

# GAによる平板構造物におけるセンサ/ アクチュエータの最適配置

木澤 悟・小笠原 悠\*

## Optimal Placement of Sensors/ Actuators in Flat Plate Using Genetic Algorithm

Satoru KIZAWA and Yutaka OGASAWARA\*

(2003年11月25日受理)

This paper shows an optimal placement of the actuators/sensors in the flat plate so as to reduce the structural vibration. The LQG controller is designed with the reduced order model of the flat plate which is obtained by finite element method and modal analyses. The location of the actuators/sensors and the LQG control system are simultaneously optimized by genetic algorithm to achieve an enhanced vibration control performance. The effect of the proposed method is illustrated by numerical examples.

### 1. 緒言

近年、多くの構造物の高層化や機械の高性能化が進んでいる。そのために軽量化をすると弾性振動が問題になってくるため、アクティブな制振制御が重要になってくる。特に、アクティブな制振制御を行う場合、センサおよびアクチュエータの配置は制振性能に関わる問題である。

このような問題を克服するために、本論文では片持ち平板構造物に圧電アクチュエータおよびセンサを取り付けた構造物を制御対象として、制振制御に有効なセンサおよびアクチュエータの配置についての検討を行った。

論文で提案した手法は、有限要素解析ソフトと制御系設計ソフトをリンク、統合化したもので、コントローラの設計とセンサおよびアクチュエータの配置は統合的に設計すべきであるという観点と制御しやすいシステムとはという観点にたった構造系と制御系の同時最適化設計法である。提案した手法を用い、片持ち平板構造物モデルに適用し、その有効性を確かめた結果を報告する。

### 2. 平板構造物のモデル化

#### 2.1 制御対象

本論文では有限要素法（以下 FEM）解析ソフト FEMLAB<sup>1)</sup> を用いて制御対象である平板構造物のモデル化を行う。FEMLAB は MATLAB<sup>2)</sup> とリンク可能な FEM 解析ソフトであり、FEMLAB での解析を MATLAB が読解可能な *m* ファイルで記述し、さらに状態方程式に変換できるように開発した。

制御対象として図 1 に示すような、板厚一定の片持ち平板構造物を考える。図 1 において  $S_i (i=1\sim3)$  は変位センサの位置を示し、 $A_i (i=1\sim3)$  圧電アクチュエータの位置を示す。また、 $d$  は外乱、 $z$  は評価したい位置を示す。ここで、センサは黒丸の節点の位置に配置されていると想定し、アクチュエータはエッジにおけるモーメント制御が可能で 1 枚分の

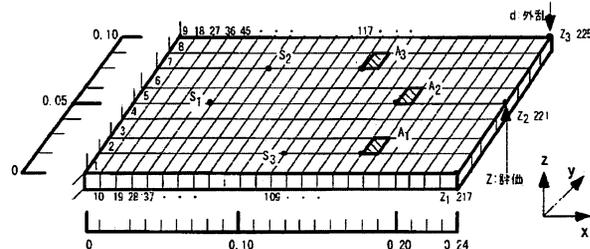


図 1 平板構造物モデル

\* 秋田高専専攻科学生

セルの大きさであり、配置はセンサの場合と同様に節点が配置位置を示している。

## 2.2 物理座標系とモード座標系の関係

図1に示した平板構造物のモード座標系での基礎式を導く。一般的に  $n$  自由度構造システムの運動方程式は式(1)で表すことができる。

$$M\ddot{U} + C\dot{U} + KU = D_d d + D_u u \quad (1)$$

ここで  $M$ ,  $C$ ,  $K$  はそれぞれ慣性、減衰、剛性行列であり、 $U$  は変位ベクトル、 $u$  は制御入力、 $d$  は外乱である。また、 $D_d$  は外乱入力の節点を定める行列、 $D_u$  は制御入力の節点を定める行列である。ここでいま式(1)の  $M$  と  $K$  から求められる固有モード行列  $\Phi$  を用いてモード分離する。すなわち、

$$U = \Phi q \quad (2)$$

を用いて座標変換を行うと、平板のモード座標系における基礎式は

$$\ddot{q} + Z\dot{q} + \Omega q = f_d d + f_u u \quad (3)$$

となる。ここで、

$$\begin{aligned} \Phi^T M \Phi &= I & f_d &= \Phi^T D_d & f_u &= \Phi^T D_u \\ \Omega &: \Phi^T K \Phi = \text{diag}[\omega_i^2] & (i=1, 2, \dots, n) & & & \\ Z &: \Phi^T C \Phi = \text{diag}[2\zeta_i \omega_i] & (i=1, 2, \dots, n) & & & \end{aligned} \quad (4)$$

である。 $q$  はモード変位ベクトルである。また、式(3)を状態方程式に変換すれば

$$\begin{cases} \dot{x}_p = A_p x_p + B_d d + B_u u_p \\ y_p = C_p x_p \end{cases} \quad (5)$$

