976	7.4886	11.0203
BB	9.0666	9.5951	13.7329

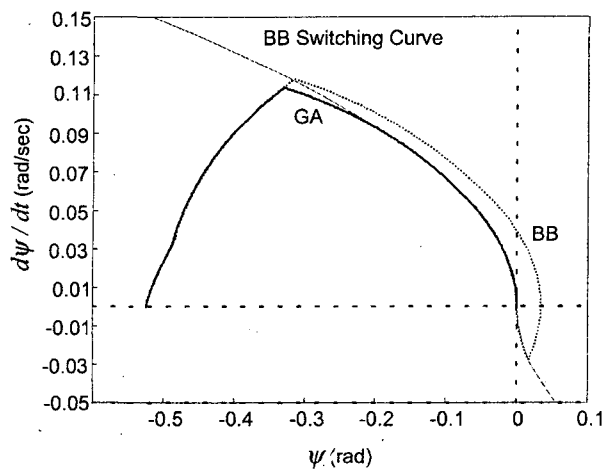
รูปที่ 1-3 เปรียบเทียบเส้นทางการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นจากการใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (GA) และกฎการควบคุมแบบแบ่งแบบแกนเดียว (BB) ของแกน roll, pitch และ yaw ตามลำดับ จะพบว่า GA สามารถขับระบบเข้าสู่ศูนย์ได้อย่างตามที่ต้องการ ในขณะที่ BB จะมีปรากฏการณ์ overshoot เกิดขึ้น ถึงแม้ว่าการเปลี่ยนสภาวะของ thrusters จะเกิดขึ้นถูกต้องตามตำแหน่งของ switching curve ของกฎการควบคุม BB แต่เนื่องจากการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นสามแกนพร้อมกัน ดังนั้นจึงเกิดผลกระทบของ nonlinear coupling ของแต่ละแกน ทำให้เส้นทางการเคลื่อนที่ไม่สอดคล้องกับ switching curve ซึ่งออกแบบมาจากระบบที่เคลื่อนที่แบบแกนเดียว สัญญาณการเปิดของ thrusters ของแต่ละแกนแสดงในรูปที่ 4-6 ซึ่งจะพบว่า การเปลี่ยนสภาวะของ thrusters ของการควบคุมที่ใช้ GA เกิดขึ้นเพียงครั้งเดียวก่อนที่ระบบจะเข้าสู่ศูนย์



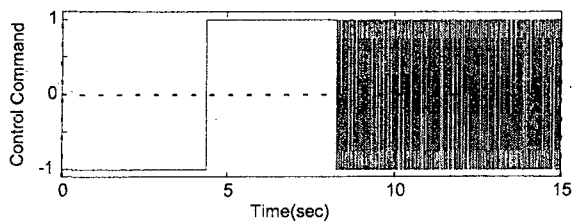
รูปที่ 1 เส้นทางการเคลื่อนที่ของแกน Roll



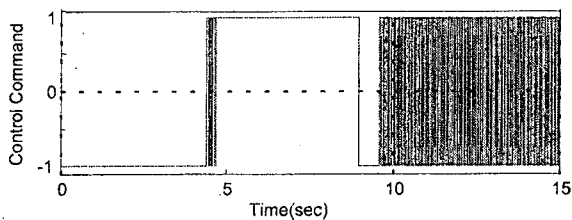
รูปที่ 2 เส้นทางการเคลื่อนที่ของแกน Pitch



รูปที่ 3 เส้นทางการเคลื่อนที่ของแกน Yaw

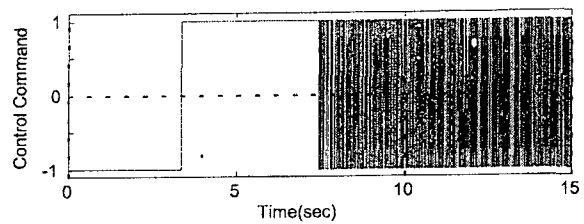


(a)

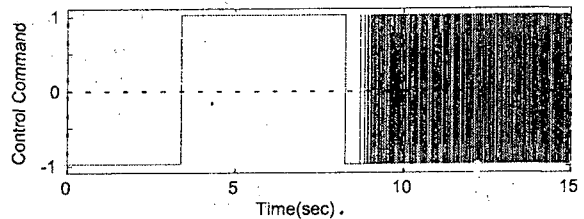


(b)

