設計変数における不確定変動を考慮した minimax 設計* (第1報, ファジィ決定法による多目的最適化)

米 澤 智 志^{*1}, 鈴 木 真 二^{*2}

Minimax Design with Consideration of Uncertain Variation of Design Variables (1st Report, Multiobjective Optimization using Fuzzy Decision)

Satoshi YONEZAWA and Shinji SUZUKI

This paper presents a new design method for systems which have uncertain variation in their design variables. We convert the design problem of above systems to a multiobjective optimization problem which improves a nominal performance and a difference between the nominal performance and the worst one. A minimax problem between a system designer and the variation of the design variables is solved with a new iterative method to get the worst performance. As a numerical example, we investigate a design problem which improves a transient response of an oil hydraulic circuit. The validity of the proposed method is demonstrated by this example.

Key Words: Optimum Design, Transient Response, Computer Aided Design, Uncertain Variation of Design Variable, Minimax Strategy, Multiobjective Optimization

1. 緒 言

最適設計に関する研究は, 1960 年ごろから盛んになり, 現在も精力的に進められている⁽¹⁾. ただし, それら研究の多くは, 設計対象であるシステムの全てのパラメータが確定し既知である, ということを前提としている. 実際の設計を考えると, 全パラメータが確定し既知であることは, 非常にまれなケースであり, 現実には, パラメータに不確定な変動が(値の大小は別にして)存在する 경우가ほとんどである. しかも, この変動は, 設計者には制御することができない外環境だけでなく, 設計者が制御することができる設計諸元についても, 公差などの形で存在する. このような場合, パラメータの変動による性能劣化も考慮した設計を行うことが必要である.

不確定変動を考慮する手法としては, (1)目的関数や制約条件の変動に対する感度を対象とする手法⁽²⁾⁽³⁾, (2)確率を導入し, 変動によって生じる応答の期待値や分散を対象とする手法⁽⁴⁾⁽⁵⁾, (3)同じく確率を導入し, 信頼度を対象とする手法⁽⁶⁾⁽⁷⁾, (4)変動によって

生じる最悪性能を対象とする手法⁽⁸⁾⁽⁹⁾, などが提案されている.

これらの中では, 最悪性能を対象とする手法が, パラメータの不確定変動に対してもっとも安全側の設計を与えることができる. しかし, 最悪性能を対象とする手法を用いた研究においては, 最悪性能の改善のみを目的としている(=単一目的)場合がほとんどであるため, 最悪性能によるシステム全体の損失が極端に大きい場合以外は, 不確定変動に対して過剰な安全設計となる.

また, 最悪性能を対象とする手法では, 問題をシステムの設計変数と不確定なパラメータの間のゼロ和ゲームととらえ, minimax 問題⁽¹⁰⁾に帰着させて解く方法が一般的である. しかし, 今までに提案されている手法では, 鞍点解が存在しない問題に対して, (1)解を得ることができない, (2)変数を事前に離散近似しなければならない⁽⁹⁾, などの問題点がある.

そこで本論文では, 設計変数における不確定変動を考慮する設計問題を, 多目的最適化問題に帰着させて解く手法を提案する. また, 変動によって生じる最悪性能の求解法について, 従来の minimax 問題に対する解法を拡張した新しい手法を提案する.

本論文の構成は以下の通りである. まず, 変動によ

* 原稿受付 1997 年 6 月 13 日.

^{*1} 正員, (株)神戸製鋼所(☎ 651-2271 神戸市西区高塚台 1-5-5).

^{*2} 正員, 東京大学(☎ 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1).

