進化的アルゴリズムとクラスタリングに基づく 多次元デザインウィンドウ自動探索法*

(光メモリ用マイクロ静電アクチュエータ設計への適用)

石原大輔^{*1}, 鄭珉仲^{*2}, 吉村 忍^{*3}
矢川元基^{*4}, 小森谷 均^{*5}, 金 永 鎮^{*2}

Automated Search for Multidimensional Design Windows Using Continuous Evolutionary Algorithms and Improved K-means Clustering

(It's Application to Shape Design of Micro Electrostatic Actuator
for Optical Memory)

Daisuke ISHIHARA, Min Joong JEONG, Shinobu YOSHIMURA^{*6},
Genki YAGAWA, Hitoshi KOMORIYA and Young Jin KIM

^{*6} University of Tokyo, Dept. of Quantum Engineering and System Science,
7-3-1 Hongo, Bunkyo, Tokyo, 113-8656 Japan

This paper proposes an automated search method for multidimensional design window (DW), which is defined as an area of satisfactory design solutions in a design parameter space, using both continuous evolutionary algorithms (CEA) and improved K-means clustering. This method consists of two phases: (a) CEA-based search for satisfactory design solutions in an ill-structured design space, and (b) clustering-based identification of DWs from the solutions. To demonstrate practical performance of the method, it is applied to an automated structural design of micro electrostatic actuator for optical memory.

Key Words: Computer Aided Design, Finite Element Method, Micromachine, Design Window, Evolutionary Algorithm, Clustering

1. 緒 言

近年, 計算機の発展に伴い, 有限要素法等の計算力学手法と最適化手法を組合せて実用構造機器の最適設計を行うことが可能になってきた⁽¹⁾. 最適設計においては, 制約条件と目的関数を数理的に定義した上で, その設計問題に対する一つの最適解を得る⁽¹⁾⁽²⁾. 一方, 工学の現場に現れる設計問題においては, 数理的に定式化できる設計制約条件や目的関数に加えて, 例えば, 加工性のよさのように, 数理的に定義しにくい制約条件も存在する. このような設計問題においては, 数理的に定義した設計問題に対して唯一の最適解を求めることよりも, 定義された設計問題を満足設計問題として解いてすべての満足解を求め, それを設計者に提示するほうがより有用であると考えられる. この場合には, 提示された満足設計解の中から, 残りの制約条件

を加味して最終的な設計解を選択することができる.

従来の満足化設計においても, 満足設計解を一つ見つける手法はいくつか提案されているが, 満足解の存在領域として定義されるデザインウィンドウ (Design Window; 以下, DW と略す) を効率的に導出する手法や DW に基づく体系的な設計法に関する研究例はまだ少ない.

例えば, 文献(3)の研究では, 低次元の設計空間中で少数の探索点に基づいて試行錯誤的に DW の導出している. この方法では高次元 DW の導出は困難である. また DW の概要が経験的に判断できる場合のみ適用可能である.

文献(4)の研究では, 設計対象の簡易モデルに対して作成した設計変数-設計特性量間の陽関数を用いて DW を導出している. この方法は設計対象が単純な構造に限られ, はん用性に乏しい.

文献(5)の研究では, 単連結, 有界, 凸形の DW に対して, 二つの評価量によって張られる二次元平面への DW の正射影の境界線探索法が研究されているにすぎない.

著者らは, これまで DW の探索法と DW を利用した体系的な構造設計法の研究を行ってきた⁽⁶⁾⁽⁷⁾. その中で DW の探索法として, 全領域探索法, 境界膨張

* 原稿受付 2000年8月2日.

^{*1} 東京大学大学院工学系研究科 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1).

^{*2} 成均館大学校工科大学院機械工学部 (300 Ch' onch' on-dong, Jangangu, Suwon, Kyonggi-do 440-746, Korea).

^{*3} 正員, 東京大学大学院新領域創成科学研究科.

^{*4} 正員, 東京大学大学院工学研究科.

^{*5} 富士通研究所 (〒243-0197 厚木市森ノ里宮10-1).

