

ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบร่วมวิวัฒนาการและทำงานร่วมกันสำหรับการตรวจสอบ ความเสียหายโดยหลักการสั่นสะเทือนในแผ่นโลหะ

Cooperative Coevolutionary Genetic Algorithm for Vibration-Based Damage Detection in Plates

พุดธา เจ็นคูร์¹ จิตติ พัทธวนิช¹ สุกัญญา เจียมวรณันท์กุล² และ กิตติพงษ์ บุญโล่ง^{1*}

Puttha Jeenkour¹, Jitti Pattavanitch¹, Sukanya Jiamworanunkul² and Kittipong Boonlong^{1*}

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

²สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ทั่วไป คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Burapha University

²Program of General Science, Faculty of Science, Chandrakasem Rajabhat University

Received : 7 March 2017

Accepted : 18 July 2017

Published online : 7 September 2017

บทคัดย่อ

การตรวจสอบความเสียหายโดยหลักการสั่นสะเทือนเป็นระเบียบวิธีแบบไม่ทำลายซึ่งเป็นที่น่าเชื่อถือที่สุดที่ว่าคุณลักษณะการสั่นสะเทือนเช่นความถี่ธรรมชาติและรูปร่างการสั่นของโครงสร้างจะเปลี่ยนแปลงไปเมื่อมีความเสียหายเกิดขึ้น งานวิจัยนี้นำเสนอขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบร่วมวิวัฒนาการและทำงานร่วมกัน (CCGA) ซึ่งเหมาะสำหรับปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดที่มีหลายตัวแปรตัดสินใจเป็นตัวหาค่าตอบสำหรับการตรวจสอบความเสียหายในแผ่นโลหะโดยหลักการสั่นสะเทือน ฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นตัวชี้วัดเชิงตัวเลขคำนวณจากคุณลักษณะการสั่นสะเทือนของการเสียหายแท้จริงกับเมทริกซ์มวลและเมทริกซ์สปริงซึ่งเป็นผลมาจากค่าทำนายความเสียหาย ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ใช้ในการคำนวณวัตถุประสงค์โดยที่แผ่นโลหะถูกแบ่งเป็น 100 เอลิเมนต์ โดยใช้ 2 ปัญหาทดสอบที่แผ่นโลหะมีความเสียหายแตกต่างกัน แต่ละปัญหาจะมี 4 กรณีของเงื่อนไขขอบของแผ่นโลหะที่แตกต่างกัน ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่า CCGA ดีกว่า ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (GA) และการหาค่าเหมาะที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (PSO) อย่างชัดเจนสำหรับทุกกรณีศึกษา นอกจากนี้คำตอบที่ได้จาก CCGA แสดงให้เห็นว่า CCGA สามารถระบุความเสียหายที่เกิดขึ้นในแผ่นโลหะได้อย่างถูกต้องแม้ว่าใช้จำนวนคำตอบที่สร้างขึ้นเพียงเล็กน้อยในการหาค่าตอบ

คำสำคัญ : การตรวจสอบความเสียหายโดยหลักการสั่นสะเทือน ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม ขั้นตอนวิธีแบบร่วมวิวัฒนาการ และทำงานร่วมกัน โครงสร้างแผ่นโลหะ ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

*Corresponding author. E-mail : kittipong@eng.buu.ac.th

Abstract

Vibration-based damage detection, a nondestructive method, is based on the fact that vibration characteristics such as natural frequencies and mode shapes of structures are changed when the damage occurs. This paper presents cooperative coevolutionary genetic algorithm (CCGA) which can be used to optimize problems with a large number of decision variables, as the optimizer for the vibration-based damage detection in plates. The objective function is a numerical indicator calculated from the vibration characteristics of the actual damage and mass matrix and stiffness matrix resulting from the predicted damage. The finite element method is used for the objective calculation in which the plates are divided into 100 elements. There are 2 test problems with different damage occurred in the plates. In each problem, 4 cases of various boundary conditions are used. The simulation results reveal that CCGA apparently outperforms genetic algorithm (GA) and particle swarm optimization (PSO) for all test cases. In addition, solutions obtained from using CCGA show that CCGA can accurately identify the damage presented in the plates although the algorithm uses small number of generated solutions in solution search.

Keywords : vibration-based damage detection, genetic algorithm, co-operative co-evolution, plate structure, finite element method

บทนำ

การตรวจสอบความเสียหายโดยใช้หลักการการสั่นสะเทือนเป็นวิธีการที่ไม่เป็นการทำลายซึ่งใช้ในการระบุความเสียหายในโครงสร้าง โดยหลักการของการตรวจสอบแบบนี้ก็คือ เมื่อมีความเสียหายเกิดขึ้นในโครงสร้าง จะทำให้ตัวแปรทางฟิสิกส์ของโครงสร้าง เช่น มวล (Mass) ความแข็ง (Stiffness) และ ความหน่วง (Damping) เปลี่ยนแปลงไป เนื่องจากโดยทฤษฎีแล้วคุณลักษณะของการสั่นสะเทือนเช่นความถี่ธรรมชาติ (Natural frequency) และรูปร่างการสั่น (Mode shape) จะเปลี่ยนแปลงไปตามตัวแปรทางฟิสิกส์ของโครงสร้างดังกล่าว โดยทั่วไปความเสียหายจะทำให้ความแข็งของโครงสร้างลดลง จึงทำให้คุณลักษณะของการสั่นสะเทือนเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย การตรวจสอบความเสียหายโดยใช้หลักการการสั่นสะเทือนจะทำนายตำแหน่งและขนาดความเสียหายที่เกิดขึ้นในโครงสร้างโดยหาจากคุณลักษณะของการสั่นสะเทือนที่เปลี่ยนแปลงไป การตรวจสอบความเสียหายโดยใช้หลักการการสั่นสะเทือนได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อนำมาประยุกต์ใช้กับงานวิศวกรรม (Barai & Pandey, 1995; Gawronski & Sawicki, 2000; Yang & Liu, 2007; González & Fassois, 2016; Yin *et al.*, 2017) โดยมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์คำนวณเชิงตัวเลขจากคุณลักษณะการสั่นสะเทือนของโครงสร้างที่เกิดความเสียหายขึ้นกับตัวแปรทางฟิสิกส์ของโครงสร้างที่กล่าวข้างต้นตามความเสียหายที่ทำนาย (Rao *et al.*, 2004; Yang & Liu, 2007; Panigrahi *et al.*, 2009).

ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm, GA) (Holland, 1975; Goldberg, 1989) เป็นวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดซึ่งไม่ต้องใช้ค่าอนุพันธ์ โดย GA จะมีกลุ่มของคำตอบ (Population) จำนวนหนึ่ง กลไกในการหาค่าตอบของ GA จะอิงกับหลักแนวคิดของชาร์ลส์ ดาร์วิน (Charles Darwin) ในเรื่องการอยู่รอดของผู้ที่แข็งแรงที่สุด โดยที่ผ่านมามีงานวิจัยจำนวนมากที่ใช้ GA ในการตรวจสอบหาค่าความเสียหายของโครงสร้าง ยกตัวอย่างเช่น Mares & Surace, 1996; Chou &

Ghaboussi, 2001; Rao *et al.*, 2004; He & Hwang, 2006; Panigrahi *et al.*, 2009; Nobaharia & Seyedpoorb, 2011; Guo & Li, 2012; Kim & Lee, 2013 โดย Rao *et al.*, 2004 ได้ใช้ GA แบบเลขฐานสอง พร้อมด้วยการสลับสายพันธุแบบสองตำแหน่ง (Two-point Crossover) รวมทั้งใช้การคัดเลือกแบบการแข่งขัน (Tournament Selection) ในการเลือกคำตอบเพื่อทำการเปลี่ยนแปลงคำตอบในกลุ่มคำตอบ He & Hwang, 2006 ได้นำเสนอขั้นตอนวิธีแบบไฮบริด (Hybrid Algorithm) เรียกว่า Simulated Annealing Genetic Algorithm ซึ่งรวม GA เข้ากับวิธีการจำลองการอบเหนียว (Simulated Annealing, SA) โดยใช้ตัวแปรจำนวนจริงในการตรวจสอบความเสียหาย โดยที่ฟังก์ชันวัตถุประสงค์เป็นผลรวมของผลต่างระหว่างระยะการเคลื่อนที่ของผลจากการทดลองกับผลจากการคำนวณทางทฤษฎี และผลต่างของความถี่ธรรมชาติที่ได้จากการทดลองกับการคำนวณทางทฤษฎี Panigrahi *et al.*, 2009 ใช้ GA ร่วมกับหลักการของเมทริกซ์แรงตกค้าง (Residual Force Matrix) สำหรับการตรวจสอบความเสียหายของคานแข็งแรงสม่ำเสมอ (Uniform Strength Beam) นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่ใช้การคำนวณเชิงวิวัฒนาการ (Evolutionary Computing) แบบอื่นในการตรวจสอบความเสียหายของโครงสร้างเช่น ขั้นตอนวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดระบบอาณานิคมผึ้ง (Bee Colony Optimization, BCO) (Ding *et al.*, 2016; Zhong *et al.*, 2017) ขั้นตอนวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดระบบอาณานิคมมด (Ant Colony Optimization, ACO) (Majumdar *et al.*, 2012; Braun *et al.*, 2015) และการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization, PSO) (Galewski, 2016; Gerist & Maheri, 2016) สำหรับการตรวจสอบหาความเสียหายของโครงสร้างต่างๆ นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยจำนวนหนึ่ง (Shih *et al.*, 2009; Pereraa *et al.*, 2013) ที่กำหนดให้การตรวจสอบความเสียหายของโครงสร้างให้เป็นปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-objective Optimization Problem) ที่มีวัตถุประสงค์จำนวนหนึ่งซึ่งคำนวณจากความแตกต่างระหว่างคุณลักษณะทางการสันตะเพียนของการทดลองและการคำนวณเชิงตัวเลขทางทฤษฎี (Numerically theoretical calculation)

