

# 人型ロボットハンド設計に向けた母指 CMC 関節の運動学同定

Kinematics identification of CMC joint of a human thumb  
toward mechanical design of an anthropomorphic robot hand

○学 谷 英紀 (阪大) 正 杉原知道 (阪大)

Hidenori TANI, Osaka University  
Tomomichi SUGIHARA, Osaka University

A method to identify the arrangement of the carpo metacarpal (CMC) joint of a human thumb is proposed with an aim at mechanical design of an anthropomorphic robot hand with as large workspace as human's. The joint is modelled by two serial revolute joints. Not only the internal joint assignment but also the joint movement that accommodate to loci of measured optical markers are guessed step-by-step.

**Key Words:** Kinematics identification, anthropomorphic hand, human thumb, motion measurement

## 1 はじめに

多品種少量生産における複雑製造作業、災害現場等の危険地域での作業、人の生活支援や介護支援など、従来自動化困難であった作業を遂行できるロボットが求められている。上記のような作業は事前に内容を限定できないため、ロボットは汎用性の高いエフェクタを備える必要がある。このようなエフェクタを人の手に似せて作ることは、人の動作技量を直接転用できる点で合理的である。人の手においては、母指が他の四指との対向性を持つという特徴的な構造を有しており、物体の把持や手内操作における安定性の向上に寄与している。

人に近い可動性を備えたロボット母指を設計したい。人の関節は骨の転がりや軟組織の変形、複数の筋の協調等によって動作する。このような複雑な機構を精密に模倣することは、必ずしも得策ではない。人の動作技量を付与するに十分な作業空間を有し、なおかつ設計・製造コストや機構の堅牢性の観点からも合理的な関節構造を決定しなければならない。

本稿では、運動計測に基づいて人の手の CMC 関節（主根中手関節）の構造を推定する方法を提案する。光学式モーションキャプチャシステムを用いて母指中手骨付近の表面に貼り付けた複数マーカーの軌跡を取得し、それに整合する関節軸配置と関節角度を推定する。関節角度に依らない運動学構造と、計測された各姿勢における関節角度を段階的に推定することで、これが可能になる。ロボット機構としての実現しやすさから、二つの回転関節の組み合わせによって構成する。同定の結果、これらの回転軸に適切なオフセットとねじれ角があれば、単一の球面関節よりも高精度にマーカー群の動きを再現することが分かった。

## 2 光学式マーカー群軌跡からの母指中手骨運動推定

まず、人の母指中手骨リンクがどのように運動するかを調べる。人の手の表皮は骨の運動に伴って複雑に動くので、その影響を低減するために、Fig.1 のように中手骨リンク付近に多数の光学式マーカーを取り付けたグローブを着用し、Horn[1]の方法を応用してマーカー群軌跡からリンク位置・姿勢を推定する。グローブは Fig.2 のように配置した両面テープで表皮に密着させる。手甲にもマーカーを複数取り付け、後に説明する方法で手首の回転中心を求め、運動の基準点を推定するのに利用する。

運動計測によって、時間フレーム  $1 \sim N$  における  $n$  個のマーカー群の座標の組  $\{p_{Mi}[k]\}$  ( $i = 1, \dots, n, k = 1, \dots, N$ ) が得られたとする。マーカー群の重心  $p_{MC}[k] = 1/N \sum_{i=1}^n p_{Mi}[k]$  をリンクの位置とする。リンク座標系における各マーカーの位置  ${}^{MC}p_{Mi}$  は全フレームで不変とすると、次が成り立つ。

$$p_{Mi}[k] = p_{MC}[k] + R_{MC}[k] {}^{MC}p_{Mi} \quad (1)$$



Fig.1 計測用グローブ Fig.2 両面テープの配置

ただし、 $R_{MC}[k]$  は  $k$  番目フレームにおけるリンクの姿勢行列である。0 番目フレームにおけるリンクの位置・姿勢は既知であるとする、上式より次が成り立つ。

$$p_{Mi}[k] - p_{MC}[k] = R_{MC}[k] R_{MC}^T[0] (p_{Mi}[0] - p_{MC}[0]) \quad (2)$$

なお、 $R_{MC}[0] = \mathbf{1}$  (単位行列) としても一般性を失わない。 $i = 1, \dots, n$  についてこれらを連立し、最小二乗法を用いれば  $R_{MC}[k]$  が得られる。

