

自己組織化アルゴリズムによる三次元構造の自律的生成

○渡部 文仁*1 三井和男*2

キーワード：自己組織化 部材長一様化 ひずみエネルギー最小化 最適化

1. はじめに

合理的な構造物の形状最適化問題の数理計画法を用いた解法は多く存在する。例として、ラチスシェルの構造設計において、ひずみエネルギーの最小化と部材長の一様化を最適化問題として定式化し¹⁾、構造物の形状最適化を行う研究などが挙げられる。しかし、数理計画法を用いた解法では、設計問題の定式化に伴う設計変数の増加によって計算量が増加することにより、解析が困難になる場合がある。そこで本研究では、単純な計算方法によって設計変数が増加しても形状最適化問題を解析できる自己組織化アルゴリズム²⁾を提案する。

自己組織化とは「ランダムな状態からある秩序へと自律的に組みあがっていく現象」のことであり、自然界においても多く観ることができる。例として、水滴から雪の結晶が生成される様子や、孔雀の羽の模様が生じられる様子が挙げられる。また、自己組織化は多方面で応用されており、巡回セールスマン問題(TSP)の解法や、アリのフェロモンをモデル化した構造形態創生などは最適化問題への応用例として挙げられる。

本研究では、骨組み構造物のひずみエネルギー最小化と部材長一様化の多目的最適化問題と、三次元構造物の部材長一様化問題を自己組織化アルゴリズムの形状最適化問題への有効性を示すために扱った。本研究は魅力的なデザインであっても技術者の観点から力学的問題のある構造物をその意匠的なデザインを損なうことなく最適化することに応用できると考えられる。

2. 多目的最適化問題

2.1 アルゴリズム

この章では自己組織化アルゴリズムのひずみエネルギー最小化と部材長一様化の多目的最適化問題への応用に

ついて述べる。最初にひずみエネルギー最小化のアルゴリズムについて述べる。

まず、図1のような骨組み構造物において、ひずみエネルギーを最小にする指標として用いたコンプライアンス C を計算する。コンプライアンス C は節点加重ベクトルを P 、節点変位ベクトルを u として(1)式で表される。

$$C = \frac{1}{2} \{P\}^t \{u\} \quad (1)$$

(1)式からコンプライアンス C を得た後、構造物の中から任意の部材を一つ選択してその部材を注目部材 m_t とする。

図1では黒色で示されている。

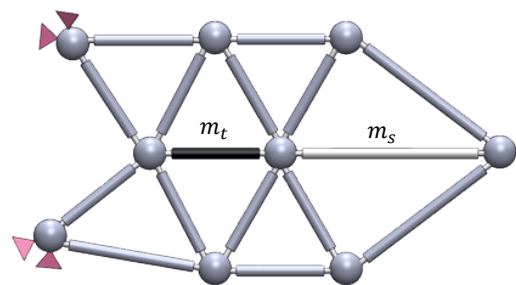


図 1

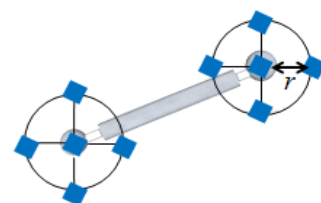


図 2

ひずみエネルギーは注目部材 m_t の両端ノードが周囲に生成される候補ノードのいずれかに移動することで増減

する。候補点は注目部材 m_t の両端ノード上にそれぞれ 1 点と、図 2 のように両端ノードを中心とした半径 r の円上にそれぞれ 4 点の合計 5 点が生成される。候補点生成時に使用する半径 r は注目部材 m_t の部材長を l_t とし、 α を $0 < \alpha < 1$ の任意の定数として、(2)式のようにする。

$$r = \alpha \cdot l_t \quad (2)$$

候補点の組み合わせは 25 通りで、この組み合わせの中からコンプライアンスを最小にする候補点の組み合わせを探索し、その組み合わせの候補点の位置へ注目部材 m_t の両端ノードが移動することでひずみエネルギーが減少する。本研究ではひずみエネルギーを最小にする最適な候補点の組み合わせをみつけるために評価値 e を用いた。評価値 e は各候補点に移動した後のコンプライアンスを C' として(3)式とした。

$$e = C - C' \quad (3)$$

各候補点に移動した後のコンプライアンス C' は候補点に部材が移動した時の部材の節点変位ベクトルを $\{u^*\}$ として、(4)式となる。

$$C' = \frac{1}{2} \{P\}^t \{u^*\} \quad (4)$$

評価値 e が最大となる候補点の組み合わせを探索し、その組み合わせの候補点に注目部材 m_t の両端ノードが移動することでひずみエネルギーは減少する。

次に、部材長一様化について述べる。ひずみエネルギー最小化と同様に注目部材 m_t の両端のノードを移動させることで部材の長さを一様にしていく。まず、前述同様に候補点を生成する。候補点生成時の半径 r は目標とする部材長を l_a として、(5)式とした。

