

要 旨

人間の手は製品の把持や操作等, 巧妙で精密な動作を行う。その為, 手の構造・動作を高精度に再現するデジタルハンドモデルは製品の仮想エルゴノミック評価において大変有用である。しかし, 母指は他の4指とは異なる関節構造を有しており, 従来のデジタルハンドで十分な精度でモデル化されていなかった。そこで本報告では, 人間の母指の運動をデジタルハンドで再現可能な母指関節運動モデルを新たに提案する。

1. はじめに

製品の持ちやすさや使いやすさをシミュレーションに基づき評価する仮想エルゴノミック評価技術が近年開発されている[1]。このエルゴノミック評価を行うにあたっては, まず, デジタルハンドモデルによる製品の妥当な把持姿勢を作る必要がある。その為, 人間の手の運動を精度良く再現可能な関節運動モデルがデジタルハンドに必要となる。しかし, 我々が利用してきた従来のデジタルハンド[1]では, 特に, 母指関節運動モデルの関節回転軸配置の十分な精度を持っておらず, 他の4指との対向を実現する運動を十分に再現する事が出来なかった。

そこで本報告では, まず, 既存のデジタルハンドが有する関節の構造および運動のモデル化とその問題点を述べ, その後, 複雑な母指の運動を十分に表現可能であり, 直観的制御が容易な改良型母指関節運動モデルを新たに提案する。続いて, この改良型関節運動モデルを用いて母指の開閉動作をデジタルハンドで実現する。最後に, 既存の関節運動モデルと提案する改良型関節運動モデルの妥当性を実験者による把持姿勢と比較・検証した結果を報告する。

2. デジタルハンド[1]

デジタルハンドは, 図1のようなリンク構造モデルおよび表皮メッシュモデルから成る。指の曲げに基づくリンク構造モデルの姿勢変化に対応し, 表皮メッシュ変形アルゴリズムによって, 指の曲げ後の表皮メッシュが生成される。

このリンク構造モデルが持つ関節運動モデルは図2のように表わされる。すなわち, リンク L_i の指根元側の関節 J_i に固定される座標系 \sum_i の位置姿勢は以下の同次変換行列 wT_i で表現される。

$${}^wT_i = {}^wT_1 T_2 \dots {}^{i-1}T_i \quad (1)$$

$${}^{i-1}T_i = \text{Trans}(t_0^i) \text{RPY}(r_0^i) \text{RPY}(r^i) \quad (2)$$

ここで, t_0^i と r_0^i は初期状態における座標系 \sum_{i-1} から座標系 \sum_i への三次元並進ベクトルと Roll-Pitch-Yaw 角ベクトルであり, r^i は指の曲げを表す \sum_i 座標系における Roll-Pitch-Yaw 角ベクトルである。各関節に固定される座標系の各軸は, 手骨のMRI測定から再構築された骨形状モデルの Bounding Box の各辺方向に一致し, 屈伸, 転回, 回旋運動が対応する座標軸回りの回転で表現可能となっている[2]。

既存のデジタルハンドモデルの母指の関節運動モデルでは, 図1のように母指は手根中手関節(CMC)に3自由度の屈伸・転回・回旋運動が, 中手指節間関節(MP)に2自由度の屈伸・回旋運動が, 指節間関節(IP)に1自由度の屈伸運動がそれぞれ定義されている。他の4指はMP関節に屈伸・転回運動が, 近位指節間関節(PIP)と遠位指節間関節(DIP)に屈伸運動がそれぞれ定義されている。デジタルハンド上でこれらの各運動は, 互いに独立に定義される関節運動モデルとなっている。

