

การระบุเอกลักษณ์ไม่เป็นเชิงเส้นด้วยวิธีการค้นหาแบบตามูสำหรับระบบสองมวลความเฉื่อย

Nonlinear Identification Using Tabu Search for a Two-Inertia System

กองพัน อารีรักษ์¹ สรวุฒิ สุจิตจร² อาทิตย์ ศรีแก้ว³ โยธิน เปรมปรมณีรัชต์⁴

¹ นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา ² รองศาสตราจารย์ ³ อาจารย์

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

⁴ รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ABSTRACT – Tabu search technique is one of artificial intelligent methods appropriate for system identification purposes. This article presents the research results of applying the technique to nonlinear identification problem found in a two-inertia system. The search yields a set of saturation nonlinearity. Review of the search method is given. The test results to find satisfactory search parameters are also presented. These parameters lead to fast and efficient searches in such a way that local optimum can be escaped effectively.

KEY WORDS – Tabu search, nonlinear identification

บทคัดย่อ – วิธีการค้นหาแบบตามูเป็นวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์ ที่เหมาะแก่การนำมาประยุกต์ใช้เพื่อการระบุเอกลักษณ์ระบบ บทความนี้นำเสนอผลงานวิจัยที่ใช้วิธีการดังกล่าวระบุเอกลักษณ์ไม่เป็นเชิงเส้น ที่ปรากฏในระบบสองมวลความเฉื่อย ได้ผลเป็นกลุ่มของลักษณะสมบัติไม่เป็นเชิงเส้นชนิดอิมิตัว บทความนี้ให้การทบทวนวิธีดำเนินงานตามหลักการค้นหาแบบตามู และแสดงผลทดสอบในการหาพารามิเตอร์กำหนดแก้อัลกอริทึมการค้นหา เพื่อส่งผลให้สามารถค้นหาค่าตอบได้รวดเร็วและหลุดออกจากการล่อของค่าตอบเฉพาะอื่น ได้ดี

คำสำคัญ – วิธีการค้นหาแบบตามู, การระบุเอกลักษณ์ไม่เป็นเชิงเส้น

1. คำนำ

อุตสาหกรรมที่ต้องใช้งานระบบขับเคลื่อนทางไฟฟ้ามักประสบปัญหาเนื่องมาจากรีโซแนนซ์การบิด (torsional resonance) ซึ่งเป็นการก้ำกอนเชิงกลในขณะหมุนของมอเตอร์ เพลลา และโหลดที่ต่อคู่ควบกัน การบิดตัวของเพลลาทำให้เกิดความแตกต่างของการหมุนในตำแหน่งเชิงมุมตลอดแนวเพลลา ตำแหน่งเชิงมุมที่เกิดขึ้นนั้นขึ้นอยู่กับความถี่ที่กระตุ้นรวมถึงพารามิเตอร์ทางพลวัตของระบบ และบางความถี่อาจส่งผลให้เกิดมุมของการบิดตัวมีเฟสตรงข้ามกันเป็นผลให้เพิ่มขนาดของการบิดตัวปรากฏการณ์นี้เรียกว่า รีโซแนนซ์การบิด ปรากฏการณ์ดังกล่าวอาจเป็นเหตุให้เกิดความเสียหายต่อโครงสร้างทางกล ระบบมีแนวโน้มที่จะขาดเสถียรภาพได้ง่ายและมีสมรรถนะที่ด้อยลง คณะวิจัยต่างประเทศได้เสนอเทคนิคการแก้ปัญหาการสั่นจากแรงบิดด้วยวิธีการต่างๆ เช่น การควบคุมความเร็วด้วยตัวกรองคาลมาน (Kalman filter) และสถานะอันดับสองเชิงเส้น [9] การใช้ตัวสังเกตบนพื้นฐานการป้อนกลับสถานะ [14] การเลือก

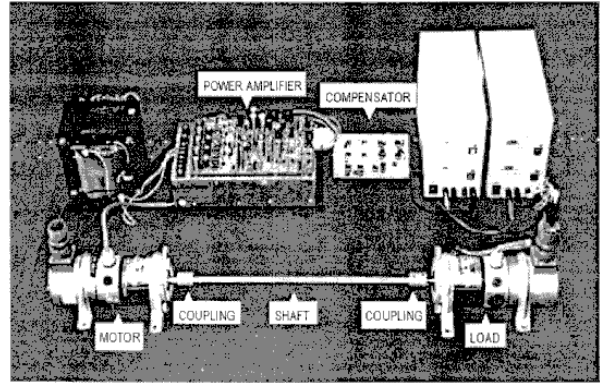
อัตราขยายป้อนกลับสถานะที่เหมาะสม [12] การควบคุมแบบปรับตัวโดยใช้ H_{∞} [6] การควบคุมความเร็วแบบอัตราขยายอันดับสองเชิงเส้นด้วยการชดเชยแรงบิด โหลดป้อนไปหน้า [10] สำหรับคณะผู้วิจัยไทย [15] ได้เสนอแนวทางแก้ไขปัญหาดังกล่าวด้วยการชดเชยทางพลวัตบนรากฐานของทฤษฎีระบบควบคุมคงทน ออกแบบด้วยการกำหนดตำแหน่งโพล-ซีโร เพื่อกำจัดรีโซแนนซ์การบิดในระบบ 2 มวลความเฉื่อย โครงสร้างของระบบควบคุมเป็นชนิด 2 ระดับความอิสระ ตัวชดเชยให้สมรรถนะใน

การกำจัดการก้ำกอนและให้การตอบสนองที่รวดเร็วน่าพึงพอใจ แต่ในงานวิจัยข้างต้นได้สมมติจุดปฏิบัติงานอยู่ที่ระดับเดียว ดังนั้นระบบจึงนิยามให้เป็นเชิงเส้นได้ แต่การใช้งานจริงมีย่านการใช้งานกว้างและวงจรรขยายกำลังมีระบบนิริยคอคยตัดทอนสัญญาณอินพุต ไม่ให้เกินระดับใดระดับหนึ่งที่อยู่กระตุ้นมอเตอร์รุนแรงเกินไปจนเกิดความเสียหาย ตามความเป็นจริงระบบดังกล่าวจึงไม่เป็นเชิงเส้น

งานวิจัยนี้สนใจที่จะศึกษาขั้นตอนการทำงานของระบบที่กว้างขึ้น โดยตรวจสอบว่ามีข้อจำกัดในทางสมรรถนะและเสถียรภาพต่อระบบอย่างไร เพื่อเป็นแนวทางการตัดสินใจในการขยายขั้นตอนการทำงานของระบบควบคุมชุดนี้ ให้ใช้งานในย่านที่กว้างขึ้น ซึ่งจำเป็นที่จะต้องคำนึงถึงความไม่เชิงเส้นของระบบ ดังนั้นบทความนี้จะนำเสนอวิธีการค้นหาลักษณะสมบัติไม่เชิงเส้นของระบบดังกล่าวด้วยวิธีการค้นหาแบบตาม เพราะลักษณะสมบัติไม่เชิงเส้นจะเป็นประโยชน์ต่อการวิเคราะห์สมรรถนะของระบบต่อไป โดยแบ่งหัวข้อในบทความดังนี้ หัวข้อที่ 2 จะกล่าวถึง วิธีการทดสอบระบบสองมวลความเฉื่อย หัวข้อที่ 3 จะกล่าวถึงหลักการของวิธีการค้นหาแบบตาม หัวข้อที่ 4 จะกล่าวถึงการทดสอบอัลกอริทึมที่ได้ทำการพัฒนาขึ้น โดยอาศัยหลักการของวิธีการค้นหาแบบตาม หัวข้อที่ 5 จะแสดงผลการนำอัลกอริทึมที่ผ่านการทดสอบแล้วไปทำการค้นหาลักษณะสมบัติไม่เชิงเส้นของระบบ หัวข้อที่ 6 จะสรุปปัญหา ข้อเสนอแนะและงานวิจัยที่จะดำเนินงานต่อไปในอนาคตรวมถึงสรุปเนื้อหาของบทความนี้

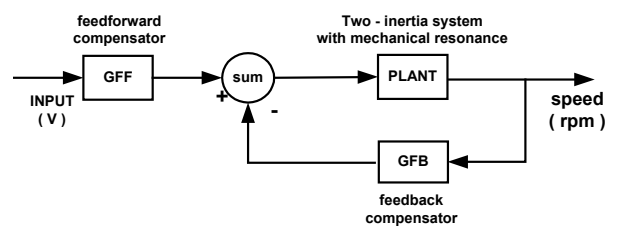
2. การทดสอบระบบสองมวล

การพิจารณาระบบ[15]ที่ได้เสนอแนวทางแก้ไขปัญหาเพื่อกำจัดริโซแนนซ์การบิดในระบบ 2 มวลความเฉื่อย ด้วยการชดเชยทางพลวัตบนรากฐานของทฤษฎีระบบควบคุมคงทน ออกแบบด้วยการกำหนดตำแหน่งโพล-ซีโร ตัวชดเชยให้สมรรถนะในการกำจัดอาการก้ำกั้วและให้การตอบสนองที่รวดเร็วน่าพึงพอใจ แต่การใช้งานของระบบดังกล่าวจำกัดไว้ที่ความเร็วรอบ 143 rpm เนื่องจากถูกจำกัดด้วยความอึดตัวของมอเตอร์ งานวิจัยดังกล่าวพิจารณาเฉพาะย่านที่เป็นเชิงเส้นเท่านั้น อย่างไรก็ตามการพิจารณาบบดังกล่าวในย่านการทำงานที่กว้างขึ้น เป็นสิ่งที่น่าสนใจอย่างมาก เนื่องจากการใช้งานจริงมีขั้นตอนการทำงานที่กว้าง บทความนี้จะสนใจที่จะศึกษาย่านการทำงานของระบบที่กว้างขึ้น โดยอาศัยตัวชดเชยชุดเดิมจากงานวิจัยที่ได้ทำไว้แล้ว [15] เพื่อเป็นแนวทางการตัดสินใจในการขยายขั้นตอนการทำงานของระบบควบคุมชุดนี้ ให้ใช้งานในย่านที่กว้างที่สุดเท่าที่จะทำได้ โดยไม่ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะ เสถียรภาพและผลการตอบสนองของระบบ