$$r = \alpha \cdot \frac{|l_t - l_a|}{2} \quad (5)$$

また、部材の長さを目標の長さ l_a に最も近づく最適な組み

合わせを見つけるために用いる評価値 e は候補点に移動した後の部材長を l_{new} として、(6)式とした。

$$e = (l_{new} - l_a)^2 \quad (6)$$

(6)式で表される評価値 e が最小となる候補点に両端ノードが移動し、部材の長さが目標の部材の長さ l_a に近づく。

ひずみエネルギー最小化のアルゴリズムのみを実行すると部材の長さが極端に長くなることや、部材の長さが極端に短くなることもある。また、ひずみエネルギー最小化と部材長一様化のアルゴリズムを順に実行すると、ひずみエネルギー最小化と部材長一様化の両方を満足する解が見つからずに局所解に陥ることがある。それらを避けるために、ノードの移動後にノードの追加・削除を行う。

ノードの追加は注目部材 m_t の部材長 l_t が目標とする部材長 l_a に対して(7)式の条件を満たすときに実行され、注目部材 m_t の midpoint にノードが追加される。ノードの削除は(8)式を満たすときに実行され、両端ノードを削除後、注目部材 m_t の midpoint にノードを 1 つ追加する。ノードの追加・削除の様子は図 3 と図 4 にそれぞれ示されている。

$$l_t > 1.8 * l_a \quad (7)$$

$$l_t < 0.2 * l_a \quad (8)$$

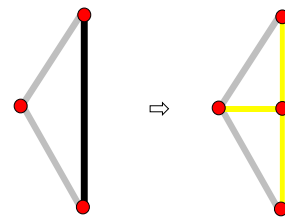


図 3

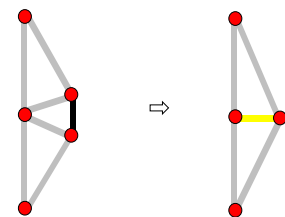


図 4

2.2 解析結果

図5は17節点34部材の構造物である。初期コンプライアンスは0.81で、部材長の平均は2242.4mmである。また、概形線上のノードは概形線上のみを移動することができる。目標部材長を1500mmとして解析した。図6は図5で示された構造物の解析結果である。22節点51部材の構造物となり、コンプライアンスは0.54で、部材長の平均は1499.7mmとなった。

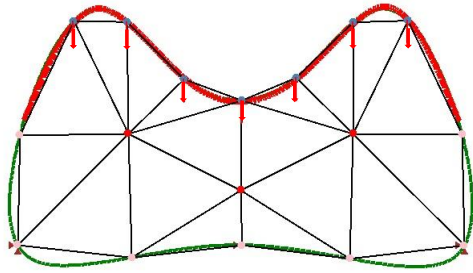


図5

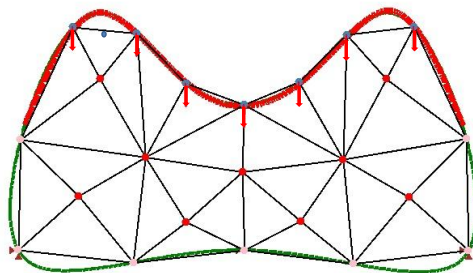


図6

3. 三次元の部材長一様化問題

3.1 アルゴリズム

この章では三次元の部材長一様化問題への応用について述べる。2章では任意の目標の長さを設定し、目標の長さに部材長を等しくしていく部材長一様化問題を扱ったが、この章では目標とする部材の長さを設定せずに近傍部材との長さの差をなくしていくことで、部材の長さを一様にしていく部材長一様化問題を扱う。本研究では指定したNURBS曲面上を動くノードを持つ構造物の問題を扱った。

まず、2章で説明したアルゴリズムと同様に構造物から任意の部材を一つ選択しその部材を注目部材 m_t とする。続いて、注目部材 m_t の近傍部材の中から部材長が最も異なる部材を選択しその部材を選択部材 m_s とする。選択部

材 m_s は図1において白色で示されている。選択部材 m_s を選択後、注目部材 m_t の両端ノードに候補点を生成する。指定されたNURBS曲面上のノードでは、ノード上に1点とNURBSのパラメータ u,v 方向に座標系をとり、それぞれ半径 r だけ離れた曲面上の座標点に4点、合計5点の候補点が生成される。指定された曲面上にないノードでは、ノード上に1点とデカルト座標の x,y,z 方向にそれぞれ半径 r だけ離れた座標点に6点、合計7点の候補点が生成される。候補点の組み合わせは、両端ノードが全てNURBS曲面上にある場合は 5×5 の25通り。両端ノードが全て曲面上にない場合は 7×7 の49通り。両端ノードの片方がNURBS曲面上にあり、もう片方が曲面上にない場合は 7×5 の35通りとなる。この候補点の組み合わせの中から部材長の差を最小にする組み合わせに両端のノードを移動させ、部材長を一様にしていく。候補点生成時に使用する半径 r の(5)式と部材長の差を最小にする組み合わせを探すために使用する評価値 e の(6)式において、目標とする部材長 l_a を選択部材 m_s の部材長とする。