E-mail: ishihara@garlic.q.t.u-tokyo.ac.jp

法, 境界追跡法を提案した。さらに, 探索時間を低減するため, 設計変数-設計特性値の関係を, 階層形ニューラルネットワーク (Neural Network: 以下, NN と略す) に写像し (一種の応答曲面), それを用いて全領域探索によって DW を探索する方法を提案した。

このような近似式を構築したのちに DW を探索する手法は計算時間という点で確かに有用ではあるものの, 元の設計変数-設計特性値の关系到多価性や非連続性などがある場合には, 近似関数の導入によって大きな誤差が混入してしまい, 結果的に重要な DW を見落とす可能性も高い。

本研究では, 多峰性や多価性, 非連続性などの存在する悪構造の設計問題においても, ロバストに全設計空間から満足解を探し出し, 得られた満足解の集合を分析することにより DW を導出する, 新しい多次元 DW 導出法を開発した。本 DW 探索法を, 著者らが開発中の複合領域を考慮した統合形 CAE システム^{(8)~(11)}に組み込み, 高密度光メモリ用マイクロ静電アクチュエータの構造設計に適用し, その実用性を検証した。

2. デザインウィンドウ探索法

2.1 満足設計解の探索 目的関数や制約条件が非線形, 不連続であったり, 多峰性がある悪構造の設計問題において, 設計空間内の情報を万遍なく得るための最もロバストな方法は, 前報⁽⁶⁾⁽⁷⁾で述べたように設計空間中に等間隔に格子点を発生させ, そのすべてを探索点とし, その各点において目的関数や制約条件を評価する, 全領域探索法であろう。しかしながら, そのような単純な選点法では, 設計変数が増えるに従って必要となる探索点数が指数関数的に増大し, とても現実的ではない。全領域探索のよさを保持しつつ探索の効率化を図るためには, 遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithms: GAs) が有効である。しかし, 単純 GAs では, 連続空間探索問題に適用すると実数空間と 2 進数空間の間に coding/decoding のプロセスが介在し, 非効率である。そこで, 本研究では, 古川らによって提案された連続空間探索用進化的アルゴリズム (CEA)⁽¹²⁾を採用することとした。CEA の詳細および従来の GAs と比べた定量的な特性については, 文献⁽¹²⁾に譲り, CEA に基づく満足解探索の基本原理のみを以下にまとめる。

(a) 第 1 世代では, 設計許容空間内に確率的に初期探索点群 (初期人口) を発生させる。人口を構成する各個体は, 実数 (設計変数) の組である。

(b) 第 2 世代以降は, 各探索点の適応度関数の評

価に基づいて選択, 淘汰, 交差, 突然変異の各手続きにより, 新しい探索点を発生させる。CEA では, 交差と突然変異は同一の操作すなわち, 正規分布に従う確率密度関数を重み係数とした加算, によって実現する。後述するように, 適応度関数の評価には, 具体的に三次元有限要素 (FE) 解析が行われる。

なお, CEA は GAs の特徴を引き継いでいるために, 多峰性の問題に対して比較的ロバストな手法であるが, それでも時折, 進化が停滞する。そこで, 本研究では, オリジナルの CEA に対して次の工夫を施した。つまり, 適応度関数の値があまり変化しなくなったならば, その原因が CEA の多様性喪失であると仮定し, その時点で得られている最良解を基に, 初期化を行い, 進化を再開する。すなわち, 次式に従って期待値 0, 分散 Γ の初期母集団を発生させ, 初期化する。

$$x_i^n = (1 + \mu)x_i^b, \dots \dots \dots (1)$$

ここで, x_i^b は初期化直前に得られている最良解がもつ i 番めの設計変数, x_i^n は初期母集団に属する全個体中の中で n 番めの個体がもつ i 番めの設計変数, μ は期待値 0, 分散 Γ の正規分布に従う確率変数を表す。この手続きを数回繰返しても適応度関数の値が向上しない場合には, そこで探索を終了する。探索終了時に, もし満足解が見つかっていないならば, 本設計問題においては満足解が存在しないと判定する。

2.2 DW の同定

(1) 基本的考え方 悪構造の設計問題においては, DW は複雑な内部構造を有する可能性がある。一般に DW は一つとは限らず, 大きさがさまざまな複数の DW から構成される可能性がある。さらに, 内部に設計不成立領域を有する DW まで存在するかもしれない。また, 設計変数が 3 個以下の設計問題では, 2.1 節で述べたプロセスによって得られた DW を直接可視化することで, その内部構造を直感的に理解できるが, 設計変数が 4 個以上の場合, DW の内部構造を理解するのに十分な視覚化手法は存在しない⁽¹³⁾。

そこで, 本研究では, 2.1 節で得られた多次元空間の満足設計解の集合に対してクラスタリング手法を適用することにより, DW の個数やその位置, サイズなどの定量的な情報を自動的に抽出することとした。

(2) 偏差度に基づく改良形 K-平均法 クラスタリング手法はデータ集合の客観的な自動分類手法であり, データ集合をクラスと呼ばれるサブセットに分類する。これまでパターン認識, 画像処理やマーケティング調査等に應用されてきた⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾。K-平均法は代表的なクラスタリング法の一つであり, これを基礎としてさまざまなクラスタリング手法が提案されてい

