柔軟構造物の構造と制御系の
同時最適設計法の開発*Development of Simultaneous Optimum Design
of Structural and Control System
of Flexible Structures岩倉 卓三*¹池田雅夫*²河村 庄造*¹安達和彦*³Takuzo IWATSUBO, Kobe University
(Rokkodai-cho, Nada-ku, Kobe-shi)
Masao IKEDA, Kobe University
Shozo KAWAMURA, Kobe University
Kazuhiko ADACHI, Kobe University Graduate School

This paper presents a new approach to the simultaneous optimum design of a structural and control system in order to realize an increasing number of elements. For simplicity, we take up a flexible beam as a dynamic model which based on the Euler-Bernoulli theory. The lateral vibration of beam is controlled under given disturbance. For simplicity, the transformation ratio of cross-sectional area is taken as a structural design variable. In this way, the number of the structural design variable is only one in spite of the increasing number of elements. However, the shape of the structure is limited. The location of the sensor and actuator is taken as a control design variable. These two design variables are optimized to minimize a performance function composed of kinetic and control energy. In the numerical examples, it is shown that the simultaneous optimum design of the structural and control system is useful.

Key Words: Structural and Control System Simultaneous Optimization, Spillover, Active Vibration Control, Vibration of Continuous System, Large Space Structure, Low Authority Control, High Authority Control

1. 緒言

産業用ロボットアームなどの柔軟構造物や、宇宙ステーションなどの宇宙構造物に共通する特徴は、非常に低い固有振動数を持ち、構造減衰が非常に小さいことである。そのため、わずかの外乱でも振動が励起され、姿勢制御や形状制御が必要となる。これらの特徴は構造物の構造自体に依存するものであり、構造系と制御系の結び付きはきわめて密接である。

従来、柔軟構造物の設計は、構造設計と制御設計が別々に行われており、構造設計の際に制御の要求が入りにくいので、制御の高精度化には限界がある。したがって、構造系と制御系を同時に考慮した最適設計手法の構築が必要であり、最近多くの研究がなされている⁽¹⁾⁻⁽³⁾。代表的な研究にJ. Onodaら⁽³⁾のものがあ、そこではビーム状構造物を5要素に分割し、構造物の断面積、センサとアクチュエータの配置を最適化している。しかし、構造物モデルの要素分割数が多い場合には計算が困難になる、という問題点があり十分とは言えない。本研究は、この問題点を改善した新しい同時最適設計手法の一つを提案する。構造物モデルの要素分割数を多くしても、設計変数が増加しないように定式化を工夫する。この設計手法を片持ちはりに適用し有効性を検討する。

2. 定式化

2.1 構造物のモデル化 柔軟構造物は連続体であるので、有限要素法で離散化して数学モデルを作る。柔軟構造物の運動は次式の運動方程式に支配される。

$$[M]\{\ddot{p}\} + [D]\{\dot{p}\} + [K]\{p\} = [L_a]\{f\} \quad (1)$$

$$\{y\} = [L_s]\{\dot{p}\} \quad (2)$$

ここで $\{p\}$ は柔軟構造物をいくつかの節点で表したときの節点変位ベクトル、 $[M]$ 、 $[D]$ 、 $[K]$ は質量マトリックス、減衰マトリックス、剛性マトリックスである。また $\{f\}$ は r 個のアクチュエータからの制御入力、 $\{y\}$ は s 個のセンサからの出力を表すベクトルである。式(2)に示すようにセンサ出力には速度信号を用いる。 $[L_a]$ はアクチュエータからの力を各節点に配分し、 $[L_s]$ は各節点の速度を s 個のセンサに配分する。これらの式を座標変換

$$\{p\} = [\phi]\{\eta\} \quad \dots\dots\dots (3)$$

でモード座標に変換すると次式のようにになる。ただし、 $[D]$ は対角化できるものと仮定する。

$$\begin{aligned} \{\ddot{\eta}\} + [\Lambda]\{\dot{\eta}\} + [\Omega]\{\eta\} \\ = [\phi]^T [L_a]\{f\} \quad \dots\dots (4) \end{aligned}$$

$$\{y\} = [L_s][\phi]\{\dot{\eta}\} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで $\{\eta\}$ はモード変位ベクトル、

$$[\Lambda] = \text{diag}(0, 0, \dots, 0, 2\zeta_1\omega_1, \dots, 2\zeta_n\omega_n)$$

