

耐故障性を考慮した構造系と制御系の統合化設計

A fault tolerant integrated design of structural and control systems

○ 稲吉 裕紀*, 平元 和彦*

Hironori Inayosi*, Kazuhiko Hiramoto*

* 秋田大学

* Akita University

キーワード： 線形行列不等式(Linear Matrix Inequality (LMI)), 多項式行列(Polynomial matrix), \mathcal{D} -安定 (\mathcal{D} -stability),

統合化設計(Simultaneous design of structural and control systems)

連絡先： 〒010-8502 秋田市手形学園町1番1号 秋田大学工学資源学部機械工学科平元研究室 ,

Tel.: (018)889-2972, Fax.: (018)837-0405, E-mail: oga@mech.akita-u.ac.jp

1. 緒言

近年技術の発展に伴い、制御性能向上のため多入力多出力化の傾向が高くなってきている。しかし多入力多出力の閉ループ系では、正常時に系全体の安定性が保証されていてもセンサおよびアクチュエータの一部が故障した場合に不安定となる可能性がある。そのため、センサおよびアクチュエータの一部が故障した場合においても系の安定性などの制御性能が保証される耐故障性が重要となってくる。この問題に対し「部分インテグリティ」の提案¹⁾、「 L 部分インテグリティ」の提案²⁾などによって耐故障性に関する性能は向上してきた。しかし、不確かさを含む制御対象に対して適用させるのが困難であったり、アクチュエータ・センサが故障した場合、望まれる安定余裕を満たすことが困難になるなどの問題がある。

そこで本論文では、Henrionらによる多項式行列アプローチに基づく制御系設計手法³⁾を用いて、

耐故障性を考慮した制御系設計を行う。この手法は、制御対象およびコントローラからなる閉ループ系の多項式行列(制御対象の動的振舞いを微分方程式で表し、それをラプラス変換したもの)を基に、閉ループ極を任意の安定領域内の部分領域に配置するものである。特徴としては(1)不確かさを含む制御対象であっても適用が容易(2)システムの極を任意の領域に配置可能(3)設計段階でコントローラの次数が設定可能、ということが挙げられる。この手法を用いることにより、先の問題を解消し、かつ効率的に適切なコントローラを設計できるものと思われる。また、制御系設計と同時に構造系設計を行う統合化設計問題も取り扱う。統合化設計を行うことにより、より優れた耐故障性能を達成できるものと思われる。

以下、 s , I_m , \otimes , $\mathcal{R}^{m \times n}$ および S^m をそれぞれラプラス演算子, m 次単位行列, 行列のKronecker積, $m \times n$ 実行列および m 次実対称行列の集合とする。

また, $\|A\|$, $\det A$, A^T および A^* をそれぞれ行列 A の最大特異値, 行列式, 転置および共役転置とする.

1.1 多項式行列アプローチ

本論文では制御対象として次式で与えられるような機械システムについて考える.

$$(Ms^2 + Ds + K)q(s) = Eu(s) \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} y_v(s) \\ y_d(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_v s \\ G_d \end{bmatrix} q(s)$$

式(1)は, 多項式行列表現と呼ばれるものであり, 多自由度の機械システムの運動方程式をラプラス変換したものである. また, 行列 $M, D, K \in R^{n \times n}$ は, それぞれ質量, 減衰, 剛性行列である. また, $q(s)$, $u(s)$ はそれぞれ変位および操作量であり, $y_v(s)$, $y_d(s)$ はそれぞれセンサで得られる速度, 変位出力である. そして行列 $G_v s \in R^{n_v \times n}$, $G_d \in R^{n_d \times n}$ は速度, 変位センサそれぞれの配置に依存して定まる定数行列である. 行列 $E \in R^{n \times n_u}$ は入力 $u(s)$ の影響係数行列である. また, 本論文では式(1)に対して次式のような比例微分(PD)が他の構造を持つコントローラで用いて制御を行うと仮定する.

$$u(s) = -F_v y_v(s) - F_d y_d(s) \quad (2)$$

ここで, 行列 $F_v \in R^{n_u \times n_v}$, $F_d \in R^{n_u \times n_d}$ はそれぞれ速度および変位フィードバックゲインである. また, 閉ループ系は次のようになる.

