

## モーションデータからの手首周辺の筋骨格モデル推定

朴 俊映<sup>†</sup> 京田 文人<sup>†</sup> 齋藤 豪<sup>†</sup> 中嶋 正之<sup>†</sup>

<sup>†</sup> 東京工業大学大学院情報理工学研究所 〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1  
E-mail: †{junyoung,kyota,suguru,nakajima}@img.cs.titech.ac.jp

**あらまし** 人間の関節は様々な種類が存在し、個人差も大きいので、身体運動の正確な再現は困難である。本稿では、橈骨手根関節に注目し、個人の関節特性を反映した関節モデル推定法および関節の動力学的計算法について提案する。まず、橈骨手根関節の周辺にマーカを付け、回転中のモーションデータを取得し、手の移動軌跡を求めた。次に軌跡を表す頂点群から橈骨手根関節の形状を楕円体として推定した。次に、推定された楕円体関節を  $SE(3)$  上の行列として定義し、楕円体関節の運動学的計算法について述べ、既存の球関節と比較した。

本稿で提案するモデルは、手首の関節の形状により近いので、より正確な運動の再現が可能と考えられる。

## Estimation of wrist joint and its musculoskeletal model from motion capture data

Junyoung PARK<sup>†</sup>, Fumihito KYOTA<sup>†</sup>, Suguru SAITO<sup>†</sup>, and Masayuki NAKAJIMA<sup>†</sup>

<sup>†</sup> Graduate School of Information Science & Engineering, Tokyo Institute of Technology  
Ookayama 2-12-1, Meguro-ku, Tokyo, 152-8552 Japan  
E-mail: †{junyoung,kyota,suguru,nakajima}@img.cs.titech.ac.jp

**Abstract** There are many difficulties in representing accurate movement of the joints of the human body. Not only are there many different types of joints, but joints also vary from person to person. We propose a method to estimate the shape of the articulation radiocarpalis (wrist joint) as an ellipsoid joint, and how to represent the joint in  $SE(3)$ . First, the motion of the wrist joint is recorded using an optical motion capture system and estimate the shape of the ellipsoid using the path of the motion data. Next, we define the ellipsoid joint as a matrix in  $SE(3)$  using Lie groups. Finally, We also present how to calculate the kinematics of the joint as the joint representation, and then compare our ellipsoid joint to a traditional ball joint model in order to evaluate the joint movement. Our ellipsoid joint can model the movement of the human wrist more accurately than the ball joint model as an ellipsoidal shape is more similar to a real human wrist joint.

### 1. はじめに

人体は複雑な構造をしており、人体の各関節の形状と動きは関節の機能と個人差で大きく異なる。Neumann [1] によると、人体の関節は卵型関節 (ovoid joint) と鞍関節 (saddle joint) に分類することができる。しかし、両関節は回転と同時に平行移動を生じ、さらに各関節ごとの形状が異なることから、関節の回転計算及び動力学計算に

用いることが困難である。

そのため、従来の人体の骨格モデルのほとんどは計算の利便性から球関節 (ball joint) のみで人体の全ての関節を表現することが多い。しかし、球関節は人体の関節の動きを正確に反映しないため、特に動力学計算を行う場合に問題となる。

そこで、卵型関節の一つである楕円体関節をモデル化する手法を提案する。楕円体関節は図 1 のように 1 つの

方向に長い凸をもつ側と、それにかみ合う似たように長い凹をもつ側からなる。橈円をかみ合う面は、2つの面間の回旋を強く制止し、2つの運動面上の運動（通常、屈曲・伸展と外転・内転）を許す。橈骨手根関節はその典型的な一例である。

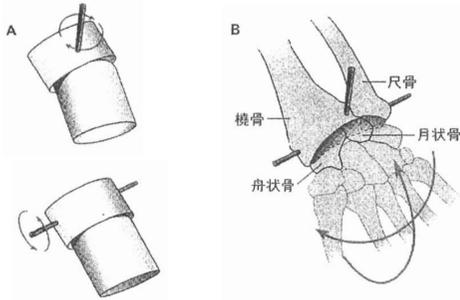


図1 橈円体関節 [2]