アルゴリズムをまとめると以下ようになる。

- (1) 構造物から1つの部材を選択し、注目部材 m_t とする。
- (2) 注目部材 m_t の近傍部材の中で注目部材 m_t と長さの差が最大の部材を選択部材 m_s とする。
- (3) 注目部材 m_t の両端ノードに候補点を生成する。
- (4) 候補点の組み合わせから評価値 e が最小となるものを探索する。
- (5) 評価値 e が最小となる候補点に注目部材 m_t の両端のノードを移動させる。
- (6) (1)~(5)を構造物すべての部材に行う。
- (7) (1)~(6)を部材の長さが等しくなるまで行う。

3.2 解析結果

図7は80節点210部材の骨組み構造物で、ノードは球面上のみを動かすることができる。図8は図7で示される構造物の解析結果である。図9は60節点156部材の骨組み構造物で、ノードは円筒上のみを動かすることができる。図10は図9で示される構造物の解析結果である。図11は116節点400部材の骨組み構造物で、部分円筒上のノードは部分円筒上のみを動き、他のノードは自由に動かすることができる。図12は図11で示される構造物の解析結果である。

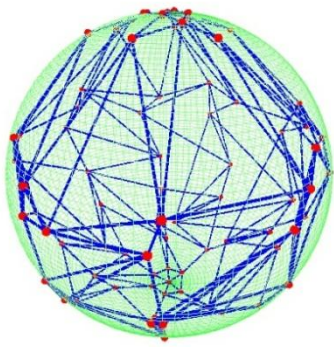


図 7

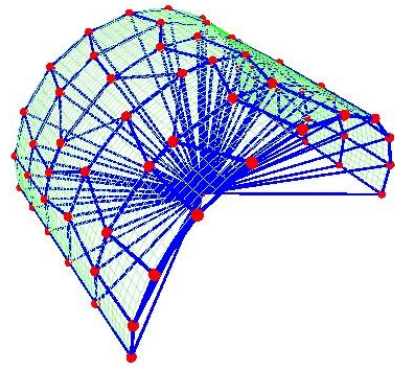


図 11

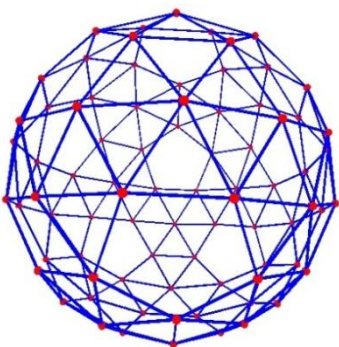


図 8

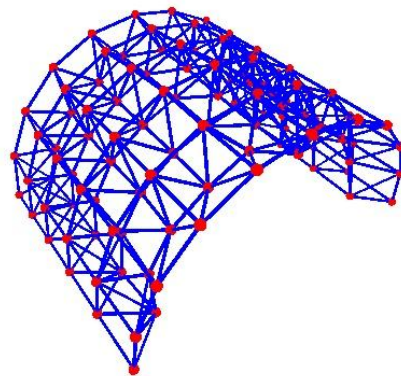


図 12

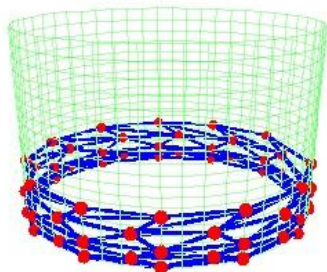


図 9

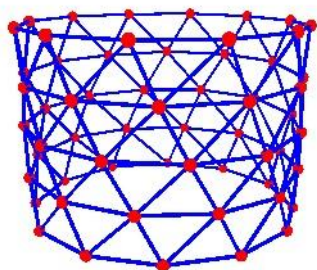


図 10

4. まとめ

2章と3章の結果から構造物の形状最適化に自己組織化アルゴリズムは有効であることが分かった。今後は三次元のひずみエネルギー最小化問題への応用が課題となる。

【参考文献】

- 1) 大崎純, 藤田慎之介: 四角形グリッドを有するラチスシェルの部材一様化とひずみエネルギー最小化を考慮した多目的最適化, 第33回情報・システム・利用・技術シンポジウム論文集, pp.135-138, 2010
 - 2) Tomohito WATABE, Kazumi OKAMURA and Kazuo MITSUI : Autonomous Generation of Structural Form by Using Self-Organization Algorithm, IASS-APCS 2012
-

*1 日本大学大学院生産工学研究科数理情報工学専攻
博士前期課程

*2 日本大学生産工学部創生デザイン学科 教授 博士(工学)