となる。ここで、

$$\begin{aligned} x_p &= [q_1, \dots, q_n | \dot{q}_1, \dots, \dot{q}_n]^T & u_p &= u \\ A_p &= \begin{bmatrix} 0 & I \\ -\Omega & -Z \end{bmatrix} & B_d &= \begin{bmatrix} 0 \\ f_d \end{bmatrix} \\ B_u &= \begin{bmatrix} 0 \\ f_u \end{bmatrix} & C_p &= [C\Phi \mid 0] \end{aligned}$$

である。式(5)より、 $n$  自由度構造システムの運動方程式は、モード解析を利用し物理座標系からモード座標系に変換することによって、 $n$  個の1自由度振動系の非連成化した運動方程式に基づく状態方程式を導くことができる。本論文においてのFEMLABの利用は、線形制御理論を用いるために式(5)の状態方程式を導出することにある。しかしながら、FEMLABはモード座標系には変換するこ

とができないので、Rayleigh減衰を含めて、モード座標系に変換するプログラムを作成した。

## 3. コントローラ的设计

LQ理論において、式(5)で与えられるシステムに対する制振制御のための制御則は次式の2次形式評価関数  $J_z$  を最小化することである。

$$\begin{aligned} J_z &= \int_0^{\infty} (x_p^T Q x_p + u_p^T R u_p) \\ &= \int_0^{\infty} (y_p^T C_p^T Q C_p y_p + u_p^T R u_p) dt \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、 $Q$  は準正定対称行列、 $R$  は正定対称行列である。式(6)における  $J_z$  の値を小さくするようなコントローラを設計する。式(6)を最小化する制御入力は

$$u_p = K x_p \quad (7)$$

である。 $K$  は最適レギュレータゲインであり、次式のように与えられる。

$$K = R^{-1} B_p^T P \quad (8)$$

$P$  は次の代数リカッチ方程式の正定対称解である。

$$P A_p + A_p^T P - P B_u R^{-1} B_u^T P + C_p^T Q C_p = 0 \quad (9)$$

具体的には全てのモードに対する評価値の総和

$$\begin{aligned} J_z &= \sum_{i=1}^n J_i \\ &= \sum_{i=1}^n \int_0^{\infty} \left\{ \begin{bmatrix} q_i \\ \dot{q}_i \end{bmatrix}^T Q_i \begin{bmatrix} q_i \\ \dot{q}_i \end{bmatrix} + u_i^T R u_i \right\} dt \end{aligned} \quad (10)$$

を最小化するようなコントローラを求めることとなる。モード制御は各固有振動数を変化させずに、各モードの減衰比だけを高めるために速度フィードバックをかけて、制御ゲインが各モードの速度成分だけを高めるように働けばよい。具体的には重み  $Q$  が速度の成分にかかるように設定すればよい。これがモード制御のメリットである。

一般に全ての状態量を検出することは不可能であるから、本論文においては、検出可能な物理量は平板に取り付けられたセンサ変位のみとし、オブザーバにはカルマンフィルタを用いる。カルマンフィルタを用いたコントローラの状態方程式は次式のようになる。

$$\begin{cases} \dot{x}_k = A_k x_k + B_k y_p \\ u_k = C_k x_k \end{cases} \quad (11)$$

ただし、

$$A_k = A_p - HC_p - B_u K \quad B_k = H \quad C_k = -K$$

である。カルマンフィルタゲイン  $H$  は次式で求められる。

$$H = SC_p^T$$

$S$  は次式のリカッチ方程式の正定対称解である。

$$SA_p + A_p^T S - SC_p^T C_p S + q^T B_u B_u^T = 0 \quad (13)$$

この  $q$  はスカラーパラメータである。また、この場合の最適制御系は LQG/LTR 法<sup>3)</sup> と呼ばれていて  $P \rightarrow \infty$  により、LQG コントローラに漸近させることができる。これより式(5) と式(11) の拡大系は

$$\begin{cases} \dot{x}_G = A_G x_G + B_G d \\ y_G = C_G x_G \end{cases} \quad (14)$$

となる。ここで、

$$x_G = \begin{bmatrix} x_p^T \\ x_k^T \end{bmatrix} \quad A_G = \begin{bmatrix} A_p & B_u C_k \\ B_k C_p & A_k \end{bmatrix} \quad B_G = \begin{bmatrix} B_c \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$C_G = \begin{bmatrix} C_p \\ 0 \end{bmatrix}^T \quad y_G = y_p$$

である。制御対象とコントローラをブロック線図で詳細に表現すれば図2となる。ただし、モデル化されたシステムは不確かさを含んでおり、厳密には実システムと全く同じではない。本論文ではプラントが忠実に再現されたと仮定し解析を行った。