本稿は前半の橈骨手根関節の形状推定と後半の関節のSE(3)上での表現法に分けられる。

3章ではまず、手首とその周辺にセンサーを付け、関節回転中の前腕に対する手の相対的な位置と方向を取得した。次に、手の軌跡からなる橈円体の形状を最小二乗法を用いて推定した。

4章ではまず、SE(3)上での関節の表現法について述べ、1自由度の蝶番関節及び円関節をSE(3)上で表した。次に、蝶番関節の行列を線形変換で橈円関節に表す手法を提案し、2自由度の球関節を橈円関節に拡張した。最後に、SE(3)の性質から関節のヤコビ行列を計算する手法について述べた。

5章では、橈円体関節を用いて逆運動学シミュレーションを行い、実際のデータとの誤差を計算した。また、従来の球関節を用いてデータとの誤差を計算し、橈円関節と比較した。

本稿で提案する橈円体モデルは従来の球関節より正確な人体の手首の形状を反映しているため、より正確な運動の再現が可能である。

## 2. 従来研究

コンピュータグラフィックスを用いてリアルな人間の動きを表現するために、人間の骨格モデルに関する研究は多く行われている。

また、Tsangら[3]は手の関節をすべて球関節と見なした筋骨格モデルのシミュレーション手法を提案した。

しかし、Kapandji[4]らによると人間の関節は複雑な形状を持つため、一般に関節は回転運動と同時に平行移動を生じる。

Nieropら[2]は複雑な手の関節を再現するため、多重

のローカル座標系を用いて関節を表す手法について提案した。しかし、多重のローカル座標系を用いると逆運動学と動力学計算が複雑になり、既存の様々なアルゴリズムの修正が必要とされる問題点がある。

Leeら[5]はSE(3)空間上にスプライン曲線を定義し、そのスプライン曲線の軌跡に従って関節の軌跡、及び動力学計算を行うことでスプライン曲線関節のモデル化手法を提案した。しかし、Leeらの手法は、1自由度の曲線に限定したデータフィッティング手法による関節の軌跡決定法のみを提案しており、2自由度以上の関節については直接適用できない。

Changら[6]は球関節における関節の回転軸をリンク表面に付着されたマーカの軌跡から推定する手法について提案した。

Fitzgibbonら[7]は反復計算を必要としない、2次元頂点群から最小二乗法を用いた橈円の推定手法を提案し、Liら[8]はそれらを3次元空間上に拡張し、ガウシアンノイズを考慮した橈円体の推定手法を提案した。

本稿では、モーションキャプチャシステムで得られた3次元頂点群から、Liらの手法を用いて橈円体の形状を推定し、Leeらの手法を橈円に適用することで、2自由度関節に拡張し、橈円体関節モデルを提案した。

## 3. モーションデータから橈円体の形状推定

### 3.1 モーションキャプチャによるデータ取得

手首の関節を推定するために、光学式モーションキャプチャシステムを用いて関節の形状推定の対象となる手首の動きを計測した。被験者は第一著者で、光学式モーションキャプチャシステムは事前にキャリブレーションされ、0.2mm以下の誤差を持つ。

まず、手甲側の第2、第3中手骨間上に1つのマーカを、前腕の橈骨上に3つのマーカを付けた。取得対象となる動作は手首の屈曲・伸展、外転・内転、分回しの動きで、60秒間3600フレームのデータを取得した。