รูปที่ 1. ระบบสองมวลที่จัดสร้างขึ้นและส่วนประกอบต่างๆ ที่ใช้ในการทดลองของงานวิจัยที่ได้ทำไว้แล้ว [1]

การพิจารณาในระบบในย่านการทำงานที่กว้างขึ้น สิ่งแรกที่ต้องกระทำคือการค้นหาลักษณะสมบัติไม่เชิงเส้นของระบบว่ามีลักษณะอย่างไร และปรากฏที่ตำแหน่งใดบ้าง ดังนั้นบทความนี้จะนำเสนอวิธีการค้นหาลักษณะสมบัติไม่เชิงเส้น ด้วยวิธีการค้นหาแบบตาม ซึ่งจำเป็นต้องอาศัยข้อมูลที่ได้จากการทดสอบระบบ ดังรูปที่ 1 จากรูปพบว่าระบบที่ทำการทดสอบประกอบด้วย ตัวขับเคลื่อนซีโร โวมอเตอร์ ทำหน้าที่จ่ายไฟให้กับมอเตอร์ และคอยตัดสัญญาณอินพุตไม่ให้เกินระดับใดระดับหนึ่งเพื่อป้องกันไม่ให้มอเตอร์เกิดความเสียหาย, ชุดควบคุมที่ประกอบด้วยตัวชดเชยในวิถีป้อนกลับ (feedback compensator) มีผลในการกำหนดตำแหน่งโพลและเสถียรภาพของระบบ และตัวชดเชยในวิถีไปหน้าหรือตัวชดเชยอินพุต (input compensator) หรือ พรีฟิลเตอร์ (prefilter) มีผลต่อการปรับปรุงสมรรถนะและผลตอบสนองของระบบตามต้องการ



รูปที่ 2. บล็อกไดอะแกรมของระบบสองมวลที่สร้างขึ้น

แบบจำลองของระบบสองมวล $G_p(s)$ ได้มาจากการระบุเอกลักษณ์ ARX ส่วนการออกแบบตัวชดเชยในวิถีไปหน้า $G_{FF}(s)$ และตัวชดเชยในวิถีป้อนกลับ $G_{FB}(s)$ อาศัยวิธีการกำหนดตำแหน่งโพล-ซีโร แบบคงทนที่มีโครงสร้างแบบ 2 ระดับขั้นเสรี (2 – degree – of – freedom : 2 - DOF) โดยใช้เทคนิคพีชคณิตเชิงเส้น [1]

จากรูปที่ 2 ฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบสองมวล, ตัวชดเชยไปหน้าและตัวชดเชยป้อนกลับใช้ค่าต่างๆ ดังนี้

$$G_p(s) = \frac{1.325 * 10^6}{s^3 + 13.388s^2 + 16.297 * 10^4 s + 73.117 * 10^4} \tag{1}$$

$$G_{FF}(s) = 15.093 \frac{s^3 + 6 * 10^4 s^2 + 1.2 * 10^7 s + 8 * 10^9}{s^3 + 7.186 * 10^4 s^2 + 19.160 * 10^6 s} \tag{2}$$

$$G_{FB}(s) = \frac{16.84 * 10^4 s^3 + 69.67 * 10^5 s^2 + 14.98 * 10^8 s + 12.07 * 10^{10}}{s^3 + 7.18 * 10^4 s^2 + 19.16 * 10^6 s} \tag{3}$$

2.1 ขั้นตอนการทดสอบระบบสองมวล

ขั้นตอนที่ 1 ทดสอบระบบที่แรงดันอินพุตเท่ากับ 1 โวลต์ (จุดปฏิบัติการ) โดยใช้อุปกรณ์ตามรูปที่ 1

ขั้นตอนที่ 2 วัดความเร็วและจับสัญญาณแรงดันที่เอาต์พุต

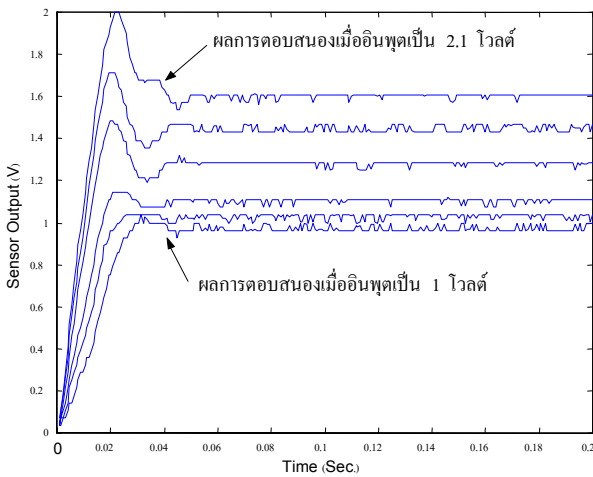
ขั้นตอนที่ 3 จัดเก็บข้อมูลลงคอมพิวเตอร์

ขั้นตอนที่ 4 ดำเนินการซ้ำตามขั้นตอนที่ 2-3 โดยเปลี่ยนแรงดันอินพุตเป็น 1.1, 1.3, 1.5, 1.7, 1.9 และ 2.1 โวลต์ ตามลำดับ

2.2 ผลการทดสอบระบบสองมวล

ตารางที่ 1. ความเร็วที่วัดได้จากการทดสอบ

| อินพุต (โวลต์) | ความเร็ว (rpm) | เอาต์พุตของเซนเซอร์ (V) |
|----------------|----------------|-------------------------|
| 1.0 | 143 | 0.95 |
| 1.1 | 144 | 0.98 |
| 1.3 | 146 | 1.04 |
| 1.5 | 150 | 1.10 |
| 1.7 | 179 | 1.30 |
| 1.9 | 201 | 1.42 |
| 2.1 | 223 | 1.60 |

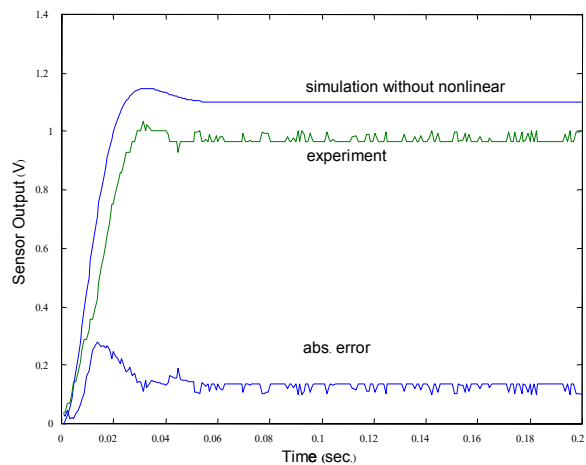


รูปที่ 3. รูปสัญญาณเอาต์พุตจากเซนเซอร์วัดความเร็วที่ได้จากการทดสอบ

ผลการทดสอบระบบสองมวลความถี่ดังที่ได้ดำเนินการตามขั้นตอนที่อธิบายไว้ในหัวข้อ 2.1 ได้รับการแสดงไว้ในรูปที่ 3 และอัตราเร็วคงตัวที่วัดได้จากการทดสอบแสดงไว้ในตารางที่ 1 อาจสังเกตจากการทดสอบได้ว่า เมื่อมีการขยายงานการทำงานของระบบดังกล่าว

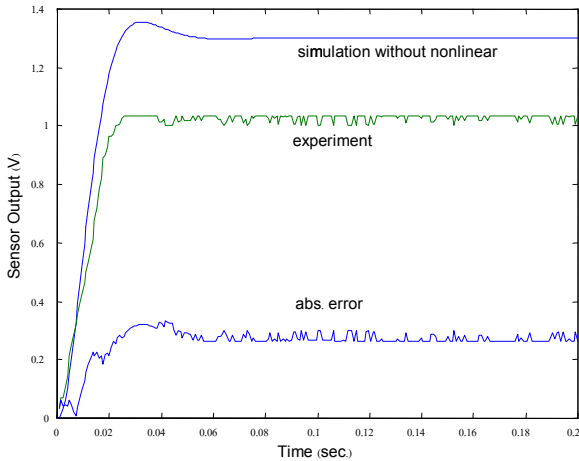
ระบบมีความไม่เป็นเชิงเส้นค่อนข้างสูง เพื่อเป็นการยืนยันสมมุติฐานดังกล่าวจึงทำการเปรียบเทียบผลการทดลองในรูปที่ 3 กับผลการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์อาศัยแบบจำลองเชิงความสัมพันธ์ (1) (2) และ (3) นำมาสร้างเป็นแบบจำลองของระบบรวมที่มีโครงสร้างดังรูปที่ 2 ผลการเปรียบเทียบแสดงได้ดังนี้

