

PD制御-2自由度制御のカスケードによる 多関節ロボットのロバスト関節サーボ系設計

正 杉原知道 (東大) 正 中村仁彦 (東大)

Robust Joint Servo with Cascaded Two-Degree-of-Freedom Control / PD Control

*Tomomichi Sugihara and Yoshihiko Nakamura (Univ.of Tokyo)

Abstract— A robust joint servo system which cascades the two-degree-of-freedom control loop to the PD control loop is proposed. The stable minor loop stands for a plant of the major loop and facilitates nominal model identification. Also, it is applicable to systems with embedded PD controllers.

Key Words: Two-degree-of-freedom control, Robust servo system, Disturbance compensation

1. はじめに

ロボットマニピュレータの動的制御において、重力・摩擦などの外乱の抑制は制御精度向上の要件である。計算トルク法 [1] は、ロボットの動特性を厳密に考慮することで外乱を補償する方法だが、モデル誤差や外力による影響を吸収できず、計算コストに比して有用性が低い。一方、2自由度制御やスライディングモード制御を応用する方法が提案され [2][3]、低い計算コストでロバストなシステム設計を可能にしている。

本稿では、PD制御系をマイナーループに、2自由度制御系をメジャーLoopに持つカスケード制御によるロバスト関節サーボ系設計法を提案する。十分安定なマイナーループを新たなプラントと見なすことにより、ノミナルモデルの同定が容易になる。また、PD制御器が予め組み込まれ制御系の設計自由度が低いシステムであっても適用できるという利点がある。

2. 提案する関節サーボ系の構成

Fig.1 に、提案する関節制御系のブロック線図を示す。図中において、点線で囲まれた部分がPD制御によるマイナーループであり、 K_P は比例ゲイン、 K_D は微分補償ゲイン、 ${}^c\theta$ は指令関節角度、 ${}^d\theta$ はPD制御器への直接入力となる目標関節角度、 d は外乱、 θ は関節角度出力、 ξ は観測雑音である。ロボットは多数の関節により構成され、全体として複雑なダイナミクスを形成することになるが、個々の関節に施されるPD制御によって、点線で囲まれた部分が次のようなノミナルモデルで良好に近似できると仮定しよう。

$$P_n = \frac{1}{T_P^2 s^2 + 2\zeta T_P s + 1} \quad (T_P: \text{時定数}, \zeta: \text{減衰比}) \quad (1)$$

これに基づく等価制御系のブロック線図を Fig.2 に示す。ただし、モデル誤差も含む外乱によるプラント変動分を ΔP_n とした。入出力の関係は次のようになる。

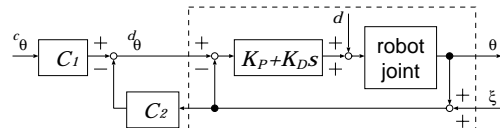


Fig.1 Robust joint servo system proposed

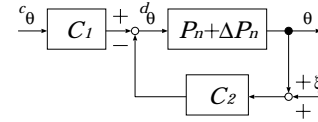


Fig.2 Equivalent two-degree-of-freedom control system

$$\theta = G^c \theta + H \xi \quad (2)$$

ただし

$$G \equiv \frac{P_n C_1}{1 + P_n C_2} \quad (\text{目標値応答}) \quad (3)$$

$$H \equiv \frac{P_n}{1 + P_n C_2} \quad (\text{雑音応答}) \quad (4)$$

また、モデル変動に対する感度関数は次のようになる。

$$S \equiv \frac{\partial G}{\partial P_n} \bigg/ \frac{G}{P_n} = \frac{1}{1 + P_n C_2} \quad (5)$$

C_1, C_2 は、 P_n, G, S を用いて次のように表せる。

$$C_1 = \frac{1}{S} \cdot \frac{G}{P_n} \quad (6)$$

$$C_2 = \frac{1 - S}{S} \cdot \frac{1}{P_n} \quad (7)$$

このシステムがロバスト安定であるための条件は、 G が安定、 S がハイパスフィルタ、 $S P_n$ がローパスフィルタ、 C_1, C_2 がプロパーであることである。これらを満たす S として、たとえば次の伝達関数が採用できる。

$$S = 1 - \frac{1}{(T_L s + 1)^2} \quad (T_L: \text{フィルタ時定数}) \quad (8)$$

今、 P_n は十分安定であると仮定し、その応答をそのまま再現し (すなわち $G = P_n$ とし)、かつ外乱による定常偏差を補償することを制御の目的としよう。この

とき C_1 および C_2 は次式のように求まる .

$$C_1 = \frac{(T_L s + 1)^2}{T_L^2 s^2 + 2T_L s} \quad (9)$$

$$C_2 = \frac{T_P^2 s^2 + 2\zeta T_P s + 1}{T_L^2 s^2 + 2T_L s} \quad (10)$$

3. ノミナルモデルの同定

実ロボット関節にまず PD 制御のみ適用し, ステップ応答を調べる. $\zeta < 1.0$ ならば, 応答の理想曲線は初期値 θ_0 , 終端値 θ_∞ , ピーク値 θ_P , ピーク到達までの時間 T から次の関数で表される .