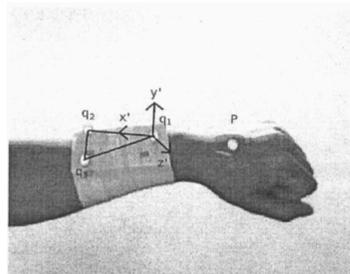


図2 手首のモーションキャプチャ

取得したデータは4個の3次元頂点座標で、図2のように前腕のマーカを $q_1, q_2, q_3$ 、手甲側は $p$ と定義する。

$\mathbf{q}_1, \mathbf{q}_2, \mathbf{q}_3$  によって生成された平面の法線ベクトルを  $\bar{\mathbf{n}}_q$  とすると、頂点  $\mathbf{q}_1$  を原点として、 $\bar{\mathbf{x}}' = \frac{\mathbf{q}_1 \bar{\mathbf{q}}_2}{\|\mathbf{q}_1 \bar{\mathbf{q}}_2\|}$  を X 軸、 $\bar{\mathbf{y}}' = \bar{\mathbf{n}}_q$  を Y 軸、 $\bar{\mathbf{z}}' = \bar{\mathbf{x}} \times \bar{\mathbf{n}}_q$  を Z 軸としたローカル座標系を定義し、 $\mathbf{p}$  を式 (1) を用いて軌跡をローカル座標系上の  $\mathbf{p}'$  に変換する。

$$\mathbf{p}' = \begin{bmatrix} x'_1 & x'_2 & x'_3 \\ y'_1 & y'_2 & y'_3 \\ z'_1 & z'_2 & z'_3 \end{bmatrix} [\mathbf{p} - \mathbf{q}_1] \quad (1)$$

### 3.2 最小二乗法による楕円体形状の推定

$n$  個のフレームを持つモーションデータから前処理により 3 次元空間上の頂点群  $\mathbf{P} = [\mathbf{p}'_1, \dots, \mathbf{p}'_n]$  が得られた。本稿では、 $\mathbf{P}$  から Li ら [8] の手法を用いて 3 次元空間上での楕円体の形状を推定する。

3 次元空間上の二次曲面を表す方程式は式 (2) で表現できる。

$$F(x, y, z) = ax^2 + by^2 + cz^2 + 2fyz + 2gxz + 2hxy + 2px + 2qy + 2rz + d = 0 \quad (2)$$

関節の軌跡を表す 3 次元空間上の頂点群を射影する  $\mathbf{H} : \mathbb{R}^3 \mapsto (\mathbf{a}, \mathbf{x})$  で式 (3) のように、式 (2) の係数と変数のベクトルに分解でき、式 (4) が成り立つ。

$$\begin{aligned} \mathbf{x} &= [x^2, y^2, z^2, 2yz, 2xz, 2xy, 2x, 2y, 2z, 1]^T \\ \mathbf{a} &= [a, b, c, f, g, h, p, q, r, d]^T \end{aligned} \quad (3)$$

$$F_{\mathbf{a}}(\mathbf{X}) = \mathbf{x} \cdot \mathbf{a} = 0 \quad (4)$$

すべての頂点  $\mathbf{p}_1, \dots, \mathbf{p}_n$  を射影し、行列  $\mathbf{D} = [\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_n]$  を定義すると、 $\mathbf{a}$  は式 (5) で求められる。

$$\min_{\mathbf{a}} \|\mathbf{D}\mathbf{a}\|^2 \quad \text{subject to} \quad \mathbf{a}^T \mathbf{C}\mathbf{a} = 1 \quad (5)$$

ここで  $\mathbf{C}$  は二次曲面の形を表す行列で、式 (6) で定まり、 $\mathbf{C}_1$  は推定される二次曲線の形状を表す定数で、楕円体の場合は式 (7) である。

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_1 & \mathbf{0}_{6 \times 4} \\ \mathbf{0}_{4 \times 6} & \mathbf{0}_{4 \times 4} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\mathbf{C}_1^{\text{Ellipsoid}} = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -4 \end{bmatrix} \quad (7)$$

### 3.3 手首関節の形状推定

モーションデータから生成された 3,600 個の頂点群から楕円体の形状を推定した。

取得した手の動きの軌跡及びそれらから推定された楕円体を図 3 に示す。楕円体の各軸の半径は (11.0cm, 7.73cm, 6.14cm) で、楕円体の y 軸は屈曲-伸展、z 軸は外転-内転を表す。