る。K-平均法および過去の改良版の多くは、クラスタ数があらかじめ既知であることを前提としている。しかしながら、一般の設計問題においては、クラスタ数、すなわちDWの数未知である。パターン認識⁽¹⁶⁾やある種の数学モデル⁽¹⁷⁾等に対しては、最適なクラスタ数を同定する方法が提案されている。しかしながら、いずれの研究においても、各クラスタごとに、その半径で定義されるクラスタ定数⁽¹⁶⁾やそのデータ数の推定であるクラスタ長⁽¹⁷⁾といった何らかの外的基準を導入して、最適なクラスタ数を同定している。一般にDWを構成するデータ集合は高次元であり、しかも複雑な構造を持つことも予想され、上述のようなクラスタ数、クラスタ定数、クラスタ長等の外的基準を事前に同定することは困難である。

そこで本研究では、クラスタリングの対象となるデータに対する外的基準が全く必要ない改良形K-平均法を新たに開発した。以下にそのアルゴリズムを示す。

クラスタリングの対象となる個体を $x_i = \{x_i^1, \dots, x_i^m\}$ ($i=1, \dots, n$, n : 個体数, m : 設計空間の次元) とする。

Step 1 クラスタ $C^{(k)}$ ($k=1, \dots, K$) の中心 $m^{(k)}$ をランダムに与える。まずクラスタ数 K の初期値を2とする。

Step 2 各個体 x_i について、すべてのクラスタ中心 $m^{(k)}$ との距離 $D(m^{(k)}, x_i)$ を計算する。ここで距離 $D(m^{(k)}, x_i)$ は通常のエウクリッド距離で定義する。

Step 3 各個体 x_i を、距離 $D(m^{(k)}, x_i)$ が最小となるクラスタ $C^{(k)}$ に割当てする。

Step 4 クラスタ $C^{(k)}$ ごとに、それに属する個体 x_i とクラスタ中心の距離 $D(m^{(k)}, x_i)$ の総和 $e^{(k)}$ を計算する。ここで $e^{(k)}$ はクラスタ内偏差平方和である。さらに全クラスタの $e^{(k)}$ の総和 E_q を計算する。ここで q は繰返し数を表す。

Step 5 Step 4 で得られた各クラスタの成分 x_i の重心を計算して、それを新しいクラスタ中心 $m^{(k)}$ とする。

E_q が最小化されるまで Step 1 から Step 5 を繰返す。本研究では、最適なクラスタ数を外的基準なしに判定するため、 E_q の最小値で定義される偏差レベルを導入する。

Step 6 初期クラスタ中心 $m^{(k)}$ をランダムに変えて、Step 1-Step 5 を繰返す。これを δ 回繰返す。 δ は経験的に決めているが、通常2-4回程度で十分である。

Step 7 E_q が δ 回同じ偏差レベルに収束するとき、その K を最適なクラスタ数と判定する。そうでない

場合、 $K=K+1$ として、Step 1 に戻る。

3. 統合化 CAE システムへの実装

2章で述べた多次元DW探索手法を、著者らが開発中の複合領域を考慮した統合形CAEシステム⁽⁸⁾⁻⁽¹¹⁾に実装した。具体的に、CAEのプロセス中の適応度関数の評価には、複合領域を考慮した自動FE解析モジュールが利用される。CEAの探索がすべて終了した後に、得られた満足設計解の集合に対して、改良形K-平均法が適用される。本CAEシステムの統合化法の詳細は、文献(11)に詳しいので省略するが、オブジェクト指向とモバイル・エージェント技術を用いて、FE解析コードや最適化エンジンを含む多数のモジュールが並列分散環境上にゆるやかに統合化されている点に特徴がある。その結果、新たに解析モジュールを追加したり、今回の研究のように新しい最適化エンジンを追加するなどの作業が比較的容易に行えるようになっていく。

4. 高密度光メモリ用マイクロ静電アクチュエータへの適用

多次元DW探索機能を実装した統合化CAEシステムを、著者らが参加している研究プロジェクト⁽¹⁸⁾において開発中の高密度光メモリ用マイクロ静電アクチュエータの構造設計に適用し、本DW探索法の性能を検証した。

4.1 動作原理 本アクチュエータは、次世代形高密度光メモリ上のデータを読み書きするレンズを搭載して、数ナノメートルオーダの微細位置制御を行うためのマイクロマシンである。レンズ以外の部分はシリコン微細加工プロセスにより一体加工される。その概略を図1に示す。本アクチュエータでは、本体がレンズ付近に存在する四つの支持ばりによって周囲の枠構造(フレーム)に支えられており、支持ばりの外側に存在するくし歯列(固定くし歯と可動くし歯)に作用する静電気力により、可動くし歯がその垂直方向(y 方

