トラス構造の位相・形状と制御系の同時最適設計^{*1}

Simultaneous Optimal Design of Structural Layout, Shape and Control Systems for Truss Structure

坂 本 慎 介^{*2}・下 村 卓^{*3}・大久保 博 志^{*3}
Shinsuke SAKAMOTO, Takashi SHIMOMURA and Hiroshi OKUBO

Key Words: ACT, Simultaneous Optimization, Active Vibration Control, Truss Structure, LMI, Genetic Algorithm

Abstract: This paper addresses simultaneous optimal design of adaptive truss structures, in which we compromise structural and control systems while taking into account structural layout, shape and control systems. The problem becomes nonconvex discrete optimization problem in terms of continuous and discrete design variables. Noticing that the nonconvex problem can be approximated by a convex one by adding a semidefinite positive function, so-called a convexifying function, to make the constraint convex, first, we solve this nonconvex problem using successive LMI optimization in cross-sectional area of truss members and state feedback gains. Second, we solve this discrete problem using genetic algorithm for simultaneous optimization of layout of truss structures. In this way, a hybrid method combining successive LMI optimization and genetic algorithm is used in this study. A numerical example of a simple structure is provided to demonstrate the effectiveness of the proposed method.

1. は じ め に

宇宙構造物に代表される柔軟構造物を設計する場合には、軽量化が要求される構造系の仕様と振動抑制が要求される制御系の仕様が相反して相互干渉する。このため、構造系と制御系の同時最適設計を行うことにより、優れた設計を実現できる可能性があり、多くの研究がなされてきた¹⁻⁴⁾。

構造系と制御系の同時最適設計問題では、第1表に示すように構造系の設計変数には位相と形状、制御系の設計変数にはフィードバックゲインとセンサ・アクチュエータ配置があるが、これまでの最適設計問題では、構造系の形状および制御系のフィードバックゲインが多く取り扱われ、最近ではセンサ・アクチュエータ配置も取り扱われるようになってきた⁵⁾。構造系の形態である位相を取り扱う最適設計問題については、位相・形状と制御系共に、遺伝的アルゴリズム (GA)、あるいはその応用である並列 GA が適用されている⁶⁾。しかしながら構造系の形態である位相を取り扱う最適設計問題は少なく、検討の余地がある。

この問題の多くは、設計対象が状態方程式で記述され、なかでもディスクリプタ形式で表現されることが多い。ディスクリプタ形式を用いると変数間の結合や物理定数の配置に由来する構造を陽に表したモデリングが実施できる特徴があり、このような問題に対し、線形行列不等式 (LMI: Linear Matrix Inequality) を用いた設計法が提案されて

いる⁷⁾。

LMI に基づく多目的制御系設計では、LMI を連立させた問題を凸化するため、多くの研究では LMI 共通解が採用されてきたが、これは設計結果に保守性をもたらす。このような保守性を緩和するため、最近 LMI 非共通解を用いた多目的制御系設計の研究が盛んになってきた⁸⁾。

本論文では、トラス構造を対象として、構造系の位相と

第1表 構造系と制御系の同時最適設計問題の分類

	目的関数	設計変数		最適化手法
構造系	重量 固有振動数	位相	部材の配置	ウィルソンの θ 法 (逐次積分法)
		形状	部材の断面積 部材の長さ 板厚 質量 ばね定数 減衰定数	傾斜投影法 擬似最小二乗法 感度解析による最適化 Powell 法 コンプレックス法 傾斜法
制御系	最適レギュレータ/2次形式評価関数 伝達関数の H_2/H_∞ ノルム	制御系の配置	アクチュエータとセンサの配置*	内点法 最適レギュレータまたはそれに準ずる方法 線形行列不等式 (LMI) 逐次二次計画法 シンプレックス法 擬似焼きなまし法 (SA)
		フィードバック制御	フィードバックゲイン	逐次線形化法 局所ランダム探索法 遺伝的アルゴリズム (GA) 逐次 LMI 化