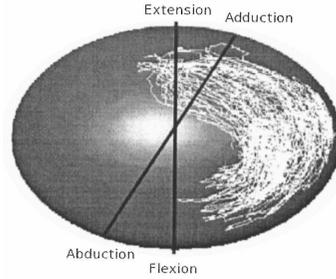


図 3 推定された楕円体と手の軌跡

## 4. 楕円体関数の表現

本稿では、Lie Group を用いて関節とリンクの状態及び動きを表している。関節の状態を Lie Group として表すことで、関節の微分可能性が保証され、様々な計算が可能となる。詳しい内容は Murray ら [9] を参考してほしい。

### 4.1 行列を用いた関節の表現

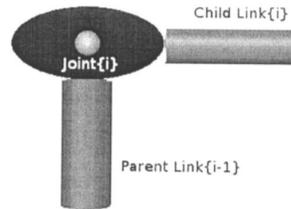


図 4 リンクと関節

図 4 のように、二つのリンクと関節からなるリンク構造を考える。親リンク  $\{i-1\}$  と子リンク  $\{i\}$  の姿勢をそれぞれ  $\mathbf{T}_{i-1}, \mathbf{T}_i \in \text{SE}(3)$ 、関節  $\{i\}$  の状態を  $\mathbf{G}_i \in \text{SE}(3)$  とすると、関節とリンク間の関係は式 (8) で表される。

$$\mathbf{T}_i = \mathbf{T}_{i-1} \mathbf{G}_i \quad (8)$$

ここで、 $\text{SE}(3)$  は剛体の回転と移動を表す  $4 \times 4$  の行列で、 $\mathbf{T} : \mathbb{R}^3 \mapsto \mathbb{R}^3$  の射影であり、式 (9) で表す。

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{p} \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

ここで、 $\mathbf{R} \in \text{SO}(3)$  は  $3 \times 3$  の回転行列で、 $\mathbf{p} \in \mathbb{R}^3$  は平行移動を表すベクトルである。

式 (10) で定義される  $\text{SO}(3)$  上の指数射影  $\exp: \text{so}(3) \rightarrow \text{SO}(3)$  を用いることで、回転軸  $\omega$  から回転行列を求めることができる。

$$\exp(\hat{\omega}\theta) = e^{\hat{\omega}\theta} = \mathbf{I} + \theta\hat{\omega} + \frac{\theta^2}{2!}\hat{\omega}^2 + \dots \quad (10)$$

ここで、 $\hat{\omega}$  は、外積を行列に直した歪対称行列で、式 (11) で定義され、 $\hat{\omega}\mathbf{v} = \omega \times \mathbf{v}$  が成り立つ。

$$\hat{\omega} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_3 & \omega_2 \\ \omega_3 & 0 & -\omega_1 \\ -\omega_2 & \omega_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

式 (12) の Rodrigues の公式を用いると、 $\omega \in \mathbb{R}^3$  から指数射影が求められる。

$$\mathbf{R} = e^{\hat{\omega}} = \mathbf{I} + \frac{\hat{\omega}}{\|\omega\|} \sin \|\omega\| + \frac{\hat{\omega}^2}{\|\omega\|^2} (1 - \cos \|\omega\|) \quad (12)$$

以上の性質から、原点を中心とし、 $z$  軸を回転軸とした蝶番関節 (Hinge Joint) の行列  $\mathbf{G}^{\text{hinge}} \in \text{SE}(3)$  は式 (13) で求められる。 $\mathbf{G}^{\text{hinge}}$  は回転成分のみで、平行移動成分を持たない。

$$\mathbf{G}^{\text{hinge}} = \begin{bmatrix} e^{\hat{\omega}} & \mathbf{0}_{3 \times 1} \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\text{ここで、}\hat{\omega} = [0, 0, 1]^T$$