$$N(s)q(s) = (N_1 + N_2 s + N_3 s^2)q(s) \quad (3)$$

$$N_1 = (K + EF_d G_d), \quad N_2 = (D + EF_v G_v), \quad N_3 = M$$

本研究では, フィードバック制御を行うことにより閉ループ極($\det N(s)=0$ の解)を安定領域内の部分領域(以下 D 領域と呼ぶ)に配置することを考える. 複素平面中の D 領域は以下のように定義される.

$$D := \{s : H_{11} + H_{12}s + H_{12}^* s^* + H_{22}ss^* < 0\} \quad (4)$$

ここで H_{11}, H_{12}, H_{22} は, それぞれ D 領域を規定するためのスカラーである. $*$ は共役転置を表す. 例えば $H_{11} = 0, H_{12} = 1, H_{22} = 0$ とした場合, D 領域は複素平面上左半平面($D = \{s : \text{Re}(s) < 0\}$)となる. また, $H_{11} = -1, H_{12} = 0, H_{22} = 1$ とした場合, D 領域は単位円内部となる. 以降式(3)の閉ループ極が全て D 領域内に存在する場合, 式(3)は D 安定であるということにする.

式(3)の閉ループ系を D 安定とするため, Henrion らによる多項式行列アプローチに基づく制御系設計手法を用いる. 文献³⁾より閉ループ系が D 安定となるための必要十分条件は, 以下の行列不等式を満足するような定数行列 $P \in S^{2n}$ と D 安定な多項式行列 $D(s) = D_1 + D_2 s + D_3 s^2$ ($D_1, D_2, D_3 \in R^{n \times n}$) が存在することである.

$$D^T N + N^T D - H(P) \succ 0, \quad P = P^T \quad (5)$$

$$D = \begin{bmatrix} D_1 & D_2 & D_3 \end{bmatrix} \quad N = \begin{bmatrix} N_1 & N_2 & N_3 \end{bmatrix}$$

$$H(P) = \Pi^T (H \otimes P) \Pi,$$

$$\Pi = \begin{bmatrix} I_n & 0 & 0 \\ 0 & I_n & 0 \\ 0 & I_n & 0 \\ 0 & 0 & I_n \end{bmatrix} \quad H = \begin{bmatrix} H_{11} & H_{12} \\ H_{12}^* & H_{22} \end{bmatrix}$$

ここで Π は大きさ $4n \times 3n$ の射影行列であり, $A \succ 0$ と表記した場合の行列 A は正定である. また $D(s)$ は一般に中心多項式行列と呼ばれるものである. この中心多項式行列 $D(s)$ の選択は設計プロセス上において非常に重要な問題であり, 式(5)において D 安定になる LMI の解が求められるかどうかは, 中心多項式行列 $D(s)$ の選択に強く依存する. 本論文では, $D(s)$ を文献⁵⁾の方法を用いて導出する.

また, 式(5)は $N(s)$ の中にコントローラのパラメータが線形に入っているため, 中心多項式行列 $D(s)$ を固定することによってコントローラパラメータに関する LMI となる. LMI は, 連立させて解くことによって複数の拘束条件を考慮した解を(存在するならば)求めることが可能である. 本論文では拘束条件に想定する故障状態を表す全ての

閉ループ系に関する式(5)のLMI条件を連立することによって、耐故障性を持たせる。

2. 故障を考慮した制御系設計

耐故障性を確保した制御系設計を行うためには、あらかじめ故障状態を想定しておく必要がある。本論文では、特にアクチュエータやセンサの故障について考える。

今回考慮するアクチュエータやセンサの状態は、正常に稼動している状態(正常状態)もしくはなんらかの原因によってまったく機能していない状態(故障状態)のどちらかに属するものとする。ここで言うアクチュエータおよびセンサの故障状態は、あるフィードバックループが完全に切断されることに相当する。そのため制御対象(閉ループ系)が正常状態から故障状態へ変動する場合には、閉ループ系に離散的な変動が起こる。この離散的な故障に対して、本論文では正常な状態に対する式(5)のLMI条件と故障した状態に対するLMI条件を連立させて解くことにより耐故障性を得るものとする。LMIは連立させることによって、複数の拘束条件を満足させることが可能となる。そのため、式(5)によって正常状態のLMI条件と故障状態のLMI条件を表現し、連立させることによって、どちらの場合でも D 安定化することが可能となる。また、故障状態を複数想定して拘束条件に加えることによって、各故障状態のいずれに陥った場合でも閉ループ系を D 安定とすることが可能となる。

