

# 先端負荷を考慮した平行リンク マニピュレータのゲインスケジュールド制御

首都大学東京 知能機械システムコース B4 齊藤 仁夢 (児島研究室)

## 1. はじめに

### 研究背景

- ◆ 平行リンクマニピュレータは高速の位置決め精度や高い剛性を有するため、広く産業用ロボットなどに導入されている。
- ◆ マニピュレータは機構特性による非線形性をもつため、人とロボットが関わるシステムに適用する場合には、**均一な制御性能を保証する設計**が必要になる。

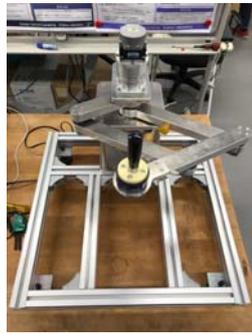


Fig. 1 平行リンクマニピュレータ

### 研究目的

- ◆ 非線形性を有する平行リンク2自由度マニピュレータに着目し、**姿勢と先端負荷による動特性の変化**に対応するI-PD制御系を用いたゲインスケジュールド(GS)制御を構成する。
- ◆ 線形行列不等式(LMI)に基づきGS制御器を設計する。

## 2. 平行リンクマニピュレータのモデル化

### 先端負荷による特性の変化

リンク $l_2$ の先端負荷: $m_5$ とすると

- ▶ リンク $l_2$ の  $\left( \begin{array}{c} \text{質量} \\ \text{重心位置} \\ \text{慣性モーメント} \end{array} \right)$  が変化

慣性行列 $H(q)$ は以下のように $m_5$ に関する1次式に近似できることが確認される。

$$H(q) = \begin{bmatrix} 0.22 + 0.09m_5 & (0.18 + 0.09m_5)\theta \\ (0.18 + 0.09m_5)\theta & 0.14 + 0.254m_5 \end{bmatrix}$$

$$\ast \theta = \cos(q_1 - q_2)$$

▶  $H(q)$ は関節角度および先端負荷によって特性が変化する。

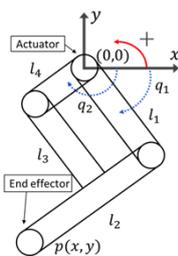


Fig. 2 スケッチ図

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

## 3. LMI条件によるゲインスケジュールド制御

### ディスクリプタ方程式

制御対象の状態: $x_p(t) = [q_1(t) \ q_2(t) \ \dot{q}_1(t) \ \dot{q}_2(t)]^T$   
 入力: $u(t) = [\tau_1(t) \ \tau_2(t)]^T$  と定義。

積分補償を加えた状態: $x(t) = [x_p(t) \ x_i(t)]^T$   
 運動方程式からディスクリプタ方程式を導出。  
 ✓ 2次の微小な項および不連続の項は考慮しない。

$$E(\theta)\dot{x}(t) = Ax(t) + B_1r(t) + B_2u(t)$$

$$A = \begin{bmatrix} A_p & 0 \\ -C_p & 0 \end{bmatrix}, B_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix}, B_2 = \begin{bmatrix} B_p \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$E(\theta) = \begin{bmatrix} E_p(\theta) & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix}, E_p(\theta) = \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & H(q) \end{bmatrix}$$

$A_p, B_p, E_p(\theta)$ はマニピュレータのシステム行列

### LMI条件による設計

安定化と安定度を考慮するLMI条件を導出する。

- ▶ 状態フィードバック(FB)則: $u(t) = K(\theta)x(t)$
- ▶ 閉ループ系の安定度: $z < 0$

$$X > \varepsilon \cdot I, AXE^T(\theta) + B_2YE^T(\theta) + E(\theta)XA^T + E(\theta)Y^TB_2^T < 2zE(\theta)XE^T(\theta)$$