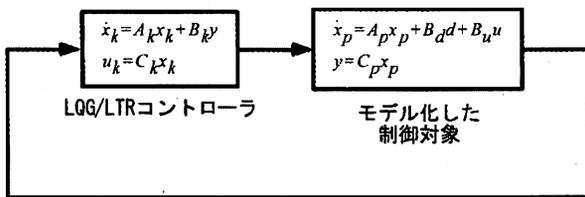


図2 制御システムのブロック線図

#### 4. 遺伝的アルゴリズム

本論文では、最適化アルゴリズムとして、遺伝的アルゴリズム<sup>4), 5)</sup> (Genetic Algorithm: 以下 GA) を用いて最適化を行った。淘汰、増殖、交叉・突然変異などの計算を行い、環境に対してもっとも適応した個体、すなわち目的関数に対して最適解を与えるような解を計算機上で求めようというのが GA の概念である。

設計パラメータである配置座標の 2 進数表現の具体例を挙げる。図1に示した平板構造物の平板の長

さは  $L=0.24$  [m]、幅は  $b=0.1$  [m] とした。また、平板は長さ方向に 24 分割、幅方向に 8 分割し、各節点が配置座標パラメータとなる。センサおよびアクチュエータはそれぞれ 3 個ずつの配置座標  $S_i(x, y)$  あるいは  $A_i(x, y)$  (ただし  $i=1, 2, 3$ ) の情報を持っているとし、このときのセンサ 1 (以下  $S1$ ) とアクチュエータ (以下  $A1$ ) の座標を 2 進数で表現する。なお、遺伝子の長さ  $n$  は 8 [bit] とする。センサの場合、配置は節点となる。10 進数から 2 進数に変換する場合は、式(15) を用いて算出された値を最終的に 0 になるまで 2 で割っていき、余りの値を最後から順に並べる。ただし、整数未満の値は切り捨てる。

$$X = \frac{(2^n - 1)x}{L} = \frac{(2^8 - 1)x}{0.24} \quad (15)$$

$$Y = \frac{(2^n - 1)y}{b} = \frac{(2^8 - 1)y}{0.1}$$

アクチュエータの場合は  $y$  方向のエッジを含んだ節点がパラメータとなり、次式を用いる。

$$X = \frac{(2^n - 1)x}{L - 0.01} = \frac{(2^8 - 1)x}{0.23} \quad (16)$$

$$Y = \frac{(2^n - 1)y}{b - 0.0125} = \frac{(2^8 - 1)y}{0.0875}$$

これも同様に算出された値を最終的に 0 になるまで 2 で割っていき、余りの値を最後から順に並べることにより設計パラメータが 2 進数で表現できる。逆に、遺伝子長さを 2 進数から 10 進数に変換するには

$$x = \text{round} \left( L \times dx \times \sum_{i=1}^8 2^{-i} \times \alpha_{xi} \right) \frac{1}{dx} \quad (17)$$

$$y = \text{round} \left( b \times dy \times \sum_{i=1}^8 2^{-i} \times \alpha_{yi} \right) \frac{1}{dy}$$

で求めることができる。ただし、 $\text{round}$  は整数化の意味である。また、 $dx$  は  $x$  方向の刻み幅、 $dy$  は  $y$  方向の刻み幅である。また、GA の収束判定には以下の条件を考慮した。つまり

- ① あらかじめ設定された目的関数の値が任意で設定した値より小さくなった。
- ② 任意に設定された世代数に達した。場合のいずれかとした。

### 5. 問題の定式化とアルゴリズム

本論文の問題設定は、図1の平板構造物の制振制御において、評価点における方向の変位に関する2次形式評価値  $J_z$  を小さくするような、コントローラ的设计と3つのセンサおよび3つのアクチュエータの最適配置をGAによって決定することである。外乱  $d$  の配置は  $(x, y) = (0.24, 0.10)$  とし、評価に関しては図1に示しているように、自由端側のある1点  $Z_1$  を評価する場合と、自由端側の3点  $Z_1, Z_2, Z_3$  を総合して評価することの2通りを考える。問題設定に対し前節で述べてきた考えに基づき、最適設計のアルゴリズムを以下に示し、そのフローチャートを図3に示す。

- Step 1: センサとアクチュエータの配置を FEMLAB に SET し、式(1)の行列  $M, C, K$  を求め、平板の運動方程式を構築する。
- Step 2: 式(1)の固有値問題を解き固有モード行列