## 3 中手骨運動からの CMC 関節軸配置同定

手首回転中心を原点とする手の運動基準点を設ける。母指 CMC 関節を 2 つの回転関節の組で近似し、Fig. 3 のように座標系を定義する。 $p_i$  は  $i$  番目関節中心の位置であり、リンク  $i$  座標系の原点とする。 $R_i$  はリンク  $i$  座標系の姿勢である。また、リンク  $i$  座標系におけるリンク  $j$  の位置・姿勢をそれぞれ  ${}^i p_j$ ,  ${}^i R_j$  で表す。リンク 3 は中手骨リンクであり、 $p_3 = p_{MC}$ ,  $R_3 = R_{MC}$  である。 $i$  番目関節角度を  $\theta_i$ ,  $\theta_i = 0$  であるときの  ${}^i R_j$  を  ${}^i R_j^*$  とそれぞれおく。

前節の方法によって得られる  $\{p_3[k]\}$ ,  $\{R_3[k]\}$  ( $k = 1, \dots, N$ ) から  ${}^0 p_1$ ,  ${}^0 R_1^*$ ,  ${}^1 p_2$ ,  ${}^1 R_2^*$ ,  ${}^2 p_3$ ,  ${}^2 R_3^*$  を同定したい。仮にリンク 3 座標系における 2 番目関節中心の位置  ${}^3 p_2$  が既知であるならば、 ${}^3 p_2[k]$  の推定値  $\tilde{p}_2[k]$  が次のように求まる。

$$\tilde{p}_2[k] = p_3[k] + R_3[k] {}^3 p_2 \quad (3)$$

このとき、理想的には  $\{\tilde{p}_2[k]\}$  ( $k = 1, \dots, N$ ) は Fig. 4 に示すように 1 番目関節軸を中心とし円弧を描く。このことから、Gamage ら [2] の方法を用いれば回転中心  ${}^0 p_1$  および回転軸方向ベクト

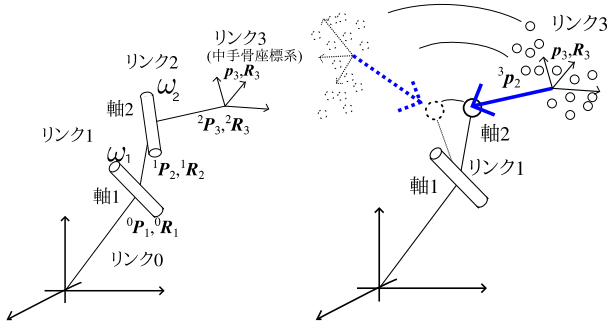


Fig. 3 回転関節により接続された開リンク系 Fig. 4 推定方法の幾何学的解釈

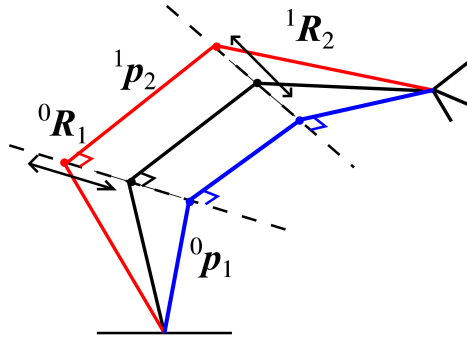


Fig. 5 2 同定される関節中心位置の任意性

ル  ${}^0\hat{z}_1$  を推定できる。Fig. 5 のように、 ${}^0\mathbf{p}_1$  の決め方には任意性があるので、 ${}^0\hat{z}_1^T(\mathbf{p}_2 - \mathbf{p}_1) = 0$  を満たすものを選ぶことにする。 $\theta_1 = 0$  において  ${}^0\hat{z}_1$  に直交する 2 つのベクトル  ${}^0\hat{x}_1, {}^0\hat{y}_1$  を適当に選べば、 ${}^0\mathbf{R}_1^T = [{}^0\hat{x}_1 \ {}^0\hat{y}_1 \ {}^0\hat{z}_1]$  が求まる。なお、前節における手首回転中心位置も同様の方法によって推定する。

$\mathbf{p}_1[k] = {}^0\mathbf{p}_1, \mathbf{R}_1[k] = {}^0\mathbf{R}_1$  であることに注意すれば、 $\theta_1[k]$  は次のように推定できる。

$$\theta_1[k] = \text{atan2}\left({}^0\hat{x}_1^T(\tilde{\mathbf{p}}_2[k] - \mathbf{p}_1), {}^0\hat{y}_1^T(\tilde{\mathbf{p}}_2[k] - \mathbf{p}_1)\right) \quad (4)$$

これより  ${}^0\mathbf{R}_1[k]$  が求まる。次に式に基づいて、最小二乗法により  ${}^1\mathbf{p}_2$  が求まる。

$${}^1\mathbf{p}_2 = {}^0\mathbf{R}_1^T[k](\tilde{\mathbf{p}}_2[k] - {}^0\mathbf{p}_1) \quad (5)$$

推定された  $\theta_1[k], {}^1\mathbf{p}_2$  から、 $\mathbf{p}_2[k]$  が次のように改めて推定される。

$$\mathbf{p}_2[k] = {}^0\mathbf{p}_1 + {}^0\mathbf{R}_1[k]{}^1\mathbf{p}_2 \quad (6)$$