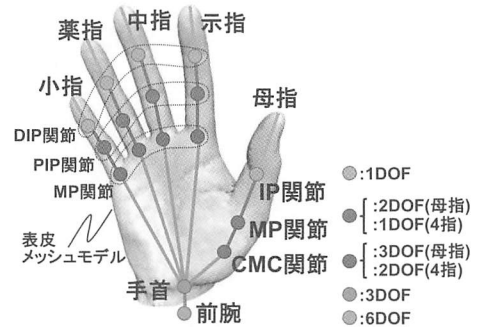


図1 デジタルハンドのリンク構造モデルと表皮メッシュモデル

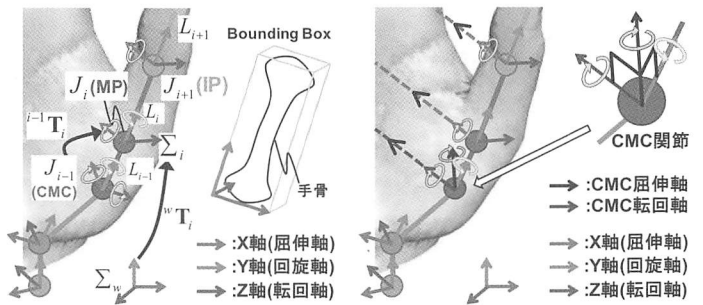
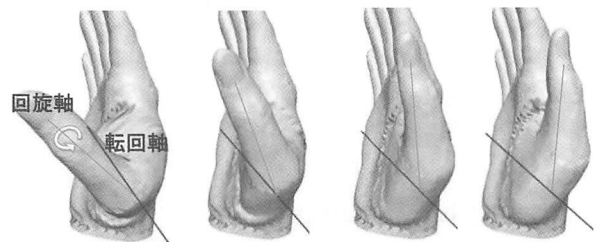
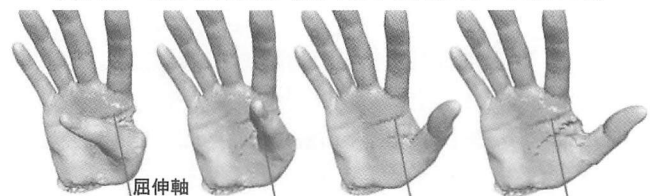


図2 既存母指関節運動モデル

図3 提案母指関節運動モデル



(a)前方・後方移動運動 (転回軸+回旋軸回りの回転運動)



(b)屈伸運動

図4 提案母指関節運動モデルに基づく母指 CMC 関節の運動

3. 母指の関節構造の改良と運動のモデル化

2節で述べた既存の関節運動モデルは母指以外の4指の運動については十分な精度で表現可能である。しかし, 特に母指 CMC 関節の運動については以下の2点が問題となる。

- ① CMC 関節の基本的な運動(図4)は, 既存のモデルで定義されている様な, 手骨形状の Bounding Box の各辺で定義される回転軸を持つ回転運動とは方向が著しく異なる。
- ② 実際の母指の回旋運動は母指の前方・後方移動運動に付随して生じる為, 各運動が独立に定義されている既存の関節運動モデルでは表現が困難である。

そこで、このような母指の運動表現が可能で、かつ、解剖学的にも妥当な関節構造と運動のモデルを新たに提案し、これを我々のデジタルハンド内に実装した。このモデルは Kapandji による解剖学的母指関節の構造および運動[3]を参考にした。

図 3 に提案する改良型関節運動モデルを示す。このモデルでは母指 CMC 関節の解剖学的知見に従い、独立した関節の運動として前方・後方移動の運動(図 4(a))を実現する回転軸(転回軸)と、屈伸運動(図 4(b))を実現する回転軸(屈伸軸)の 2 関節回転軸を有する様にモデル化した。ここで、改良型 CMC 関節運動モデルの屈伸軸は、従来モデルの母指 MP 関節の屈伸軸と母指 IP 関節の屈伸軸と平行とし、また、改良型 CMC 関節運動モデルの転回軸は改良型 CMC 関節運動モデルの屈伸軸と直交する。

さらにこのモデルでは CMC 関節の転回運動に伴う回旋運動を生成できる。この回旋運動を実現する関節回転軸(回旋軸)は母子中手骨長軸方向に定義される。一方、母指の MP 関節と IP 関節はそれぞれ、既存の関節運動モデルと同様に骨形状モデルの Bounding Box から定義される屈伸軸を採用している。

以上の関節構造を有する新たな母指 CMC 関節 ($i = 2$) の運動は以下の式(3)で表現される。

$${}^wT_2 = \text{Trans}(\mathbf{t}_0^2) \text{RPY}(\mathbf{r}_0^2) \text{Rot}(\mathbf{AR}, \theta_{AR}) \text{Rot}(\mathbf{PS}, f(\theta_{AR})) \text{Rot}(\mathbf{FE}, \theta_{FE}) \quad (3)$$

ここで、 \mathbf{AR} 、 \mathbf{PS} 、 \mathbf{FE} はそれぞれ転回軸、回旋軸、屈伸軸の単位方向ベクトルを表し、 θ_{AR} 、 θ_{FE} は転回軸、屈伸軸回りの回転角を表す。 $f(\theta_{AR})$ は θ_{AR} と回旋軸回りの回転角との運動性を表す関数であり、母指の前方・後方移動の際、転回軸回りの回転に伴い生じる回旋運動により母指腹側が手のひら中心位置を向く運動が観察された為、 $f(\theta_{AR}) = \theta_{AR}/4$ と設定した。

4. Power Grasp における母指自動開閉アルゴリズム

2 節の既存母指関節運動モデルと 3 節の新たに提案する母指関節運動モデルの妥当性を検証する為、各運動モデルを組み込んだデジタルハンドによる Power Grasp の実験を行った。その理由は、手のひら全体と指の腹の大部分を接触させる Power Grasp を適切に実現する為には母指関節の運動が適切にモデル化されている必要があり、かつ、Power Grasp の為の母指開閉アルゴリズムが適切に設計されている必要がある為である。

Power Grasp 姿勢生成アルゴリズムは以下の手順で設計した。

① 実験者による Power Grasp の把持動作の観察から、物体把持時に以下の動作がなされると仮定した(図 5)。

- 対象を包み込むような把持姿勢を取る為に、母指を前方へ移動させた姿勢をとる。
- CMC, MP, IP 関節の順に屈曲を行い、母指先端と中指、薬指、小指の重心点との距離を最小化する姿勢をとる。