ただし,  $\varepsilon > 0$

これらのLMI条件に文献[1],[2],[3]を用いてパラメータ非依存の条件に変換し, 状態FBゲイン $K(\theta)$ を求める

## 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

- ◆ スケジューリングパラメータの $\theta = \cos(q_1 - q_2)$ が可動域内に収まり, かつ非線形性をもつようにマニピュレータの各関節角度の初期値と目標値を設定。
- ◆ 離散化ステップを0.001s, 先端負荷を $m_5 \in [0, 1]$ , 安定度を $z = -1, \varepsilon = 0.01$ と定義。

Table 1 関節角度の初期値と目標値

	初期値[rad]	目標値[rad]
$q_1$	-0.30	-1.00
$q_2$	-2.83	-2.14
$q_1 - q_2$	2.53	1.14

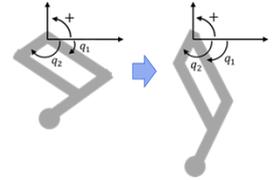


Fig. 3 初期姿勢と目標姿勢

### シミュレーション・実験結果

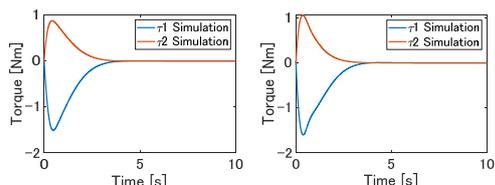
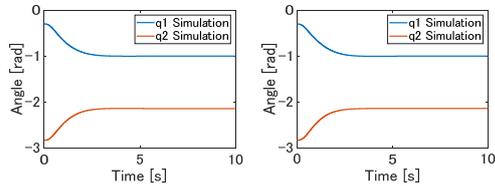


Fig. 4 シミュレーション結果 (左:  $m_5 = 0$  kg, 右:  $m_5 = 1$  kg)

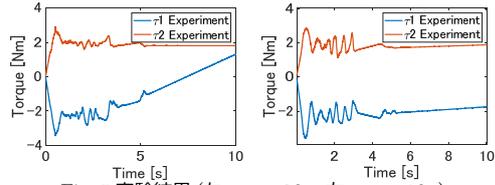
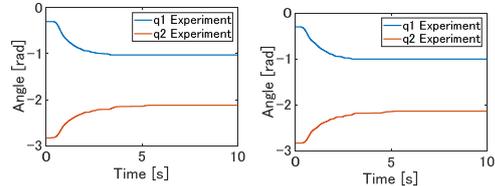


Fig. 5 実験結果 (左:  $m_5 = 0$  kg, 右:  $m_5 = 1$  kg)

- ◆ 関節角度の応答は滑らかに目標値に追従している。

- ◆ 先端負荷が大きくなると必要なトルクが増加。

- ◆ シミュレーションよりやや振動的ではあるが同様の時間で目標値に収束。

- ◆ 静止摩擦による不感帯を抜け出すためにトルクが増加。

- ◆ 先端負荷が変化しても追従性に影響が見られなかった。

## 5. まとめと今後の展望

### まとめ

平行リンクマニピュレータに着目し, 先端負荷を考慮したゲインスケジュールド制御を構成し, シミュレーション・実験を通して追従性能を評価した。

### 今後の展望

- ◆ パラメータ非依存のLMI条件がもつ保守性を緩和する方法を明らかにし, 先端にリンクをもつマニピュレータに適用する。

### 参考文献

- [1] A. Kojima: A Characterization of Parameter-dependent LMIs on Bernstein Polynomial Basis, Proc. of 57th IEEE Conference on Decision and Control, pp. 4687-4694(2018)
- [2] 児島: アフラインな非線形基底を用いたパラメータ依存LMIの解法, 計測自動制御学会論文集, Vol.~48, No.9, pp. 1-10(2012)
- [3] 石, 花房, 児島: 多項式非線形基底を用いたロボットマニピュレータのゲインスケジュールド制御, 第62回自動制御連合講演会(2019)