$$\theta(t) = \theta_0 + (\theta_\infty - \theta_0) \left\{ 1 - \frac{e^{-\zeta \frac{t}{T}}}{\sqrt{1-\zeta^2}} \cos \left(\frac{\sqrt{1-\zeta^2} t}{T} - \tan^{-1} \frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} \right) \right\} \quad (11)$$

したがって, 上記パラメータそれぞれの計測値 $\theta_0^m, \theta_\infty^m, \theta_P^m, T^m$ から, ζ, T_p の第一近似が下記のように求まる .

$$\zeta \simeq \frac{\gamma^2}{\gamma^2 + \pi^2} \quad \left(\gamma \equiv \ln \left(\frac{\theta_P^m - \theta_\infty^m}{\theta_\infty^m - \theta_0^m} \right) \right) \quad (12)$$

$$T_p \simeq \sqrt{1-\zeta^2} T^m / \pi \quad (13)$$

これを初期値とし, 非線形最小二乗法を適用することによりノミナルモデルを同定できる. また, $\zeta > 1.0$ のときは次式を第一近似とし, T のみを同定する .

$$\theta(t) = \theta_0 + (\theta_\infty - \theta_0) \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} - \frac{t}{T} e^{-\frac{t}{T}} \right) \quad (14)$$

4. シミュレーションおよび実験

提案する制御系を, シミュレーションおよびヒューマノイドロボット UT- $\mu 2$ [4] を用いた実験により検証した .

まず, 全関節のノミナルモデル同定を行った . 直立状態で全身をサーボし, 一軸毎に 5° の指令値を与えステップ応答を調べた . 非線形最小二乗法には単体法を用いた . Fig.3 に, 左肩回転関節のステップ応答および第一近似モデルと最適化モデルの理想曲線を示す . なお, 値は初期値・終端値を用いて正規化してある .

次に, 同定されたモデルを用いて制御器を実装し, シミュレーションにより応答を確認した . Fig.4 に, 左肩回転関節の結果を示す . サンプリング時間は $0.003[s]$, $T_p \simeq 0.03$, $\zeta \simeq 0.8$, $T_L = 0.05$ とした . 出力の観測値には $-0.01 \sim 0.01$ の乱数を擬似雑音として加えた . また, 次式で定義される疑似的な外乱を加えた .

$$d = -0.1 - 0.01 \text{sgn}(\dot{\theta}) - 0.2\theta \quad (15)$$

各々の項は, 一定値外力, 乾性動摩擦, 重力にそれぞれ相当する . これらの係数は実際のロボットのものよりも大きめに設定しており, 図から分かる通り, 提案する制御を行わない場合には 30% 近い定常偏差を生じることが, 提案方法はこれをロバストに補償できている .

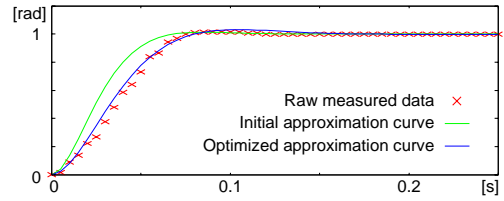


Fig.3 Nominal model identification from step response

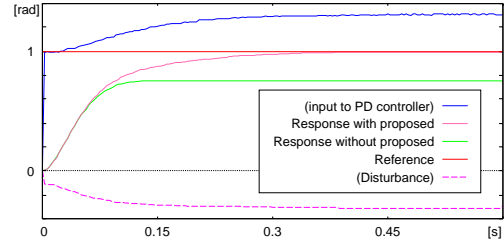


Fig.4 Step response of proposed system in simulation

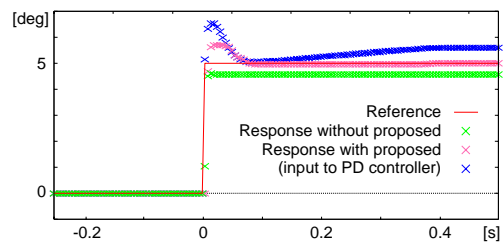


Fig.5 Step response of proposed system on actual robot

Fig.5 は, 実装した制御器を実機に適用し, 左肩回転関節に 5° の指令値を与えたときの応答結果である . シミュレーションと同様に定常偏差を補償できていることが確認された .

5. おわりに

PD 制御の外側に 2 自由度制御を施すカスケード制御による, ロバストな関節サーボ系設計法を示した . マイナループをプラントと見なすことで, ノミナルモデルの同定が容易になる, また PD 制御器が予め組み込まれたシステムへの適用も可能であるという特長を持つ . なお本研究は, 科学研究費補助金基盤研究 (S) (課題番号: 15100002) の支援を受けた .

参考文献

- [1] J. Y. S. Luh, M. W. Walker, and R. P. C. Paul. On-Line Computational Scheme for Mechanical Manipulators. *Transactions of the ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, Vol. 102, pp. 69-76, 1980.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 杉原知道, 山本江, 中村仁彦. アニマトロニクス展開に向けた小型ヒューマノイドロボットの開発. 第 23 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 2005.