

人の運動特性を再現するロボットハンド機構の試作と評価

Development and Evaluation of Robot Hand Mechanism That Reproduces Human Motion Characteristics

学 谷 英紀 (阪大) 学 野澤 峻 (阪大) ○正 杉原知道 (阪大)

Hidenori TANI, Osaka University
Ryo NOZAWA, Osaka University
Tomomichi SUGIHARA, Osaka University

For robot hand design to reproduce the work space of the fingertip of a person, we proposed a method to measure the movement of the fingertip using optical motion capture and estimate the joint that reproduces it. For this time, trial the robot hand based on this, and make sure that the design is possible. we examine the characteristics of the joint structure of the model from the motion of the fingertip of the estimated model. As a result, compared to other robot hands, a robot hand with a large overlap of finger work spaces was designed. This is because the joints of the fingers are in a twisted relation to each other, the workspace of the fingertip has become a distribution towards the inside.

Key Words: Kinematics identification, anthropomorphic hand, motion measurement

1 はじめに

多品種少量生産における一貫製造作業や人の生活支援作業、介護支援作業等、従来は人しか行えなかった作業を自動化するためのロボットが求められている。これらの作業は不定形の道具や物体の操作を伴うため、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、人の作業技量を直接転用できる点で合理的である。

製作や保守の観点から、人の筋骨格系や軟組織の構造を精密に模倣することは得策ではなく、回転関節を組み合わせて複合的な指運動を再現することが望ましい。筆者ら [1] は、モーションキャプチャシステムで計測した人の手の指先運動を再現する関節配置を推定する方法を提案した。運動に伴う皮膚変形の影響が比較的小さい爪と手の甲に光学マーカを取り付け、その軌跡に整合する関節角度と関節配置を最適化によって同時に推定することができた。ただし、局所解の存在により関節の逆折れが発生することがあった。

本稿では、まず上記の問題に対し、おおよその回転中心を与えるためのマーカを各関節付近に追加し参照することで、不自然な関節角度および関節配置が得られることを抑制する方法を提案する。次に、同方法を用いて推定した関節配置が手の運動性や作業性の向上にどのように寄与するかを考察する。複数の指先が同時に到達できる領域が広く指間協調しやすい構造になっていることを、幾つかの既存のロボットハンドと比較して示す。最後に、推定された関節配置に基づいて設計・製作したロボットハンドの骨格機構を示す。

2 指先運動を再現する関節配置最適化

運動計測方法においては次の2つの計測を行う。1つ目の計測は Fig. 1 のようにマーカを配置し指ごとに運動を計測する。その際、白で囲んだマーカは常に取り付けたままにし、赤のマーカは測定する指ごとに置き替える。2つ目の計測は1つ目の計測で用いた白で囲んだマーカをそのまま用い、全ての指の運動を同時に計測する。1つ目の計測で1本ごとの指モデルの推定をし、2つ目の計測でそれらを統合する。

指モデルも推定に際して、多数の最適化パラメータ、局所最適化に収束する可能性、皮膚の動揺による誤差の3つの問題を解決する必要がある。指先に対して手の甲の運動を説明する指モデルを最適化するため、途中にあるリンクの位置関係はマーカ位置を直接使わずにリンク位置を推定する。リンク系の相対関係を指先と手の甲の相対関係のみから推定した場合、時系列的に変化する関節角を推定する必要がある。少なくとも(フレーム)×(関節角の個数)個が最適化



Fig.1 マーカの配置

Fig.2 推定した手モデル

パラメータである。また、途中のリンクの位置が不明なため、人の指とは異なる関節配置が推定される可能性がある。これに加えて、手の甲は指運動に応じて動くため、皮膚の影響を低減する最適化手法が必要である。

指モデルのパラメータには毎時刻ごとに変化する関節角と変化しない関節構造がある。求めたいパラメータである関節構造は数十個であるが関節角のパラメータ数は膨大である。このため、内側の最適化で関節角を推定し、それを用いて外側の最適化で関節構造のパラメータを推定する。

