

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 8 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25330313

研究課題名(和文) 連動性を考慮した可動領域表現による人の手の運動機能の解明

研究課題名(英文) Investigation of human hand function with coupled joint range of motion

研究代表者

宮田 なつき (Miyata, Natsuki)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・人間情報研究部門・主任研究員

研究者番号：90344225

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、人の手指の関節の連動性を考慮した可動領域表現上で運動を捉えることで、運動機能の特徴を解明することを目指した。多様な姿勢を関節自由度平面に射影し、全点を内包する境界線を求めることで、連動性を反映した関節可動域が求まる。日常生活で不可欠な把持では物体から外力を受け、能動的な場合より広い受動的な可動域の姿勢をとることが予想されるが、種々のサイズの物体の把持姿勢計測により、母指の中手指節関節など一部の関節のみ受動的な姿勢になることが判明した。また、この可動範囲を用いて連動性を反映した指先到達範囲を構成論的に求める手法を提案した。これにより、実世界に働きかける手の機能評価への展開が期待できる。

研究成果の概要(英文)：This research aimed to clarify human hand function by analyzing its movement with coupled joint range of motion (ROM) model. As grasping is essential for daily activity, we first captured and observed postures to grasp variously-sized objects. While grasping, an object applies external force to the hand, which leads to postures not only in active ROM but also in passive ROM. According to our analysis, such extension happened not uniformly but in specified joints such as metacarpo-phalangeal joint of the thumb. We also developed fingertip reachability expression considering coupled joint movement. As this metric describes the hand function in working space, it is expected to be applied to the hand function evaluation.

研究分野：デジタルヒューマンモデリング

キーワード：関節可動域 関節連動 個人差 把持姿勢

1. 研究開始当初の背景

人の手は多くの関節を有し、それらが解剖学的な構造や神経支配など様々な要因で連携して動く非常に複雑で精緻な器官であることはよく知られている。その手が物体を把持したり操作したりする仕方は、対象となる物体によって、その目的によって、個人差によって、さまざまに異なる。そのため、その様子を自然な動作として推定することは、非常にチャレンジングな課題であるが、可能となれば、使いやすい製品の設計や人と機械との円滑なインタラクションの実現など、様々な分野で役立つ。

人らしい動作の推定手法には種々の手法が提案されているが、安定性という観点で有望視されているのが、計測した動作データの主成分分析などの統計的処理により、一旦、主な関節同士の連動関係(固有動作成分)を抽出して低次元化し[1]、それらの重みづけによって運動を生成する手法[2]である。この手法は、行うタスクが物体の握力把持など単純な場合には比較的安定しており、固有動作成分の意味も理解しやすい。ただし、単純な重みづけで動作を生成すると、実際にはとれない姿勢が生成されてしまう。そのため、関節の動かせる範囲を考慮する必要があるが、この“可動領域”のモデル化が、従来は不十分であった。

まず、これまで可動域の計測方法といえば、関節同士の連動性を無視しそれぞれについて独立に、最も伸展した状態と最も屈曲した状態など限界姿勢の情報のみがゴニオメータを用いて収集されてきた。その結果、本来は他の関節の状態の影響でとれない姿勢も“可能”と判断されるという問題があった。また、可動域には、外部からのサポートなく自らの筋力で自由に動かさうる「能動的な可動域」と外力を受けることで動かさうる「受動的な可動域」があり、前者より後者のほうが大きい。把持や操作といった外部との接触を伴う日常動作を達成する場合には、受動的な可動域の姿勢をとっていることも考えられるが、すべての関節がそうなっているのかそれとも一部の関節がそうなっているのかはよくわかっていない。

ここで、十分多様な運動データを包含する最小の空間の境界をモデル化すれば、その内部は連動性を反映した真の可動領域となる。この空間では、ある姿勢は点で、ある運動は連続した点の経路で表現される。能動的に動く範囲で空間を構成するとともに、受動的に動く範囲を計測し、日常動作などをこれらの空間上で位置づけて分析することで、どの関節が能動と受動のどちらの可動域で成立しているかという理解が可能になり、自然な動作を推定する際に有用と考えられる。

