

การประยุกต์การค้นหาแบบกระแสเชิงปรับตัวเพื่อแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุดแบบมีเงื่อนไข

Application of Adaptive Current Search to Solve Constraint Optimization Problems

สุภาภรณ์ สุวรรณรังษี*

ภาควิชาวิศวกรรมขนถ่ายวัสดุและโลจิสติกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

1518 ถนนประชากรบุรี 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800

E-mail:supaporn.s@eng.kmutnb.ac.th*

Supaporn Suwannarongsri*

Department of Materials Handling and Logistics Engineering, Faculty of Engineering,

King Mongkut's University of Technology North Bangkok,

1518 Piboonsongkram Rd. Bangsue District, Wong Sawang Area, Bangkok 10800,

E-mail:supaporn.s@eng.kmutnb.ac.th*

บทคัดย่อ

การค้นหาแบบกระแสเชิงปรับตัวเป็นเทคนิคการหาค่าเหมาะที่สุดแบบอภิศักศึกษาสำนักเทคนิคหนึ่งที่มีประสิทธิภาพ ขั้นตอนวิธีของการค้นหาแบบกระแสเชิงปรับตัวได้รับการพัฒนาขึ้นจากพฤติกรรมการไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจรขยาย บทความนี้นำเสนอการประยุกต์การค้นหาแบบกระแสเชิงปรับตัวเพื่อแก้ปัญหาค่าเหมาะที่สุดแบบมีเงื่อนไข โดยได้ทำการทดสอบกับปัญหาค่าเหมาะที่สุดแบบมีเงื่อนไขมาตรฐานจำนวน 3 ปัญหา จากนั้นได้ประยุกต์การค้นหาแบบกระแสเชิงปรับตัวกับปัญหาค่าเหมาะที่สุดแบบมีเงื่อนไขทางวิศวกรรมจำนวน 2 ปัญหา ได้แก่การออกแบบสปริง และการออกแบบท่อความดัน ผลการทดสอบจะเปรียบเทียบกับวิธีการแบบดั้งเดิมที่มีประสิทธิภาพ จากผลการทดสอบพบว่าการค้นหาแบบกระแสเชิงปรับตัวสามารถให้คำตอบที่ดีกว่าวิธีการแบบดั้งเดิมสำหรับทุกปัญหา

คำหลัก: การค้นหาแบบกระแสเชิงปรับตัว, การหาค่าเหมาะที่สุดแบบมีเงื่อนไข, อภิศักศึกษาสำนัก

Abstract

The adaptive current search (ACS) is one of the most efficient metaheuristic optimization techniques. Algorithms of the ACS is developed from the behavior of electric current flow through electrical networks. This paper proposes the application of the ACS to solve constraint optimization problems. Performance of the ACS is evaluated against three standard benchmarking constraint problems. Then, the ACS is applied to solve two real-world constraint engineering problems, i.e. spring design and pressure vessel design. Results obtained by the ACS will be compared with those obtained by the conventional method. As results, it was found that the ACS can provide superior solutions to the conventional method for all problems.

Keywords: Adaptive current search, Constraint optimization problem, Metaheuristics