故障状態は、アクチュエータおよびセンサがまったく動作しないものとして、それぞれの故障状態に相当する閉ループ系の多項式行列によって表現される。そのために、行列 E, G_d, G_v を適切に設定することによって各故障状態の表現を行う。行列 E, G_d, G_v は前章でも述べたようにそれぞれ入力 $u(s)$ 、変位センサ、速度センサの配置によって形が決まってくる。そのため行列 E, G_d, G_v の各パラ

メータを変化させることでアクチュエータおよびセンサの有無を任意に設定することが可能となる。パラメータはアクチュエータ、変位センサおよび速度センサが稼動している状態を1、故障状態を0と表す。こうすることで離散的に各部の状態を表現することが可能となる。

また本論文では、先に述べた離散的に起こるものだけではなく、モデル化誤差や対象の長期的運用に伴う物理パラメータの構造的な不確実性も考慮する。先に述べたようにHenrionらの制御手法は、対象に不確かさを含む場合でも容易に適用できる特徴がある。具体的には文献⁴⁾で行列 M, D, K が構造的な不確かさをもつ場合に閉ループ系が D 安定になるような条件が導出されている。

$$M = \sum_{i=1}^{n_p} \alpha_i M_i, \quad D = \sum_{i=1}^{n_p} \alpha_i D_i, \quad K = \sum_{i=1}^{n_p} \alpha_i K_i$$

$$\sum_{i=1}^{n_p} \alpha_i = 1, \quad \alpha_i \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots$$

この状態での全ての閉ループ系は以下のように表される。

$$N^\alpha(s)q(s) = N_1^\alpha + N_2^\alpha s + N_3^\alpha s^2 \quad (7)$$

$$N_1^\alpha = \sum_{i=1}^{n_p} \alpha_i (K_i + E F_d G_d) \quad (8)$$

$$N_2^\alpha = \sum_{i=1}^{n_p} \alpha_i (D_i + E F_v G_v) \quad (9)$$

$$N_3^\alpha = \sum_{i=1}^{n_p} \alpha_i M_i \quad (10)$$

この場合、 $N^\alpha(s)$ は与えられた多項式行列がもつ不確かさの端点を示している。これより、不確かさを含む閉ループ系 $N^\alpha(s)$ の全てが D 安定となる必要十分条件は、以下の行列不等式を満足するような定数行列 $P^i \in S^{2n}$ ($i = 1, \dots, n_p$)と D 安定な多項式行列 $D(s) = D_1 + D_2 s + D_3 s^2$ ($D_1, D_2, D_3 \in R^{n \times n}$)が存在することである。

$$D^T N^\alpha + (N^\alpha)^T D - H(P) \succ 0, \quad P = P^T \quad (11)$$

$$D = [D_1 \quad D_2 \quad D_3] \quad N = [N_1^\alpha \quad N_2^\alpha \quad N_3^\alpha]$$

そして、不確かさの端点である N^α の数だけ式(11)を用いてLMI条件を設定し、連立させて解くことによって、不確かさを表す超直方体中の全ての点で、対象が安定となるように極の配置を行うということになる。このことより、不確かさを含むシステムであっても、不確かさの範囲が分かれば、容易に D 安定とすることが可能であるとわかる。

以上のことより、式(11)によって制御対象に構造的な不確かさが存在する場合の D 安定を保証することができる。さらに、離散的な故障を同時に考慮するために、離散的な故障の各状態を適用し、LMI条件で表す。これは式(8),(9)に含まれる行列 E, G_d, G_v を変化させることで表現することが可能となる。そして、その全てのLMI条件を連立させて解くことにより、全故障状態および制御対象に構造的な不確かさが存在する場合に対して望まれる安定余裕を満たすことが可能となる。

さらに、本論文では先に述べた制御系設計に加え、構造系設計を同時に行う統合化設計を取り扱う。統合化設計とは、構造系を設計してから制御系を設計するという2ステップの設計を行う従来の手法ではなく、制御系設計の中でコントローラだけでなく制御対象(構造系)自体も設計の対象と考え、制御対象中の設計変数と、制御を行うコントローラの設計を統合し、高い制御性能を達成するための設計方法である。今回は式(3)の閉ループ系に含まれるコントローラゲイン F_d, F_v および各階の質量 m_i 、減衰 d_i 、剛性 k_i を同時に調整することにより、制約に対してよりタイトな解が得られるものと思われる。