^{*1} © 2009 日本航空宇宙学会

平成 19 年 11 月 22 日, 第 23 回宇宙構造・材料シンポジウムにおいて発表。平成 20 年 7 月 21 日原稿受理

^{*2} 三菱電機 (株)

^{*3} 大阪府立大学大学院工学研究科航空宇宙海洋系専攻

* 文献によっては、センサ・アクチュエータ配置を構造系の設計問題として扱う考え方もある。

形状, および制御系のフィードバックゲインを設計変数とした構造系と制御系の同時最適設計を行うため, LMI の非共通解を用いた多目的制御系設計法を適用する. さらにトラス構造の位相を探索して最適化する場合には, 構造部材の有無を離散変数として取り扱い, 混合整数計画問題として遺伝的アルゴリズムを組み合わせ, 同時最適設計を行う方法を提案する.

GA は離散的な設計変数を取り扱う最適化手法であり, トラスの位相やアクチュエータ・センサの配置には適しているが, 寸法を含む形状や制御系のフィードバックゲインの連続的な設計変数を取り扱う最適化には有利とは限らず, 設計変数の種類に応じた最適化手法を適用する必要がある. 本論文では, 形状と制御系のフィードバックゲインの同時最適化に対して, 連続的な多目的最適化手法であり, かつ制御系の設計手法である, LMI の非共通解を用いた逐次 LMI を適用することに意義がある.

2. 対象システム

2.1 運動方程式 一般に構造物の運動方程式は次式で与えられる.

$$M\ddot{q} + C\dot{q} + Kq = \overline{B}_u u + \overline{B}_w w \quad (1)$$

ここで, q, u, w は各々変位ベクトル, 制御入力ベクトル, および外乱入力ベクトルを表し, M, C, K はそれぞれ質量行列, 減衰行列, および剛性行列を表す. また, $\overline{B}_u, \overline{B}_w$ は各々制御入力の配置行列, 外乱入力の配置行列である.

上記の運動方程式を構造系パラメータの取り扱いやすいディスクリプタ方程式で表現すると, 次式ようになる. また制御出力の方程式を以下で表し, 対象モデル (プラント) の方程式とする.

$$E(\alpha)\dot{x} = A(\alpha)x + B_u u + B_w w \quad (2)$$

$$z = Lx + Du \quad (3)$$

ここで, 行列 E, A, B_u, B_w は以下のとおりであり, $x = \begin{bmatrix} q^T & \dot{q}^T \end{bmatrix}^T$ は状態ベクトル, α は構造の設計変数である. また, z は性能評価出力であり, z と w を H_2 ノルムの評価に用いる. L は性能評価の係数行列, D は入力の係数行列である.

$$E := \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & M \end{bmatrix}, \quad A := \begin{bmatrix} 0 & I \\ -K & -C \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$B_u := \begin{bmatrix} 0 \\ \overline{B}_u \end{bmatrix}, \quad B_w := \begin{bmatrix} 0 \\ \overline{B}_w \end{bmatrix}$$

状態フィードバック制御則 ($u = -K_c x$) を用いると, 方程式は以下ようになる. K_c はフィードバックゲインである.

$$E(\alpha)\dot{x} = (A(\alpha) - B_u K_c)x + B_w w \quad (5)$$

$$z = (L - D K_c)x \quad (6)$$

第 1 図 3 部材平面トラス構造

(5) 式を x について解くと, 方程式は以下ようになる.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= E^{-1}(\alpha)\{A_{cl}(\alpha)x + B_w w\} \\ &= \hat{A}_{cl}(\alpha)x + \hat{B}_w w \end{aligned} \quad (7)$$

ここで, $\hat{A}_{cl}(\alpha)$ および $\hat{B}_w$ は以下のとおりである.

$$\hat{A}_{cl}(\alpha) = E^{-1}(\alpha)A_{cl}(\alpha), \quad A_{cl}(\alpha) = A(\alpha) - B_u K_c \quad (8)$$

$$\hat{B}_w = E^{-1}(\alpha)B_w \quad (9)$$

2.2 トラス構造の行列 (マトリックス) 化 トラス構造の形態・位相の設計を行うにあたり, 第 1 図のような 3 部材平面トラス構造を考える.

