

## 投球動作解析のための 4 自由度マニピュレータの開発

### Development of four-degree-freedom manipulator for pitching motion analysis.

角濱孝史, 佐川貢一

Takashi Kadohama, Koichi Sagawa

弘前大学 大学院理工学研究科

Graduate School of Science and Technology, Hirosaki University

キーワード : 4 リンクマニピュレータ (four-degree-freedom manipulator), 投球動作解析 (pitching motion analysis), 関節負荷 (joint loading)

連絡先 : 〒 036-8561 青森県弘前市文京町 3, 弘前大学 大学院理工学研究科 佐川研究室  
角濱孝史, Tel/Fax:(0172)-39-3691 E-mail: h11gs607@stu.hirosaki-u.ac.jp

#### 1. はじめに

近年スポーツを楽しむ人が増える一方で、スポーツによる障害が問題となっている。野球の場合、スポーツ障害として野球肩や野球肘といった投球障害が挙げられる [1]。投球障害が起こる原因として、体幹が開いた状態での投球や、肘が曲がった状態での投球などのような適切ではない投球動作による関節への過負荷が考えられる。現在、場所に依存しない投球動作のモニタリングや、バイオメカニクス解析実現のため、装着型 3 次元動作解析装置を使用した投球動作解析システムが提案されている [2-5]。装着型センサは、身体に取り付け、運動加速度や、角速度を計測することで関節トルクを算出することが可能であり、スポーツ動作解析などでの利用が期待されている。また、逆動力学に基づき、投球時の上肢を剛体リンクモデルで近似して運動方程式を構築し、関節トルクを算出する方法が提案されている [6-8]。しかし、指先に作用する

力と関節トルクとの関係に関する研究はあまり行われていないため、関節トルクの推定値の妥当性は不明である。

そこで本報告では、投球時に肩関節に作用する力を実測するために、人間の上肢を模擬した 4 自由度 2 リンクマニピュレータを製作する。その際、マニピュレータの構成は、人間の腕と同様の機構にする必要がある。肩関節は、水平屈曲伸展、内転外転、内旋外旋の 3 自由度、肘関節は、屈曲伸展の 1 自由度を有するマニピュレータを開発する。また、肩関節に 6 軸力覚センサ (力センサ) を取り付け、3 軸の力と 3 軸のモーメントを計測する。

## 2. 原理

### 2.1 4自由度2リンクマニピュレータの運動方程式の導出

投球を模擬する4リンクマニピュレータのモデルをFig.1に示す。ここで、 $\theta_1$ は肩水平屈曲伸展関節、 $\theta_2$ は肩内転外転関節、 $\theta_3$ は肩内旋外旋関節、 $\theta_4$ は肘屈曲伸展関節の回転角度である。 $m_i$ はリンク*i*の質量、 $l_i$ はリンク*i*の長さ、 $l_{gi}$ はリンク*i*の質量中心位置、 $I_i$ はリンク*i*の質量中心まわりの慣性モーメント、 $g$ は重力加速度、 ${}^iR_{i+1}$ は関節*i*から見た関節*i+1*の回転行列とする。ボールリリース時に手先に作用する力 ${}^5f_5$ [N]と、肩関節に作用する力 ${}^1F_1$ [N]との関係は次式のように表すことができる。

$${}^1F_1 = {}^1R_2({}^2R_3({}^3R_4({}^4R_5({}^5f_5 + {}^4\hat{f}_4) + {}^3\hat{f}_3) + {}^2\hat{f}_2) + {}^1\hat{f}_1) \quad (1)$$

$${}^0R_1 = \begin{bmatrix} C_1 & -S_1 & 0 \\ S_1 & C_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$${}^1R_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ -S_2 & -C_2 & 0 \\ C_2 & -S_2 & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$${}^2R_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ C_3 & -S_3 & 0 \\ S_3 & C_3 & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$${}^3R_4 = \begin{bmatrix} -S_4 & -C_4 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ C_4 & -S_4 & 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$${}^4R_5 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$C_i = \cos \theta_i, S_i = \sin \theta_i$