注意：大瀬ら⁶⁾により、ディスクリプタシステムで表される閉ループ系に対して(Chilaliら⁷⁾の手法を拡張した)閉ループ極に関する制約条件を満足する統合化設計手法が提案されている。文献⁶⁾では、単独の制御対象を検討しており、BMIに帰着される問題に対して繰り返し設計アルゴリズムを用いて解を求めている。一方、本報告の手法

は故障による制御対象の離散的変動を陽に扱うことが可能であると同時に、各制御対象の物理変数の構造的な不確定性も考慮に入れることができる。また、提案する設計アルゴリズムは、最適化される指標が設計変数のLMI(例：フィードバックゲイン行列の最大特異値や構造の総質量等)で表されていれば、極配置制約の下でのこれら指標の局所的最適解への収束性も保証される。

3. 設計例

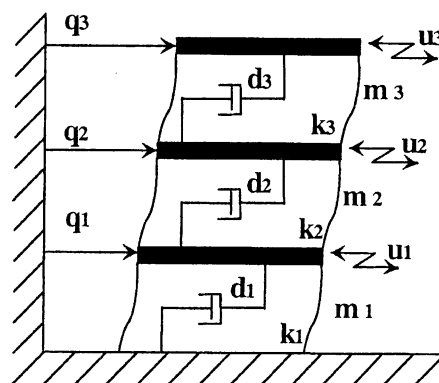


Fig. 1 3dof system

設計例としてFig.1のような3自由度の構造物に対し、前章に述べた方法を用いてアクチュエータおよびセンサが故障した場合でも D 安定性を保証するコントローラゲイン F_d, F_v を設計する。また今回は各階についているアクチュエータ、センサを一体型とし、故障した場合はアクチュエータとセンサが同時に使えなくなるものとする。つまり $E = G_d = G_v$ となるようにする。各階に作用する操作量をそれぞれ1階から u_1, u_2, u_3 とし、変位ベクトル $q = [q_1 \ q_2 \ q_3]^T$ 、操作量 $u = [u_1 \ u_2 \ u_3]^T$ とした場合、式(1)の係数行列および行列 $E = G_d = G_v$ はそれぞれ式(12),(13),(14),(15)のように与えられる。また m_i, d_i, k_i はそれぞれ i 階($i = 1, 2, 3$)の質量、減衰、剛性である。これらの各パラメータ

は以下のような集合に属しているとする.

$$m := \{m_i : \underline{m}_i \leq m_i \leq \overline{m}_i\}$$

$$d := \{d_i : \underline{d}_i \leq d_i \leq \overline{d}_i\}$$

$$k := \{k_i : \underline{k}_i \leq k_i \leq \overline{k}_i\}$$

ここで $\underline{m}_i = 2$ $\overline{m}_i = 5$ $\underline{d}_i = 0$ $\overline{d}_i = 0.5$ $\underline{k}_i = 0$ $\overline{k}_i = 3000$ とする.

$$M = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$D = \begin{bmatrix} d_1 + d_2 & -d_2 & 0 \\ -d_2 & d_2 + d_3 & -d_3 \\ 0 & -d_3 & d_3 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$K = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 \\ 0 & -k_3 & k_3 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$E = G_d = G_v = \begin{bmatrix} e_1 & 0 & 0 \\ 0 & e_2 & 0 \\ 0 & 0 & e_3 \end{bmatrix} \quad (15)$$

全てのアクチュエータおよびセンサが稼動している状態を正常状態とした場合, 行列 E, G_d および G_v の各パラメータは $e_1 = e_2 = e_3 = 1$ となる. また, 仮に一階に設置されているアクチュエータ, 変位センサおよび速度センサが故障した場合, 行列 E, G_d および G_v の各パラメータは $e_1 = 0, e_2 = e_3 = 1$ となる. 今回はアクチュエータおよびセンサの状態を, 正常時, 1階故障時, 2階故障時, 3階故障時および1,2階故障時, 1,3階故障時, 2,3階故障時, 全階故障時(開ループ状態)の8パターンを想定する.