各構造部材①～③の要素剛性マトリックス k_N ($N = 1 \sim 3$) を要素座標系から全体座標系に変換して, 節点 4 に関する全体剛性マトリックスを算出すると, 以下ようになる.

$$K = \frac{E_L}{l} \begin{pmatrix} S_1/2\sqrt{2} + S_2/2\sqrt{2} + S_3 & -S_1/2\sqrt{2} + S_2/2\sqrt{2} \\ -S_1/2\sqrt{2} + S_2/2\sqrt{2} & S_1/2\sqrt{2} + S_2/2\sqrt{2} \end{pmatrix} \quad (10)$$

各構造部材①～③の要素質量マトリックス m_N ($N = 1 \sim 3$) を要素座標系から全体座標系に変換して, 節点 4 に関する全体質量マトリックスを算出すると, 以下ようになる.

$$M = \frac{\rho l}{6} \begin{pmatrix} 2\sqrt{2}S_1 + 2\sqrt{2}S_2 + S_3 & 0 \\ 0 & 2\sqrt{2}S_1 + 2\sqrt{2}S_2 + S_3 \end{pmatrix} \quad (11)$$

ここで, l はトラス構造の部材の長さ, ρ は部材の密度, E_L は部材の縦弾性定数, S_N ($N = 1 \sim 3$) は各部材の断面積である.

上記以外に減衰マトリックス C は減衰を考慮しないため以下となる.

$$C = 0 \quad (12)$$

制御入力の配置行列 $\overline{B}_u$, 外乱入力の配置行列 $\overline{B}_w$ および

外乱入力 w は外力 F_w を用いて以下となる.

$$\bar{B}_u = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (13)$$

$$\bar{B}_w = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}^T, \quad w = F_w \quad (14)$$

3. 形状と制御の同時最適設計問題の定式化

構造系と制御系の同時最適設計の評価関数は、次のように構造系の評価関数 J_s と制御系の評価関数 J_a の線形結合で表されるものとする⁷⁾.

$$J = a \left(\frac{J_s}{J_{s0}} \right) + b \left(\frac{J_a}{J_{a0}} \right) \quad (15)$$

ここで J_{s0} と J_{a0} はそれぞれの初期基準値である. 構造系の評価関数 J_s としてトラス構造の総質量を用いる.

$$J_s = \sum_{N=1}^{N \max} m_N = \sum_{N=1}^{N \max} \rho S_N l_N \quad (16)$$

ここで m_N は N 番目の部材の質量であり, S_N は N 番目の部材の断面積, および l_N は N 番目の部材の長さである. 制御系の評価関数 J_a として外乱による応答の H_2 ノルムの 2 乗を用いる.

$$\begin{aligned} J_a &= \|H_{zw}(s)\|_2^2 \\ &= \inf (\text{trace} [(L - DK_c)X(L - DK_c)^T]) \end{aligned} \quad (17)$$

ここで $\|\cdot\|_2$ は H_2 ノルム, H_{zw} は w から z までの伝達関数を表し, X は次の不等式の解である.

$$\hat{A}_{cl}(\alpha)X + X\hat{A}_{cl}^T(\alpha) + \hat{B}_w\hat{B}_w^T < 0 \quad (18)$$

構造系の制約条件としては, 構造部材の断面積 S_N の上下限値 S_N^L, S_N^U , すなわち, $S_N^L \leq S_N \leq S_N^U$ を用いる.

構造系と制御系の同時最適設計問題は, 次の条件を満たすパラメータ α と安定なフィードバック制御則を求める問題となり, 以下のように表される. ここではパラメータ α は断面積 S_N に相当する.

minimize: $J_{\text{opt}} = \inf J$

$$\begin{aligned} \text{subject to: } & \hat{A}_{cl}(S_N)X + X\hat{A}_{cl}^T(S_N) + \hat{B}_w\hat{B}_w^T < 0 \\ & S_N^L \leq S_N \leq S_N^U \end{aligned} \quad (19)$$

式 (18) の両側から $E(\alpha)$ をかけると, 次式のようになる.

