

磁気記録評価装置用変位拡大位置決め制御機
構の機構形状とコントローラの統合化設計*安藤 大樹^{*1}, 酒井 猛^{*2}, 大日方 五郎^{*3}Integrated Design of Structural Shape and Controller on Mechanism
of Displacement Magnification and Positioning Control
for Magnetic Recording Test StandHiroki ANDO^{*4}, Takeshi SAKAI and Goro OBINATA^{*4} Graduate School of Engineering, Nagoya University,
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, Aichi, 464-8603 Japan

This paper discusses the integrated design of structural shape and controller of high-speed positioning actuators for magnetic recording test stands. To allow highly flexible shape design of the mechanism for the positioning actuator and to improve the calculation efficiency in the structural shape optimization, this paper proposes an integrated design method in which a structural shape is defined like as a skeleton and meats and a genetic algorithm is used to search the combination of the skeleton and meats for obtaining better performance of the closed loop system in iterative design procedure. The iterative optimization procedure includes the shape and the controller updates. It is shown in design examples that the proposed integrated design method can improve the performance of the positioning actuator according to the performance indices, and the effect is verified.

Key Words: Actuator, Optimal Control, Finite Element Method, Information Processing Equipment, Integrated Design, Simultaneous Optimization, Displacement Amplifier

1. はじめに

近い将来, ハードディスクドライブ (HDD) の面記録密度は $1\text{Tbit}/\text{in}^2$ に達することが期待されている^①. そのような高密度磁気記録を支えるため, 磁気ヘッドと高密度磁気記録メディアを組み合わせた記録再生特性の測定評価を行うスピンスタンドでは, 磁気ヘッドを所定のトラック上へ高速・高精度に位置決めする技術が要求されている. この要求に対して, 現在, スピンスタンドには, 精密位置決め用のアクチュエータとして, 積層型圧電素子 (PZT) とその PZT の発生変位を拡大する変位拡大部で構成される PZT 微動アクチュエータが搭載されている^②. この変位拡大機構は, 平行リンク形状のバネに変位拡大用のテコの機構が組

み合わされており, 回転対偶として弾性変形を応用したヒンジが採用されている. 筆者らは, 文献^③において, このアクチュエータの機構形状として, 平行リンク形状の技術的問題点を解決する菱形リンク形状を提案し, 直交する二つの軸に対称な機構の有効性を示した. 菱形リンク形状機構は, 機構の対称性により低次の振動モードをキャンセルすることにより高い機械共振周波数を有し, 高速応答性に優れた機構となっている. しかしながら, この菱形リンク形状を採用した変位拡大部は, 回転対偶としてヒンジ部の弾性変形を利用したリンク形状を前提として, 機構各部の寸法が設計されており, アクチュエータの性能は初期設定した変位拡大部の骨格となるリンクの長さおよびヒンジの配置に大きく依存してしまっている. このことから, スピンスタンド用 PZT 微動アクチュエータの性能に大きな影響を与える機構形状の設計として, リンク形状を前提としない, より自由度の大きい設計を行うことにより, 更なる高性能化が期待できる. 構造物の機構形状の骨格を初期設定することなしに, 設計自由度

* 原稿受付 2005年11月30日.

^{*1} 正員, 名古屋大学大学院工学研究科(☎464-8603 名古屋市千種区不老町).^{*2} トヨタ車体(株)(☎448-8666 刈谷市一里山町金山100).^{*3} 正員, フェロー, 名古屋大学先端技術共同研究センター.

E-mail: ando@mech.nagoya-u.ac.jp

の大きい形状設計を行う手法としては、有限要素法 (Finite Element Method: FEM) により表現された構造物の位相形状を、遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm: GA) を用いて最適化する研究⁽⁴⁾が報告されている。しかし、一般の機械構造物へ位相形状最適化法を適用する際には、多大な数値計算が必要となる。この問題に対して文献⁽⁴⁾では、GA における基本操作を改良するとともに、構造解析に部分構造合成法と構造の幾何学的対称性を利用して自由度を縮小することにより、計算効率を向上させる手法が提案されている。一方、アクティブコントローラを内蔵する機械システムの設計には、従来から与えられた制御対象に対してコントローラを付加する二段階設計手法が用いられている。しかしながら、制御対象とコントローラからなる閉ループ系全体の性能は、その制御対象の性能に大きく影響する。これに対して、制御対象とコントローラを統合的観点から設計する制御対象とコントローラの統合化設計⁽⁵⁾の研究が行われている。構造物の位相形状の設計を含む制御対象とコントローラの統合化設計としては、振動制御を目的とした研究⁽⁶⁾などが報告されている。

