

# 予見型サーボ補償を用いた 平行リンクマニピュレータの軌道追従制御

首都大学東京 ヒューマンメカトロニクスシステムコース  
B4 石友真 (児島研究室)

## 1. はじめに

### 研究背景

- 産業用ロボットや工作機械では、経路制御が重要となることが多く、経路制御に関する研究はこれらの生産性を高める要求に結び付くと考えられている。
- ロボットマニピュレータの経路制御においては、目標値である経路があらかじめ与えられていることが少なくない。
- そこで、未来の目標値が既知である場合に、予見制御を経路制御へ応用する研究が行われてきた。<sup>[1]</sup>

### 研究目的

本研究では、右図の平行リンク2自由度マニピュレータを制御対象として  $H_2$  予見サーボ系を構成し、それにより達成される軌道追従性能を評価することを目的とする。

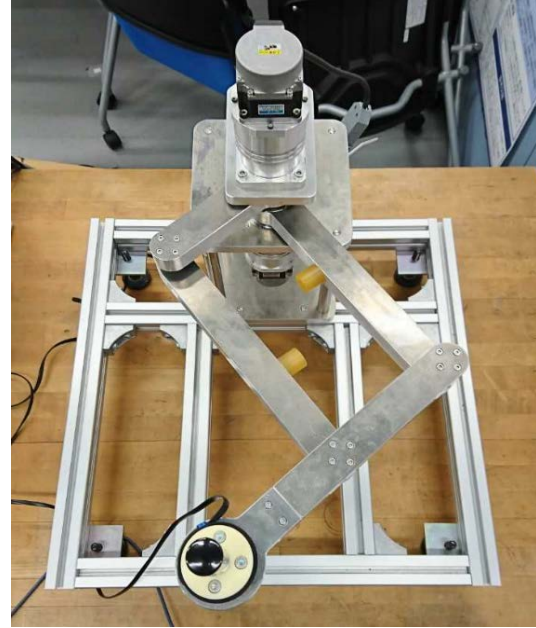


Fig. 1 平行リンクマニピュレータ

## 2. 制御対象

### 運動方程式

平行リンクマニピュレータの運動方程式は以下のようになる。

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

$$H(q) = \begin{bmatrix} I_0 & -C_r \cos_{01} \\ -C_r \cos_{01} & I_1 \end{bmatrix}$$

$$C(q, \dot{q}) = \begin{bmatrix} 0 & -C_r \dot{q}_1 \sin_{01} \\ C_r \dot{q}_0 \sin_{01} & 0 \end{bmatrix}$$

$$r(\dot{q}) = \begin{bmatrix} B_0 \dot{q}_0 + E_0 \text{sgn}(\dot{q}_0) \\ B_1 \dot{q}_1 + E_1 \text{sgn}(\dot{q}_1) \end{bmatrix}$$