${}^2\hat{f}_2, {}^3\hat{f}_3, {}^4\hat{f}_4, {}^5\hat{f}_5$  および関節まわりのモーメントはニュートン・オイラーの動力学と運動学

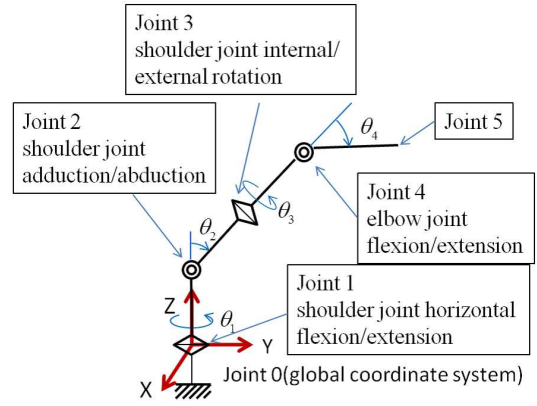


Fig. 1 Coordinate system of 4 link manipulator

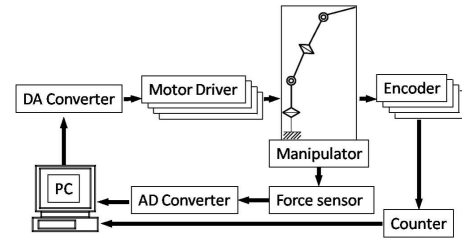


Fig. 2 Control system of 4 link manipulator

の式に基づき求める。また、手先に作用するトルク ${}^5n_5$ と肩関節に作用するトルク ${}^1n_1$ の関係は以下の2式から求めることができる。

$${}^1n_1 = {}^iR_{i+1}({}^{i+1}n_{i+1} + {}^i\hat{n}_i + {}^i\hat{s}_i \times {}^i\hat{f}_i + {}^i\hat{p}_{i+1} \times ({}^iR_{i+1}({}^{i+1}f_{i+1})) \quad (7)$$

力センサをJoint1に取り付けることにより、 ${}^1F_1$ と ${}^1n_1$ を実測することができる。

## 3. 機構

### 3.1 制御システム

Fig.2に、4リンクマニピュレータの計測制御システムの構成を示す。各関節は、DCサーボモータによって駆動される。投球動作実施時、肩関節の水平屈曲伸展の回転軸となる関節1に作用する力とトルクは、6軸力覚センサ(NITTA, IFS-90M40A100-I50 ANA)によって計測され、AD/DAコンバータ(Interface, PCI-3521)を通して、RT-Linuxを組み込んだPC(Intel, Intel

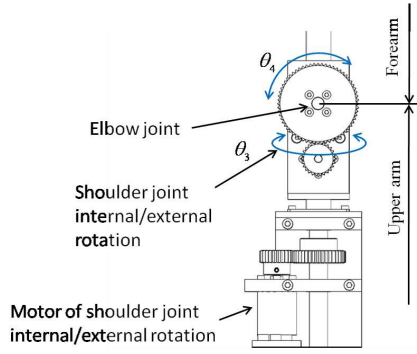


Fig. 3 Mechanism of internal/external rotation

Celeron processor) にサンプリング周波数 100[Hz] で取り込まれる。一方, 各関節の回転数はエンコーダ (maxon, HEDS 5540) によって計測され, カウンタ (Interface, PCI-6204) を通して PC に取り込まれる。

### 3.2 モータ仕様

肩水平屈曲伸展関節の駆動は, モータ (maxon, RE40) とギア (maxon, GP52C) により行う。肩内転外転関節の駆動は, モータ (maxon, RE40) とギア (maxon, GP52C) により行う。肩内旋外旋関節と肘屈曲伸展関節の駆動は, モータ (maxon, RE25) とギア (maxon, GP32A) により行う。角度計測はエンコーダ (maxon, HEDS5540-110511) により計測する。肩内転外転関節と肩内旋外旋関節と肘屈曲伸展関節には, 静止時の姿勢を固定するためにブレーキ (maxon, AB28) を組み込む。