本論文では、設計自由度の大きい機構形状の設計を可能とし、形状探索を効率良く行うことのできるスピンスタンド用 PZT 微動アクチュエータの機構形状とコントローラの統合化設計を提案する。本手法は、設計領域として定義した空間を微小要素に分割し、設計される機構形状を骨要素および肉要素で定義した微小要素により定義し、その機構を制御対象とするコントローラを設計し、GA を用いて性能を改善する閉ループ系の制御対象の機構形状とコントローラを探索する手法である。統合化設計における構造系と制御系の同時最適化問題は、一般的には凸な問題とはならず、大域的な最適解を確実に求める方法は知られていない⁽⁷⁾。このため、本手法では、必ずしも大域的最適解でなくとも次善の解を得ることができるという特徴をもつ GA を数値探索手法として採用する。本論文の構成を以下に示す。2章ではスピンスタンド用 PZT 微動アクチュエータについて述べる。3章では本論文で提案する形状設計について述べる。4章では本論文における統合化設計問題を定義する。5章では設計を行う。そして6章でまとめを行う。なお、以下、 s を Laplace 演算子とし、 \mathbf{R}^n を n 次元実数ベクトル空間とする。

2. PZT 微動アクチュエータ

スピンスタンド上で磁気ヘッドの高速・高精度な位置決めを行う PZT 微動アクチュエータは、スピンス

タンド本体の超音波モータやサーボモータとボールネジを組み合わせた X-Y 直交ステージ上に配置され、磁気ヘッドを先端に配置する Head Gimbal Assembly (HGA) を支持し、その HGA を微調整移動することにより磁気ヘッドの位置決めを行う。スピンスタンドでは、HDD のような大きなシーク動作は必要とされない。このため、本アクチュエータが駆動される際には、X-Y 直交ステージは固定され、二つのアクチュエータが同時に制御され協調動作するような方式は採用されていない。文献⁽³⁾において提案した PZT 微動アクチュエータの構造を図 1 に示す。本機構は、スピンスタンド本体の X-Y 直交ステージへの取り付け部 a、特性の等しい二つの PZT、菱形リンク形状の変位拡大部 b から構成される。本アクチュエータの固定は、X-Y 直交ステージへの取り付け部 a の二つの円形の穴にボルト等を用いて行う。HGA は変位拡大部 b の HGA 支持部 c に取り付けられる。PZT は x_2 方向に伸縮する。PZT の変位は、HGA 支持部 c において変位拡大部 b により拡大される。本アクチュエータは、特性の等しい二つの PZT が X-Y 直交ステージへの取り付け部 a を挟んで直列に配置され、一点鎖線で示した v, h 軸に対して対称な機構となっている。HGA 支持部 c に HGA を取り付ける際には、 v 軸に対して質量の対称性を保つため、カウンターウェイトを変位拡大部 b のカウンターウェイト取り付け部 d に取り付ける。

PZT の x_2 方向への変位 dk_2 に対する HGA 支持部 c の x_1 方向への変位 dk_1 の変位拡大率は $E_0 = dk_1 / dk_2 = \tan \varphi$ で与えられる⁽⁸⁾。ここで、 φ は図 1 中のリンク部の傾きである。文献⁽³⁾では、 $E_0 = 3.0$ となるように $\varphi = 71.6^\circ$ と初期設定されている。このことは、変位拡大率の最大値が、初期設定された変位拡大部の骨格によってほぼ決定されてしまっていることを意味する。