อินพุตเท่ากับ 1.1 โวลต์



รูปที่ 4. การเปรียบเทียบผลที่แรงดันอินพุตเท่ากับ 1.1 โวลต์

อินพุตเท่ากับ 1.3 โวลต์



รูปที่ 5. การเปรียบเทียบผลที่แรงดันอินพุตเท่ากับ 1.3 โวลต์

จากผลการทดสอบดังรูปที่ 4 และ 5 พบว่าผลการทดสอบจริงกับผลการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์มีความคลาดเคลื่อนค่อนข้างสูง สำหรับค่าความคลาดเคลื่อนที่แรงดันอินพุตต่างๆ สรุปได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2. ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างผลการทดสอบจริงกับผลการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์

| อินพุต (โวลต์) | ความคลาดเคลื่อน (sum square error) |
|----------------|------------------------------------|
| 1.1 | 4.9457 |
| 1.3 | 17.8222 |
| 1.5 | 36.8377 |
| 1.7 | 40.5674 |
| 1.9 | 48.6716 |
| 2.1 | 54.9896 |

จากตารางที่ 2 ค่าความคลาดเคลื่อนมีค่าค่อนข้างสูง สาเหตุเนื่องมาจากแบบจำลองที่ใช้ในการจำลองสถานการณ์เป็นเชิงเส้นไม่ได้คำนึงถึงความไม่เป็นเชิงเส้นของระบบซึ่งอาจเกิดได้จาก

- การอิมิตัวของออปแอมป์ในส่วนของตัวชดเชยไปหน้าและตัวชดเชยป้อนกลับ [5]
- การอิมิตัวของสนามแม่เหล็กในมอเตอร์ [13]
- เนื่องจากอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยเป็น ดีซี เซอร์โวมอเตอร์ 2 ตัวของบริษัท ซัน โย เดนกิ (Sanyo Denki Co., Ltd) รุ่น U178T ซึ่งมีทาโคมิเตอร์ต่อคู่ควบอยู่ด้วย ผนวกกับตัวขับ (driver)รุ่น PDT-203-30 ของบริษัทเดียวกัน วงจรขยายกำลังของอุปกรณ์ดังกล่าวมีระบบนิรภัย คอยตัดทอนสัญญาณอินพุตไม่ให้เกินระดับใดระดับหนึ่งเพื่อป้องกันไม่ให้มอเตอร์เกิดความเสียหาย

จากผลการทดสอบและสมมุติฐานข้างต้น สรุปได้ว่า การขยายย่านการทำงานของระบบสองมวลความถี่ของงานวิจัยที่ได้ทำมาแล้ว ระบบดังกล่าวจะต้องคำนึงถึงความไม่เป็นเชิงเส้น ดังนั้นบทความนี้จะนำเสนอวิธีการค้นหาลักษณะสมบัติไม่เป็นเชิงเส้นของระบบด้วยวิธีการค้นหาแบบตาบ ซึ่งเป็นวิธีการที่ใช้เวลาในการค้นหาคำตอบได้รวดเร็วและให้คำตอบได้ใกล้กับจุดคำตอบที่ดีที่สุด (near global optimum) ถ้าเทียบกับวิธีการค้นหาอื่นๆ [16] ลักษณะสมบัติไม่เป็นเชิงเส้นเมื่อหามาได้ ก็จะสามารถนำไปวิเคราะห์สมรรถนะและเสถียรภาพของระบบได้อย่างถูกต้องแม่นยำ รวมถึงนำไปประกอบการพิจารณาปรับปรุงสมรรถนะหากต้องการอีกด้วย

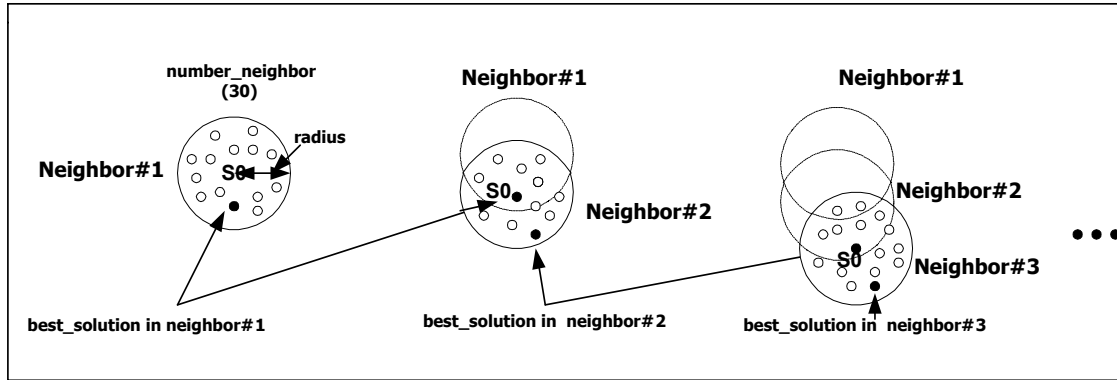
3. หลักการของวิธีการค้นหาแบบตาบ

วิธีการค้นหาแบบตาบ เป็นวิธีการที่นำมาประยุกต์ใช้กับการแก้ปัญหาสำหรับงานที่ต้องการหาคำตอบที่ดีที่สุด (Optimization) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ Glover เป็นผู้ริเริ่มเสนอแนวคิดวิธีการค้นหาแบบตาบไว้เมื่อปี ค.ศ. 1977 ซึ่งได้รับคำอธิบายไว้ใน [8] และหลังจากนั้นก็เป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากวิธีการดังกล่าวสามารถหลีกเลี่ยงคำตอบบวงแคบเฉพาะถิ่น (local optimum) และดำเนินการค้นหาคำตอบต่อไปเรื่อยๆจนกระทั่งได้คำตอบที่ใกล้ความเป็นวงกว้าง (near global optimum) [2, 3, 8] นอกจากนั้นเมื่อไม่นานมานี้ได้มีการศึกษาเปรียบเทียบสมรรถนะของเทคนิคการค้นหาแบบ Sequential Quadratic Programming (SQP), Evolutionary Programming (EP) และ Tabu Search (TS) [16] กับปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดภายใต้เงื่อนไขไม่เป็นเชิงเส้น พบว่าวิธีการค้นหาแบบตาบมีสมรรถนะที่ดีที่สุด ทั้งด้านความแม่นยำในคำตอบและความเร็วในการค้นหา ปัญหาที่ [16] ศึกษานั้นเป็นการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดภายใต้เงื่อนไขบังคับไม่เป็นเชิงเส้น EP ใช้เวลาในการค้นหาคำตอบนานที่สุด ส่วน SQP และ TS ใช้เวลา 62.3% และ 18.6% ของเวลาที่ EP ใช้ตามลำดับ

3.1 องค์ประกอบของวิธีการค้นหาแบบตาบ

องค์ประกอบของวิธีการค้นหาแบบตาบที่แตกต่างจากวิธีการค้นหาแบบอื่นๆ คือ มีเกณฑ์ความเป็นตาบ (tabu list criteria) และ มีเกณฑ์ความปรารถนา (aspiration criteria) ซึ่ง

- “เกณฑ์ความเป็นตาบ” เป็นส่วนที่คอยเก็บข้อมูลของคำตอบในอดีตของกระบวนการค้นหานั้นๆ เพื่อเป็นตัวกำหนดการค้นหาคำตอบว่าจะมีทิศทางไปทางใด หลักการออกแบบเกณฑ์ความเป็นตาบจะมีลักษณะแตกต่างกันออกไป ขึ้นอยู่กับปัญหาแต่ละชนิด



รูปที่ 6. ภาพอธิบายการทำงาน

- “เกณฑ์ความปรารถนา” เป็นเงื่อนไขที่จะใช้ในบางครั้งที่จำเป็นจะต้องเลือกคำตอบที่อยู่ในเกณฑ์ความเป็นคาบ งานบางชนิดที่ปัญหาไม่ซับซ้อนไม่จำเป็นต้องพึ่งส่วนนี้ก็ได้ เกณฑ์ความเป็นคาบก็เพียงพอที่จะค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดได้

3.2 อธิบายกลไกการทำงานของวิธีการค้นหาแบบคาบ

ความหมายของคำศัพท์ที่ใช้ในการอธิบายการทำงาน

radius = ขอบเขตของการสุ่มในแต่ละรอบของการทำงาน

number_neighbor = จำนวน neighborhood ที่ต้องการสุ่มในแต่ละ search_space

neighbor_list = ส่วนที่เก็บค่า neighborhood ตามจำนวนที่กำหนด (tabu list)

best_neighbor = ค่า neighborhood ที่เป็น local optimum

best_error = ค่าความคลาดเคลื่อนที่เป็น local optimum

overall_neighbor = ค่า neighborhood ที่เป็น near global optimum

overall_best_error = ค่าความคลาดเคลื่อนที่เป็น near global optimum

n = จำนวนรอบในการค้นหาคำตอบ

xlimit = ขอบเขตของพารามิเตอร์แต่ละตัว

S0 = ค่าเริ่มต้นในแต่ละ search_space

S1, S2, S3,...Sn = ค่าที่เก็บไว้ใน neighbor_list

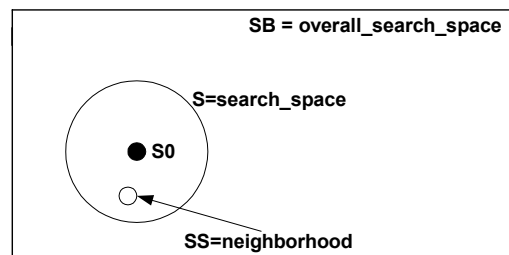
cost = ค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้จากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (objective function)

