

形状に関する設計者の選好を反映した構造最適設計

室巻 孝郎^{1*}・花原 和之²・多田 幸生²

¹ 工学研究科情報知能学専攻

² システム情報学研究科システム科学専攻

(受付: July 17, 2010 受理: December 27, 2010 公開: December 28, 2010)

キーワード: 形状最適化, トラス構造物, 発見的手法, 幾何モーメント, 全応力設計

本論文では, 設計者の試行錯誤過程により得られた構造物の特徴を反映しつつ, 形状最適化を行う取り組みについて述べる. 設計者の嗜好に関する特徴を幾何モーメントの形で抽出し, 最適化を行う際の目的関数に反映させる. 2次元のトラス構造を用いて実現されるコート掛け問題を題材として扱う. あらかじめ人間である設計者が制約条件を満たすトラス構造を試行錯誤により設計し, 得られた形状を基準形状とする. トラスの構造重量という目的関数に加え, 試行錯誤過程より得られた形状との類似性を評価する指標を導入して新たな目的関数を定式化する. 最適化手法は発見的手法(遺伝的アルゴリズム: GA と粒子群最適化法: PSO)を用いる. トラス構造の部材の配置について発見的手法を適用し, 部材の断面積は全応力設計を用いて決定する. 部材の配置に関して条件を変えて数値シミュレーションを行い, 各場合について試行錯誤過程より得られた形状の形態的特徴を反映しつつ軽量化された解を得ることができた. また, GA と PSO 共に類似した傾向を持つ解を得ることができたので, 本手法が最適化アルゴリズムに依存せずに適用可能であることを確認した.

緒 言

構造設計の最適化の手順は, 最適化問題の設定に始まり, 初期構造モデルの設定を経て力学的解析に基づく評価と設計変数の変更を繰り返すという流れになる. この手順を人間である設計者が行う場合, 設計変数の変更プロセスは設計者自身の経験を主体とした試行錯誤の方法で実施される. 優れた設計者は少ない試行で優れた解を得ることができる. 反面, 非習熟者が設計を行う場合, 設計変数の変更作業が多くなりやすく, 設計した構造物も局所的な解に陥ることが多い. しかしながら, いずれの場合でも得られた構造物には設計者自身の知見及び嗜好が反映されている. 設計者の嗜好は千差万別であり陽な形で定式化することは難しいが, 設計者自身にとっては力学的合理性に勝るとも劣らない重要な評価因子である. そこで, 試行錯誤の設計過程から得られた構造物の形態的特徴を保存しつつ優れた解を生成することができれば設計者の負担を軽減し設計作業の効率化を達成することが可能となる. 本研究では試行錯誤過程から得られた構造物の形状に関する特徴を保持しつつ, より軽量化された構造物を得ることを目的とする. 形状最適化プロセスについては, 問題の特性や規模に関わらず幅広く適用可能な発見的手法¹⁾を用いる.

構造設計プロセスを扱う既存研究としてGero²⁾により分析-合成-評価モデルが構築されている. また, 広瀬・藤井³⁾はGeroのモデルの合成部分に着目し, 構造設計の計画に関わる知識をスキーマにもとづいて記述している. これにより, 目標があらかじめ決まっていなかった計画や概念設計において, どのような支

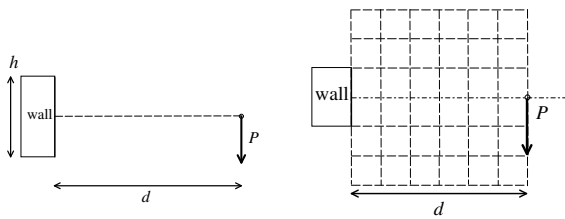
援を設計者に対して行うことが可能かということを知る手助けが得られる. これとは別に浜田・大森⁴⁾は意匠的な要求と構造的な合理性の両立を図った構造設計法を提案している. この提案法では, 設計者の選好を定量的に表現するため形状の幾何学的な距離を採用している. さらに, 辻ら⁵⁾は意思決定者が問題に対して持っている選好情報を活用して意思決定者の興味ある部分を集中的に探索する手法を提案している. 本稿では, 浜田らの手法と同様に設計者の選好を幾何学的距離を用いて目的関数に取り入れる手法について述べる.

構造設計問題の題材として2次元トラス構造を用いて実現されるコート掛け問題を扱う. トラスのレイアウト(位相, 部材断面積及び節点位置)最適化問題についてはこれまでに数多くの研究^{6),7)}が為されており, 最適化手法として遺伝的アルゴリズム(GA)のような発見的手法を利用した報告も多い. 特に, 大森・鬼頭⁸⁾の論文ではトラス構造物の設計問題に遺伝的アルゴリズム(GA)を適用する際の問題点や解決法が紹介されている. 今回, 最適化アルゴリズムとして遺伝的アルゴリズム(GA)と粒子群最適化法(PSO)⁹⁾を用いた. 遺伝的アルゴリズム(GA)は離散変数最適化問題に特化した手法であり, 部材の配置に関して組み合わせ最適化問題となるトラスのレイアウト最適化問題との相性が良いといえる. これに対し, 粒子群最適化法(PSO)は連続変数最適化用の手法であり, そのままでは組み合わせ問題に適用することができない. この問題を克服するため論理演算型の粒子群最適化法(BPSO)を利用する. 両手法で得られる最適化問題の解について比較を行い, 具体的アルゴリズムに依存せず最適化問題の解が得られることを示す.