### 3.3 マニピュレータの機構

マニピュレータは, 肩関節では水平屈曲伸展, 外転内転, 内旋外旋の 3 自由度, 肘関節では屈曲伸展の 1 自由度の合わせて 4 自由度必要である。しかし, 一般的な産業用ロボットでは, 肩関節の内旋外旋機構はあまり利用されていない。そこで, Fig.3 に示すように, 上腕の長軸まわりに肘関節を回転させるように肩関節の内旋外旋

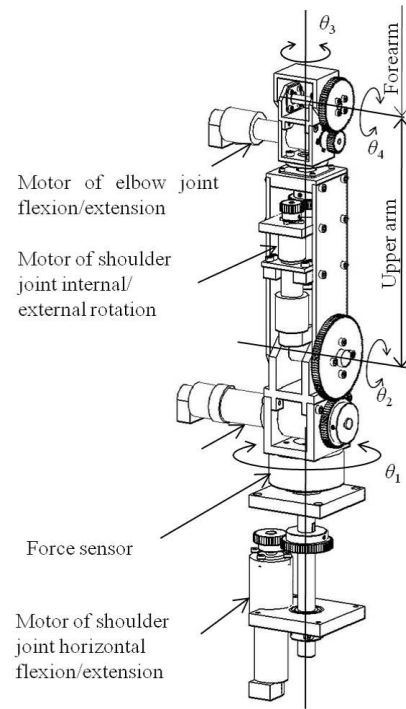


Fig. 4 Overview of 4 link manipulator

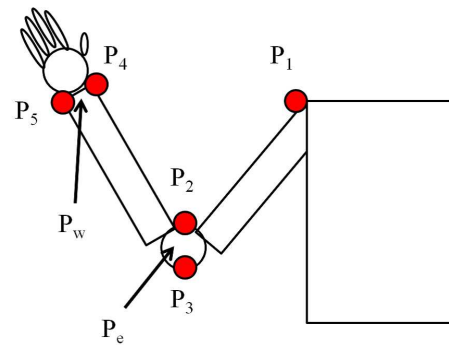


Fig. 5 Marker position

機構を構築する。試作したマニピュレータの概観を Fig.4 に示す。

## 4. 実験方法

### 4.1 投球動作計測

実際の投球動作をマニピュレータで実現するため, 光学式動作計測装置 (MAC 3D systems, Motion Analysis) を用いてサンプリング周波数 100[Hz] で投球時の上腕の動作を計測する。マーカー張り付け位置は Fig.5 に示すとおり, 肩 1 点, 肘 2 点, 手首 2 点の計 5 点とし, それぞれのマ

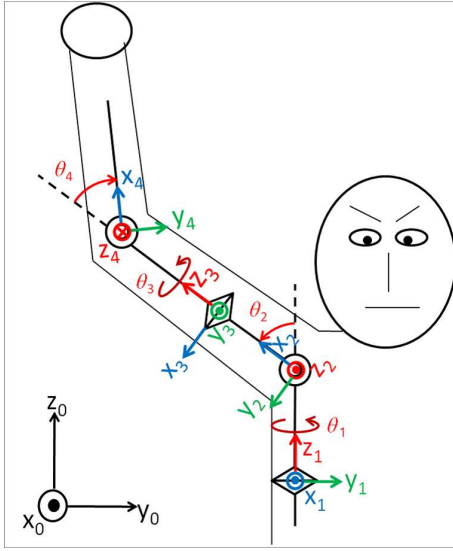


Fig. 6 Link parameter

カーの3次元位置を  $P_1 \sim P_5$  とする。測定する動作は肩から先のみを使用してボールを約 4[m] 投げるようなオーバーハンドスローとする。

#### 4.2 マニピュレータ回転角度算出

Fig.6 にリンクパラメーターを示す。3次元マーカー位置  $P_1 \sim P_5$  を使用することにより肘の位置  $P_e$  と手首の位置  $P_w$  を以下のように求める。

