

# 高速ビジョンシステムを用いた 2リンクフレキシブルアームの制御

村中裕之 (立命館大学) 平井慎一 (立命館大学)

## Control of 2-link flexible arm with high-speed visual feedback

\*Hiroyuki MURANAKA (Ritsumeikan Univ.), Shinichi HIRAI (Ritsumeikan Univ.)

**Abstract**—This paper presents a vision-based Jacobian-free control of a 2-DOF flexible arm. Tip position of a manipulator is described by polar coordinate system instead of Cartesian coordinate system. This yields one-to-one monotonous relationship between polar coordinates and joint angles. Based on this relationship, we construct a simple PID controller to compensate tip position error. Simulation demonstrates how the proposed control works and revised laws are proposed.

**Key Words:** flexible arm, high-speed vision, control, polar coordinates, Jacobian Matrix

### 1. 緒言

ロボットアームの高速化長腕化の欲求に対し、アームの軽量化が進んでいる。そのため、アームの剛性が低下し、たわみや振動が生じる場合がある。

このような剛体でないフレキシブルアームの制御の研究では、直接ひずみフィードバック制御 [1] などの多くの制御則が提案されている。これらの制御則では、フレキシブルアームのモデルを必要とする。一方、高速ビジョンセンサを用いることで、高速運動する制御対象に対して、より簡単な制御則が期待できる。そこで、本研究では撮影速度 1000 fps の高速ビジョンシステムを用いる事により、高速ビジュアルフィードバックによるフレキシブルアームの先端位置制御を目指す。

また、従来の直角座標系での制御モデルに対し、目標位置座標を原点からの角度と距離で表す円座標系を用いる事により、ヤコビアンなどの複雑な逆運動学を用いることなく、先端位置制御を実現する。

### 2. システム構成

本研究で前提となるシステムについて Fig.1 に示す。本システムは、制御対象である 2 リンクフレキシブルアームの先端を 1000 fps の高速 CMOS カメラで撮影し、FPGA ボードを用いて高速画像処理を行い、アーム先端位置を検出する。そして画像処理で得られたアーム先端位置の座標をフィードバックし、制御を行う。

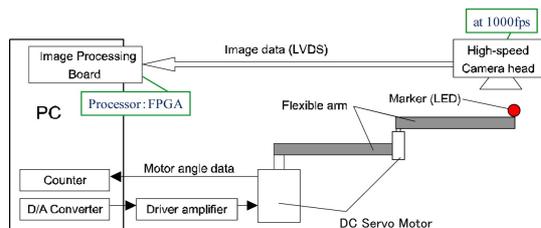


Fig.1 High speed feedback system

### 3. 円座標系での制御

本報告では、アームの先端位置を円座標系で表す。円座標系におけるフレキシブルアームのモデルを Fig.2 に示す。

この円座標系モデルでは目標位置座標を原点からの距離及び角度で指定する。

リンク 1 の長さを  $l_1$ 、リンク 2 の長さを  $l_2$ 、関節 1 の角度を  $\theta_1$ 、関節 2 の角度を  $\theta_2$  で表す。アームの先端位置を直角座標で表し、先端の座標を  $(x_e, y_e)$  で表すと

$$x_e = l_1 C_1 + l_2 C_{12} \quad (1)$$

$$y_e = l_1 S_1 + l_2 S_{12} \quad (2)$$

である。ここで  $C_1 = \cos \theta_1$ 、 $S_1 = \sin \theta_1$ 、 $C_{12} = \cos(\theta_1 + \theta_2)$ 、 $S_{12} = \sin(\theta_1 + \theta_2)$  と略記した、直角座標でのヤコビ行列は

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial \theta_e}{\partial \theta_1} & \frac{\partial \theta_e}{\partial \theta_2} \\ \frac{\partial r}{\partial \theta_1} & \frac{\partial r}{\partial \theta_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -l_1 S_1 - l_2 S_{12} & -l_2 S_{12} \\ l_1 C_1 + l_2 C_{12} & l_1 C_{12} \end{bmatrix} \quad (3)$$

である。これより、関節角  $\theta_1, \theta_2$  と先端位置座標  $x_e, y_e$  はカップリングしていることがわかる。さらに  $\theta_1, \theta_2$  の値によって、ヤコビ行列の要素は、正の値や負の値をとることがわかる。これは  $\theta_1, \theta_2$  の増減と  $x_e, y_e$  の増減が一意には対応していないことを意味する。