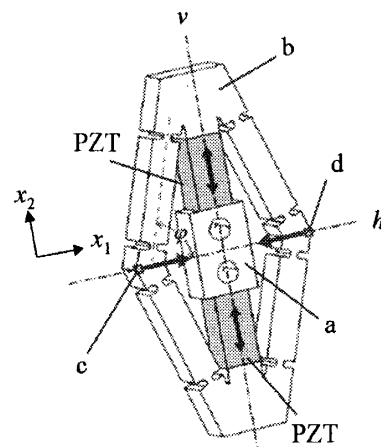


Fig. 1 Structure of piezoelectric actuator

3. 形状設計

本論文で提案する形状設計法は、図1中の変位拡大部**b**の形状を対象とし、文献(3)において有効性が示された対称機構を採用し、機構全体が v, h 軸に対して対称となることを前提とする。このため、 v, h 軸で区切られた四つの領域のうちの一つの領域、すなわち、機構全体の1/4の領域のみを設計する。この際、 v, h 軸上の各軸に対して垂直となる方向の変位は、機構の対称性により完全に相殺されるものとする。図2に変位拡大部の設計領域を示す。この領域は1mm四方の微小要素で263要素に分割されている。各微小要素、PZTおよびX-Y直交ステージへの取り付け部aの紙面に対して垂直方向となる厚さは5mmとする。そして、変位拡大部の設計領域内の各要素の存在の有無により変位拡大部の形状を定義する。これにより、自由度の大きい設計が可能となる。しかしその反面、263もの微小要素の存在の有無の組み合わせは膨大な数であり、そのほとんどは、明らかにアクチュエータとしての要件を満たさない形状であるため、形状探索の効率上、実用的ではない。そこで、本研究ではPZTの発生力によりHGA支持部cを動作させるには、PZTの発生力を直接受ける部分とHGA支持部cがつながっている必要があることに着目する。そして、変位拡大部の形状を構成する微小要素は、骨要素と肉要素の二種類から成るものと定義する。まず、PZTの発生力が変位拡大部へ入力される入力点とHGAを支持する出力点cを骨要素として定義した微小要素により一筋の線でつなぎ骨格を形成する。そして、その各骨要素の周りに肉要素として定義した微小要素を肉付けすることにより変位拡大部の機構形状を定義する。これにより、入力点と出力点は確実に繋がっており、独立して宙に浮いているような部材は存在しないといったアクチュエータとしての要件を満たす機構形状のみを生成できる。生成された形状は、GAによる形状探索を行うため、GAにおける初期世代の個体 S_1 とし、初期世代の個体群からなる母集団 S_1 に所属させる。

3.1 遺伝子型の表現と初期個体の生成 一般にGAでは各染色体上の遺伝子は一次元的に配置されるが、本研究では、遺伝子を設計領域となる空間中の微小要素と同じ配置とする。遺伝子の配置を図2に示した263個の微小要素 $(e_{i,j})$ の配置と対応させ、各微小要素の存在の有無を1.0で表わす。

GAにおける個体の生成として、変位拡大部の14の形状の生成過程を以下に示す。263個の微小要素の中から、まず、骨格となる部分**bone**を一筋の骨要素

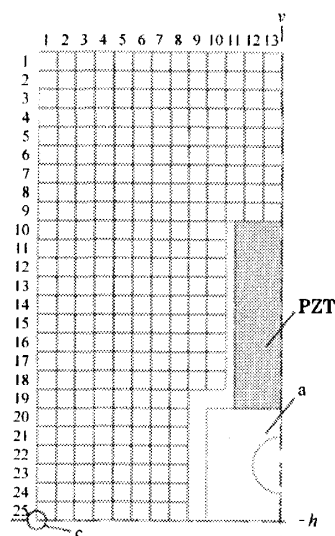


Fig. 2 Design region of displacement amplifier

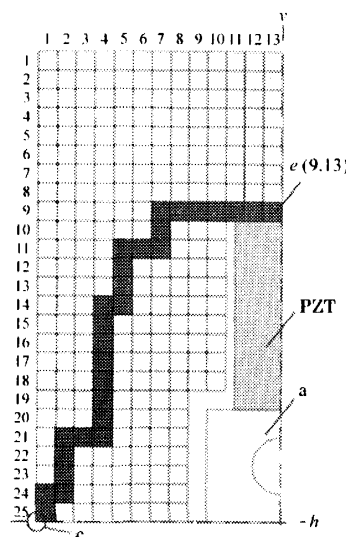


Fig. 3 Example of Skeleton of displacement amplifier

$$bone_i = e(e_{v_i}, e_{h_i}) \quad (i=1, 2, \dots) \quad (1)$$

により決定する。図3に、一筋の骨要素のつながりから形成される骨格の例を示す。PZTの発生力を直接受ける微小要素 $e(9,13), e(9,12), e(9,11)$ は常に骨要素として存在するものとし、

$$bone_1 = e(e_{v_1}, e_{h_1}) = e(9, 13) \quad (2.1)$$

$$bone_2 = e(e_{v_2}, e_{h_2}) = e(9, 12) \quad (2.2)$$

$$bone_3 = e(e_{v_3}, e_{h_3}) = e(9, 11) \quad (2.3)$$

とする。そして $bone_4$ を $bone_3$ の上に隣接する微小要素

$$bone_4 = e(e_{v_4}, e_{h_4}) = e(8, 11) \quad (3.1)$$

または、 $bone_3$ の左に隣接する微小要素

$$bone_4 = e(e_{v_4}, e_{h_4}) = e(9, 10) \quad (3.2)$$

のいずれかとする。そして、 $i=5, 6, \dots$ について、 $bone_i$ が $bone_{i-1}$ の左に隣接する微小要素

$$bone_i = e(e_{v,i+1}, e_{h,i+1}-1) \quad (4.1)$$

または, $bone_{i+1}$ の下に隣接する微小要素

$$bone_i = e(e_{v,i+1}+1, e_{h,i+1}) \quad (4.2)$$

のいずれかとなるように $bone_i$ を決定し, $bone$ が HGA 支持部 c の微小要素とつながる ($bone_i = e(25, 1)$ となる) までこれを繰り返す。