文献⁵⁾の結果を用いて設計した今回使用する中心多項式 $D(s)$ のパラメータは以下のようなもので

ある.

$$D_1 = \begin{bmatrix} 5.2000e+003 & -2.6000e+003 & -1.5407e-002 \\ -2.6000e+003 & 5.2000e+003 & -2.6000e+003 \\ -1.4963e-002 & -2.6000e+003 & 2.6000e+003 \end{bmatrix}$$

$$D_2 = \begin{bmatrix} 5.2946e+000 & -4.4132e-001 & 4.5303e-002 \\ 6.3151e-001 & 5.8764e+000 & -3.4137e-001 \\ -3.4069e-001 & 2.0314e-001 & 5.3753e+000 \end{bmatrix}$$

$$D_3 = \begin{bmatrix} 3.9902e+000 & 1.1579e-005 & -1.2879e-003 \\ -3.7675e-003 & 3.2424e+000 & -4.5585e-003 \\ -1.7324e-003 & -2.1560e-003 & 4.1732e+000 \end{bmatrix}$$

さらに, 本論文では閉ループ系の D 安定性を満たすだけでなく, 評価指標として式(16)を用いて最大特異値 $F = [F_d \ F_v]$ のノルムを最小化し, より少ないエネルギーで制御を行うこととする.

$$\begin{bmatrix} fI & F \\ F^T & I \end{bmatrix} > 0 \quad (16)$$

本対象に対して前章で述べた手法を用い, 離散的な故障を考慮した構造系と制御系の同時設計および連続時間系および離散的な故障を考慮した構造系と制御系の同時設計を行う.

3.1 離散的な故障を考慮に入れた統合化設計

ここではアクチュエータおよびセンサが故障した場合でも, 閉ループ極 s_1, \dots, s_n に関して D 領域 $Re(s) < -0.05$ を満足するように各階の質量, 減衰, 剛性およびコントローラゲイン F_d, F_v を設計する. またアクチュエータおよびセンサの全状態のうち, 全階故障時(開ループ状態)を除く7パターンを D 安定とするように極配置を行う. 式(5)および式(16)を用いて設計した構造の各パラメータを Table 1 に示す. またその際のコントローラゲイン F_d, F_v は次のようになった.

$$F_d = \begin{bmatrix} 6.9065 \times 10^{-5} & 4.6427 \times 10^{-7} & 3.0198 \times 10^{-7} \\ 5.4103 \times 10^{-4} & 1.7967 \times 10^{-2} & -5.1862 \times 10^{-3} \\ -5.3050 \times 10^{-6} & 2.5823 \times 10^{-4} & -1.7615 \times 10^{-3} \end{bmatrix}$$

$$F_v = \begin{bmatrix} 1.5300 & -8.7410 \times 10^{-5} & 1.3554 \times 10^{-5} \\ 1.3407 \times 10^{-4} & 1.4378 & -1.1967 \times 10^{-2} \\ -2.1006 \times 10^{-7} & 1.1041 \times 10^{-2} & 1.4866 \end{bmatrix}$$

i	1	2	3
m_i [kg]	2.3315	2.0001	2.3891
d_i [N $_s$ /m]	0.49986	0.49990	0.49959
k_i [N/m]	1532.1	1535.7	1491.5

Table 1 Optimized design parameters

また、正常状態のみを考慮した制御を行った場合の極配置図をFig.2に、故障状態を考慮した制御を行った場合の極配置図をFig.3に示す。Fig.2より正常状態のみを考慮した制御を行った場合、アクチュエータおよびセンサが正常時(\times)にはシステムを D 安定とすることができたが、一箇所でも故障した場合(\bullet)には D 安定を保証できなくなる。一方、Fig.3の(\times)は正常時、(\bullet)は一部故障時、(\circ)は全故障時(開ループ系)の極であるが、全故障時(開ループ系)を除き、全ての極が D 領域内に存在することが分かる。このことから、故障を考慮した制御を行った場合、全てのアクチュエータおよびセンサが故障しない限り、一部が故障しても D 安定を保証できることが分かる。

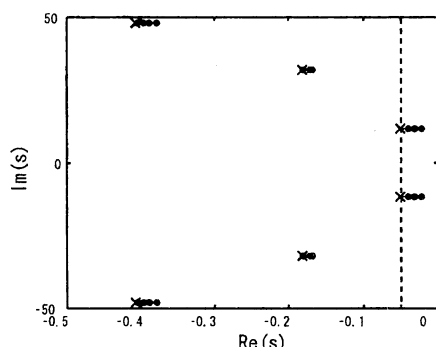


Fig. 2 Pole distribution of no fault tolerant design

次に、正常状態のみを考慮した制御を行った場合の正常状態の一階の変位のインパルス応答をFig.4に、二,三階故障状態の一階のインパルス応答をFig.5に示す。正常状態では、短い時間で振動が収束しているのに対し、二,三階故障状態では振動が収束するまで非常に時間がかかることが見て取