งานวิจัยนี้จะนำเสนอการตรวจสอบความเสียหายในแผ่นโลหะ 2 มิติ เนื่องด้วยว่าจำนวนตัวแปรตัดสินใจจะเท่ากับจำนวนเอลิเมนต์ที่แบ่ง โดยในทางปฏิบัติแล้วจำนวนเอลิเมนต์ที่ถูกแบ่งมากก็ทำให้ลดการทำนายที่ผิดพลาดเนื่องจากความคลาดเคลื่อนเชิงตัวเลข (Numerical error) จากการคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ แต่หากจำนวนตัวแปรตัดสินใจมากก็จะทำการหาค่าตอบยากขึ้น ดังนั้นตัวหาค่าเหมาะสมที่สุดสำหรับปัญหาที่มีหลายตัวแปรตัดสินใจจึงเหมาะสมสำหรับปัญหาการตรวจสอบความเสียหายในแผ่นโลหะ ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบร่วมวิวัฒนาการและทำงานร่วมกัน (Cooperative coevolutionary genetic algorithm, CCGA) พัฒนาขึ้นโดย Potter และ De Jong (Potter & de Jong, 1994; Potter & de Jong, 2000) เพื่อแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดที่มีหลายตัวแปรตัดสินใจ มีงานวิจัยมากมายที่ได้ประยุกต์ใช้ CCGA อย่างมีประสิทธิภาพสำหรับปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุดดังเช่น Garcia-Pedrajas, 2003; Boonlong *et al.*, 2004; Ibáñez *et al.*, 2012 ในวิธีการหาค่าตอบของ CCGA นั้น กลุ่มคำตอบ (Population) จะถูกแบ่งเป็นกลุ่มคำตอบย่อย (Subpopulations) หรือ Species จำนวนหนึ่ง โดยแต่ละ Species อาจแทนหนึ่งตัวแปรตัดสินใจหรือเป็นเพียงส่วนหนึ่งของคำตอบของปัญหา ซึ่งก่อนหน้านี้ได้มีงานวิจัยที่ใช้ CCGA ในการวิเคราะห์ความเสียหายของคาน (Beam) (Boonlong, 2014) และโครงสร้างโครงถัก (Truss structure) (Kim & Boonlong, 2015) นอกจากนี้หลักการร่วมวิวัฒนาการและทำงานร่วมกัน (Cooperative coevolution) ใน CCGA ซึ่งเป็นหลักการสำหรับปัญหาหาค่าเหมาะสมที่สุดหลายตัวแปรตัดสินใจยังสามารถประยุกต์ใช้กับขั้นตอนวิธีหาค่าเหมาะสมที่สุดอื่นได้อีกด้วยเช่นร่วมกับ PSO (Bergh & Engelbrecht, 2004; Li & Yao, 2012) โดยงานวิจัยนี้จะใช้ CCGA เพื่อแก้ปัญหาการตรวจสอบความเสียหายในแผ่นโลหะ โดยเงื่อนไขขอบที่ใช้ได้แก่

ปลายยึด (Fixed end) รองรับอย่างง่าย (Simply supported end) และปลายอิสระ (Free end) ด้วยเงื่อนไขขอบดังกล่าว งานวิจัยนี้กำหนด (Formulate) ปัญหาทดสอบขึ้นมา 4 กรณี โดยที่แผ่นโลหะจะถูกแบ่งเป็น 100 เอลิเมนต์สำหรับการคำนวณ ในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

วิธีดำเนินการวิจัย

1. ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบร่วมวิวัฒนาการและทำงานร่วมกัน (CCGA)

ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบร่วมวิวัฒนาการและทำงานร่วมกัน (CCGA) ได้ค้นหาคำตอบโดยแบ่งคำตอบเป็นกลุ่มย่อยซึ่งเรียกว่า Species โดยคำตอบย่อยในแต่ละ Species จะเปลี่ยนแปลงหรือวิวัฒนาการตามกระบวนการของ GA ทั้งนี้คำตอบย่อยแต่ละ Species จะแทนหนึ่งตัวแปรตัดสินใจ หรือส่วนหนึ่งของคำตอบเต็ม (Full solution) เช่นหากคำตอบคือ เซตของ x_1, x_2, \dots, x_{100} ด้วยการแบ่งเป็น 100 Species ก็จะได้ว่าแต่ละ Species แทนคำตอบย่อย x_i แต่ละตัว เมื่อต้องคำนวณค่าวัตถุประสงค์ (Objective function) ของคำตอบย่อยใน Species หนึ่ง จำเป็นต้องนำคำตอบย่อยนี้ไปรวมกับตัวแปรอื่นหรือส่วนอื่นของคำตอบเพื่อให้ได้คำตอบเต็ม (Full solution) ที่สามารถประเมินคุณภาพได้ ด้วยการแบ่งคำตอบเป็นจำนวน Species ปริภูมิค้นหา (Search space) ของทุก Species รวมกันน่าจะลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเทียบกับการค้นหาจากคำตอบเต็ม (Full solution search) CCGA จะมีประสิทธิภาพสูงสุดเมื่อไม่มีการเชื่อมต่อ (Coupling) ระหว่าง Species เลยกตัวอย่างเช่น หากคำตอบถูกเข้ารหัสด้วยเลขฐานสองจำนวน 100 บิต ซึ่งจะได้ว่าจำนวนคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมดเท่ากับ $2^{100} = 1.27 \times 10^{30}$ ด้วยการแบ่งคำตอบเป็น 20 Species ที่ไม่มีการเชื่อมต่อกัน (Uncoupling species) โดยแต่ละ Species แทนเลขฐานสองที่มี 5 บิต จำนวนคำตอบที่เป็นไปได้ทั้งหมดจะลดลงเหลือเพียง $20 \times 2^5 = 640$ ซึ่งทำให้การค้นหาคำตอบง่ายขึ้น อย่างไรก็ตามหากมีความเชื่อมต่อระหว่าง Species มีมากขึ้น ประสิทธิภาพการค้นหาคำตอบของ CCGA จะลดลง เพื่อความเข้าใจกระบวนการทำงานของ CCGA เริ่มต้นด้วยการอธิบายการทำงานของ GA ดังขั้นตอนต่อไปนี้

(1) อ่านกลุ่มคำตอบที่เข้ารหัสไว้ขึ้นมาเป็นกลุ่มคำตอบเริ่มต้นโดยอ่านจากไฟล์ที่ป้อนเข้า ไฟล์ดังกล่าวประกอบด้วยคำตอบจำนวนหนึ่งซึ่งสร้างขึ้นมาด้วยการสุ่ม

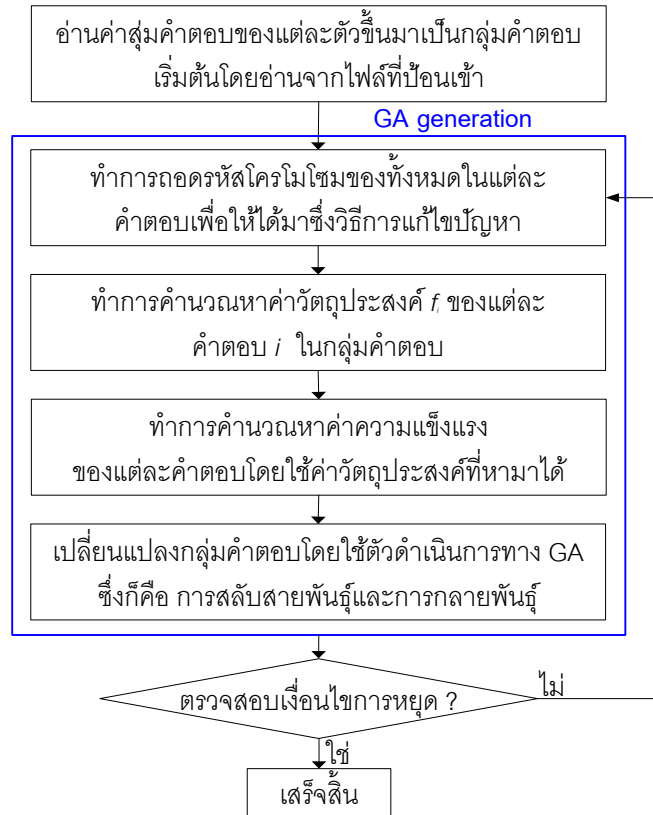
(2) ทำการถอดรหัสคำตอบในกลุ่มคำตอบปัจจุบัน

(3) ทำการคำนวณหาค่าวัตถุประสงค์ f_i ของแต่ละคำตอบ i ในกลุ่มคำตอบปัจจุบัน

(4) ทำการคำนวณหาค่าความแข็งแรง (fitness) ของแต่ละคำตอบโดยใช้ค่าวัตถุประสงค์ที่ได้มา โดยค่าความแข็งแรงมาก คำตอบนั้นเป็นคำตอบที่ดี หากปัญหาที่ทดสอบเป็นปัญหาการหาค่ามากที่สุด ค่าความแข็งแรงก็อาจจะเท่ากับค่าคงที่ค่าหนึ่งบวกค่าวัตถุประสงค์ f_i แต่หากเป็นปัญหาการหาค่าน้อยที่สุด ค่าความแข็งแรงก็อาจจะเท่ากับค่าคงที่ค่าหนึ่งลบค่าวัตถุประสงค์ f_i โดยทั่วไปแล้วค่าความแข็งแรงจะเป็นค่าบวก