その際、指の関節付近にもマーカを取り付け、マーカと関節の距離を評価関数に組み込むことで局所解への収束を抑える。内側の関節角の推定では回転関節の逆折れ現象発生する問題、外側の関節構造の推定では指内部に収まらない局所解が求まる問題は途中のリンクの位置情報を全く使わないために起こる。このため、1フレームにおける評価関数を手の甲の位置・姿勢誤差 p_m, R_m 、関節マーカ

の誤差関数 f_a を使って下記のように定義する.

$$f(t, \mathbf{x}) = \mathbf{p}_m(\mathbf{q}(t), \mathbf{x})^T \mathbf{W}_p \mathbf{p}_m(\mathbf{q}(t), \mathbf{x}) + \mathbf{a}(\mathbf{R}_m(\mathbf{q}(t), \mathbf{x}))^T \mathbf{W}_a \mathbf{a}(\mathbf{R}_m(\mathbf{q}(t), \mathbf{x})) + w_m \sum_a^A f_a(t) \quad (1)$$

ただし、関節角 \mathbf{q} 、 $\mathbf{a}()$ は回転行列の等価軸変換、 w_m は重み、 A は回転関節の個数、 $\mathbf{W}_p = \text{diag}\{w_{p,i}\}(w_{p,i} > 0 \text{ for } \forall i = 1, \dots, 3)$ 、 $\mathbf{W}_a = \text{diag}\{w_{a,i}\}(w_{a,i} > 0 \text{ for } \forall i = 1, \dots, 3)$ とする.

関節角と関節構造の推定ではそれぞれ関節マーカに対する扱いが異なるため、 w_m, f_a が異なる評価関数を用いる. 関節角を最適化する場合の重み、誤差関数を $w_{m,IK}, f_{a,IK}$ 、関節構造を最適化する場合の重み、誤差関数を $w_{m,pm}, f_{a,pm}$ と定める. $\mathbf{q}(t)$ は Eq. (1) を最小化する逆運動学計算 [2] により計算する. a 番目の回転軸と対応する 2 個のマーカの中点の距離を $r_{a,mid}(t)$ とし、次のように $f_{a,IK}$ を定める. また、 $w_{IK} = 0.0016$ する.

$$f_{a,IK}(t) = 2r_{a,mid}(t)^2 \quad (2)$$

また、全フレームの $f(t, \mathbf{x})$ の和は次のようになる.

$$F(\mathbf{x}) = \sum_t^N f(t, \mathbf{x}) \quad (3)$$

上記の $F(\mathbf{x})$ を最小化するパラメータ \mathbf{x} を Nelder-Mead 法により計算し、モデルを得る. 2 自由度以上の関節の場合は関節角の最適化と同じく次のように誤差を定める.

$$f_a(t) = 2r_{a,mid}(t)^2 \quad (4)$$

1 自由度の関節の場合は a 番目の回転軸とそれに対応するマーカ k の距離を $r_{a,k}(t)$ とし、次式で誤差を定義する.

$$f_{a,pm}(t) = r_{a,1}(t)^2 + r_{a,2}(t)^2 \quad (5)$$

$w_{m,pm}$ の値が小さい時、目安として決めた関節軸端マーカの影響が大きくなる. 逆に $w_{m,pm}$ の値が大きい時、指先マーカの誤差の影響が小さくなるように最適化され、局所解に収束する可能性が高まる. そこで反復計算の初期段階では $w_{m,pm}$ の値を大きく設定し、徐々に小さくしていく.

手の甲の誤差を小さくするためには評価関数の重み \mathbf{W}_p 、 \mathbf{W}_a の設定が重要である. 関節マーカや手の甲においては、皮膚の動揺が発生する. 手表面の内、動揺の影響を受けにくい各指の爪を基準座標系として手の甲の位置を最適化することで、動揺の誤差の影響を低減する. 動揺の大きさは位置や方向によってことなるため、 \mathbf{W}_p 、 \mathbf{W}_a を動揺の大きさに合わせて設定する.

