

GIMC-based fault tolerant control and its application to magnetic suspension systems

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2017-10-05 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/2297/26933

氏名	中曾 裕次郎
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	博甲第 1078 号
学位授与の日付	平成 21 年 3 月 23 日
学位授与の要件	課程博士(学位規則第 4 条第 1 項)
学位授与の題目	GIMC 構造に基づく耐故障制御とその磁気浮上システムへの応用に関する研究
論文審査委員(主査)	滑川 徹(理工研究域・准教授)
論文審査委員(副査)	村本 健一郎(理工研究域・教授), 木村 春彦(理工研究域・教授), 山根 智(理工研究域・教授), 山本 茂(理工研究域・教授)

Abstract: This paper deals with a fault tolerant control system for magnetic suspension systems by using Generalized Internal Model Control (GIMC) structure. To design a robust fault detection filter, fault detection design problems are formulated as multiple objective optimization problems by minimizing the effects of disturbances and keeping the fault sensitivity involving an LTI system with disturbance and fault signals. The designed fault detection filter by solving an optimization problem is implemented with the magnetic suspension system to verify its validity. In experimental results, the sensor fault is detected by the designed filter. It has better performance for the disturbance attenuation than the conventional detection filter. Moreover, actuator faults in MIMO systems can be detected by the proposed method. The algorithm for the fault isolation is proposed to decide which actuator is faulty. Finally, a fault tolerant control system with fault detection, fault isolation and reconfiguration functions is constructed for a MIMO magnetic suspension system and its effectiveness is evaluated via control experiments.

Key Words: Fault Tolerant Control, GIMC Structure, Fault Detection, Fault Isolation, Magnetic Suspension Systems

1 はじめに

従来のフィードバック制御では、アクチュエータやセンサに不具合がある場合、性能仕様を満たさなくなったり、不安定化してしまう可能性もある。機能不全のあるシステムに対しても性能仕様を満たしたり、ロバスト安定性を有する耐故障制御系に関する研究が必要である。耐故障制御系では、故障が発生しているかどうかを検出する故障検出、どの部分が故障したのかを判断する故障診断、状況に応じた制御系の再構成、という主に 3 つの機能を有することで、システムの安定性を維持することができる。これらの機能によって、正常時には高性能な制御系であり、故障が発生しても安定性が保証されるシステムを構築することが可能となる。このような耐故障制御系について様々な研究がされている [1, 2].

従来研究では、モデルの左既約分解表現を用いて制御対象の特性変動を検出することができる GIMC 構造が提案されており [3], 実システムへ適用することで正常に稼働している場合と制御対象が変動した場合において制御系が再構成可能であることを実証している [4]. GIMC 構造に基づく故障検出法は提案されているが [5], 故障信号による影響の最大化問題を考えている。ロバスト制御やフィルタ設計の観点から見れば外乱による影響の最小化問題を考えるべきである。また、この文献では仮想的な故障信号によるシミュレーションでしか評価をおこなっていない。また、文献 [6] では GIMC 構造に基づく耐故障制御系を用い、故障診断をおこなって

いるが、フィルタが高次元で実装が困難であったり、シミュレーションでは外乱による影響を評価していない。

そこで本研究では、GIMC 構造に基づく耐故障制御の構築と、磁気浮上システムへの応用を目的とする。ロバスト制御の観点から、外乱による影響を抑えるために故障検出フィルタに関して外乱による影響の最小化問題を新たに定式化し、それに対する最適な故障検出フィルタを導出することで、外乱と故障の影響を区別する。また、不安定系である磁気浮上系に対し、外乱および故障信号を含めたモデルを導出し、最適故障検出フィルタを設計する。そして、正常稼働時および故障発生時に対するコントローラ的设计をおこない、GIMC 構造に基づく耐故障制御系を構築する。構築した制御系に対する検証実験をおこない、設計した故障検出フィルタの有効性および外乱抑制性能を確認する。さらに、MIMO システムに対して適用し、提案する故障診断アルゴリズムによって故障診断をおこない、制御系を適切に再構成できることを検証実験を通して確認する。