る性能劣化を表す新しい指標を導入して多目的最適化問題を構成し、その解法を示す。次に、最悪性能を求める問題の minimax 問題への変換方法を示し、変換された minimax 問題に鞍点解のない場合にも、minimax 解的な性質を持った解を得ることができる求解アルゴリズムを提案する。そして、上記の2つによって再構築された設計問題を示し、使用した最適化計算法について説明する。最後に、応答特性の改善を目的とする油圧回路を例として、提案手法の妥当性を示す。

2. 多目的最適化問題

2.1 設計方針 最悪性能の改善を単一の目的関数とする最適設計では、不確定変動に対しては、ロバストなシステムを得ることができる。しかし、その場合、ノミナル性能(設計変数に変動が生じていない状態、つまりノミナル設計点、における性能)については、何ら考慮されていないため、最悪性能の改善のためにノミナル性能が大幅に劣化する可能性がある。最悪性能での損失が極端に大きい場合(システムの破壊等)には、ノミナル性能の劣化も許容できるが、そうでない場合は、変動に対して過剰に安全な設計になっている。

そこで本稿では、設計変数に不確定変動が存在するシステムの設計を、

- (1) ノミナル性能を極端に悪化させない。
 - (2) ノミナル性能と最悪性能の差を小さくする。
- という2つを目的として行うことにした。

2.2 多目的最適化問題への変換 ノミナル性能と最悪性能の差を表す指標として、最悪性能劣化率という指標を導入する。その定義を以下に示す。

$$\text{最悪性能劣化率} = \frac{\text{最悪性能} - \text{ノミナル性能}}{\text{ノミナル性能}}$$

最悪性能劣化率は、変動係数(=標準偏差/期待値)に似ているが、最悪性能を対象としている点で、より安全側の指標となっている。

この指標を用いることによって、設計変数における不確定変動を考慮する設計問題は、ノミナル性能と最悪性能劣化率の2個の目的関数の改善を行う多目的最適化問題に帰着される。

この変換によって、ノミナル性能が目的関数に含まれるので、設計者が設計過程での値の変化を監視することができる。また、最悪性能そのものではなく、無次元化された最悪性能劣化率を目的関数とすることで、ノミナル性能との関係を見通しよくしている。そして、ノミナル性能と最悪性能劣化率を同時に扱うこ

Fig. 1 Comparison of two types of solutions

とによって、設計者の選好を反映させた設計、“ノミナル性能重視で、性能劣化はある程度許容”や“最悪性能劣化率重視、ノミナル性能の悪化はある程度許容”を行うことができる。図1に、1変数 x の場合の2つのタイプの解、ノミナル性能重視の解と最悪性能劣化率重視の解、の比較を示す。ここでは、 f が小さいほど望ましい設計であるとしている。

2.3 多目的最適化問題の解法 多目的最適化問題の解法については、ファジィ関数を用いたファジィ決定法⁽¹¹⁾を採用する。

ファジィ決定法は、ファジィ関数で定義された各目的の満足度の最小値を最大化するという手法である(通常最適化問題では目的関数の最小化を行うが、満足度の場合は最大化を目的とする)。ノミナル性能に関する目的関数を f_1 、最大性能劣化率に関する目的関数を f_2 、それぞれのファジィ関数を μ_1 、 μ_2 とし、制約条件を $g(x)$ とすると、

$$\begin{aligned} & \text{maximize } \min(\mu_1(f_1), \mu_2(f_2)) \dots\dots\dots (1) \\ & \text{subject to } g(x) \leq 0 \end{aligned}$$

と、表される。

ファジィ決定法は、他の多目的最適化問題の解法である重み係数法⁽¹¹⁾等と比較して、(1)最小満足度を対象として解の改善を行うので、安全側の設計を行うことができる、(2)性質の違う複数の目標を満足度という同一の尺度で扱うことができる、(3)満足度の設定をファジィ関数で行うので柔軟性がある、という特徴がある。

3. 最悪性能の探索

3.1 minimax 問題 minimax 問題は、目的関数 f に対して、これを最小化する変数を x 、最大化しようとする変数を y とし、制約条件を $g(x, y)$ とすれば、次のように表される⁽¹⁰⁾。

$$\begin{aligned} & \min_x \max_y f(x, y) \dots\dots\dots (2) \\ & \text{subject to } g(x, y) \leq 0 \end{aligned}$$

ゲーム理論では、 x を決定するプレイヤーを最小化プレイヤー、 y を決定するプレイヤーを最大化プレイヤーと呼

Table 1 Corresponding table of worst performance search problem and minimax problem