$$A_{cl}(\alpha)XE(\alpha) + E(\alpha)XA_{cl}^T(\alpha) + B_wB_w^T < 0 \quad (20)$$

上式を式 (8) により展開し, 変数変換 $F = K_cX$ を行くと,

$$\begin{aligned} A(\alpha)XE(\alpha) + E(\alpha)XA^T(\alpha) - B_uFE(\alpha) \\ - E(\alpha)F^TB_u^T + B_wB_w^T < 0 \end{aligned} \quad (21)$$

この式に Schur の相補定理を用いると次のように表すことができる.

$$\begin{bmatrix} A(\alpha)XE(\alpha) + E(\alpha)XA^T(\alpha) - B_uFE(\alpha) - E(\alpha)F^TB_u^T & B_w \\ B_w^T & -I \end{bmatrix} < 0 \quad (22)$$

同様に式 (17) において変数変換を行うと,

$$J_a = \text{trace}[(LX - DF)X^{-1}(LX - DF)^T] \quad (23)$$

変数 Z を用いて以下の不等式を設定すると,

$$(LX - DF)X^{-1}(LX - DF)^T < Z \quad (24)$$

これを Schur の相補定理を用いて書き換えると,

$$\begin{bmatrix} Z & LX - DF \\ (LX - DF)^T & X \end{bmatrix} > 0 \quad (25)$$

となり, $J_a = \inf[\text{trace}(Z)]$ で与えられる.

これより式 (19) の同時最適設計問題は, 式 (22) の α を S_N に置き換えて, 以下のように書き換えられる.

minimize:

$$J_{\text{opt}} = \inf J = \inf a \left(\frac{J_s}{J_{s0}} \right) + b \left(\frac{J_a}{J_{a0}} \right)$$

subject to:

$$\begin{bmatrix} A(S_N)XE(S_N) + E(S_N)XA^T(S_N) - B_uFE(S_N) - E(S_N)F^TB_u^T & B_w \\ B_w^T & -I \end{bmatrix} < 0$$

$$\begin{bmatrix} Z & LX - DF \\ (LX - DF)^T & X \end{bmatrix} > 0 \quad (26)$$

$$S_N^L \leq S_N \leq S_N^U$$

式 (21) は $A(\alpha)$, X , $E(\alpha)$ の三つの変数の積による TMI (Trilinear Matrix Inequality) になっている.

一般的に BMI 問題は変数変換をして変数を交互に固定すると, 逐次的に問題を解くことができるが, 式 (22) の場合には TMI であるためにそれができない. そこで, 半正定な凸化関数を導入する. 式 (22) の (1, 1)-block は平方完成を用いると次のようになる.

$$\begin{aligned} A(\alpha)XE(\alpha) + E(\alpha)XA^T(\alpha) - B_uFE(\alpha) - E(\alpha)F^TB_u^T \\ = (A(\alpha)X - B_uF)(A(\alpha)X - B_uF)^T + E(\alpha)E^T(\alpha) \\ - (A(\alpha)X - B_uF - E(\alpha))(A(\alpha)X - B_uF - E(\alpha))^T \end{aligned} \quad (27)$$

式 (27) を式 (22) に代入し, Schur の相補定理を用いると, 式 (27) は次のようになる.

$$\begin{bmatrix} -G(\zeta)G^T(\zeta) & * & * & * \\ B_w^T & -I & * & * \\ (AX - B_uF)^T & 0 & -I & * \\ E^T & 0 & 0 & -I \end{bmatrix} < 0 \quad (28)$$

ここで, $G(\zeta) = A(\alpha)X - B_u F - E(\alpha)$ ($\zeta := (\alpha, X, F)$) である. さらに, 式 (28) の (1, 1)-block の $-G(\zeta)G^T(\zeta)$ を分離するため, ζ と同次元の定数 η を導入して以下の不等式を用いる.

$$\begin{aligned} -G(\zeta)G^T(\zeta) &\leq -G(\zeta)G^T(\eta) - G(\eta)G^T(\zeta) \\ &\quad + G(\eta)G^T(\eta) \end{aligned} \quad (29)$$