1. บทนำ

การหาค่าเหมาะที่สุดแบบอภิศึกษาสำนึก (meta-heuristic optimization) ได้รับการยอมรับและถูกนำไปประยุกต์ใช้เพื่อแก้ปัญหาทางวิศวกรรมอย่างกว้างขวาง[1],[2] ในบริบทของการหาค่าเหมาะที่สุดแนวใหม่ อภิศึกษาสำนึกสามารถแบ่งตามลักษณะการค้นหาได้ 2 กลุ่มคืออภิศึกษาสำนึกแบบอิงผลเฉลยเดี่ยว (single-solution based metaheuristics) ซึ่งจะมีคุณสมบัติความเข้มข้น (intensification) ที่โดดเด่น และอภิศึกษาสำนึกแบบอิงประชากร (population-based metaheuristics) ซึ่งมีคุณสมบัติความหลากหลายเข้มข้น (diversification) ที่โดดเด่น [1],[2],[3] จากการสำรวจงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าในกลุ่มของอภิศึกษาสำนึกแบบอิงผลเฉลยเดี่ยว การค้นแบบกระแสเชิงปรับตัว (adaptive current search: ACS) นับว่าเป็นเทคนิคใหม่ซึ่งได้รับการนำเสนอในปีค.ศ. 2014 [4],[5] ขั้นตอนวิธีของ ACS ได้รับการพัฒนาขึ้นจากพฤติกรรมการไหลของกระแสไฟฟ้าในวงจรจ่ายโดยอาศัยรายการหน่วยความจำสำหรับจัดจำผลเฉลยในอดีต และกลไกการปรับรัศมีการค้นหา (adaptive radius mechanism: AR) เพื่อเร่งกระบวนการค้นหาผลเฉลย ทำให้ ACS มีประสิทธิภาพในการค้นหาผลเฉลยวงกว้าง (global solution) มากยิ่งขึ้น ด้วยขั้นตอนวิธีที่ไม่ซับซ้อน ทำให้ ACS ได้รับความสนใจและนำไปแก้ปัญหาทางวิศวกรรมอุตสาหกรรมที่หลายหลาย อาทิเช่น การแก้ปัญหาการจัดการพลังงานในสายงานการประกอบ [4],[5] และการจัดการพลังงานอย่างเหมาะสมในปัญหาการจัดเส้นทางขนส่ง [6] เป็นต้น

บทความนี้นำเสนอการประยุกต์ ACS เพื่อแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดแบบมีเงื่อนไขที่เป็นปัญหามาตรฐานจำนวน 3 ปัญหา จากนั้นทำการประยุกต์ ACS เพื่อแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดแบบมีเงื่อนไข ซึ่งเป็นปัญหาจริงจำนวน 2 ปัญหา คือการออกแบบสปริง และการออกแบบท่อความดัน บทความนี้ประกอบด้วย

หัวข้อต่างๆ จำนวน 5 หัวข้อ ในหัวข้อที่ 2 ของบทความจะนำเสนอขั้นตอนวิธีของ ACS หัวข้อที่ 3 นำเสนอปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดแบบมีเงื่อนไขที่ใช้ในการทดสอบหัวข้อที่ 4 นำเสนอผลการทดสอบและการอภิปราย และหัวข้อที่ 5 เป็นบทสรุป

2. ขั้นตอนวิธีของ ACS

การค้นแบบกระแสเชิงปรับตัว หรือ ACS เป็นอภิศึกษาสำนึกแบบอิงผลเฉลยเดี่ยว [4], [5] ที่มีขั้นตอนวิธีที่เลียนแบบพฤติกรรมการไหลของกระแสไฟฟ้า ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับการค้นหาเฉพาะที่ (local search) แต่ ACS จะมีการนำเอารายการหน่วยความจำมาใช้เพื่อจัดจำผลเฉลยในอดีต และใช้ประโยชน์จากผลเฉลยดังกล่าวเพื่อกำหนดทิศทางการค้นหา ขั้นตอนวิธีของ ACS มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 กำหนดจำนวนผลเฉลยเริ่มต้น (จำนวนเส้นทางการค้นหา), รัศมีการค้นหา R , ตัวนับ $k=1$, หน่วยความจำเส้นทางการค้นหา Ψ และหน่วยความจำผลเฉลยเฉพาะที่

ขั้นตอนที่ 2 สร้างผลเฉลยเริ่มต้น $x = x_1, \dots, x_n$ จากกระบวนการสุ่มภายในปริภูมิการค้นหา

ขั้นตอนที่ 3 ประเมินผลเฉลย ด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (objective function) จากนั้นทำการจัดลำดับผลเฉลย x ที่ ซึ่ง $f(x_1) < \dots < f(x_n)$ แล้วเก็บ x ที่ผ่านการจัดลำดับแล้วลงใน Ψ