Worst performance search	minimax
Designer	Minimizer
Design variables	$\mathbf{x}$
Uncertain variation	Maximizer and $\mathbf{y}$
Worst performance	minimax solution

Fig. 2 Concept of minimax problem

んでいる。

3・2 最悪性能探索問題と minimax 問題の関係

一般的な定義にしたがって目的関数最小化を設計目的とすると、最悪性能を求める問題は、表 1 に示す対応付けによって、minimax 問題に変換される。

図 2 に minimax 問題としての概念図を示す。

3・3 minimax 問題の解法 minimax 問題は、目的関数や制約条件を構成する関数に凸性等の条件がない場合には、簡単に解くことができない。そこで、一般には、最小化プレイヤと最大化プレイヤを交互に変化させる、つまり、目的関数の最小化と最大化の過程を交互に繰り返して、収束した解を minimax 解とするという逐次的な方法(従来法)で解かれる。

しかし、この手法では、鞍点解の存在しない問題は、解が振動して収束しない。その原因は、最小化過程で 1 つの最大化プレイヤの値に特化した最小化を行うことにある。最小化プレイヤの値 $\mathbf{x}^{\Delta}$ は、最小化過程で、そのときの最大化プレイヤの値 $\mathbf{y}^{\Delta}$ を対象として目的関数の最小化が行われている。そのため、最大化プレイヤが取り得る範囲が広い場合には、次の最大化過程で、その最小化プレイヤの値 $\mathbf{x}^{\Delta}$ に対して、最大化プレイヤがあたかも最小化プレイヤの裏をかくかのように、目的関数の値を大きくする別の最大化プレイヤの値 $\mathbf{y}^{\star}$ が選ばれる。次の最小化過程では、今度は、 $\mathbf{y}^{\star}$ を対象として最小化が行われる。この繰り返して、モグラ叩きのような状況になって解が振動する。

そのような問題に対しても minimax 解的な性質を持った解を得る手法を、ここで提案する。

最小化過程と最大化過程を交互に行う点は従来法と同じであるが、提案手法では、その中に新しく参照群

という集合を設定する。参照群は、繰返し計算の中の最大化過程で得られた最大化プレイヤの値を、複数個(最大個数は設計者指定)保存している集合である。例えば、1 回目の最大化過程での最大化プレイヤの値が 1.0、2 回めの値が 2.0 であれば、参照群には、1.0 と 2.0 が存在している。

以下に今回提案する手法のアルゴリズムを示す。

(1) **初期化** 参照群内の最大化プレイヤ値の最大個数と、両プレイヤの初期値を設定。

(2) **最小化過程** 参照群の値を固定し、最小化プレイヤで目的関数の最小化。

(3) **最大化過程** 最小化プレイヤの値を固定し、最大化プレイヤで目的関数の最大化。得られた最大化プレイヤの値が参照群に含まれていなければ、参照群に追加または置換。

(4) **収束判定** (2)(3)での目的関数の変化が設定値以下なら収束として終了。それ以外は(2)に戻る。

最小化過程では、参照群にある全ての最大化プレイヤの値について目的関数値を計算し、その中で最大の目的関数値をその時の最小化プレイヤの目的関数値として最小化プレイヤの変数の改良を行う。

最大化過程では、従来の方と同様に、最小化過程で選ばれた最小化プレイヤを固定し、目的関数値を最大にする最大化プレイヤの値を選択する。そして、得られた最大化プレイヤの値が参照群に含まれていない場合は、その最大化プレイヤ値を参照群に加える。このとき、全履歴を参照群に保存していくと最小化過程での計算時間が莫大になるため、参照群での最大個数をあらかじめ設定しておき、その個数に達していた場合は、参照群の中で最も目的関数値の小さいものと入れ換える。

つまり、参照群内の最大化プレイヤの最大個数を 1 個にしたものが従来からの繰返し手法で、本稿で提案する手法はその拡張版である。本手法では、最小化過程で複数の最大化プレイヤの値を参照することによって、最大化過程で裏をかかれて目的関数値が増加するという状況を防止している。そのため、収束した解が得られることが期待できる。なお、収束した解を得るために必要な最大化プレイヤ値の最大個数は、問題に依存しており、初期化過程で正確に設定することは困難である。したがって、解析前に経験等に基づいて初期化過程で最大個数を設定して解析を行うが、特定の最大化プレイヤ値の間で解が振動して収束しない場合には、最大個数を増やして解析を行わなければならない。

