Suppression Control of Inverse Response for A Multi-Agent Type Non-Minimum Phase System

正 加藤 誠 (阪工大)

Makoto Katoh, Osaka Institute of Technology

Abstract: First of all, the 2nd or 2nd approximated non-minimum phase objects were requested, it limited as the agent system in this thesis. We obtained an analytical solution on the amount and the over-shoot time of an inverse-response. Then, a strategy of the inverse-response suppression control by the adjustment of inherent parameters was requested about it. Next, if an inverse-response of the worst damping agent was suppressed in the case of those parallel multi agents systems, it was shown that it was enough for them.

KEYWORD: Non-minimum Phase System, Inverse Response Suppression Control

1. はじめに

非最小位相系の制御問題の解決のために線形系では最適レギュレータによる非干渉制御¹⁾が、多入力多出力の特定の非線形系では特異摂動系への変換手法等が研究されている²⁾。しかし、それらが逆応答の抑制にも有効であるとは直接的に述べられてはいなかった。

一方、多くの分野において、分散人工知能の柱としてマルチエージェントシステムの研究の有用性が注目されている³⁾。そこでは、自律性、適応性、社会性を兼ね備えた狭義の高機能エージェントから、それらのうちの1つでも有すれば良いとする広義の簡易エージェントまで、さまざまなエージェントが活躍している。その実体もロボット、タスク、ソフト、状態方程式など多くの種類がある。

本稿では非自律的であるが並列分散系の構成要素である2次系もしくは2次近似系⁴⁾⁵⁾をエージェント系と呼び、それらが並列に結合した系をマルチエージェント系と見なす。そして、各エージェント系の逆応答時間と逆応答量を解析的に求めれば、各エージェント系の固有パラメタの調整戦略からマルチエージェント系の逆応答抑制制御の社会性のある指針が得られることを示す。

2. 安定な非最小位相過減衰2次系の逆応答

次のような零点を1つ持つエージェント系:
を考える。これが過減衰系の場合には逆応答の逆応

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1(t) \\ \dot{x}_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_n^2 & -2\zeta\omega_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ K\omega_n^2 \end{bmatrix} u(t) \quad (1)$$

$$y(t) = \begin{bmatrix} 1, \frac{c}{\omega_n^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix}$$

答時間および逆応答量は次のように解析的に求められる。また、この零点が不安定零点 ($c < 0$) であれば、そのエージェント系のステップ応答は逆応答を有することを式(2)の正值条件から示すことができる。

逆応答時間は Fig. 1 に示すように減衰係数が大きくなる程小さくなり、逆応答量も Fig. 2 に示すように減衰係数が大きくなる程小さくなる。

逆応答時間

$$t_i = \frac{1}{2\sqrt{\zeta^2 - 1}\omega_n} \ln \left(\frac{c(\zeta + \sqrt{\zeta^2 - 1}) - \omega_n}{c(\zeta - \sqrt{\zeta^2 - 1}) - \omega_n} \right) \quad (2)$$

Fig.1 逆応答時間

逆応答量

$$y_i(t) = K \left\{ 1 + \frac{-c + (\zeta - \sqrt{\zeta^2 - 1})\omega_n}{2\sqrt{\zeta^2 - 1}\omega_n} \left(\frac{c(\zeta + \sqrt{\zeta^2 - 1}) - \omega_n}{c(\zeta - \sqrt{\zeta^2 - 1}) - \omega_n} \right)^\alpha + \frac{c - (\zeta + \sqrt{\zeta^2 - 1})\omega_n}{2\sqrt{\zeta^2 - 1}\omega_n} \left(\frac{c(\zeta + \sqrt{\zeta^2 - 1}) - \omega_n}{c(\zeta - \sqrt{\zeta^2 - 1}) - \omega_n} \right)^\beta \right\} \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{-(\zeta + \sqrt{\zeta^2 - 1})}{2\sqrt{\zeta^2 - 1}} \quad \beta = \frac{-(\zeta - \sqrt{\zeta^2 - 1})}{2\sqrt{\zeta^2 - 1}} \quad (4)$$