2 耐故障制御系

2.1 GIMC 構造

GIMC 構造とは、Fig. 1 に示すような、再構成可能な制御構造である。ただし、 \tilde{P} は制御対象、 U, V は制御対象のノミナルモデルに対する内部安定化コントローラ $K = V^{-1}U$ の左既約分解表現、 Q は内部コントローラ、 H は故障検出フィルタである。推定誤差信号 f_e は

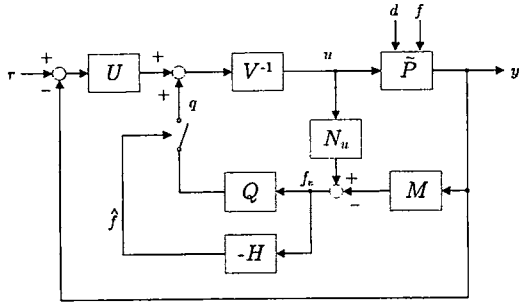


Fig. 1: GIMC-based Fault Tolerant Control System

制御対象の変動に応じて変化する信号であるが、設計するフィルタの特性から、故障検出フィルタ H から得られる故障検出信号 \hat{f} は故障発生時に大きく変動する信号となる。このとき、この信号に対して閾値 J_{th} を設ける。故障検出信号が閾値より小さい場合、外部ループのみの制御系によってシステムが構成される。また、制御対象に故障が発生し、故障検出信号 \hat{f} が閾値より大きくなった場合、内部信号 q によって制御系を再構成し、制御系の安定性を維持することができる再構成可能な制御構造となっている。再構成後の制御系は Fig. 1 より、 $K_Q = (V - QN_u)^{-1}(U + QM)$ で制御される。

2.2 問題設定

次のような LTI システムを考える。

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + B_u u + B_d d + B_f f \\ y = Cx + D_u u + D_d d + D_f f \end{cases} \quad (1)$$

ただし、 $x \in \mathbb{R}^n$ は状態、 $u \in \mathbb{R}^{n_u}$ は制御入力、 $d \in \mathbb{R}^{n_d}$ は外乱、 $f \in \mathbb{R}^{n_f}$ は故障信号、 $y \in \mathbb{R}^{n_y}$ は観測出力を表す。このとき、式 (1) の伝達関数表現は

$$y(s) = G_u(s)u(s) + G_d(s)d(s) + G_f(s)f(s) \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} G_u & G_d & G_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B_u & B_d & B_f \\ C & D_u & D_d & D_f \end{bmatrix} \quad (3)$$

となる。このシステムに対し、次のような仮定をおく。

仮定 1 (A, C) は可検出である。

仮定 2 D_f は行フルランクである。

仮定 3 伝達行列 G_f が虚軸上に伝達零点を持たない。

G_u, G_d, G_f は A 行列および C 行列が共通であるため、仮定 1 より、それぞれの左既約分解表現は次式で与えられる。

$$\begin{bmatrix} G_u & G_d & G_f \end{bmatrix} = M^{-1} \begin{bmatrix} N_u & N_d & N_f \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} M & N_u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A + L_p C & L_p & B_u + L_p D_u \\ C & I & D_u \end{bmatrix} \quad (5)$$

ただし、 L_p は $A + L_p C$ を安定とする行列である。 N_d, N_f についても同様である。

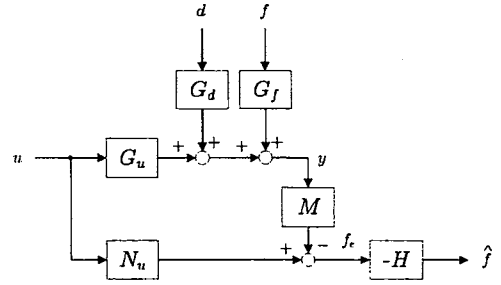


Fig. 2: Block Diagram for the Fault Detection

このとき、Fig. 2 に故障検出フィルタに関するブロック線図を示す。式 (2)(4) より、推定誤差信号 f_e は、

$$f_e = N_u u - M y = -N_d d - N_f f \quad (6)$$

となる。上式から、推定誤差信号 f_e は外乱と故障信号に依存している。また、伝達行列 N_f について次の補題が成り立つ。

補題 1 (スペクトル分解 [7])

