

筋骨格モデルを用いた手の姿勢推定手法の検討 Hand Pose Estimation Method Based on Musculoskeletal Model

笠松 英[†] 梅澤 猛[†] 大澤 範高[†]

Akira Kasamatsu Takeshi Umezawa Noritaka Osawa

1. はじめに

手の動作を用いたユーザインタフェースが注目されており、簡単なハンドジェスチャを用いた家電の操作や、手指の動作を用いた非接触での PC の操作が実現されている。しかし、まだ利用範囲が限られており、指の屈曲によって指が隠れてセンサから見えなくなるオクルージョンが原因であると考えられる。オクルージョンを含む推定には、手の見えから特徴量を求めて機械学習による分類を行う手法が高い精度で実現されており、Keskin らの手法[1]では北米で用いられる手話である American Sign Language の数字を表す 10 種の形状を 99.9%の精度で分類している。しかし、この結果は予め決められた限られた姿勢を対象とした分類のものであり、様々な姿勢を対象とする場合は隠れた指の姿勢が同じとは限らず、有効に働かないことが予想される。以上のことから、オクルージョンを含む手指の姿勢推定を実現することで、利用範囲がより広がると考えられる。

そこで、本研究では指のオクルージョンが発生した時の手指の姿勢推定の実現を目標とし、特にオクルージョンが生じやすいと考えられる、手の甲がセンサへ向いた場合を対象とする。オクルージョンを含む推定に、関節運動からの筋活動の推定と筋活動からの関節運動の決定が可能な筋骨格モデルが利用できると考え、その有効性について検証を行った。

2. 筋骨格モデル

筋骨格モデルとは人間の骨格と筋肉を数学的にモデル化したものであり、本研究では広く用いられている Hill タイプ[2]を用いる。Hill タイプのモデルでは、各筋肉は腱の他、神経信号により自発的に収縮する収縮要素、外力によって弾性効果を発揮する並列弾性要素の 3 つの要素で構成される。それぞれの要素が発揮する張力で各筋肉の発揮張力が決まる。個々の筋肉の発揮張力が求まると、関節でのトルクが決定して姿勢が一意に決まる。収縮要素の張力は式(1)で表され、並列弾性要素の張力は式(2)で表される。腱の伸縮については他の 2 つの要素に比べて非常に小さいため無視する。式(1)および式(2)は文献[3]から引用した。 l_{rcei} は休息肢位での筋肉*i*の長さ、 F_{maxi} は筋肉*i*の最大発揮張力である。どちらも定数であり、Brand ら[4]が検体を用いて計測した筋肉のデータを用いた。 a_i は筋肉の活動度合を表す筋活動度で 0 から 1 の値をとる。 l_i は筋肉*i*の長さであり、モーメントアームと関節角度によって決まる。関節角度が変化するとモーメントアームも変化するため、池田ら[5]の求めたモーメントアームの近似曲線の値をもとに、4 次の多項式で近似した式を用いた。ただし、背側骨間筋の DIP 関節におけるモーメントアームについては、池田らが 0 としていたところを掌側骨間筋と同じ値を取るように変更した。どちらの骨間筋も指背腱膜と呼ばれる構造に繋がっており、この指背腱膜によって DIP 関節の伸展を行う。同じ構造に

よって作用するため、同じ値を取るはずである。本稿で登場する各関節及び筋肉については図 1 に従う。

$$F_{Ci} = a_i \left\{ -4 \left(\frac{l_i}{l_{rcei}} - 1.1 \right)^2 \right\} F_{maxi} \quad (1)$$

$$F_{Pi} = \begin{cases} 2.77 \left(\frac{l_i}{l_{rcei}} - 1 \right)^2 F_{maxi} & (l_i \geq l_{rcei}) \\ 0 & (l_i < l_{rcei}) \end{cases} \quad (2)$$