หลักการทำงาน

ขั้นตอนที่ 1 โหลดข้อมูลจริงที่ได้จากการทดลอง

ขั้นตอนที่ 2 กำหนดค่า S0 ซึ่งเป็นคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมดที่อยู่ใน overall_search_space ดังรูปที่ 6 และ 7 โดยทำการหาค่า S0 จากการสุ่มคำตอบ

ขั้นตอนที่ 3 เริ่มต้นจากคำตอบที่มีอยู่ โดยกำหนดให้คำตอบที่มีอยู่เป็นคำตอบที่ดีที่สุด $best_neighbor = S0$ และค่า cost ของคำตอบที่ดีที่สุด กำหนดให้เป็น $best_error$ ซึ่งค่าดังกล่าวได้จากฟังก์ชันตรวจสอบค่าความคลาดเคลื่อนหรือฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (cost หรือ objective function) ในงานวิจัยนี้ ค่า cost คือ ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างข้อมูลที่ได้ออกจากการทดลองจริงกับข้อมูลที่ได้ออกจากการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ แสดงด้วยสมการ (4) การค้นหาคำตอบจะทำได้เรื่อยๆจนได้ค่า cost น้อยที่สุดตามที่ได้จัดตั้งค่า cost ไว้ก่อนล่วงหน้า

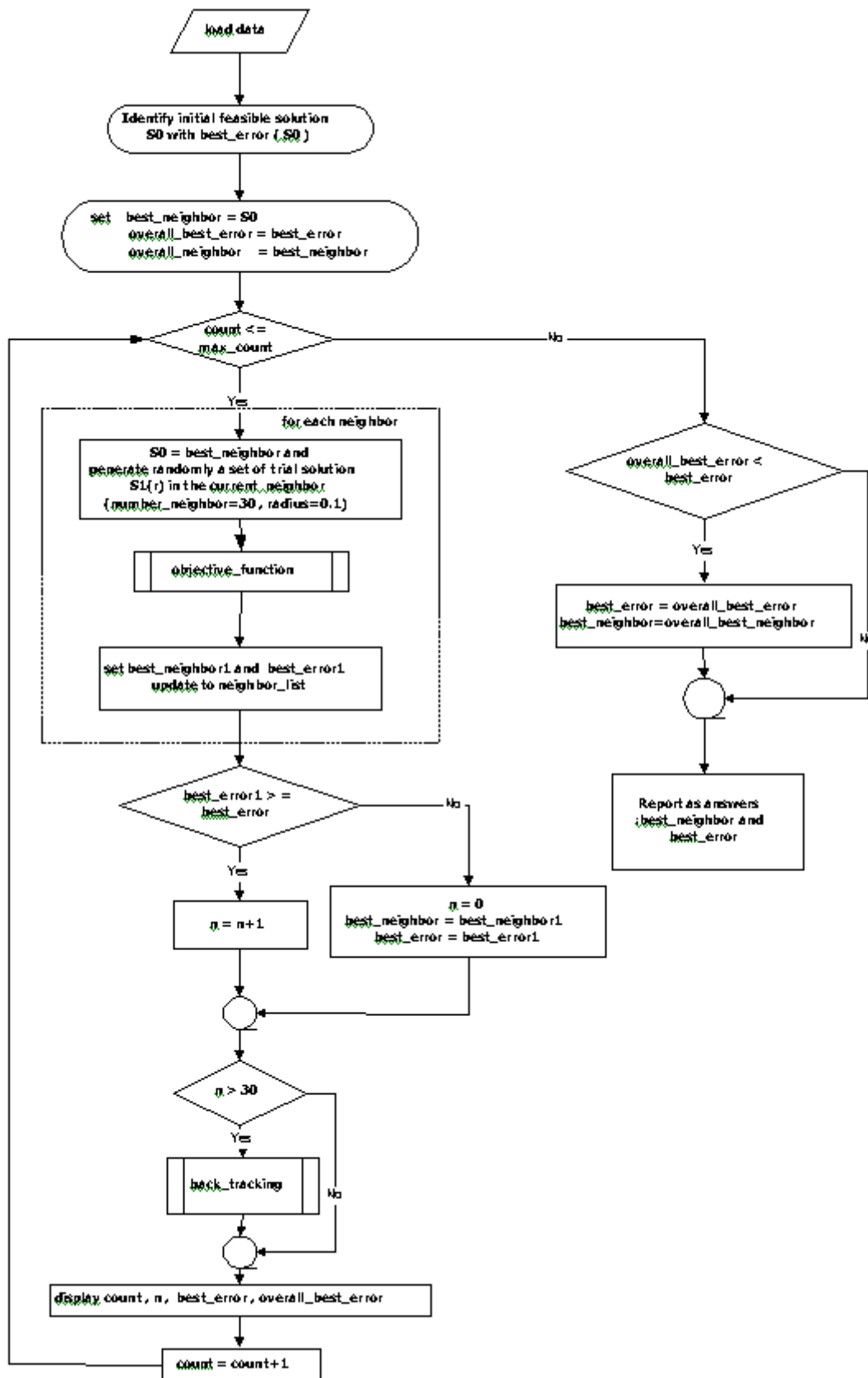


รูปที่ 7. ลักษณะของ space ที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ

ขั้นตอนที่ 4 จาก S0 ดำเนินการเคลื่อนย้ายในลักษณะสุ่มเท่ากับจำนวน number_neighbor ในขอบเขตของ search_space ซึ่งค่าดังกล่าวขึ้นอยู่กับค่า radius

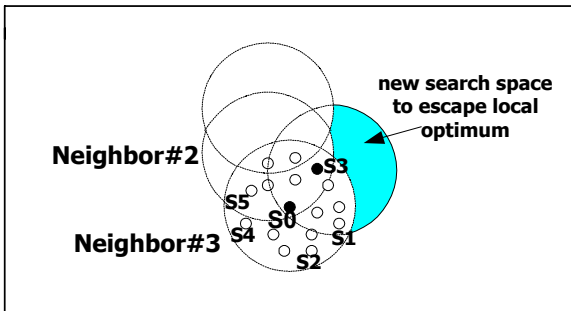
ขั้นตอนที่ 5 ค้นหาหาค่า cost ของสมาชิกแต่ละตัวและเลือกค่า cost ที่ดีที่สุด โดยกำหนดให้ค่า cost ดังกล่าวเท่ากับ $best_error$ และ ให้คำตอบนี้เป็น $best_neighbor$ ค่า cost ในที่นี้ต้องมีค่าน้อยกว่าค่า cost ของ S0 ถ้าไม่สามารถหาคำตอบได้ข้ามไปทำในขั้นตอนที่ 7 เพื่อหลีกเลี่ยงการลื่นของคำตอบเฉพาะถิ่น ถ้าสามารถหาคำตอบได้ให้ทำตามขั้นตอนต่อไป นอกจากนี้ในขั้นตอนที่ 5 จะเก็บค่าที่ได้จากการสุ่ม 5 ครั้งล่าสุดไว้ใน neighbor_list เพื่อนำไปใช้ในส่วนของการย้อนรอยการค้นหา (back_tracking) ต่อไป ซึ่งเป็นส่วนที่ได้พัฒนาปรับปรุงขึ้น ให้การค้นหาแบบดั้งเดิมทำงานได้ดีขึ้นในการค้นหาคำตอบ (ในบทความนี้จะขอเรียก back_tracking ต่อจากนี้ไป รายละเอียดอยู่ในขั้นตอนที่ 7)

Flow chart for the tabu-search algorithm



รูปที่ 8. แผนภูมิการทำงานของอัลกอริทึมที่อาศัยหลักการทํางานของวิธีการค้นหาแบบตํานู

ขั้นตอนที่ 6 กำหนดให้ S0 เท่ากับ best_neighbor ที่ได้จากขั้นตอนที่ 5 จากนั้นเริ่มทำในขั้นตอนที่ 3 ใหม่



รูปที่ 9. ภาพแสดงการทำงานในช่วง back_tracking

ขั้นตอนที่ 7 จากการเฟ้นสุ่มในขั้นตอนที่ 5 ถ้าไม่มีสมาชิกใดๆที่ให้ค่า cost ต่ำกว่าค่า cost ของ S0 ให้ทำการกำหนดค่า S0=S3 โดยที่ค่า S3 คือค่าที่ได้จากการเฟ้นสุ่มในอดีต จัดเก็บอยู่ใน neighbor_list ดังที่ได้กล่าวไว้แล้ว การดำเนินการในขั้นตอนนี้เป็นการย้อนรอยการค้นหากลับไปยังค่าที่เคยค้นหาในอดีต เพื่อจะเริ่มทำการค้นหาใหม่ในทิศทางที่แตกต่างไปจากเดิม สังเกตได้ว่า การย้อนรอยการค้นหาก่อให้เกิดพื้นที่การค้นหาคำตอบใหม่ แสดงได้ดังรูปที่ 9 พื้นที่ดังกล่าวทำให้การดำเนินการค้นหาคำตอบ สามารถหลีกเลี่ยงจากการล่อลวงของคำตอบวงแคบเฉพาะถิ่นได้อย่างมีประสิทธิภาพ วิธีการนี้จะเรียกโดยรวมว่า back_tracking จากนั้นเมื่อทำตามขั้นตอนนี้เสร็จสิ้นกลับไปทำตามขั้นตอนที่ 3 ใหม่ ภาพรวมของการทำงานค้นหาคำตอบด้วยวิธีตามจากที่กล่าวมาข้างต้น แสดงได้ด้วยแผนภูมิในรูปที่ 8