1. コート掛け問題と発見的手法の適用

1. 1 最適化問題の定式化

最適構造設計の題材として扱うコート掛け問題について説明する。これは、ある与えられた荷重を、その荷重点から一定距離はなれた壁で支えるための構造を設計する問題である。設計目的は、構造物が破損しないという条件の下で構造重量の最小化を図ることである。Figure 1(a) はコート掛け問題の概念図を示したものである。本研究ではトラス構造による実現を扱う。即ち、設定された領域内でトラス構造物を作成し、高さ h の壁から距離 d 離れた点にかかる下向き荷重 P を支える構造を設計する。設計領域は一辺 d の正方形領域とし、Figure 1(b) は設計領域を 6×6 の格子に離散化した図である。領域内の各格子点を部材を配置することのできる節点とする。



(a) Conceptual illustration (b) Problem specification

Fig. 1 Coat-hanging problem

このトラス設計問題を記述するための変数について説明する。節点の位置を $\mathbf{x} = [\mathbf{x}_1^T, \dots, \mathbf{x}_N^T]^T$ と表す。ここで、 N は節点数であり、 \mathbf{x}_i は i 番目の節点の x 座標と y 座標を並べた横ベクトルである。ただし、各節点位置は固定されているものとし、部材の変形による影響は考慮しないものとする。部材の接続関係は $\mathbf{C} = [\mathbf{c}_1^T, \dots, \mathbf{c}_M^T]^T$ で表す。ここで M は部材数、 \mathbf{c}_i は節点 c_i^1 と c_i^2 を結ぶ i 番目の部材の接続関係を表すものであり、以下のように表記する。

$$\mathbf{c}_i = [c_i^1, c_i^2]^T \quad (1 \leq c_i^1 < c_i^2 \leq N) \quad (1)$$

部材断面積は $\mathbf{A} = [A_1, \dots, A_M]^T$ で表す。また、部材長さは以下の式により求める。

$$l_i = \|\mathbf{x}_{c_i^1} - \mathbf{x}_{c_i^2}\| \quad (2)$$

応力制約のみを受けるトラス構造物の最小重量設計問題を以下のように定式化する。

$$\begin{aligned} & \text{Find} && \mathbf{A}, \mathbf{C}, M \\ & \text{Such that} && W = \sum_{i=1}^M A_i l_i \rho \rightarrow \text{Min} \\ & \text{Subject to} && |\sigma_i| \leq \sigma_{al} \quad (i = 1, \dots, M) \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 ρ は材料密度、 σ_{al} は許容応力である。本論文では座屈を考慮しないため引っ張り側と圧縮側の許容応力を正の等しい値とする。各部材の応力 σ_i は $\mathbf{x}, \mathbf{C}, \mathbf{A}$ および荷重ベクトル \mathbf{P} に基づいてマトリクス構造解析¹⁰⁾により算出する。

1. 2 トラス構造表現法と全応力設計

トラス構造を作成する際にはFigure 1(b) に示した格子状の領域内において、格子点の集合から2点を選択しその2点を両端点とする部材を配置するという作業を繰り返す。節点数が

\bar{N} の場合、格子点の選び方は最大 $\bar{N}C_2 \equiv \bar{M}$ 通り存在する。1番目から \bar{M} 番目の各部材について、各部材を選ぶ-1、選ばない-0という $\{0,1\}$ のビット表現し、1つのトラス構造を \bar{M} ビットで表す。節点番号の付け方は、壁の一番下の節点の番号を1とし下から上、左から右の順に番号を付与する。節点番号1と2を結ぶ部材の番号を1、節点番号1と3を結ぶ部材の番号を2とする。最後に節点番号 $\bar{N}-1$ と \bar{N} を結ぶ部材の番号が \bar{M} となるように番号付けを行う。トラスの設計例をFigure 2に示す。各アルファベットは節点番号に対応しており、部材には部材番号を付けている。節点数が9であるから格子点の選び方は $9C_2 = 36$ 通り存在する。このトラス構造に対応するデータをビット表現すると $[0010000001010000010000010000010000000100000010000]$ となる。

部材の配置は発見的手法を用いて探索するが、断面積の決定には「全応力設計(応力比法)」を用いる。全応力設計とは、「構造物の各部材の応力がすべて許容応力に同時に到達する設計が最小重量設計になる」という考えにもとづく構造設計法である¹⁾。全応力設計は次式の反復アルゴリズムとして実装することができる。

$$A_i^{(t)} = \left(\frac{|\sigma_i^{(t)}|}{\sigma_{al}} \right)^\alpha A_i^{(t-1)} \quad (4)$$