(5) เลือกกลุ่มคำตอบมาจากกลุ่มคำตอบปัจจุบัน โดยกลุ่มคำตอบที่ถูกเลือกจะเรียกว่ากลุ่มคำตอบรุ่นพ่อแม่ (Parent Population) นอกจากนี้อาจจะมีการดำเนินการหนึ่งซึ่งเรียกว่าการคัดเลือก (Elitism) ซึ่งจะเก็บคำตอบที่ดีที่สุดได้จำนวนหนึ่งโดยไม่ผ่านการเปลี่ยนในขั้นตอนถัดไป

(6) ทำการเปลี่ยนแปลงกลุ่มคำตอบรุ่นพ่อแม่ ด้วยตัวดำเนินการทางพันธุกรรม ซึ่งก็คือ การสลับสายพันธุ (Crossover) และการกลายพันธุ์ (Mutation) เพื่อสร้างกลุ่มคำตอบรุ่นลูก (Child Population) ซึ่งจะไปรวมกับกลุ่มคำตอบที่เก็บไว้โดยการคัดเลือก เพื่อให้ได้กลุ่มคำตอบรุ่นถัดไป



ภาพที่ 1 หลักการทำงานของ GA สำหรับปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดแบบวัตถุประสงค์เดียว

(7) ตรวจสอบดูเงื่อนไขการหยุด ถ้าหากเป็นไปตามเงื่อนไขดังกล่าว หยุดค้นหาคำตอบ ซึ่งจะได้ว่าคำตอบดีที่สุดของกลุ่มคำตอบล่าสุด คือผลลัพธ์ของการค้นหาคำตอบโดย GA แต่ถ้าหากยังไม่ถึงเงื่อนไขหยุด กลับไปค้นหาคำตอบซ้ำในขั้นตอนที่ 2 โดย โดยการซ้ำจากขั้นตอนที่ 2 ถึง 6 เรียกว่า 1 รอบ (Generation) ของการหาค่าตอบโดย GA ซึ่งกระบวนการของ GA สำหรับปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดแบบวัตถุประสงค์เดียว ได้แสดงไว้ในภาพที่ 1

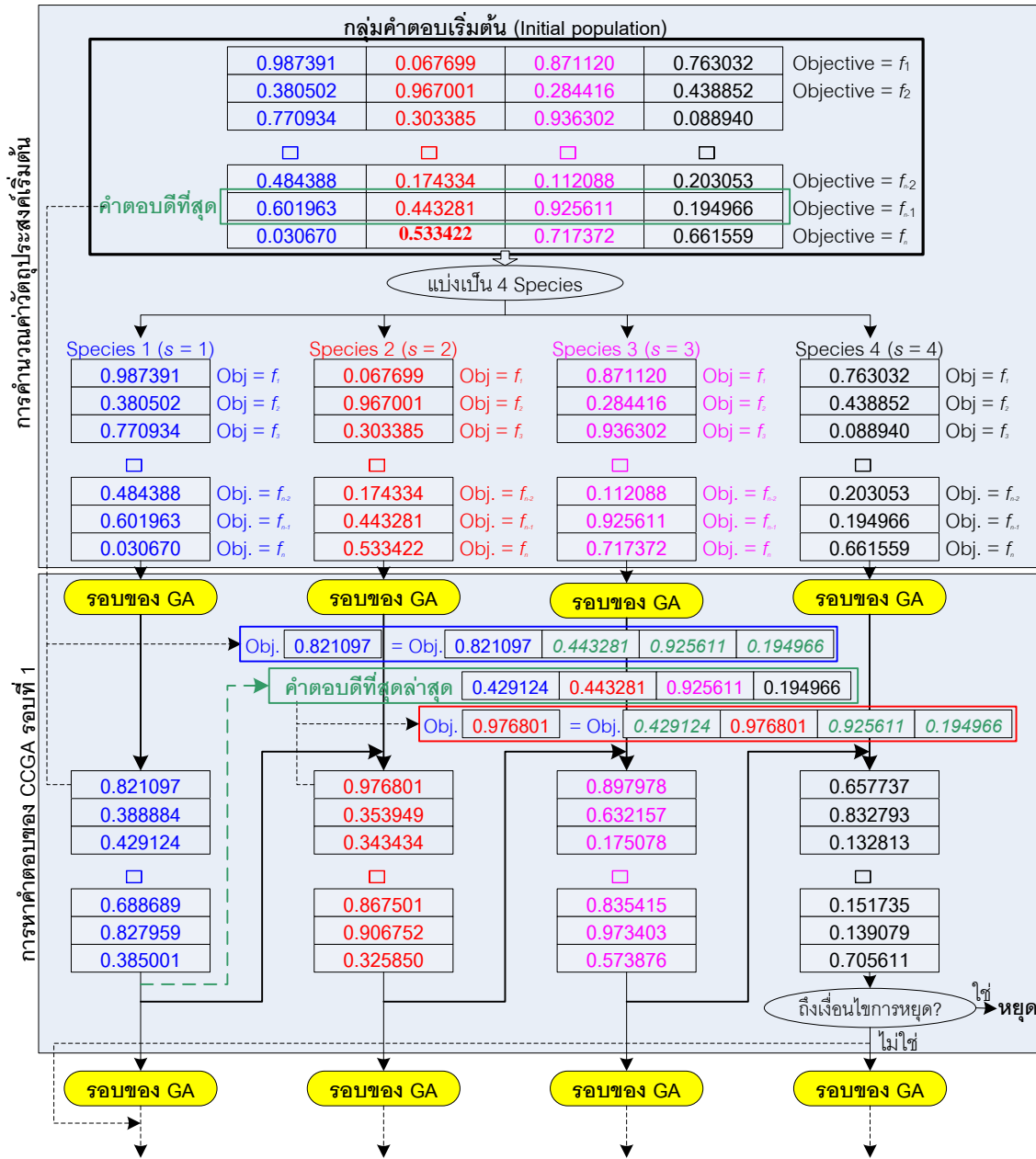
ขณะที่ กระบวนการหลักของ CCGA มีดังต่อไปนี้

(1) อ่านกลุ่มคำตอบที่เข้ารหัสไว้ขึ้นมาเป็นกลุ่มคำตอบเริ่มต้นโดยอ่านจากไฟล์ที่ป้อนเข้า ไฟล์ดังกล่าวประกอบด้วยคำตอบจำนวนหนึ่งซึ่งสร้างขึ้นมาด้วยการสุ่ม

(2) ทำการถอดรหัสคำตอบในกลุ่มคำตอบปัจจุบัน จากนั้นคำนวณค่าวัตถุประสงค์ของแต่ละคำตอบ คำตอบที่มีค่าวัตถุประสงค์ที่ดีที่สุดจะถูกกำหนดให้เป็นคำตอบดีที่สุดปัจจุบัน (Current best solution)

(3) เริ่มต้นด้วยกำหนดให้ตัวนับ Species $s = 1$ และแบ่งคำตอบแต่ละตัวในกลุ่มคำตอบเริ่มต้นเป็นกลุ่มคำตอบย่อย (Subpopulation) โดยกลุ่มคำตอบย่อยแต่ละกลุ่มแทนแต่ละ Species ค่าวัตถุประสงค์ของคำตอบหนึ่งในกลุ่มคำตอบเริ่มต้นจะเป็นค่าวัตถุประสงค์เริ่มต้นของคำตอบที่ตรงกันในแต่ละ Species

(4) จาก Species s ขณะนี้ กลุ่มคำตอบย่อยใน Species นี้จะเข้าสู่รอบการหาค่าตอบของ GA (GA generation) ซึ่งประกอบด้วย การคำนวณค่าความแข็งแรง (Fitness calculation) การเลือกคำตอบรุ่นพ่อแม่ (Parent selection) การสลับสายพันธุ (Crossover) และการกลายพันธุ์ (Mutation) เพื่อสร้างกลุ่มคำตอบย่อยกลุ่มใหม่สำหรับ Species s นี้



ภาพที่ 2 ขั้นตอนการทำงานของ CCGA สำหรับปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดแบบวัตถุประสงค์เดียว

(5) ใน Species ปัจจุบัน s คำตอบเต็มสำหรับแต่ละคำตอบย่อย i ใน Species ดังกล่าว หาได้โดยการรวมคำตอบย่อยนี้ด้วยส่วนอื่นซึ่งมาจากคำตอบที่ดีที่สุดขณะนั้น จากนั้นค่าวัตถุประสงค์ของคำตอบย่อย i นี้จะเท่ากับค่าวัตถุประสงค์ของคำตอบเต็มหลังการรวม โดยหากค่าวัตถุประสงค์ของคำตอบเต็มนี้ดีกว่าค่าวัตถุประสงค์ของคำตอบที่ดีที่สุด ก็ทำการเปลี่ยนแปลงคำตอบที่ดีที่สุดและค่าวัตถุประสงค์ของคำตอบที่ดีที่สุด

(6) เพิ่มตัวนับ Species s เป็น $s+1$ กลับไปที่ขั้นตอนที่ (4) จนกระทั่งถึง Species สุดท้าย

(7) ตรวจสอบเงื่อนไขการหยุดหาคำตอบ หากถึงเงื่อนไขนี้ หยุดหาคำตอบ คำตอบที่ดีที่สุดขณะนั้นจะเป็นผลลัพธ์ของการหาคำตอบโดย CCGA หากยังไม่ถึงเงื่อนไขการหยุด กำหนด $s = 1$ แล้วกลับไปยังขั้นตอนที่ (4) ซึ่งจะได้ว่า 1 รอบจากขั้นตอนที่ (4) ถึงขั้นตอนที่ (6) คือ 1 รอบของ CCGA (CCGA Generation)