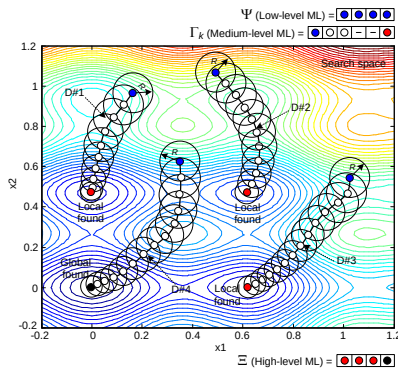
ขั้นตอนที่ 4 ให้ $s = x_k$ เป็นผลเฉลยเริ่มต้นที่ได้รับการคัดเลือกหลังการจัดลำดับ (เส้นทางการค้นหา)

ขั้นตอนที่ 5 สร้างเซตค่าข้างเคียง $\mathcal{N}(s)$ จากผลเฉลย s ด้วยกระบวนการสุ่มภายในรัศมีการค้นหา R **ขั้นตอนที่ 6** ประเมินค่าข้างเคียงในเซต $\mathcal{N}(s)$ ด้วยฟังก์ชันวัตถุประสงค์ให้ $s' \in \mathcal{N}(s)$ คือค่าข้างเคียงที่ดีที่สุดภายในเซต

ขั้นตอนที่ 7 ถ้า $f(s') \leq f(s)$ ให้ยอมรับ s' โดยปรับค่า $s = s'$ ถ้าฟังก์ชันวัตถุประสงค์ไม่ได้รับการปรับปรุงอย่างมีนัยสำคัญ ให้เรียกใช้กลไกการปรับระดับการค้นหา (AR) โดยการปรับ $R = \alpha R$, $0 < \alpha < 1$ แล้วกลับไปยังขั้นตอนที่ 5 ไม่เช่นนั้น แสดงว่าผลเฉลยเฉพาะที่ในเส้นทางนี้ถูกค้นพบ

ขั้นตอนที่ 8 ตรวจสอบ TC (termination criteria) ถ้า TC เป็นจริง ให้ยุติการค้นหา ไม่เช่นนั้นให้เก็บ s ไว้ในเซต Ξ แล้วทำการปรับค่า $k = k + 1$ และกลับไปยังขั้นตอนที่ 4 เพื่อทำการค้นหาในเส้นทางถัดไป

ตัวอย่างการค้นหาของ ACS บนปริภูมิ 2 มิติ เมื่อกำหนดให้จำนวนเส้นทางการค้นหาเท่ากับ 4 เส้นทางแสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 การค้นหาของ ACS บนปริภูมิ 2 มิติ

3. ปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดแบบมีเงื่อนไข

ปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดแบบมีเงื่อนไขที่ใช้ในงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 กลุ่มด้วยกัน กลุ่มแรกคือปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดแบบมีเงื่อนไขที่เป็นปัญหามาตรฐานจำนวน 3 ปัญหา และกลุ่มที่สองคือปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดแบบมีเงื่อนไขซึ่งเป็นปัญหาจริงจำนวน 2 ปัญหา ดังรายละเอียดต่อไปนี้

2.1 ปัญหามาตรฐาน

ปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดแบบมีเงื่อนไขที่เป็นปัญหามาตรฐานจำนวน 3 ปัญหา ได้รับการ

คัดเลือกมาจากปัญหาที่ใช้อย่างแพร่หลาย และมีจำนวนตัวแปรตัดสินใจ (decision variables) และจำนวนเงื่อนไขที่แตกต่างกัน [7],[8] โดยที่ฟังก์ชัน Fcon1 จะมีตัวแปรตัดสินใจจำนวน 2 ตัวแปร และมีเงื่อนไขจำนวน 2 เงื่อนไขดังแสดงในสมการที่ (1) ฟังก์ชัน Fcon2 มีตัวแปรตัดสินใจจำนวน 7 ตัวแปร และมีเงื่อนไขจำนวน 4 เงื่อนไขดังแสดงในสมการที่ (2) และฟังก์ชัน Fcon3 มีตัวแปรตัดสินใจจำนวน 8 ตัวแปร และมีเงื่อนไขจำนวน 6 เงื่อนไขดังแสดงในสมการที่ (3) ตามลำดับ