ここで (t) は世代番号、 i は部材番号を表しており、 α は断面積の修正を調整するパラメータである。 (t) 世代目の各部材の応力 $\sigma_i^{(t)}$ は、修正された断面積に基づいてマトリクス構造解析により算出する。Equation (4)によって断面積を逐次修正していくことにより、最終的にはすべての部材の応力は許容応力になることを想定している。

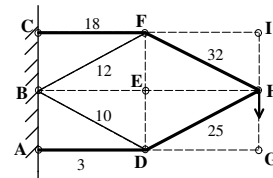


Fig. 2 Design example of truss (6 members)

1. 3 遺伝的アルゴリズム(GA)の実装

遺伝的アルゴリズム(GA)は、1960年代にHollandによって導入された生物の進化過程を模擬するアルゴリズム¹⁾である。適応度に基づいて個体の良し悪しの評価を行い、適応度の高い個体を次の世代へと残していくアルゴリズムである。遺伝的アルゴリズムでは各個体(解候補)が遺伝子型の形で表現されており、各遺伝子型に対して施す操作は選択、交叉、突然変異の3つがある。選択操作は個体群中から次の世代に情報を引き継がせるために個体を選び出す操作である。個体群中から T 個の個体を取り出して、そのなかから適応度の高い1個体を選択する操作を繰り返すトーナメント選択方式を用いた。交叉操作は選択された2個体の遺伝子情報を掛け合わせ、次の世代の個体を生成する操作である。2つの遺伝子列のある部分以降の部分遺伝子列を交換する1点交叉を用いた。突然変異操作は個体の遺伝子情報の一部を変更する操作である。各遺伝子型に対し、ランダムに選んだ1ビットの数値(0または1)を反転させることにより行う。また、上記3つの基本操作に加えて、適応度上位のエリート個体を各世代で選び出し、それらの個体には操作を

施さずそのまま次の世代に引き継ぐというエリート戦略を用いた。

1. 4 粒子群最適化法 (PSO) の実装

粒子群最適化法 (PSO) は鳥や魚などの群れの行動を基にした最適化手法¹⁾である。粒子群最適化法 (PSO) では各個体 (Particle) が「位置」と「速度」に関する情報を持ち、相互作用を持ちつつ集団 (Swarm) で解を探索していく。k回目の探索において、個体dの位置 \mathbf{x}_d^k と速度 \mathbf{v}_d^k を用いて、k+1回目の位置 \mathbf{x}_d^{k+1} と速度 \mathbf{v}_d^{k+1} は、次式により更新される。

$$\mathbf{x}_d^{k+1} = \mathbf{x}_d^k + \mathbf{v}_d^{k+1} \quad (5)$$

$$\mathbf{v}_d^{k+1} = w\mathbf{v}_d^k + c_1r_1(\mathbf{p}_d^k - \mathbf{x}_d^k) + c_2r_2(\mathbf{p}_g^k - \mathbf{x}_d^k) \quad (6)$$

Equation (6) において、 r_1 と r_2 は0から1の間の乱数であり、 w と c_1 , c_2 はパラメータである。 \mathbf{p}_d^k は、d番目の個体がk回目までの探索において得られた最良の解 (p-best) を表す。一方、 \mathbf{p}_g^k は、k回目までの探索において群れ全体の中での最良の解 (g-best) を表す。

粒子群最適化法 (PSO) は連続変数に関して定義された関数の最大値・最小値を求めるアルゴリズムである。本稿で扱うトラスの設計問題は各個体がビット表現された離散型の変数になっているためそのままでは粒子群最適化法 (PSO) を適用することができない。離散変数を含む問題に粒子群最適化法 (PSO) を適用するための手法はこれまでにいくつか提案されている。北山・安田¹¹⁾は変数の離散条件をペナルティ関数を用いることで連続変数として扱うことができるようにしている。これに対し Zaharias⁹⁾は、論理演算子を導入して、Eqs. (5) と (6) の更新式をビットデータで表された変数に適用できるようにする手法を用いている。本研究ではトラス構造をビットデータで表現することから、後者のZahariasの手法を用いて実装を行う。個体dのiビット目の座標位置 x_{di}^k と速度成分 v_{di}^k の更新式を次式で表す。

$$x_{di}^{k+1} = x_{di}^k \oplus v_{di}^{k+1} \quad (7)$$

$$v_{di}^{k+1} = w \cdot v_{di}^k + c_1 \cdot (p_{di}^k \oplus x_{di}^k) + c_2 \cdot (p_{gi}^k \oplus x_{di}^k) \quad (8)$$

(\cdot), ($+$), (\oplus) はそれぞれAND, OR, XOR演算を表している。 w と c_1 , c_2 はランダムに0又は1を割り当てるパラメータである。 p_{di}^k は個体dのiビット目についての最良解、 p_{gi}^k は群れ全体でのiビット目についての最良解である。