蝶番関節の回転成分  $e^{\hat{\omega}}$  は、子リンクの方向を表す。

蝶番関節から平行移動成分を追加することで、円関節 (Circle Joint) を定義することができる。円関節の行列  $\mathbf{G}^{\text{circle}}$  を式 (14) で示す。

$$\mathbf{G}^{\text{circle}} = \begin{bmatrix} e^{\hat{\omega}} & \mathbf{p}^{\text{circle}} \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\text{ここで、}\hat{\omega} = [0, 0, 1]^T,$$

$$\mathbf{p}^{\text{circle}} = [r \cos q \quad r \sin q \quad 0]^T$$

ここで  $r$  は円の半径である。

$\mathbf{G}^{\text{circle}}$  で表現される円関節は原点を中心とした半径  $r$  の円上に子リンクが存在し、子リンクの方向は円の法線ベクトルと一致する。

本稿では、円関節の性質から、曲線  $\mathbf{p}(q)$  上に生成される関節は子リンクの軌跡が曲線上に存在し、子リンクの

方向は曲線の法線ベクトルと一致すると定義する。

関節を表す  $\text{SE}(3)$  の行列  $\mathbf{G}$  は式 (8) と式 (9) から、子リンクの方向を決める回転行列  $\mathbf{R} \in \text{SO}(3)$  と子リンクの位置を決める平行移動ベクトル  $\mathbf{p}$  に分解できる。

式 (14) で定義した  $xy$  平面上の円関節を図 5 のように、楕円関節 (Ellipse Joint) に変換する場合を考える。

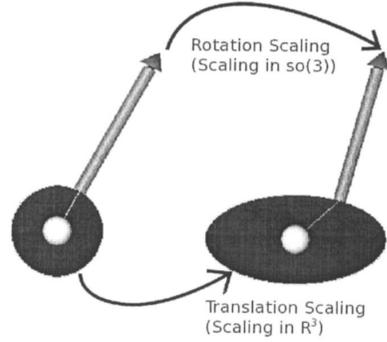


図 5 スケール変換

$x, y, z$  軸にそれぞれ  $a, b, c$  倍の拡大を行うアフィン行列を  $\mathbf{M}$  とすると、平行移動成分はアフィン射影を用いることで、式 (15) のようにスケール変換を行うことができる。

$$\mathbf{p}^{\text{ellipse}} = \mathbf{M}\mathbf{p}^{\text{circle}}$$

$$\text{ここで、}\mathbf{M} = \begin{bmatrix} a & 0 & 0 \\ 0 & b & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

また、式 (16) を用いると、ある図形上の法線ベクトル  $\mathbf{n}$  のスケール変換ができる。

$$\frac{\mathbf{n}^{\text{ellipse}}}{\|\mathbf{n}^{\text{ellipse}}\|} = (\mathbf{M}^{-1})^T \frac{\mathbf{n}^{\text{circle}}}{\|\mathbf{n}^{\text{circle}}\|} \quad (16)$$

$$\mathbf{M} \neq \mathbf{I} \text{ なら } \|\mathbf{n}^{\text{ellipse}}\| \neq 1$$

しかし、回転成分をスケール変換を行うと、 $\mathbf{M} \neq \mathbf{I}$  の場合は  $(\mathbf{M}\mathbf{R})^T(\mathbf{M}\mathbf{R}) = (\mathbf{R}^T\mathbf{M})(\mathbf{M}\mathbf{R}) \neq \mathbf{I}$  であるため、関節の行列表現が  $\text{SE}(3)$  上で表現できない。

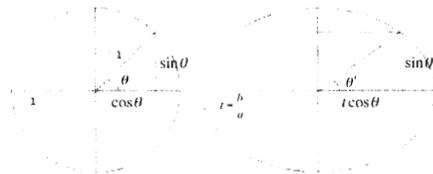


図 6 関節のスケールと角度変化

図 6 は、円が横方向に  $t = \frac{r'}{r}$  倍スケール変換された場

合の変化を表す。縦方向ではスケールが固定されているため、角度  $\theta'$  は式 17 で求められ、楕円の性質から楕円で  $\theta'$  の法線ベクトルは円で  $\theta$  の法線ベクトルと等しい。

$$\begin{aligned}\theta' &= \text{atan} \frac{\sin \theta}{t \cos \theta} \\ &= \text{atan} \frac{b \sin \theta}{a \cos \theta}\end{aligned}\quad (17)$$