Fig.2 逆応答量

3. 逆応答抑制制御

3. 1 調整戦略

逆応答量は固有角速度には無関係に減衰係数を大きくするほど小さくなるので、逆応答量を所定の値以下にする減衰係数になるようにフィードバック制御で調整することができる。それとは無関係に立ち上がり時間や整定時間をほぼ一定に調整するために、減衰係数を大きくするほど固有角速度も大きくなるように、固有角速度をやはりフィードバック制御で調整する2自由度制御案が考えられる。元の系が不足減衰や臨界減衰の場合でも目標とする減衰係数が過減衰であれば、同様の式が使えるはずである。

結局、発見的な「K不変かつ $\zeta = \omega_n$ 戦略」を採用

すれば逆応答を抑制しつつ応答速度を維持できる。

3. 2 PD レギュレータによる実現

PD レギュレータを用いた場合に「K 不変かつ $\zeta = \omega_n$ 戦略」を採れば、安定限界パラメタ空間内の比例・微分係数は次式で解ける。

$$(K\omega_n^2 + Kc)k_d^2 + (K\omega_n^2 + 2\zeta\omega_n Kc - Kc^2)k_d + 2\zeta\omega_n - 2\omega_n^2 = 0$$

$$k_p = \left\{ \frac{1}{(1 + k_d Kc)} - 1 \right\} \frac{1}{K} \quad (5)$$

この場合、固有パラメタは決まってしまう、十分な逆応答の抑制は期待できない。「K 不変かつ指定戦略」を採れば逆応答は抑制できるが、応答は遅くなると考えられる。結局、定常偏差も無くそうとすると PD 極指定レギュレータでは自由度が足りない、次に二自由度制御について検討する。

3. 3 二自由度制御

極指定と定常偏差防止を行える二自由度制御には目標値変換を行う方法と I-PD 制御を行う方法が考えられるが、調整の容易さや外乱の影響除去の観点では積分器を用いた I-PD 制御の方が優れている。しかし、閉ループは 3 次系になるので逆応答と固有パラメタの関係が複雑である。そこで、K 不変性は積分制御や目標値変換に任せてしまい、PD レギュレータでは「 $\omega_n = \zeta$ 指定、すなわち、極指定戦略」を採ることにすると、2 次系のままで扱える。結局、PD レギュレータの各パラメタは次式で求まるが、安定性確保のための不等式が存在するので、任意に減衰係数を指定することはできない。

$$Kk_d = \frac{(2\zeta\omega_n - 2\zeta^2 - c)\omega_n^2 + c\zeta^2}{(2\zeta^2 c - \omega_n^2)\omega_n^2 - \zeta^2 c^2} < \frac{1}{-c} \quad (6)$$

$$\frac{2\zeta\omega_n + k_d K\omega_n^2}{-c} > Kk_p = \frac{\zeta^2}{\omega_n^2} (1 + cKk_d) - 1 > -1 \quad (7)$$

K 不変性のための目標値変換は次式になる。

$$\bar{r} = (1 + k_d Kc)(1 + k_p K)r \quad (8)$$

この目標値変換による方法は積分器を用いていないために、サーボの用途ではソフトサーボになることに注意すべきである。

4. マルチエージェント系への拡張

高次偶数次数系が次のように部分分数展開できたとする。ここでは一般には直列エージェント系が並列エージェント系として記述できた場合を考察する。

$$G(s) = K \frac{\prod_{i=1}^{2m-1} (\tilde{c}_i s + \tilde{b}_i)}{\prod_{i=1}^m (s^2 + 2\zeta_i \omega_{ni} s + \omega_{ni}^2)} = K \sum_{i=1}^m \frac{A_i \omega_{ni}^2 (\frac{c_i}{\omega_{ni}^2} s + 1)}{s^2 + 2\zeta_i \omega_{ni} s + \omega_{ni}^2} \quad (9)$$