れる。

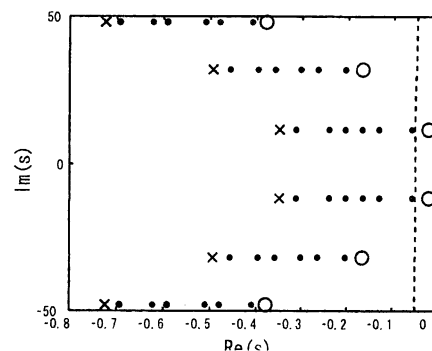


Fig. 3 Pole distribution of fault tolerant design

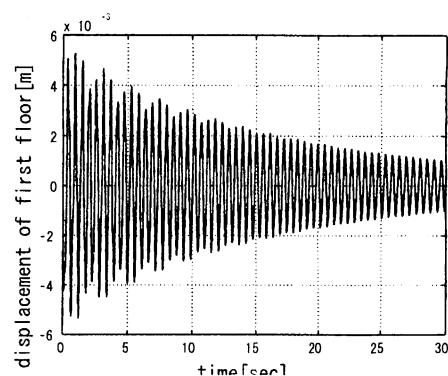


Fig. 4 impulse response(normal)

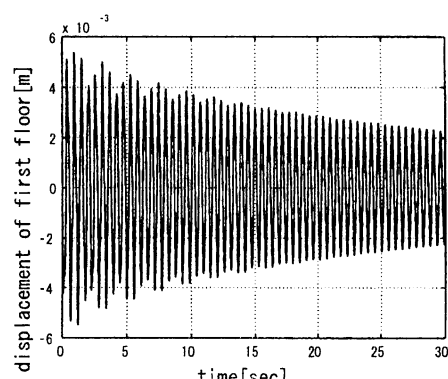


Fig. 5 impulse response(actuator and sensor are out of order in 2,3floor)

また、故障状態を考慮した制御を行った場合の正常状態の一階の変位のインパルス応答をFig.6に、二,三階故障状態の一階のインパルス応答をFig.

.7に示す．正常状態のみを考慮した制御を行った場合の二,三階故障状態の一階の変位(Fig .5)に比べ，故障状態を考慮した制御を行った場合の二,三階故障状態の一階の変位(Fig .7)のほうがより早く収束しているのが分かる．また，故障状態を考慮した制御を行った場合，共に振動が収束していくが，正常状態に比べ二,三階故障状態のほうが振動が収束するまで，時間がかかるのが見て取れる．そのため，安定余裕を確保することは可能であるが，性能自体は低下しているものと思われる．

3.2 離散的な故障および制御対象に構造的な不確かさが存在する場合を考慮した統合化設計

次に離散的な故障に加え，制御対象に構造的な不確かさが存在する場合を考慮に入れた制御を考える．今回は1,2階の減衰 d_1, d_2 が $\pm 20\%$ 変動するとし，さらにアクチュエータおよびセンサが離散的な故障した場合でもシステムが D 領域 $Re(s) < -0.05$ を満足するように各階の質量，減衰，剛性およびコントローラゲイン F_d, F_v を設計する．故障状態は先と同じパターンを想定し，それを不確かさの超直方体の各端点ごとに適用，極配置を行う．式(11)および式(16)を用いて設計した構造の各パラメータをTable 2に示す．またその際のコントローラゲイン F_d, F_v は次のようになった．

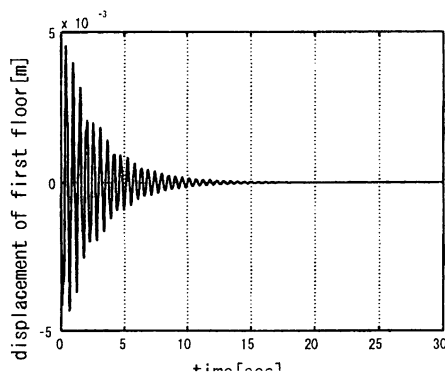


Fig. 6 impulse response(normal)