$$P_e = \frac{P_2 + P_3}{2} \quad (8)$$

$$P_w = \frac{P_4 + P_5}{2} \quad (9)$$

各リンクの長さ  $l_2, l_3, l_4$  は以下のようになる。

$$l_2 + l_3 = \|P_e - P_1\| \quad (10)$$

$$l_4 = \|P_w - P_e\| \quad (11)$$

肩関節のマーカーから見た手先の位置  ${}^0r$  は  ${}^0r = [r_x, r_y, r_z]^T$  となる。マーカーの3次元位置から関節3, 関節4の回転角度  $\theta_3, \theta_4$  を以下のようにあらわすことができる。

$$\theta_3 = \tan^{-1} \frac{|Z_2 \times Z_4| \cdot Z_3}{Z_2 \cdot Z_4} \quad (12)$$

$$\theta_4 = \tan^{-1} \frac{|Z_3 \times X_4| \cdot Z_4}{Z_3 \cdot X_4} \quad (13)$$

ここで, 単位ベクトル  $Z_3, Z_4, X_4$  は以下のようになる。

$$Z_3 = \frac{P_e - P_1}{\|P_e - P_1\|} \quad (14)$$

$$Z_4 = \frac{P_2 - P_3}{\|P_2 - P_3\|} \quad (15)$$

$$X_4 = \frac{P_w - P_e}{\|P_w - P_e\|} \quad (16)$$

$Z_2$  は,  $Z_3$  のベクトルの向きより以下のようにして求めることができる。

$$Z_2 = \frac{[-Z_{3Y}, Z_{3X}, 0]}{\sqrt{Z_{3Y}^2 + Z_{3X}^2}} \quad (17)$$

ここで,  $Y_{Z_3}$  は  $Z_3$  の  $Y_0$  方向成分であり,  $X_{Z_3}$  は  $Z_3$  の  $X_0$  方向成分である。関節3, 関節4の回転角度  $\theta_3, \theta_4$  が求まることにより, 関節1, 関節2の回転角度  $\theta_1, \theta_2$  を以下のように求めることができる。

$$\theta_1 = \tan^{-1} \frac{r_x}{r_z} + \tan^{-1} \frac{\sqrt{r_x^2 + r_y^2 - (l_4 S_3 S_4)^2}}{(-l_4 S_3 S_4)} \quad (18)$$

$$\theta_2 = \tan^{-1} \frac{r_z + \frac{(S_1 r_x - C_1 r_y)(C_4 l_4 + l_2 + l_3)}{C_3 S_4 l_4}}{-S_1 r_x + C_1 r_y + \frac{l_4 r_z C_4 + (l_2 + l_3) r_z}{C_3 S_4 l_4}} \quad (19)$$

