

1. はじめに

□ 背景

- 近年、人とロボットが作業領域を共有するなどロボットシステムの形態は多様化し、**ロボットに起因する事故が増加**。
- ロボットマニピュレータは、動作に伴う**姿勢変化**や作業内容による**手先部分の変更**により、その特性が大きく変化する。
- **安全性、操作性の面からこれらの変化に対応した制御系の構成が重要である。**



Fig. 1 : Robot manipulator

□ 研究目的

- ✓ **インピーダンスモデルに追従する制御系を構成。**
- ✓ マニピュレータの姿勢変化、先端の重さ変更に着目し、制御対象のパラメトリックな変動に合わせて制御ゲインを調整する**ゲインスケジュールド制御**を設計する。

2. 制御対象と設計モデル

□ 運動方程式

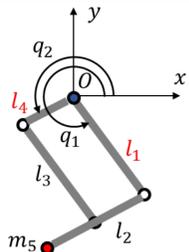
l_1, l_2, l_3 [m]	l_4 [m]
0.3	0.15

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

慣性 遠心・コリオリ 摩擦* 制御入力

$$M(q) = \begin{bmatrix} M_1 + m_5 l_1^2 & * \\ (C_r + m_5 l_1 l_2) \cos \varphi & M_2 + m_5 l_2^2 + J_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q \in \mathbb{R}^2 & \text{:角度} \\ \tau \in \mathbb{R}^2 & \text{:入力} \end{bmatrix}$$

$$C(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} (C_r + m_5 l_1 l_2) \dot{q}_2^2 \sin \varphi \\ -(C_r + m_5 l_1 l_2) \dot{q}_1^2 \sin \varphi \end{bmatrix} \quad (\varphi = q_1 - q_2)$$



- : Actuator
- : End Effector
- : Passive Joints
- l_1, l_4 : Driving Link
- l_2, l_3 : Driven Link

Fig. 2 : Model configuration

- **関節角度、先端負荷の変動に伴い、慣性項が変化。**

□ LPVモデル

遠心・コリオリ力、摩擦力の非線形性を補償する入力を $u_f(t)$ と定め、 $\tau(t) = u_{ci}(t) + u_f(t)$ としてLPVモデルを構築 ($x(t) := \dot{q}$)。

$$P_m: \begin{cases} E_p(\theta)\dot{x}_p(t) = A_p x_p(t) + B_p u_{ci}(t) \\ y_p(t) = C_p x_p(t) \end{cases} \quad \theta = [\theta_1 \ \theta_2]^T = [\cos \varphi \quad m_5]^T$$

3. 制御系設計

□ 制御系構造

目標値への追従を評価量に定めた一般化サーボ系を構成。

$$\Sigma: \begin{cases} \dot{x}(t) = A(\theta)x(t) + B_1 w(t) + B_2(\theta)u_{GS}(t) \\ z(t) = \begin{bmatrix} x_i(t) \\ \rho \cdot u_{GS}(t) \end{bmatrix} = Cx(t) + D_1 w(t) + D_2 u_{GS}(t) \\ x(t) := [x_p^T(t) \ x_i^T(t)]^T \end{cases} \quad \text{※ } w(t): \text{目標信号, } x_i(t): \text{積分器の状態}$$

□ 制御ゲイン設計

システムをGS制御則 $u_{GS} = K(\theta)x + H(\theta)w$ により安定化し、かつ w - z 間の L_2 ゲインを $\gamma > 0$ 未満に抑制する問題を考える。

- パラメータ依存のExtended LMI条件

$$\min_{\gamma > 0} \Phi(X(\theta), Y(\theta), H(\theta), Q) \leq -\epsilon_1 \cdot I, \quad \Phi(X(\theta), Y(\theta), H(\theta), Q) := \begin{bmatrix} E(\theta) \left(\pm v_1 \cdot \frac{\partial X(\theta)}{\partial \theta_1} \right) E^T(\theta) & * & * & * \\ +\text{He}[A_e Q E^T(\theta) + B_{e2} Y(\theta) E^T(\theta)] & & & \\ \begin{pmatrix} X(\theta) E^T(\theta) - Q E^T(\theta) \\ +k(Q^T A_e^T + Y^T(\theta) B_{e2}^T) \end{pmatrix} & -k(Q + Q^T) & * & * \\ C Q E^T(\theta) + D_2 Y(\theta) E^T(\theta) & k(C Q + D_2 Y(\theta)) & -\gamma \cdot I & * \\ B_1^T E^T(\theta) + H^T(\theta) B_{e2}^T & 0 & D_1^T + H^T(\theta) D_2^T & -\gamma \cdot I \end{bmatrix}$$

$$X(\theta) = X^T(\theta) \succeq \epsilon_2 I, \quad \epsilon_1, \epsilon_2 > 0, \quad \theta_i \in [\underline{\theta}_i, \bar{\theta}_i], \quad |\dot{\theta}_i| \leq v_1 \ (i = 1, 2)$$