ภาพที่ 2 แสดงให้เห็นถึงกระบวนการหลักของ CCGA ของปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดแบบวัตถุประสงค์เดียว ที่มี 4 ตัวแปรตัดสินใจ โดยแต่ละ Species ของ CCGA แทนหนึ่งตัวแปรตัดสินใจ จากภาพดังกล่าวกลุ่มคำตอบเริ่มต้น (Initial population) ซึ่งมีคำตอบจำนวน n คำตอบ มีค่าวัตถุประสงค์ (Objective) f_1, f_2, \dots, f_n ตามลำดับ หากคำตอบที่ดีที่สุดเริ่มต้นคือคำตอบเริ่มต้นลำดับที่ $n-1$ ซึ่งก็คือ $\{0.601963, 0.443281, 0.925611, 0.194966\}$ หลังจากนั้นกลุ่มคำตอบเริ่มต้นก็จะถูกแบ่งเป็น 4 Species โดยค่าวัตถุประสงค์เริ่มต้นของกลุ่มคำตอบย่อยของแต่ละ Species ก็จะเท่ากับค่าวัตถุประสงค์ของกลุ่มคำตอบเริ่มต้น เช่นค่าวัตถุประสงค์ของคำตอบย่อยตัวที่ 1 ของ Species ที่ 1, 2, 3, และ 4 ทั้งหมดจะเท่ากับค่าวัตถุประสงค์ของคำตอบเริ่มต้นตัวที่ 1 ซึ่งเท่ากับ f_1 จากนั้นกลุ่มคำตอบย่อยในแต่ละ Species ก็ผ่านรอบของ GA (GA generation) ได้แก่ การคัดเลือก (Selection) การสลับสายพันธุ์ (Crossover) และการกลายพันธุ์ (Mutation) เพื่อได้กลุ่มคำตอบย่อยใหม่ ซึ่งจากภาพ สำหรับ Species ที่ 1 แสดงด้วยตัวเลขสีน้ำเงิน กลุ่มคำตอบย่อยใหม่ก็คือ $0.821097, 0.388884, 0.429124, \dots, 0.688689, 0.827959, 0.385001$ ซึ่ง ณ ขณะนี้ หากต้องการคำนวณค่าวัตถุประสงค์ของคำตอบย่อยใด เช่น ต้องการคำนวณค่าวัตถุประสงค์ของคำตอบย่อยตัวแรก ซึ่งก็คือ $\{0.821097\}$ ซึ่งแทนตัวแปรตัดสินใจที่ 1 ของปัญหา ก็ต้องรวมกับตัวแปรอื่นของคำตอบที่ดีที่สุดขณะนั้น $\{0.601963, 0.443281, 0.925611, 0.194966\}$ โดยจะได้ว่าค่าวัตถุประสงค์ของ $\{0.821097\}$ จะเท่ากับค่าวัตถุประสงค์ของคำตอบเต็ม $\{0.821097, 0.443281, 0.925611, 0.194966\}$ ดังแสดงในภาพ ซึ่งหลังจากผ่าน Species ที่ 1 คำตอบที่ดีที่สุดเปลี่ยนเป็น $\{0.429124, 0.443281, 0.925611, 0.194966\}$ ดังภาพ จากนั้นก็ต้องไปคำนวณค่าวัตถุประสงค์ของกลุ่มคำตอบย่อย Species ที่ 2 ซึ่งแทนตัวแปรตัดสินใจที่ 2 ของปัญหา แสดงด้วยตัวเลขสีแดง ได้แก่ $0.976801, 0.353949, 0.343434, \dots, 0.867501, 0.906752, 0.325850$ โดยหากต้องการคำนวณค่าวัตถุประสงค์ของ $\{0.976801\}$ ซึ่งแทนตัวแปรตัดสินใจที่ 2 ก็ต้องไปรวมกับตัวแปรอื่นซึ่งก็คือตัวแปรตัดสินใจที่ 1, 3, และ 4 ของคำตอบที่ดีที่สุดขณะนี้ ซึ่งจะได้ว่า ค่าวัตถุประสงค์ของ $\{0.976801\}$ จะเท่ากับค่าวัตถุประสงค์ของคำตอบเต็ม $\{0.429124, 0.976801, 0.925611, 0.194966\}$ ดังภาพ จากนั้นก็ไปต่อที่ Species ที่ 3 และ 4 หลังจากนั้นก็ทำซ้ำไปเรื่อยๆ จนถึงเงื่อนไขการหยุด

2. การคำนวณหาฟังก์ชันวัตถุประสงค์

การคำนวณหาฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในบทความนี้ได้ประยุกต์มาจาก Rao *et al.*, 2004; Panigrahi *et al.*, 2009 โดยสมการของการเคลื่อนที่ของระบบการเคลื่อนที่ n องศาอิสระ ซึ่งจะได้ว่า

$$[m]\{\ddot{x}(t)\} + [k]\{x(t)\} = \{F(t)\} \quad (1)$$

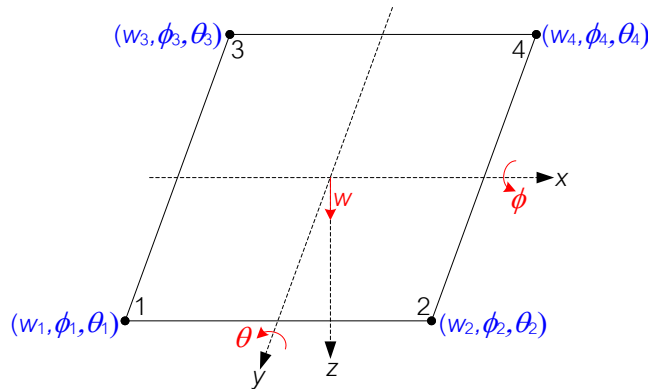
เมื่อ $[m]$ และ $[k]$ คือ เมทริกซ์มวล (Mass matrix) และเมทริกซ์สปริง (Spring matrix) ขนาด $n \times n$ ขณะที่ $\{x\}$ และ $\{F\}$ คือ เวกเตอร์ระยะเคลื่อนที่ (Displacement vector) และเวกเตอร์แรงกระทำ (Applied force vector) ขนาด $n \times 1$

สำหรับการสั่นสะเทือนแบบอิสระ (Free vibration) จะไม่มีแรงกระทำซึ่งจะได้ว่า $\{F(t)\}$ ในสมการที่ (1) จะเท่ากับ $\{0\}$ โดยจะมีสมการค่าลักษณะเฉพาะ (Eigenvalue Equation) โหมด (Mode) สั่นสะเทือน j เป็นดังนี้

$$[k]\{v_j\} - \lambda[m]\{v_j\} = \{0\} \tag{2}$$

เมื่อ λ_j และ $\{v_j\}$ คือค่าลักษณะเฉพาะ และเวกเตอร์ลักษณะเฉพาะ สำหรับโหมดสั้นสะเทือน j ดังกล่าว

งานวิจัยนี้ได้ใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์ของแผ่นโลหะ (Dawe, 1984) สำหรับแบบจำลองระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์วิเคราะห์ของแผ่นโลหะ ภาพที่ 3 แสดงเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมที่ถูกแบ่ง จุดใดๆ จะมี 3 องศาอิสระการเคลื่อนที่ ได้แก่ ระยะแอนตัวในแนวแกน z (w) มุมหมุนรอบแกน x (ϕ) และมุมหมุนรอบแกน y (θ) โดยจากเอลิเมนต์สี่เหลี่ยมมุมฉาก จะมีจุดที่ต้องใช้ในการคำนวณ 4 จุดที่มุมทั้งสิ้น ก็จะได้ว่าเอลิเมนต์นี้มีทั้งหมด 12 องศาอิสระการเคลื่อนที่สำหรับการคำนวณ ซึ่งจะทำให้ เมทริกซ์สปริงย่อย $[k]$, และ เมทริกซ์มวลย่อย $[m]$, สำหรับเอลิเมนต์นี้ จึงมีขนาดเท่ากับ 12×12



ภาพที่ 3 เอลิเมนต์สำหรับแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์

ในแบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์ เมทริกซ์สปริง $[k]$ สามารถคำนวณได้จากผลรวมของเมทริกซ์สปริงย่อย $[k]$, ของทุกเอลิเมนต์ที่ถูกแบ่ง

$$[k] = \sum_{i=1}^N [k]_i \tag{3}$$

เมื่อ $[k]_i$ เป็นเมทริกซ์สปริงย่อยของเอลิเมนต์ลำดับที่ i และ N คือจำนวนเอลิเมนต์ที่ถูกแบ่งทั้งหมด

ในทำนองเดียวกัน เมทริกซ์ $[m]$ คือผลรวมของเมทริกซ์มวลย่อย $[m]_i$, ของทุกเอลิเมนต์

$$[m] = \sum_{i=1}^N [m]_i \tag{4}$$

โดยที่ $[m]_i$ เป็นเมทริกซ์มวลย่อยของเอลิเมนต์ลำดับที่ i ขณะที่ N คือจำนวนเอลิเมนต์ทั้งหมด

เมื่อมีความเสียหายเกิดขึ้นในโครงสร้างเมทริกซ์สปริงจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไป หาก $[k_d]$ คือเมทริกซ์สปริงของโครงสร้างที่เสียหาย $[k_d]$ สามารถคำนวณได้จากผลรวมของเมทริกซ์สปริงย่อย $[k_i]$ แต่ละเอลิเมนต์คูณกับปัจจัยความแข็งแรง (Stiffness factor, α_i) เนื่องจากความเสียหายของเอลิเมนต์นั้นๆ ซึ่งจะได้ว่าเมทริกซ์สปริงของโครงสร้างที่เสียหายสามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$[k_d] = \sum_{i=1}^N \alpha_i [k_i] \tag{5}$$