次に, 各骨要素 $bone_i$ に対して, それぞれ肉付けをしていく. $bone_i$ に肉付けする肉要素

$$meat_{i,j} = e(e_{v,i,j}, e_{h,i,j}) \quad (j=1, 2, \dots, p_i) \quad (5)$$

は以下のように決定する. まず, $bone_i$ に肉付けする肉要素 $meat_i$ の要素数 p_i はランダムに決定する. そして, $bone_i$ を始点として $meat_{i,1}$ が $bone_i$ の上下左右のいずれかに隣接する微小要素となるよう決定する. そして, $2 \leq j \leq p_i$ のときの $meat_{i,j}$ が, $meat_{i,k}$ ($k < j$) および $bone_i$ と重複せずに, $meat_{i,k}$ および $bone_i$ の上下左右のいずれかに隣接する微小要素となるように決定する. 「 $bone_i$ に肉付けされた肉要素 $meat_i$ と $bone_i$ 以外の骨要素」および「 $bone_i$ に肉付けされた肉要素 $meat_i$ と $bone_i$ 以外の骨要素に肉付けされた肉要素」における存在位置の重複は認め, その重複した微小要素は存在するものとする。

以上により, GA における初期個体を l 個生成し, 初期世代の個体群 (S_1^1, \dots, S_l^1) からなる母集団 S_1 に所属させる。

3.2 遺伝的操作 本研究では, 生成された個体に対して, 遺伝的操作を行うことで, 新しい個体を生成する. 遺伝的操作には, 以下の「交叉」と「突然変異」を用いる。

【交叉】 交叉を行う m 組の両親をランキング選択により選択する. 本研究では, 選択された全ての両親のペアに対して, 両親の骨格 $bone^1, bone^2$ の一部に肉付けされた全肉要素を親同士で交換することにより交叉を行う. まず, 両親の骨格 $bone^1, bone^2$ に対して, 二つの骨要素 $bone_\alpha, bone_\beta$ をランダムに決定する. そして, この二つの骨要素を両端とする一筋の隣接する骨要素のつながり $bone_\alpha, \dots, bone_\beta$ ($\alpha < \beta$), すなわち骨格の一部に対して, それぞれの骨要素に肉付けされた全肉要素 $meat_\alpha, \dots, meat_\beta$ を, 各骨要素との相対位置関係を保持したまま親同士交換することにより以下のように交叉を行う。

$$\begin{aligned} (bone_\alpha^1, meat_\alpha^1) &\rightarrow (bone_\alpha^1, meat_\alpha^2) \\ &\vdots \\ (bone_\beta^1, meat_\beta^1) &\rightarrow (bone_\beta^1, meat_\beta^2) \end{aligned} \quad (6.1)$$

$$\begin{aligned} (bone_\alpha^2, meat_\alpha^2) &\rightarrow (bone_\alpha^2, meat_\alpha^1) \\ &\vdots \\ (bone_\beta^2, meat_\beta^2) &\rightarrow (bone_\beta^2, meat_\beta^1) \end{aligned} \quad (6.2)$$

この際, 「肉要素と骨要素」および「肉要素と肉要素」における存在位置の重複は認め, その重複した微小要素は存在するものとする。

【突然変異】 突然変異を行う n 個体をランキング選択により選択する. 選択された個体に対して, それぞれ以下の (i) ~ (iv) のうちのいずれかの方法をランダムに適用する。

- (i) 任意の数の骨要素をランダムに選択し, その骨要素に付いている肉要素を削る.
- (ii) 任意の数の骨要素をランダムに選択し, その骨要素に付いている肉要素にさらに肉要素を付け加える.
- (iii) 二つの骨要素をランダムに選択し, その二つの骨要素の間の骨要素のつながりを, 前節の手順に従って新たに生成し直し, 元の肉要素の情報通りに肉付けを行う.
- (iv) 前節の手順に従って, 新たに個体を生成し直す.

「交叉」および「突然変異」において用いるランキング選択は, 本研究では 5 章で具体的に定義する評価関数 J の値の小さい順に個体を順位付けし, 1 位の個体から順に

$$\frac{l^3}{\sum_{z=1}^l z^3}, \frac{(l-1)^3}{\sum_{z=1}^{l-1} z^3}, \dots, \frac{1^3}{\sum_{z=1}^1 z^3} \quad (7)$$

といった確率で選択する方法で行う. この方法は, J の値が小さい上位の個体ほど選択される確率が高く, J の値が大きい個体でも選択される可能性がある選択法となっている. 本研究では, 適応度の高い個体ほど J の値が小さくなるように評価関数 J を設定している。

