

# 姿勢変化に着目した 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

東京都立大学 機械システム工学科  
児島研究室 B4 布施 和基

## 1. はじめに

### 背景

ロボットマニピュレータは、姿勢の変化により慣性項に大きな変化を生じる特徴を有する。

機構の**姿勢変化**を合理的に考えた制御系設計が重要。

### 研究目的

マニピュレータの姿勢によって構成した制御器を**補間**し、姿勢変化に応じて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

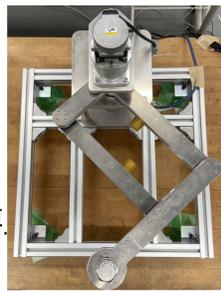


Fig.1: Robot manipulator

## 2. 制御対象と表現方法

### 運動方程式

$$M(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q}) + f_f(\dot{q}, \tau) = \tau \quad (q = [q_1 \quad q_2]^T)$$

慣性項 遠心コリオリ力 摩擦力

$$M(q) = \begin{bmatrix} M_1 & C_1 \cos(q_1 - q_2) \\ C_1 \cos(q_1 - q_2) & M_2 \end{bmatrix}$$

$$C(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} C_1 \sin(q_1 - q_2) \dot{q}_2^2 \\ -C_1 \sin(q_1 - q_2) \dot{q}_1^2 \end{bmatrix}$$

$$f_f(\dot{q}, \tau) = \begin{bmatrix} f_{f1}(\dot{q}_1, \tau_1) \\ f_{f2}(\dot{q}_2, \tau_2) \end{bmatrix}, \quad \tau = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix}$$

$$f_{fi}(\dot{q}_i, \tau_i) = \begin{cases} F_{vi}\dot{q}_i + F_{ci} \operatorname{sgn}(\dot{q}_i) & \text{for } \dot{q}_i \neq 0 \\ \tau_i & \text{for } \dot{q}_i = 0, \tau_i \in (F_{si}^-, F_{si}^+) \\ F_{si}^+ & \text{for } \dot{q}_i = 0, \tau_i \geq F_{si}^+ \\ F_{si}^- & \text{for } \dot{q}_i = 0, \tau_i \leq F_{si}^- \end{cases}$$

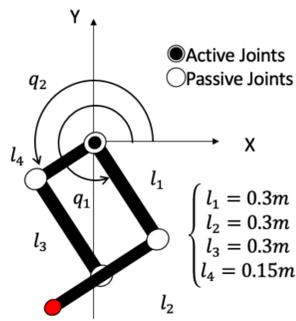


Fig.2: Model configuration

### 状態方程式

遠心・コリオリ力, 摩擦力の非線形性を**補償**する  
入力 $u_f$ を用い $(\tau = u_f(t) + u(t), u_f = C(q, \dot{q}) + r(\dot{q}))$ ,  
 $\theta = \cos(q_1 - q_2)$  とし, 平衡点 $x_e = [q_{1e}^T \quad q_{2e}^T]^T$ の周りで  
**線形化**し, 状態変数を $x_p = [q - q_e^T \quad \dot{q} - \dot{q}_e^T]^T$ とすると,

$$\begin{cases} \dot{x}_p(t) = A_p x_p(t) + B_p u(t) \\ y(t) = C_p x_p(t) \end{cases}$$

$$A_p = \begin{bmatrix} 0 & I \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, B_p = \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1}(\theta_e) \end{bmatrix}, C_p = \begin{bmatrix} I & 0 \end{bmatrix}$$

## 3. 制御系設計

### ブロック線図

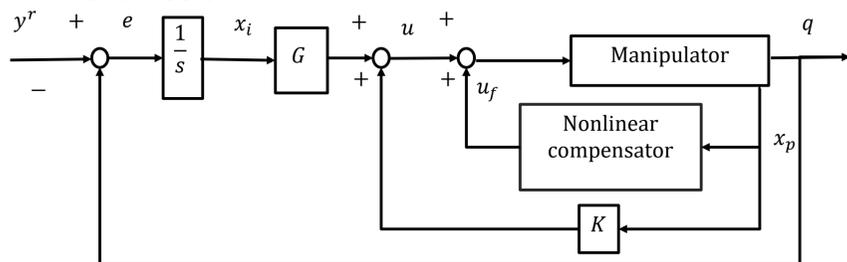


Fig.3: Block diagram

- ・ 摩擦補償を含めた制御則をこのようなサーボ系で構成する。
- ・ フィードバックゲイン $K$ と積分器からの入力のゲイン $G$ を**拡大系**を定め, 2次形式評価関数を**最小**にするように設計。