ค่าของพารามิเตอร์ α_i จะอยู่ในช่วง 0 ถึง 1 ค่า $\alpha_i = 1$ แสดงว่าเอลิเมนต์ที่ไม่ได้รับความเสียหาย ขณะที่หาก $\alpha_i = 0$ หรือน้อยกว่า 1 บ่งบอกว่าเอลิเมนต์นั้นได้รับความเสียหายทั้งหมดหรือเสียหายบางส่วน ตามลำดับ ความถี่ธรรมชาติ (Natural frequency) และรูปแบบการสั่น (Mode shape) ซึ่งแทนด้วยเวกเตอร์แอมพลิจูดหนึ่งหน่วย (Unit amplitude vector) ของโครงสร้างที่ได้รับความเสียหายประมาณว่าสอดคล้องกับสมการค่าลักษณะเฉพาะ (Eigenvalue equation) ลำดับที่ j ดังนั้นสมการที่ (2) เขียนใหม่ได้ดังนี้

$$[k_d] \{v_{jd}\} - \lambda_{jd} [m] \{v_{jd}\} = \{0\} \tag{6}$$

เมื่อ λ_{jd} และ $\{v_{jd}\}$ คือ ค่าลักษณะเฉพาะ (Eigenvalue) ซึ่งเป็นกำลังสองของความถี่ธรรมชาติ และเวกเตอร์ลักษณะเฉพาะขนาดหนึ่งหน่วย (Unit eigenvector) ซึ่งถือเป็นผลทดลองโดยประมาณของการสั่นสะเทือนโหมดที่ j นอกจากนี้สมมุติให้ว่าเมทริกซ์มวลไม่เปลี่ยนแปลงไปเนื่องจากความเสียหายที่เกิดขึ้น

หาก $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_N$ คือตัวแปรตัดสินใจซึ่งเป็นค่าทำนายของปัจจัยความแข็งแรง (Predicted stiffness factor) เมื่อแทน $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_N$ ในสมการที่ (1) และ (2) ก็จะทำให้เทอมด้านขวาของสมการที่ (2) ไม่เท่ากับ $\{0\}$ โดยจะเรียกว่าเกิดเวกเตอร์แรงตกค้าง (Residual force vector, $\{R_j\}$) สำหรับโหมดสั่นสะเทือนที่ j ซึ่งสามารถเขียนในรูปฟังก์ชันของ β_j ได้ดังนี้

$$\{R_j\} = -\lambda_{jd} [m] \{v_{jd}\} + \sum_{i=1}^N \beta_i [k_i] \{v_{jd}\} \tag{7}$$

เวกเตอร์แรงตกค้าง $\{R_j\}$ เท่ากับ $\{0\}$ เหมือนดังสมการที่ (2) หากทำนายค่า β_j ได้อย่างถูกต้องซึ่งหมายถึง $\beta_i = \alpha_i$ สำหรับทุก $i = 1, 2, \dots, N$ เมทริกซ์แรงตกค้าง (Residual force matrix) $[R]$ ซึ่งมีขนาด $n \times n$ จะกำหนดโดยสมการต่อไปนี้

$$[R] = [\{R_1\} \{R_2\} \dots \{R_n\}] \tag{8}$$

ควรห่างกันพอสมควรไม่อยู่บริเวณใดบริเวณหนึ่ง กำหนดให้มี 5 เอลิเมนต์เสียหาย ได้แก่เอลิเมนต์ลำดับที่ 22, 46, 64, 79 และ 85 มีความเสียหาย 20%, 80%, 50%, 40% และ 60% ตามลำดับ จะได้ค่าปัจจัยความแข็งแรง (Stiffness factor, α) เนื่องจากความเสียหายของแต่ละเอลิเมนต์สำหรับปัญหาที่ 1 แสดงดังสมการที่ (10) ขณะที่ปัญหาที่ 2 ดังภาพที่ 4 (ค) มีจำนวนเอลิเมนต์จำนวนมากที่เสียหายซึ่งมีทั้งหมด 40 เอลิเมนต์ โดยมี 9 บริเวณ (Region) ที่เกิดการเสียหาย แต่ละบริเวณประกอบด้วย 3-6 เอลิเมนต์ที่เสียหาย ค่าปัจจัยความแข็งแรง (Stiffness factor, α) เนื่องจากความเสียหายของแต่ละเอลิเมนต์สำหรับปัญหาทดสอบที่ 2 แสดงดังตารางที่ 1

$$\alpha_{22} = 0.8, \alpha_{46} = 0.2, \alpha_{64} = 0.5, \alpha_{79} = 0.6, \alpha_{85} = 0.4, \alpha_i = 1.0 \text{ สำหรับเอลิเมนต์อื่น} \quad (10)$$

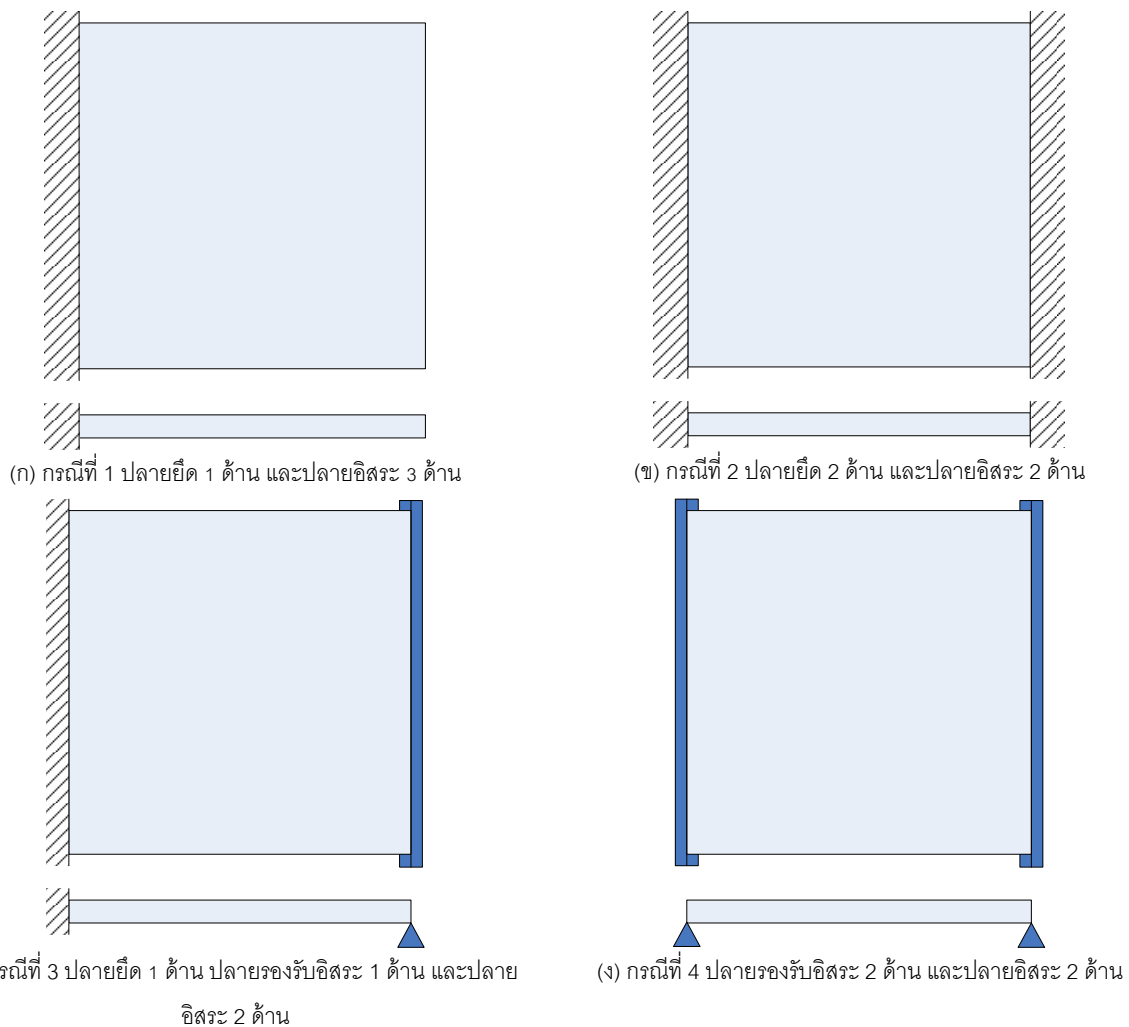
ตารางที่ 1 ค่าปัจจัยความแข็งแรงของปัญหาทดสอบที่ 2

เอลิเมนต์	ปัจจัยความแข็งแรง (Stiffness factor, α)
4-7	0.3
10, 19, 20	0.8
12, 21-23, 31	0.9
26, 36, 46, 47	0.2
39, 40, 49, 50	0.7
53, 54, 63, 64	0.5
71, 81, 82, 91, 92	0.1
78-80, 89, 90	0.6
84-86, 94-96	0.4
อื่นๆ ที่เหลือ	1.0

สำหรับเงื่อนไขขอบของแผ่นโลหะหลักๆ จะมีอยู่ด้วยกัน 3 แบบ ก็คือปลายยึด (Fixed end) ปลายรองรับอย่างง่าย (Simply supported end) และปลายอิสระ (Free end) ดังนั้นแผ่นโลหะที่ทดสอบควรมีเงื่อนไขขอบครบทั้ง 3 แบบ แผ่นโลหะที่ใช้ทดสอบจึงแบ่งเป็น 4 กรณีตามเงื่อนไขขอบที่แตกต่างกันดังภาพที่ 5 โดยกรณีที่ 1 แผ่นโลหะมีปลายยึด 1 ด้าน และปลายอิสระ 3 ด้าน กรณีที่ 2 แผ่นโลหะมีปลายยึด 2 ด้านที่ตรงข้ามกัน และปลายอิสระ 2 ด้านตรงข้ามกัน กรณีที่ 3 แผ่นโลหะมีปลายยึด 1 ด้าน ปลายรองรับอิสระ 1 ด้าน ซึ่งเป็นด้านตรงข้ามกัน และปลายอิสระ 2 ด้านตรงข้ามกัน ส่วนกรณีที่ 4 แผ่นโลหะมีปลายรองรับอิสระ 2 ด้านตรงข้ามกัน และปลายอิสระ 2 ด้านตรงข้ามกัน

ในการทดสอบประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบร่วมวิวัฒนาการและทำงานร่วมกัน (CCGA) CCGA จะเปรียบเทียบกับขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic algorithm, GA) และการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimization, PSO) (Kennedy & Eberhart, 1995). ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมกันในปัจจุบัน โดยจะใช้ขนาดกลุ่มคำตอบ (Population size) ของทั้ง GA PSO และ CCGA เท่ากับ 16 คำตอบเต็มจะถูกเข้ารหัสเป็นแถวลำดับ (Array) ของจำนวนจริง (Real number) จำนวนเท่ากับจำนวนเอลิเมนต์ที่ถูกแบ่งซึ่งก็คือเท่ากับ 100 โดยแต่ละตัวแปรตัดสินใจก็จะแทนค่าทำนายของ

ปัจจัยความแข็งแรงของแต่ละเอลิเมนต์ซึ่งมีค่าตั้งแต่ 0.0 ถึง 1.0 แต่ละ Species ของ CCGA จะแทนหนึ่งตัวแปรตัดสินใจ ซึ่งจะได้ว่าสำหรับปัญหานี้ CCGA ได้แบ่งกลุ่มคำตอบออกเป็น 100 Species โดยจำนวนรอบในการหาคำตอบ (Number of generation) สำหรับเงื่อนไขการหยุด เท่ากับ 1,000 สำหรับ GA และ PSO ขณะที่จำนวนรอบในการหาคำตอบของ CCGA เท่ากับ 10 สำหรับเงื่อนไขการหยุดดังที่แสดงในภาพที่ 2 ซึ่งจะได้ว่าใช้คำตอบที่ถูกสร้างขึ้น (Generated solution) เท่ากับ 16,000 คำตอบเท่ากันทั้งการหาคำตอบด้วย GA PSO และ CCGA เนื่องด้วยว่ามีการเข้ารหัสด้วยจำนวนจริง งานวิจัยนี้ได้ใช้ การสลับสายพันธุ์ (Crossover) แบบ Simulated-binary Crossover (Deb & Agrawal, 1995) และการกลายพันธุ์แบบ Variable-wise polynomial mutation (Deb, 1997) ค่าปัจจัยความแข็งแรง (β) และค่าวัตถุประสงค์ดัดสมการที่ (9) ที่ได้โดย GA PSO และ CCGA สำหรับทั้ง 2 ปัญหาทดสอบซึ่งแต่ละปัญหามี 4 กรณีของเงื่อนไขขอบแสดงดังตารางที่ 2 ถึง ตารางที่ 9 ซึ่งจากตารางดังกล่าว พบว่าค่าปัจจัยความแข็งแรงที่หาได้โดย CCGA ถูกต้องมากกว่าคำตอบที่ได้จาก GA และ PSO อย่าง ชัดเจนทุกกรณีของปัญหา รวมทั้งค่าปัจจัยความแข็งแรงโดย CCGA ใกล้เคียงกับคำตอบที่แท้จริงมาก และค่าวัตถุประสงค์ ที่ได้โดย CCGA ก็มีค่าที่ดีกว่า (น้อยกว่า) ค่าวัตถุประสงค์ที่ได้โดย GA และ PSO สำหรับทุกกรณีของทั้ง 2 ปัญหาทดสอบ



ภาพที่ 5 กรณีเงื่อนไขขอบของแผ่นโลหะทดสอบ

ตารางที่ 2 ค่าปัจจัยความแข็งแรงและค่าวัตถุประสงค์สำหรับปัญหาทดสอบที่ 1 ของแผ่นโลหะเงื่อนไขว้ขอบกรณีที่ 1

เอลิเมนต์	คำตอบที่		ค่าปัจจัยความแข็งแรง (β) ที่หาได้		
	ถูกต้อง	GA	PSO	CCGA	
22	0.8	0.8248	0.8582	0.8004	
46	0.2	0.2108	0.5077	0.2003	
64	0.5	0.5294	0.6825	0.5039	
79	0.6	0.6057	0.7680	0.6000	
85	0.4	0.4724	0.3430	0.4016	
อื่นๆ ที่เหลือ	1.0	0.9141-1.0000	0.2616-1.000	0.9987-1.0000	
ค่าวัตถุประสงค์	0.0	27.35	171.22	0.53	

ตารางที่ 3 ค่าปัจจัยความแข็งแรงและค่าวัตถุประสงค์สำหรับปัญหาทดสอบที่ 1 ของแผ่นโลหะเงื่อนไขว้ขอบกรณีที่ 2

เอลิเมนต์	คำตอบที่		ค่าปัจจัยความแข็งแรง (β) ที่หาได้		
	ถูกต้อง	GA	PSO	CCGA	
22	0.8	0.8247	0.8528	0.8007	
46	0.2	0.2194	0.3121	0.2002	
64	0.5	0.6775	0.4688	0.4986	
79	0.6	0.6400	0.7297	0.6007	
85	0.4	0.4553	0.4430	0.4039	
อื่นๆ ที่เหลือ	1.0	0.8952-1.0000	0.2855-1.0000	0.9971-1.0000	
ค่าวัตถุประสงค์	0.0	32.30	201.99	0.56	

ตารางที่ 4 ค่าปัจจัยความแข็งแรงและค่าวัตถุประสงค์สำหรับปัญหาทดสอบที่ 1 ของแผ่นโลหะเงื่อนไขว้ขอบกรณีที่ 3

เอลิเมนต์	คำตอบที่		ค่าปัจจัยความแข็งแรง (β) ที่หาได้		
	ถูกต้อง	GA	PSO	CCGA	
22	0.8	0.8303	0.9962	0.8007	
46	0.2	0.2261	0.5561	0.2002	
64	0.5	0.5256	0.5067	0.4986	
79	0.6	0.6356	0.6604	0.6007	
85	0.4	0.4878	0.8837	0.4039	
อื่นๆ ที่เหลือ	1.0	0.8273-1.0000	0.3335-1.0000	0.9971-1.0000	
ค่าวัตถุประสงค์	0.0	31.15	214.99	0.79	

ตารางที่ 5 ค่าปัจจัยความแข็งแรงและค่าวัสดุประสงค์สำหรับปัญหาทดสอบที่ 1 ของแผ่นโลหะเงื่อนไขขอบกรณีที่ 4

เอลิเมนต์	ค่าตอบที่		ค่าปัจจัยความแข็งแรง (β) ที่หาได้		
	ถูกต้อง	GA	PSO	CCGA	
22	0.8	0.8390	0.9223	0.8027	
46	0.2	0.2316	0.2256	0.2004	
64	0.5	0.6341	0.6413	0.4974	
79	0.6	0.6144	0.8677	0.5991	
85	0.4	0.4610	0.8950	0.4036	
อื่นๆ ที่เหลือ	1.0	0.8757-1.0000	0.0466-1.0000	0.9975-1.0000	
ค่าวัสดุประสงค์	0.0	29.05	210.37	0.65	

ตารางที่ 6 ค่าปัจจัยความแข็งแรงและค่าวัสดุประสงค์สำหรับปัญหาทดสอบที่ 2 ของแผ่นโลหะเงื่อนไขขอบกรณีที่ 1

เอลิเมนต์	ค่าตอบที่		ค่าปัจจัยความแข็งแรง (β) ที่หาได้		
	ถูกต้อง	GA	PSO	CCGA	
4-7	0.3	0.2781-0.4131	0.1811-0.5734	0.2985-0.3039	
10, 19, 20	0.8	0.7848-0.8221	0.5688-0.9538	0.7993-0.8018	
12, 21-23, 31	0.9	0.8637-0.9995	0.4050-0.9777	0.8967-0.9019	
26, 36, 46, 47	0.2	0.1783-0.2373	0.1737-0.3202	0.1990-0.2009	
39, 40, 49, 50	0.7	0.6876-0.7018	0.5910-0.7550	0.6987-0.7019	
53, 54, 63, 64	0.5	0.4649-0.5255	0.4377-0.5478	0.4997-0.5005	
71, 81, 82, 91, 92	0.1	0.0836-0.1125	0.0784-0.1315	0.0954-0.1033	
78-80, 89, 90	0.6	0.5491-0.6472	0.3353-0.8961	0.5987-0.6017	
84-86, 94-96	0.4	0.3796-0.4299	0.2541-0.5452	0.3977-0.4027	
อื่นๆ ที่เหลือ	1.0	0.8908-1.0000	0.5976-1.0000	0.9983-1.0000	
ค่าวัสดุประสงค์	0.0	21.60	112.94	0.93	

ภาพที่ 6 ถึง ภาพที่ 9 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าปัจจัยความแข็งแรงตลอดการหาค่าตอบโดย GA PSO และ CCGA ซึ่งแสดงเฉพาะปัญหาทดสอบที่ 1 ของทั้ง 4 กรณีของเงื่อนไขขอบ โดยบนภาพทั้ง 4 เส้นกราฟเส้นสีดำซึ่งมีลักษณะเส้นที่แตกต่างกันแสดงปัจจัยความแข็งแรงของเอลิเมนต์ที่ไม่เสียหาย (Undamaged element) หากถูกต้องเส้นกราฟสีดำจะต้องอยู่เข้า 1.0 ขณะที่เส้นกราฟสีอื่นแสดงปัจจัยความแข็งแรงของเอลิเมนต์ที่เสียหายทั้ง 5 เอลิเมนต์ โดยที่เส้นกราฟสีแดง สีเขียว เข้ม สีนํ้าเงิน สีชมพู และสีเขียวยอ่อน แสดงปัจจัยความแข็งแรงของเอลิเมนต์ที่ 22, 46, 64, 79, และ 85 ตามลำดับ ซึ่งจากภาพดังกล่าวก็จะเห็นว่าเมื่อเปรียบเทียบกันแล้วก็จะพบว่าค่าปัจจัยความแข็งแรงของการค้นหาค่าตอบโดย CCGA เปลี่ยนแปลง