を得る。そして式(2)のように座標変換を行い、物理座標系からモード座標系に変換し、式(5)の状態方程式を導出する。

Step 3: コントローラを設計する。

Step 4: 初期配置における評価値を求める。1点のみを評価した場合と3点を総合的に評価した場合の2通りを考える。評価値の計算には  $H_2$  ノルムを用いる。 $H_2$  ノルムは時間領域の評価であり、 $H_2$  ノルムはシステム表現が

$$G(s) = C_c(sI - A_c)^{-1} B_c + D_c \quad (18)$$

のように与えられた場合、評価値は

$$\begin{aligned} J_z &= \|G(s)\|_2 \\ &= \sqrt{\text{trace}\{B_c^T L_0 B_c\}} \\ &= \sqrt{\text{trace}\{C_c^T L_c C_c\}} \quad (\text{ただし } D_c = 0) \end{aligned} \quad (19)$$

で求めることができる。ただし、 $L_0$  と  $L_c$  は次のリアプノフ方程式

$$\begin{aligned} A_c^T L_0 + L_0 A_c + C_c^T C_c &= 0 \\ A_c L_c + L_c A_c^T + B_c B_c^T &= 0 \end{aligned} \quad (20)$$

の解である。なお、3点評価の場合は式を用いて、3つの  $\|G(s)\|_2$  の総和を求めることになる。

Step 5: ここからGAの計算を開始する。GAでは各固体についてStep 1~Step 4までの行程を繰り返し、それぞれの固体の評価値  $J_z$  を求め、個体の中で一番小さい評価値を見いだしたとき1世代目の終了となる。そして次の世代に進み、また各個体についてStep 1~Step 4までを繰り返す。

Step 6: 目的関数の値が任意で設定した値より小さくなった場合や、任意に設定された世代数に達した場合はプログラムを終了する。これらの条件を満たさなかった場合はStep 5に戻る。

### 6. 数値例

前節で提案した手法を用いて図1の片側固定の平板構造モデルに適用した結果を以下に示す。平板構造モデルの寸法諸元と物性値は表1に示す。本論文では外乱入力  $d$  の位置を節点座標  $(x, y) = (0.24, 0.10)$  とした。式(19)に基づく評価関数は次の2つのケース、つまり、

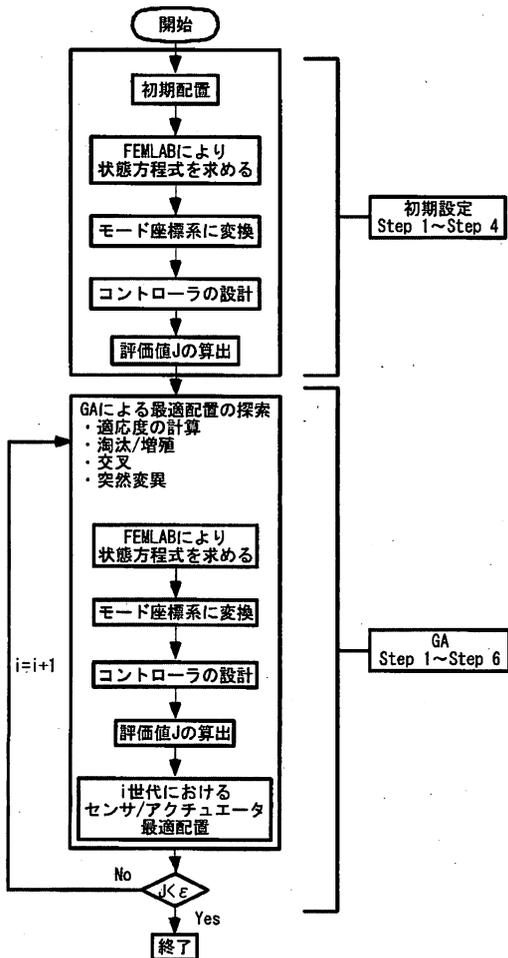


図3 最適化アルゴリズム

GA による平板構造物におけるセンサ/アクチュエータの最適配置

ケース 1: 平板の中央先端部分の節点座標  $Z_2: (x, y) = (0.24, 0.05)$  における評価値  $J_z$

ケース 2: 平板の先端部分の節点座標 3 点  $Z_1: (x, y) = (0.24, 0.00)$ ,  $Z_2: (x, y) = (0.24, 0.05)$ ,  $Z_3: (x, y) = (0.24, 0.10)$  における評価値  $J_z$  の総和

を考えた。これは評価の相違により結果に違いが出るかを考察するために設定した。そして外乱  $d$  の配置に対するケース 1 とケース 2 の 2 通りの評価についての制振効果を調べた。GA の設定においては、個体数 10, 交叉率 0.2, 変異率 0.03 で計算した。その結果, 3 つのセンサと 3 つのアクチュエータの初期配置と最適配置されたケース 1 の場合とケース 2 の場合のそれぞれについて表 2 と表 3 に示す。表 2 および表 3 の Point 欄は, センサの場合は FEMLAB における節点の番号, アクチュエータの場合はエッ