$$\text{※} \cos_{01} = \cos(q_0 - q_1), \quad \sin_{01} = \sin(q_0 - q_1)$$

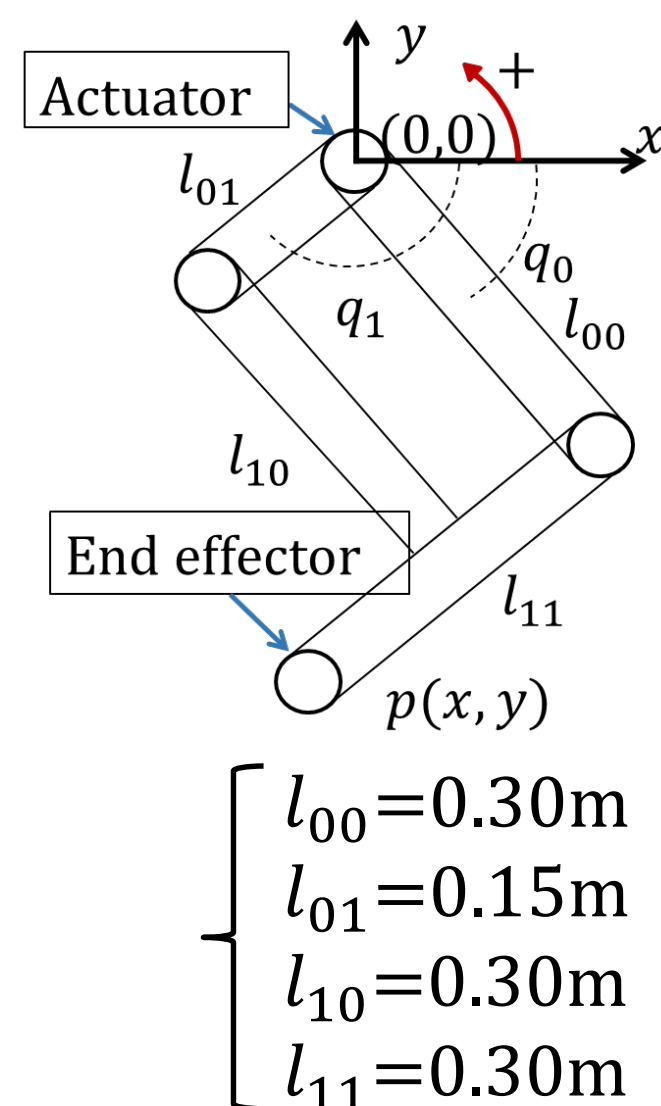


Fig. 2 制御対象

$H(q)$ : 慣性行列を表す対称行列  
 $C(q, \dot{q})$ : 遠心・コリオリ力を表す歪対称行列  
 $r(\dot{q})$ : 粘性摩擦およびクーロン摩擦を表す摩擦項

Table 2 各パラメータの推定値

$I_0$ [kgm <sup>2</sup> ]	$I_1$ [kgm <sup>2</sup> ]	$C_r$ [kgm <sup>2</sup> ]	$B_0$ [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. 制御系の設計

### $H_2$ 予見サーボ系

- コントローラ  $K$  は、一般化プラントに対して  $h$  [s] 先の未来の目標値情報を利用することができる。
- 以下のように定めた一般化プラント  $\Sigma$  に対して、 $w$ - $z$  間の  $H_2$  ノルムを最小にする制御則の構成を行う。<sup>[2]</sup>

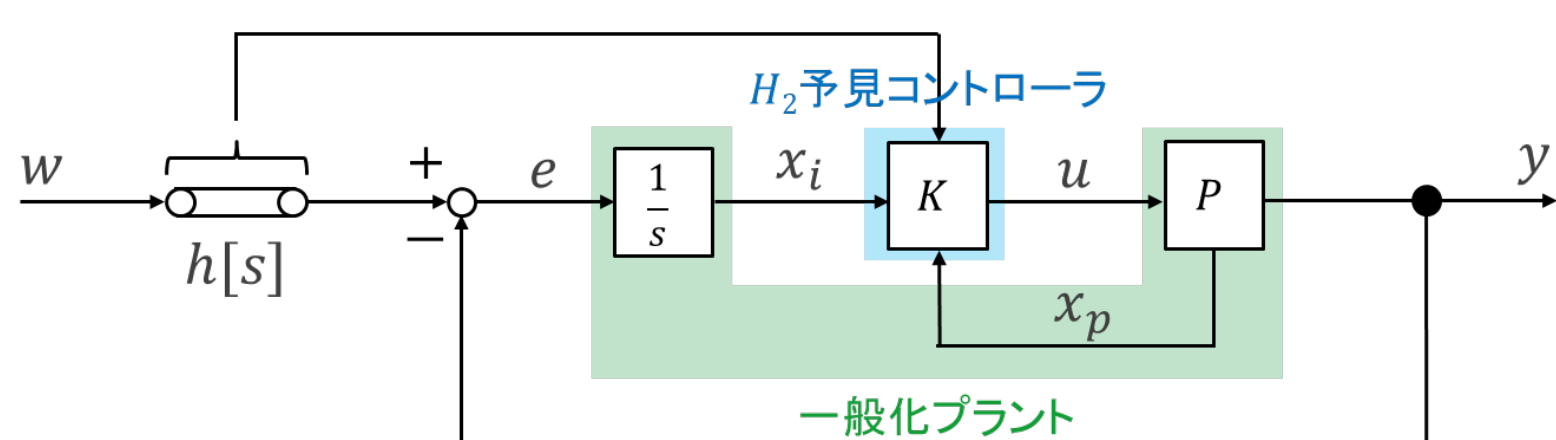


Fig. 3  $H_2$  予見サーボ系の構造

$$\text{一般化プラント } \Sigma \begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + B_1 w(t-h) + B_2 u(t) \\ z(t) = \begin{bmatrix} x_i(t) \\ u(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F \\ 0 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix} u(t) \\ y(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ w(t) \end{bmatrix}, \quad x(t) := \begin{bmatrix} x_p(t) \\ x_i(t) \end{bmatrix}, \quad x(0) = 0 \end{cases}$$