Fig.1 Micromachine for optical memory

向)に平行移動し、その結果レンズが y 方向に移動する。

4・2 設計要求 本アクチュエータには、以下のようなさまざまな設計要求が課される。

レンズの可動範囲および位置分解能に関して、(a) 最大静電気力が可動くし歯部分に静的に作用するときのレンズ中心の y 方向変位 $y_{\max}$ がある値以上であること、(b) 最小静電気力が可動くし歯部分に静的に作用するときの y 方向変位 $y_{\min}$ がある値以下であること。

強度に関して、(c) 最大静電気力が作用するときに発生する相当応力の最大値 $\sigma_{\max}$ が、シリコンの破断応力 σ_r より十分小さいこと。

光ディスクの偏心や外乱に対するレンズの追従性に関して、(d) 立ち上がり加速度 a_{target} がある値以上であること。

フィードバック制御に関して、(e) 立ち上がり時間 t_{raise} がある値以下であること。

製造上の制約に関して、(f) くし歯間のアスペクト比 h_n/b_3 がある値以上であること。ここで h_n は狭いほうのくし歯間ギャップ、 b_3 はくし歯の厚さである。

本設計問題は、基本的に上記に掲げた(a)～(f)の6種類の設計要求を満たす解を見出すという、満足化設計問題として定式化することができる。なお、上述の設計要求のうち、(a)～(d)に関しては、可動くし歯に静電気力を模した y 方向単位分布荷重を負荷した三次元静応力解析を行う。設計要求(e)に関しては、可動くし歯へ y 方向単位ステップ分布荷重を負荷した三次元動的応答解析を行う。また後述するようにこの動解析においては、空気の影響を付加質量、付加粘性として考慮する。

4・3 幾何モデル 本システムにおいては、パラメトリック表現された三次元幾何モデルから自動的にFE解析のための三次元メッシュモデルを生成できる。設計プロセスにおける設計変数の変更操作は、こ

Fig. 2 Typical mesh

の三次元幾何モデルに対して行われる。本設計問題においては、図1に示されるマイクロ静電アクチュエータのなかで、周辺のフレームを除いた部分を設計対象とし、幾何モデルを作成した。レンズ部分は簡単のため正六角柱で近似した。図2に本設計問題で用いた典型的なメッシュ(対称性を考慮した1/2モデル、四面体二次要素、総節点数約5000)例を示す。

4・4 空気効果の考慮

(1) 基本的な考え方 本アクチュエータ全体の大きさは1mm程度であるが、荷重発生部位でありかつ最小構成部品でもあるくし歯の幅やくし歯間隔は数 μm 程度である。この部位ではレイノルズ数 $Re \sim 10^{-3}$ (代表長さ $\sim 10^{-6}\text{m}$, 代表速度 $\sim 10^{-2}\text{m/s}$, 空気(1気圧20°C)の動粘性係数 $\sim 10^{-5}\text{m}^2/\text{s}$)であることから、アクチュエータの動特性評価において空気の粘性効果を無視できない。なお、この部位ではクヌーセン数 $Kn \sim 10^{-2}$ (代表長さ $\sim 10^{-6}\text{m}$, 空気(1気圧20°C)の平均自由行程 $\lambda \sim 10^{-8}\text{m}$ ⁽¹⁹⁾)であるため、くし歯まわりの空気の流れを通常の粘性流体^{(20)～(22)}として取扱うことができる。

空気の影響の評価にあたっては、本研究では、第1次近似として、次に述べる簡易評価法を採用することとした。

(2) 空気効果の簡易評価 アクチュエータの動作機構全体に関する定性的な考察から、空気の影響が顕著に現れる部分はくし歯列とレンズと判断した。

くし歯列が空気から受ける効果に関しては、くし歯列を柱列でモデル化し、文献(23)を参考にして、付加粘性および付加質量に対する次式を導出した。

h_w : wide gap between fixed comb tooth and movable comb tooth,
 h_n : narrow gap between fixed comb tooth and movable comb tooth.