ลักษณะการทำงานของวิธีการค้นหาแบบตามข้างต้น ยังมีได้กล่าวถึงเงื่อนไขการยุติการค้นหาคำตอบ โดยทั่วไปกระทำได้สองแนวทางคือแนวทางแรก กำหนดวงรอบของการค้นหาคำตอบ (max_count) เช่น กำหนดว่าให้ค้นหา 3,000 รอบแล้วยุติ หรือแนวทางที่สอง กำหนดค่าตัวเลขจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (μ) ซึ่งได้มาจากการคำนวณซ้ำๆ เพื่อศึกษาพลวัตของระบบ งานวิจัยนี้เลือกเงื่อนไขการยุติตามแนวทางที่สอง ซึ่งจะกล่าวรายละเอียดต่อไปในหัวข้อที่ 5 ดังนั้นการกำหนดค่า max_count ในแผนภูมิรูปที่ 8 จะกำหนดค่าไว้มากพอสมควรประมาณ 1,000 รอบ เพื่อให้การค้นหาคำตอบดำเนินไปเรื่อยๆ ไล่ค่าตัวเลขจากฟังก์ชันวัตถุประสงค์ตามที่กำหนดไว้แต่อย่างไรก็ตามการพิจารณาเช่นนี้ต้องมั่นใจว่าอัลกอริทึมที่พัฒนาขึ้นมีความสามารถพอที่จะหลุดจากการล่อลวงของคำตอบที่เป็นวงแคบเฉพาะถิ่น การทดสอบอัลกอริทึมเพื่อให้เกิดความมั่นใจก่อนนำไปใช้งาน ได้รวบรวมไว้ในหัวข้อที่ 4

4. การทดสอบอัลกอริทึม

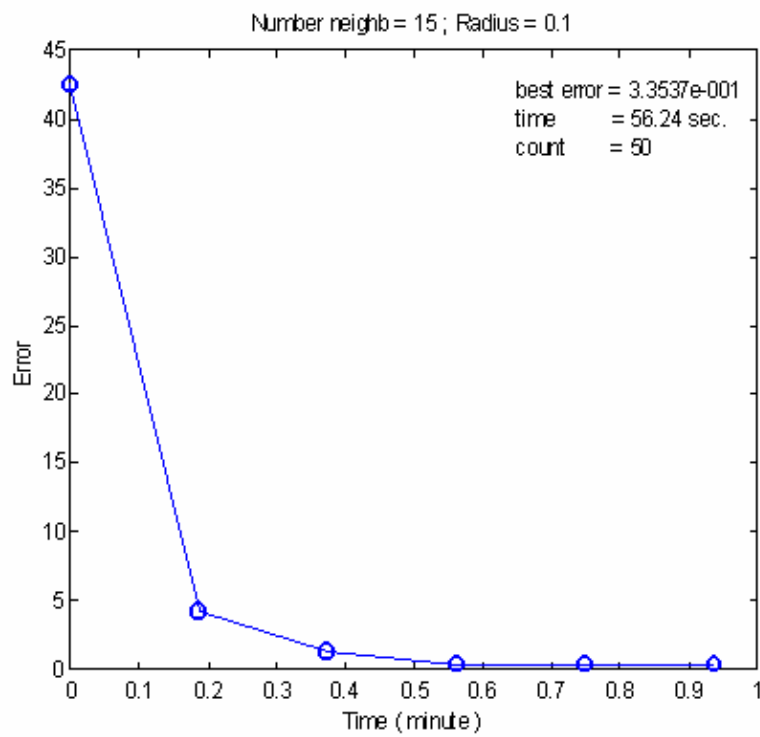
จากคำอธิบายหลักการทำงานของอัลกอริทึม แสดงให้เห็นว่าค่า radius และ number_neighbor เป็นค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญที่ใช้ในการเฟ้นสุ่มคำตอบ ดังนั้นก่อนที่จะนำอัลกอริทึมมาใช้งานจำเป็นต้องทำการทดสอบอัลกอริทึม เพื่อให้ได้ค่า radius และ number_neighbor ที่เหมาะสม ขั้นตอนการทดสอบกระทำโดยการปรับเปลี่ยนค่าดังกล่าว ดังต่อไปนี้

- (1) number_neighbor = 15 radius = 0.10
- (2) number_neighbor = 30 radius = 0.10
- (3) number_neighbor = 50 radius = 0.10
- (4) number_neighbor = 15 radius = 0.05
- (5) number_neighbor = 15 radius = 0.20

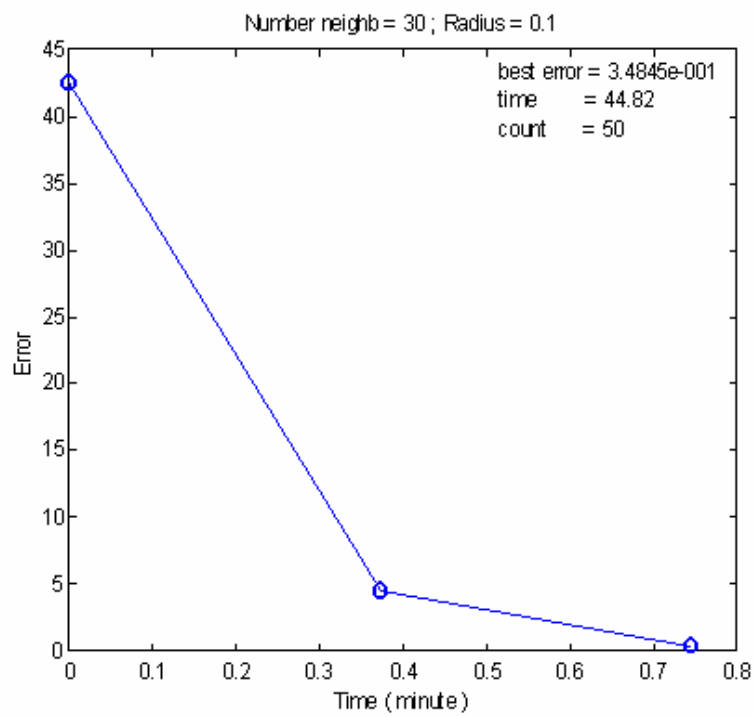
การทดสอบในแต่ละกรณีจะทำการทดสอบกับระบบที่แสดงดังรูปที่ 16 ซึ่งเป็นรูปแบบ Lure's problem [7, 17] โดยกำหนดจุดเริ่มต้น (S0) ที่จุดเดียวกันและจะทำการค้นหาคำตอบไปเรื่อยๆจนกว่าค่าความคลาดเคลื่อนจะลดลงมาอยู่ที่ค่าน้อยกว่า 0.375 จึงจะยุติการค้นหาคำตอบ ในระหว่างการค้นหาจะทำการบันทึกผลและทำการพล็อตกราฟระหว่างค่าความคลาดเคลื่อนกับเวลาที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ ซึ่งได้ผลการทดสอบดังที่แสดงไว้ในรูปที่ 10 ถึง 14

จากรูปที่ 10 ถึง 14 และตารางที่ 3 สรุปได้ว่าค่า number_neighbor = 30 และค่า radius = 0.1 จะให้คำตอบที่ดีที่สุด โดยใช้เวลา 44.82 วินาทีหรือทำการค้นหาคำตอบ 3 รอบ โดย Pentium III 733 MHz ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ค่าดังกล่าวในการนำไปเฟ้นสุ่มคำตอบต่อไป อย่างไรก็ตามเพื่อเป็นการยืนยันว่าอัลกอริทึมที่ได้พัฒนาขึ้น โดยอาศัยหลักการวิธีการค้นหาแบบตาม และ back_tracking สามารถค้นหาคำตอบที่ใกล้เคียงความเป็นวงกว้างได้ จึงทำการทดสอบ โดยเลือกค่า number_neighbor และค่า radius ที่ได้จากการทดสอบ ทำการค้นหาคำตอบเป็นจำนวน 50 รอบ และทำการบันทึกแนวโน้มการลดลงของค่าความคลาดเคลื่อนเทียบกับเวลา ผลของการทดสอบแสดงดังรูปที่ 15

