

目標値整形による組込PD制御器のための簡易ロバストサーボ

正 杉原知道 (九大)

Reference Shaping for Simple Robust Servo on Embedded PD Controller

*Tomomichi Sugihara (Kyushu Univ.)

Abstract— An online reference shaping which easily achieves robust motor servo control is proposed. The key technique is to equip an integration compensator with a quantized anti-windup function outside of the PD controller. It works even on unsophisticated embedded PD controllers.

Key Words: Reference shaping, Embedded PD controller, Robust servo control, Anti-wind-up

1. はじめに

サーボ制御では、プラントのモデルが正確でなくても重力・摩擦などによる定常外乱を補償できるロバスト性が求められる。2自由度制御やスライディングモード制御の応用が提案されている [1][2] が、制御対象が回転モータの場合、どのような方法であれ積分補償が必須となる。しかし積分補償を不用意に行うと、電圧やトルクの制限が原因でwindup [3] が生じる。これを防ぐためには、操作量の飽和時に特別な制御を行う必要があるが、市販の組込制御器には飽和が生じているか否かを外部から監視する機能が備わっていないことが多い。一方、制御器への目標値を整形するだけで、システムのある程度設計できる方法 [4, 5, 6] が知られている。本稿では、目標値整形器自体に積分補償およびアンチwindup機能を持たせることで、低機能な組込PD補償器を用いたシステムであってもロバストに定常外乱を補償する方法を提案する。

2. 目標値整形によるサーボ制御の応答改善

Fig.1 に示すように、目標角度 $d\theta$ のみを入力としモータを制御する組込PD補償器を想定する。 K_P は比例ゲイン、 K_D は微分ゲインである。図では微分先行型となっているが、通常のPD補償器であっても構わない。内部に飽和器を持つが、飽和しているか否かを外部からは判らない。ただし、モータの現在角度 θ は取得できるものとする。

Fig.2 のように、与えられた指令角度 $c\theta$ を修正し $d\theta$ とする目標値整形器を、次式で設計する。

$$d\theta = c\theta + K_I a + \theta_O \quad (1)$$

$$a = \text{acm}(e; a_M) \quad (2)$$

$$e = \text{sat}(c\theta - \theta; e_M) \quad (3)$$

$$\theta_O = \text{sgn}\{dz(e; \Delta)\}r \quad (4)$$

ただし K_I , a_M , e_M , Δ , r は定数とする。 sat は次式で定義される閾値関数である。

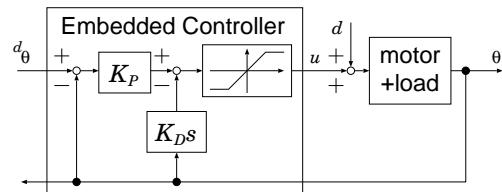


Fig.1 An embedded PD controller to be supposed.

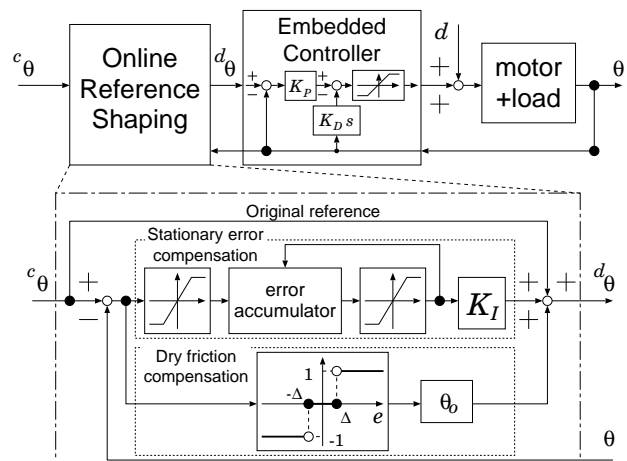


Fig.2 Proposed online reference shaping system.

$$\text{sat}(x; x_M) = \begin{cases} x_M & (x > x_M \text{ のとき}) \\ x & (-x_M \leq x \leq x_M \text{ のとき}) \\ -x_M & (x < -x_M \text{ のとき}) \end{cases} \quad (5)$$

$\text{acm}(x; x_M)$ は、 $|x| < x_M$ のときのみ x を積分し、それ以外の場合は出力を現在値でリセットするアンチwindup機能付き積分補償器である。これは代数ループを含むので、連続時間システムとして表現することはできないが、例えば長方形近似によって離散化すると、次のように漸化式で定義できる。