Q : 補助変数, $K(\theta) = Y(\theta)Q^{-1}$, k : 微小な正のスカラー

- Bernstein基底を用いて、**パラメータ非依存のLMI条件**に帰着。

□ 制御系

- **インピーダンスモデルにより生成された目標速度に追従する制御系**を以下のように構成する。

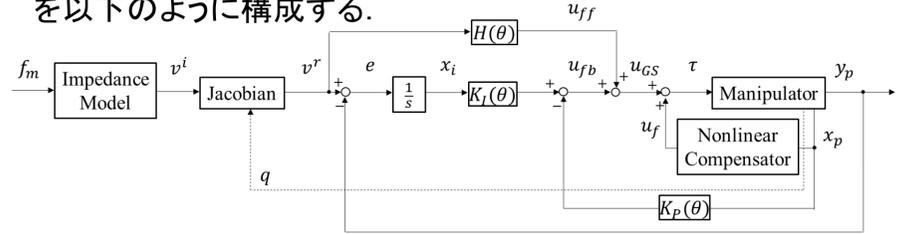


Fig. 3 : Proposed control system

$$\tau = u_{GS} + u_f \begin{cases} u_{GS} = -K_p(\theta)x_p(t) + K_i(\theta) \int_0^t e(t)dt + H(\theta)v^r(t) \\ u_f = C(q, \dot{q}) + r(\dot{q}, \tau) \end{cases}$$

4. シミュレーション・実機実験

- ✓ **GS制御器**と基準点周りで設計した固定制御器(GS制御器と同様の仕様で構成)を適用し、シミュレーションにより応答を比較。
- ✓ **GS制御器**を実機に適用し、シミュレーションと応答を比較。

□ 条件

- インピーダンスモデル
- $$\begin{bmatrix} M_x & 0 \\ 0 & M_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{v}_x \\ \dot{v}_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Q_x & 0 \\ 0 & Q_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{mx} \\ F_{my} \end{bmatrix}$$
- 質量慣性の項: $M_x = M_y = 4$
粘性の項: $Q_x = Q_y = 4$

• 操作力

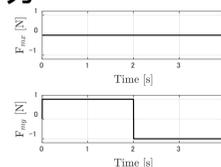


Fig. 5 : Operator input (Simulation)

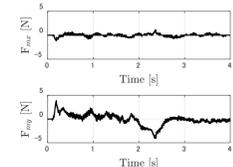


Fig. 6 : Operator input (Experiment)

$q_1(0)$ [rad]	$q_2(0)$ [rad]
-1.1781	-1.9635

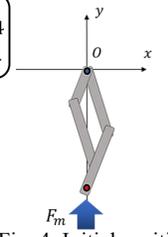


Fig. 4 : Initial position

□ シミュレーション結果

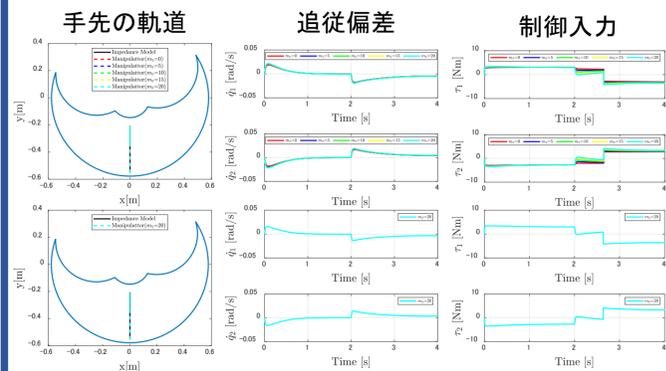


Fig. 7 : Simulation results (上:GS制御, 下:固定制御 (Case 2-B ($\theta_{eq} = [0.031 \ 20]^T$)))

□ 実験結果

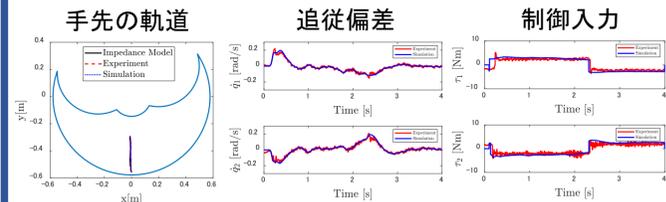


Fig. 8 : Experimental results

赤線: 実験結果
青線: シミュレーション結果

- ✓ シミュレーションと概ね同様の応答。

5. まとめと今後の展望

□ まとめ

マニピュレータの速度追従制御問題において、**パラメータの変動を考慮したGS制御系**を提案し、その設計法を明らかにした。また、シミュレーション及び実機実験により、その**有用性**を示した。

□ 今後の展望

予期しない操作力が印加された際も安全な動作を維持できるよう、**インピーダンスモデルの検討及び実機の改良**を行う予定である。

6. 参考文献

- [1] W. Xie: An Equivalent LMI Representation of Bounded Real Lemma for Continuous-time Systems, Journal of Inequalities and Applications, Article ID 672905, 2008
- [2] A. Kojima: A Characterization of Parameter dependent LMIs on Bernstein Polynomial Basis, Proc. of 57th IEEE Conference on Decision and Control, 4687/4694, 2018