このステップ応答はそれぞれの並列サブシステム、すなわち各エージェント系のステップ応答の重ね合わせになり、それぞれの逆応答時間は次のようになる。ただし、少なくとも 1 つの $\alpha_i < 0$ とする。

$$t_i = \frac{1}{(2\sqrt{\zeta_i^2 - 1})\omega_{ni}} \ln \left[\frac{\omega_{ni} - (\zeta_i + \sqrt{\zeta_i^2 - 1})c_i}{\omega_{ni} - (\zeta_i - \sqrt{\zeta_i^2 - 1})c_i} \right] \quad (10)$$

逆応答項のそれぞれの逆応答量も次のようになる。

$$y_i(t) = K A_i \left\{ 1 + \frac{-c_i + (\zeta_i - \sqrt{\zeta_i^2 - 1})\omega_{ni}}{2\sqrt{\zeta_i^2 - 1}\omega_{ni}} \left(\frac{c_i(\zeta_i + \sqrt{\zeta_i^2 - 1}) - \omega_{ni}}{c_i(\zeta_i - \sqrt{\zeta_i^2 - 1}) - \omega_{ni}} \right)^{\alpha_i} \right. \\ \left. + \frac{c_i - (\zeta_i + \sqrt{\zeta_i^2 - 1})\omega_{ni}}{2\sqrt{\zeta_i^2 - 1}\omega_{ni}} \left(\frac{c_i(\zeta_i + \sqrt{\zeta_i^2 - 1}) - \omega_{ni}}{c_i(\zeta_i - \sqrt{\zeta_i^2 - 1}) - \omega_{ni}} \right)^{\beta_i} \right\} \quad (11)$$

$$\alpha_i = \frac{-(\zeta_i + \sqrt{\zeta_i^2 - 1})}{2\sqrt{\zeta_i^2 - 1}} \quad \beta_i = \frac{-(\zeta_i - \sqrt{\zeta_i^2 - 1})}{2\sqrt{\zeta_i^2 - 1}} \quad (12)$$

これらを重ね合わせた時の逆応答時間は正時間の $t \in [\min_i t_i, \max_i t_i]$ で発生し、重ね合わせ後の最大値は逆応答項に関する次の不等式で抑えられる。

$$\min_i y_i(t) \leq \max y(t) \leq \sum_{i=1}^m y_i(t) \quad (13)$$

これらの逆行き過ぎ量はそれぞれの減衰係数を大きくする程小さくなるが、応答が遅くなるので、次のような二自由度 I-PD 制御調整戦略を考える。

1) 各エージェント系の中の最悪減衰系について、「 $\zeta_i = \omega_{ni}$ 戦略」を採用して並列モデル参照型 PD レギュレータ等によって調整する。その他のエージェント系はその調整の下で成り行きに任せるが、符号が同一であれば同様に改善されるはずである。

2) K 不変性は全体系に対する目標値変換が難しくなるので積分制御によって保証する。

5. 結論

零点を 1 つ有する二次系をエージェント系とみなして目標値変換法を用いた二自由度極指定 PD レギュレータによる非最小位相系の逆応答抑制制御法を誘導した。同様の効果は同じ PD レギュレータを用いた I-PD 制御による二自由度制御でも得られる。

高次系をこれらの並列系へ変換後の最悪減衰エージェント系に対する調整を行えば、マルチエージェント系にも十分な効果が得られることを示した。

謝辞

本研究に対して貴重なサジェスチョンを頂いた大阪大学の古荘教授と池田教授および重要な議論をしてくれた大阪工大の田中学君に感謝致します。

参考文献

1. 鈴木・小林・藤田：非最小位相系に対する最適レギュレータの極限形式を用いた近似非干渉制御、電学論 C, 119-3, 380/386 (1999)
2. JuIl Lee and In-Joong Ha: A Novel Approach to Control of Nonminimum-Phase Nonlinear Systems, IEEE Trans. On AC, Vol. 47-9, 1480/1491 (2002)
3. G. M. P. O'Hare and N. R. Jennings, "Foundations of Distributed Artificial Intelligence", Sixth-Generation Computer Technology Series, Wiley-Interscience, (1996).
4. 高橋：システムと制御、岩波 (1986)
5. 嘉納他：動的システムの解析と制御、コロナ社 (1996)