一方、先端位置を円座標で表し、原点から先端を結ぶ直線が水平から成す角を  $\theta_e$ 、原点から先端までの距離を  $r_e$  で表すと

$$r_e = (x_e^2 + y_e^2)^{\frac{1}{2}} = (l_1^2 + l_2^2 + l_1 l_2 C_2)^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

$$\theta_e = \text{atan2}(y_e, x_e) = \text{atan2}(l_1 S_1 + l_2 S_{12}, l_1 C_1 + l_2 C_{12}) \quad (5)$$

である。したがって円座標でのヤコビ行列は

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial \theta_e}{\partial \theta_1} & \frac{\partial \theta_e}{\partial \theta_2} \\ \frac{\partial r}{\partial \theta_1} & \frac{\partial r}{\partial \theta_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & l_1 l_2 C_2 + l_2^2 \\ 0 & -l_1 l_2 S_2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

である．これより，距離  $r_e$  は， $\theta_2$  のみに依存し， $\theta_1$  には依存しないことがわかる．さらに， $S_2 > 0$  のとき  $\theta_2$  が増加すると  $r_e$  が減少， $S_2 < 0$  のとき  $\theta_2$  が増加すると  $r_e$  が増加することがわかる．すなわち  $S_2 < 0$  のとき  $\theta_2$  の増減と  $r_e$  の増減が一致する．そこで関節角  $\theta_2$  に  $-\pi \leq \theta_2 \leq 0$  という制約を課し， $r_e$  の値をフィードバックすることにより， $\theta_2$  の値を制御するという一対一の対応関係を導入する．角度  $\theta_e$  は  $\theta_1$  と  $\theta_2$  の双方に依存する．ここで， $\theta_e$  と  $\theta_1$  の間には，関節角  $\theta_1$  が増加すると角度  $\theta_e$  が増加するという関係があることがわかる．すなわち， $\theta_1$  の増減と  $\theta_e$  の増減が一致する．そこで  $\theta_e$  の値フィードバックすることにより， $\theta_1$  の値を制御するという一対一の対応関係を導入する．

以上のように， $\theta_e$  の制御には， $\theta_1$ ， $r_e$  の制御には  $\theta_2$  を対応させることにより，単純な一入力一出力の制御則を用いて 2 リンクフレキシブルアームを制御することができると思われる．

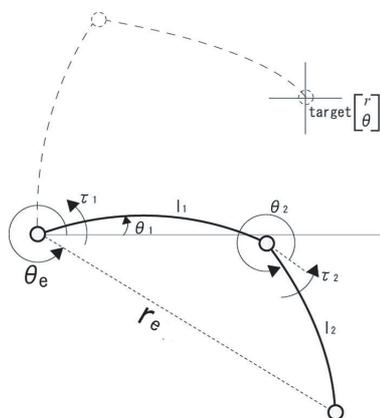


Fig.2 Two-link arm of circular polar coordinates setting

#### 4. シミュレーション

アーム先端位置の円座標をフィードバックすることによって効果的な制御が可能か検証するため，C 言語を用いてシミュレーションを行った．1 リンクの長さが 300mm の 2 リンクのフレキシブルアームを，初期位置である鉛直下向き（先端角度  $\theta = -\pi/2$  rad，先端距離  $r = 600$  mm）から，目標位置（先端角度  $\theta = 0$  rad，先端距離  $r = 400$  mm）に制御することを目標にシミュレーションを行った．

フレキシブルアームのシミュレーションでは，吉川らが提案した仮想受動関節を用いたモデリング手法 [2] を用いた．これは，フレキシブルアームをいくつかの剛体リンクに分割し，関節にフレキシブルアームのパラメータに一致するようにバネ・ダンパを設定する方法である．空気抵抗は近似的に関節ダンパ要素で表す．また，実機で用いるアームとのキャリブレーションを行った．各ゲインを Table 1 に示す．

まず，基本となる先端 PID 制御で考える．剛体が対象の関節角をフィードバックする一般的な PID 制御と異なり，先端 PID 制御は先端角度と先端距離をフィードバックする制御である．制御則は次式で表される．

Table 1 Definition of gain parameters

記号	意味
$K_p^{angle}$	先端位置角度比例ゲイン
$K_d^{angle}$	先端位置角度微分ゲイン
$K_i^{angle}$	先端位置角度積分ゲイン
$K_p^{length}$	先端位置距離比例ゲイン
$K_d^{length}$	先端位置距離微分ゲイン
$K_i^{length}$	先端位置距離積分ゲイン
$K_d^1$	第 1 モータ回転角微分ゲイン
$K_d^2$	第 2 モータ回転角微分ゲイン

