

平面3自由度マニピュレータに対する目標値追従制御

東京都立大学 知能機械システムコース B4 門司 達也 (児島研究室)

1. はじめに

研究背景と目的

- ロボット産業界で最も広く使われているPID制御系のうち、PD動作をFB補償にあてた設計は、**積分型サーボ系 (I-PD制御系)**
→ I-PD制御系の過渡応答改善に向けた設計
- 摩擦は制御を行う上で考慮すべき重要な要素
→ 摩擦特性を考慮した設計



Fig.1 : Robot manipulator

アプローチ

- I-PD制御系の速応性を向上させる→フィードフォワード(FF)要素の導入
- 摩擦特性を考慮した設計→制御入力に摩擦補償を付与

2. 制御対象

運動方程式

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q}) + r(\dot{q}) = \tau$$

$$M(q) = \begin{bmatrix} M_{11} & C_1 \cos \theta_1 + C_2 \cos \theta_2 & C_2 \cos \theta_2 \\ C_1 \cos \theta_1 + C_2 \cos \theta_2 & M_{22} + 2C_3 \cos q_3 & M_{33} + C_3 \cos q_3 \\ C_2 \cos \theta_2 & M_{33} + C_3 \cos q_3 & M_{33} \end{bmatrix}$$

$$C(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} (C_1 \sin \theta_1 + C_2 \sin \theta_2)\dot{q}_1^2 + C_2(2\dot{q}_2 + \dot{q}_3)\dot{q}_3 \sin \theta_2 \\ -(C_1 \sin \theta_1 + C_2 \sin \theta_2)\dot{q}_1^2 - C_3(2\dot{q}_2 + \dot{q}_3)\dot{q}_3 \sin q_3 \\ -C_2 \sin \theta_2 \dot{q}_1^2 + C_3 \sin q_3 \dot{q}_2^2 \end{bmatrix}$$

$$r(\dot{q}) = \begin{bmatrix} r_1(\dot{q}_1) \\ r_2(\dot{q}_2) \\ r_3(\dot{q}_3) \end{bmatrix}, \quad \tau = [\tau_1 \quad \tau_2 \quad \tau_3]^T, \quad \theta_1 = q_1 - q_2, \quad \theta_2 = q_1 - q_2 - q_3$$

$$r_i(\dot{q}_i) = \begin{cases} F_{vi}\dot{q}_i + F_{ci}\text{sgn}(\dot{q}_i) & \text{for } \dot{q}_i \neq 0 \\ 0 & \text{for } \dot{q}_i = 0 \end{cases} \quad (i = 1, 2, 3)$$

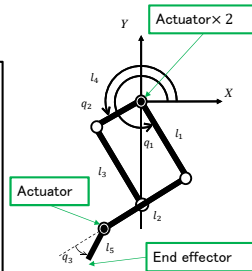


Fig.2 : Model configuration

$$\begin{cases} l_1 = l_2 = l_3 = 0.30 \text{ m} \\ l_4 = 0.15 \text{ m} \\ l_5 = 0.08 \text{ m} \end{cases}$$

Table 2 : Parameters of the friction model

	F_v [Nms]	F_c [Nms]
$r(\dot{q}_1)$	1.03	1.83
$r(\dot{q}_2)$	1.14	1.51
$r(\dot{q}_3)$	2.34	2.21

Table 1 : Parameters of the inertia and centrifugal/Coriolis terms

M_{11} [kgm ²]	M_{22} [kgm ²]	M_{33} [kgm ²]	C_1 [kgm ²]	C_2 [kgm ²]	C_3 [kgm ²]
0.41	0.62	0.14	0.22	9.00×10^{-4}	-0.16