2. 研究の目的

そこで本研究では、(1) 多様な運動データから関節同士の連動性を反映した手の可

動領域をモデル化する手法を構築すること、(2) 受動的な可動域を合わせて計測し日常動作をその可動領域上に重畳表現して特徴を把握すること、さらに、提案する可動領域モデルは関節角度空間での情報になるが、これを実世界で活用する一手法として(3) 連動性を踏まえた可動領域情報に基づく指先到達可能領域(リーチエンベロップ)の導出手法を構築することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 関節同士の連動性を反映した手の可動領域モデル化

手の真に動きうる関節可動領域は、手がとりうるあらゆる姿勢の集合と考えることができる。ただし、各手姿勢データは30個ほどの姿勢変数で表現されることから、すべての関節の連動性を一度にまとめて表現することは難しい。そこで図1に示すように、あらゆる二つの姿勢変数の組み合わせで平面を作り、姿勢を射影して各平面上で可動域を求め、その集合体として手全体の可動域を表現する手法を提案した。各組み合わせ平面では計測された姿勢データは点として表現され、互いの連動関係が強ければ平面内の限られた場所にもみ、連動関係が弱ければ各軸の最大値と最小値で囲まれた矩形領域内全域に、点データが散在することになる。各平面上での可動域の表現方法としては、姿勢データ点の存在する領域を囲む境界を求めることにし、導出にはアルファシェイプアルゴリズム[3]を用いた。

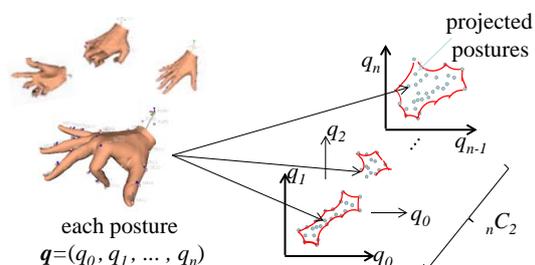


図1 計測データの射影による連動性を考慮した関節可動域の導出概念

計測姿勢については、可動領域の端の姿勢が含まれること、関節同士異なった関節角度になるような姿勢が含まれること、自然な連動関係が含まれることなどに留意して、表1に示す24種に決定した。それぞれの動作を計測する前には、被験者が動作例を記録したビデオを見ながら手を動かし、所定の動作に慣れるための時間を設けた。

表1 計測内容

Exp1	全ての指を同時に伸展屈曲
Exp2	全ての指を同時に内転外転
Exp3	各指ごとに内転外転
Exp4	各指ごとに伸展屈曲

Exp5	グーチョキパーの姿勢
Exp6	5 秒間ランダムな姿勢
Exp7	一つの指を屈曲させた状態を維持したまま、他の指を同時に伸展屈曲
Exp8	鉤爪の姿勢(PIP、DIP 関節のみ屈曲)を維持したまま、各指ごとに MP 関節を伸展屈曲
Exp9	一つの指を鉤爪の姿勢で維持したまま他の指を同時に伸展屈曲
Exp10	手首を伸展させた状態で全ての指を伸展屈曲
Exp11	手首を屈曲させた状態で全ての指を伸展屈曲
Exp12	各指ごとに MP 関節を屈曲させた後 PIP 関節を屈曲
Exp13	全ての指を同時に MP 関節のみ屈曲
Exp14	母指以外の全ての指の MP 関節を同時に屈曲させた後 PIP 関節を屈曲
Exp15	ボールをつかむような姿勢
Exp16	各指ごとに MP 関節を円形に右回りでまわす
Exp17	各指ごとに MP 関節を円形に左回りでまわす
Exp18	鉤爪姿勢を母指から順に小指まで行い、小指から順に戻す
Exp19	屈曲を母指から順に小指まで行い、小指から順に戻す
Exp20	鉤爪姿勢を小指から順に母指まで行い、母指から順に戻す
Exp21	屈曲を小指から順に母指まで行い、母指から順に戻す
Exp22	母指を屈曲させた状態で母指以外のすべての指を伸展屈曲させる
Exp23	各指ごとに PIP 関節を屈曲させた状態を維持したまま、MP 関節を伸展屈曲させる
Exp24	各指ごとに DIP 関節を屈曲させた状態を維持したまま、MP 関節を伸展屈曲させる