2. 特徴量の抽出と援用法

2. 1 設計条件の設定

トラスの設計にあたり、部材の配置に関する以下の3つの場合を設定した。

case A: 制限無し

矩形領域内の任意の節点を選択して部材を配置することができる

case B: 制限有りI

矩形領域中央部分に部材を配置することのできない節点群がある

case C: 制限有りII

矩形領域左上部分と右下部分に部材を配置することのできない節点群がある

制限有り条件BとCの場合の制限領域を示した図をFigure 3(a) と (b) に示す。図に太線で示した枠内にある○で示した節点に

部材を配置することはできないが、制限領域外にある節点を結ぶ部材が制限領域内を通過することは認める。遺伝的アルゴリズム (GA) や粒子群最適化法 (PSO) でこの条件を実装する際には、制限領域内の節点を端点にもつ部材のビット情報を0 (部材無し) に置き換え、あらかじめ設計変数の集合から除外しておく。

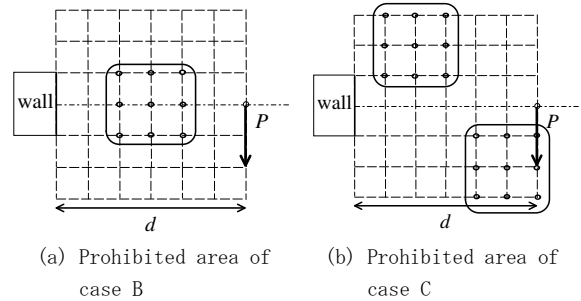


Fig. 3 Illustration of prohibited areas in case B and C

2. 2 試行に基づくトラスの設計サンプル

トラス構造の設計サンプルを収集するためにトラス構造作製プログラムを用意した。このプログラムはGUI (Graphical User Interface) を備えており、マウス操作で節点を選んで部材を配置することができる。また、設計機能と共に解析機能も有しており、レイアウトの配置が完了すると、全応力設計により各部材断面積を決定し、構造重量の算出を行う。材料力学に関する講義は未履修である学生3名がこのプログラムを利用したトラス構造設計を依頼した。彼らが設計したトラス構造の例をFigure 4(a1), (a2), (b), (c) に示す。各図の表題のところに構造重量及びどの設計条件で得られたトラス構造であるかを併記している。Figures 4(a1) と (b), (c) は構造重量の軽い形状を作製するよう指示し、Figure 4(a2) は軽量化を意識せず自由に作製するよう指示して得られた形状の例である。

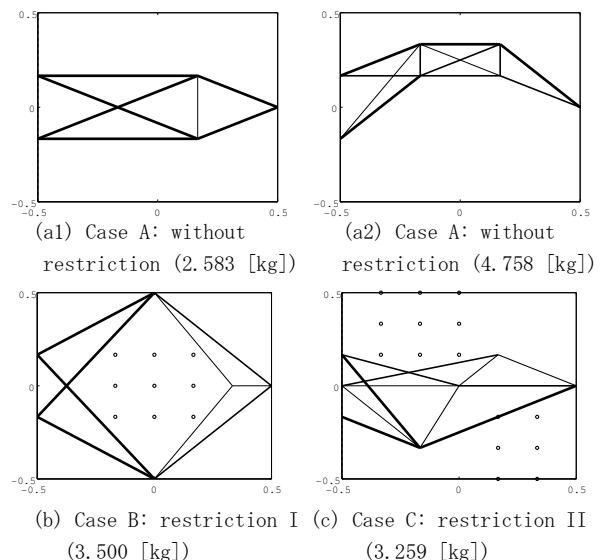


Fig. 4 Obtained design examples of truss structure based on trial-and-error design approach

2. 3 特徴量の計算

サンプルデータの幾何的特徴の抽出方法について説明する。

本研究では各トラス構造における部材の配置に注目する。Figures 4(a1)と(b)では上下対称に部材が配置されているが、上下方向の部材の広がり具合が異なる。これに対しFigure 4(a2)では上側あるいは下側に部材が偏っており、上下方向の部材の広がり具合も他の形状と比べると小さい。Figure 4(c)は上下対称ではないが、部材の偏りが大きくはなく、上下方向にもある程度広がりをもっている。このような部材の配置に関する幾何的特徴に設計者の嗜好が表れていると考え、この特徴を定量化することにより嗜好の抽出を行う。本研究では、トラス構造の幾何的特徴を抽出するために幾何モーメントに着目する。幾何モーメントは質量要素の分布度合を示す指標であり次式で与えられる。

$$m_{pq} = \sum_{i=1}^M \int_{elem} (i)x)^p (i)y)^q dm \quad (9)$$

ここで、 p, q は非負の整数から成る指数 ($p+q$ はモーメントの次数)を表しており、 $i)x, i)y$ は原点から見た部材 i 中の微小質点の位置である。この幾何モーメントは原点(0,0)を中心とした質量のばらつき具合を示している。部材 i 及びその中の微小質量点の分布をイメージした図をFigure 5に示す。例えば、トラスの構造重量は m_{00} で表され、トラスの重心座標は $(m_{10}/m_{00}, m_{01}/m_{00})$ のように求められる。