したがって、 $z$  軸を回転軸とし、 $xy$  平面上に長径  $ar$ 、短径  $br$  の楕円関節は式 (18) のように、円関節のスケール変換で求められる。

$$\mathbf{G}^{\text{ellipse}} = \begin{bmatrix} e^{\hat{\omega} \text{atan}(\frac{b \sin \theta}{a \cos \theta})} & \mathbf{M} \mathbf{p}^{\text{circle}} \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix}$$

$$\text{ここで、} \omega = [0, 0, 1]^T, \mathbf{M} = \begin{bmatrix} a & 0 & 0 \\ 0 & b & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$\mathbf{p}^{\text{circle}} = [r \sin q, r \cos q, 0]^T$$

ここで、関節の初期姿勢を表す行列  $\mathbf{G}_0 \in \text{SE}(3)$  を定義すると、関節は式 (19) になり、関節の中心と角度の変更ができる。

$$\mathbf{G}(q) = \mathbf{G}_0 \mathbf{G}^{\text{ellipse}}(q) \quad (19)$$

以上で 1 自由度を持つ関節を行列  $\mathbf{G} \in \text{SE}(3)$  で表すことができた。

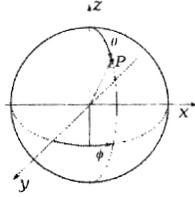


図 7 極座標系

2 自由度を持つ関節を表すために、図 7 の左のように極座標系を表すパラメータベクトル  $\mathbf{q} = \{\theta, \phi\}$  を定義する。極座標系の性質から各パラメータは互いに直交であるため、2 自由度を持つ回転行列は式 (20) で表せる。

$$\begin{aligned}\mathbf{R}(\mathbf{q}) &= \mathbf{R}_\theta(\theta) \mathbf{R}_\phi(\phi) \\ &= e^{\hat{\omega}_1 \theta} e^{\hat{\omega}_2 \phi}\end{aligned}\quad (20)$$

ここで、 $\hat{\omega}_1 = [1, 0, 0]^T$ 、 $\hat{\omega}_2 = [0, 0, 1]^T$  である。

子リンクが親リンクから Y 軸上に存在する場合、回転は  $x$  軸回転後  $z$  軸回転を行うことで子リンクの平行成分が保たれる (図 7 右)。

本稿では、関節の形状を子リンクの経路として見なすため、平行移動がない球関節を無半径球関節、半径  $r$  の

球の境界上を移動する関節を有半球関節と表現する。

式 (20) から、2 自由度を持つ無半径球関節を式 (21) で示す。

$$\mathbf{G}^{\text{sphere}(0)}(\mathbf{q}) = \mathbf{G}_0 \begin{bmatrix} e^{\hat{\omega}_1 \theta} e^{\hat{\omega}_2 \phi} & \mathbf{0}_{3 \times 1} \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \quad (21)$$

蝶番関節の円関節への拡張と同様、極座標系上の球の軌跡は  $\mathbf{p}^{\text{sphere}} = [r \sin \mathbf{q}_1 \cos \mathbf{q}_2, r \sin \mathbf{q}_1 \sin \mathbf{q}_2, r \cos \mathbf{q}_1]^T$  であり、無半径球関節を半径  $r$  を有する有半径球関節に拡張すると式 (22) になる。

$$\mathbf{G}^{\text{sphere}}(\mathbf{q}) = \mathbf{G}_0 \begin{bmatrix} e^{\hat{\omega}_1 \theta} e^{\hat{\omega}_2 \phi} & \mathbf{p}^{\text{sphere}} \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \quad (22)$$

球関節を楕円体関節 (Ellipsoid Joint) に拡張するため、楕円関節と同様にスケール変換を行うと式 (23) になる。

$$\mathbf{G}^{\text{ellipsoid}} = \begin{bmatrix} e^{\hat{\omega}_1 \text{atan}(\frac{b \sin \theta}{a \cos \theta})} e^{\hat{\omega}_2 \text{atan}(\frac{b \sin \phi}{a \cos \phi})} & \mathbf{M} \mathbf{p}^{\text{sphere}} \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix}$$

$$\text{ここで、} \mathbf{M} = \begin{bmatrix} a & 0 & 0 \\ 0 & b & 0 \\ 0 & 0 & c \end{bmatrix} \quad (23)$$