4. 統合化設計

本論文では, PZT 微動アクチュエータの機構形状とコントローラの統合化設計問題として, 「閉ループ系の性能に制約を与え, 設定した評価関数の値を小さくする機構形状の設計変数とコントローラ中の設計変数を求める」問題を考える. コントローラの設計には, McFarlane & Glover によって提案された正規化既約分解によるループ整形設計法⁹⁾を適用する. 制御対象の数学モデルは, 機構の動特性を有限要素解析により得ることにより得る. 機構形状の設計変数とコントローラ中の設計変数から決定される閉ループ系は, GA における反復計算において, より評価関数の値を小さくするシステムへと更新される. 設計変数および設計アルゴリズムを以下に示す。

4.1 機構形状の設計変数と制御対象 機構形状の設計変数は, 図 2 に示した 263 個の微小要素の存

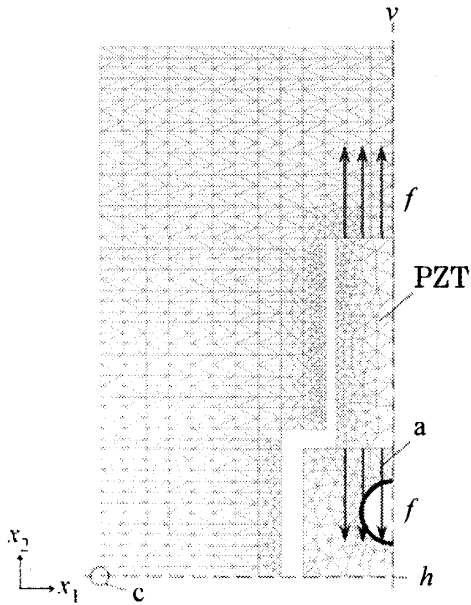


Fig. 4 Finite element model of plant

在の有無とする。263個の微小要素の存在の有無は、各微小要素の存在の有無を1, 0により表現した遺伝子からなる染色体により表現される。

制御対象の数学モデルは、有限要素解析により得る。有限要素解析の際には、微小要素の存在の有無を表現する遺伝子が0であっても、対応する微小要素の厚さ、密度、ヤング率を厳密に0とはせず、十分小さい値として解析を行う。図4に制御対象の有限要素モデルを示す。図4において、図1中のX-Y直交ステージへの取り付け部aの円形の穴に対応する半円部分を固定とし、PZTの上下両端に荷重 f [Nm²]を定義し、三角要素を用いて970接点1733要素に分割し、二次元有限要素解析により本アクチュエータの有限要素モデルを得る。使用するPZTについては、市販のNEC/TOKIN: AE0505D08 (6.1 μ m/100V, ヤング率 44×10^9 Nm², 密度7540 kg/m³)を想定した。X-Y直交ステージへの取り付け部aおよび形状設計を行う変位拡大部については、超々ジュラルミン(A7075, ヤング率 72×10^9 Nm², 密度2800 kg/m³)を用いることを想定した。そして、有限要素モデルから、入力をPZTへの入力電圧 u [V], 出力をHGA支持部cの x_1 方向変位 y [μ m>]とした次式に示す1次の振動モードを表わす状態空間モデルを得る。

$$\begin{cases} \dot{q} = Aq + Bu \\ y = Cq \end{cases} \quad (8)$$

ここで、 $q \in \mathbb{R}^2$, $A \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$, $B \in \mathbb{R}^{2 \times 1}$, $C \in \mathbb{R}^{1 \times 2}$ はそれぞれ状態ベクトル, システム行列, 制御入力行列, 観測出力行列である。

4.2 コントローラ設計とコントローラ中の設計

変数 コントローラ設計に用いるMcFarlane & Gloverによって提案された正規化既約分解によるループ整形設計法は、 γ 反復せずに解が得られるといった計算時間上の利点がある。式(8)の状態空間モデルから得られる u から y までの伝達関数は、次式で示される1自由度2次遅れ系となる。

$$P(s) = \frac{k_{st} \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta_n \omega_n s + \omega_n^2} \quad (9)$$

ここで、 $\omega_n, \zeta_n, k_{st}$ は固有振動数, 減衰率, 静ゲインである。

H_∞ 準最適制御問題の指標は次式で与えられる。

$$\left\| \begin{bmatrix} H(s) \\ I \end{bmatrix} (I + G(s)H(s))^{-1} \begin{bmatrix} I & G(s) \end{bmatrix} \right\|_\infty < \gamma \quad (10)$$