上記の工夫の結果、Fig. 2 のような関節構造が推定される. 推定した手モデルは Fig. 2 のようになる. また、このときの誤差は Fig. 1 のようになる. 各指モデルが推定した手の甲の位置とそれらの平均の誤差より、実測された手の甲位置と上記の平均位置の誤差の方が大きい. 推定した指モデルが皮膚の動揺よりも高い精度で推定されたことを意味し、推定結果の誤差は小さいと言える.

3 評価

母指と他の指の協調動作により様々な把持が実現され、母指の指先で精密な操作を行い、母指球は握力把持に寄与している. このため、人型ロボットハンドの器用さを評価する指標として、母指対向性と可操作度、母指球付近の他の指のワークスペースの広さを用いる.

これらの指標は数値や分布そのものには絶対的な意味は存在せず、推定したモデルを正しく評価することは難しい. 複数の人型ロボットハンドのモデルを用意し、推定したモデルと大きさを統一した上で比較する. 人の器用さを再現するために設計されたロボットハンドとして dexmart hand[3], shadow hand[4], gifu hand 3[5] の 3 種類を用いる.

Table 1 指モデルの手の甲平均位置に対する誤差分散

	位置		姿勢	
	分散 [mm]	最大 [mm]	分散 [mrad]	最大 [mrad]
母指	0.36	1.16	17.66	59.14
示指	0.58	2.14	28.13	111.17
中指	0.48	1.86	21.01	74.27
薬指	0.47	1.79	25.30	72.96
小指	0.57	2.48	26.65	126.33
実測値	1.34	3.19	52.70	140.39

Table 2 ロボットハンドにおける母指対向性

	示指	中指	薬指	小指
推定モデル	267	280	344	414
dexmart hand	89	126	215	67
gifu hand 3	218	106	58	114
shadow hand	217	138	20	110

3.1 正規化

ロボットハンドの関節の相対関係を変えず、評価が平等になるよう正規化する. Fig. 6 のように示指 ~ 小指が座標軸に並行になるようにロボットハンドを配置する. その上で、示指と中指の距離をロボットハンド同士で同じになるように、水平方向に等倍する. 次に、母指と示指の垂直距離が同じになるように母指の位置を調節する. それぞれの指の各リンクの長さの総和が一定になるように正規化を行う.

3.2 母指対向性の比較

母指と他の指のワークスペースの評価方法として母指対向性 [5] があ. これは他の指との重なる体積であり、指の重なり具合を示す指標である.

$$J = \frac{1}{d^3} \sum_{i=1}^k w_i v_i \quad (6)$$

ただし、 d は母指の指の長さ、 w_i は指の重要性応じた重み、 k は母指以外の指の本数、 i 番目の指の v_i は母指とワークスペースが重なった体積である. 推定した指の関節構造が複雑であり体積を計算することが難しい. 今回は正規化により指の長さを統一し、指先が到達できた点の個数を数える. 手の甲に水平・垂直方向に 5mm 等間隔に点を取り、それぞれの指に対して数え上げた結果は Table 2 のようになる. 推定モデルの結果が極めて高い値になっており、他のロボットハンドより人の手の特徴である母指対向性をより再現していることを示している. また、人の手の操りでは母指と母指以外の 1 本のみで対象物を操作することは少ないことから、母指の指先が到達できる点に対して到達できた母指以外の指の本数を表示し、ワークスペースの詳細を確認した. 結果は Fig. 7 のようになる. 最適化したハンドに対して他のハンドは 3 本以上の指が同時に到達できる点が存在しないことがわかった. 複雑な作業を行う上では指先の作業が重要であり、同時に到達できる点が多い最適化したハンドはより安定した操作が行えるとと言える.