4. 変換された設計問題

4・1 解析の流れ 設計変数における不確定変動を考慮する設計問題は、多目的最適化問題への変換とminimax問題としての最悪性能の探索を用いることにより、以下の流れで解析される。

(1) 初期化 参照群の最大個数(n)を設定, 設計変数 $\mathbf{x}(\in \mathbf{X})$ と設計変数の変動 $\mathbf{Y}_r = \{\mathbf{y}_1, \dots, \mathbf{y}_m\}(\in \mathbf{Y}, m \leq n)$ に適当な初期値を代入する。

(2) 満足度最大化過程 $\mathbf{Y}_r$ を固定して,

$$\mu(\bar{\mathbf{x}}, \bar{\mathbf{y}}) = \max_{\mathbf{x}} \{\mu_1[f_1(\mathbf{x}, \bar{\mathbf{y}})], \mu_2[f_2(\mathbf{x}, \bar{\mathbf{y}})]\}$$

$$\text{subject to } g_{\min}(\mathbf{x}, \bar{\mathbf{y}}) \leq 0$$

..... (3)

を満たす $\bar{\mathbf{x}}$ を求める。ここで、 $\bar{\mathbf{y}}$ は、各 $\mathbf{x}$ について、

$$\mu(\bar{\mathbf{x}}, \bar{\mathbf{y}}) = \min_{\mathbf{y}_r} \{\mu_1[f_1(\mathbf{x}, \bar{\mathbf{y}})], \mu_2[f_2(\mathbf{x}, \bar{\mathbf{y}})]\}$$

$$\text{subject to } g_{\min}(\mathbf{x}, \mathbf{y}_i) \leq 0$$

..... (4)

を満たしているものとする。

(3) 最悪性能探索過程 (2)で求められた $\mathbf{x} = \bar{\mathbf{x}}$ を固定して,

$$f_2(\bar{\mathbf{x}}, \bar{\mathbf{y}}) = \max_{\mathbf{y}} f_2(\bar{\mathbf{x}}, \mathbf{y})$$

$$\text{subject to } g_{\max}(\bar{\mathbf{x}}, \mathbf{y}) \leq 0$$

を満たす $\bar{\mathbf{y}}$ を求める。この $\bar{\mathbf{y}}$ と参照群を比較し、 $\bar{\mathbf{y}}$ が参照群の中に含まれていない場合、a) $m \leq n$ なら、そのまま参照群に追加し、 $m = m + 1$, b) $m = n$ なら、 m 個の中で f_2 が最小である $\mathbf{y}_i$ と置換する。

(4) 収束判定 (2)(3)での目的関数の変化が設定値以下なら収束として終了。それ以外は(2)に戻る。

ここでは、満足度を評価基準に用いているので、minimax問題での最小化過程が満足度最大化過程となっている。この問題は、満足度最大化過程における相手プレイヤーのいない最小値最大化問題と、満足度最大化過程と最悪性能探索過程を通して行われる2人のプレイヤーによるminimax問題が存在し、複雑な問題となっていることが分かる。

4・2 解析手法 本稿では、最小化と最大化のための最適化手法として、Tabu探索法⁽¹²⁾を用いた。Tabu探索法は、現在の解を中心として設計変数の存在領域を大きさの異なるいくつかの領域に分割し、各領域でランダムサーチを行い、各サーチで得られた中で最小値を与えるものを新しい解とし、次はその解を中心として再び探索を行う、という手法である。Tabu探索法には、(1)領域分割によって盲目的探索