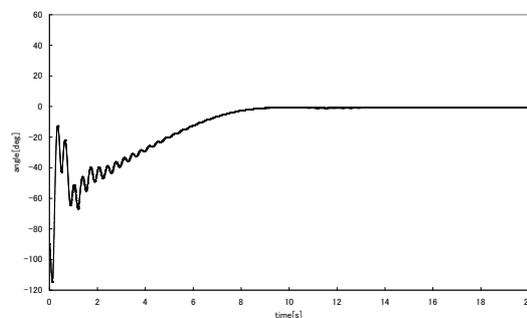
$$\tau_1 = K_p^{angle} \cdot (\theta_{target} - \theta_e) - K_d^{angle} \cdot \dot{\theta}_e + K_i^{angle} \cdot \int (\theta_{target} - \theta_e) dt \quad (7)$$

$$\tau_2 = K_p^{length} \cdot (r_{target} - r_e) - K_d^{length} \cdot \dot{r}_e + K_i^{length} \cdot \int (r_{target} - r_e) dt \quad (8)$$

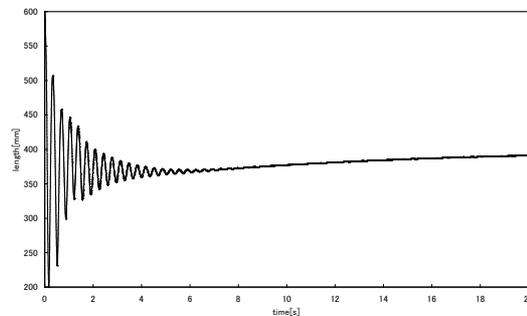
用いた制御ゲインを Table 2 に示す．また，先端 PID 制御のシミュレーション結果を Fig.3 に示す．

Table 2 Control gain parameters for tipPID

$K_p^{angle}$	30	$K_p^{length}$	1.0
$K_d^{angle}$	4	$K_d^{length}$	0.015
$K_i^{angle}$	5	$K_i^{length}$	0.1



(a) angle  $\theta_e$



(b) length  $r_e$

Fig.3 Result of tipPID simulation

目標に収束するまでに 10 秒程度かかり，ダンピング不足により振動の収束も遅い．そこでダンピング不足を解決するため，式 (2) のダンピング要素である  $\dot{r}_e$  を  $\dot{x} + \dot{y}$  に変更し，さらに関節角の微分ゲインを加えたのが 先端 PID+D 制御である．制御則を次式に示す．

$$\tau_1 = K_p^{angle} \cdot (\theta_{target} - \theta_e) - K_d^{angle} \cdot \dot{\theta}_e + K_i^{angle} \cdot \int (\theta_{target} - \theta_e) dt - K_d^1 \cdot \dot{\theta}_1 \quad (9)$$

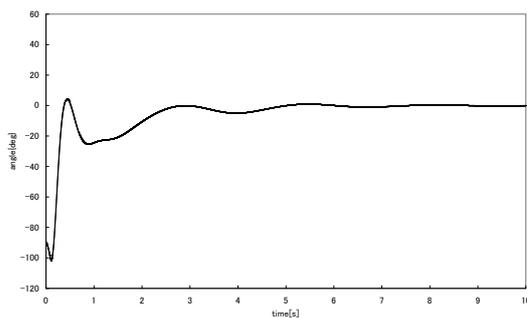
$$\tau_2 = K_p^{length} \cdot (r_{target} - r_e) - K_d^{length} \cdot (\dot{x} + \dot{y}) + K_i^{length} \cdot \int (r_{length} - r_e) dt - K_d^2 \cdot \dot{\theta}_2 \quad (10)$$

なお，初期姿勢，及び目的位置は同じである．

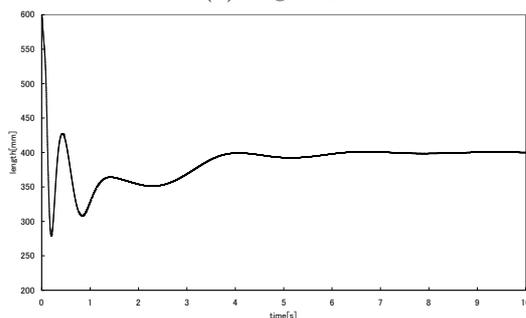
このときの制御ゲインを Table 3 に示す．シミュレーション結果を Fig.4 に示す．

Table 3 Control gain parameters for tipPID+D

$K_p^{angle}$	40	$K_p^{length}$	0.1
$K_d^{angle}$	5	$K_d^{length}$	0.01
$K_i^{angle}$	20	$K_i^{length}$	0.2
$K_d^1$	0.2	$K_d^2$	0.2