3.3 指先のワークスペースの比較

器用さの指標として可操作度を用いる. 結果は Fig. 8~Fig. 11 のようになる. 指が到達可能な点に色の濃さで可操作度を示した. 最適化したハンドが特に色の濃い領域が多く、複雑な操作を行えると

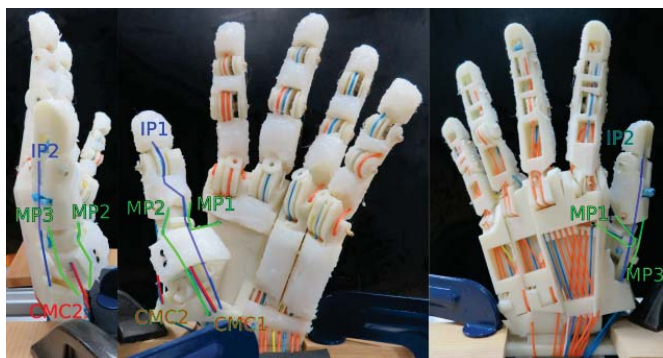


Fig.3 設計したロボットハンド

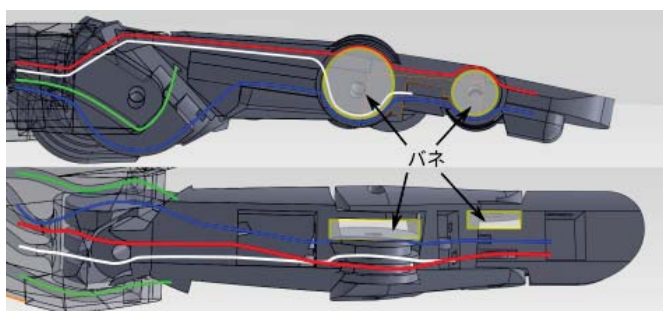


Fig.4 示指のワイヤ経路

言える。他のハンドは指の関節が平行、または直行しているため、指先のワークスペースが長細くなっており、最適化したハンドより指先のワークスペースが限られている。

4 最適化による手モデルを用いたロボットハンド

推定結果を用いて設計したロボットハンドは Fig. 3 のように 3D プリンタを用いて作成した。母指は 5 自由度あり 7 本のワイヤで駆動する。ワイヤ経路は Fig. 3 の内、線でなぞった部分である。示指・中指は 4 自由度を 5 本のワイヤを用い、小指・薬指は 5 自由度で 6 本のワイヤを用いて駆動する。示指～小指のワイヤ経路はほぼ同じであるため、示指の経路を Fig. 4 に示す。対象物の把持時に必要に応じて馴染み性を発揮できるようにするため、DIP、PIP 関節にねじりバネを取りつけた。MP 関節は伸展に対して 2 本のワイヤが通る必要があったが、回転軸上に 2 本を通すことが空間的に難しいことから、軸になるべく近づける設計を行った。

推定された回転関節の位置関係は Fig. 5 の黄色の線のようになった。指先から見た指先側の関節はほぼ平行であるのに対し、指が根本に行くに連れて内側にねじれが大きくなっている。このような大きなねじれは比較した 3 つのハンドには無いため、指先のワークスペースの違いや母指対向性を人に近づけるためには、徐々に内側にねじれるような関節配置が重要である。