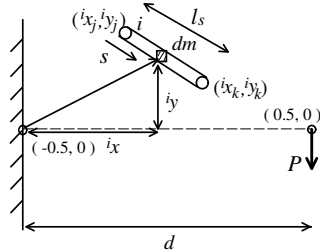


Fig. 5 Conceptual illustration of mass distribution in i -th member

2. 4 目的関数への反映法

試行錯誤による設計過程から得られたトラス構造の幾何モーメントの情報を目的関数に反映させる方法について説明する。Figure 4に示した各サンプルの幾何モーメントを算出し、基準モーメント $m_{ref}^{(a1)}, m_{ref}^{(a2)}, m_{ref}^{(b)}, m_{ref}^{(c)}$ とする。ここで、 m は各次数のモーメントを次のように並べたベクトルである。

$$m = \frac{1}{m_{00}} [m_{10} \ m_{01} \ m_{20} \ m_{11} \ m_{02} \ m_{30} \ \dots]^T \quad (10)$$

今回は6次の幾何モーメントまで算出し、基準モーメントを設定した。

原問題(3)の目的関数はトラスの構造重量 W であるが、この目的関数に対し幾何モーメントに基づく評価指標をペナルティの形で導入する。すなわち、基準モーメント m_{ref} と遺伝的アルゴリズム(GA)もしくは粒子群最適化法(PSO)の適用によって得られた個体 j のトラス構造の幾何モーメント m^j の距離に応じて新たな目的関数 F_j を次式により定める。

$$F_j = W_j [1 + \{(m_{ref} - m^j)^T R (m_{ref} - m^j)\}^{1/2}] \quad (11)$$

ここで、 W_j は個体 j の構造重量、 R は各モーメントに対する重みを表した係数行列である。この目的関数 F_j は基準モーメントとの類似度合に応じて構造重量の値を修正するものである。つまり、基準モーメントとの類似性が低い場合、重み R に基づくペナルティが課されることになり、目的関数値が悪くなる。

従って、基準モーメントに類似した幾何モーメントを有し構造重量の小さな解が目的関数値の小さな優れた解であるといえることができる。重み行列 R は次のように設定した。

$$R = \beta I \quad (12)$$

ここで、 I は6次の幾何モーメントの場合 27×27 の単位行列である。つまり、 R は対角成分が β で表される対角行列である。

3. 計算結果

3. 1 パラメータの設定

構造設計の際の仕様をTable 1に示す。遺伝的アルゴリズム(GA)で用いたパラメータについては、世代数:200, 個体数:300, 交叉率:0.9, 突然変異率:0.01とした。粒子群最適化法(PSO)のパラメータは、世代数:100, 個体数400とした。初期世代の個体群は $\{0, 1\}$ をランダムに発生させて作成したもの、各基準形状を含めた集合で構成した。また、初期世代の個体集合は制約条件(トラス構造を為している、荷重点に部材が配置されている、制限領域内の節点に部材は配置されていない)を満たさないものは除外している。遺伝的アルゴリズム(GA)や粒子群最適化法(PSO)の探索中に制約条件を満たさない個体を得られた場合は個体群中の最低の適応度を一律に与えた。

断面積を決定する際の全応力設計(Eq. (4))のパラメータは $\alpha=1.0$ とし、反復回数の上限值 $t_{max}=10$ とした。また、全応力設計の反復過程で断面積が $1.0 \times 10^{-8} m^2$ 以下の部材があった場合は、次のステップで最小断面積 $1.0 \times 10^{-8} m^2$ を割り当てた。これは、部材断面積が0になった際にトラス構造を成さなくなる場合があり、このような事態を回避しつつ安定した反復計算を行うための措置である。

Table 1. Design specification

Parameter	Value	Parameter	Value
P	5 kN	d	1.0 m
h	0.33 m	ρ (density)	10,000 kg/m ³
σ_{al}	100 MPa	\bar{N}	49
\bar{M}	1176	β	20

3. 2 解構造についての考察・検討

3.2.1 遺伝的アルゴリズム(GA)を用いる探索の結果

遺伝的アルゴリズム(GA)による探索で得られた形状例をFigures 6(a1)-(c)に示す。Figures 4(a1)-(c)に示した試行錯誤で得られたトラス構造の形状を基準構造としたときに得られた形状であり、Figure 4と対応がつくように並べている。各図の表題に構造重量を併記している。節点に関する制限無しの場合Aの場合について、遺伝的アルゴリズム(GA)による探索で得られた解と基準構造との類似性について比較する。基準にした構造Figure 4(a1)と遺伝的アルゴリズム(GA)による探索で得られた構造Figure 6(a1)を比較すると、形態的類似性の高い解が得られている。主な違いは縦方向の部材の有無と、内部で部材が連結されている節点の位置である。縦方向の部材を取り除き、連結節点位置を右側にずらすことにより基準形状より軽量化された解が得られることがわかる。また、遺伝的アルゴリズム(GA)による探索で得られた解Figure 6(a2)と基準にした構造Figure 4(a2)を比べると、Figure 4(a2)の上側に膨らんだ特徴が反映されていることがわかる。部材数は多くなっている。