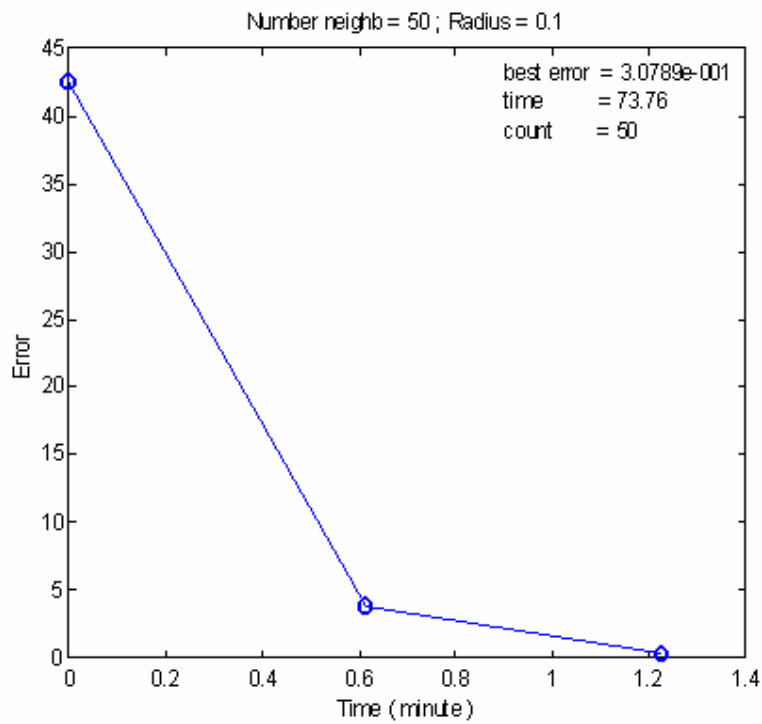
รูปที่ 15 แสดงให้เห็นว่าอัลกอริทึมที่พัฒนาขึ้นสามารถที่จะค้นหาคำตอบที่ใกล้เคียงความเป็นวงกว้างได้ เนื่องจากผลการทดสอบสามารถหลุดจากจุดคำตอบวงแคบเฉพาะถิ่นได้ถึง 2 ครั้งในช่วงการค้นหาเพียง 50 รอบ จากที่กล่าวมาข้างต้น ขั้นตอนการทดสอบอัลกอริทึมถือว่าเป็นสิ่งสำคัญในการที่จะนำวิธีการทางปัญญาประดิษฐ์มาประยุกต์ใช้งานเกี่ยวกับการหาคำตอบที่ดีที่สุด เพื่อเป็นการตรวจสอบอัลกอริทึมให้เกิดความมั่นใจได้ว่า คำตอบที่ได้จากการค้นหาจะเป็นคำตอบที่ดีที่สุด ก่อนที่จะนำอัลกอริทึมดังกล่าวไปใช้งานจริง



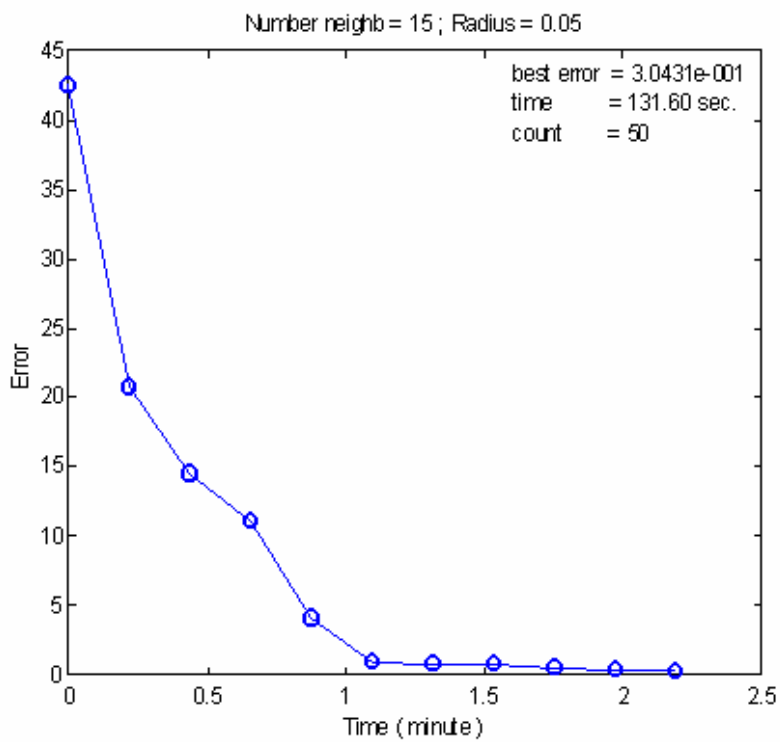
รูปที่ 10. ผลการทดสอบเมื่อ number_neighbor = 15 radius = 0.10



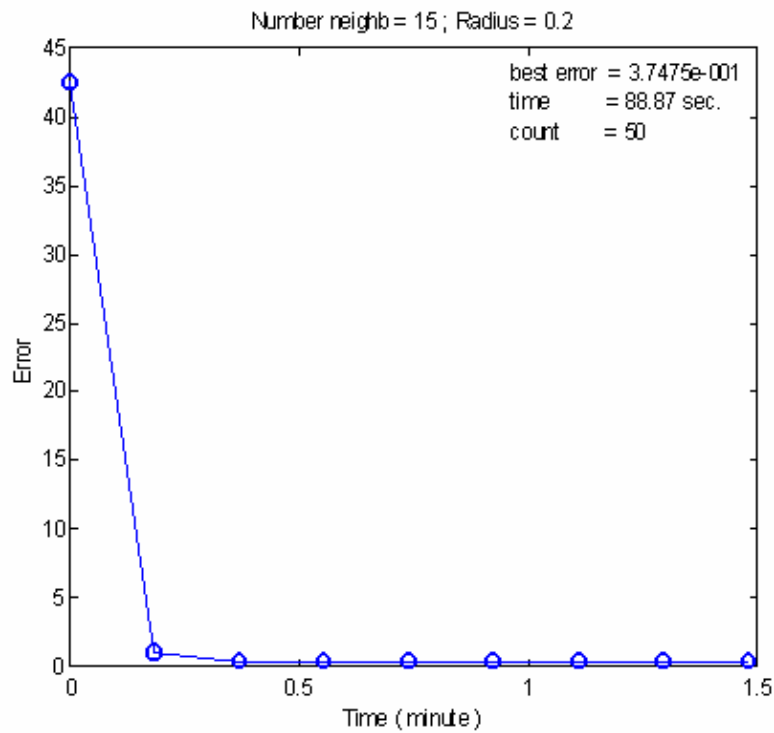
รูปที่ 11. ผลการทดสอบเมื่อ number_neighbor = 30 radius = 0.10



รูปที่ 12. ผลการทดสอบเมื่อ number_neighbor = 50 radius = 0.10



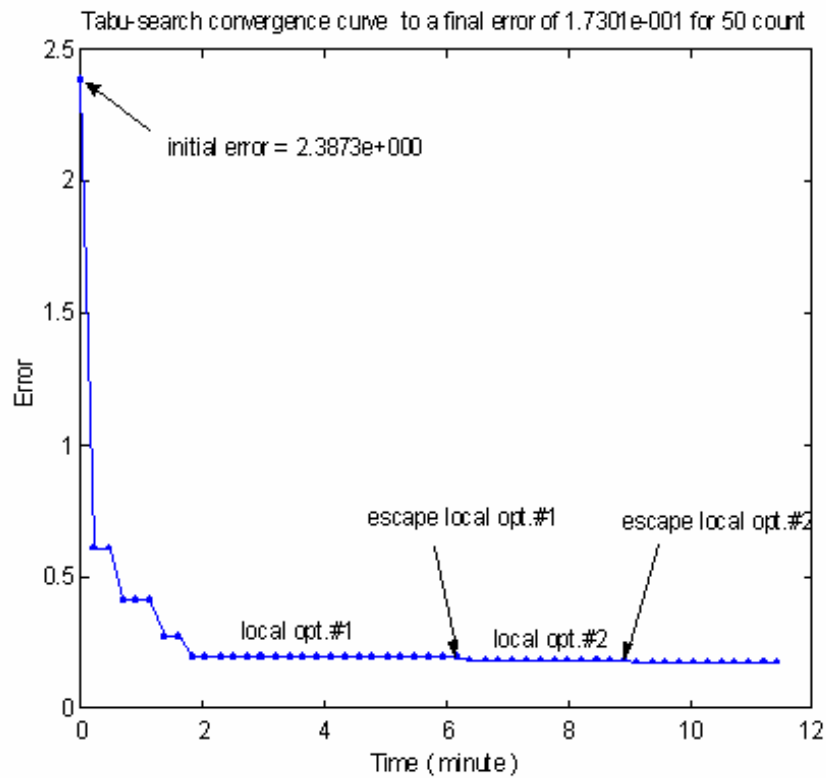
รูปที่ 13. ผลการทดสอบเมื่อ number_neighbor = 15 radius = 0.05



รูปที่ 14. ผลการทดสอบเมื่อ number_neighbor = 15 radius = 0.20

ตารางที่ 3. แสดงผลการทดสอบอัลกอริทึมกรณี่ต่างๆ

| Count | N=15 , R=0.05 | N=15 , R=0.1 | N=15 , R=0.2 | N=30 , R=0.1 | N=50 , R=0.1 |
|-------------|---------------|--------------|--------------|---------------|--------------|
| 0 | 4.2555e+001 | 4.2555e+001 | 4.2555e+001 | 4.2555e+001 | 4.2555e+001 |
| 1 | 2.0674e+001 | 4.2861e+000 | 1.1148e+000 | 4.4967e+000 | 3.8186e+000 |
| 2 | 1.4575e+001 | 1.3020e+000 | 4.3803e-001 | 3.4845e-001 | 3.0789e-001 |
| 3 | 1.1119e+001 | 4.3888e-001 | #1 | - | - |
| 4 | 4.0259e+000 | #1 | #2 | - | - |
| 5 | 9.7949e-001 | 3.3537e-001 | 4.1335e-001 | - | - |
| 6 | 7.9695e-001 | - | #1 | - | - |
| 7 | #1 | - | #2 | - | - |
| 8 | 4.6597e-001 | - | 3.7475e-001 | - | - |
| 9 | 3.9030e-001 | - | - | - | - |
| 10 | 3.0431e-001 | - | - | - | - |
| Time (sec.) | 131.60 | 56.24 | 88.87 | 44.82 O.K. | 73.76 |