(2) 受動的な可動域計測と日常動作の関係

受動的な可動域は、被験者自身の反対側の手を用いて力を加える動作により計測することにした。動作の種類は、各関節に外力が働いた際の可動領域の端が含まれることに留意して決定した。受動的関節可動域では各関節自由度は連動性が低いと考え、各組み合わせにおいて上限値と下限値で囲まれる矩形領域で表現することにした。

対象とする日常動作としては、外部からの力が加わり能動的にはとりえない状態が多いと考えられる“把持”に着目し、サイズの異なる種々の物体の、種々の把持戦略で持った場合の関節角度を分析することにした。人の把持の分類に関しては観察に基づく多数の先行研究がおこなわれているが、ここでは、そうした先行研究を把持に用いる対向面の構成要素などの観点より 33 種類に分類しなおした Feix らの結果[4]に基づき、計測する

把持姿勢を定めた(図2)。同じ把持戦略でもサイズにより指の開き具合は異なることを考慮し、全 96 の把持姿勢を計測することにした。



図2 計測した把持姿勢の例

(3) 連動性を踏まえた可動領域情報に基づく指先到達可能域(リーチエンベロップ)

スマートフォンのように、手の一部で物体を把持した状態で、把持に寄与しない残りの部位を動かして操作する場合、関節同士の連動性の影響で、自由なはずの部位の取りうる動きにも少なからず制限が及ぶと予想される。

そこでまず、把持に寄与する固定関節か自由に動かす関節かを指単位で選択したのち、自由関節のとりうる姿勢の範囲を、すべての固定関節角度により規定される上下限値の積集合として求めた。指先の到達可能位置を求めるため、与えられた上下限矩形の中でランダムに値を発生させ、これが能動的な可動域内に含まれる場合にのみ有効な姿勢、すなわち可到達位置とみなして指先位置を記憶し、可視化することにした(図3)。

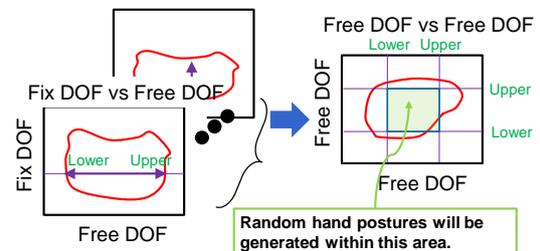


図3 連動性を反映したリーチエンベロップの導出概念図

4. 研究成果

(1) 関節同士の連動性を反映した手の可動領域モデル化

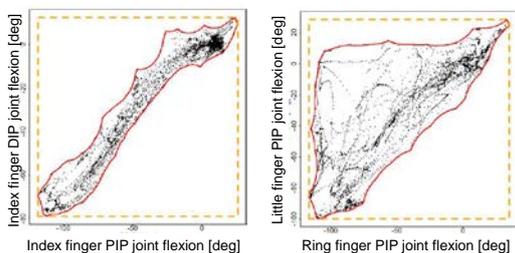
まずは能動的な動作についての計測と可動域モデル化を行った。

計測にはモーションキャプチャシステム(Vicon社製MXカメラ20台)を用いた。計測したマーカデータはラベリングを行ったのち、被験者ごとの個別ハンドモデルを作成し、モデル上に定義した仮想的なマーカが計測されたマーカ位置に合うような最適化計算によりモデル姿勢を変形させることで、姿勢データに変換した。被験者の個人モデルは、ノギスを用いて計測した手各部の寸法にあ

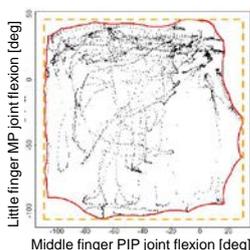
うようにジェネリックモデル (CT 画像から手モデルを得る手法に基づいて生成され、手の骨格と表皮情報を備えたモデル) を適宜スケールリングすることで作成した。