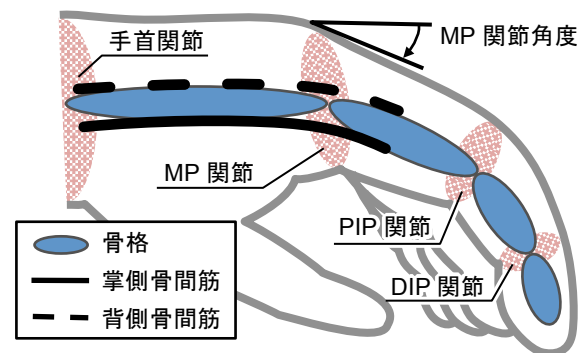


図 1 示指の関節と一部の筋肉

3. 筋活動を推定するための最適化問題

3.1 制約条件と目的関数

手指の姿勢を決定するためには筋肉の発揮張力を求める必要がある。この発揮張力を決める筋活動度は複数の解を持つ可能性がある。そこで、 m 個の筋肉それぞれの筋活動度 a_i を推定するために最適化問題を設定する。目的関数には Crowninshield らの[6]求めた筋力最適化の式である(3)を用いる。Crowninshield らは $r=2, 3, 4$ の時に式(3)を最小化するように発揮張力を求めることで人間の筋電位の計測結果に近くなるとしている。本研究では $r=2, 3, 4$ の内、計算コストが最も小さくなる $r=2$ で用いた。 f_i は筋肉の発揮張力であり、式(1)と式(2)の和で求められる。 $PCSA_i$ は筋肉の生理断面積であり、池田ら[5]が研究に用いた定数値と同じものを利用する。等式条件である式(4)は各関節でのトルクのつり合いであり、関節*j*の数だけある。 F_{Ci} と F_{Pi} はそれぞれ式(1)と式(2)に等しく、 $r_{i,j}$ は関節*j*における筋肉*i*のモーメントアームである。式(5)は筋活動度が 0 から 1 の値を取ることを表している。目的関数を最小化する最小化問題として解を求める。

$$\text{目的関数: } \sum_{i=1}^m \left(\frac{f_i}{PCSA_i} \right)^r \quad (3)$$

$$\text{等式条件: } \sum_{i=1}^m (F_{Ci} + F_{Pi}) r_{i,j} = 0 \quad (4)$$

$$\text{不等式条件: } 0 \leq a_i \leq 1 \quad (5)$$

[†] 千葉大学大学院 融合科学研究科 Chiba University,
Graduate School of Advanced Integration Science

3.2 解の算出

最適化問題の解法には有効制約法を用いた。有効制約法における初期の実行可能解は、式(3)を $r=1$ として、等式条件と不等式条件は同じ線形最適化問題を設定し、ピボット項の選択に最小添字法を用いた二段階シンプレックス法で算出した。示指の 3 関節と 7 つの筋肉について実装した。屈曲方向を正とした時、MP 関節を $-45 \sim 90$ 度、PIP 関節を $0 \sim 100$ 度、DIP 関節を $0 \sim 80$ 度の範囲で 1 度ずつ変化させ、全 1112616 通りの関節角度の組み合わせから 243290 個の解を得た。この解は全筋肉の筋活動度であり、解を得ることができた関節角度の組は構築した筋骨格モデルが取り得る姿勢の集合を表している。

4. 得られた解に対する考察

3.2 で得た解について、具体的な数値を挙げて手指姿勢の推定に有効であると考えられる点や課題、今後行うべき改良とその結果の予想について考察を行う。

4.1 推定手法の検討

指が屈曲していても PIP 関節、MP 関節、手首の位置は取得できると考えられる。そして、これら 3 点の 3 次元位置から MP 関節角度を求めることができる。そこで、MP 関節角度を入力とし、3.2 で得た関節角度と筋活動度の解の組から、入力である MP 関節角度が一致し、式(3)が最小となる関節角度の組を求めることで推定結果とする。この手法をとる場合について、3.2 で得た値をもとに有効性や課題について述べる。

4.1.1 推定への有効性

表 1 は MP 関節角度が 20 度で PIP 関節が 15 度の時、MP 関節角度が 40 度で PIP 関節角度が 24 度の時、それぞれにおいて最適であると推定された DIP 関節角度と、MP 関節角度が 60 度の時に最適であると推定された PIP 及び DIP 関節角度を示している。ここで注目する点は PIP 関節角度と DIP 関節角度の比である。15 : 12, 24 : 16, 31 : 22 と、どれもおよそ 3 : 2 の関係にある。一般に PIP 関節と DIP 関節の角度は屈曲時に 3 : 2 の関係があるとされており、この条件に当てはまることから、推定手法として有効に働くことが示唆される結果となっている。