(a) angle  $\theta_e$



(b) length  $r_e$

Fig.4 Result of tipPID+D simulation

Fig.4 からダンピング不足が改善していることがわかる．PID 制御では目標値がステップ関数状に与えられる場合，積分ゲインが大きくなり，初期トルクが過大になる場合がある．それにより振動を励振する場合がある．特にフレキシブルアームではその振動が長時間

残り，制御結果に影響し易い．比例・微分先行型 PID 制御である I-PD 制御はその問題に有効である．制御則を次式に示す．

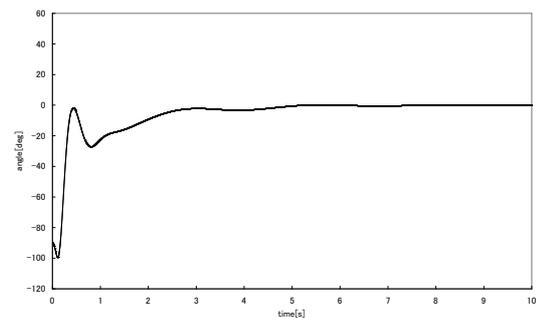
$$\tau_1 = K_i^{angle} \cdot \int (\theta_{target} - \theta_e) dt - K_p^{angle} \cdot \theta_e - K_d^{angle} \cdot \dot{\theta}_e - K_d^1 \cdot \dot{\theta}_1 \quad (11)$$

$$\tau_2 = K_p^{length} \cdot (r_{target} - r_e) - K_d^{length} \cdot (\dot{x} + \dot{y}) + K_i^{length} \cdot \int (r_{length} - r_e) dt - K_d^2 \cdot \dot{\theta}_2 \quad (12)$$

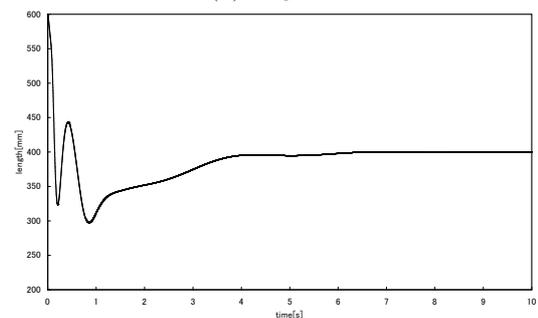
このときの制御ゲインを Table 4 に示す．シミュレーション結果を Fig.5 に示す．またそのときの先端の軌道を Fig.6 に示す．

Table 4 Control gain parameters for tipI-PD+D

$K_p^{angle}$	40	$K_p^{length}$	0.1
$K_d^{angle}$	5	$K_d^{length}$	0.01
$K_i^{angle}$	20	$K_i^{length}$	0.2
$K_d^1$	1	$K_d^2$	0.2



(a) angle  $\theta_e$



(b) length  $r_e$

Fig.5 Result of tipI-PD+D simulation

振動幅が小さく，また収束も早くなっているのがわかる．以上よりフレキシブルアームにおいて高速ビジュアルフィードバックを用いた，先端 I-PD + D 制御が有効であるといえる．しかし，今回は目標座標を一点（先端角度  $\theta = 0$  rad，先端距離  $r = 400$  mm）のみでシミュレーションを行っており，目標座標が他の象限の場合にもこの制御則が有効であるか検証していく予定である．

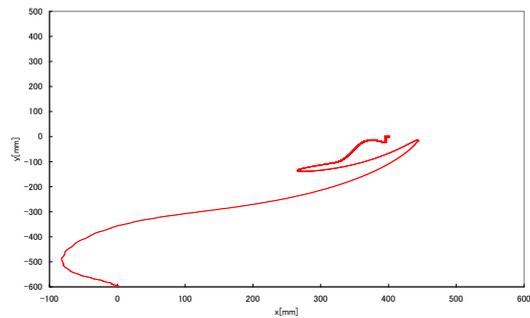


Fig.6 Trajectory of end point in tipI-PD+D control

## 5. 結言

本稿では、高速ビジュアルフィードバックによるフレキシブルアームの先端位置制御を提案し、簡単な制御則 (tipI-PD + D 制御) で 2 リンクフレキシブルアームが制御できることをシミュレーションによって示した。

また、直交座標系との差異として円座表系でのモデル、および運動学を考察し、ヤコビアンを用いずに簡単に制御できることを示した。今後、実機での検証を行う予定である。

## 参考文献

- [1] 羅正華, 山本透: “ゲイン適応によるフレキシブルロボットアームのひずみ直接フィードバック制御”, 日本機械学会論文集 (C 編), 59, 566, pp.3146-3150, 1993.
- [2] 吉川恒夫, 田村正人: “フレキシブルアームに対する仮想受動関節モデルの有効性の検討”, 日本ロボット学会誌, 17, 2, pp.250-259, 1999.