$$\begin{aligned} \text{Fcon1 : } \min_x f(x) &= (x_1^2 + x_2 - 11)^2 + (x_1 + x_2^2 - 7)^2 \\ \text{subject to,} \\ g_1(x) &= 4.84 - (x_1 - 0.05)^2 - (x_2 - 2.5)^2 \geq 0, \\ g_2(x) &= x_1^2 + (x_2 - 2.5)^2 - 4.84 \geq 0, \\ 0 \leq x_1 \leq 6, \quad 0 \leq x_2 \leq 6 \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{Fcon2 : } \min_x f(x) &= (x_1 - 10)^2 + 5(x_2 - 12)^2 \\ &+ x_3^4 + 3(x_4 - 11)^2 + 10x_5^6 + 7x_6^2 + x_7^4 \\ &- 4x_6x_7 - 10x_6 - 8x_7 \\ \text{subject to,} \\ g_1(x) &= 127 - 2x_1^2 - 3x_4^2 - x_3 - 4x_4^2 - 5x_5 \geq 0, \\ g_2(x) &= 282 - 7x_1 - 3x_2 - 10x_3^2 - x_4 + x_5 \geq 0, \\ g_3(x) &= 196 - 23x_1 - x_2^2 - 6x_6^2 + 8x_7 \geq 0, \\ g_4(x) &= -4x_1^2 - x_2^2 + 3x_1x_2 - 2x_3^2 - 5x_6 + 11x_7 \geq 0, \\ -10 \leq x_i \leq 10, \quad (i=1, \dots, 7) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{Fcon3 : } \min_x f(x) &= x_1 + x_2 + x_3 \\ \text{subject to,} \\ g_1(x) &= 1 - 0.0025(x_4 + x_6) \geq 0, \\ g_2(x) &= 1 - 0.0025(x_5 + x_7 - x_4) \geq 0, \\ g_3(x) &= 1 - 0.01(x_8 - x_5) \geq 0, \\ g_4(x) &= x_1x_6 - 833.33252x_4 - 100x_1 + 83333.333 \geq 0, \\ g_5(x) &= x_2x_7 - 1250x_5 - x_2x_4 + 1250x_4 \geq 0, \\ g_6(x) &= x_3x_8 - x_3x_5 + 2500x_5 - 1250000 \geq 0, \\ 100 \leq x_1 \leq 10000, \quad 1000 \leq x_2, x_3 \leq 10000, \\ 10 \leq x_i \leq 1000, \quad (i=4, \dots, 8) \end{aligned} \quad (3)$$

2.2 ปัญหาทางวิศวกรรม

ปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดแบบมีเงื่อนไขที่เป็นปัญหาจริงทางวิศวกรรมจำนวน 2 ปัญหาได้แก่ ปัญหาการออกแบบสปริง และปัญหาการออกแบบท่อความดัน

ปัญหาการออกแบบสปริง (Fspring) สำหรับรับแรงดึงและแรงอัดพบ เป็นปัญหาที่ต้องการให้สปริงให้มีน้ำหนักเบาที่สุดที่สอดคล้องกับเงื่อนไขระยะการเบนน้อยที่สุด ความเค้นเฉือนสูงสุด และข้อจำกัดด้านรูปทรงเรขาคณิต เมื่อสปริงที่พิจารณานั้นสร้างขึ้นจากขดลวดตั้งรูปที่ 2 และสมการที่ (4) [9],[10] ผลเฉลยหรือตัวแปรตัดสินใจคือ เส้นผ่าศูนย์กลางกลางของลวด w (ความหนา), เส้นผ่าศูนย์กลางของขดลวด d และความยาว L (จำนวนของขดลวดที่สมมูลกัน)