เข้าสู่ค่าที่แท้จริงอย่างรวดเร็ว ขณะที่การลู่เข้าสู่คำตอบจากการค้นหาคำตอบโดย GA ค่อนข้างช้าและก็ไม่เข้าสู่คำตอบที่แท้จริง ส่วน PSO เกิดการลู่เข้าก่อนกำหนด (Premature convergence) ทำให้ได้คำตอบที่แย่ที่สุด

ตารางที่ 7 ค่าปัจจัยความแข็งแรงและค่าวัตถุประสงค์สำหรับปัญหาทดสอบที่ 2 ของแผ่นโลหะเงื่อนไขขอบกรณีที่ 2

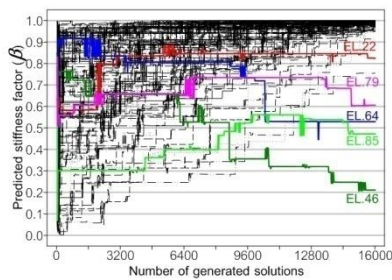
เอลิเมนต์	คำตอบที่ถูกต้อง	ค่าปัจจัยความแข็งแรง (β) ที่หาได้		
		GA	PSO	CCGA
4-7	0.3	0.2780-0.3243	0.2804-0.3644	0.2987-0.3007
10, 19, 20	0.8	0.6665-0.8914	0.1567-0.8662	0.7986-0.8005
12, 21-23, 31	0.9	0.8795-0.9463	0.5597-0.9717	0.8975-0.9009
26, 36, 46, 47	0.2	0.1715-0.2391	0.1408-0.3733	0.1986-0.2013
39, 40, 49, 50	0.7	0.6656-0.7287	0.6129-0.9201	0.6970-0.7004
53, 54, 63, 64	0.5	0.4510-0.5506	0.4395-0.7409	0.4990-0.5018
71, 81, 82, 91, 92	0.1	0.0714-0.1147	0.0385-0.2194	0.0964-0.1024
78-80, 89, 90	0.6	0.5706-0.6277	0.4786-0.7127	0.5972-0.6041
84-86, 94-96	0.4	0.3721-0.4430	0.3329-0.4920	0.3970-0.4045
อื่นๆ ที่เหลือ	1.0	0.9122-1.0000	0.2626-1.0000	0.9985-1.0000
ค่าวัตถุประสงค์	0.0	20.14	123.86	0.98

ตารางที่ 8 ค่าปัจจัยความแข็งแรงและค่าวัตถุประสงค์สำหรับปัญหาทดสอบที่ 2 ของแผ่นโลหะเงื่อนไขขอบกรณีที่ 3

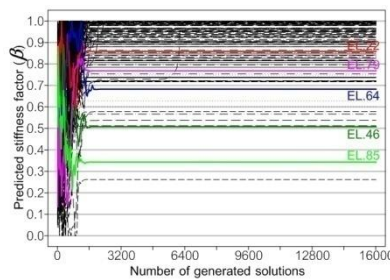
เอลิเมนต์	คำตอบที่ถูกต้อง	ค่าปัจจัยความแข็งแรง (β) ที่หาได้		
		GA	PSO	CCGA
4-7	0.3	0.2647-0.3363	0.2698-0.4946	0.2974-0.2998
10, 19, 20	0.8	0.7941-0.8438	0.3854-0.9913	0.7995-0.8014
12, 21-23, 31	0.9	0.8630-0.9104	0.7553-0.9480	0.8959-0.9056
26, 36, 46, 47	0.2	0.1615-0.2717	0.1322-0.3506	0.1996-0.2023
39, 40, 49, 50	0.7	0.6471-0.7798	0.5106-0.8356	0.6962-0.7036
53, 54, 63, 64	0.5	0.4045-0.5659	0.3468-0.6504	0.4946-0.5050
71, 81, 82, 91, 92	0.1	0.0398-0.1528	0.0855-0.2993	0.0948-0.1059
78-80, 89, 90	0.6	0.5775-0.6106	0.2462-0.7300	0.5978-0.6012
84-86, 94-96	0.4	0.3554-0.4413	0.1534-0.6561	0.3972-0.4034
อื่นๆ ที่เหลือ	1.0	0.8453-1.0000	0.3885-1.0000	0.9952-1.0000
ค่าวัตถุประสงค์	0.0	30.15	146.88	1.32

ตารางที่ 9 ค่าปัจจัยความแข็งแรงและค่าวัตถุประสงค์สำหรับปัญหาทดสอบที่ 2 ของแผ่นโลหะเงื่อนไขขอบกรณีี่ 4

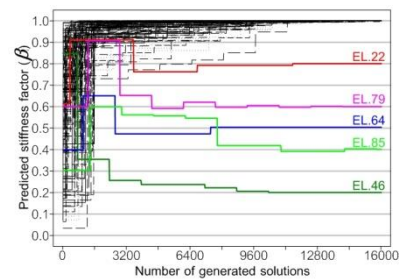
เอลิเมนต์	ค่าตอขที่ ถูกตอข	ค่าปัจจัยความแข็งแรง (β) ที่หาได้		
		GA	PSO	CCGA
4-7	0.3	0.2716-0.3531	0.0750-0.5460	0.2994-0.3022
10, 19, 20	0.8	0.7214-0.9919	0.5546-0.8141	0.7979-0.8032
12, 21-23, 31	0.9	0.8898-0.9397	0.2624-0.9166	0.8978-0.9025
26, 36, 46, 47	0.2	0.1864-0.2156	0.2020-0.3209	0.1934-0.2060
39, 40, 49, 50	0.7	0.4777-0.8910	0.4566-0.9159	0.7000-0.7023
53, 54, 63, 64	0.5	0.4611-0.5483	0.4225-0.6455	0.4982-0.5021
71, 81, 82, 91, 92	0.1	0.0686-0.1389	0.0384-0.3067	0.0970-0.1019
78-80, 89, 90	0.6	0.5437-0.6348	0.5700-0.6302	0.5978-0.6047
84-86, 94-96	0.4	0.3777-0.4136	0.2826-0.6240	0.3962-0.4035
อื่นๆ ที่เหลือ	1.0	0.5144-1.0000	0.2087-1.0000	0.9958-1.0000
ค่าวัตถุประสงค์	0.0	37.68	146.96	1.40



(ก) ปัจจัยความแข็งแรงโดย GA กรณีที่ 1

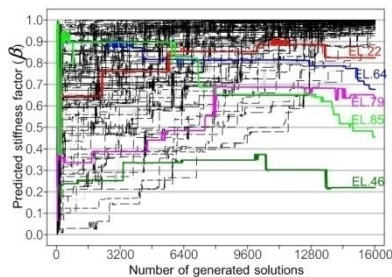


(ข) ปัจจัยความแข็งแรงโดย PSO กรณีที่ 1

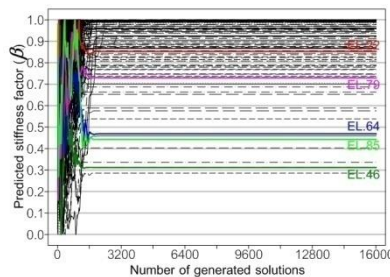


(ค) ปัจจัยความแข็งแรงโดย CCGA กรณีที่ 1

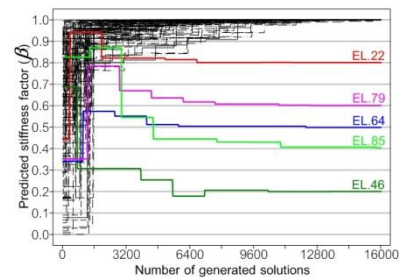
ภาพที่ 6 การลู่เข้าของปัจจัยความแข็งแรงสำหรับปัญหาทดสอบที่ 1 แผ่นโลหะกรณีี่ 1



(ก) ปัจจัยความแข็งแรงโดย GA กรณีที่ 2

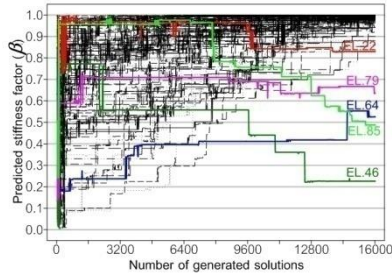


(ข) ปัจจัยความแข็งแรงโดย PSO กรณีที่ 2

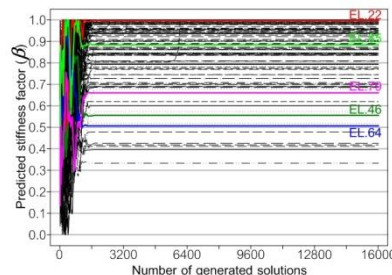


(ค) ปัจจัยความแข็งแรงโดย CCGA กรณีที่ 2

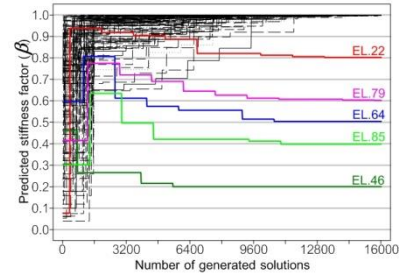
ภาพที่ 7 การลู่เข้าของปัจจัยความแข็งแรงสำหรับปัญหาทดสอบที่ 1 แผ่นโลหะกรณีี่ 2