ジを含んだ節点の番号を表している。

図 4 は, 外乱  $d$  から評価端点  $Z_2: (x, y) = (0.24, 0.05)$  までの伝達特性で, 制御していない場合と最適配置により制御された場合のボード線図の比較である。図より, 1 次モードのゲインピークが大幅に下がっており, 当然ながら制御した場合の方が振動を抑えていることがわかる。図 5 はケース 2 の場合であり, 同様な傾向を示している。図 6 と図 7 は GA の計算経過を示したものであり, 各世代における最小評価値  $J_z$  の推移を表したグラフである。ケース 1 の場合は 1 世代目から 3 世代目までにかけて評価値の急激な低下が見られ, その後は徐々に低下している。ケース 2 の場合は評価点を 3 つ考慮しているのでケース 1 に比べて評価値  $J_z$  の値が高めである。

次に GA により最適配置されたセンサおよびアクチュエータの配置を FEMLAB で求めたモード形に配置して考察する。図 8~図 10 および図 11~図 13 はそれぞれケース 1 とケース 2 の場合であり, センサおよびアクチュエータの最適配置と 1 次モードから 3 次モードとの関係を示した図である。はじめにセンサの位置について考察する。ケース 1 の場合, 全てのモードにおいて変位量の大きい先端部分に 2 個のセンサ (センサ 1 とセンサ 2) が配置された結果となっている。この 2 個のセンサは変位情報を得

表 1 平板構造物の寸法諸元と物性値

Plate Length : $L$	$240 \times 10^{-3} [m]$
Plate Height : $t$	$7.00 \times 10^{-3} [m]$
Plate Width : $b$	$100 \times 10^{-3} [m]$
Density : $\rho$	$7.87 \times 10^3 [kg/m^3]$
Young's Module : $E$	$207 \times 10^9 [Pa]$
Poisson's Ratio : $\nu$	0.3

表 2 センサ・アクチュエータの最適配置 (ケース 1)

センサ				アクチュエータ			
No.	$X_{ini}$	$Y_{ini}$	Point	No.	$X_{ini}$	$Y_{ini}$	Point
1	0.1200	0.0250	111	1	0.1700	0.0125	155
2	0.1200	0.0500	113	2	0.1700	0.0375	157
3	0.1200	0.0750	115	3	0.1700	0.0750	160
No.	$X_{opt}$	$Y_{opt}$	Point	No.	$X_{opt}$	$Y_{opt}$	Point
1	0.2400	0.0250	219	1	0.1700	0.0125	155
2	0.2400	0.0375	220	2	0.0400	0.0875	44
3	0.1200	0.0375	112	3	0.1200	0.0875	116

表 3 センサ・アクチュエータの最適配置 (ケース 2)

センサ				アクチュエータ			
No.	$X_{ini}$	$Y_{ini}$	Point	No.	$X_{ini}$	$Y_{ini}$	Point
1	0.1200	0.0250	111	1	0.1700	0.0125	155
2	0.1200	0.0500	113	2	0.1700	0.0375	157
3	0.1200	0.0750	115	3	0.1700	0.0750	160
No.	$X_{opt}$	$Y_{opt}$	Point	No.	$X_{opt}$	$Y_{opt}$	Point
1	0.2400	0.0250	101	1	0.0400	0.0875	82
2	0.0900	0.0500	221	2	0.1300	0.0000	80
3	0.1800	0.0750	108	3	0.0800	0.0875	147

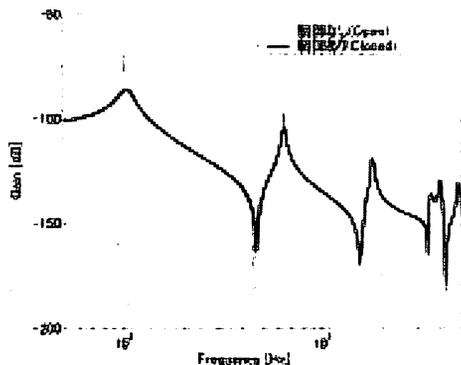


図 4 評価点  $Z_2$  の周波数応答 (ケース 1)

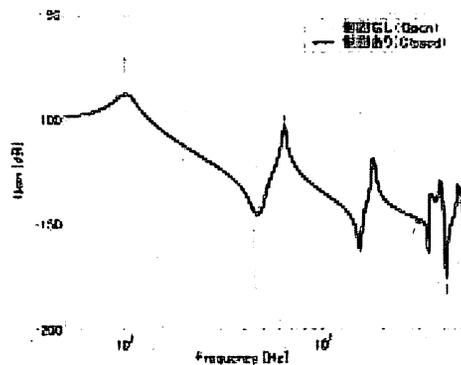


図 5 評価点  $Z_2$  の周波数応答 (ケース 2)

