マニピュレータの非線形特性を考慮したゲインスケジュールド制御

M２　村﨑智文 (首都大学東京)

1.はじめに

背景

- 近年のロボット技術の発展により, ロボットアームは工場, 災害現場, 宇宙空間など活躍の場を広げている.
- 人とロボットが協調していく上で作業時の安全性が求められ, ロボットアームの持つ非線形性を考慮した設計や, 可動範囲における特性の変化を抑制することが有用である.
- 一つの制御器では全ての可動範囲で一定の性能を保てない.

目的

アームの姿勢変化による特性変動を抑制するために, 行列ポリトープ表現に基づくゲインスケジュールド制御を検討する.

ゲインスケジュールド制御

複数の状態で設計した制御器を補間して, 状態によって制御器の抑制を変化させるもの.

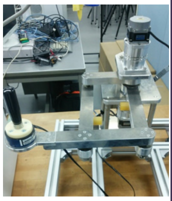

Fig. 1 制御対象

2.平行リンクマニピュレータ

- $\theta = q_0 - q_1$により, 下記の状態方程式で表される平行リンクマニピュレータの特性は大きく変化する.

$$\begin{cases} \dot{x} = A(\theta)\,x + B(\theta)u \\ y = Cx \end{cases} , \quad 0.6 \le \theta \le 2.65$$

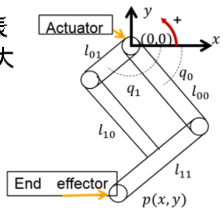

Fig. 2 制御対象

$$A(\theta) = \frac{1}{\{C_r\cos_{01}(\theta)\}^2 - I_0 I_1}\begin{bmatrix} 0 & \{C_r\cos_{01}(\theta)\}^2 - I_0 I_1 & 0 & 0 \\ 0 & B_0 I_1 & 0 & -B_1 C_r\cos_{01}(\theta) \\ 0 & 0 & 0 & \{C_r\cos_{01}(\theta)\}^2 - I_0 I_1 \\ 0 & -B_0 C_r\cos_{01}(\theta) & 0 & I_0 B_1 \end{bmatrix}$$

$$B(\theta) = \frac{1}{\{C_r cos_{01}(\theta)\}^2 - I_0 I_1}\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -I_1 & C_r\cos_{01}(\theta) \\ 0 & 0 \\ C_r\cos_{01}(\theta) & -I_0 \end{bmatrix}, C = I$$

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]	E_0[Nm]	E_1[Nm]
0.22	0.14	−0.18	2.94	1.63	1.68	1.46

3.ゲインスケジュールド制御

- 系を3つの状態で線形化し, 補間することで以下の様に表現.[2]

$$\dot{x}_\alpha = A_\alpha x_\alpha + B_\alpha u_\alpha \qquad A_\alpha = \sum_{i=0}^{2}\alpha_i A_i\,, B_\alpha = \sum_{i=0}^{2}\alpha_i B_i \quad \alpha_i \ge 0, \sum_{i=0}^{2}\alpha_i = 1$$

ここで, 入力u_αを

$$u_\alpha = \sum_{i=0}^{2} K_\alpha x_\alpha$$

とすると,

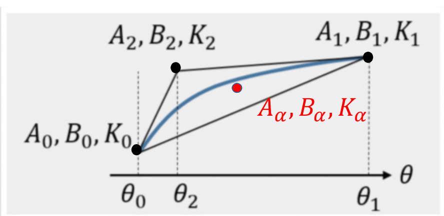

Fig. 3 特性変化をする系

上記の補間制御則により閉ループ系を以下のポリトープ系で表現.

$$\dot{x_\alpha} = \sum_{i=0}^{2}\sum_{j=i}^{2}\mu_{ij}\,G_{ij}(x_\alpha)$$

$$G_{ij} = \begin{cases} A_i + B_i K_i & : \; i = j \\ \frac{1}{2}\{(A_i + B_j K_i) + (A_j + B_i F_j)\} & : \; i \ne j \end{cases} \qquad \mu_{ij} = \begin{cases} \alpha_i^2 & : \; i = j \\ 2\alpha_i\alpha_j & : \; i \ne j \end{cases}$$

この系が安定となるように制御器を設計し, 元の系を安定化する.

等式　$\sum_{i=0}^{2}\sum_{j=i}^{2}\mu_{ij} = 1$　が成り立つので,

安定となるためのLMI条件は

$$G_{ij}X + XG_{ij} < 0\,, X > 0\ (i,j = 0,1,2)$$

となる. さらに,

$$K_2 = (1-\rho)K_0 + \rho K_1, (0 \le \rho \le 1\,)$$

として設計することにより, K_2は三角形内の$\theta = \theta_2$の赤い線分上のパラメータ対応する点を安定化する. これにより, Fig. 4のように, θにだけ依存するフィードバックゲインが求められる.

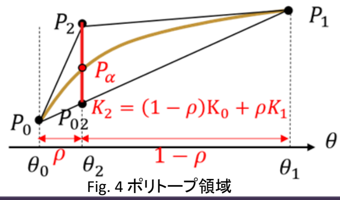

Fig. 4 ポリトープ領域

4.シミュレーション

- 拡大系で上記のLMI条件を解き, サーボ系を構成した.
- Fig. 5 のように, 領域を8つの区間に分けて考える.
- $0.6 \le \theta \le 2.65$の 変動範囲を考慮し, シミュレーションを行った.

Table. 2 シミュレーション条件

	初期値	目標値
$q_0[rad]$	-1.2	0
$q_1[rad]$	-1.8	-2.65
$\theta(q_0 - q_1)$	0.6	2.65

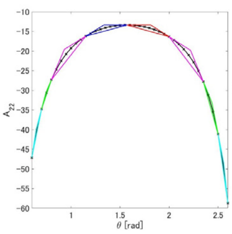

Fig. 5 特性変化

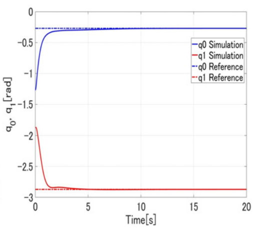

Fig. 6 関節角度の時間変化

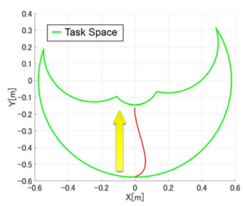

Fig. 7 軌道の変化

振動は見られるが, 補間した制御則を状態によって切り替えて使用し目標値に追従していることが確認できる.

5.おわりに

まとめ

- 非線形性の強いマニピュレータに, ゲインスケジュールド制御を適用し, その効果を確認した.

今後の予定

- 状態に応じた極配置を行うことで, 追従過程の振動をなくし, 過渡特性の向上を目指す.
- 実機実験による評価を行う.

参考文献

[1] 澤戸 : モード変化を考慮したディーゼルエンジン吸気系の制御, 平成25年度修士論文
[2] 涔口, 児島 : Explicit MPCの線形補間による状態推移制御, 第60回自動制御連合講演会, 2017
[3] J. Daafouz, J. Bernussou : Parameter dependent Lyapunov functions for discrete time systems with time varying parametric uncertainties, Systems & Control Letters, 355-359 (2001).
[4] 小原敦美 : 行列不等式アプローチによる制御系設計, コロナ社, 2016