

GIMC 構造を用いた磁気浮上系のロバスト制御

Robust Control of Magnetic Suspension Systems Using GIMC Structure

滑川 徹 (長岡技術科学大学)

丸山 英人 (長岡技術科学大学)

Toru NAMERIKAWA, Nagaoka University of Technology, Kamitomioka 1603-1, Nagaoka, Niigata
Hideto MARUYAMA, Nagaoka University of Technology

Key Words: Generalized Internal Model Control, Design Tradeoff, Magnetic Suspension System, Robust Control

1. はじめに

通常のフィードバック制御構造において、性能とロバスト性にはトレードオフの関係があり、高い性能を得るためにはロバスト性を犠牲にし、高いロバスト性を得るには性能を犠牲にして制御系設計を行うことが一般的である。この問題に対して GIMC 構造はトレードオフなく、望ましいコントローラを得ることができる制御構造として提案されている^{(1) (2)}。高い性能を持つノミナルコントローラ K_0 と高いロバスト性を持つロバストコントローラ K を使い、ノミナル時には K_0 でモデル変動時には K で制御し望ましいコントローラ構造となる。本研究ではこの GIMC 構造を磁気浮上系に適用し⁽³⁾、従来のロバスト制御法である H_∞ 制御との比較検討を行う。

2. GIMC 構造

はじめに制御対象 \tilde{G} とそのモデル G 、そして G を安定化するノミナルコントローラ K_0 があり、それらは式 (1) の左既約分解で表現されるとする。

$$G = \tilde{M}^{-1}\tilde{N}, \quad K_0 = \tilde{V}^{-1}\tilde{U} \quad (1)$$

このとき、全ての安定化ロバストコントローラ K は安定な $Q \in H_\infty$ を用いて式 (2) で表される。

$$K = (\tilde{V} - Q\tilde{N})^{-1}(\tilde{U} + Q\tilde{M}) \quad (2)$$

GIMC 構造はこの式 (1), (2) の関係を用いて Fig.1 で表される。

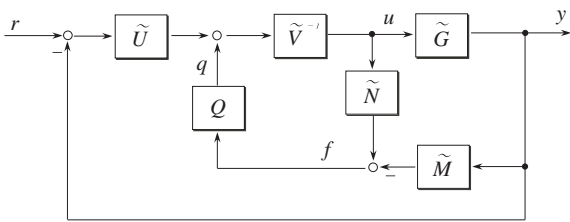


Fig. 1 GIMC Structure

GIMC 構造が K_0 と K を切り替えて制御できることは内部信号 f によるものである。ここで信号 f は式 (3) で表される。

$$f = \tilde{N}u - \tilde{M}y \quad (3)$$

この信号 f は推定出力と観測出力の誤差であり⁽²⁾、この信号には二つの状態がある。制御対象とモデルが一致する $\tilde{G} = G$ の場合と制御対象とモデルが一致しない $\tilde{G} \neq G$ の場合である。

$\tilde{G} = G$: モデルに不確かさ、外乱が無く $f = 0$ となり内部ループは使用されない。よって $K_0 = \tilde{V}^{-1}\tilde{U}$ で制御される。

$\tilde{G} \neq G$: モデルに不確かさ、外乱が存在し $f \neq 0$ で内部ループが有効となる。その結果全ての内部安定化コントローラ $K = (\tilde{V} - Q\tilde{N})^{-1}(\tilde{U} + Q\tilde{M})$ で制御される。

つまり K_0 を高い性能を有するように、 K を高いロバスト性を有するように設計すれば、ノミナル時は高い性能を有したノミナルコントローラ K_0 で、モデル変動時には高いロバスト性を有したロバストコントローラ K で制御されることになり、望ましいコントローラを得ることができる。