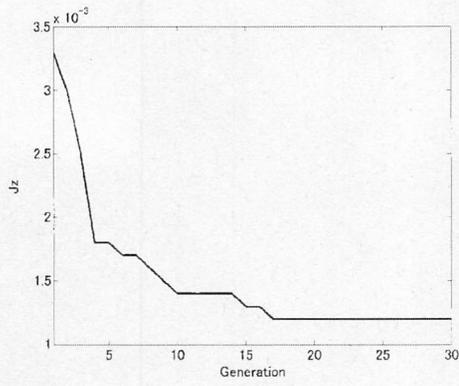


図6 各世代の最小関数値  $J_z$  (ケース1)

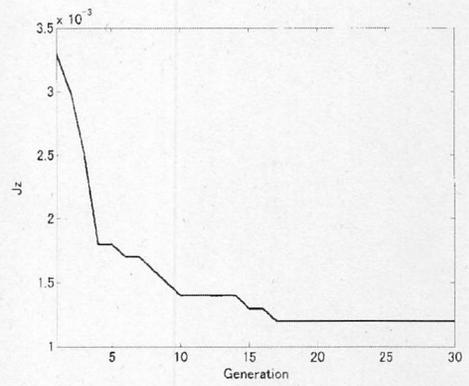


図7 各世代の最小関数値  $J_z$  (ケース2)

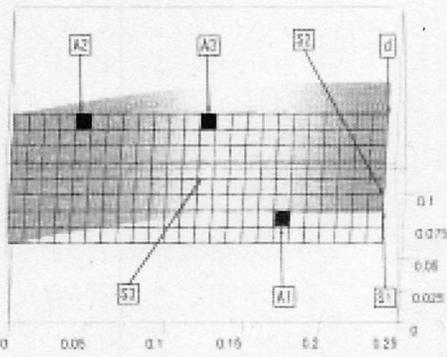


図8 1次モードにおける最適配置 (ケース1)

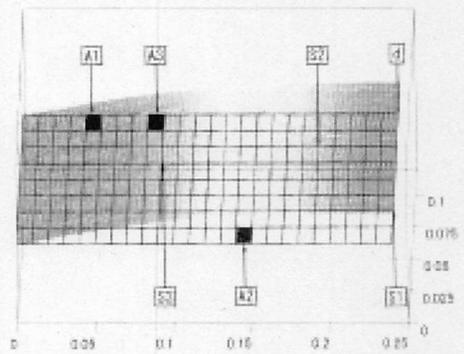


図11 1次モードにおける最適配置 (ケース2)

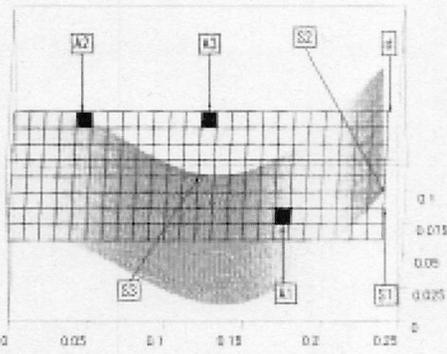


図9 2次モードにおける最適配置 (ケース1)

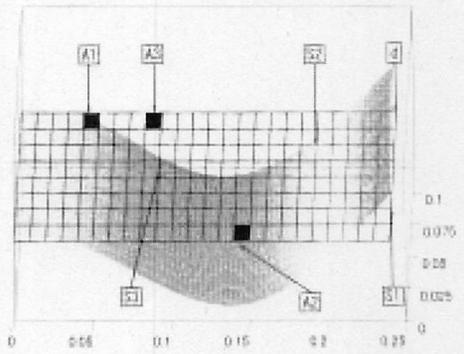


図12 2次モードにおける最適配置 (ケース2)

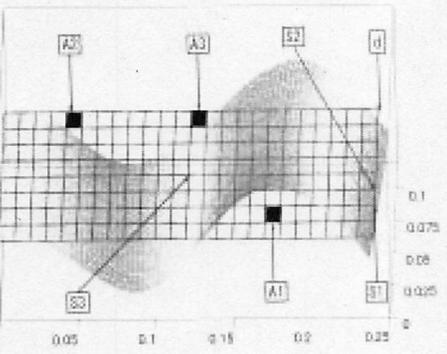


図10 3次モードにおける最適配置 (ケース1)

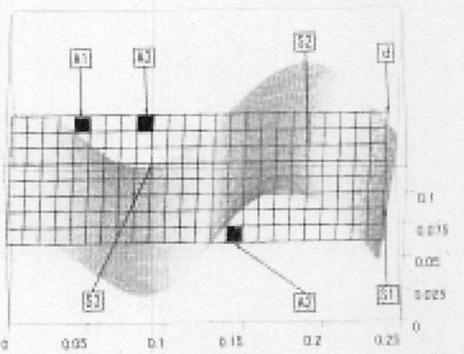


図13 3次モードにおける最適配置 (ケース2)