(等号成立条件 $\eta = \zeta$)

式 (29) の右辺で式 (28) の (1, 1)-block を置き換えると,

$$\begin{bmatrix} (**) & * & * & * \\ B_w^T & -I & * & * \\ (AX - B_u F)^T & 0 & -I & * \\ E^T & 0 & 0 & -I \end{bmatrix} < 0 \quad (30)$$

となる. ここで, $(**) = -G(\zeta)G^T(\eta) - G(\eta)G^T(\zeta) + G(\eta)G^T(\eta)$ である. そして, $G(\eta)$ の X, F などの値は構造系のパラメータを固定したときの式 (26) の値を用いる.

以上より, 同時最適設計問題は, α を S_N に置き換えて, 以下のように表される.

minimize:

$$J_{\text{opt}} = \inf J = \inf a \left(\frac{J_s}{J_{s0}} \right) + b \left(\frac{J_a}{J_{a0}} \right)$$

subject to:

$$\begin{bmatrix} (**) & * & * & * \\ B_w^T & -I & * & * \\ (A(S_N)X - B_u F)^T & 0 & -I & * \\ E(S_N)^T & 0 & 0 & -I \end{bmatrix} < 0$$

$$\begin{aligned} (**) &= -G(\zeta)G^T(\eta) - G(\eta)G^T(\zeta) + G(\eta)G^T(\eta) \\ G(\zeta) &= A(S_N)X - B_u F - E(S_N) \end{aligned} \quad (31)$$

$$\begin{bmatrix} Z & LX - DF \\ (LX - DF)^T & X \end{bmatrix} > 0$$

$$S_N^L \leq S_N \leq S_N^U$$

これより逐次 LMI 化のアルゴリズムが以下のように記述される.

$f = \inf J$ とおく.

初期値 α_0, A_0, E_0 を与える.

(26) 式によって最適化計算を行い, 構造系パラメータの初期値 α_0, A_0, E_0 に対する F_0, X_0 を計算する.

収束判定値 $\varepsilon > 0$ を導入し, $k = 0$ とおく.

Repeat

$$G_k \leftarrow A(S_N)X_k - B_u F_k - E(S_N)$$

$$G_f \leftarrow A_0 X_0 - B_u F_0 - E_0 \quad (k = 0 \text{ のとき})$$

$$G_f \leftarrow A(S_N)X_{\text{opt}} - B_u F_{\text{opt}} - E(S_N)$$

($k \neq 0$ のとき)

$G(\zeta) = G_k$, $G(\eta) = G_f$, $X = X_k$, $F = F_k$ として, (31) 式の制約条件下で $f_k = \inf J$ となる S_N^* を求める.

Until $\|f_k - f_{k-1}\| < \varepsilon$

4. 位相の同時最適化のアルゴリズム

トラス構造の位相決定問題において, 各部材の有無を表す変数につき, 部材がある場合を 1, 部材がない場合を 0 とする離散変数として取り扱うことができる. 設計変数に離散的な整数変数を用いて最適化を行う場合, これを組合せあるいは離散的最適化問題として分類できる.

離散的な設計変数を取り扱う方法としては, 大別すると以下の通り決定論的手法と確率的手法がある⁹⁾.

(1) 決定論的手法

(a) 列挙的手法, (b) 分岐限定法

(2) 確率的手法

(a) ランダムサーチ, (b) 遺伝的アルゴリズム (GA),

(c) 擬似焼きなまし法 (SA), (d) タブー探索法

決定論的手法は離散的設計変数の数やその取り得る値が少ない場合には, 最も確実かつ簡単な方法である. しかしながら離散的設計変数の数や取り得る値が多い場合には, 取り得る組合せ数が膨大になり, 実用的な時間で最適解を求めるのは非常に困難になる.

確率的手法は離散的設計変数と連続的設計変数を区別せずに最適化が行えるためアルゴリズム自体は簡単である. しかしながら局所解への収束さえも確率的には保証されず, 最適化の設計結果が必ずしも最良の設計結果になるとは限らない.