以上の手順で生成した楕円体関節を図 8 に示す。

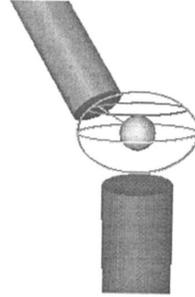


図 8 楕円体関節

## 4.2 ヤコビ行列の計算

前節では、関節の状態を  $\text{SE}(3)$  上の行列として表した。関節を  $\text{SE}(3)$  で表すことで、関節の微分計算が可能となる。本節では、関節の状態からヤコビ行列を計算する手法について簡単に述べる。

リンクと関節の瞬間速度は twist といい、角速度  $\omega$  と線速度  $v$  を用いて式 (24) で表す。

$$\hat{\mathbf{v}} = \mathbf{T}^{-1} \hat{\mathbf{T}} = \begin{bmatrix} \hat{\omega} & v \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{v} = [\omega^T, v^T]^T \quad (24)$$

式 (8) を式 (24) に代入すると、式 (25) になる。

$$\hat{\mathbf{v}}_i = \mathbf{G}_i^{-1} \hat{\mathbf{v}}_{i-1} \mathbf{G}_i + \mathbf{G}_i^{-1} \dot{\mathbf{G}}_i \quad (25)$$

ここで、 $\mathbf{G}_i^{-1} \dot{\mathbf{G}}_i$  を式 (8) から関節  $\{i\}$  に対する twist,  $\hat{\mathbf{u}}_i$ , とし、 $\{i\}$  から見たときの  $\{i-1\}$  の速度、 ${}^i \hat{\mathbf{v}}_{i-1} = \mathbf{G}_i^{-1} \hat{\mathbf{v}}_{i-1} \mathbf{G}_i$  とすると、式 (26) が求まる。

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_i &= (\hat{\mathbf{v}}_i)^\vee = ({}^i \hat{\mathbf{v}}_{i-1} + \hat{\mathbf{u}}_i)^\vee \\ &= {}^i \mathbf{v}_{i-1} + \mathbf{u}_i \end{aligned} \quad (26)$$

ここで、演算子  $\vee$  は、twist の行列表現  $\hat{\mathbf{v}}$  をベクトル表現  $\mathbf{v}$  に戻す。

関節  $\{i\}$  の twist,  $\mathbf{u}_i$ , は式 (24) と連鎖律で式 (27) になり、速度  $\hat{\mathbf{v}}_i$  は各関節の速度  $\dot{\mathbf{q}}_i$  に関する式になる。

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{u}}_i(\mathbf{q}) &= \mathbf{G}_i^{-1}(\mathbf{q}) \dot{\mathbf{G}}_i(\mathbf{q}) \\ &= \mathbf{G}_i^{-1}(\mathbf{q}) \sum_{k=1}^n \left( \frac{\partial \mathbf{G}_i}{\partial \mathbf{q}_k} \dot{\mathbf{q}}_k \right) \end{aligned} \quad (27)$$

ここで、 $n$  は関節の自由度を表す。

上式をヤコビ行列を用いて表すと式 (28) になる。

$$\mathbf{u}_i = \mathbf{S}_i(\mathbf{q}) \dot{\boldsymbol{\theta}} \quad (28)$$

ここでヤコビ行列  $\mathbf{S}_i(\boldsymbol{\theta})$  は式 (29) である。

$$\mathbf{S}_i(\mathbf{q}) = \left[ \left( \mathbf{G}_i^{-1} \frac{\partial \mathbf{G}_i}{\partial \mathbf{q}_1} \right)^\vee \dots \left( \mathbf{G}_i^{-1} \frac{\partial \mathbf{G}_i}{\partial \mathbf{q}_n} \right)^\vee \right]^T \quad (29)$$