GIMC 構造のコントローラの設計は次のように行う。

1. ノミナルモデルに対して高い性能を持つノミナルコントローラ K_0 を設計する
2. 変動モデルに対して高いロバスト性を持つロバストコントローラ K を設計する
3. 内部コントローラ Q を以下の式で求める

$$Q = \tilde{V}(K - K_0)(\tilde{N}K + \tilde{M})^{-1} \quad (4)$$

このように設計することで内部コントローラ Q はノミナル時には影響を及ぼさず、ノミナルコントローラ K_0 で制御され、モデル変動時にはロバストコントローラ K で制御されることになる。これにより GIMC 構造での制御系設計では性能とロバスト性のトレードオフを分けて設計することができる。

3. 制御対象

本研究の制御対象は Fig.2 で示される一軸制御型磁気浮上システムである。この制御対象は式 (5) の線形化された伝達関数で表される⁽³⁾。式中の各変数は、 m :浮上体質量、 $x(t)$:変位、 $i(t)$:電流、 k, x_0 :電磁石係数、 X :平衡位置、 I :平衡電流である。ノミナルパラメータを Table 1 に示す。

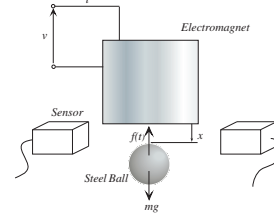


Fig. 2 Magnetic Suspension System

$$G = \frac{-k_i}{s^2 - k_x} \quad (5)$$

$$k_x = \frac{2kI}{m(X + x_0)^2}, \quad k_i = \frac{2kI^2}{m(X + x_0)^3}$$

4. 制御系設計

GIMC 構造で用いるノミナルコントローラ K_0 とロバストコントローラ K を H_∞ 混合感度問題により設計する。このコント

Table 1 Nominal Parameters

m	0.357[kg]
k	$11.641 \times 10^{-4} [\text{Nm}^2/\text{A}^2]$
x_0	$4.737 \times 10^{-3} [\text{m}]$
X	$5 \times 10^{-3} [\text{m}]$
I	0.53[A]

ローラ設計では K_0 に高い性能を, K に高いロバスト性を持たせるように設計する. 一般化プラントを Fig.3 に示す. W_S が感度関数に対する重み, W_T が相補感度関数に対する重みである.

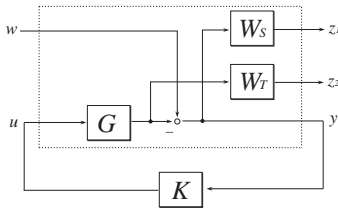
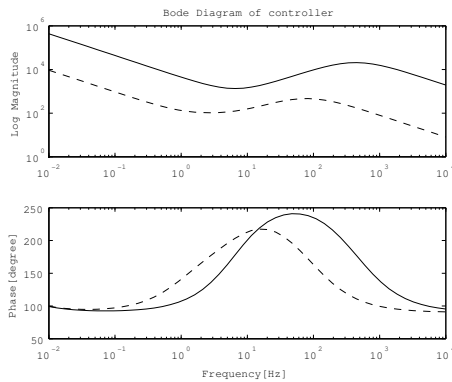


Fig. 3 Generalized Plant

K_0, K の設計に用いる重みをそれぞれ式 (6), (7) に示す. 添え字の P は K_0, R は K に対する重みを表す. またこれによって求めた H_∞ コントローラ K_0, K を Fig.4 に示す. 実線が K_0 , 破線が K である. 設計した二つのコントローラは, K_0 が高ゲインなコントローラで高性能を有し, K が低ゲインでモデル変動に対してロバストであることが分かる. K_0, K を用いて式 (4) から Q を導出する⁽²⁾.

$$W_{SP} = \frac{500}{s + 0.01}, W_{TP} = 1 \cdot 10^{-6} \cdot (s + 0.02)(s + 0.1) \quad (6)$$

$$W_{SR} = \frac{10}{s + 0.01}, W_{TR} = 1 \cdot 10^{-5} \cdot (s + 0.02)(s + 800) \quad (7)$$