Fig. 3 Oil-hydraulic system

が回避される、(2)ランダムサーチによって局所解から脱出し大域解を探索する可能性がある、(3)設計変数を連続値のまま扱うことができる、などの特徴がある。

制約条件については、ペナルティ関数法によって目的関数に含めて考慮することとした。

5. 数値計算例

5・1 設計対象 図3に設計対象とした油圧回路⁽¹³⁾を示す。

図3の系の定常状態での運動方程式と連続の式は、

$$Q_s = c_0 A_0 \sqrt{\frac{2P_1}{\rho}} + \frac{V_1}{\kappa} \dot{P}_1 + D_m \omega + A \dot{x} \quad \text{..... (6)}$$

$$J \dot{\omega} = D_m (P_1 - P_2) + T_p - T_f \quad \text{..... (7)}$$

$$T_f = c_g (P_1 + P_2) + c_m \omega \quad \text{..... (8)}$$

$$C_e \dot{x} + k(x + X_s) = A P_1 - c_0 \pi D \sin(2\theta) x P_2 \quad \text{..... (9)}$$

$$D_m \omega = c_0 D \sin(\theta) x \sqrt{\frac{2P_2}{\rho}} + \frac{V_2}{\kappa} \dot{P}_2 \quad \text{..... (10)}$$

と、表される。ここで、各変数は以下の意味を持つ。

A : スプール断面積

A_0 : オリフィス断面積

c_0 : 流量係数

c_m : モータ粘性係数

C_e : スプール粘抗係数

c_g : 出入口圧力比例のトルク損失係数

D : スプール直径

D_m : モータ1 [rad] 当たりの理論吐出し量

J : 慣性モーメント

k : スプールばね定数

P_1 : 配管1の圧力

P_2 : 配管2の圧力

T_p : モータ方向負荷トルク

Fig. 4 Responses and error of a system

V_1 : 配管 1 の体積

V_2 : 配管 2 の体積

x : スプール変位

X_s : バネ初期たわみ量

Q_s : ポンプ出口流量

Q_v : オリフィス通過流量

ω : モータ回転角速度

θ : スプールテーパ角

κ : 油体積弾性率

μ : 油の粘性係数

ρ : 油の密度

上記の式を整理することによって、このシステムは、状態量が x , ω , P_1 , P_2 の 4 自由度の非線形方程式で表される。

5.2 問題設定 本システムに対する設計目標は、定常状態からの Q_s のステップ入力に対する ω の応答波形を目標波形に近づけること、とした。そこで、目的関数は、応答波形と目標波形の誤差の自乗和としている。今回は、ステップ入力から 0.08 sec で定常値に達する応答を目標波形とした。図 4 に、応答波形、目標波形、および誤差の関係を示す。

最小化プレイヤーの設計変数としては、 k , C_e , θ および A_0 の 4 個を用い、各々に上下限を設定した。最大化プレイヤーの設計変数となる設計変数の変動は、 k と C_e の 2 つに存在するとし、変動幅 (Δk , ΔC_e) をノミナル点に対する割合で設定した。したがって、ノミナル点での値を $\bar{k}$, $\bar{C}_e$ とすると、実際設計変数が取りうる範囲は、

$$\begin{aligned} (1.0 - \Delta k) \times \bar{k} \leq k \leq (1.0 + \Delta k) \times \bar{k} \\ (1.0 - \Delta C_e) \times \bar{C}_e \leq C_e \leq (1.0 + \Delta C_e) \times \bar{C}_e \quad \cdots (11) \end{aligned}$$

となる。表 2 と表 3 に、最小化プレイヤーと最大化プレイヤーの設計変数の上下限値を示す。

定常状態での x , P_1 , ω に設定されている制約条件を以下に示す。各記号の ()₀ は定常状態での状態量であることを表している。

$$\begin{aligned} (x)_0 &\leq 6.00 \times 10^{-3} \\ (P_1)_0 &\leq 9.80 \times 10^5 \quad \cdots \cdots \cdots (12) \end{aligned}$$

Table 2 Bounds of minimizer design variables

Design variable	Upper bound	Lower bound
k [N/m]	2.84×10^4	7.84×10^3
C_e [N/(m/sec)]	2.94×10^5	4.90×10^4
A_0 [m ²]	4.00×10^{-6}	5.00×10^{-7}
θ [deg]	8.00	1.00