3. 制御手法

線形モデル

摩擦補償を制御入力に付与し ($\tau = r(\dot{q}) + v$) , テーラー展開の1次近似に基づく**線形化**で制御対象の線形モデルを導出

$$\begin{bmatrix} \dot{q} - \bar{q} \\ \ddot{q} - \bar{\ddot{q}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q - \bar{q} \\ \dot{q} - \bar{\dot{q}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}(\bar{q}) \end{bmatrix} (v - \bar{v})$$

$$\dot{x}_p(t) = A_p x_p(t) + B_p u_p(t)$$

最適サーボ系

LQ制御の設計法を用いてFF要素を含めたサーボ系を構成
《設計手順》

- LQR理論に基づき、最適サーボ系を構成
- 定義した評価関数の最小化を考慮することで**FF項の導入**

《評価関数》

$$J = \int_0^{\infty} (e(t)^T Q_{11} e(t) + \dot{x}_i(t)^T Q_{22} \dot{x}_i(t) + \ddot{u}_p(t)^T R_e \ddot{u}_p(t)) dt$$

《制御入力》

$$\tau(t) = r_i(\dot{q}_i) + K_{PD} x_p(t) + K_I \int_0^t e(t) dt + F_a y^r + F_b x_{p0}$$

《ブロック図 (最適サーボ系)》

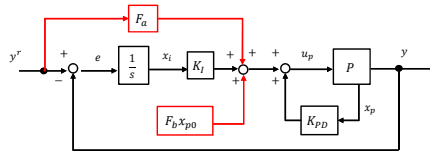


Fig.3 : Block diagram

積分型サーボ系に以下の2項を新たに導入

- 目標値からのFF
- 制御対象と積分分の初期状態で決まる定値入力

4. シミュレーション・実機実験

目標軌道

《目標軌道》

Table 3 : Posture change and equilibrium point

	初期値 [rad]	目標値 [rad]	平衡点 [rad]
q_1	$-\pi/2$	0	0
q_2	$-\pi$	$-\pi/2$	$-\pi/4$
q_3	0	$\pi/2$	$\pi/4$

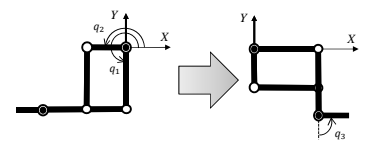


Fig.4 : Initial and target posture of the manipulator

シミュレーション・実験結果

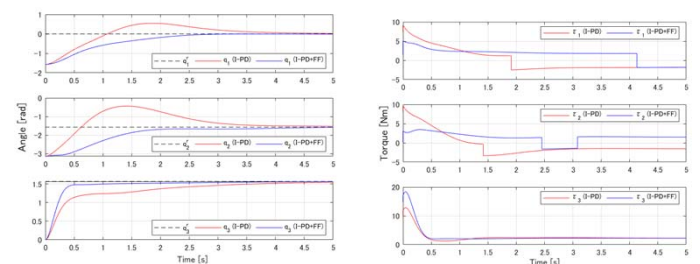


Fig.5 : Simulation results

過渡応答における速応性向上からFF導入の有効性を確認

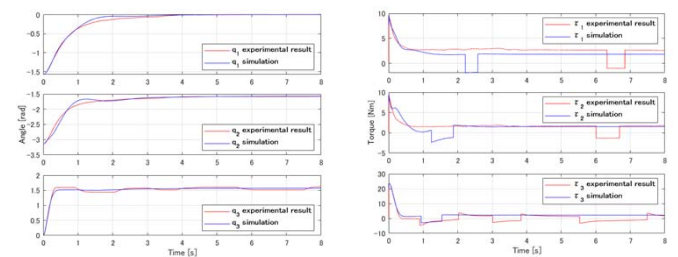


Fig.6 : Experimental results

全軸において、整定時間 **3.5 s** 以内と高い制御性能を確認

5. まとめと今後の展望

まとめ

平面3自由度マニピュレータに対して、LQ制御の枠組みで、FF項を含めた最適サーボ系を構成し、シミュレーション・実機実験を行うことにより、その制御性能を評価した。

今後の展望

- 定値目標値追従制御 → **軌道追従制御**
- 摩擦特性だけでなく、他の非線形要素 (遠心・コリオリ) も考慮した制御

参考文献

- 池田, 須田: 積分型最適サーボ系の構成, 計測自動制御学会論文集, Vol.24, No.1, pp.40-46 (1998)
- 川田昌克, MATLAB/Simulinkによる現代制御入門, 森北出版株式会社 (2019)