計測結果から被験者ごとに適当な動きをさせた場合と比較すると、こうしたセットを教示することで、実際に広い範囲にわたる動作が計測出来ることが確認された。

図 4 に、提案手法で得られた典型的な可動域の形状を示す。解剖学的に連動関係が強いことが既知である近位および遠位指節間関節同士では、計測された姿勢データの成す領域は、図 4 (a) のように、最大値および最小値のなす矩形に比べ非常に限られた領域となった。図 4 (b) は方向性のある連動関係を表し、図 4 (c) は連動性が非常に低い例となる。領域形状などから、比較的強い連動が見られるのは、被験者 5 名からの結果では 100 個程度の組み合わせパターンであった。



(a)強い連動性の例 (b)有方向な連動性の例



(c)弱い連動性の例

図 4 典型的な二姿勢変数間の連動関係を表す領域形状の例

(2) 受動的な可動域計測と日常動作の関係

受動的関節可動域は能動的関節可動域よりもほとんどのもので広い範囲になっていたが、その広がり方は関節によって異なった。例えば図 5 や図 6 には、能動的可動域から受動的な可動域への変化を見た場合に、主に伸展方向に拡大する例が示されている。なお、能動的関節可動域が完全には含まれていない関節の組み合わせもあったが、本手法では関節角度導出までに様々な処理が含まれるため、計測誤差とみなせる。

次に把持姿勢について見ると、大部分の把持姿勢データが能動的関節可動域に含まれていたが、近位・遠位指節間関節で見た場合、その分布には偏りがみられた。これは、物体を把持する際に、遠位指節間関節は屈曲させることが多いのに対し、近位指節間関節は把

持する物体が大きければ伸展、小さければ屈曲と、物体に合わせて調整していることを示している (図 5)。

なお、図 5 で能動的関節可動域より大きく外れた上方に位置する把持姿勢データは、同図左側に示すような薄い平板を力を入れて把持した姿勢であった。このとき示指の遠位指節間関節が過伸展位になり、示指の近位指節間関節の屈曲と母指指節間関節の屈曲が強くなっている。

同じく能動的関節可動域から大きく離れる姿勢として、図 6 の右方に集中的に分布する姿勢が見られた。これは大きな物体を持った姿勢に相当した。すなわち、母指の中手指節間関節は、把持する物体の大きさによる影響を受け、能動的にとりえない姿勢になりやすいことが分かった。

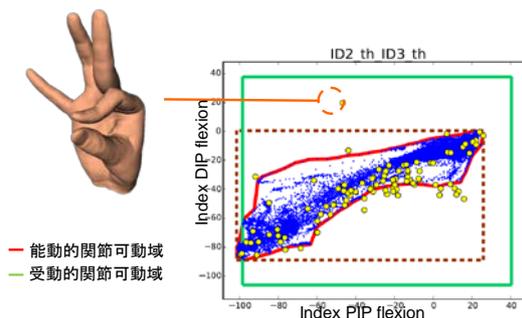


図 5 示指の近位および遠位指節間関節の屈曲

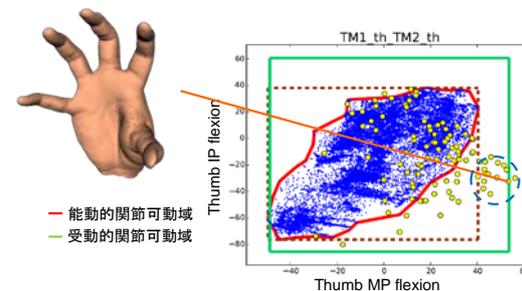


図 6 母指中手指節間関節と母指指節間関節の屈曲

(3) 可動領域に応じた指先到達可能領域

ここでは、2 章 (3) で提案した手法を用いて実際にいくつかの把持姿勢でリーチエンベロープを求めてみた結果を示す。図 7 は、固定関節から求められた母指の中手指節間関節および指節間関節の屈曲の上下限範囲からランダムに姿勢を生成し (図 7 左)、そのうち、本来この二つの関節が能動的にとりうる可動範囲内に入ったものだけを有効点として残した結果 (図 7 右) となっている。