## 4. 目標軌道追従実験

### 条件

軌道追従実験における目標軌道と各パラメータを以下に示す。

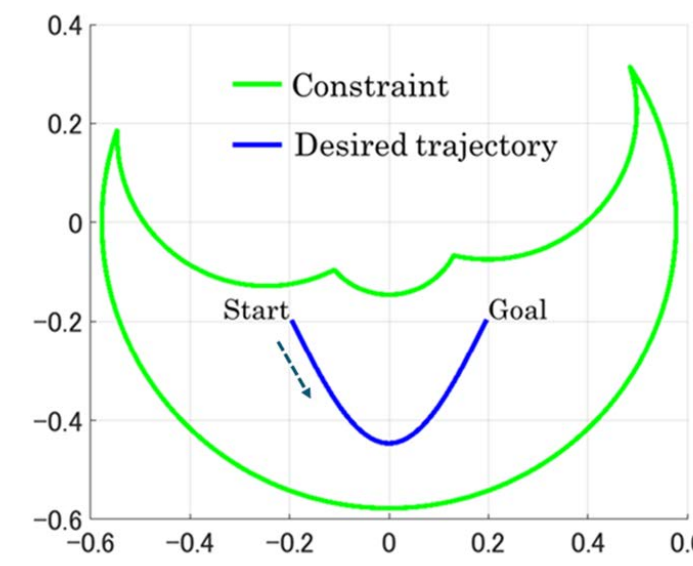


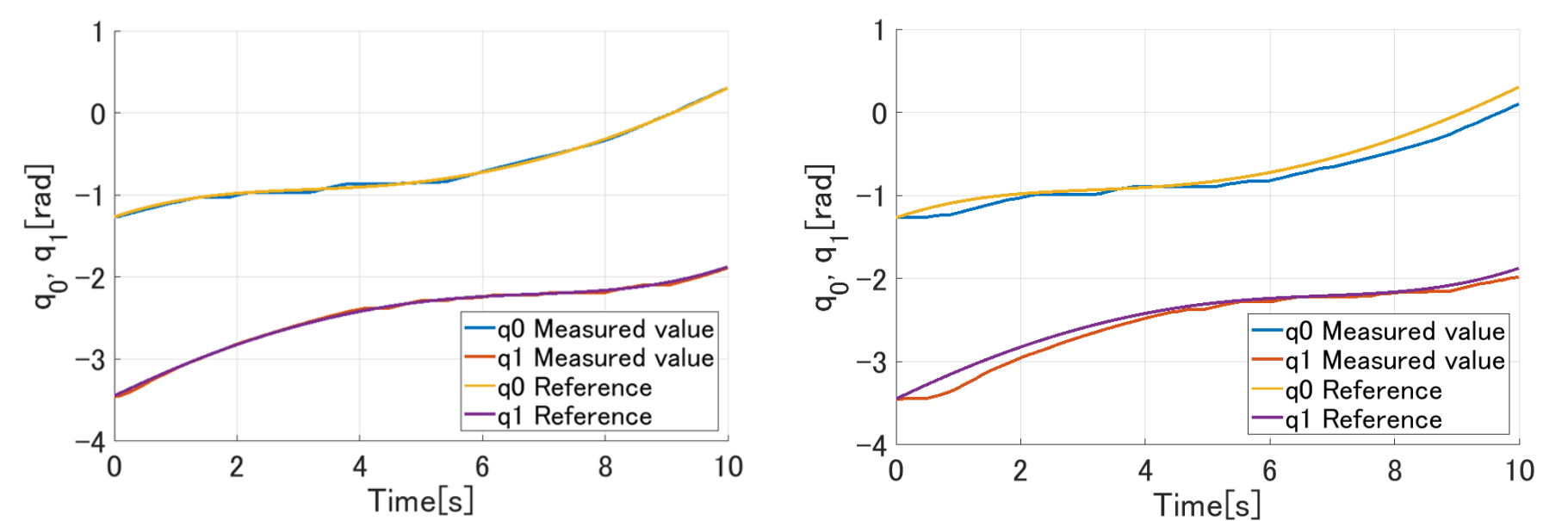
Fig. 4 目標軌道

Table 2 条件の各パラメータ

	(a) 予見補償あり	(b) 予見補償なし
$h$	1.0[s]	0[s]
$T_s$	0.005[s]	0.005[s]
$T_f$	10[s]	10[s]
$K_p$	$q_0: -12.2039$ $q_1: -9.5680$	$q_0: -12.2039$ $q_1: -9.5680$