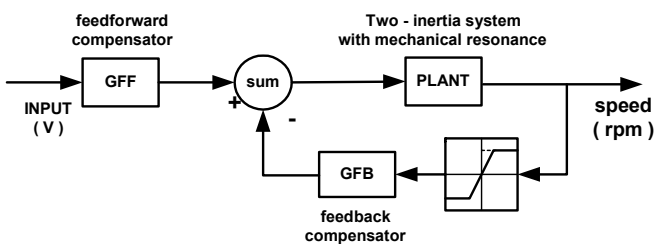


รูปที่ 15. ความสามารถของอัลกอริทึมในการค้นหาค่าตอบ

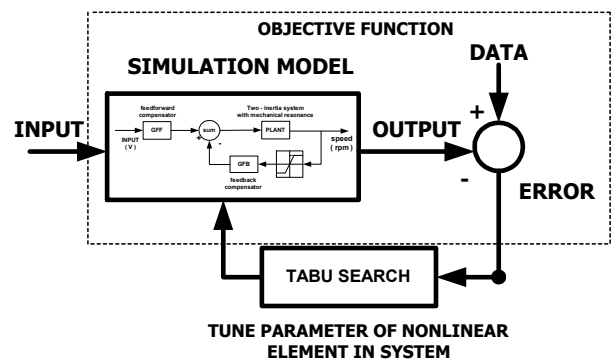
5. การทดลอง

5.1 วิธีการทดลอง

จากผลการทดสอบระบบสองมวลในหัวข้อที่ 2 สามารถตั้งสมมุติฐานได้ว่า ลักษณะสมบัติไม่เป็นเชิงเส้นจะเป็นแบบอิมตัว โดยถือว่าตำแหน่งของลักษณะสมบัติไม่เป็นเชิงเส้นจะอยู่ที่ส่วนของสัญญาณป้อนกลับเพียงแค่จุดเดียวตามรูปแบบของ Lure's problem หมายความว่า ได้สมมุติให้ เป็นลักษณะสมบัติไม่เป็นเชิงเส้นสมมูล (equivalent nonlinearity) ซึ่งแทนความไม่เป็นเชิงเส้นของระบบทั้งหมดไว้ที่ตำแหน่งนี้ตำแหน่งเดียว ดังรูปที่ 16



รูปที่ 16. สมมุติฐานที่ใช้ในการค้นหาค่าตอบ



รูปที่ 17. แผนภาพแสดงวิธีการทดลอง

รูปที่ 17 ใช้อธิบายการค้นหาพารามิเตอร์ของลักษณะสมบัติไม่เป็นเชิงเส้นซึ่งมีขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้ คือ เริ่มจากป้อนอินพุตขึ้นบนได้ให้กับระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น มีขนาด 1.1, 1.3, 1.5, 1.7, 1.9 และ 2.1 โวลต์ตามลำดับ จากนั้นนำผลที่เป็นค่าเชิงเลขที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ (simulation model) มาเปรียบเทียบกับผลการทดสอบที่ได้บันทึกไว้ และ

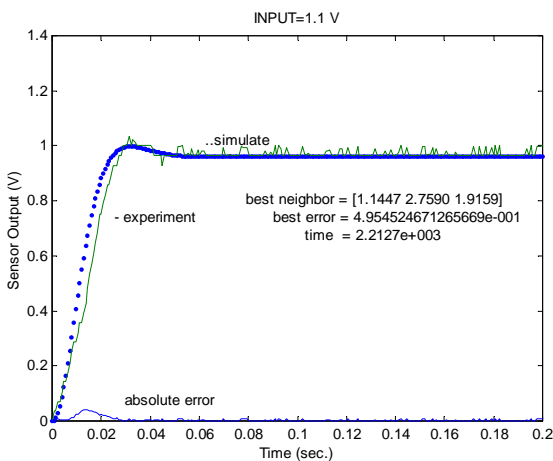
ประเมินค่าความคลาดเคลื่อนที่อาจแสดงได้ด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ ดังสมการที่ (4)

$$J = \sum e^2(kT) \quad , kT = 0,1,2,\dots \quad (4)$$

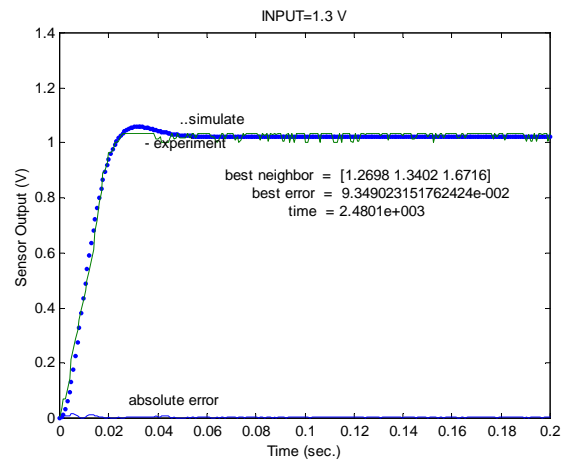
ซึ่ง $e(kT)$ เป็นผลต่างระหว่างความเร็วรอบที่วัดได้โดยเซนเซอร์มีหน่วยเป็นโวลต์กับความเร็วรอบที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ ค่าความคลาดเคลื่อนที่ได้มาเป็นตัวกำหนดทิศทางการค้นหาแบบตามูว่าจะมีทิศทางไปทางใด เราจะยอมรับผลการค้นหาว่าแม่นยำพอและยุติการค้นหาเมื่อ $J_{\min} \leq \mu$ ค่า μ ในที่นี้เท่ากับ 0.5 ซึ่งได้มาจากการคำนวณซ้ำๆ เพื่อศึกษาพลวัตของระบบ การจำลองสถานการณ์ในรูปที่ 17 ดำเนินการในโดเมนเวลา ด้วยสมการดิฟเฟอเรนซ์ ที่ได้จากการแปลงแบบจำลองต่อเนื่องด้วยเทคนิคไบเลเนียน์ โปรแกรมจำลองสถานการณ์สร้างขึ้นด้วย MATLAB™

5.2 ผลการทดลอง

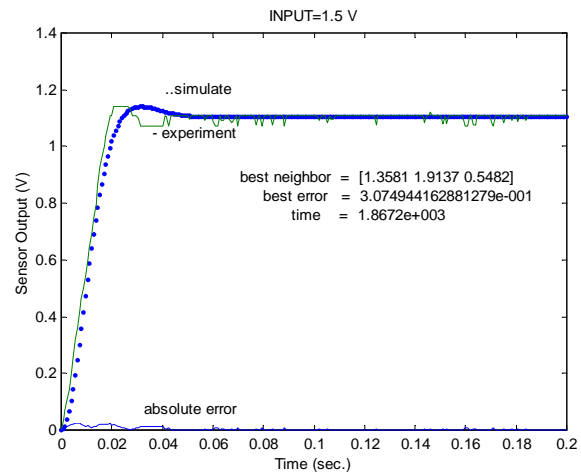
ผลการทดลองที่ได้จากวิธีการค้นหาแบบตามู พบว่าแบบจำลองที่ได้สามารถอธิบายพฤติกรรมของระบบได้สมจริง เนื่องจากผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ของระบบดังแผนภาพในรูปที่ 16 มีความใกล้เคียงกับผลการทดสอบจริงเป็นอย่างมาก ซึ่งอาจสังเกตได้ถึงความใกล้เคียงกันของความเร็วในมวลหมุนที่บันทึกได้กับผลการการจำลองสถานการณ์ดังแสดงในรูปที่ 18 ถึง 20



รูปที่ 18. ผลการค้นหาแบบตามูที่อินพุต 1.1 โวลต์



รูปที่ 19. ผลการค้นหาแบบตามูที่อินพุต 1.3 โวลต์

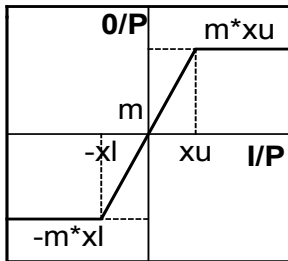


รูปที่ 20. ผลการค้นหาแบบตามูที่อินพุต 1.5 โวลต์

ตารางที่ 4. ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการค้นหาแบบตามู

| อินพุต (โวลต์) | ค่าพารามิเตอร์ | | |
|----------------|----------------|--------|--------|
| | m | xu | xl |
| 1.1 | 1.1447 | 2.7590 | 1.9159 |
| 1.3 | 1.2698 | 1.3402 | 1.6716 |
| 1.5 | 1.3581 | 1.9137 | 0.5482 |
| 1.7 | 1.3128 | 2.4456 | 2.1646 |
| 1.9 | 1.3018 | 1.8827 | 0.2553 |
| 2.1 | 1.2849 | 2.2356 | 1.7925 |

ผลจากการค้นหาในรูปแบบ ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของลักษณะสมบัติไม่เป็นเชิงเส้นชนิดอิมิตัวได้รับการรวบรวมไว้ในตารางที่ 4 ซึ่งอาจทำความเข้าใจโดยดูรูปที่ 21 ประกอบได้ดังนี้