Fig. 3 Shape parameters of the basic design

Table 1 Material properties

Silicon [110]	Air (20°C)
Mass Density (kg/m ³) : 2328	Mass Density (kg/m ³) : 1.205
Young's modules (GPa): 170	Kinematic Viscosity(kg/m ³) : 15.01*10 ⁻³
Poisson's ratio: 0.2	Re: 1.0
Yield stress (GPa): 2.0	

Table 2 Design characters and their restriction

$$\begin{aligned}
 y_1 &= y_{\max} / Y_{\max} > 1, \\
 y_2 &= y_{\min} / Y_{\min} < 1, \\
 y_3 &= s \sigma_{\max} / \sigma_y < 1, \\
 y_4 &= a / A > 1, \\
 y_5 &= t_{\text{raise}} / T_{\text{raise}} < 1.
 \end{aligned}$$

$y_{\max}$: max disp. of lens center in y direc., $Y_{\max}$: required max disp.,
 $y_{\min}$: min disp. of lens center in y direc., $Y_{\min}$: required min disp.,
 $\sigma_{\max}$: max mean stress in structure, σ_y : yield stress of structure,
 s : safety factor,
 a : accel. of lens center in y direction, A : required accel..

付加質量密度:

$$M' = \{\rho_{\text{Air}} l_z^2 / (12 l_y)\} (1/h_{u0} + 1/h_{l0}), \dots\dots\dots (3)$$

単位表面積当たりの付加粘性係数:

$$C' = (\rho_{\text{Air}} l_z^2 \beta / 12) (1/h_{u0}^3 + 1/h_{l0}^3), \dots\dots\dots (4)$$

ここで,

ρ_{Air} : 空気密度

l_z : くし歯の z 方向長さ

l_y : くし歯の y 方向長さ

h_{u0} : 長いくし歯間距離の初期位相

h_{l0} : 短いくし歯間距離の初期位相

β : $\beta = 12\mu/\rho_{\text{Air}}$

μ : 空気の粘性係数

である.

一方、レンズは円柱でモデル化した。ただし、円柱モデルに対して付加質量、付加粘性を導出した文献は見当たらなかったため、次式の流体抵抗 F' を用いて流体の影響を考慮する⁽²⁴⁾。

$$F' = C_s v^2, \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 v は一様流速、抵抗係数 C_s は、

$$C_s = 0.5 \rho_{\text{Air}} d C_D, \dots\dots\dots (6)$$

である。ただし、 $C_D = 8\pi / (Re \cdot S)$, $S = 0.5 - \gamma - \ln(Re/8)$, $\gamma = 0.57721$, d : レンズの直径、である。

なお、式(3)、(4)は、(a)くし歯間の z 方向流れが卓越する、(b)空気の初期状態は静止流体である、(c)くし歯の y 方向変位がくし歯間距離に比べて十分小さい、という仮定に基づいており、さらに式(6)は(d) $Re \leq 1$ 、という仮定に基づいているので、その適

Fig. 4 Transition of objective function

用範囲に注意を要する。(a)に関しては、今後、実験または詳細な構造-流体連成解析による検証が必要である。(b)についてはハードウェア製作グループとの議論の中でおおよそ満たされることを確認した。(c)については、設計要求(a)が満たされる場合、くし歯の最大移動距離がくし歯間距離の数十%に達するため、十分満たされるとはいえない。場合によっては詳細な構造-流体連成解析が必要となるが、それについては今後の研究に譲るものとする。(d)に関しては、すでにレイノルズ数 Re について考察したとおり、十分満足される。

4.5 設計変数および物性値 設計変数については、アクチュエータの運動に関する定性的な考察から、感度が高いと思われる支持ばりの x , y , z 方向長さ b_1 , b_2 , b_3 、くし歯の x 方向長さ m_1 、広いくし歯間距離 h_w の計五つを選んだ。解析に用いるシリコンの物性値(単結晶シリコン)、空気の物性値(1気圧 20°C)の値を表1に示す。

4.6 予備的解析 図3に著者らのうちハードウェア製作グループが提案した基本設計(図1)を参考に設定した各部寸法を示す。この基本設計モデルを用いて、空気の影響を簡易解析した。解析条件として図2において支持ばりの一端を固定し、くし歯に総和1Nの y 方向分布荷重をステップ状に与えた。解析結果からレンズ中心の y 方向変位の時刻歴応答を得た。空気の影響を考慮しなかった場合、きれいな正弦波状の振動が得られた。これに対し、空気の影響を考慮した場合、付加質量効果による振動周期の遅延(約15%)と付加粘性効果による振幅の減衰(1周期あたり約14%)が明確に現れた。この予備解析結果から、本設計問題において空気の影響を考慮することが必要不可欠であることが確認された。