表 1 MP 関節角度に対して最適であると推定された解 1

MP 関節(度)	PIP 関節(度)	DIP 関節(度)
20	15	12
40	24	16
60	31	22

4.1.2 推定への課題

4.1.1 と同様に MP 関節角度がそれぞれ 75 度、80 度、85 度である時、最適であると推定された PIP 関節角度及び DIP 関節角度を表 2 に示す。PIP 関節と DIP 関節の角度はいずれも 12 度以下と小さい値となっている。取り得る姿勢ではあるが、4.1.1 で述べた PIP 関節と DIP 関節の角度が 3 : 2 の関係になっている姿勢ではない。DIP 関節や PIP 関節を屈曲させる筋肉は MP 関節の屈曲も行うが、それ以外の筋肉が MP 関節を大きく屈曲させる働きをし、DIP 関節や PIP 関節の屈曲を行う筋肉は活動しない方が式(3)は小さくなるため、このような結果が出たと考えられる。MP 関節角度が大きい場合には改善の必要があることが示された。

表 2 MP 関節角度に対して最適であると推定された解 2

MP 関節(度)	PIP 関節(度)	DIP 関節(度)
75	4	7
80	1	0
85	12	0

この推定結果をより良いものとするための手法として、示指だけでなく、複数の指の情報を用いる方法が考えられる。指を動かす筋肉には複数の指に作用するものがある。例えば親指を除く 4 本の指全てを背屈させる筋肉は全ての指に一度に作用する。示指以外の指を軽く伸ばした状態で示指を屈曲させると DIP 関節や PIP 関節はあまり曲がらず、表 2 の結果に近いものが得られることが予想される。このように複数の指の情報を利用することで、推定結果が改善される可能性がある。

また別のアプローチとして、筋活動度の変化量に着目する方法が考えられる。姿勢が連続的に変化し、それを推定するのであれば、当然筋活動度も連続的に変化するはずである。よって、1 つ前の結果から各筋肉の活動度の変化が不自然でない範囲から解を選択することで違う結果が得られると考えられる。

4.2 筋骨格モデルのパラメータの見直し

解が得られていない関節角度の範囲に注目してみると、MP 関節が伸展位にある解がほとんど得られていないことがわかった。これは MP 関節が伸展位にある時、モーメントアームの近似式が保証されていないためと考えられる。伸展位についても正しく近似がされた式を用いることで、伸展位の解が得られる可能性がある。

5. まとめ

指先が隠れる場合の手指姿勢の推定を可能とすることを目的として、筋骨格モデルを用いた推定手法の検討を行った。その結果、筋骨格モデルを用いることで、指先が隠れるような場合でも、MP 関節角度や複数の指の情報によって手指の姿勢を推定することができる可能性があるとの示唆を得ることができた。今回挙げた課題とその解決方法について更に検討を行い、最終的には実際に人間の手の動作を用いた実験から、実動作への有効性や最適な解の選択方法について検討を行う。

参考文献

- [1] C Keskin, F Kırac, YE Kara, L Akarun, "Real time hand pose estimation using depth sensors", Computer Vision Workshops (ICCV Workshops), 2011 IEEE International Conference on, 6-13 Nov. 2011, pp.1228-1234.
- [2] A. V. Hill, "The heat of shortening and dynamic constraints of muscle", In Proceedings of SIGGRAPH Symposium for Computer Animation 2003, Vol. 126, pp. 136-195, 1938.
- [3] 朴 俊映, 京田 文人, 斎藤 豪, 中島 正之, "手の筋骨格モデルを用いた手姿勢の低次元化", NICOGRAPH 2008 春季大会, CD-ROM.
- [4] P.W. Brand, A.M. Hollister, *Clinical Mechanics of the hand*, 3rd ed., Mosby - Year Book, Inc., St.Louis, MO, 1999.
- [5] 池田 篤俊, 栗田 雄一, 小笠原 司, "腱骨格モデルを用いたつまみやすさの生体力学的解析", 日本ロボット学会誌, Vol.28, No.2, pp.191-199, 2010.
- [6] R.D. Crowninshield, R.A. Brand, "A physiologically based criterion of muscle force prediction in locomotion", Journal of Biomechanics, vol.14, no.11, pp.793-801, 1981.