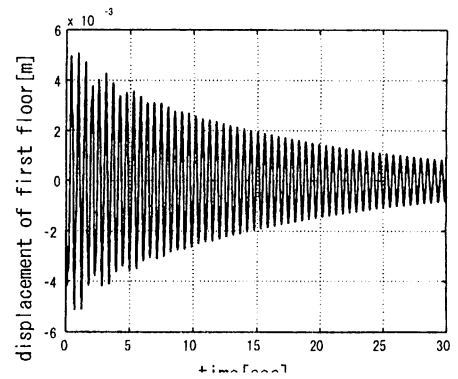


Fig. 7 impulse response(actuator and sensor are out of order in 2,3 floor)

$$F_d = \begin{bmatrix} 8.3016 \times 10^{-5} & -7.3804 \times 10^{-6} & 6.1092 \times 10^{-6} \\ 1.2436 \times 10^{-3} & 2.0412 \times 10^{-2} & -6.1777 \times 10^{-3} \\ 8.2654 \times 10^{-5} & 3.1793 \times 10^{-4} & -1.2383 \times 10^{-3} \end{bmatrix}$$

$$F_v = \begin{bmatrix} 1.7923 & -3.2483 \times 10^{-4} & 1.2938 \times 10^{-4} \\ 3.4738 \times 10^{-4} & 1.7603 & -1.9864 \times 10^{-2} \\ -1.1541 \times 10^{-4} & 1.9743 \times 10^{-2} & 1.7650 \end{bmatrix}$$

i	1	2	3
m_i [kg]	2.3419	2.0001	2.4003
d_i [Ns/m]	0.49981	0.49988	0.49959
k_i [N/m]	1536.9	1540.0	1498.5

Table 2 Optimized design parameters

また，制御を行った際の極配置図をFig.8に示し，(×)は正常時，(●)は一部故障時，(○)は全故障時(開ループ系)の極とする．Fig.8より構造に不確かさを含み，かつ故障した場合でも全故障時(開ループ系)を除き， D 安定を保証できたことが分かる．

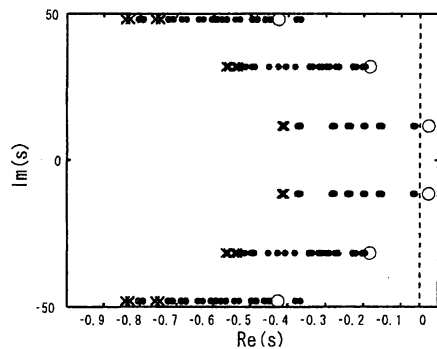


Fig. 8 Pole distribution

なお、4.1および4.2節で得られるゲイン行列には、その構造に特別な制約は入れていないにもかかわらず、得られるフィードバックゲイン行列は対角成分が大きく優勢となっており、結果的にコントローラは分散制御型の構造を持っていることがわかる。一般に分散制御の優位な点として、耐故障性や故障に対する対応の容易さが挙げられることが多いが、本設計例で得られた結果は、それがある意味で裏付けており、興味深い。

4. 結言

多項式行列アプローチに基づく制御系設計手法を用いて、耐故障性を考慮した構造系および制御系の統合化設計を行った。本手法を用いることで従来の耐故障性設計は困難であった、不確かさを含む構造に対しての対故障設計および故障時にも安定余裕を保证する事が容易に可能となった。

文 献

参考文献

- 1) 藤田, 示村, 特定の操作端に関するIntegrityを考慮した状態フィードバック系の設計, 計測自動制御学会論文集, 22-1, 23/29(1986)

- 2) 濱田 吉郎, 新 誠一, 瀬部 昇, 耐故障性を有する多変数制御系の一設計法, 計測自動学会論文集, Vol.34, No.9, 1184/1190(1998)
- 3) D.Henrion, M.Sebek and V.Kucera, Robust pole placement for second-order systems: an LMI approach, LAAS-CNRS Research Report, No.02324(2002)
- 4) D.Henrion, M.Sebek and V.Kucera, Positive Polynomial and Robust Stabilization with Fixed-Order Controllers, Vol. 48, No. 7, pp. 1178-1186, November 26(2002)
- 5) 平元和彦, 多項式行列手法による機械システムの制御系設計への統一的アプローチ, 計測自動制御学会第5回制御部門大会資料 (2005), 223-226.
- 6) 大瀬長門・森田 亮・柳沢 宗, 極の領域指定による構造系と制御系の同時設計問題, 機論, 67-55, C (2001), 697-703.
- 7) Chilali, M. and Gahinet, P., H_∞ Design with Pole Placement Constraint: An LMI Approach, *IEEE Trans. Automat. Contr.*, 41-3 (1996), 358-367.