$K_i$	$q_0: 19.9951$ $q_1: 19.9951$	$q_0: 19.9951$ $q_1: 19.9951$
$K_d$	$q_0: -0.7999$ $q_1: -0.6748$	$q_0: -0.7999$ $q_1: -0.6748$

### 実機実験結果

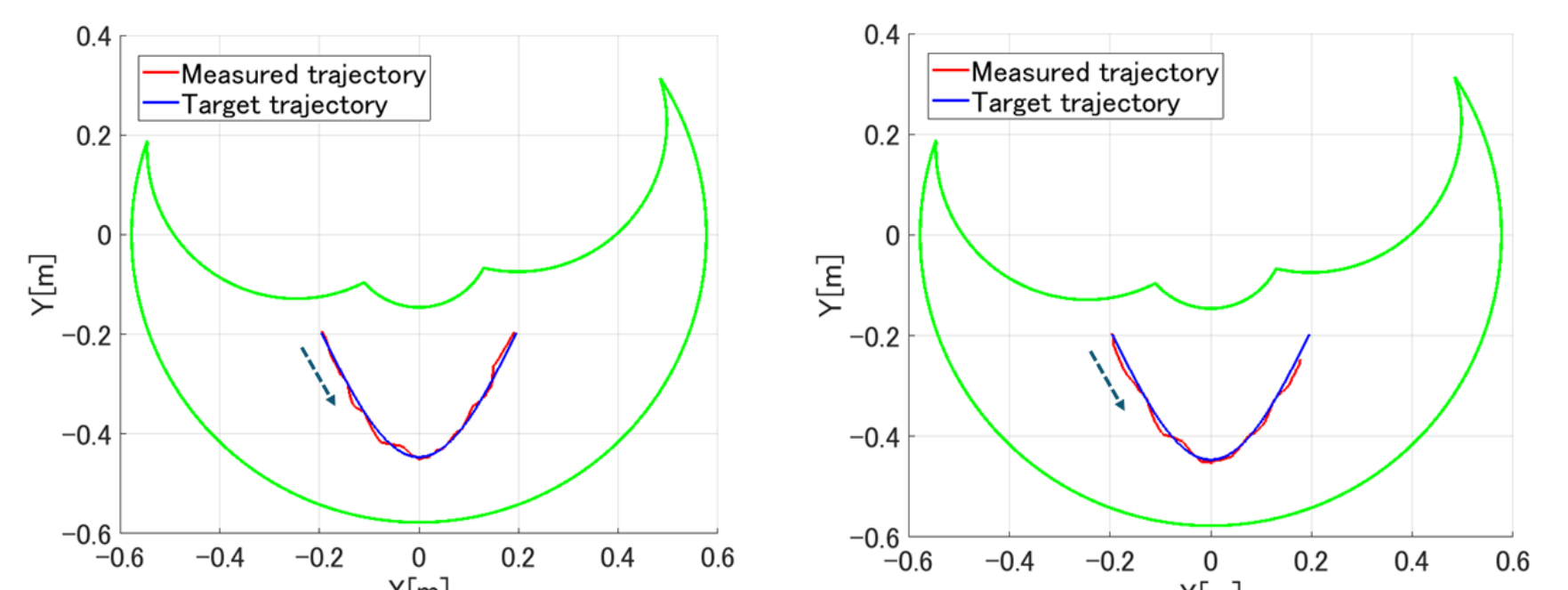
Fig. 5, 6において、(a)では目標軌道にほぼ追従しているのに対し、(b)では遅れて追従しており、最終目標地点に到達できていないことがわかる。Fig. 7において、(a)では0秒の直後に動き出しているのに対し、(b)では動き出しが遅いことがわかる。