$$[\Omega] = \text{diag}(0, 0, \dots, 0, \omega_1^2, \dots, \omega_n^2)$$

ζ_i , ω_i ($i=1\sim n$)はモード減衰比、固有振動数である。

* 原稿受付 平成2年6月25日。

*¹ 正員、神戸大学工学部 (〒657 神戸市灘区六甲台町1)。*² 神戸大学工学部。*³ 学生員、神戸大学大学院。

$[\phi]$ はモードマトリックスである。 $[\Lambda]$, $[\Omega]$ の対角成分には 6 個の零が並ぶ。これは宇宙構造物の剛体運動を表し、固有振動数零の剛体モードである。ロボットアームなど地上の柔軟構造物には存在しない。後の制御設計で述べるように、制御系に D V F B 制御を用いるので、アクチュエータは剛体モードを励起しないとして⁽⁴⁾、ここでは柔軟モードのみ取り扱う。式(4), (5)の $\{\eta\}$ から剛体モードを取り除いて新たに $\{\eta\}$ と置き直すと、

$$\begin{aligned} \{\ddot{\eta}\} + [\Lambda \bullet] \{\dot{\eta}\} + [\Omega \bullet] \{\eta\} \\ = [\phi \bullet]^T [L \bullet \bullet] \{f\} \quad \dots \dots (4') \end{aligned}$$

$$\{y\} = [L s \bullet] [\phi \bullet] \{\dot{\eta}\} \quad \dots \dots (5')$$

ここで

$$[\Lambda \bullet] = \text{diag}(2\zeta_1 \omega_1, \dots, 2\zeta_n \omega_n)$$

$$[\Omega \bullet] = \text{diag}(\omega_1^2, \dots, \omega_n^2)$$

$[\phi \bullet]$, $[L \bullet \bullet]$, $[L s \bullet]$ は $(n \times n)$, $(n \times r)$, $(s \times n)$ のマトリックスである。式(4'), (5')を状態変数を用いて表現すると次式のようになる。

$$\dot{z} = A z + B u \quad \dots \dots (6)$$

$$y = C z \quad \dots \dots (7)$$

ここで、

$$z = \begin{Bmatrix} \eta \\ \dot{\eta} \end{Bmatrix}, \quad A = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -\omega_i^2 & -2\zeta_i \omega_i \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ \dots \\ \phi \bullet^T \end{bmatrix} [L \bullet \bullet], \quad C = [L s \bullet] \begin{bmatrix} D & \phi \bullet \end{bmatrix}$$

$$u = \{f\}, \quad y = \{y\}$$

z は $2n$ 次元の状態変数、 A は $(2n \times 2n)$ のプラントマトリックスで、 B は $(2n \times r)$ 、 C は $(s \times 2n)$ のマトリックスである。また u は r 次元の制御入力、 y は s 次元のセンサ出力である。

2.2 制御設計 連続体では理論上無限個の振動モードを持っているが、ある有限の高次モード n で打ち切ってモデル化される。制御用コンピュータの処理能力の限界からモデルの全てのモードを制御することは不可能であり、制御系はモデルの振動に大きな影響を及ぼす m 個の低次モードだけで構成された低次元モデルに対して設計する。その結果、モデルの振動モードのうち制御設計で無視した高次モードが制御力によって励起されシステム全体が不安定になるスピルオーバー不安定が予想される。これを回避するために階層構造の制御系として L A C / H A C (Low Authority Control/High Authority Control)⁽⁶⁾ を採用する。制御則は次式で与えられる。

$$u = u_L + u_H \quad \dots \dots (8)$$

ここで、 u_L は L A C の制御入力、 u_H は H A C の制御入力である。

2.2.1 L A C L A C の制御則として D V F B (Direct Velocity Feedback) 制御^{(4), (5)}を用いる。次式に示す直接出力フィードバック u_L をほどこし、全ての振動モードに減衰を付加させる。

$$u_L = -K v \cdot y \quad \dots \dots (9)$$

ここで $K v$ は $(r \times s)$ のゲインマトリックスである。

なお、ゲインの値は一定として L A C の最適設計はしない。センサとアクチュエータを同じ位置に配置するので $r = s$ となり、 $[L s] = [L \bullet]^T$ であるから、

$$C = B^T \quad \dots \dots (10)$$

式(6), (7), (9), (10) より D V F B 閉ループ系

$$\dot{z} = (A - B \cdot K v \cdot B^T) z \quad \dots \dots (11)$$

2.2.2 H A C 制御モードを低次の m 次とし、最適制御理論⁽⁶⁾に基づき最適レギュレータを構成する。式(11)の閉ループ系を制御対象とする。制御モードの状態方程式および出力方程式は、

$$\begin{aligned} \dot{z}_m &= A_m z_m + B_m u \\ y_m &= C_m z_m \end{aligned} \quad \dots \dots (12)$$