る上でも有効なセンサであると考えられる。センサ3は2次のモード形において振幅の大きい腹の部分に配置されていて、たわみ情報を得る上でも有効な配置であると考えられる。しかし、3次のモード形においてはほぼ節の部分にあり有効性があまり考えられない。ケース2の場合、変位量の多い先端にセンサ1が配置された結果となり情報を得る上で有効であると考えられる。センサ2は1次モードと2次モードにおける比較の変位情報の多い場所で有効な配置と考えられる。また、センサ3は2次モードでは節付近であり有効性が期待できないが、1次のモード形では、比較の変位情報の多い配置、3次モードにおいては腹付近であり、有効的な配置と考えられる。

次にアクチュエータの配置について考察する。ケース1の場合、アクチュエータ2は根元に配置されているので、1~3次モードの曲げモードを抑えることに有効であると考えられる。アクチュエータ3は方向のほぼ中央に配置され、1次モードにあまり寄与しているとは考えられないが、2次モードに対しては腹の部分に配置され、曲げを抑制するための最適な配置と考えられる。アクチュエータ1は1次モードにおいては有効性が考えられないが、2次モード、3次モードにとっては腹付近であり、曲げの抑制の効果が考えられる。ケース2の場合、アクチュエータ1は根元付近に配置され、1~3次モードに対して有効であると考えられる。アクチュエータ2はx方向の中央付近に配置され2次モードにおいては腹付近、またアクチュエータ3は1次モードの根元付近、3次モードにおいては腹付近にあり、曲げを抑制する効果があると考えられる。

ところで、評価点 $Z_2$ 以外の節点の閉ループ系の伝達特性を調べるために、外乱入力 $d$ からそれぞれ評価点 $Z_1$ 、 $Z_2$ および $Z_3$ までの閉ループ伝達特性を調べてみた。図14~図16はケース1の場合で、外乱入力 $d$ から各評価点 $Z_1$ ~ $Z_3$ における閉ループ系の最適化前と最適化後のボード線図の比較である。図より、評価点 $Z_2$ における伝達特性は改善されているが、評価点 $Z_1$ 以外の伝達特性つまり外乱 $d$ から評価点 $Z_1$ および $Z_3$ への伝達特性は低周波領域でゲインが上がっていることがわかる。このことについてケース2の場合と比較してみる。図17~図19はケース2の結果であり、この場合はGAの計算アルゴリズムの中で、3点全ての評価値( $Z_1$ 、 $Z_2$ および $Z_3$ )を考慮しているため、外乱 $d$ から端点 $Z_1$ および $Z_3$ への伝達特性は悪くなっていない。これは外乱 $d$ が例えば位置 $Z_2$ のように真ん中に入力される場合、

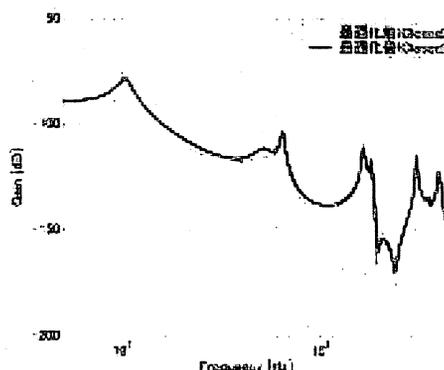


図14 外乱入力 $d$ から座標 $Z_1$ までの伝達特性 (ケース1の場合)

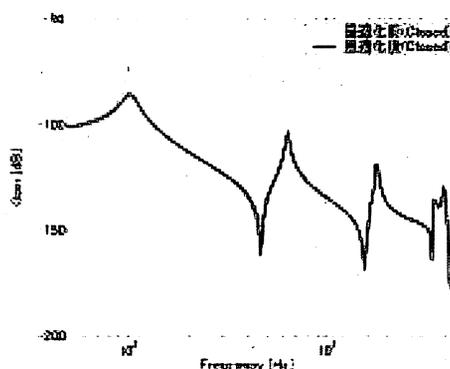


図15 外乱入力 $d$ から座標 $Z_2$ までの伝達特性 (ケース1の場合)

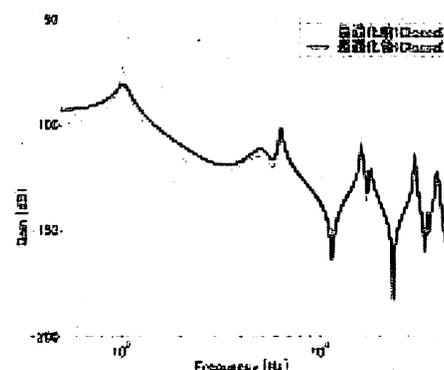


図16 外乱入力 $d$ から座標 $Z_3$ までの伝達特性 (ケース1の場合)