Table 3 Bounds of maximizer design variables

Design variable	Upper bound	Lower bound
Δk	0.15	-0.15
ΔC_e	0.15	-0.15

Table 4 Parameters of this system

A [m ²]	3.14×10^{-4}	Q_s [m ³ /sec]	1.80×10^{-3}
c_0	0.70	T_p [Nm]	3.00×10^1
c_m [N]	4.90	V_1 [m ³]	1.00×10^{-3}
c_g [m ³]	1.00×10^{-6}	V_2 [m ³]	1.00×10^{-5}
D [m]	2.00×10^{-2}	X_s [m]	5.00×10^{-3}
D_m [m ³ /rad]	1.19×10^{-6}	κ [N/m ²]	1.37×10^9
J [kgm ²]	9.80×10^{-2}	ρ [kg/m ³]	8.60×10^3

Fig. 5 Iteration history of fuzzy number μ_1 , μ_2

$$(\omega) \leq 1.44 \times 10^3$$

満足度を表すファジィ関数は次のように設定した。まず、ノミナル性能についての満足度 μ_1 は、得られた目的関数値を、変動を無視した設計で得られる最小目的関数値で割った値を対象とした。その値が 1 の場合の満足度を 1、4 の場合の満足度を 0 とし、間には線形補間した。また、最悪性能に関する最大性能劣化率の満足度 μ_2 は、その値が 0 の時の満足度を 1、3 の場合の満足度を 0 とし、同様に線形補間している。

その他のシステムのパラメータを、表 4 に示す。

5.3 minimax 問題に従来法を適用した場合 図 5 に、minimax 問題の解法に参照群を利用しない従来法を用いた場合の満足度 μ_1 , μ_2 の履歴を示す。横軸はイタレーション回数、縦軸は満足度を示している。

Fig. 6 Iteration history of C_e Fig. 9 Iteration history of C_e Fig. 7 Iteration history of ΔC_e Fig. 10 Iteration history of ΔC_e Fig. 8 Iteration history of fuzzy number μ_1, μ_2 Fig. 11 Comparison of μ of two systems

イタレーション回数0が初期状態で、奇数番目が満足度最大化過程、偶数番目が最悪性能探索過程の結果である。

図5より、従来法では、奇数回目の満足度最大化過程では満足度($\mu_1 \div 0.95$)が向上しているが、必ずその次の最悪性能探索過程で満足度が減少($\mu_1 = 0.6 \sim 0.7$)し、解が振動していることが分かる。

満足度最大化過程の設計変数の1つである C_e の履歴を図6に、最悪性能探索過程の設計変数の1つである ΔC_e の履歴を図7に、それぞれ示す。

満足度最大化過程で満足度を向上させるたびに、最悪性能探索過程で ΔC_e がその大きな動作範囲を利用して満足度を低下させ、 C_e がその変化に振り回されている状況が、図6, 7から分かる。このとき、最悪性

能探索過程の設計変数($\Delta k, \Delta C_e$)は、 $(-0.15, 0.15)$ と $(0.15, -0.15)$ の2つの組で振動している。

この手法では、この振動が続くだけで収束した解を得ることはできなかった。

5.4 minimax問題に提案手法を適用した場合

図8にminimax問題の解法に本稿での提案手法を用いた場合の満足度の履歴を、図9にその時の C_e の履歴を、図10に ΔC_e の履歴を、それぞれ示す。

この解析では、従来手法と比較するために参照群の初期個数は1個とし、参照群の最大個数は3個に設定した。

図5と比較すると、最初は同じように満足度の値が振動しているが、図8では途中で振動が収束(微妙な

改善はあり)し、解が得られていることが分かる。この結果は、本稿で提案した参照群を利用する手法が、鞍点解の無い minimax 問題の解法として有効であることを示している。