システム (1) に対し仮定 1-3 が成り立つとする。このとき、

$$W_f W_f^* = N_f N_f^*, \quad W_f = \left[\begin{array}{c|c} A + L_p C & (L_p - L_0) R_f^{1/2} \\ \hline C & R_f^{1/2} \end{array} \right] \quad (7)$$

を満たす正方伝達行列 $W_f \in \mathcal{RH}_\infty^{n_y \times n_y}$ が存在する。ただし、 $R_f = D_f D_f^T$, $L_0 = -(B_f D_f^T + Y C^T) R_f^{-1}$ であり、 Y はリカッチ方程式

$$\begin{aligned} (A - B_f D_f^T R_f^{-1} C) Y + Y (A - B_f D_f^T R_f^{-1} C)^T \\ - Y C^T R_f^{-1} C Y + B_f (I - D_f^T R_f^{-1} D_f) B_f^T = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

の準正定解である。ただし、 $A - B_f D_f^T R_f^{-1} C - Y C^T R_f^{-1} C$ は安定である。

補題 1 から得られる伝達行列 W_f の特異値はその性質から N_f と等価となり、 $\sigma(W_f^{-1} N_f) = 1$ が成立する。

2.3 故障検出における最適化問題

Fig. 2 から、故障検出信号 \hat{f} は、

$$\hat{f} = -H f_e = H N_d d + H N_f f \quad (9)$$

となる。フィルタ出力 \hat{f} を用いて故障検出をおこなうが、前節で導出したように、フィルタ H への入力である推定誤差信号 f_e は故障信号だけでなく、外乱の影響も受けてしまう。このため、故障検出フィルタ H には外乱除去性能と、故障信号に対する高感度性を同時に要求される。そこで、本論文ではいくつかの問題を定式化し、それぞれに対する最適解を導出するが、故障検出フィルタとして実用的であるものとして次のように定式化した問題を扱う。

問題 9 システム (1) に対してある正数 $\beta > 0$ を考える。このとき、次式を最適とする安定な伝達行列 $H \in$

$\mathcal{RH}_2^{n_y \times n_y}$ を見つけよ.

$$\min_{H \in \mathcal{RH}_2^{n_y \times n_y}} \left\{ \|HN_d\|_2 : \|HN_f\|_{[f_1, f_2]} \geq \beta \right\} \quad (10)$$

ただし, $\|G\|_2^2 = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \text{Trace}\{G^*(j\omega)G(j\omega)\}d\omega$, $\|G\|_{[f_1, f_2]} = \inf_{\omega \in [\omega_1, \omega_2]} \underline{\sigma}(G(j\omega))$, $\omega = 2\pi f$ である. この問題に対して, 次の定理が成り立つ.

定理 2 システム (1) に対して仮定 1-3 が成り立つとする. このとき, 故障検出フィルタ H を

$$H = \Psi W_f^{-1}, \quad \Psi \in \mathcal{RH}_2^{n_y \times n_y} \quad (11)$$

とすると, 問題 9 は次のような問題と等価となる.

$$\min_{\Psi \in \mathcal{RH}_2^{n_y \times n_y}} \left\{ \|\Psi W_f^{-1} N_d\|_2 : \|\Psi\|_{[f_1, f_2]} \geq \beta \right\} \quad (12)$$

略証 ノルムの定義より

$$\|HN_f\|_{[f_1, f_2]} = \|\Psi\|_{[f_1, f_2]} \geq \beta \quad (13)$$

が成り立つ. \square

故障検出フィルタ H は定理 2 で得られた問題を Simplex 法などによって解くことで導出することができる. また, 周波数評価区間 $[f_1, f_2]$ を設計パラメータとすることで, フィルタの速応性や外乱抑制性能を時間応答を見ながら設計することができる.