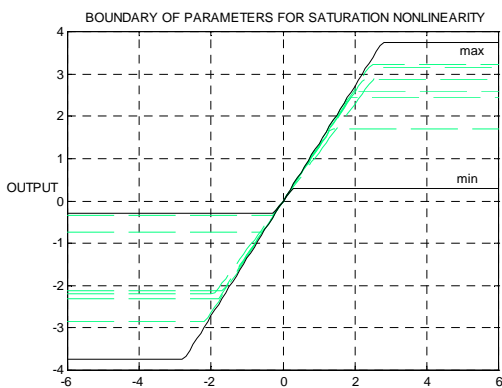


รูปที่ 21. ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการค้นหาคำตอบ

ค่า m คือค่าความชัน

ค่า x_u คือจุดที่เริ่มเกิดการอิมิตัวทางด้านบวก

ค่า x_l คือจุดที่เริ่มเกิดการอิมิตัวทางด้านลบ



รูปที่ 22. พารามิเตอร์ที่ได้จากวิธีการค้นหาแบบตามูที่ระดับอินพุตต่างๆ

ผลการทดลองที่ได้จากการค้นหาแบบตามู มีค่าความคลาดเคลื่อนน้อยมาก เมื่อนำค่าความคลาดเคลื่อนกรณีที่ระบบยังไม่มีลักษณะสมบัติไม่เป็นเชิงเส้นมาเปรียบเทียบกับระบบที่มีลักษณะสมบัติไม่เป็นเชิงเส้นพบว่าค่าความคลาดเคลื่อนมีค่าลดลงประมาณ 89-99 % ดังรายละเอียดในตารางที่ 5

ตารางที่ 5. เปรียบเทียบค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างระบบเชิงเส้นกับระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น

| อินพุต (โวลต์) | ระบบเชิงเส้น | ระบบไม่เชิงเส้น | %ลดลงของค่าความคลาดเคลื่อน |
|----------------|--------------|-----------------|----------------------------|
| 1.1 | 4.9457 | 0.4955 | 89.9822 |
| 1.3 | 17.8222 | 0.0935 | 99.4800 |
| 1.5 | 36.8377 | 0.3075 | 99.1653 |
| 1.7 | 40.5674 | 1.9654 | 95.1552 |
| 1.9 | 48.4605 | 3.1829 | 93.4605 |
| 2.1 | 54.9896 | 4.2706 | 92.2339 |

6. สรุป

จากผลการวิจัยที่ได้นำเสนอ พบว่าวิธีการค้นหาแบบตามูให้ผลที่มีความถูกต้องสูงและใช้เวลาในการค้นหาคำตอบรวดเร็ว เมื่อนำผลที่ได้เปรียบเทียบกับผลการจำลองสถานการณ์ของระบบที่เป็นเชิงเส้นพบว่ามีความคลาดเคลื่อนลดลงเป็นอย่างมาก ดังตารางที่ 5 ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการขยายงานการทำงานของระบบสองมวลความถี่จะต้องพิจารณาลักษณะสมบัติไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งปรากฏอยู่ในรูปลักษณะสมบัติไม่เป็นเชิงเส้นอิมิตัว ตรงส่วนของระบบวิถีป้อนกลับดังรูปที่ 16 เป็นไปตามรูปแบบของ Lure's problem เมื่อพิจารณาค่าพารามิเตอร์ของลักษณะสมบัติไม่เป็นเชิงเส้น ค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวในแต่ละอินพุตไม่สามารถที่จะรวมเป็นพารามิเตอร์ชุดเดียวได้ เนื่องจากระบบมีความไม่เป็นเชิงเส้นค่อนข้างสูง

สำหรับงานวิจัยในอนาคตจะได้นำแบบจำลองที่ได้ไปใช้เพื่อการวิเคราะห์สมรรถนะและเสถียรภาพของระบบ แบบจำลองความไม่เป็นเชิงเส้นปรากฏเป็นตระกูล เพื่อการวิเคราะห์เสถียรภาพจึงกำหนดขอบเขตล้อมรอบกลุ่มของลักษณะสมบัติไม่เป็นเชิงเส้นเป็นขอบเขตบนและขอบเขตล่าง ดังรูปที่ 22 โดยอาศัยข้อมูลที่ได้จากการค้นหาแบบตามู การวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบสามารถทำได้โดยอาศัยวิธีการทางโดเมนความถี่ด้วยวิธีฟังก์ชันพรรณนา (Describing function) เกณฑ์ของโพพอฟ (Popov's criterion) และ เกณฑ์วงกลม (Circle criterion) เพื่อเปรียบเทียบผลและให้มั่นใจในเสถียรภาพของระบบขยายงานการทำงาน

เอกสารอ้างอิง

- [1] ชัชชัย อุทัยวสิน. (2543). การกำจัดรีโซแนนซ์การบิดในระบบ 2 มวล โดยใช้เทคนิคการกำหนดตำแหน่งโพล-ซีโร. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง.
- [2] A. H. Mantawy, Y. L. Abdel-Magid, and S. Z. Selim. (1998). Unit Commitment by Tabu Search. IEEE Transaction on Distrib. 145(1):56-64.
- [3] A. Kaplan, S. Ozer, and S. Sagiroglu. (1998). Membership Function Optimuization of a Fuzzy Controller using Modified Tabu Search Algorithm. IEEE Transaction on Industrial Electronics. 98(7):64-67.
- [4] C. H. Houppis, and G. B.Lamont. (1985). Digital Control System. New York:McGraw-Hill.
- [5] D. P.Atherton. (1982). Nonlinear Control Engineering. Student edition. New York: Van Nostrand Reinhold.
- [6] H.Hirata, et.al. (1995). Speed Control of DC Motor with Torisional Oscillation and Load Fluctuation. Proc. of Sch. Eng, Tokai University. 35(3):31-41.
- [7] H. K.Khalil. (1996). Nonlinear System. Second edition . London :Prentice Hall.
- [8] J A Bland G P Dawson. (1991). Tabu Search and Design Optimization. IEEE Transaction on Industrial Electronics. 23(3):195-201.
- [9] J.K. Ji, and S.K.Sul. (1995). Kalman Filter and LQ Based on Controller for Torsional Vibration Suppression in a 2-mass Motor Drive System. IEEE Trans. On IE. 42(6):564-571.
- [10] J. K. Ji, et.al. (1993). LQG Based Speed Controller for Torsional Vibration Suppression in 2 – Mass System. Proc. IEEE IECON'93. pp:1157-1162.
- [11] J. Ngamwiwit, C. U-thaiwasin, Y. Prempraneerach and S. Sujitjorn. (2000). Torsional Resonance Suppression via PIDA Controller. Proc. IEEE Conf. On Artificial Intelligence & Robotics – TENCON 2000. Kuala Lumpur: Malaysia.
- [12] K. Fujikawn, et.al. (1991). Robust and Fast Speed Control for Torsional System Based on State – Space Method. Proc. IEEE IECON'91. pp:687-692
- [13] M. Hassul. (1993). Control System Design Using MATLAB. London:Prentice-Hall.
- [14] S.H. Song, et.al. (1993). Torsional Vibration Suppression Control in 2 - Mass System by State Feedback Speed Controller. Proc. IEEE CCA'93. pp:129-134.
- [15] S. Sujitjorn, C. U-Thaiwasin, and Y.Prempraneerat. (2000). Torsional Resonance Suppression Via Pole – Zero Assignment. Proc. 19th IASTED Int. Conf. On Modelling, Identification, and Control. Innsbruck:Austria.
- [16] S. Sujitjorn, and T. Kulworawanichpong. (2001). Optimal Power Flow Using Tabu Search. IEEE Power Engineering Review (submitted)
- [17] T. Glad, and L. Ljung. (2000). Control Theory : Multivariable and Nonlinear Methods. London :Taylor & Francis



กองพัน อารีรักษ์ สำเร็จปริญญาตรีในสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เมื่อ พ.ศ.2543 ปัจจุบันกำลังศึกษาาระดับปริญญาโทที่มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี สุรนารี และเป็นผู้ช่วยวิจัยทางด้านระบบควบคุมคงทน โดยได้รับทุนอุดหนุนวิจัยประจำปี 2544 จากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ



นาวาอากาศโท สราวุฒิ สุจิตจร สำเร็จปริญญาตรีและปริญญาเอกในสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จากโรงเรียนนายเรืออากาศ และมหาวิทยาลัยเบอร์มิงแฮม ประเทศอังกฤษ เมื่อ พ.ศ.2527 และ 2530 ตามลำดับ ปัจจุบันดำรงตำแหน่งรองศาสตราจารย์และหัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ดำเนินงานวิจัยทางด้านระบบควบคุมเชิงเส้นและไม่เชิงเส้น การดำเนินกระบวนการทางสัญญาณ การอนุรักษ์พลังงาน และการประยุกต์เทคนิคทางปัญญาประดิษฐ์ อาจารย์สราวุฒิเป็นสมาชิกวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยฯ สมาคมเทคโนโลยีที่เหมาะสม และ IEEE อีกทั้งได้รับการจารึกชื่อไว้ใน Who's Who in the World และ Who's Who in Science and Engineering.



อาทิตย์ ศรีแก้ว สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรีในสาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เมื่อ พ.ศ. 2537 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโทและปริญญาเอกสาขาวิศวกรรมไฟฟ้าจาก Vanderbilt

University ประเทศสหรัฐอเมริกา เมื่อ พ.ศ. 2540 และ 2543 ตามลำดับ ปัจจุบันดำรงตำแหน่งเป็นอาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี มีความสนใจงานวิจัยทางด้าน computer and robot vision, image processing, neural networks, artificial Intelligence และ intelligent system



โยชิน เปรมปราณีรัชต์ สำเร็จการศึกษาปริญญาเอกทางวิศวกรรมระบบควบคุม จากมหาวิทยาลัย Nihon ประเทศญี่ปุ่น ปัจจุบันดำรงตำแหน่ง รองศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และเป็นผู้อำนวยการศูนย์ทดสอบผลิตภัณฑ์ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ (ศทอ.) อาจารย์โยชินฯ สอนและวิจัยทางด้านระบบควบคุม การควบคุมมอเตอร์แบบต่างๆ มากกว่า 20 ปี