である。式(12)に式(8), (9), (10)を代入すると

$$\begin{aligned} \dot{z}_m &= A_m z_m + B_m (u_L + u_H) \\ &= (A_m - B_m \cdot K v \cdot B_m^T) z_m + B_m u_H \\ &= A_{Hm} z_m + B_m u_H \end{aligned}$$

であるから、

$$\begin{aligned} \dot{z}_m &= A_{Hm} z_m + B_m u_H \\ y_m &= C_m z_m \end{aligned} \quad \dots \dots (12')$$

制御対象 式(12')において次の 2 次形式評価関数 J

$$J = \int_{t_0}^{\infty} (y_m^T Q y_m + u_H^T R u_H) dt \quad \dots (13)$$

を最小にするようなフィードバック制御則が最適制御である。 Q , R は $(r \times r)$ の正定値の重みマトリックスである。最適制御理論によれば J を最小にするような u_H は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} u_H &= -F z_m \\ F &= R^{-1} B_m^T P \end{aligned} \quad \dots \dots (14)$$

このとき、評価関数 J の最小値は、

$$J = z_{m0}^T P z_{m0} \quad \dots \dots (15)$$

である。ここで z_{m0} は初期状態変数、 P は $(2n \times 2n)$ で次式に示す行列リッカティ方程式の解⁽⁸⁾である。

$$\begin{aligned} C_m^T Q C_m - P B_m R^{-1} B_m^T P \\ + A_{Hm}^T P + P A_{Hm} = 0 \end{aligned}$$

式(8), (9), (10), (14)より L A C / H A C の制御則は次式で与えられる。

$$u = u_L + u_H = -K v \cdot B^T \cdot z + F \cdot z_m \quad \dots \dots (16)$$

H A C の閉ループ系は次のようになる。

$$\dot{z}_m = [A_m - B_m (K v \cdot B_m^T + F)] z_m \quad \dots \dots (17)$$

2.3 設計変数 これまでの同時最適設計例では構造系の設計変数として構造物の断面積を採用したものが多く、モデルの各要素の断面積が設計変数になるので構造系の設計変数の数は要素分割数に等しくなる。この場合、要素分割数を増加させるほど設計変数が増加し拘束条件も増加するので、最適化アルゴリズムで設計変数を最適化することが非常に困難になる。そのため構造物モデルの要素分割数が少ない場合しかできない。設計変数を増加させることなく要素分割数を増加させることができるように変数設定の仕方を工夫する必要がある。本研究では従来と同じように構造系では構造物の断面積を最適化するが、各要素の断面積を独立な設計変数にせず、構造物全体での断面積の変化率を設計変数にすることによって断面積を変化率の従属変数にする。このように定式化すれば、構造物は断面積の変化率 δ によって決まる形状を持つという制約を受けるが要素分割数を多くしても変数は増加しない。

一方、制御系の設計変数としてセンサとアクチュエータの位置 x_{sai} ($i=1\sim r$)を採用する。センサとアクチュエータは同じ位置に配置するので制御系の設計変数の数は r 個となる。これはモデルの要素分割数とは無関係であり、分割数を増加させても変化しない。

2.4 同時最適設計の定式化 設計変数は構造物全体での断面積の変化率 δ 、センサとアクチュエータの位置 x_{sai} ($i=1\sim r$)の $1+r$ 個を採用する。

構造物の形状は δ によって決まるので、ある与えられた δ に対して構造物の質量マトリックス、剛性マトリックスが計算でき状態方程式(12')が求められる。その構造物を r 個の制御装置(センサとアクチュエータ)で制御する場合、式(13)を最小にする最適制御則、式(14)が決定され、システムの制御則が式(16)で与えられるので制御系の設計変数 x_{sai} ($i=1\sim r$)だけでなく構造系の設計変数 δ に対する評価も式(13)に含まれていることになる。したがって本同時最適設計の評価関数には式(13)を採用し、後に示す制約条件のもとでこの評価関数を最小化する。式(13)を次のように2項に分けると、

$$J = J_1 + J_2$$

$$J_1 = \int_{t_0}^{\infty} (y_n^T Q y_n) dt, \quad J_2 = \int_{t_0}^{\infty} (u_n^T R u_n) dt$$