注意 1 本論文では, 式 (1) (Fig. 2) で表現される LTI システムに対して, 周波数帯域によって外乱と故障を区別する問題を扱っている. このため, 外乱と故障の周波数帯域が重なる場合, 本質的に区別することができない.

3 故障検出

3.1 磁気浮上システム

本論文では, まず Fig. 3 に示すような, 1 軸制御型磁気浮上システムを制御対象とする. ここで, y_∞ は定常ギャップ, y_p は定常ギャップからの変位, i は電流, e は電圧を表している. このシステムは, 鉄球を電磁石から定常ギャップ y_∞ [m] の位置で浮上させることを目的とするシステムで, 電磁石と鉄球との距離を水平方向から測定する透過型光センサ (KEYENCE:LX2-02) と, 鉛直方向から測定する反射型光センサ (KEYENCE:LB-62) を用い, 得られた位置情報の平均値をフィードバックすることで, 電流 i によって制御をおこなう.

本論文では, 約 1 [s] 後に透過型光センサ (Sensor 2) の検出光が完全に遮断されてしまう状況を考える. この故障はステップ状に作用するため, 故障信号は低周波数帯域の信号となる.

H_2 ノルムの評価区間を $[f_1, f_2] = [0.001, 2]$ とし, $\beta = 1$, また, Ψ の次数を 2 とするとき, 定理 2 で与えられた最適化問題に対する最適な伝達行列 Ψ を導出す

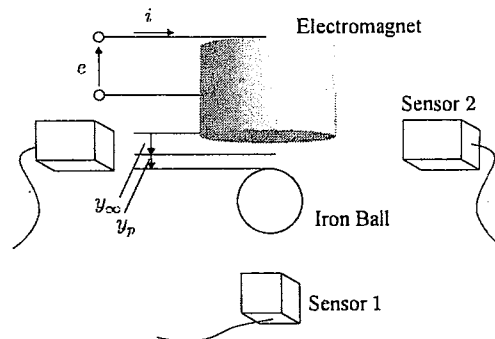


Fig. 3: Description of the System

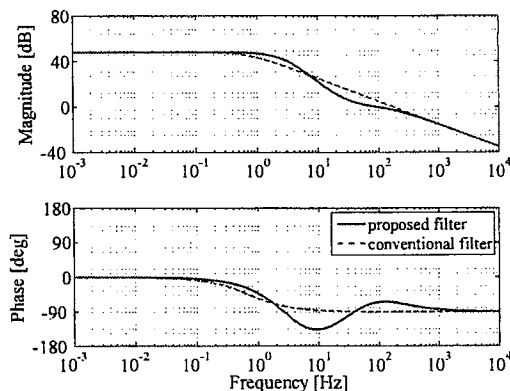


Fig. 4: Property of the Fault Detection Filter

るために, まず Simple Genetic Algorithm によってある程度まで解を収束させ, 得られた値を初期値として, 最終的に Nelder-Mead Simplex 法によって解を導出する. このとき得られた最適故障検出フィルタの周波数特性を Fig. 4 (a) に示す. ただし, 破線は従来研究 [4] で用いている変動検出フィルタを表しており, 本論文の実験状況に対して再設計したものである.

設計した故障検出フィルタを用いて検証実験をおこなう. 本実験では平衡状態を保持した状態からはじめ, 約 1 [s] 後になんらかの理由で透過型光センサ (Sensor 2) の検出光が完全に遮断されてしまう状況を考える. 検証実験では実際に透過型センサの前に手をかざ

Table 1: Comparison with \hat{f}

	B/A	C/A	D
従来法	27.5 %	33.6 %	0.79×10^{-3}
提案法	16.2 %	19.3 %	1.15×10^{-3}

し, 故意に検出光を遮断することをおこなっている.