$$a' = a[k] + T e[k] \quad (6)$$

$$a[k+1] = \text{sat}(a'; a_M) \quad (7)$$

ただし T はサンプリング時間である。また $dz(x; \Delta)$ は、次式で定義される不感帯関数である。

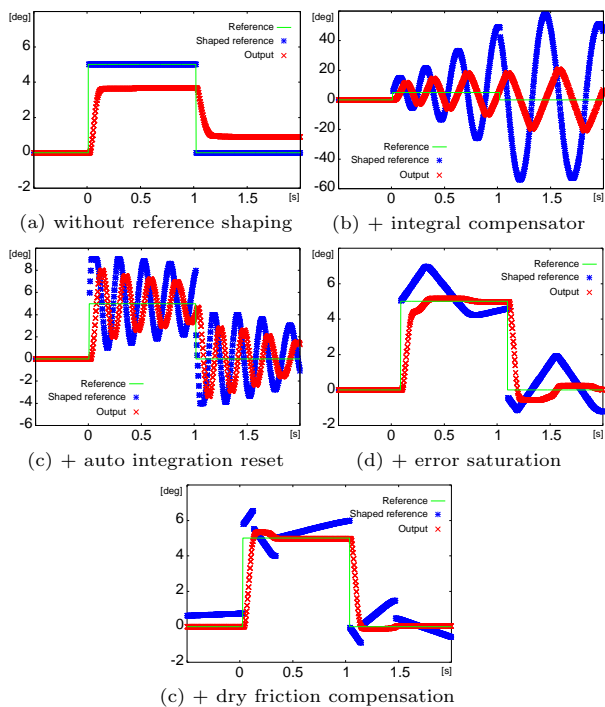


Fig.3 Step responses for proposed subsystems

$$dz(x; \Delta) = \begin{cases} x - \Delta & (x > \Delta \text{ のとき}) \\ 0 & (-\Delta \leq x \leq \Delta \text{ のとき}) \\ -x + \Delta & (x < -\Delta \text{ のとき}) \end{cases} \quad (8)$$

式(2)(3)(4)はそれぞれ, 定常偏差補償, オーバーシュート抑制, 乾性摩擦補償を目的としている. 値が全て飽和しない領域においては, 制御器は次式のような微分先行型 PID 補償器と等価になる.

$$u = K_P \{ {}^c\theta - \theta + K_I \int ({}^c\theta - \theta) dt + \theta_O \} - K_D \dot{\theta} \quad (9)$$

また, いずれかの箇所で飽和が起こる場合, 積分項は定値で抑えられ (平衡点は ${}^c\theta$ からずれるが) 元の微分先行型 PD 補償器と等価になる.

3. 実験

人型ロボット mighty[7] の腕部を用いて実験を行った. 肩関節の外転方向に, 5° 幅のステップ状指令値を与えて応答を調べた. モータは maxon motor コアレス DC モータ RE-max21, 減速器はプーリおよびハーモニックドライブ CSF-8-100 を用いており, 回転中心から約 $0.1[m]$ の距離に重心がある. 腕部質量は約 $0.4[kg]$ である. また使用したモータドライバは, H8 プロセッサを持ち, $1[ms]$ 周期で PD 補償制御を行うプログラムが組み込まれている. 出力は $\pm 24[V]$ 電圧 PWM デューティ比 (基本周波数 $12.5[kHz]$) である. 電圧-電流はほぼ比例すると仮定し電流フィードバックは行わない, 小サイズ, 低コストを優先した低機能なものである. 高ゲインで用いると広い領域で出力は飽和し, ほとんど ON-OFF スイッチとして動作する.

結果を Fig.3 に示す. まず $K_I = 0, a_M = \infty, e_M = \infty, \Delta = 0, r = 0$ とし, 指令値をそのまま PD 補償器に与えたときの応答が (a) である. 過渡応答はオーバーシュート 1% 未満, 静定時間は約 $0.1[s]$ だが, 20% 程度の定常偏差が生じている. ヒステリシスがあるので, 主な原因は乾性摩擦と考えられる. 次に, $K_I = 0.2$ とし積分補償を有効にしたときの応答が (b) である. 組込制御器内部の飽和要素により Windup が起こり, 不安定なシステムとなっている. $K_I a_M = 4^\circ$ とし自動リセットを有効にした結果が (c) である. 安定な応答にはなったが Windup による大振動は残っている. そこで $e_M = 0.15^\circ$ とし, 振動を抑えたものが (d) である. このグラフでは定常偏差が補償されていることが分かりやすい. また乾性摩擦の影響で, 目標値近くでの収束性が悪いことも分かる. さらに $\Delta = 0.01^\circ, r = 0.5^\circ$ とした結果が (e) である. 乾性摩擦がフィードフォワード補償され, 目標値近くでの過渡応答が改善されている.

4. おわりに

目標値整形のみで安価にロバスト安定性を実現するモータサーボ制御を提案した. 電流フィードバックや飽和監視機能を持たない低機能な組込 PD 補償器でも, 重力・乾性摩擦を補償できることを示した. 本研究は, 科学研究費補助金若手研究 (B) (課題番号: 20760170) および次世代研究スーパースター養成プログラム (九州大学総長裁量経費) の支援を受けた.

参考文献

- [1] 金子智朗, 梅野孝治, 堀洋一. 2 自由度ロバストサーボ系による多軸マニピュレータの運動制御. 日本ロボット学会誌, Vol. 9, No. 7, pp. 830-840, 1991.
- [2] Yasutaka Fujimoto and Atsuo Kawamura. Robust Servo-system Based on Two-Degree-of-Freedom Control with Sliding Mode. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 42, No. 3, pp. 272-280, 1995.
- [3] Christopher Edwards and Ian Postlethwaite. Anti-windup and Bumpless-transfer Schemes. *Automatica*, Vol. 34, No. 2, pp. 199-210, 1998.
- [4] Elmer Gilbert and Ilya Kolmanovsky. Nonlinear tracking control in the presence of state and control constraints: a generalized reference governor. *Automatica*, Vol. 38, No. 12, pp. 2063-2073, 2002.
- [5] 杉江俊治. 入力と状態の制約条件を考慮した目標値整形. システム/制御/情報, Vol. 47, No. 11, pp. 520-525, 2003.
- [6] Ryo Kikuuwe and Hideo Fujimoto. Proxy-Based Sliding Mode Control For Accurate and Safe Position Control. In *Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics & Automation*, pp. 25-30, 2006.
- [7] Tomomichi Sugihara, Kou Yamamoto, and Yoshihiko Nakamura. Hardware design of high performance miniature anthropomorphic robots. *Robotics and Autonomous System*, Vol. 56, pp. 82-94, 2007.