4.7 設計満足度の評価 文献(12)に習い、4.3節で述べた5個の設計要求を満たす満足設計解を導出するにあたって、次のように設計問題を設定する。

まず、設計要求(a)~(e)を5種類の設計特性量

Fig. 5 Variational levels for Results

$y_1, \dots, y_5$ とそれに対する制約条件という数学的表現に書き換える。表 2 にその結果を示す。ただし、寸法比に関する (f) の設計要求は、設計変数に対する制約条件とした。次に各設計要求の評価尺度を揃えるために、満足度関数 $\phi_i (i=1\sim 5)$ を定義した。各関数は 10 点満点形式とし、対応する設計要求が満足であるとき 5 点以上となるように設定した。満足度関数の詳細は文献(12)に譲る。以上の準備を整えた上で、次の目的関数を設定する。

$$\phi(x_1, \dots, x_5) = \min \{\phi_1, \dots, \phi_5\} \rightarrow \max \dots (7)$$

結局、本設計問題は、 $\phi \geq 5$ となる満足解(の集合)を求める満足設計問題として定式化される。

5. 設計結果および考察

5.1 満足設計解の探索 図 3 に示す基本設計の

Fig. 6 Comparison of shapes among the basic design and four designs

Table 3 Comparisons of design parameters, design characters, satisfaction functions among an initial design and the obtained design solutions.

tained design solutions.															
One of initial designs															
	Design parameters[mm]					Design characters					Satisfaction function values				
	b ₁	b ₂	k ₂	k ₃	m ₁	y ₁	y ₂	y ₃	y ₄	y ₅	Φ ₁	Φ ₂	Φ ₃	Φ ₄	Φ ₅
	0.20	0.015	0.285	0.10	0.30	0.01517	0.00303	0.04891	-273.7	0.1350	0.07584	10.00	10.00	0.0000	10.00
Means of clusters															
Cluster center	Design parameters[mm]					Design characters					Satisfaction function values				
	b ₁	b ₂	k ₂	k ₃	m ₁	y ₁	y ₂	y ₃	y ₄	y ₅	Φ ₁	Φ ₂	Φ ₃	Φ ₄	Φ ₅
Type1	0.7067	0.0180	0.3328	0.0556	0.8113	1.144	0.2287	0.4296	16.86	0.9223	6.436	10.00	10.00	10.00	5.777
Type2	0.7681	0.0189	0.3264	0.0557	0.6845	1.055	0.2109	0.3315	13.81	0.9648	5.548	10.00	10.00	10.00	5.352
Type3	0.6401	0.0169	0.3162	0.0507	0.9147	1.170	0.2337	0.4931	17.69	0.9120	6.689	10.00	10.00	10.00	5.880
Type4	0.8660	0.0230	0.3089	0.0527	0.9313	1.163	0.2325	0.3727	18.34	0.8961	6.629	10.00	10.00	10.00	6.039
Best design using conventional optimization method															
	Design parameters[mm]					Design characters					Satisfaction function values				
	b ₁	b ₂	k ₂	k ₃	m ₁	y ₁	y ₂	y ₃	y ₄	y ₅	Φ ₁	Φ ₂	Φ ₃	Φ ₄	Φ ₅
	0.6824	0.0179	0.3565	0.0593	0.9461	1.232	0.2464	0.4683	21.16	0.8649	7.325	10.00	10.00	10.00	6.351

寸法を基に, CEA における進化の第 1 世代(個体数 200)を発生させた. 満足設計解集合の探索から DW の分析までに, 25 台の PC クラスタ(ICPU: Pentium 133 MHz)を用いて 2 日程度を要した. 設計時間の 80%以上は CEA による満足解の探索に費やされた. CEA のプロセスにおける目的関数 ϕ の推移を図 4 に示す. 同図より, 25 世代で ϕ は 5 を超え, それ以降に満足解が得られはじめていることがわかる.

5・2 満足設計解の分析 全 40 世代で合計 16 000 個の点を探索した結果, 合計 179 個の満足設計解($\phi \geq 5$)が得られた. そのうち ϕ 値の最高点は 6.351 点であった. ϕ の最高点を与える解を従来の最良解と呼ぶ. 通常の設計最適化の考え方に従えば, ϕ の最高点を与える従来の最良解を最終設計解として選択すべきであろう. しかし, 本設計問題の本来の目的からすれば 179 個の満足解すべてが解候補であり, その中には, 極めて類似した解から, 傾向の異なる解まで多様な解が含まれている可能性がある. そのような場合には, 最終解を選択するにあたって, 便宜的に設定した目的関数 ϕ のわずかな違いに基づいて採否を判定するよりも, 設計問題の定式化に組み込むことができなかったその他の判定基準も加味しながら総合的に判定するほうが, より合理的であると考えられる.