J_1 は出力(速度)の2乗積分値で運動エネルギーを表しシステムの出力の過渡特性に対する評価を、 J_2 は制御入力 u の2乗積分値で制御エネルギーを表し入力エネルギー消費に対する評価を与えていることがわかる。

制御下での柔軟構造物モデルの運動は式(1)あるいは式(12)に支配され、制御系はLAC/HACを採用しているので制御則式(16)に従う。これらは明らかに制約条件になっており、挙動制約(Behavioural

Constraint)条件と呼ばれる。また、設計変数として δ や x_{sai} ($i=1\sim r$)を選んだこと自体、設計する上で制約を与えたことになり、これら以外の制御系のフィードバックゲインを除く構造系・制御系のパラメータは、ここでは同時最適設計の対象にならない。更に設計変数自身も次式に示すような制約を受ける。これらは設計空間での変数の動きうる範囲を決めるもので側面制約(Side Constraint)条件と呼ばれる。

$$\delta_{(L)} < \delta < \delta_{(U)}, \quad x_{sai} \in X_{sa}$$

ただし、 $\delta_{(L)}$ は δ の下限値、 $\delta_{(U)}$ は δ の上限値であり、 X_{sa} は制御装置(センサとアクチュエータ)の配置が可能な構造物上の領域である。

特に、構造物全体での断面積の変化率 δ の導入は、モデルの要素分割数の増大を可能にする一方で構造物の形状の選択の余地を非常に狭くするので、本同時最適設計で得られる最適形状は、制約条件下での非常に狭い意味での最適形状でしかない。

本研究で取り扱う同時最適設計問題はTable 1に示すように定式化できる。

2.5 最適設計アルゴリズム 同時最適設計は δ と x_{sai} ($i=1\sim r$)の $1+r$ 個の設計変数の値を変化させていったとき、その各々の値に対する式(13)で計算される評価関数の最小値が最も小さくなる(極小値)ときの設計変数値を求めることによって行う。極小値はパウエル法⁽⁷⁾を用いて求める。Fig.1に最適設計のアルゴリズムを示す。 δ と x_{sai} ($i=1\sim r$)の変更量はパウエル法のアルゴリズムの中で与えられる。いくつかの初期値を与えて局所的な最適解(極小値)を求め、その中で最も評価関数の値が小さくなるものを大域的な最適解とする。

3. 数値例

柔軟構造物モデルとして Fig.2 (a)に示す長さ L で

表1 同時最適設計問題の定式化

Design Variables	1. Transformation Ratio of Cross-sectional Area; δ 2. Sensor and Actuator Location; x_{sai} ($i=1\sim r$)
Constraints	1. Behavioural Constraints Eq. (1) or (12) : Eq. of Motion Eq. (16) : Control Law 2. Side Constraints $\delta_{(L)} < \delta < \delta_{(U)}$ $x_{sai} \in X_{sa}$
Evaluation Function	$J = \int_{t_0}^{\infty} (\underbrace{y_n^T Q y_n}_{\text{Kinetic Energy}} + \underbrace{u_n^T R u_n}_{\text{Control Energy}}) dt$

図1 最適設計アルゴリズム

厚さ T 一定, 固定端から自由端まで変化率 δ で幅が変化するはりを採用し, 本設計手法を適用する. Table 2 にはりの諸元を示す. 制御系はセンサとアクチュエータを各々1個使用する1入力1出力系 ($r=s=1$) とし, 設計変数 x_{sa1} ($i=1$) を x_{sa} と表す. 1入力1出力系であるから式(13)の重みマトリックスはスカラとなる. 最適レギュレータ設計では重み行列 Q, R の選定が非常に重要であるが, 最適な Q, R の選定のための規範がないので, ここでは $Q=R=1$ とする. 初期外乱として自由端に Fig. 3 に示す大きさ $1.0(N)$ で時刻 $t=0$ で除荷するステップ状外力を採用し, はりの曲げ振動を

図2 柔軟構造物モデル

制御する. 節点の並進変位と回転変位を考慮する. 制御設計において LAC は最適設計しておらず, LAC ゲインは K_v を0から ∞ まで変化させたときの $DVFB$ 閉ループ極の根の実部の絶対値をプロットした線図を作り, 高次モードがよく減衰するような値を選ぶ. ここでは $K_v = 0.4(kg/sec)$ とした. HAC の制御モード数は, 自由端に初期外力が加わる場合であるから, 低次の5次モードまでとする.