(a) 予見補償あり ( $h=1$ )

(a) 予見補償なし ( $h=0$ )

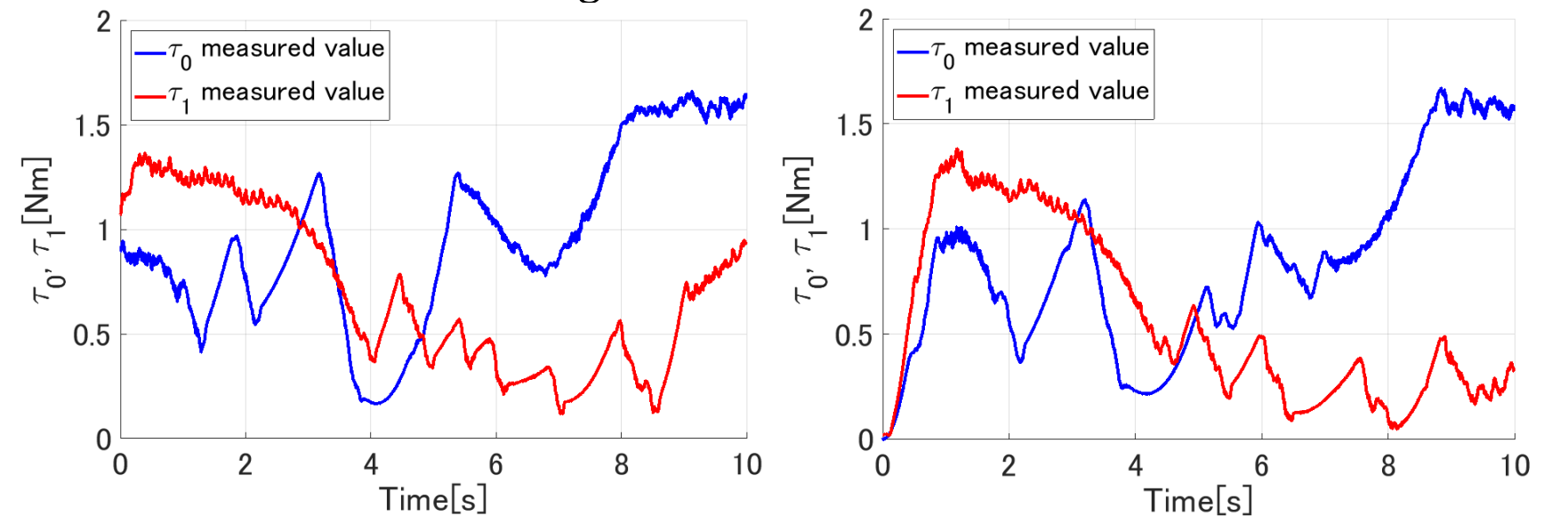
Fig. 5 関節角度の時間応答



(a) 予見補償あり ( $h=1$ )

(a) 予見補償なし ( $h=0$ )

Fig. 6 軌道追従性の結果



(a) 予見補償あり ( $h=1$ )

(a) 予見補償なし ( $h=0$ )

Fig. 7 操作量の時間応答

## 5. まとめと今後の展望

### まとめ

- $H_2$  予見サーボ系を構成し、目標軌道追従実験を行った。
- 実機実験により、軌道追従性能を高めることに関して、予見補償の導入が有効であることを確認した。

### 今後の展望

- 周波数特性に応じて可変速な軌道計画を行うことにより、追従精度を向上させることを検討する。

### 参考文献

- 品田浩一郎, 江上正, 土谷武士: 経路上を可変速で動くマニピュレータの予見制御, 計測自動制御学会論文集, Vol. 25, No. 1, 126/128 (1989)
- 児島晃: 予見フィードフォワード補償と  $H_2$  予見制御, 計測自動制御学会論文集, Vol. 41, No. 4, 300/306 (2005)