Fig. 4 Bode Diagram of Controllers : K_0 and K

5. シミュレーションによる検討

求めた二つのコントローラ K_0, K と GIMC 構造の三つのステップ応答を示す. このシミュレーションではモデルの変動として鉄球の質量の変化と信号の遅れを考慮しており, ノミナルモデルの鉄球質量 m は 357[g] で, 変動モデルの鉄球質量 m_p は 197[g] である. またプラントの応答の遅れを考慮モデル変動に 0.001[s] のむだ時間を設定した (Table 2). ノミナルモデルと変動モデルのステップ応答を Fig.5 に示す. ここでステップは平衡位置 5[mm] から 6[mm] への目標値を与えている. 実線が GIMC, 破線が K_0 , 一点破線が K の応答である.

Table 2 Perturbed Parameter

	Nominal Parameters	Perturbed Parameters
m [kg]	0.357	0.197
delay[s]	0.000	0.001

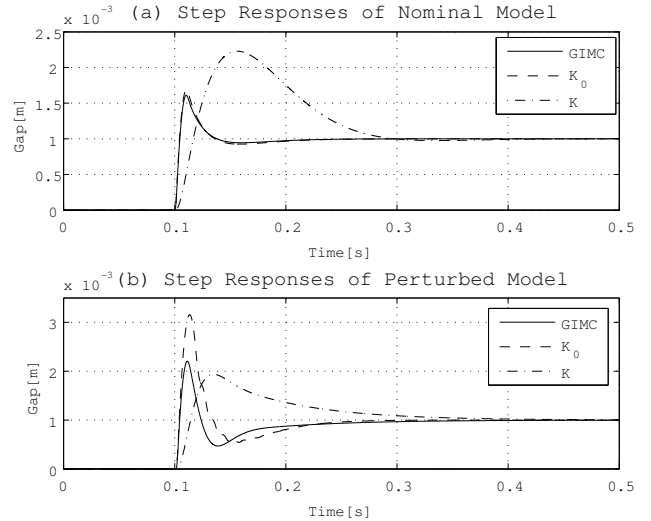


Fig. 5 Step Responses of Nominal and Perturbed Models

この結果より, K_0 はノミナルプラントにおいて良い応答を示し, K は変動プラントで良い応答を示し, 二つのコントローラは高い性能と高いロバスト性をそれぞれ持つことが分かる. この二つのコントローラを用いて設計した GIMC の応答はモデル誤差が無いノミナル時では K_0 と同じ応答を示している. またモデル変動時では K_0 の応答は大きく変動しているが, GIMC は良い応答を示している. これにより GIMC 構造は良いノミナル性能と高いロバスト性を実現していることが分かる.

6. おわりに

今回 GIMC 構造を磁気浮上系に適用し, その性能とロバスト性を確認した. GIMC の設計には高い性能を有する K_0 と高いロバスト性を有する K の二つのコントローラを用い, 制御構造でこの二つを切り替えて制御を行っている. シミュレーションにより, GIMC 構造は良好なノミナル性能とロバスト安定性の二つの特性を有していることを確認した. 今後は制御実験により GIMC 構造の性能とロバスト性の検証を行う.

文献

- (1) Kemin Zhou, "A Neutral Approach to High Performance Robust Control: Another Look at Youla Parameterization", Proc. of SICE Annual Conf. 2004, pp.869-874, 2004
- (2) Kemin Zhou, and Zhang Ren, "A New Controller Architecture for High Performance, Robust, and Fault-Tolerant Control", IEEE Trans. on Automatic Control, Vol.46, No.10, pp1613-1618, 2001
- (3) Masayuki Fujita, Toru Namerikawa, Fumio Matsumura, and Kenko Uchida, " μ -Synthesis of an Electromagnetic Suspension System", IEEE Trans. Automat. Contr., Vol.40, No.3, pp530-536, March 1995