Fspring : min $f(w, d, L) = (2 + L)dw^2$
subject to,

$$\begin{aligned} g_1(w, d, L) &= 1 - \frac{d^3 L}{71,785 w^4} \leq 0, \\ g_2(w, d, L) &= \frac{d(4d - w)}{w^3(12,566d - w)} + \frac{1}{5,108 w^2} - 1 \leq 0, \\ g_3(w, d, L) &= 1 - \frac{140.45 w}{d^2 L} \leq 0, \\ g_4(w, d, L) &= \frac{2(w + L)}{3} - 1 \leq 0, \\ 0.05 \leq w \leq 2.0, \quad 0.25 \leq d \leq 1.3, \quad 2.0 \leq L \leq 15.0 \end{aligned} \quad (4)$$



รูปที่ 2 ปัญหา Fspring

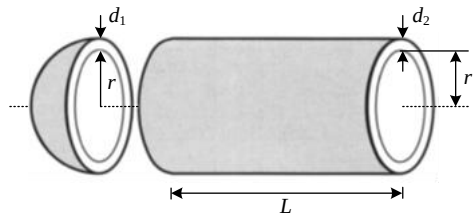
ปัญหาการออกแบบท่อความดัน (Fvessel) ในถังแก๊สหรือหม้อไอน้ำ คือปัญหาที่ต้องการออกแบบท่อทรงกระบอกที่มีต้นทุนน้อยที่สุดที่สามารถทำงานภายใต้ปริมาตรและความดันที่กำหนด ดังรูปที่ 3 และสมการที่(5) [9],[10] ตัวแปรตัดสินใจของการออกแบบได้แก่ความหนาของหัวท่อ d_1 , ความหนาของตัวท่อ d_2 , รัศมีภายใน

ท่อ r และความยาวของท่อ L

$$\text{Fvessel: min } f(x) = 0.6224d_1rL + 1.7781d_2r^2 + 3.1661d_1^2L + 19.84d_1^2r$$

subject to,

$$\begin{aligned} g_1(x) &= -d_1 + 0.0193r \leq 0, \\ g_2(x) &= -d_2 + 0.00954r \leq 0, \\ g_3(x) &= -\pi^2 L - \frac{4\pi}{3} r^3 + 1,296,000 \leq 0, \\ g_4(x) &= L - 240 \leq 0, \\ 0.0625 \leq d_1, d_2 \leq 99 \times 0.0625, \\ 10.0 \leq r, L \leq 200.0 \end{aligned} \quad (5)$$



รูปที่ 3 ปัญหา Fvessel

4. ผลการทดสอบและอภิปราย

ขั้นตอนวิธีของ ACS ได้รับการพัฒนาขึ้นด้วย MATLAB เพื่อประมวลผลบนเครื่องคอมพิวเตอร์ Intel Core2 Duo 2.0 GHz สำหรับแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดแบบมีเงื่อนไข เริ่มต้นจากการทดสอบเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของ ACS ที่เหมาะสมสำหรับทุกปัญหาที่ใช้ในงานวิจัยนี้ โดยทำการเปลี่ยนแปลงจำนวนเส้นทางการค้นหา $N = 3, 5, 10, 20, 30$, จำนวนค่าข้างเคียง $n = 10, 20, 30, 40, 50$, รัศมีการค้นหา $R = 10\%, 20\%, 30\%, 40\%, 50\%$ ของปริภูมิการค้นหา จำนวนการทำซ้ำของแต่ละเส้นทาง $Iter = 100, 200, 500, 1000$, กลไก AR = 2, 3, 4, 5 states จากการทดสอบเบื้องต้นพบว่าค่าพารามิเตอร์ของ ACS ที่เหมาะสมสำหรับทุกปัญหาที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ $N = 10$ (กำหนดให้เป็น TC), $n = 40, R = 20\%$ ของปริภูมิการค้นหา

, $Iter = 200$ และกลไก $AR = 2$ states ซึ่งในการทดสอบกับทุกปัญหาต่อไปนี้ จะใช้ค่าพารามิเตอร์ชุดดังกล่าวเพียงชุดเดียวเท่านั้น