รูปที่ 4 สัญญาณ thruster ของแกน Roll: (a) GA, (b) BB

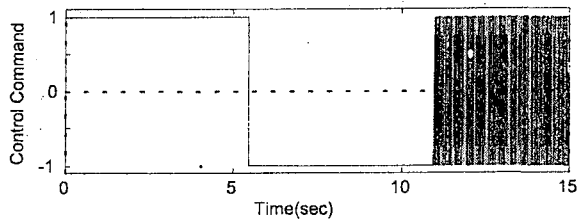


(a)

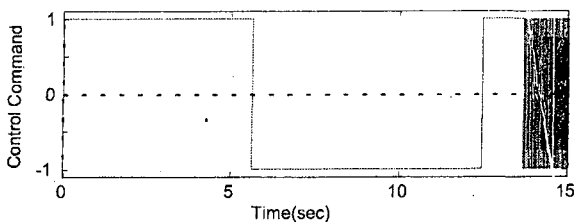


(b)

รูปที่ 5 สัญญาณ thruster ของแกน Pitch: (a) GA, (b) BB



(a)



(b)

รูปที่ 6 สัญญาณ thruster ของแกน Yaw: (a) GA, (b) BB

6. สรุปและงานวิจัยในอนาคต

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาขั้นต้นโดยการจำลองการทำงานในคอมพิวเตอร์ในการใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (GA) ในการหาผลเฉลยการควบคุมการทรงตัวแบบใช้เวลาน้อยที่สุดของดาวเทียมเล็กที่มีการเคลื่อนที่พร้อมกันทั้งสามแกน ผลลัพธ์ของการศึกษาแสดงให้เห็นว่าขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมสามารถหาค่าตัวควบคุมที่เหมาะสมที่สุดตามเงื่อนไขที่ต้องการได้ด้วยเวลาที่น้อยกว่าเมื่อใช้กฎการควบคุมแบบแบบแกนเดียว (BB) ซึ่งเป็นกฎการควบคุมที่รู้จักกันดีว่าใช้เวลาน้อยที่สุดในกรณีของการเคลื่อนที่เพียงแกนเดียว ผลการศึกษาโดยทั่วไปอยู่ในระดับที่น่า

พอใจ แต่ก็มีอีกหลายประเด็นที่ยังคงสามารถเป็นงานวิจัยต่อเนื่องในอนาคตได้ ตัวอย่างเช่น

- ใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (GA) หาผลเฉลยของการควบคุมการทรงตัวที่มีทั้งการ Minimum Time และ Energy พร้อมกัน
- รวมผลลัพธ์จากการใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมที่ได้เข้ากับโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อสร้างเป็น Hybrid Controller ที่มีความอัจฉริยะมากขึ้น
- พัฒนาการคำนวณใหม่ของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมที่สามารถทำงานแบบปรับตัวเองได้สำหรับปัญหาการควบคุมการทรงตัวของดาวเทียม
- ประยุกต์ใช้กับปัญหาดาวเทียมที่มีส่วนที่เป็น flexible element เป็นส่วนประกอบด้วย
- ฯลฯ

เอกสารอ้างอิง

- [1] Wertz, James R., Spacecraft Attitude Determination and Control, Kluwer Academic Pub., 1991.
- [2] Kaplan M., Modern Spacecraft Dynamics and Control, John Wiley and Sons Inc., 1976.
- [3] Narendra, K.S. and K. Parthasarathy, "Identification and control of dynamical systems using neural networks", IEEE Neural Networks, No. 1, 1990.
- [4] Kuntanapreeda, S., R.W. Gunderson and R.R. Fullmer, "Neural network model reference control of nonlinear systems", International Joint Conference on Neural Networks, Baltimore, USA., 1992.
- [5] R.W. Gunderson, G. Olsen, and G. Powell, "A fuzzy-inference scheme for fully autonomous control of Rover class planetary exploration vehicles", The 46th International Astronautical Conf., USA., 1995
- [6] Wang, H.O, K. Tanaka, and M.F. Griffin, "An approach to fuzzy control of nonlinear systems: stability and design issues" IEEE Fuzzy Systems, No. 1, 1996
- [7] Goldberg, D.E., "Genetic Algorithms in Search, Optimization & Machine Learning", Addison Wesley, 1989.
- [8] Michalewicz, Z., "Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs" (2nd ed.), Springer-Verlag, 1994.
- [9] Rana, A. S. and Zalzala, A. M. S., "Near Time-Optimal Collision-free motion planning of robotic manipulators using an evolutionary algorithm", Robotica, Vol 14, 1996.
- [10] Chaiyaratana, N, and Zalzala, A. M. S., "Hybridisation of neural networks and genetic algorithms for on-line trajectory planning", UKACC International Conf. On Control, Cambridge, UK, 2000.