イタレーション初期では、参照群内の最悪変動に関するデータが不十分であるため、最悪性能探索過程で新たな最悪変動が探索されて、参照群の更新と満足度の改善が行われている。しかし、イタレーションが進み参照群が充実すると、最悪変動となる設計変数は参照群内部に存在するようになり、最悪性能探索過程での改善による解の振動が収まっている。このことは、図 9, 10 に示された設計変数の履歴からも分かる。このとき、参照群には、初期値である $(\Delta k, \Delta C_e) = (0, 0)$ と、従来手法で交互に現れた $(-0.15, 0.15)$ と $(0.15, -0.15)$ が存在し、後者 2 つでの満足度はほぼ等しくなっていた。

本稿の提案手法で得られたシステム(システム 1)の満足度と、ノミナル性能のみに注目して最適化を行ったシステム(システム 2)の満足度との比較を図 11 に示す。

図 11 より、ノミナル性能のみに着目したシステム 2 では、ノミナル性能は優れているが、変動によって大きく満足度が低下していることが分かる。提案手法で得られたシステム 1 では、ノミナル性能の満足度はシステム 1 に劣るが、最悪性能劣化率での満足度の低下が無く、全体として満足度がシステム 2 より大きくなっている。

以上のことから、多目的最適化問題として扱った本稿の手法は、より満足度の高い設計を得る手法として有用であることが示された。

6. 結 言

本稿では、設計変数に不確定変動が存在する設計問題に対して、

(1) 問題を、ノミナル性能と最大性能劣化率の改善を行う多目的最適化問題と定義し、ファジィ決定法で最小満足度の最大化を行う。

(2) 最悪性能探索問題を、システムの設計変数と設計変数の変動との間の 2 人ゼロ和ゲームの minimax 問題に変換する。

という、設計手法を提案した。また、minimax 問題については、鞍点解の無い場合に対しても minimax 解を得るために、繰返しを用いる従来手法に参照群という考えを導入した手法を提案した。そして、応答性の改善を目的とする油圧回路の設計問題を例として、提案手法による解析を行い、その効果を示した。

今回は設計変数に不確定変動が存在する問題を扱ったが、本稿で提案した参照群を用いた minimax 問題に対する解法は、設計変数でないシステムの内部変数や設計者がコントロールすることができないシステムの入力や外乱に不確定変動が存在する問題に対しても、適用することができると考える。

文 献

- (1) Miura, H. and Neill, D. J., Survey: Applications of Structural Optimization Methods to Fixed Wing Aircraft and Spacecraft, *AIAA-92-4726-CP* (1992), 1-25.
- (2) Rao, S. S., Sundararaju, K., Balakrishna, C. and Prakash, B. G., Multiobjective Insensitive Design of Structures, *Comput. Struct.*, **45**-2(1992), 349-359.
- (3) 廣安知之・岡洋介・木村光宏・山川宏, ロバスト構造に関する研究, 機論, **62**-594, A(1996), 482-487.
- (4) Wei, C., Allen, J. K., Tsui, K.-L. and Mistree, F., A Procedure for Robust Design (Minimizing Variations caused by Noise Factors and Control Factors, *Trans. ASME, J. Mech. Des.*, **118**-4(1996), 478-485.
- (5) Chao, L.-P., Multiobjective Optimization Design Methodology for Incorporating Manufacturing Uncertainties in Advanced Composite Structures, *Eng. Optim.*, **25**-4(1996), 309-323.
- (6) 室津義定・邵曉文・渡辺愛, 機論, **62**-593, A(1996), 280-286.
- (7) 中西真悟・中易秀敏, 機論, **62**-604, A(1996), 2823-2830.
- (8) 浦原信治・鈴木真二, 機論, **61**-587, C(1995), 2741-2745.
- (9) 河辺徹・片山徹, 一般化 ISE を評価規範としたロバスト I-PD コントローラの Minimax 最適化による設計, 計測自動制御学会論文集, **32**-8(1996), 1226-1233.
- (10) 志水清孝, 多目的と競争の理論, (1982), 229, 共立出版.
- (11) 坂和正敏, 線形システムの最適化, (1984), 185, 森北出版.
- (12) Hu, N., *Int. J. Numer. Methods Eng.*, **35**, (1992), 1055-1070.
- (13) 宮川新平, 機論, **44**-380(1978), 1321-1328.