が、構造重量は半分程度になっている。Figure 6(b)と基準にした構造Figure 4(b)を比べると、上下方向の部材の広がり小さくなっているが、上下対称に部材を配置するという特徴が反映されていることがわかる。Figure 6(c)と基準にした構造Figure 4(c)を比べると、比較的類似した形状を有し、基準とした形状よりも軽い構造が得られている。

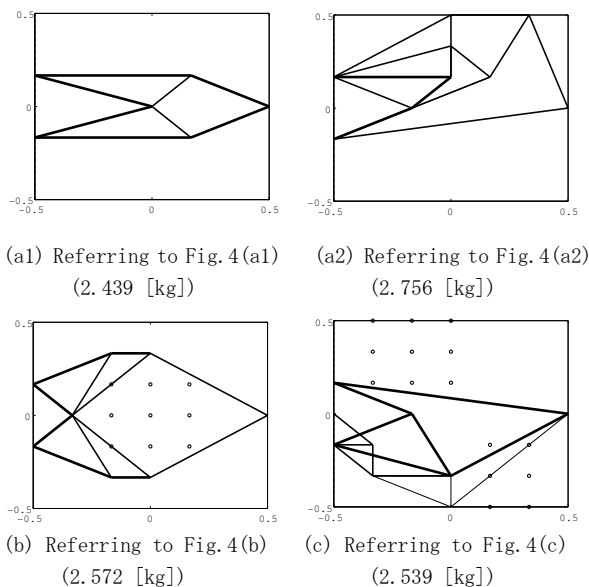


Fig. 6 Truss structure solutions obtained by GA on each condition

3.2.2 粒子群最適化法(PSO)を用いる探索の結果

粒子群最適化法 (PSO) による探索で得られた形状例を Figures 7(a1)-(c)に示す。Figures 4(a1)-(c)に示したトラス構造の形状を基準構造としたときに得られた形状であり、対応がつくように並べている。各図の表題に構造重量を併記している。粒子群最適化法 (PSO) による探索で得られた解の形状 Figures 7(a1)～(c)と対応する基準形状 Figures 4(a1)～(c)を見比べると、外形の特徴が反映された形状となっていることがわかる。Figure 7(a1)は Figure 6(a1)と同じ形状であり、基準とした形状との形態的類似性の高い形状が得られた。その他の形状についても、Figure 7(a2)は Figure 4(a2)の上側に膨らんだ特徴を反映しており、Figure 7(b)は Figure 4(b)の上下対称な部材配置という特徴を反映している。Figure 7(c)も Figure 4(c)と類似した形状が得られている。すべての場合において基準構造よりも軽量化された構造物が得られており、「基準にした形状に類似する形状を有し軽量化された構造物」を得るという目的を達しているといえる。

3.2.3 遺伝的アルゴリズム(GA)及び粒子群最適化法(PSO)による探索で得られた解についての検討

遺伝的アルゴリズム (GA) による探索で得られた解 Figure 6 と粒子群最適化法 (PSO) による探索で得られた解 Figure 7 との比較・検討について述べる。Figures 6(a1)と 7(a1)及び Figures 6(b)と 7(b)が同じトラス形状になったことをはじめ、一般的に両手法により得られた解は構造重量及びトラス構造の形状に関して類似した傾向をもっていると判断できる。このことを

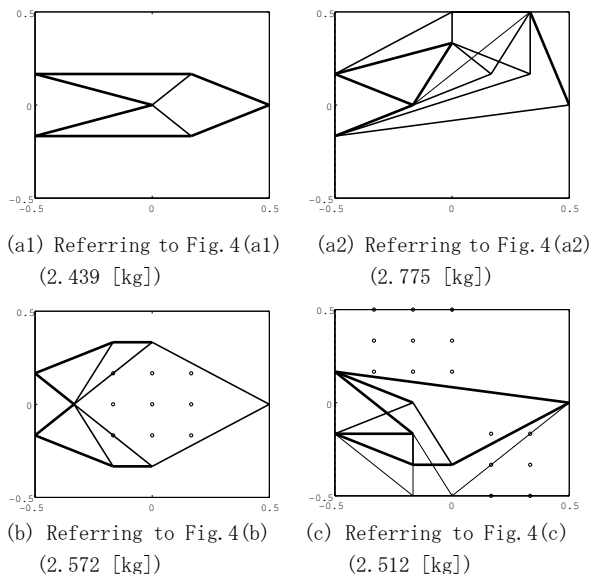


Fig. 7 Truss structure solutions obtained by PSO on each condition

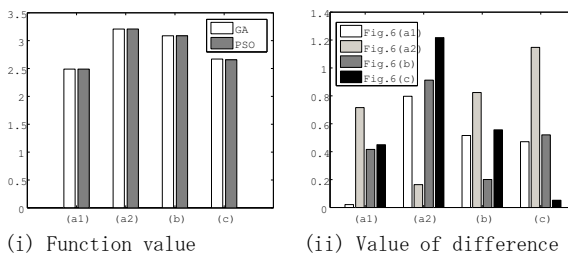


Fig. 8 Objective function value for each solution and numerical value of difference based on geometrical moment between obtained designs in Fig. 6 and reference design in Fig. 4