3.2 実験結果

もし鉄球の質量が変化した場合, これはモデルのパラメータ誤差として影響する外乱となるため, 故障検出フィルタによってこの影響を抑え, 故障信号と区別しなければならぬ. そこで, 鉄球の質量を故意に変化させ,

1 [s] 後にセンサ故障が発生する実験をおこなった。今、鉄球の質量変動は故障ではないため、故障検出信号 \hat{f} への影響は少ないほうが良い性能といえる。Fig. 5 に実験結果を示す。ただし、(a) は従来研究 [4] で用いていた変動検出フィルタによる結果、(b) は提案法による故障検出フィルタを用いた場合の結果である。図中の A は故障による影響、B および C は外乱による影響を表している。故障による影響に対する、外乱による影響の割合を表す B/A および C/A の値を計算した結果を Table 1 にまとめる。どちらの値も提案法のほうが小さいことから、従来法より外乱抑制性能が高いことがわかる。また、従来法に比べて提案法のほうが故障前と故障後のギャップ D が大きいことから、故障検出をおこなうための閾値 J_{th} の選択に幅を与えることができる。

また、制御入力に対する外乱が発生した場合にも故障検出信号 \hat{f} に影響が生じるが、提案法のほうがより広い周波数帯域の外乱を抑制していることを検証実験によって確認している。

4 故障診断と制御系の再構成

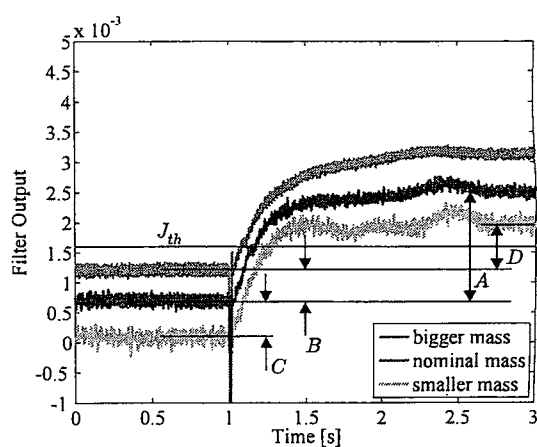
4.1 鋼板磁気浮上システム

続いて、発生した故障がどのようなものか判断する故障診断について、MIMO システムである鋼板磁気浮上システムを用いて検証実験をおこなう。本稿では Fig. 6 に示すように、四隅に配置された電磁石の吸引力によって鋼板を浮上させる鋼板磁気浮上システムを用いる。また、いずれかのアクチュエータの出力が 50 [%] 低下するというアクチュエータ故障を考える。どのアクチュエータに故障が発生しているかによってシステムへの影響が異なるため、故障診断をおこなわなければ適切な制御系へ再構成することができない。ここでは、システムを非干渉化するために鋼板の運動モードごとに制御をおこなう。このため、故障検出フィルタも各運動モードに対して独立に設計することができる。

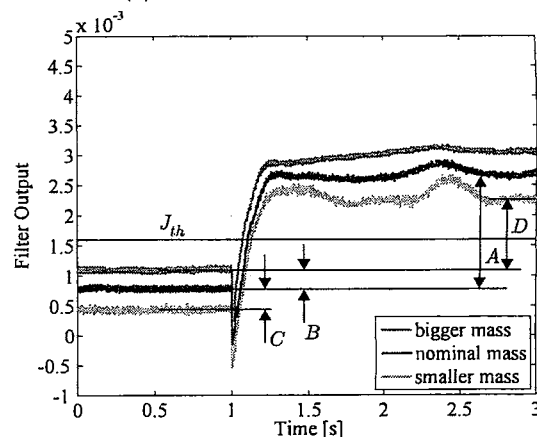
一方、それぞれのアクチュエータ故障信号に対して閾値を設けることで、Table 2 に示すような方法で故障診断をおこなうことができる。例えば、 \hat{f}_1 のみが閾値 J_{th1} より大きくなった場合、これは i_1 に対するアクチュエータ故障が発生していることを表し、故障診断信号 $\eta = 1$ とすることで制御系を適切なものへ再構成する。