### 補間方法

状態が変動領域の2点間にあるとき,  
2点間を結ぶ状態に対する制御器を得る。

$$K_n = \frac{n}{m+n} K_1 + \frac{m}{m+n} K_2$$

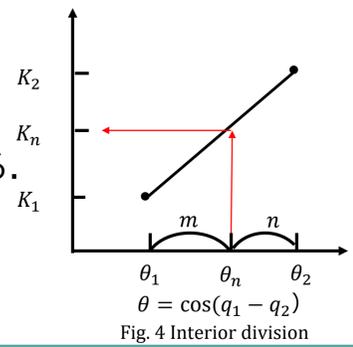


Fig.4 Interior division

## 4. シミュレーション・実機実験

### 目標軌道 (周期10秒の円軌道)

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.15 \cos\left(\frac{\pi}{2}t\right) \\ 0.15 \sin\left(\frac{\pi}{2}t\right) - 0.4 \end{bmatrix}$$

Table 1 Parameters based on posture

	Posture (A)	Posture (B)	Posture (C)
$q_1$	-0.90	-0.45	0
$q_2$	-1.60	-2.02	-2.44
$\theta$	0.70	1.57	2.44

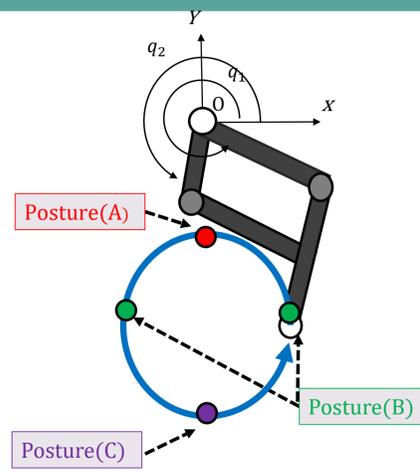


Fig.5 Trajectory of end effector

- Case 1 :パラメータを(B)とした場合のサーボ制御
- Case 2 :パラメータを3点(A,B,C)とした場合のGS制御

### シミュレーション結果

- ・ GS制御による顕著な応答の改善は確認できなかった。
- ・ 制御器の切り替わりの時点で応答の乱れが生じた。

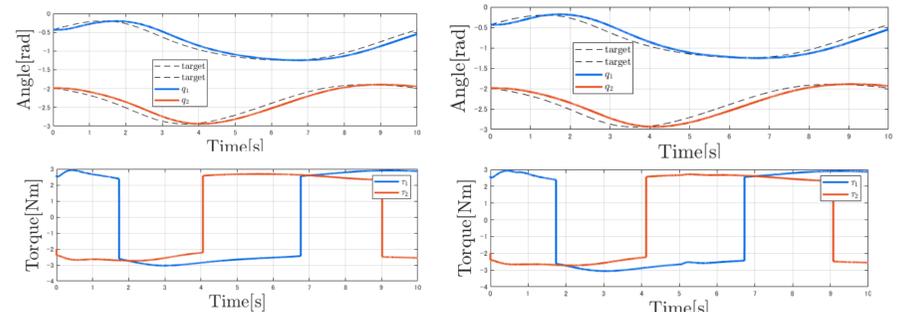


Fig.6: Simulation results (left: Case 1, right: Case 2)

### 実験結果

- ・ GS制御による顕著な応答の改善は確認できなかった。
- ・ 要因として**角速度**の情報が補間に利用できなかったため。

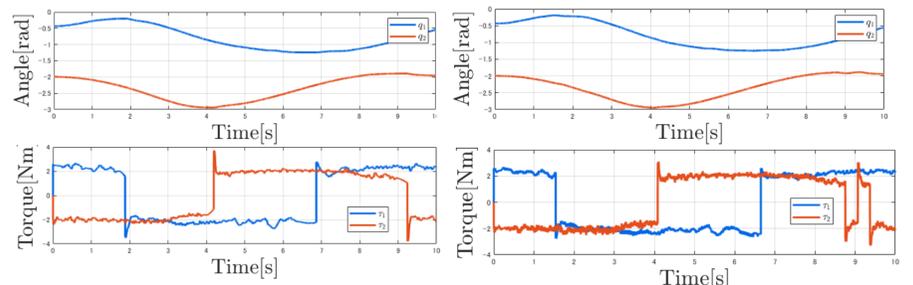


Fig.7: Simulation results (left: Case 1, right: Case 2)

## 5. まとめと今後の展望

### まとめ

- ・ 平面2自由度マニピュレータに対し, 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

- ・ 補間方法, **移動速度**に着目したGS制御を検討する。

### 参考文献

- [1]川田昌克, MATLAB/Simulinkによる現代制御入門, 森北出版株式会社 (2019)
- [2]小原: 行列不等式アプローチによる制御系設計, コロナ社 (2016)
- [3]内田健康: ゲインスケジューリング, 計測と制御, Vol. 34, No. 3, pp. 182-187 (1995)