確認するため、Eq. (15)で定義した目的関数の値を棒グラフで示した図をFigure 8(i)に示す。縦軸は目的関数値、横軸はFigures 6と7において(a1)-(c)のどのパターンに対応するかを表している。薄い色のグラフが遺伝的アルゴリズム (GA) による探索で得られた解に対応し、濃い色のグラフが粒子群最適化法 (PSO) による探索で得られた解に対応している。それぞれの手法で得られた解の目的関数値にほとんど差が無いことから、今回設定した条件の下では両手法の探索能力は同程度であることが確認できる。

得られた解形状とFigure 4に示した基準形状との幾何学的類似性を確認するため(a1)から(c)の各基準形状と解形状との幾何モーメントの偏差の値をグラフにしたものをFigure 8(ii)に示す。探索アルゴリズムの性能が同程度であるので遺伝的アルゴリズム (GA) により得られた解 (Figure 6) と基準形状 (Figure 4) との間で計算した幾何モーメントの偏差についてのみ示している。グラフの縦軸は幾何モーメントの偏差の値、横軸はFigure 4のどの基準形状に対応しているかを示している。どのパターンにおいても基準形状に対して得られた解の場合に偏差が有意に小さくなっているが、(a2)や(b)の場合は(a1)や(c)の場合に比べて偏差が大きくなっている。Figures

6(a2)と(b)を確認すると、他の2つに比べて上下方向の部材の広がりが高く反映されなかったことが要因と考えられる。

3. 3 異なる設計条件への適用

幾何モーメントの利点として設計領域に関する制約が異なる場合にも適用できるという利点がある。6×6の設計領域で基準形状と類似した形状を求めてきたが、分割数の異なる設計領域に対しても適用可能である。このことを示すため、Figure 9(i)に示す4×4で離散化した領域での形状設計について考える。Figure 4(a1)を基準形状とした場合について説明する。基準モーメントはFigure 4(a1)の幾何モーメントを利用し、構造設計は4×4に分割した場合で行う。類似性の評価はEq. (14)により行う。格子点数以外の条件を揃えた上で粒子群最適化法による探索で得られた解をFigure 9(ii)に示す。表題に構造重量を併記している。Figure 4(a1)の基準形状と類似した構造重量の軽い形状が得られている。従って、幾何モーメントを利用した本手法は領域の分割数が異なる場合にも適用可能である。また、この例では設計領域を等分割した場合の結果を示しているが、幾何モーメントを利用する手法自体は等分割していない領域に対しても適用可能である。

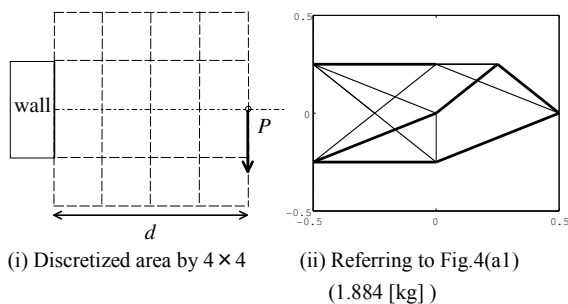


Fig. 9 Problem specification and truss structure solution obtained by PSO

結言

本稿では、設計者の試行錯誤過程から得られた構造の特徴を反映しつつより軽量化された構造を得る手法について述べた。設計者の嗜好を設計評価に組み込むための方法として、構造物の幾何モーメントに着目した。構造重量を評価する目的関数に、人間である設計者により設計された構造（基準構造）との幾何モーメントに関する偏差を重み付けして加え合わせることに、設計者の意図する幾何学的特徴を反映させる最適化問題の定式化を行った。トラス構造を用いたコート掛け問題を具体的題材として扱い、解を探索するためのアルゴリズムとして遺伝的アルゴリズム(GA)と粒子群最適化法(PSO)を用いた。両手法により得られた解は、基準とした構造よりも軽量化され、且つ元の形に類似した形状となっていた。最適化問題の解がアルゴリズムに依存しない傾向がみられることを確認した。

今回用いた手法は、構造物の幾何学的特徴に着目したものであり、構造設計全般に適用可能である。特に、設計領域に制限が設けられている場合や設計領域の分割数や分割方式が異なる場合でも適用できる点が利点である。今回は構造物の力学的な制約条件として1つの荷重ケースに対して応力制約を取り入れた。構造物の設計の際には応力に関する強度条件の他にも