4.2 実験結果

このシステムに対しても同様に定理 2 から得られる最適な故障検出フィルタを導出し、検証実験をおこなった。本実験では平衡状態を保持した状態からはじめ、1 [s] 後に各アクチュエータゲインが 50 % 低下するアクチュエータ故障を発生させる。ここで、故障診断信号は Table 2 に基づいて変化するものとし、Table 2 以外の組み合わせとなった場合は η は変わらないものとする。また、故障は自動的に復帰することがないという考えから、 $\eta \neq 0$ から $\eta = 0$ へは変化しないように設定している。Fig. 7 に信号 \hat{f}^{mag} の時間応答を示す。Table 2



(a) Conventional Detection Filter



(b) Fault Detection Filter

Fig. 5: Experimental Comparison

にしたがって切り替えをおこなった結果、 η が i_1 が故障した場合と一致し、制御系を適切に切り替えることができた。同様に、 i_1 以外のアクチュエータが故障した場

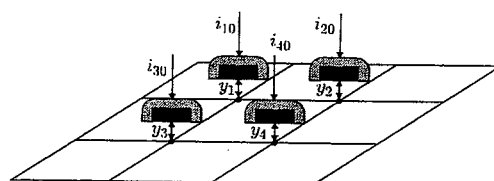


Fig. 6: 鋼板磁気浮上システム

Table 2: アクチュエータ故障と故障診断信号 η

+ : その信号が閾値 J_{thi} より大きい
- : その信号が閾値 J_{thi} より小さい

	\hat{f}_1	\hat{f}_2	\hat{f}_3	\hat{f}_4	η
正常	-	-	-	-	0
i_1 が故障	+	-	-	-	1
i_2 が故障	-	+	-	-	2
i_3 が故障	-	-	+	-	3
i_4 が故障	-	-	-	+	4

合も同じく故障診断信号 η によって適切な切り替えがおこなわれていることを確認している。

5 おわりに

本研究では、GIMC 構造に基づく最適故障検出フィルタを提案し、磁気浮上システムに対する耐故障制御系の構築をおこなった。また、鋼板磁気浮上システムに対する故障診断アルゴリズムを決定し、MIMO システムに対する耐故障制御系を構築した。故障検出、故障診断、制御系の再構成という耐故障制御系における重要な 3 つの機能を有した制御系の構築をおこなうことで、提案手法による耐故障制御系が実システムに対して安全性を提供でき得ることが示されたということが大きな貢献である。

本文では、故障検出フィルタ設計に関する 4 つの多目的最適化問題を定式化し、それぞれの問題に対する最適解を導出した。特に問題 9 によって得られる最適故障検出フィルタを用いることで、実際の制御対象に対する故障信号の特徴をより正確に捉えることができ、周波数評価区間 $[f_1, f_2]$ によって故障検出フィルタの整形が可能となる。これは、他に定式化した問題と比べて外乱による影響に対する条件を緩和することで、故障による影響を周波数領域においてより厳密に指定することができるからである。

また、不安定系である磁気浮上系に対し、外乱および故障信号を含めたモデルを導出し、実際に最適故障検出フィルタの設計をおこなった。検証実験では、提案手法による故障検出フィルタによって正常に故障検出をおこなうことができ、それによって GIMC 構造の内部ループを切替えることで制御系の安定性を維持できること

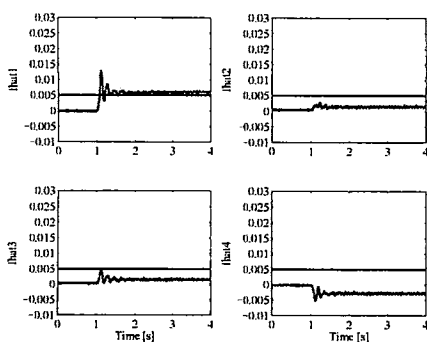


Fig. 7: 実験結果 — i_1 が故障した場合

を確認した。また、浮上対象物の質量変動を外乱として与えることで、従来法による変動検出フィルタより、提案手法による故障検出フィルタのほうが外乱抑制性能が高いことを示した。