5 おわりに

モーションキャプチャを用いて人の手の指先の運動の計測を行った。最適化計算により指先の運動を再現する関節構造を決定し、実

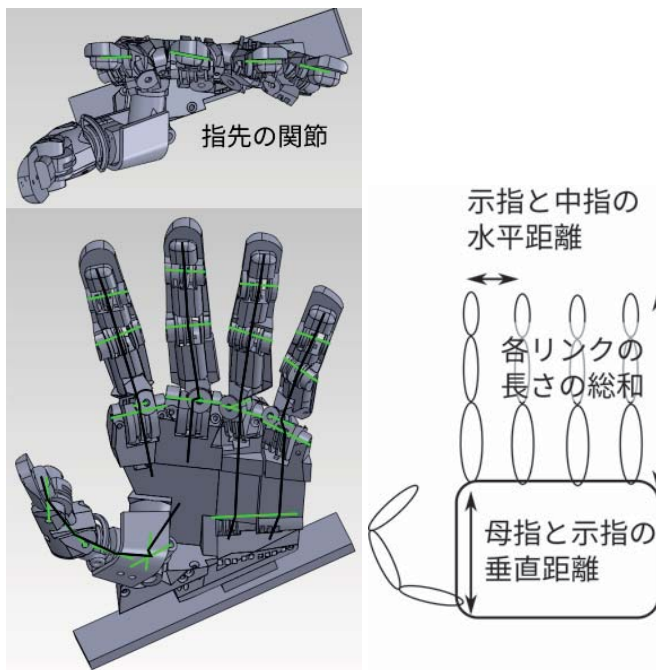


Fig.5 ハンドの関節配置

Fig.6 モデルの正規化方法

参考文献

- [1] 谷英紀, 杉原知道. 運動計測による全指爪位置を基準として人の手の関節配置同定. 第 36 回 日本ロボット学会学術講演会, pp. 際にこれと同じ関節配置のロボットハンドを設計した. このロボットハンドは他のロボットハンドに対して関節の位置関係がねじれて配置されており, 指同士の指先のワークスペースの重なりが大きいことが特徴である. また, 指先のワークスペースが広いことから, 指先で複雑な操作を行うことができると言える.
1B1-01, 中部大学春日井キャンパス, Sep 2018.
- [2] T.Sugihara. Solvability-unconcerned inverse kinematics by the levenberg x2013;marquardt method. *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 27, No. 5, pp. 984-991, Oct 2011.
- [3] Gianluca Palli, Claudio Melchiorri, Gabriele Vassura, Umberto Scarcia, Lorenzo Moriello, Giovanni Berselli, Alberto Cavallo, Giuseppe De Maria, Ciro Natale, Salvatore Pirozzi, Chris May, Fanny Ficuciello, and Bruno Siciliano. The dexmart hand: Mechatronic design and experimental evaluation of synergy-based control for human-like grasping. *I. J. Robotics Res.*, Vol. 33, pp. 799-824, 2014.
- [4] Shadow Robot Company. <https://www.shadowrobot.com/>.
- [5] T Mouri, Haruhisa Kawasaki, K Yoshikawa, J Takai, and S Ito. Anthropomorphic robot hand "gifu hand iii". *International Congress and Convention Association*, Vol. 2002, pp. 1288-1293, 10 2002.