ผลการทดสอบ ACS เพื่อแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดแบบมีเงื่อนไขจะได้รับการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากวิธีการแบบดั้งเดิม ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้กำหนดการไม่เชิงเส้น (nonlinear programming) โดยใช้คำสั่ง `fmincon` ในกล่องเครื่องมือการหาค่าเหมาะที่สุดของ MATLAB และขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (genetic algorithm: GA) ซึ่งเป็นนักศึกษาสำนักแบบอิงประชากรที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย ซึ่งในงานวิจัยได้ใช้กล่องเครื่องมือ GA ของ MATLAB เช่นเดียวกัน

ผลการทดสอบ ACS กับปัญหามาตรฐานจำนวน 3 ปัญหาแสดงดังตารางที่ 1 ซึ่งพบว่า ACS สามารถให้คำตอบที่ดีกว่ากำหนดการไม่เชิงเส้น และ GA ในทุกปัญหา และเช่นเดียวกัน ผลการทดสอบ ACS กับปัญหาทางวิศวกรรมซึ่งเป็นปัญหาจริงจำนวน 2 ปัญหา ดังแสดงในตารางที่ 2 พบว่า ACS สามารถให้คำตอบที่ดีกว่ากำหนดการไม่เชิงเส้น และ GA ในทุกปัญหา

5. สรุป

บทความนี้ได้นำเสนอการประยุกต์การค้นหาแบบกระแสวิกฤต (ACS) สำหรับการแก้ปัญหาการหาค่าเหมาะที่สุดแบบมีเงื่อนไข ACS นับเป็นนักศึกษาสำนักแบบอิงผลเฉลยเดี่ยวที่ทรงประสิทธิภาพและมีขั้นตอนวิธีที่ไม่ซับซ้อน โดยได้ทำการทดสอบ ACS กับปัญหามาตรฐานจำนวน 3 ปัญหา และปัญหาทางวิศวกรรมจำนวน 2 ปัญหา ได้แก่การออกแบบสปริง และการออกแบบท่อความดัน ทำการเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากกำหนดการไม่เชิงเส้นซึ่งเป็นวิธีการแบบดั้งเดิม และ GA ซึ่งเป็นนักศึกษาสำนักแบบอิงประชากร จากผลการทดสอบในทุกกรณีปัญหาที่ใช้ในงานวิจัยนี้พบว่า ACS สามารถให้คำตอบที่ดีกว่ากำหนดการไม่เชิงเส้น และ GA ตามลำดับ

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบกับปัญหามาตรฐาน

Fcon1				
Standard Solutions x , Constraint Function and Objective function $f(x)$	Optimal Solutions x^* , Constraint Function and Objective function $f^*(x)$	Algorithms		
		Nonlinear Programming	GA	ACS
$0 \leq x_1 \leq 6$	x_1	2.2467	2.2472	2.2468
$0 \leq x_2 \leq 6$	x_2	2.3822	2.3821	2.3818
$g_1 \geq 0$	g_1	0.0001	0.0001	1.83×10^{-18}
$g_2 \geq 0$	g_2	0.2222	0.2222	0.2222
$f(x) = 13.5908$	$f^*(x)$	13.5991	13.5974	13.5908
Fcon2				
Standard Solutions x and Objective function $f(x)$	Optimal Solutions x^* and Objective function $f^*(x)$	Algorithms		
		Nonlinear Programming	GA	ACS
$-10 \leq x_1 \leq 10$	x_1	2.3234	2.3305	2.3250
$-10 \leq x_2 \leq 10$	x_2	1.9512	1.9514	1.9500
$-10 \leq x_3 \leq 10$	x_3	-0.4484	-0.4778	-0.4914
$-10 \leq x_4 \leq 10$	x_4	4.3619	4.3657	4.3709
$-10 \leq x_5 \leq 10$	x_5	-0.631	-0.6244	-0.6239
$-10 \leq x_6 \leq 10$	x_6	1.0387	1.0380	1.0409
$-10 \leq x_7 \leq 10$	x_7	1.6055	1.5941	1.5934
$f(x) = 6.8064 \times 10^2$	$f^*(x)$	6.8086×10^2	6.8069×10^2	6.8064×10^2