連続的設計変数と離散的設計変数が混在している解析的または数値的に見通しの良い凸最適化問題や LMI に帰着できる解法は見つかっていない. これより離散的な同時最適化問題の解法として, 遺伝的アルゴリズム (GA) を組合せた逐次 LMI の手法を提案する.

遺伝的アルゴリズムでは部材が存在する場合を 1, 部材が存在しない場合を 0, とするような 2 進数のコードを定義する. 第 1 図のトラス構造では存在可能な部材が計 3 本あるため, あらゆる位相は 0, 1 の 3 ビット列で示されることになる. このように定義した遺伝子に対する適応度評価, つまり設定された位相を有するトラス構造の評価を, 形状と制御の同時最適化により行い, 以下のアルゴリズムにより解くことができる¹⁰⁾.

Step 1: トラス構造の位相について, GA の初期個体を生成し, 世代数を $g = 1$ とおく.

Step 2: 各個体を 2 進数のコードで表し, 最適化問題を形状と制御の同時最適化問題に帰着させる.

Step 3: 逐次 LMI による同時最適化を行い, 最適な形状, 制御フィードバックゲインを計算する.

Step 4: 各個体に対して, 適応度を計算する.

Step 5: ルーレット選択を用いて個体を選択し, 遺伝的オペレータ (交差あるいは突然変異) を各個体に適用する.

Step 6: 世代数等に関する停止条件を満足したら計算を停止する. そうでなければ世代数 $g = g + 1$ として Step 2 に戻る.

5. 計 算 例

計算例として3部材トラスを取り上げ(ケース1), これより1部材を削除した(ケース2~4), 第2~4図に示す2部材トラスの全パターンについて, 形状と制御の同時最適化計算を行った.

最適化前後での解の変化がわかりやすくなるように, パラメータは以下の無次元化された諸量を用いた.

部材長 $l = 2.0$, 密度 $\rho = 1.0$, 縦弾性定数 $E_L = 2000$

断面積の初期値 $S_1 \sim S_3$ (init) = 1.0 (または 0.99)

断面積の制約条件 $0.5 \leq S_1 \sim S_3 \leq 1.5$

性能評価の係数 $L = [0 \ 200 \ 0 \ 2; \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$

収束判定値 $\varepsilon = 10^{-5}$

目的関数の係数 $a = 1.0, b = 1.0$ ($a + b = 2.0$)

J_s : 全トラスの質量, J_a : 応答 H_2 ノルムの2乗

4 ケースの計算結果をそれぞれ第2~5表に示す. どのケースにおいても提案法で最適化後評価関数が下がり, 改善されていることがわかる.

第2表 ケース1の最適解

	最適化前	最適化後
J	2	1.8966
J_s/J_{s0} (質量の比)	1	0.9965
J_a/J_{a0} (H_2 ノルムの比)	1	0.9001
S_1	1	1.0038
S_2	0.99	0.9875
S_3	1	0.9848

(第1図: コード [1 1 1])

第2図 2部材平面トラス構造 (1)

第3図 2部材平面トラス構造 (2)

第3表 ケース2の最適解

	最適化前	最適化後
J	2	1.8988
J_s/J_{s0}	1	0.9728
J_a/J_{a0}	1	0.9260
S_1	1	0.9699
S_2	0.99	0.9661

(第2図: コード [1 1 0])

第4表 ケース3の最適解

	最適化前	最適化後
J	2	1.9206
J_s/J_{s0}	1	0.9397
J_a/J_{a0}	1	0.9810
S_1	1	0.8535
S_3	1	1.0615

(第3図: コード [1 0 1])

第4図 2部材平面トラス構造 (3)

第5表 ケース4の最適解

	最適化前	最適化後
J	2	1.9252
J_s/J_{s0}	1	0.9399
J_a/J_{a0}	1	0.9853
S_2	1	0.8432
S_3	1	1.0768

(第4図: コード [0 1 1])

第6表 4 ケースの同時最適解の比較

	ケース1	ケース2	ケース3	ケース4
J	1.8966	1.7259	2.3344	2.3393
J_s	7.6018	5.4756	4.5371	4.5384
J_s/J_{s0} (質量の比)	0.9965	0.7203	0.5968	0.5970
J_a	5.1163	5.7160	9.8764	9.9032
J_a/J_{a0} (H_2 ノルムの比)	0.9001	1.0056	1.7376	1.7423

ケース1での $J_{s0} = 7.6286$, $J_{a0} = 5.6839$ を使用.