3・1 モデル化 はりの曲げ振動(自由振動)の運動方程式は重力の影響を無視すると次式で表される.

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left\{ E I(x) \frac{\partial^2 Y}{\partial x^2} \right\} + \rho A(x) \frac{\partial^2 Y}{\partial t^2} = 0 \quad \dots \dots \dots (18)$$

Y は横変位, $E I$ は曲げ剛性, ρ は材料密度, A は断面積である. はりを n 要素に分割するので要素の長さ $h = L/n$ である. Fig. 2 (b) に示すように各々の要素で軸方向に局所座標 x をとる. 基本形状を幅 b_0 の一様断面はり ($\delta = 0$) とすると幅の変化率が δ の場合, k 番目の要素の中央の幅 b_{ck} は次式で与えられる.

$$b_{ck} = \left(k - \frac{n}{2} - \frac{1}{2} \right) h \delta + b_0 \quad \dots \dots \dots (19)$$

この式(19)からはりの形状が決まる. 要素内では幅一定とすると,

$$\left. \begin{aligned} I_k &= \frac{1}{12} \cdot b_{ck} \cdot T^3 \\ A_k &= b_{ck} \cdot T \end{aligned} \right\} \quad \dots \dots \dots (20)$$

式(20)から k 番目の要素の運動方程式は,

$$E I_k \frac{\partial^4 Y}{\partial x^4} + \rho A_k \frac{\partial^2 Y}{\partial t^2} = 0 \quad \dots \dots \dots (21)$$

となり, この式を変数分離法で解く.

文献(8)の内挿関数を用いた方法により各要素の質量マトリックス, 剛性マトリックスを計算する. これらを組み合わせて全体系の運動方程式(式(1))を作り, モード解析の手法を適用してモード座標に変換(式(4))した後, システムの状態方程式(式(12))を作る. なお, 柔軟構造物では一般にモード減衰率は小さく, その値を正確に決めることは非常に難しい⁽⁹⁾ のでモード減衰率一定とし, $\zeta_i = 0.001$ とする.

図3 初期外力

3・2 固有振動数 幅一定($\delta=0$)の一様断面はりの固有振動数を計算するとTable 3 (a)のようになり、最低次のモードの固有振動数は1 Hz強と非常に低い。柔軟構造物は地上でも数多くみられるので、重力を考慮した場合の定式化も行い、その結果をTable 3 (b)に示す。Table 3 (a), (b)の両者はほとんど一致しており、今回の数値例では重力の影響はわずかであるとしてこれを無視する。

3・3 同時最適設計とその有効性の検討 同時最適設計は幅の変化率を3通り、センサとアクチュエータの位置を3通りの合計9通りの初期条件を与えて行った。計算結果をTable 4のCase 1~9に示す。いずれの場合も幅の変化率、センサとアクチュエータの位置は等しくなっている。

同時最適設計の有効性を検討するために、制御系のみ最適設計、従来からの柔軟構造物の設計法に基づく設計、という2つの設計を行い比較する。

一つ目の制御系のみ最適設計は幅一定の一様断面はり(幅の変化率 $\delta=0$)に対してセンサとアクチュエータの位置だけを最適化することによって行う。結果をTable 4のCase 11~13に示す。センサとアクチュエータの初期位置3通りに対して2通りの最適解を得たが、どちらの場合も、評価関数の値は同時最適設計したものより大きくなっている。

二つ目は構造設計と制御設計を別々に行うもので、構造設計を動的応答における最適設計問題としてとらえ、初期外力に対する自由端の応答変位のある時間内の2乗平均値を最小とするような⁽¹⁸⁾幅の変化率を求める最適形状設計を行う。そして、求められた最適な幅の変化率をもつはりに対して式(13)を使用して最適制御設計を行う。構造設計の評価関数 J_s に、

$$J_s = \sqrt{\frac{1}{ts} \cdot \sum_{i=1}^{ts} (y_{fi})^2} \dots \dots \dots (22)$$

を採用する。 y_f は自由端の変位、 ts は時間分割数である。初期条件として幅の変化率を3通り与えて構造設計を行い、その結果をTable 5に示す。最適な幅の変化率をもつはりのセンサとアクチュエータの位置を最適化した結果をTable 4のCase 14~15に示す。初期条件3通りに対し2通りの最適解を得た。Case 15, 16では同時最適設計したものと同じ解が得られたが、Case 14では、はりの形状のみ同じで、評価関数の値がかなり大きくなっている。