ここで、 $\gamma = \kappa \gamma_{\min}$ ($\kappa > 1$), $G(s) = V(s)P(s)W(s)$, $K(s) = W(s)V(s)U(s)$ であり、 γ_{\min} , $P(s)$, $K(s)$ はそれぞれ式(10)の左辺の H_∞ ノルムの下限值, 制御対象の数学モデル, ロバスト安定化コントローラであり、 $V(s)$, $W(s)$ は重み関数, I は適当な次元の単位行列である。McFarlane & Gloverの手法において仮定した既約分解要素の不確定性に対する安定余裕 γ^{-1} は $\kappa = 1.0$ のとき最大(最適値)となるが、一般にはコントローラのゲインが大きくなり過ぎるので、安定余裕をある程度確保した上で、コントローラのゲインが過大にならないようなゲインを選ぶ。また、 κ を大きくしすぎるとロバスト性を失う。本設計では、 $\kappa = 12$ とする。

PZT微小アクチュエータには、高速・高精度なトラック追従性が求められ、ステップ目標値に定常偏差なく追従しなければならない。そこで、重み関数 $W(s)$ に積分器を持たせ、

$$W(s) = \frac{\hat{W}(s)}{s} \quad (11)$$

とした。なお、 $V(s) = I$ とする。式(11)中の重み $\hat{W}(s)$ については、共振点付近の不確定性に対応するため次式のように決定した。

$$\hat{W}(s) = K_p \cdot \frac{s^2 + 2\zeta_n \omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta \omega_n s + \omega_n^2} \quad (12)$$

ここで、 K_p はスカラー重みとし、 $\zeta = 0.9$ とした。スカラー重み K_p をコントローラ中の設計変数とする。重み関数 $W(s)$ はコントローラに組み入れられることになるので、 K_p に大きな値を与えることはフィードバックの効果を大きくすることになる。

4.3 設計アルゴリズム 本論文で考える統合化設計問題の設計アルゴリズムを以下に示す。

Step1: 初期世代の1個の個体(機構形状の設計変数

- を表わす染色体) S_1^1, \dots, S_l^1 から成る母集団 S_1 を生成する。世代数 $g=1$ とする。
- Step 2: S_1^1, \dots, S_l^1 により定義される機構に対して、有限要素解析により制御対象の数学モデル P_1^1, \dots, P_l^1 を得る。
- Step 3: P_1^1, \dots, P_l^1 に対し、McFarlane & Glover の手法によりステップ目標値入力に対してオーバーシュートが 5%以下で $\pm 5\%$ 整定時間が最小となるコントローラ中の設計変数 K_p をそれぞれ求め、コントローラ K_1^1, \dots, K_l^1 を得る。
- Step 4: 評価関数 J の値 J_1^1, \dots, J_l^1 を求め、評価値の小さい順に S_1^1, \dots, S_l^1 を順位付けする。
- Step 5: ランキング選択により、 S_g の中から交叉させるカップルを m 組、突然変異させる個体を n 個体選択し、新たな個体 $S_g^{h+1}, \dots, S_g^{h+2m+n}$ を生成する。
- Step 6: $S_g^{h+1}, \dots, S_g^{h+2m+n}$ に対して、有限要素解析により制御対象の数学モデル $P_g^{h+1}, \dots, P_g^{h+2m+n}$ を得る。
- Step 7: $P_g^{h+1}, \dots, P_g^{h+2m+n}$ に対し、Step 3 と同様に McFarlane & Glover の手法によりコントローラ $K_g^{h+1}, \dots, K_g^{h+2m+n}$ を得る。
- Step 8: 評価関数 J の値 $J_g^{h+1}, \dots, J_g^{h+2m+n}$ を求め、評価値の小さい順に $S_g^{h+1}, \dots, S_g^{h+2m+n}$ を順位付けし、評価値の小さい方から l 個体選択し、次世代の l 個の個体 $S_{g+1}^1, \dots, S_{g+1}^l$ から成る母集団 S_{g+1} を形成する。そして、 $g=g+1$ として次世代へ更新する。
- Step 8 において、評価関数 J の値が最小となる個体が 15 世代連続で変化しなくなるまで、Step 5~8 の手順を繰り返す、設計変数を得る。

5. 設計

本章ではスピンスタンド用 PZT 微動アクチュエータの機構形状とコントローラの統合化設計を行う。本設計では、設計アルゴリズム中の初期世代の個体数 l 、交叉を行うペア数 m 、突然変異を行う個体数 n をそれぞれ 300, 105, 30 とする。