## 5. 楕円体関節の評価

第4章で提案した楕円体関節の有効性を示すため、モーションデータの軌跡を楕円体関節のヤコビ行列を用いて逆運動学で再現し、誤差を比較した。モーションデータとしては関節可動域が大きい屈曲・伸展動作を与えた。作業空間を  $(x, y, z) \in \mathbf{R}^3$  の3次元空間で定義し、目標姿勢に屈曲・伸展の動作の xyz 座標を与えた。目標姿勢までの動きは直線状にし、目標姿勢までの最短距離を誤差とした。また、比較対象としてモーションデータから最小二乗法で求めた半径 4.56cm の球とデータ間の最短距離を表した。推定された球関節と楕円体関節は中心が異なり、球関節が楕円体関節より手側に近い。

楕円体関節と球関節で計算されたモーションデータとの最短距離を図9に示す。

取得された屈曲・伸展運動中の手の動きは約  $-70^\circ$  から  $+60^\circ$  までの角度で、球関節と比べて実測データまでの距離が小さいことがわかる。

楕円体関節と球関節ともに中心部分のデータが関節内部になっている。これは手首関節は完全な楕円状ではなく、中心部分にくぼみがある楕円であることを表す。

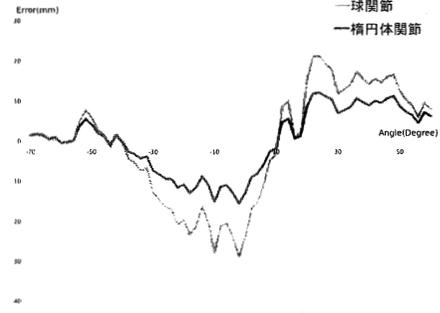


図9 屈曲・伸展運動における誤差

## 6. 結論

本稿では、手首のモーションキャプチャデータから楕円体関節モデルの生成法について提案した。手首の関節は楕円体関節であり、回転と同時に平行移動が生じる。また、その形状は個人差があるため、形状推定が難しい。本稿では、手首のモーションデータを用いて最小二乗法で楕円体関節の形状推定を行った。また、関節を  $SE(3)$  上の行列として表現することで、回転と平行移動を数学的に表し、そのヤコビ行列を用いて逆運動学計算が可能であることを示した。本稿で提案するモデルは、手首の動きをより正確に反映するため、個人の特性を反映した筋骨格モデル生成に役に立つと考えられる。

## 文献

- [1] Donald A. Neumann. *Kinesiology of the musculoskeletal system*. Mosby, 2002.
- [2] Onno A. van Nierop, Aadjan van der Helm, Kees J. Overbeeke, and Tom J. P. Djajadiningrat. A natural human hand model. *Vis. Comput.*, Vol. 24, No. 1, pp. 31–44, 2007.
- [3] W. Tsang, K. Singh, and E. Fiume. Helping hand: An anatomically accurate inverse dynamics solution for unconstrained hand motion. *ACM SIGGRAPH / Eurographics Symposium of Computer Animation (SCA 2005)*, pp. 319–328, 2005.
- [4] A.I. KAPANDJI. *The Physiology of the Joints, Volume 1: Upper Limb*. Churchill Livingstone, 2007.
- [5] S.-H. Lee and D. Terzopoulos. Spline joints for multibody dynamics. *SIGGRAPH (ACM Transactions on Graphics)*, 2008.
- [6] Lillian Y. Chang and Nancy Pollard. Robust estimation of dominant axis of rotation. *Journal of Biomechanics*, Vol. 40, No. 12, pp. 2707–2715, 2007.
- [7] M. Fitzgibbon, A. W. and Pilu and R. B. Fisher. Direct least-squares fitting of ellipses. Vol. 21, No. 5, pp. 476–480, May 1999.
- [8] Qingde Li and John G. Griffiths. Least squares ellipsoid specific fitting. *gmp*, Vol. 00, p. 335, 2004.
- [9] Richard M. Murray, Zexiang LI, and S. Shankar Sastry. *A Mathematical Introduction to Robotic Manipulation*. CRC Press, 1994.