(ก) ปัจจัยความแข็งแรงโดย GA กรณีที่ 3

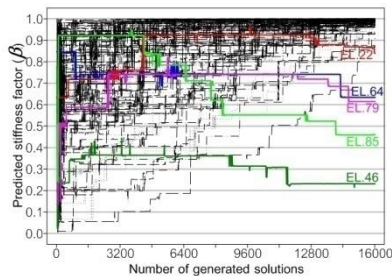


(ข) ปัจจัยความแข็งแรงโดย PSO กรณีที่ 3

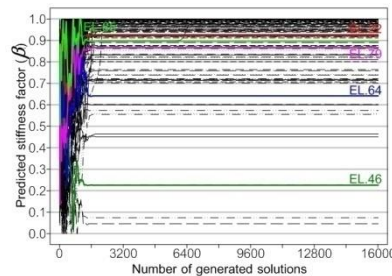


(ค) ปัจจัยความแข็งแรงโดย CCGA กรณีที่ 3

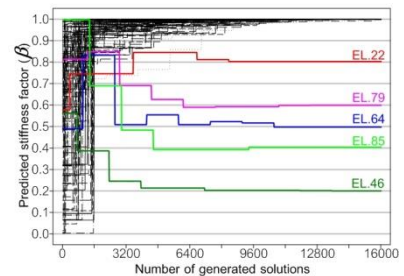
ภาพที่ 8 การลู่เข้าของปัจจัยความแข็งแรงสำหรับปัญหาทดสอบที่ 1 แผ่นโลหะกรณีที่ 3



(ก) ปัจจัยความแข็งแรงโดย GA กรณีที่ 4



(ข) ปัจจัยความแข็งแรงโดย PSO กรณีที่ 4



(ค) ปัจจัยความแข็งแรงโดย CCGA กรณีที่ 4

ภาพที่ 9 การลู่เข้าของปัจจัยความแข็งแรงสำหรับปัญหาทดสอบที่ 1 แผ่นโลหะกรณีที่ 4

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบร่วมวิวัฒนาการและทำงานร่วมกัน (CCGA) ซึ่งถูกเสนอการแก้ไข ปัญหาที่เหมาะสมสำหรับปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดที่มีหลายตัวแปรในการตัดสินใจ ร่วมกับระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เพื่อตรวจสอบความเสียหายโดยใช้หลักการสันสะเทือนในแผ่นโลหะ ซึ่งในบทความนี้ CCGA ถูกใช้หาค่าที่เหมาะสมที่สุดเพื่อหา ความเสียหายที่เกิดขึ้นในแผ่นโลหะ ซึ่งใช้ 2 ปัญหาทดสอบพร้อมด้วย 4 กรณีตามเงื่อนไขขอบของแผ่นโลหะที่ไม่เหมือนกัน โดยแผ่นโลหะถูกแบ่งเป็น 100 เอลิเมนต์ จากการจำลองพบว่า CCGA สามารถหาค่าตอบได้ดีกว่า GA และ PSO อย่างชัดเจน ทุกกรณีทดสอบ รวมทั้งจากการจำลอง ก็ได้ว่า CCGA สามารถค้นหาค่าตอบได้อย่างถูกต้องโดยใช้จำนวนคำตอบที่สร้าง ขึ้นระหว่างการค้นหาค่าตอบเพียง 16,000 คำตอบเท่านั้น ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า CCGA เหมาะสมในการหาค่าตอบสำหรับการ ทำนายความเสียหายของแผ่นโลหะโดยใช้หลักการสันสะเทือน

เอกสารอ้างอิง

- Barai, V., & Pandey, P. C. (1995). Vibration signature analysis using artificial neural networks. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 9(4), 259-265.
- Bergh, F. V. D., & Engelbrecht, A. P. (2004). A Cooperative approach to particle swarm optimization. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 8(3), 225-239.
- Boonlong, K. (2014). Vibration-based damage detection in beams by cooperative coevolutionary genetic algorithm. *Advances in Mechanical Engineering*, 2014, 1-13.

- Boonlong, K., Chaiyaratana, N., & Kuntanapreeda, S. (2004). Optimal control of a hysteresis system by means of co-operative co-evolution. *International Journal of Computational Intelligence and Applications*, 4(4), 321-336.
- Braun, C. E., Chiwiacowsky, L. D., & Gómez, A. T. (2015). Variations of ant colony optimization for the solution of the structural damage identification. *Procedia Computer Science*, 51, 875-884.
- Chou, J. H., & Ghaboussi, J. (2001). Genetic algorithm in structural damage detection. *Computers & Structures*, 79(4), 1335-1353.
- Dawe, D. J. (1984). Matrix and finite element displacement analysis and structures. *Oxford engineering science series*, 410-541.
- Deb, K. (1997). Mechanical component design using genetic algorithms. In D. Dasgupta, & Z. Michalewicz. (Eds.), *Evolutionary Algorithms in Engineering Applications*. (pp. 495-512), New York: Springer.
- Deb, K., & Agrawal R. B. (1995). Simulated binary crossover for continuous search space. *Complex Systems*, 9(2), 115-148.
- Ding, Z. H., Huang, M., & Lu, Z. R. (2016). Structural damage detection using artificial bee colony algorithm with hybrid search strategy. *Swarm and Evolutionary Computation*, 28, 1-13.
- Galewski, M. A. (2016). Spectrum-based modal parameters identification with particle swarm optimization. *Mechatronics*, 37, 21-32.
- Garcia-Pedrajas, N. (2003). COVNET: a cooperative coevolutionary model for evolving artificial neural networks. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 14(3), 575-596.
- Gawronski, W., & Sawicki, J. T. (2000). Structural damage detection using modal norms. *Journal of Sound and Vibration*, 229(1), 194-198.
- Gerist, S., & Maheri, M. R. (2016). Multi-stage approach for structural damage detection problem using basis pursuit and particle swarm optimization. *Journal of Sound and Vibration*, 384, 210-226.
- Goldberg, D. E. (1989). *Genetic algorithms in search, optimization and machine learning*, Addison-Wesley, USA.
- González, A. G., & Fassois, S. D. (2016). A supervised vibration-based statistical methodology for damage detection under varying environmental conditions & its laboratory assessment with a scale wind turbine blade. *Journal of Sound and Vibration*, 366, 484-500.
- Guo, H. Y., & Li, Z. L. (2012). Structural damage identification based on Bayesian theory and improved immune genetic algorithm. *Expert Systems with Applications*, 39(7), 6426-6434.
- He, R. S., & Hwang, S. F. (2006). Damage detection by an adaptive real-parameter simulated annealing genetic algorithm. *Computers & Structures*, 84(31-32), 2231-2243.
- Holland, J. H. (1975). *Adaptation in natural and artificial systems*, Ann Arbor, MI: University of Michigan Press, USA.

- Ibáñez, O., Cordón, O., & Damas, S. (2012). A cooperative coevolutionary approach dealing with the skull–face overlay uncertainty in forensic identification by craniofacial superimposition. *Soft Computing*, 16(5), 797-808.
- Kennedy, J. & Eberhart, R. C. (1995). Particle swarm optimization. In *Proceedings of IEEE International Conference on Neural Network*. (pp. 1942-1948). Perth, Australia.
- Kim, N. I. & Lee, J. (2013). Damage identification of trusses with elastic supports using FEM and genetic algorithm. *Advances in Mechanical Engineering*, 2013, 1-10.
- Kim, V. & Boonlong, K. (2015) Cooperative coevolutionary genetic algorithm for vibration based damage detection of truss structures. *International Journal of Advanced and Applied Science*, 2(12), 52-57.
- Li, X. & Yao, X. (2012). Cooperatively coevolving particle swarms for large scale optimization. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 16(2), 210-224.
- Majumdar, A., Maiti, D. K., & Maity, D. (2012). Damage assessment of truss structures from changes in natural frequencies using ant colony optimization. *Applied Mathematics and Computation*, 218(19), 9759-9772.
- Mares, C., & Surace, C. (1996). An application of genetic algorithms to identify damage in elastic structures. *Journal of Sound and Vibration*, 195(2), 195-215.
- Nobaharia, M., & Seyedpoorb, S. M. (2011). Structural damage detection using an efficient correlation-based index and a modified genetic algorithm. *Mathematical and Computer Modelling*, 53(9-10), 1798-1809.
- Panigrahi, S. K., Chakraverty, S. & Mishra, B. K. (2009). Vibration based damage detection in a uniform strength beam using genetic algorithm. *Meccanica*, 44(6), 697-710.
- Pereraa, R., Marina, R., & Ruizb, A. (2013). Static–dynamic multi-scale structural damage identification in a multi-objective framework. *Journal of Sound and Vibration*, 332(6), 1484-1500.
- Potter, M. A., & de Jong, K. A. (1994). A cooperative coevolutionary approach to function optimization. *Lecture Notes in Computer Science*, 866, 249-257.
- Potter, M. A., & de Jong, K. A. (2000). Cooperative coevolution: An architecture for evolving coadapted subcomponents. *Evolutionary Computation*, 8(1) (2000) 1-29.
- Rao, M. A., Srinivas, J., & Murthy, B. S. N. (2004). Damage detection in vibrating bodies using genetic algorithms. *Computers & Structures*, 82(11-12), 963-968.
- Shih, H. W., Thambiratnam, D. P., & Chan, T. H. T. (2009). Vibration based structural damage detection in flexural members using multi-criteria approach. *Journal of Sound and Vibration*, 323(3–5), 645-661.
- Yang, Q. W., & Liu, J. K. (2007). Structural damage identification based on residual force vector, *Journal of Sound and Vibration*, 305(1-2), 298-307.

- Yin, T., Jiang, Q. H., & Yuen, K. V. (2017). Vibration-based damage detection for structural connections using incomplete modal data by Bayesian approach and model reduction technique. *Engineering Structures*, 132, 260-277.
- Zhong, F., Li, H., & Zhong S. (2017). An improved artificial bee colony algorithm with modified-neighborhood-based update operator and independent-inheriting-search strategy for global optimization. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 58, 134-156.