② これらの仮定から、次のアルゴリズムに従いデジタルハンドの母指関節を回転させる事で、Power Grasp における母指の運動を近似的に再現可能にするソフトウェアを実装した。なお、各関節回転角範囲を離散的にサンプルし、以下の 1) ~3) の条件を満たし、かつ、デジタルハンドと把持対象モデルが干渉しない母指の姿勢が選択される。

- 母指 MP 関節位置と中指、薬指、小指の 3 先端位置の重心との距離が最小となる、母指 CMC 関節の姿勢を選択する。

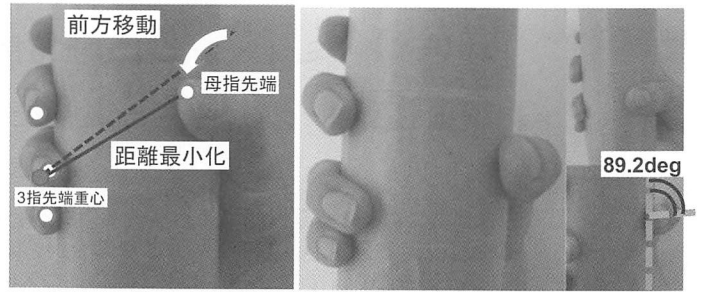


図 5 Power Grasp における母指運動

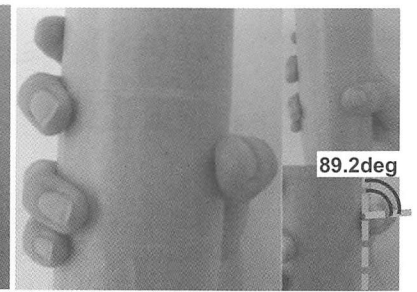
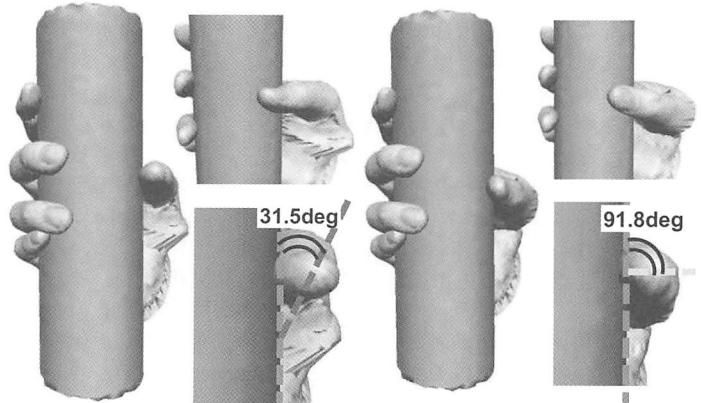


図 7 実験者による円筒(直径 60mm)把持姿勢



(a) 既存母指関節運動モデル (b) 提案母指関節運動モデル

図 6 円筒モデル(直径 60mm)把持姿勢

- 母指 IP 関節位置と中指、薬指、小指の 3IP 関節位置の重心との距離が最小となる、母指 MP 関節の姿勢を選択する。
- 母指先端位置と中指、薬指、小指の 3 先端位置の重心との距離が最小となる母子 IP 関節の姿勢を選択する。

5. 結果

2 節の既存の関節運動モデルと、3 節の提案関節運動モデルを組み込んだ 2 種類のデジタルハンドを用いて、4 節の Power Grasp 姿勢生成アルゴリズムに基づき、直径が 60mm の円筒モデルに対し把持姿勢生成を行った。既存の関節運動モデルを用いて生成された把持姿勢は、図 6(a) の様に母指の側面が円筒表面に接触する明らかに不適切な姿勢である。一方、提案する改良型関節運動モデルを用いて生成された把持姿勢は、図 6(b) の様に母指の腹が円筒表面に接触する姿勢であり、図 7 の様な実験者の把持姿勢に近い妥当な把持姿勢である事が確認された。また、円筒軸に対する母指の爪表面法線の角度が、実験者による円筒把持姿勢では 89.2deg であるのに対し、既存の関節運動モデルでは 31.5deg、提案関節運動モデルでは 91.2deg であった。従って、提案関節運動モデルでは人間の母指運動の特徴である前方移動に伴う回旋運動がある程度再現されている事が確認された。以上の事から、提案する母指関節運動モデルは Power Grasp 時の人間の母指の運動をデジタルハンドで適切に再現するモデルとして妥当であると考えられる。

参考文献

- 遠藤, 他:「デジタルハンドとプロダクトモデルとの統合によるエルゴノミック評価システムの開発(第 1 報)」, 精密工学会誌, 74(2), pp 182-187, (2008).
- N.Miyata et al.: "Finger Joint Kinematics from MR Images" Proc. of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp2750-2755, (2005)
- カパンディ:「関節の生理学 I 上肢」, 医歯薬出版(2005)