平板は曲げのみを受けると考えられるが、外乱 $d$ が端点 $Z_1$ および $Z_3$ に入力される場合は、ねじりのモードを受けることが予想される。そのため、外乱からの伝達特性は中央と端とでは伝達特性がかなり異なると考えられる。このことより、評価関数を設定する場合は、制振の目的がある一部分の制振なのか、あるいは全体的に制振が必要なのかを考えてGA

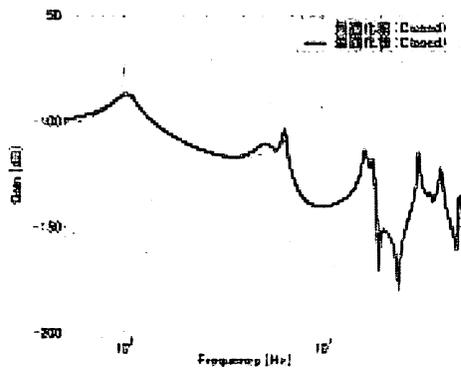


図17 外乱入力  $d$  から座標  $Z_1$  までの伝達特性 (ケース2の場合)

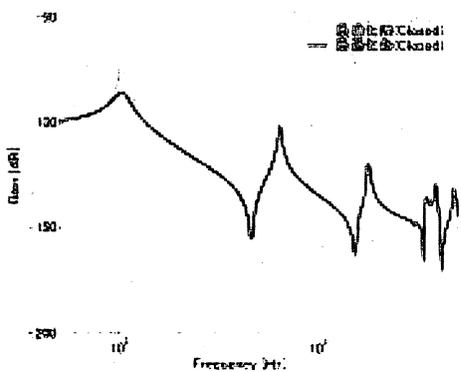


図18 外乱入力  $d$  から座標  $Z_1$  までの伝達特性 (ケース2の場合)

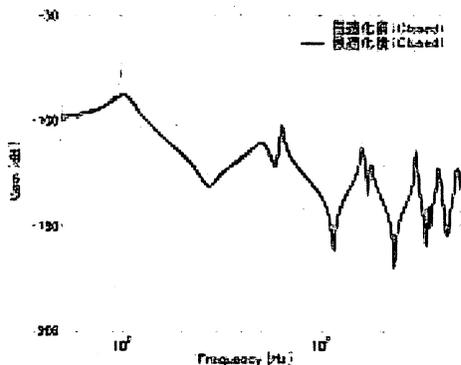


図19 外乱入力  $d$  から座標  $Z_1$  までの伝達特性 (ケース2の場合)

のアルゴリズムの評価関数を設定することが重要であると考えられる。

## 7. 結 言

本研究では、片側固定の平板構造物の有限要素モ

デルを例題とし、制振制御を目的にセンサ/アクチュエータ配置の最適化を行った。得られた結果をまとめると以下ようになる。

- (1) 本解析アルゴリズムは、有限要素解析ソフトと制御系設計ソフトをリンク、統合化し、制御対象モデルをモード変換し、状態方程式に変換することが可能である。
- (2) センサとアクチュエータの配置場所の最適化に関しては、配置パラメータが離散的であるために、最適化手法として遺伝的アルゴリズムを利用した。提案したGAを用いた最適化アルゴリズムは、センサ/アクチュエータという構造系の配置パラメータと制御系を最適化する同時最適化設計法である。
- (3) 評価方法の違いについて検討した結果、1点のみを評価関数に利用した場合よりも3点を考慮した評価関数を用いた場合の方が、曲げモードばかりだけではなくねじりモードにも対応する制振効果が得られている。したがって、制振の目的により評価関数を考えて設定することが重要である。
- (4) センサはたわみ量の多い位置に配置し、アクチュエータは曲げによる変形が大きい根元付近や腹の部分に配置するのが望ましい。
- (5) 本研究ではGAの評価関数として1点評価、3点評価のみを考えたが、平板モデルの全体的な制振を考えると多くの評価点を考慮した方が有効であると考えられる。この点に関しては今後の検討課題としたい。また、センサ/アクチュエータの最適個数を考慮したアルゴリズムについても、コスト対効果という点で今後の課題として残されている。

## 参考文献

- 1) FEMLAB Structural Mechanics Module, COMSOL AB. (2002)
- 2) Using MATLAB, The Math Works Inc. (1999)
- 3) 佐伯, LTR法とその倒立振り子への適用, システム/制御/情報, 35-5 (1991), pp.260-267
- 4) 酒和正敏・田中雅博・日本ファジイ学会編, ソフトコンピューティングシリーズ1 遺伝的アルゴリズム, 朝倉書店 (1995)
- 5) 安居院猛・長尾智春, ジェネティックアルゴリズム, 昭晃堂 (1999)