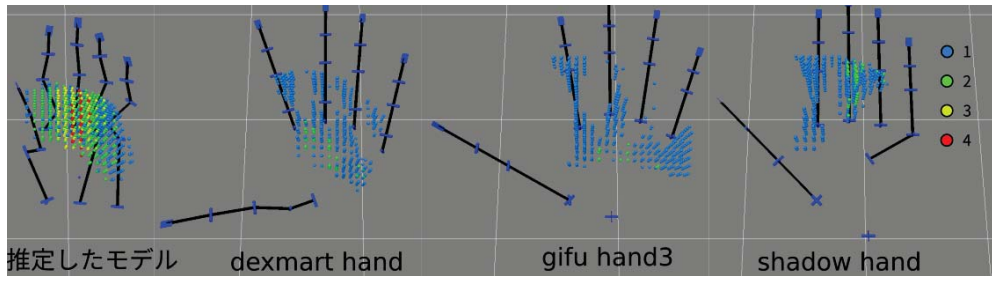


Fig.7 母指のワークスペースに到達可能化指の本数

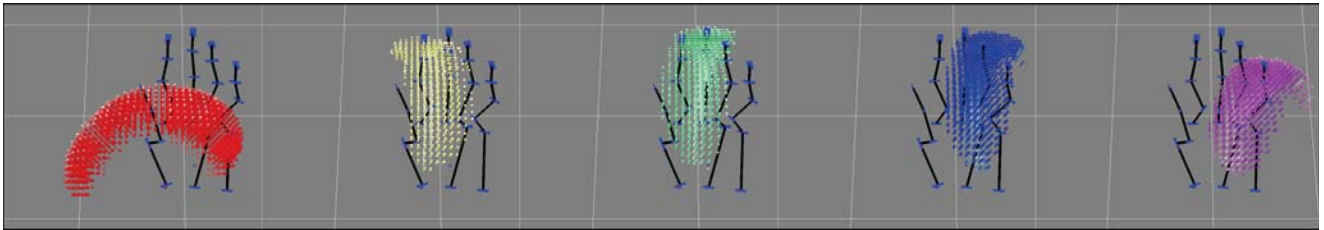


Fig.8 最適化したモデルの母指対向性

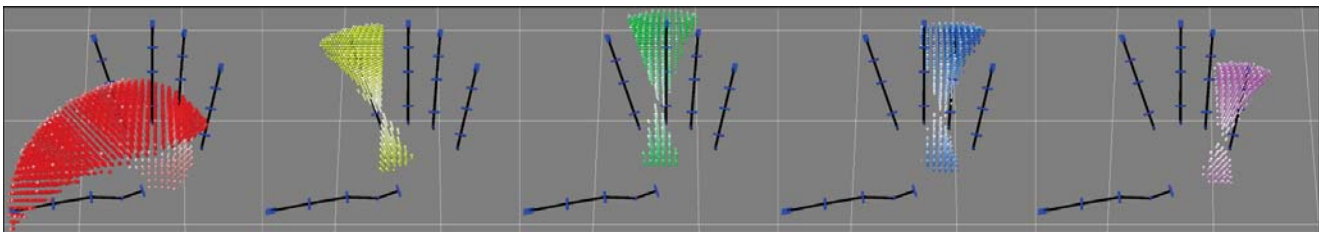


Fig.9 dexmart hand の母指対向性

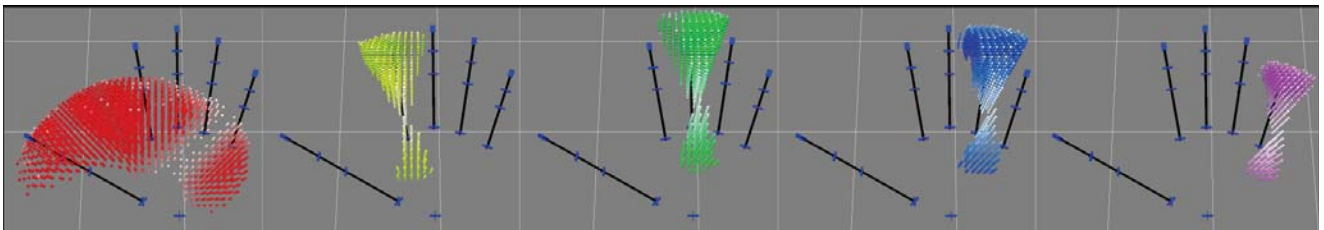


Fig.10 gifu hand3 の母指対向性

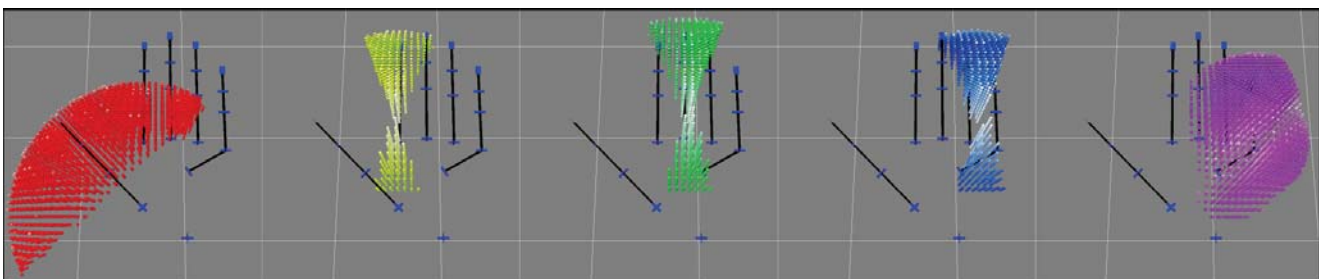


Fig.11 shadow hand の母指対向性