Fig. 4 (a)に同時最適設計したCase1, Fig. 4 (b)に制御系のみ最適設計したCase 11, Fig. 4 (c)に従来の

表2 柔軟はりの諸元

$L = 0.9$	$\rho = 7.86E+3 \text{ kg/m}^3$
$T = 0.0012$	$\zeta = 0.001$
$b_g = 0.06$	$n = 40$
$E = 2.0954E+5 \text{ Pa}$	

表3 柔軟はりの固有振動数

Mode	(a)	(b)
1	1.22500	1.22507
2	7.67695	7.67734
3	21.4960	21.4970
4	42.1255	42.1273
5	69.6439	69.6466

表4 最適設計結果

	DELTA		S/A LOCATION		Value of J
	δ_g	δ_{op}	x_{sag}	x_{saop}	
1	0.000		0.450		
2	0.000		0.870		
3	0.000		0.030		
4	0.100		0.450		
5	0.100	-0.120	0.870	0.9000	0.068361
6	0.100		0.030		
7	-0.100		0.450		
8	-0.100		0.870		
9	-0.100		0.030		
11			0.450	0.6683	0.174096
12		0.000	0.870	0.9000	0.090640
13			0.030	0.9000	0.090640
14			0.450	0.5725	0.224459
15		-0.120	0.870	0.9000	0.068361
16			0.030	0.9000	0.068361

δ_g :Initial transformation ratio of width
 δ_{op} :Optimum transformation ratio of width
 x_{sag} :Initial sensor and actuator location
 x_{saop} :Optimum sensor and actuator location

表5 構造設計(形状最適化)

	DELTA		Value of J_s
	δ_g	δ_{op}	
a	0.000		
b	0.100	-0.120	0.062753
c	-0.100

図4 自由端の変位応答

設計法に基づく場合のCase 14のそれぞれの自由端変位を示す。これらの図から、評価関数の値が最も小さいCase 1の場合が最も制御性能がよく急速に減衰していることがわかる。また、Fig. 5にCase 1, 11, 14のはりの形状およびセンサとアクチュエータ位置を示す。

今回の数値例では、はりの自由端に初期外力が作用するときの曲げ振動の制御を行い、はりの幅が直線的に変化するようにしているので、(a)に示すCase 1の固定端から自由端に向かって細くなる形状および自由端のセンサとアクチュエータの位置は、自然なものといえる。また(c)に示すようにCase 14~16の場合でも自由端の変位応答の二乗平均値を最小にするような構造設計を行っているため、はりの形状は固定端から自由端に向かって細くなる。

4. 結 言

柔軟構造物の断面積の変化率およびセンサとアクチュエータの位置を設計変数として2次形式の評価関数を最小化することで構造・制御系の同時最適設計を行う手法を提案し、次のような結論を得た。

(1) 構造系の設計変数として構造物全体での断面積の変化率を採用することで、構造物の形状の選択の余

図5 はりの形状およびセンサとアクチュエータ位置

地が非常に狭くなり、本同時最適設計で得られた最適形状は、非常に限定された範囲の中での最適形状という意味しか持たない。しかし、この変化率を用いた定式化により、取扱が簡単になりモデルの要素分割数を多くしても同時最適設計が可能になる。

(2) 数値例で示したように、構造設計と制御設計を別々に行う従来の方法で設計したものは制御性能が本同時最適設計法によって設計したものに比べわめて悪くなる場合があるので、柔軟構造物の設計においては同時最適設計の有効性があるといえる。

文 献

- (1) R. T. Haftka, ほか 2 名, AIAA J., 23-8, 1985, 1260-1266
- (2) S. S. Rao, J. of Eng. Opt., 13, 1988, 1-16
- (3) J. Onoda and R. T. Haftka, AIAA J., 25-8, 1987, 1133-1138
- (4) M. J. Balas, Journal of Guidance and Control, 2-3, 1979, 252-253
- (5) 山田・柏瀬, 日本機械学会関西支部第164回講習会 1989, 99-108
- (6) 加藤, 工学的最適制御, 1988, 東京大学出版会
- (7) 嘉納, システムの最適理論と最適化, 1987, コロナ社
- (8) L. Meirovitch, Elements of Vibration Analysis, 1986, McGraw-Hill
- (9) 狼ほか14名, 東京都立工科短期大学研究報告, 1983
- (10) 山川・若林, 機論(C編), 48-435, 1983, 1750-1758