そこで, 次に 2・2 節で述べたクラスタリング手法を用いて 179 個の満足解の分析を行った. 図 5 に得られたクラスタ数と偏差レベルの関係を示す. 同図より, 本問題の場合, 最適なクラスタ数は $K=4$, すなわち満足設計解は 4 個の DW に分けられることがわかる. クラスタに含まれる設計解の数は多いほうから, それ

Fig. 7 Comparison of relative satisfaction values (Nos. 1-5 denote each satisfaction values.)

ぞれ DW 1(63), DW 2(46), DW 3(42), DW 4(28)となった. なお, 従来の最良解は DW 3 に属する.

得られた DW の利用方法はいろいろと考えられるが, 五次元の DW を可視化することも, 直接考察することも困難であるので, ここでは各 DW 1-DW 4 の中央値(クラスタ中心)に対応する満足解(Type1-4)を代表的満足解として取り出し, 従来の最良解と合せて設計解候補とする. 表 3 に基本設計解, 代表的満足解(Type 1-4), 従来の最良解の設計変数値, 設計特性値, 満足度関数値を示す. また図 6(a)に基本設計解の形状, 図 6(b)に従来の最良解の形状, 図 6(c)-(f)に代表満足解の形状を示す.

なお, 3・1 節で述べたようにトーラス状の DW も考えられるので中央値が必ずしも満足解となるとは限らない. 表 3 から得られた中央値が満足解であることがわかる. また図 6(b)に示される従来の最良解と図 6(e)に示される DW 3 の代表的満足解 Type 3 の形

状の類似性が高いことがわかる。

5.3 考察

(1) 基本設計解と設計候補の比較 すべての設計候補は、基本設計解と比較して、支持ばりおよびくし歯の x 方向長さがかなり長くなっており、 z 方向には短くなっていることがわかる。これは次のように解釈することができる。まず、支持ばりが長くなったのは、十分な稼動範囲を実現するために剛性を小さくするためと解釈できる。また、くし歯については長さが増加し、高さが減少したのは、静電気力を十分確保しつつ空気の影響(抵抗)を小さくするためであると解釈できる。

形状が大きく変化した結果、基本設計解と設計候補で設計特性値が大きく異なる。具体的には、設計特性量 y_1 – y_3 のオーダが3けた異なり、設計特性 y_1 は符号さえ異なる。したがって、本手法が非常に大域的に DW を探索できることがわかる。なお、基本設計解は設計特性量 y_2 , y_3 に関して、極端により性能を示している。これは剛性が高く、かつ静電力が小さいため、変形量が極端に小さいからである。

(2) 設計候補同士の比較 設計候補同士を相互に比較する最も簡便な方法は表3の満足度関数値を比較することである。しかしながら、この満足度関数値は DW 探索を目的として設定したので、設計候補の相互比較には適切でない場合がある。そこで新たに、設計候補の相互比較を目的として、設計特性量 y_1 – y_5 の相対的な評価尺度(相対的満足度 ϕ_1 – ϕ_5)を導入する。4.7節と異なり、各設計特性量ごとに、設計候補中、最も優れたものに10点、最も劣るものに1点を与えるように評価関数を設定する。図7に相対的満足度に関するレーダチャートを示す。

次に図7に基づき、各設計特性量について詳細に比較する。従来の最良解が設計特性量 y_1 , y_4 , y_5 が優れ、設計特性量 y_2 , y_3 が劣っていることがわかる。この原因は、くし歯を他の解候補に比べて大きくすることで静電力を大きくし、かつ支持ばりを他の解候補に比べて細く貧弱にすることで剛性を下げているためである。逆に Type 2 は設計特性量 y_2 , y_3 に優れ、設計特性量 y_1 , y_4 , y_5 に劣っていることがわかる。この原因は、くし歯を他の解に比べて小さくすることで発生する静電力を小さくしているためである。Type 4 は設計特性が平均して優れている。したがって、設計者は重視する設計特性に応じて、従来の最良解か Type 2 のいずれかを選択できる。すべての設計特性が万遍なく優れていることを重視する場合、Type 4 を選択できる。

定式化し難い設計要求のうち、製造容易性に着目すると、Type 3 は製造容易性に劣る。というのも、Type 3 は支持ばりよりくし歯長さがかなり長いので、フレーム構造として単純な長方形を採用することができず、それなりの工夫が必要であるからである。

以上を総合すると、製造容易性も含めてすべての設計特性が最もバランスよく優れている Type 4 か、特定の設計特性が特に優れている最良解と Type 2 のいずれかを状況に応じて採用すべきである。なお従来の最良解が最終設計解として採用されるとは限らない。