ここで,  $r$  は肩関節から見た手先位置で以下のようにして求めることができる。

$$r = P_w - P_1 \quad (20)$$

ただしこの条件では, 上腕の移動経路により, フレームの姿勢が複数存在する場合があるため,  $\theta_2$  の値を正に限定して回転角度を算出する。

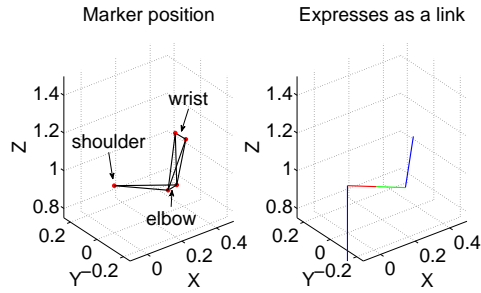


Fig. 7 Motion1 t=0.0

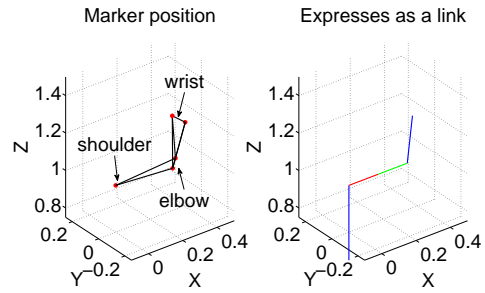


Fig. 9 Motion3 t=3.5

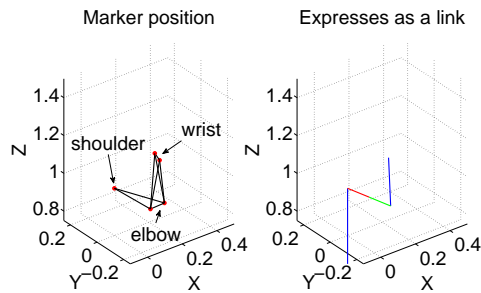


Fig. 8 Motion2 t=3.0

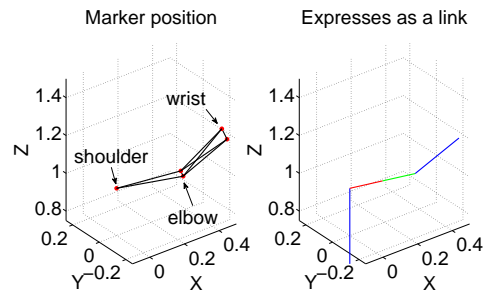


Fig. 10 Motion4 t=5.0

## 5. 実験結果

### 5.1 回転角度変換

回転角度計算式確認のため、投球動作時のマーカーの軌跡とマーカーの位置データを使用し、ロボットアームの回転角度に変換した後のスティックピクチャを作成した。初期姿勢を Fig.7, 動作中の姿勢を Fig.8, Fig.9 に示す。最終姿勢を Fig.10 に示す。マーカーの位置からロボットアームの姿勢を求めることができることを確認した。

### 5.2 マニピュレータの動作

関節 1 から関節 4 の投球動作の目標角度と回転角度を Fig.11~ Fig.14 に示す。また、力センサに作用する 3 軸の力のデータをカットオフ周波数 10[Hz] のローパスフィルタで処理した後の波形を Fig.15, 3 軸のトルクのデータをカットオフ周波数 10[Hz] のローパスフィルタで処理し

た後の波形を Fig.16 に示す。目標角度と実際の回転角度を比べると全て近い値の角度をとることができた。力センサを取り付けることにより、関節に作用する力とトルクを実測することが可能であることがわかった。しかし、力とトルクの波形だけでは関節トルクの傾向が読み取れないため、マニピュレータをコンピュータで描き関節トルクをあわせて表示する必要があるとわかった。

## 6. 結言

本報告では、4 リンクマニピュレータを製作し、光学式 3 次元動作計測装置で取得した投球動作から各関節への角度変換を行い回転角度を各関節に与え、マニピュレータに投球動作をあてたときの肩関節に作用する 3 軸の力とトルクを計測した。今後は、装着型センサによる推定した力およびトルクと実測値とを比較し、推