Fcon3				
Standard Solutions x and Objective function $f(x)$	Optimal solutions x^* and Objective function $f^*(x)$	Algorithms		
		Nonlinear Programming	GA	ACS
$100 \leq x_1 \leq 10,000$	x_1	584.02	585.68	590.48
$1,000 \leq x_2 \leq 10,000$	x_2	1357.02	1358.34	1361.73
$1,000 \leq x_3 \leq 10,000$	x_3	5146.64	5145.17	5100.32
$10 \leq x_4 \leq 1,000$	x_4	192.01	191.16	182.89
$10 \leq x_5 \leq 1,000$	x_5	296.58	298.01	296.02
$10 \leq x_6 \leq 1,000$	x_6	213.88	212.35	217.07
$10 \leq x_7 \leq 1,000$	x_7	285.67	286.14	286.74
$10 \leq x_8 \leq 1,000$	x_8	392.12	394.95	396.01
$f(x) = 7.0525 \times 10^3$	$f^*(x)$	7.0583×10^3	7.0564×10^3	7.0525×10^3

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบกับปัญหาทางวิศวกรรม

Fspring				
Standard Solutions x , Constraint Function and Objective function $f(x)$	Optimal Solutions x^* , Constraint Function and Objective function $f^*(x)$	Algorithms		
		Nonlinear Programming	GA	ACS
$0.05 \leq w \leq 2.0$	w	0.05	0.0517	0.04999
$0.05 \leq d \leq 1.3$	d	0.25	0.3568	0.25001
$2.0 \leq L \leq 15$	L	9.9877	11.2871	9.98769
$f(x) = \text{not-known}$	$f^*(x)$	0.0075	0.0127	0.0074

Fvessel				
Standard Solutions x and Objective function $f(x)$	Optimal Solutions x^* and Objective function $f^*(x)$	Algorithms		
		Nonlinear Programming	GA	ACS
$0.0625 \leq d_1 \leq 6.1875$	d_1	0.7782	0.8125	0.77818
$0.0625 \leq d_2 \leq 6.1875$	d_2	0.3846	0.4375	0.38459
$10 \leq r \leq 200$	r	40.3196	42.0984	40.31958
$10 \leq L \leq 200$	L	200.00	176.6366	199.998
$f(x) = \text{not-known}$	$f^*(x)$	5,885.33	6,059.71	5,884.45

เอกสารอ้างอิง

- [1] F. Glover and G. A. Kochenberger, Handbook of Metaheuristics, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2003.
- [2] E. G. Talbi, Metaheuristics from Design to Implementation, John Wiley & Sons, 2009.
- [3] X. S. Yang, Engineering Optimization: An Introduction with Metaheuristic Applications, John Wiley & Sons, 2010.
- [4] S. Suwannarongsri, T. Bunnag and W. Klinbun, "Energy resource management of assembly line balancing problem using modified current search method," International Journal of Intelligent Systems and Applications, vol.6, no.3, 2014, pp. 1 – 11.
- [5] S. Suwannarongsri, T. Bunnag and W. Klinbun, "Optimization of energy resource management for assembly line balancing using adaptive current search," American Journal of Operations Research, vol.4, no.1, 2014, pp. 8 – 21.
- [6] S. Suwannarongsri, T. Bunnag and W. Klinbun, "Traveling transportation problem optimization by adaptive current search method," International Journal of Modern Education and Computer Science, vol.6, no.5, 2014, pp. 33 – 45.
- [7] D. M. Himmelblau, Applied Nonlinear Programming, McGraw-Hill, New York, 1972.
- [8] J. Braken and G. P. McCormick, Selected Applications of Nonlinear Programming, John Wiley & Sons, New York, 1968.
- [9] L. C. Cagnina, S. C. Esquivel and C. A. Coello, "Solving engineering optimization problems with the simple constrained particle swarm optimizer," Informatica, vol. 32, 2008, pp. 319 – 326.
- [10] C. A. Coello, "Use of a self-adaptive penalty approach for engineering optimization problems," Computers in Industry, vol. 41, 2000, pp. 113 – 127