ケース1, ケース2の場合には, 対称な構造のため, 部材の断面積はほぼ均等であるが, ケース3, ケース4の場合には, 非対称な構造のため, 1次の固有振動数が最適化前より最適化後の方が減少している形態となっており, 最適化前後で構造重量は減少しているが, 固有振動数が H_2 ノルムの増加する方向に寄与していることがわかる.

第2~5表の4ケースは J_{s0} : 全トラスの質量, J_{a0} : 初期最適化時の H_2 ノルムが異なるため, これを統一して比較すると, 第6表のようになる.

質量の比 J_s/J_{s0} においてはケース3またはケース4が最も改善され, H_2 ノルムの比 J_a/J_{a0} においてはケース1が最も改善され, 総合評価として, ケース2が最も良い設計結果となった.

6. 結 論

本研究では, トラス構造の位相・形状と制御系の同時最適設計法として, 形状と制御フィードバックゲインの同時最適設計には線形行列不等式 (LMI) の非共通解を用いた多目的制御系設計による方法を適用し, 位相については構造部材の有無を離散変数とした混合整数計画問題として, 遺伝的アルゴリズムを適用することで新たな同時最適化法を提案した.

計算例として, 3部材トラス構造の位相・形状と制御系の同時最適設計を行い, 位相を含めた最適化による有効性を検証した. その結果, すべてのケースで評価関数値が改善し, 関数の分母をそろえて全ケースを比較することで, 総合評価を得ることもできた. 以上の結果は本手法の有効性を示すものと考えられる.

有益なコメントをいただいた査読者の方に感謝いたします.

参 考 文 献

- 1) 岩壺卓三, 河村庄造, 安達和彦: 機械構造物の構造系と制御系の同時最適設計に関する研究動向と今後の課題, 日本機械学会論文集 C 編, **59** (1993), pp. 631–637.
- 2) 小野田淳次郎: 宇宙構造物の構造と制御の同時最適設計, システム・制御・情報, **39** (1995), pp. 136–141.
- 3) 大日方五郎: 構造系と制御系の同時最適設計問題, 計測と制御, **36** (1997), pp. 254–261.
- 4) 梶原逸朗: 制御性と安定性の向上を目指した構造と制御の同時設計, システム・制御・情報, **44** (2000), pp. 623–631.
- 5) 下村 卓, 藤田義久, 大久保博志: 柔軟宇宙構造物の構造と制御の同時最適設計: センサー・アクチュエータ配置と制御系設計—接線による線形化拘束条件, 日本航空宇宙学会論文集, **56** (2008), pp. 239–243.
- 6) 山川 宏, 高木裕司: 遺伝的アルゴリズムを用いた構造物の位相・形状と制御系の同時最適設計に関する研究, 日本機械学会第 3 回最適化シンポジウム講演論文集, 1998, pp. 25–30.
- 7) Kim, J. H., Shimomura, T. and Okubo, H.: Simultaneous Optimal Design of Structural and Control via Successive LMI Optimization, J. Intell. Mater. Syst. Struct., **16** (2005), pp. 977–982.
- 8) 下村 卓: 行列不等式の非共通解を用いた多目的制御系設計, 計測と制御, **41** (2002), pp. 811–818.
- 9) 平元和彦, 土岐 仁, 大日方五郎: 離散的設計変数を考慮した構造系と制御系の同時最適設計, 日本機械学会論文集 C 編, **65** (2000), pp. 793–800.
- 10) 坂本二郎, 尾田十八: 遺伝的アルゴリズムを利用した最適トラス形態決定法, 日本機械学会論文集 A 編, **59** (1993), pp. 1568–1573.