以上の結果に基づき、ハードウェア製作グループは Type 4 を設計解として採用することにし、チップ面積に関する制約を考慮した上で、長い支持ばりを中心に折り曲げ、二重折り畳み構造の支持ばりをもつ新しいアクチュエータ形状を提案した。

6. 結 言

連続空間探索用進化的アルゴリズム(CEA)に基づく多点探索法と偏差レベルに基づく改良形 K-平均法を組合せた多次元デザインウィンドウ(DW)の自動探索法を提案し、これを著者らが開発中の複合領域を考慮した統合形 CAE システムに実装した。これを高密度光メモリ用マイクロ静電アクチュエータの構造設計に適用した。その結果、5 設計変数および5 設計要求からなる満足化設計問題に対して179 個の満足設計解を自動的に得ることができ、それを分析した結果、4 個の DW を見つけることができた。これらに属する設計解は、傾向の異なる形状と設計特性を有しており、それらを詳細に比較検討した。その結果、製造容易性も含めてすべての設計特性が万遍なく優れている Type 4 か、特定の設計特性が特に優れた従来の最良解と Type 2 を従来とは異なる新しい最良解として選定することができた。

製造容易性も含めてすべての設計特性が万遍なく優れている Type 4 を基にして、現在、光メモリ用マイクロ静電アクチュエータの製作が進められている。

本研究を遂行するに当たり、東京大学大学院新領域創成科学研究科の坂生清教授、保坂寛教授、同寄付講座の大久保俊文助教授、および(財)光産業技術振興協会より援助と協力を得た。また、本研究の一部は通産省産業技術応用研究開発プロジェクト「ナノメーター制御光ディスクシステムの研究開発」の成果の一部であることを記し、謝意を表す。

文 献

- (1) 山川宏, 設計工学・システム部門講演会, No.99-27

- (1999), A8-A14.
- (2) 茨木俊秀・福島雅夫, 最適化の手法, (1993), 106-143, 共立出版.
- (3) Hasan, M. Z., Monde, M., Mitsutake, Y. and Islam, M. A., *Fusion Eng. & Design*, 41 (1998), 547-554.
- (4) Wang, X-M., Ye, L., Mai, Y-W. and Galea, S. C., *Smart Materials & Structures*, 9 (2000), 157-162.
- (5) 田中正夫・花原和之, 機講論, No.930-27 (1993-6), 48.
- (6) 望月義彦・吉村忍・矢川元基, 機論, 60-579, C (1994), 3649-3656.
- (7) Mochizuki, Y., Yoshimura, S. and Yagawa, G., *Advances in Eng. Software*, 28 (1997), 103-113.
- (8) Lee, J-S., Yoshimura, S., Yagawa, G. and Shibaike, N., *Sensors & Actuators*, 50A (1995), 209-221.
- (9) 李準晟・吉村忍・河合浩志・矢川元基, シミュレーション, 15-2 (1996), 121-130.
- (10) 吉村忍・古川知成・コヴァルチック, トマッシュ・矢川元基, 機論, 63-610, C (1997), 2173-2180.
- (11) 吉村忍・コヴァルチック, トマッシュ, 計算工学, 3-2 (1998), 94-101.
- (12) 古川知成・矢川元基, 機論, 61A-586 (1995), 1409-1415.
- (13) 松田聡浩, 吉村忍・矢川元基・平田隆教・西岡正夫, 機論, 64-619, C (1998), 1004-1012.
- (14) 宮本定明, クラスター分析入門, (1999), 1-26, 森北出版.
- (15) SAS インスティテュートジャパン, 江原淳・佐藤栄作, データマイニング手法 (2000), 89-124, 海文堂.
- (16) Esogbue, A. O. and Liu, B., Cluster validity for fuzzy criterion clustering, *Computer & Mathematics with Application*, 37 (1999), 95-100.
- (17) Nabba, N. and Bishop, R. H., *IEEE Trans. Systems, Man, & Cybernetics*, 29B-6 (1999), 908-912.
- (18) 例えば, <http://www.nedo.go.jp/itd/newprj/nanometa/nanometaO.html>.
- (19) 大橋秀雄, 流体力学(2), (1995), 5, コロナ社.
- (20) 大橋秀雄, 流体力学(1), (1995), 1-4, コロナ社.
- (21) 江刺正喜・藤田博之・五十嵐伊勢美・杉山進, マイクロマシーニングとマイクロメカトロニクス, (1992), 73-97, 培風館.
- (22) 巽友正, 流体力学, (1982), 1-4, 培風館.
- (23) 金子成彦, すきま流励起振動の基礎, 機学第 674 回講習会, (1988), 47-52.
- (24) 巽友正, 流体力学, (1982), 320-322, 培風館.