5.1 統合化設計における制約条件と評価関数
本設計では、アクチュエータの位置決め制御における閉ループ系の性能として、10 μ m ステップ目標値入力に対する $\pm 5\%$ 整定時間 T_s [μ s]、およびその際の最大入力電圧 u [V] に対して、次式に示す制約条件を与える。

$$T_s \leq 100 [\mu\text{s}] \quad (13.1)$$

$$u \leq 100 [\text{V}] \quad (13.2)$$

スピンスタンド用 PZT 微動アクチュエータには、高速応答性の要求に加え、一度に多くのトラックの測

定評価を行うために HGA 支持部の最大変位を大きくしたいという要求がある。これらの要求に対し、本研究では入力電圧 75V を静的に印加した時の出力変位 y_s [μ m] およびステップ目標値入力に対する $\pm 5\%$ 整定時間 T_s [μ s] に対して評価を行う。その際、文献(3)において設計された菱形リンク形状の PZT 微動アクチュエータにより得られる値 $y_s^* = 8.6 [\mu\text{m}]$, $T_s^* = 60 [\mu\text{s}]$ を基準値として設定する。本設計では、評価関数 J として、以下に示す三通りの評価関数 J_y, J_T, J_{yT} に対して設計を行う。

Case 1: 出力変位を評価する評価関数

$$J_y = 1/(y_s / y_s^*) \quad (14.1)$$

Case 2: 整定時間を評価する評価関数

$$J_T = T_s / T_s^* \quad (14.2)$$

Case 3: 出力変位と整定時間を評価する評価関数

$$J_{yT} = 2 \times J_y + J_T \quad (14.3)$$

5.2 設計結果 Case 1-3 の設計により得られた結果を表 1 に示す。さらに、文献(3)において設計された菱形リンク形状の PZT 微動アクチュエータにより得られる値を Case 0 として表 1 に示す。表 1 中の $T_s, \sigma_{\max}, y_s, f_1$ はそれぞれ、ステップ目標値入力に対する $\pm 5\%$ 整定時間、入力電圧 75V を静的に印加した時の変位拡大部における最大主応力、入力電圧 75V を静的に印加した時の出力変位、および制御対象の共振周波数の値である。整定時間 T_s に関して、整定時間を評価した Case 2 の T_s の値が最短となった。整定時間を評価しなかった Case 1 の T_s の値は最長となり、制約条件 (13.1) における上限値となった。整定時間と出力変位の両方を評価した Case 3 の T_s の値は、基準値とした Case 0 の値とほぼ等しい値となった。また、出力変位 y_s に関して、出力変位を評価した Case 1 の y_s の値が最大となった。出力変位を評価しなかった Case 2 の y_s の値は最小となり、整定時間と出力変位の両方を評価した Case 3 の y_s の値は、基準値とした Case 0 の値より大きくなった。この結果から Case 3 のシステムは、文献(3)のアクチュエータと同等の速応性もちながら 13 倍の出力変位を達成していることが確認できる。最大

Table 1 T_s, σ_{\max}, y_s and f_1 of case 0 to 3

	Case 0	Case 1	Case 2	Case 3
T_s [μ s]	60	100	37	61
σ_{\max} [MPa]	15.8	8.5	5.4	8.0
y_s [μ m]	8.6	13.2	6.8	10.9
f_1 [kHz]	10.6	6.5	16.6	10.1

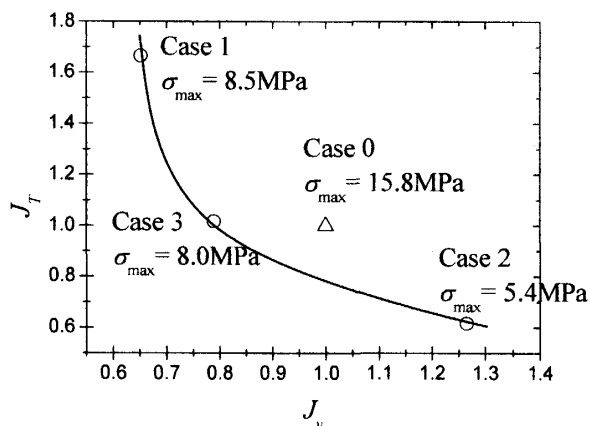
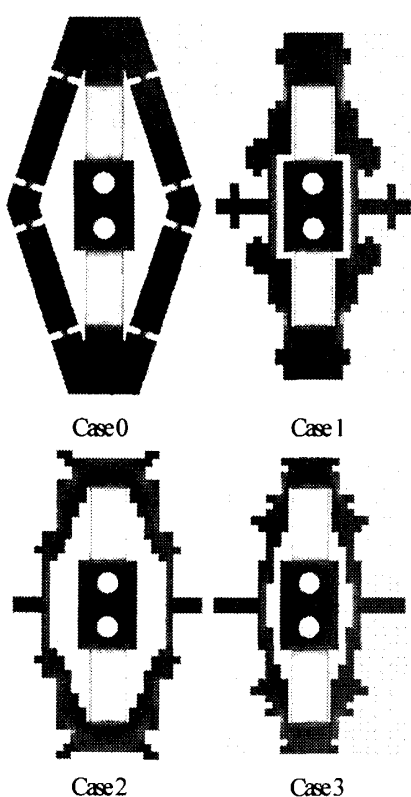
Fig. 5 Relation between J_y , J_y and σ_{max} in case 0 to 3

