

1. はじめに

研究背景

- 制御系の設計においては、制御対象の非線形性や時変の特性変動がしばしば問題となる。ロボットマニピュレータでは腕の伸び縮みにより慣性が変化し、**姿勢の変化前後で異なる動特性を示す**。
- 人間機械協調系の観点から近年ロボットの安全性は強く求められるが、システムの特長が変化すると**全ての可動範囲で一定の性能を保てなくなる**。

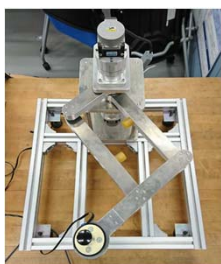


Fig. 1 平行リンクマニピュレータ

研究目的

非線形性をもつ制御対象であるマニピュレータに対して、先の問題の改善が期待される**ゲインスケジュールド(GS)制御**を適用して位置制御を行い、シミュレーションと実験によりその応答を確認する。

2. 平行リンクマニピュレータのモデリング

ディスクリプタ方程式

システムの状態 x_p 、入力 u をそれぞれ

$$x_p = [q_0 \quad \dot{q}_0 \quad q_1 \quad \dot{q}_1]^T, \\ u = [\tau_0 \quad \tau_1]^T$$

として、以下のディスクリプタ表現を導出できる。

$$E_p(\theta)\dot{x}_p(t) = A_p x_p(t) + B_p u(t) \\ y(t) = C_p x_p(t)$$

ただし、 $E_p(\theta)$ 、 A_p 、 B_p はそれぞれ

$$E_p(\theta) = \begin{bmatrix} b_0 & i_0 & 0 & -C_r \cos \theta \\ 0 & -C_r \cos \theta & b_1 & i_1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \\ A_p = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad B_p = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

とする。 ※ $\cos \theta = \cos(q_0 - q_1)$

Table 1 各パラメータの推定値

i_0 [kgm ²]	i_1 [kgm ²]	C_r [kgm ²]	b_0 [Nms]	b_1 [Nms]
0.22	0.14	-0.18	2.94	1.63

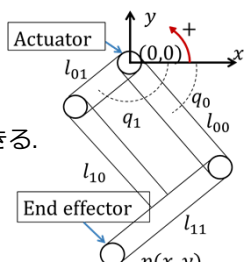


Fig. 2 制御対象スケッチ

$$\begin{cases} l_{00} = 0.30\text{m} \\ l_{01} = 0.15\text{m} \\ l_{10} = 0.30\text{m} \\ l_{11} = 0.30\text{m} \end{cases}$$

3. 制御則

一般化プラント

L_2 ゲインを抑制する状態フィードバック制御問題に着目し、以下のように一般化プラント Σ を定める。評価量 z には、目標値とのずれと過剰な操作量を抑制するために x_i と u を設定する。

$$\Sigma : \begin{cases} E(\theta)\dot{x}(t) = Ax(t) + B_1 w(t) + B_2 u(t) \\ z(t) = \begin{bmatrix} x_i(t) \\ \rho \cdot u(t) \end{bmatrix} = Cx(t) + D_1 w(t) + D_2 u(t) \\ \theta(t) \in [-0.88, 0.85], \theta = \cos(q_0 - q_1) \end{cases}$$

この系を状態フィードバック則 $u(t) = K(\theta)x(t)$ により安定化し、 w - z 間の L_2 ゲインを抑制する問題を考える。

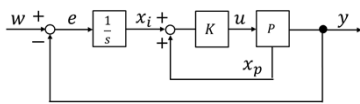


Fig. 3 ブロック線図

LMI条件式

- パラメータ依存のLMIである $F(x, \theta) < 0$ に対する十分条件が、 $F(x, \theta) = (1 - \theta)^2 G_0(x) + 2(1 - \theta)\theta G_1(x) + \theta^2 G_2(x)$ と多項式基底を用いて変形することにより、 $G_k(x) < 0$ と与えられる。
- ディスクリプタシステム表現を用いたことにより、スケジューリングパラメータ $\theta = \cos(q_0 - q_1)$ として簡単に表現できる。ここで、制御則は $K(\theta) = Y(\theta)X^{-1}(\theta)$ と定めることにより与えられる。

▼目標値から評価出力までの L_2 ゲインを $\gamma(> 0)$ 未満に抑制するためのLMI条件

$$\begin{cases} \Phi(\theta) < 0, \Phi(\theta) = \\ \begin{bmatrix} AX(\theta)E^T(\theta) + B_2 Y(\theta)E^T(\theta) & * & * \\ +E(\theta)X(\theta)A^T + E(\theta)Y(\theta)B_2^T & -\gamma \cdot I & * \\ CX(\theta)E^T(\theta) + D_2 Y(\theta)E^T(\theta) & B_1^T E^T(\theta) & D_1^T - \gamma \cdot I \end{bmatrix} < 0 \\ \cdot X(\theta) > \varepsilon \cdot I \end{cases}$$

4. シミュレーション・実機実験

シミュレーション・実験条件

- 積分型サーボ系による L_2 ゲイン抑制のGS制御を行う。
- LMIの決定変数は X :定数行列、 $Y(\theta)$:1次多項式とする。
- 設計パラメータをそれぞれ $\rho = 0.5$ 、 $\varepsilon = 0.029$ とする。
- 初期姿勢と目標姿勢の関節角度を以下のように設定する。

Table 2 関節角度の初期値と目標値

	初期値 [rad]	目標値 [rad]
q_0	-0.464	-1.173
q_1	-2.678	-1.968
$\cos(q_0 - q_1)$	-0.6	0.7

※可動域の制約 [rad]
 $-0.88 \leq \cos(q_0 - q_1) \leq 0.85$

シミュレーション・実験結果

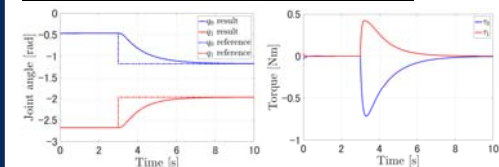


Fig. 4 シミュレーション結果 (左: 関節角度, 右: 操作量)

✓ 収束に4秒ほど要するが、オーバーシュートがなく滑らかに目標値に追従している。

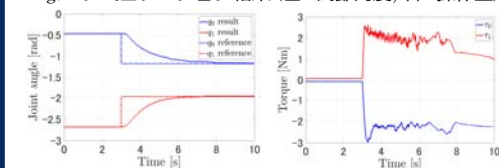


Fig. 5 実験結果 (左: 関節角度, 右: 操作量)

✓ 実験ではシミュレーションで考慮しなかった摩擦による不感帯の影響で、入力トルクが増大している。

5. まとめと今後の展望

まとめ

マニピュレータ全般に広く適用可能な、パラメータ変動を保証した制御系を構成し、シミュレーションにより有効性を、実機実験により実装性を確認した。

今後の展望

パラメータ区間を分割することによって保守性を低減させ、さらにサーボ補償器に比例要素も加えることで、より速応性のよい制御系を構成する。

参考文献

- [1] 児島晃: アファインな非線形基底を用いたパラメータ依存LMIの解法, 計測自動制御学会, Vol.55 No.7 (2019-7)