耐久性に関する条件なども考えなければならない。耐久性について考慮した構造物設計法についての報告も為されており¹²⁾、強度のみならず耐久性も考慮した制約を取り入れることにより、本提案手法はさらに拡張することが可能である。今後多様な構造設計問題に適用し、本手法の有効性を確認する。

Literature Cited

- 1) E. Aiyoshi, and K. Yasuda; "Metaheuristics" (in Japanese), Ohmsha, (2007).
- 2) Gero, John S.; "Design Prototypes: A Knowledge Representation Schema for Design", AI Magazine, Vol. 11, No. 4, pp. 26-36, (1990)
- 3) K. Hirose and H. Fujii; "A Formal Representation of Planning Knowledge for Structural Design" (in Japanese), Journal of Structural and Construction Engineering, AIJ, No.516, pp.173-179, (1999)
- 4) H. Hamada and H. Ohmori; "Computational Morphogenesis of Free Surface Shells Considering both Designer's Preference and Structural Rationality -Part 1 Heuristic approach by multi-objective genetic algorithm" (in Japanese), Journal of Structural and Construction Engineering, AIJ, No.609, pp.105-111, (2006)
- 5) Y. Tsuji, T. Kiyota and E. Kondo; "Evolutionary Multiobjective Optimization Considering Designer's Preference" (in Japanese), Mechanical Engineering Congress, 2001 Japan, No.01-1, pp. 43-44, (2001)
- 6) M. Asayama, T. Annoh, and K. Kawamo; "Layout Problem of Truss Structure Using Genetic Algorithm" (in Japanese), Japan Society for Simulation Technology, 17, 2, pp. 69-80, (1998)
- 7) H. Tagawa and M. Ohsaki; "Simultaneous Optimization of Topology and Geometry of Plane Trusses with Uniform Cross-Sectional Area" (in Japanese), Journal of Structural and Construction Engineering, AIJ, No.521, pp.73-80, (1999)
- 8) H. Ohmori and N. Kito; "Form Creation of Truss Structures by Genetic Algorithm" (in Japanese), Journal of Structural and Construction Engineering, AIJ, No.520, pp.85-92, (1999)
- 9) Zaharias D. Zaharis; "Boolean Particle Swarm Optimization of 3-branch GSM/DCS/UMTS current dividers by using Artificial Immune System", IEICE Electronics, Vol. 5, No. 2, 41-47, (2008)
- 10) Paz, M. and Leigh, W.; "Integrated matrix analysis of structures : theory and computation", Kluwer Academic Publishers, pp. 203-220, (2001)
- 11) S. Kitayama and K. Yasuda; "A Method for Mixed Integer Programming Problems by Particle Swarm Optimization"(in Japanese), IEEJ Trans. EIS, Vol. 125, No. 5, pp.813-820, (2005)
- 12) T. Soh, Y. Seguchi and Y. Tada; "Shape Determination Problems of Structures under Multiple Loading Conditions (Imposing Constraints Considering the Fatigue Strength)"(in Japanese), Transactions of JSME, Series A, Vol. 52, No. 473, pp.1191-1195, (1986)

Optimal Structural Design Taking Account of Designer's Preference

Takao MUROMAKI¹, Kazuyuki HANAHARA² and Yukio TADA²

¹*Graduate School of Engineering, Department of Computer Science and Systems Engineering*

²*Graduate School of System Informatics, Department of Systems Science*

Key words: Shape Optimization, Truss Structure, Meta-heuristics, Geometric Moment, Fully Stress Design

The main topic of this study is a good structural design which reflects a designer's preference. The obtained results from "trial-and-error" optimal design approach are meaningful and have a good performance from the designer's viewpoint. By introducing a formulation of the geometric moment, we evaluate designer's preference quantitatively. We deal with the coat-hanging problem using two-dimensional truss structure as a design object. We request some laboratory students to design truss structures based on the trial-and-error design approach. We call these structures as "reference structures". We evaluate the designer's preference in terms of the similarity to the reference designs in the geometric moment. The original objective function which evaluates a structural weight is modified by adding an index that represents the difference of the geometric moment between the individual design and reference one. We utilize the meta-heuristic approaches (Genetic Algorithm and Particle Swarm Optimization) as the optimization method. The layout of the truss structure is decided by these meta-heuristic approaches but the cross-section area of each truss member is decided by means of fully stressed design approach. We can get solutions that are similar to the reference design and have lighter weight in case of having geometrical restriction about the truss structure layout. The solutions obtained by the genetic algorithm and the particle swarm optimization have the similar tendency about the layout of the truss structure. The structural weights of the designs obtained by these two algorithms are almost same value. We show that this problem can be solved irrespective of the meta-heuristics applied. The present design approach dealt with in this study is widely applicable to other structural design problems as long as the geometric moment of the structure can be obtained.