このとき、理想的には  $\mathbf{p}_3[k] - \mathbf{p}_2[k]$  は  $\mathbf{p}_2[k]$  を中心とし円弧を描く。したがって上記と同様の方法により  ${}^1\mathbf{R}_2^*, \theta_2[k], {}^2\mathbf{p}_3$  が求まる。最後に 0 フレームにおいて  ${}^2\mathbf{R}_3^*$  を得る。

$${}^2\mathbf{R}_3^* = \mathbf{R}_3[0]{}^0\mathbf{R}_1^{*T}{}^1\mathbf{R}_2^{*T} \quad (7)$$

${}^3\mathbf{p}_2$  は仮に定めたものであるから、推定されたパラメータを用いて順運動学により得られる中手骨リンクの位置  $\tilde{\mathbf{p}}_3[k]$  および姿勢  $\tilde{\mathbf{R}}_3[k]$  と元の  $\mathbf{p}_3[k], \mathbf{R}_3[k]$  との間には誤差が生じる。そこで、

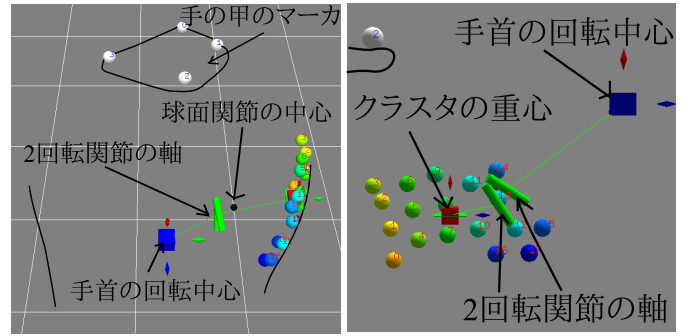


Fig. 6 推定したモデル（背面視点） Fig. 7 推定したモデル（小指側面視点）

次の評価関数を最小化するように  ${}^3\mathbf{p}_2$  を修正する。

$$f({}^3\mathbf{p}_2) = \sum_{k=1}^N \left( l^2 \|\mathbf{R}_3^T[k]\tilde{\mathbf{R}}_3[k] - \mathbf{1}\|^2 + \|\mathbf{p}_3[k] - \tilde{\mathbf{p}}_3[k]\|^2 \right) \quad (8)$$

ただし、 $l$  は次元を合わせるための定数である。

#### 4 関節同定計算と結果

前節の方法において、 ${}^3\mathbf{p}_2$  の各成分を  $-500 \sim 500\text{mm}$  の領域で  $12.5\text{mm}$  ごとに値を選び、Eq. (8) の評価関数値およびその最小値を与える関節配置を求めた。Fig. 6, Fig. 7 は同定された関節配置を可視化したものである。3 章で求めた  $\theta_1[k]$  のような関節角計算では、測定した中手骨の位置、姿勢の一方に対して計算の影響力が偏ってしまうため、位置・姿勢の誤差の 2 乗和誤差の両方を最小化する Sugihara[3] の方法の用いて逆運動学を行った。その結果、マーカごとの誤差平均値は  $2.15\text{mm}$  であった。

比較のために、CMC 関節を球面関節で近似し Gamege ら [2] の方法を用いて同定した [4]。このときのマーカごとの誤差平均値は  $2.45\text{mm}$  であった。3 自由度を有する球面関節よりも、回転軸間にオフセットとねじれ角のある 2 自由度関節の方が、高精度にマーカ群の動きを再現できたとと言える。

#### 5 おわりに

光学式モーションキャプチャを用いて、中手骨リンクの運動ならびにそれを与える母指 CMC 関節モデルを同定する方法を示した。

運動中の表皮の伸縮は大きく、計測されたマーカ群は必ずしも推定されたリンク座標系において定位置にあるとは言えないものであった。この影響をより低減することが、今後の課題である。

#### 参考文献

- [1] B.K.P Horn. Closed-form solution of absolute orientation using unit quaternions. *Journal of the Optical Society of America*, Vol. 4, No. 4, pp. 629–6, 1986.
- [2] S.S.H.U. Gamege and J. Lasenby. New least squares solutions for estimating the average centre of rotation and the axis of rotation. Vol. 35, pp. 87–93, 2002.
- [3] T. Sugihara. Solvability-Unconcerned Inverse Kinematics by the Levenberg-Marquardt Method. *IEEE Transaction on Robotics*, Vol. 27, No. 5, pp. 984–991, 2011.
- [4] 遠藤 維, 多田 充徳, 持丸 正明. モーションキャプチャを用いた個人別デジタルハンドモデルの構築. *精密工学会誌*, Vol. 79, No. 9, pp. 860–867, 2013.