さらに、MIMO システムである鋼板磁気浮上システムに対する耐故障制御系を構築した。検証実験では、4 つのうち 1 つのアンプに対する出力が低下するアクチュエータ故障に対し、提案手法による故障検出フィルタを用いてこのアクチュエータ故障も検出できることを示した。さらに、故障診断信号の外乱による影響を評価す

るために、正弦波外乱を故意に発生させた状況における検証実験をおこなった。

今後の課題

提案手法による最適故障検出フィルタはパラメータ最適化によって導出されているため、得られた故障検出フィルタが必ずしも定式化した問題に対する最適解とは限らない。故障検出フィルタの構造を限定しない最適化手法に関する研究が必要である。

また、たとえシステムが非干渉なものであっても、発生している故障がアクチュエータ故障、センサ故障のどちらなのかを診断しなければならない。したがって、アクチュエータ故障とセンサ故障を非干渉化するか、あるいは別の故障診断に関する研究が必要である。

参考文献

- [1] R. J. Patton, "Fault-Tolerant Control Systems: The 1997 Situation," *Proc. in IFAC Safeprocess Conference*, pp. 1033-1054, 1997.
- [2] Y. Zhang and J. Jiang, "Bibliographical Review on Reconfigurable Fault-Tolerant Control Systems," *Proc. in IFAC Safeprocess Conference*, pp. 265-276, 2003.
- [3] K. Zhou and Z. Ren, "A New Controller Architecture for High Performance, Robust, and Fault-Tolerant Control," *IEEE Trans. on Automatic Control*, Vol. 46, No. 10, pp. 1613-1618, 2001.
- [4] 滑川, 丸山, "GIMC 構造を用いた磁気浮上システムの高性能ロバスト制御," 計測自動制御学会論文集, Vol. 42, No.11, pp. 1181-1187, 2006.
- [5] N. Liu and K. Zhou, "Optimal Solutions to Multi-objective Robust Fault Detection Problems," *Proc. in IEEE Conference on Decision and Control*, pp. 981-988, 2007.
- [6] D. U. Campos-Delgado, E. Palacios and D. R. Espinoza-Trejo, "Fault Detection, Isolation, and Accommodation for LTI Systems Based on GIMC Structure," *Journal of Control Science and Engineering*, Article ID 853275, 2008.
- [7] K. Zhou and J. C. Doyle, *Robust and Optimal Control*; Prentice Hall, 1996.

学位論文審査結果の要旨

当該学位論文に関し、平成 21 年 1 月 29 日に第 1 回学位論文審査委員会を開催した。1 月 30 日に口頭発表を実施し、その後に第 2 回審査委員会を開催した。慎重審議の結果、以下の通り判定した。なお、口頭発表における質疑を最終試験に代えるものとした。

本論文では、GIMC (Generalized Internal Model Control) 構造に基づく耐故障制御系設計法を提案し、この理論を鋼板磁気浮上システムへ応用して有効性を実験的に示した。

まず GIMC 構造に基づく推定誤差信号によるオンライン故障検出法を提案し、それを用いた耐故障制御系構築を行った。特にロバスト制御の観点から故障信号による影響をある感度レベルで保持し、外乱による影響を最小化する故障検出フィルタ設計問題を多目的最適化問題として定式化し、代数的な解を導出した。さらに理論検証のために、磁気浮上系に対し故障検出フィルタと GIMC 構造に基づく耐故障制御系を構築した。実際の制御実験において最適故障検出フィルタは良好なセンサ故障検出特性を示した。次に多入出力系の鋼板磁気浮上システムに対する故障診断を含めたアクチュエータ耐故障制御系を構築した。ここでは非干渉化したシステムに対して故障検出フィルタを設計し、故障検出と故障診断アルゴリズムを決定した。検証実験では提案した診断アルゴリズムにより適切に故障状況を判断し、制御系の再構成が可能であることを確認した。

以上の研究成果は、制御工学における耐故障制御系設計理論とその応用に大きく貢献するものであり、本論文は博士（工学）に値すると判定した。