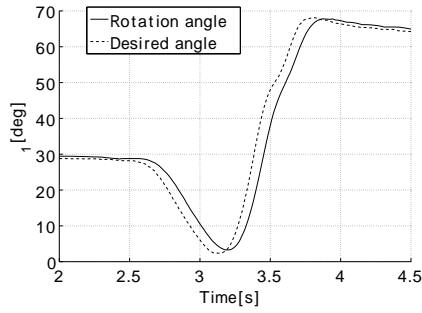


Fig. 11 Shoulder joint horizontal flexion/extension angle  $\theta_1$

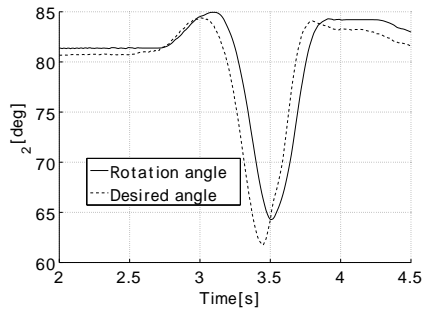


Fig. 12 Shoulder joint adduction/abduction angle  $\theta_2$

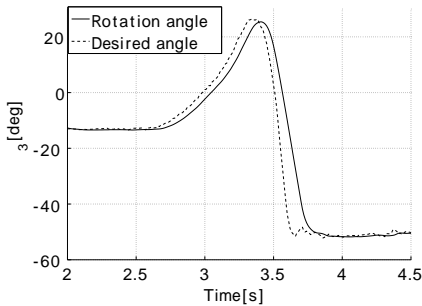


Fig. 13 Shoulder joint internal/external rotation angle  $\theta_3$

定値の妥当性を検証する。

## 参考文献

- 1) 塚本利昭, 伊藤郁恵, 近藤和泉, 佐藤英樹, 石橋恭之: "投球障害肩へのリハビリテーションアプローチ", 青森県スポーツ医学研究誌, Vol2(2), pp.54-57, 2003
- 2) 佐川貢一, 阿保萩子, 塚本利昭, 近藤和泉: "装着型センサによる投球フォーム前腕の軌道推定", 日本機械学会論文集, C編, 74巻, 738号, pp871-882, 2007
- 3) Yasuaki Ohtaki, Koichi Sagawa, Hikaru Inooka: "A Method for gait analysis in a daily

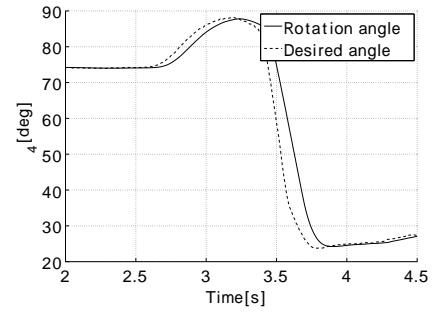


Fig. 14 Elbow joint flexion/extension angle  $\theta_4$

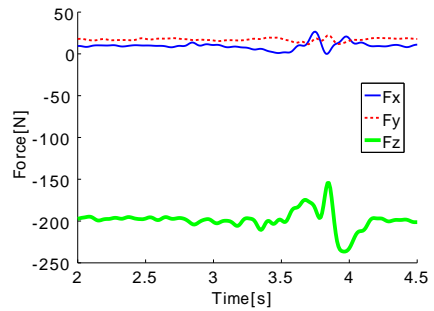


Fig. 15 Force data

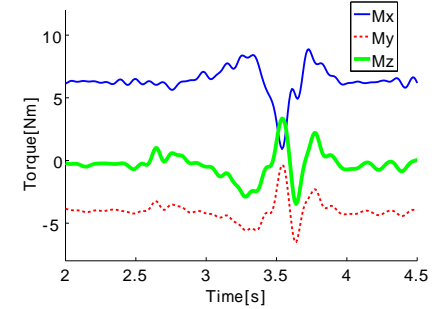


Fig. 16 Torque data

living environment by body-mounted instruments", JMSE International Journal, Series C, Vol.44, No.4, pp.1125-1132, 2001

- 4) Ryo Takeda, Shigeru Tadano, Akiko Natorigawa, Masahiro Todoh, Satoshi Yoshinari: "Gait posture estimation using wearable acceleration and gyro sensors" Journal of Biomechanics, Vol42, pp2486-2494, 2009
- 5) Masaya Hirashima, Katsu Yamane, Yoshihiko Nakamura, Tatsuyuki Ohtsuki: "Kinetic chain of overarm throwing in terms of joint rotations reveals by induced acceleration analysis", Journal of Biomechanics, Vol.41, pp2874-2883, 2008
- 6) Masaya Hirashima, Kazutoshi Kudo, Tatsuyuki Ohtsuki: "A new non-orthogonal decomposition method to determine effective

- torques for three-dimensional joint rotation”,  
Journal of Biomechanics, Vol40, pp871-882,  
2007
- 7) Masaya Hirashima, Kazutoshi Kudo, Tatsuyuki Ohtsuki: ”Erratum A new non-orthogonal decomposition method to determine effective torques for three-dimensional joint rotation”, Journal of Biomechanics, Vol41, pp488-489, 2008
- 8) 瀧澤哲也, 飯塚大輔, 中村康雄, 中村真理, 林豊彦, 信原克哉: ”モーションキャプチャシステムを用いた投球時肩関節負荷の逆動力学解析”, 信学技報 IEICE Technical Report, MBE2005-61, pp23-26, 2005