Fig. 6 Structural shapes of actuator of case 0 to 3

主応力 σ_{max} に関して、Case 1-3の σ_{max} の値は、Case 0の値の1/2程度となった。このことは、リンク形状を前提としたCase 0のアクチュエータは、出力変位を得るために必要以上の応力集中が起こっていると考えられる。

Case 0-3の J_y と J_y の関係および σ_{max} の値を図5に示す。Case 1-3において、出力変位と整定時間との間のトレードオフの関係が確認できる。さらに、Case 0のシステムは本研究で統合化設計されたCase 1-3のシステムにおけるトレードオフの関係の外にあることが確認でき、本設計の有効性が確認できる。

Case 0-3の機構形状を図6に示す。Case 1の骨格において、図1中の ϕ に相当する傾きが最大となった。また、Case 1の機構形状は、PZTの発生力を直接受ける部分およびCase 0の菱形リンク形状機構のリンク部に相当する部分に肉付けされることによって形成されており、リンク形状と似た肉付きとなっている。Case 2の骨格において、図1中の ϕ に相当する傾きは、Case 0のそれとほぼ等しくなった。しかしながら、Case 2の形状は菱形というよりむしろ楕円形状をしており、あまり肉付けされることなしに形成されている。さらに、肉付け量はPZTの発生力を直接受ける部分からHGA取り付け部およびカウンターウェイト取り付け部に近づくにつれて減少している。Case 3の骨格に関して、図1中の ϕ に相当する傾きは、Case 1のそれよりかは少し小さくなった。Case 3の機構形状は、肉の付き方がCase 1のようにリンク形状と似た付き方となっており、かつCase 2のようにあまり肉付けされることなしに形成されている。このCase 3の形状の特徴および図5中の J_y と J_y の間のトレードオフの関係から、図1中の ϕ に相当する傾きが大きくリンク形状をした機構が、より大きな出力変位を得るための位置決めアクチュエータの形状として適した形状であると考えられ、また、あまり肉付けされていない楕円形状の機構が、より速応性に優れた位置決めアクチュエータの形状として適した形状であると考えられる。

6. おわりに

本研究では、設計領域として定義した空間を微小要素に分割し、設計される機構形状を骨要素および肉要素で定義した微小要素により定義することにより、設計自由度の大きい機構形状の設計を可能とし、GAを用いて形状探索を効率良く行うことのできるスピンスランド用PZT微動アクチュエータの機構形状とコントローラの統合化設計法を提案した。

設計結果から、設計されたアクチュエータは従来型のリンク形状とは異なり、出力変位を得るための過度な応力集中を避けた機構となっている。本アクチュエータは文献(3)の菱形アクチュエータと同等の速応性をもちながら、1.3倍の出力変位を達成した。これにより、提案した手法の有効性が示された。

なお、本研究は、科学技術振興事業団、秋田県地域結集型共同研究事業「次世代磁気記録技術と脳医療応用技術開発」の一環として行われたものである。関係者各位に謝意を表す。

文献

- (1) Wood, R. et al., Recording Technologies for Terabit per Square Inch Systems, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol.38, No.4 (2002), pp.1711-1718.
- (2) Mori, S. et al., Highly Precise Actuator with PZT and Displacement Expander for Track Following, *IEICE Technical Report*, MR2001-104 (2002), pp.23-28. (in Japanese)
- (3) Ando, H. et al., Integrated Design of Structure/Controller for Head Gimbals Assembly of Magnetic Recording Test Stand, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.71, No.703 (2005), pp.987-994. (in Japanese)
- (4) Kajiwara, I. et al., Structural Topology Optimization by Genetic Algorithm (Improvement of Calculation Efficiency for Real System Optimization), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.62, No.597 (1996), pp.1731-1738. (in Japanese)
- (5) Obinata, G., Integrated Design Considering Plant and Controller Together, *Journal of the Institute of Electrical Engineers of Japan*, Vol.117, No.10 (1997), pp.683-686. (in Japanese)
- (6) Kajiwara, I. and Omori, T., Topology and Shape Optimization of Smart Structure Considering Controllability, *Proceedings of Dynamics & Design Conference*, No.03-7 (2003-9), CD-ROM (No.320). (in Japanese)
- (7) Zou, L. and Obinata, G., Sensitivity Analysis for Simultaneous Optimization of Mechanical-Structural/Control Systems (Case of H^2 Norm Performance Index for Symmetric Systems), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.64, No.626 (1998), pp.3790-3797. (in Japanese)
- (8) McFarlane, D. and Glover, K., *Robust Controller Design Using Normalized Coprime Factor Plant Descriptions*, Lecture Notes in Control and Information Sciences 138, (1990), p.98, Springer-Verlag.