

1 はじめに

実際のシステムでは、物理的限界などの理由から制御入力に制限を持つものが多く存在する。このようなシステムに対して高い性能を要求すると、制御入力に飽和が生じ所望の入力が得られず、性能劣化やシステムの不安定化を招く要因となる。このような現象を Windup 現象と呼び、それを抑制する制御手法のことを Anti-Windup 制御と呼ぶ。その中の一つに内部モデル制御 (IMC) 構造を用いた方法がある [1] [2]。しかし IMC の性質上、対象となるシステムは安定でなければならない。

本稿では、IMC に基づく Anti-Windup 制御を不安定系へ応用し、その有効性を検証する。具体的には、不安定な磁気浮上システムをまず PID 制御により安定化し、安定化された閉ループ系を新たな対象とみなし、IMC を用いて Anti-Windup 制御系設計を行う。その結果、入力飽和による性能劣化が抑制されることを制御実験により確認する。

2 IMC の設計

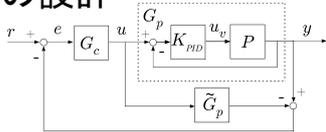


Figure 1: IMC Structure

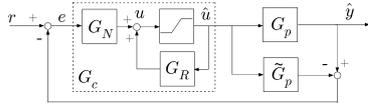


Figure 2: Anti-Windup Compensater

Anti-Windup 制御器を設計する準備として IMC 制御器を設計する。Fig. 1 に IMC 構造を示す。 G_p, \tilde{G}_p はそれぞれ制御対象、制御対象のモデル、 G_c は IMC 制御器である。ここで PID 制御器 K_{PID} と磁気浮上システム P の閉ループ系を広義の制御対象 \tilde{G}_p とみなすと、それぞれ (1), (2), (3) 式で与えられる。

$$K_{PID}(s) = K_P + \frac{1}{s}K_I + \frac{s}{\frac{1}{N}s + 1}K_D \quad (1)$$

$$P(s) = \frac{k_i}{ML} \frac{1}{(s^2 - \frac{k_x}{M})(s + \frac{R}{L})} \quad (2)$$

$$\tilde{G}_p(s) = \frac{K_{PID}P}{1 + K_{PID}P} \quad (3)$$

以上より、IMC 制御器 G_c は (4) 式で与えられる [1]。

$$G_c(s) = G_f(s)\tilde{G}_p^{-1}(s) \quad (4)$$

ここで、 G_f は G_c をプロパーとするために付加したローパスフィルタであり、 $G_p = \tilde{G}_p$ のとき (5) 式となる。

$$y(s)/r(s) = G_f(s) \quad (5)$$

3 Anti-Windup 補償を考慮した IMC

Fig. 2 に入力飽和があるシステムに対する Anti-Windup 制御系を示す。ここで \hat{u} は飽和後の制御入力、 \hat{y} は飽和時の出力である。Fig. 2 より $u = \hat{u}$ 、つまり非飽和時には

$$G_c(s) = (1 - G_R)^{-1}G_N \quad (6)$$

となる。一方、飽和時には飽和前の制御入力 u が

$$u(s) = G_N e + G_R \hat{u} \quad (7)$$

となり、 G_N, G_R を適切に定めることにより、Anti-Windup 制御器として作用する。ただし、 G_N, G_R は Anti-Windup フィルタ $F(s)$ を用いて (8) 式で表される。

$$G_N(s) = F(s)\tilde{G}_p G_c, \quad G_R(s) = 1 - F(s)\tilde{G}_p \quad (8)$$

したがって、 G_N, G_R を適切に設定することはフィルタ $F(s)$ を適切に設定することと等価である。

4 実験結果

設計パラメータとなるフィルタ $F(s)$ は、

$$F(s) = (as + b)^3 \quad (9)$$

と表される。 F がインプロパーで、次数が 3 次となっているのは G_N がプロパーとなるためであり、また a は G_R が厳密にプロパーとなるように設定される。よって実質的に設計パラメータは b のみとなる。ここでは (10) 式のように定めた。

$$a = 0.0022, \quad b = 1 \quad (10)$$

今回は入力飽和を $-55 \leq u_v [V] \leq 55$ とし、時刻 0[s] で 1[mm] のステップ目標値を与える実験を行った。その結果を Figs. 3, 4, 5 に示す。Fig. 3 は入力飽和がないシステムで、最大 $\pm 150[V]$ まで印加可能である。Fig. 4 は入力飽和があるシステムにおける IMC の応答であり、Fig. 5 は、入力飽和があるシステムにおいて IMC を Anti-Windup 化したときの応答である。Figs. 3, 4 より、IMC では飽和が起ると応答が振動的になっていること分かる。一方、Fig. 5 より、Anti-Windup 化したときの応答は飽和がない場合の Fig. 3 の応答のように、すばやく目標値に追従している。これより、明らかに Anti-Windup によって飽和の影響が抑制されていることが確認できる。

5 おわりに

磁気浮上システムに対して IMC に基づく Anti-Windup 制御系設計を行い、制御実験によってその有効性を確認した。

References

- [1] M.Morrari et al, Anti-Windup Design for Internal Model Control, *Int. J. of Control*, 60-5, 1015/1024, 1994.
- [2] 玉江ら, IMC による入力飽和をもつむだ時間系の制御, 第 49 回自動制御連合講演会, SA-2-2-3, 2006.

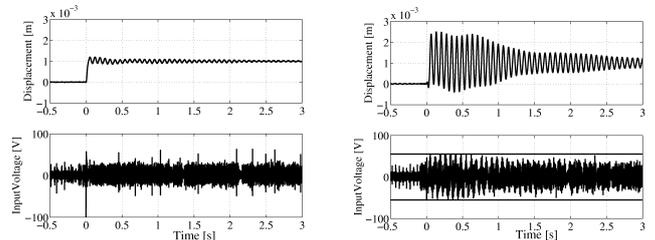


Figure 3: Unconstrained system Figure 4: Constrained system

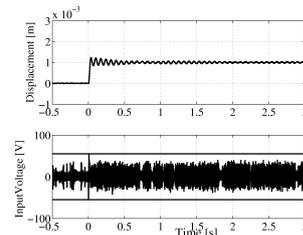


Figure 5: Constrained system with AW