図 8 は、スマートフォン、ペン、デジタルカメラの把持・操作を想定した把持姿勢に対する結果であり、(a) (b) では母指先端の、(c) では示指先端のリーチエンベロープが示されている。図 8 (a) および (b) の比較により、

固定部の関節角度が異なれば、自由であるはずの母指のとりうる姿勢も影響を受ける様子がよくわかる。

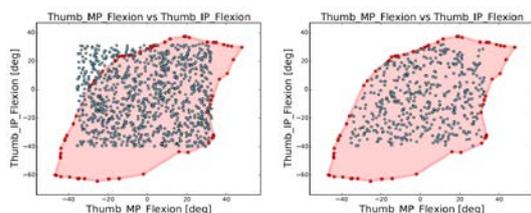
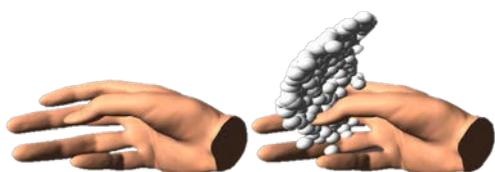
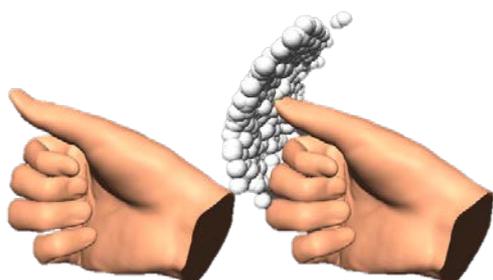


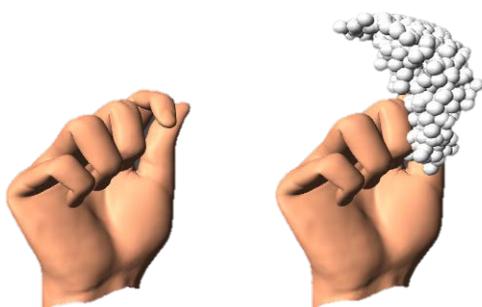
図7 固定関節から定まる上下限值に基づくランダム姿勢生成(左)と能動可動域内の有効姿勢(右)



(a)スマートフォン操作



(b)ペンヘッドのノック



(c)デジタルカメラの固定

図8 複数の物体把持姿勢(左)と連動性を反映した指先可到達領域の可視化(右)

#### 参考文献

[1] M. Santello, et al., Postural Hand Synergies for Tool Use, The Journal of Neuroscience, Vol. 18, No. 23, 10105-10115, 1998.

[2] H. B. Amor, et al., Grasp Synthesis from Low-Dimensional Probabilistic Grasp Models, Computer Animation and Virtual Worlds, Vol. 19, 445-454, 2008.

[3] B. Pateiro-Lopez, A. Rodriguez-Casal, Generalizing the Convex Hull of a Sample: The R Package alphahull, Journal of Statistical Software, Vol. 34, No. 5, 1-28, 2010.

[4] T. Feix, R. Pawlik, H. B. Schmiiedmayer, J. Romeo, D. Kragic: A comprehensive grasp taxonomy, Robotics, Science and Systems Conference, Workshop on Understand the Human Hand for Advanced Robotic Manipulation, 2009.

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計 4 件)

① Natsuki Miyata, Yuki Shimizu, Yusuke Maeda, A Measuring and Analysis Method of Coupled Range of Motion of the Human Hands, 2013 IEEE Int. Conf. on Systems, Man, and Cybernetics, 2013/10/15, Manchester, Britain.

② Natsuki Miyata, Takayoshi Hirono, Yusuke Maeda, Grasp Database that Covers Variation of Contact Region Usage, 2013 IEEE Int. Conf. on Systems, Man, and Cybernetics, 2013/10/15, Manchester, Britain.

③ 萩原 智, 宮田 なつき, 前田雄介, 人の手の能動的/受動的関節可動域と把持姿勢, 日本ロボット学会学術講演会, 2015/09/04, 東京.

④ Natsuki Miyata, Satoshi Hagiwara, Yusuke Maeda, MODELING COORDINATED JOINT RANGE OF MOTION OF THE HUMAN HAND -- CHARACTERISTICS OF COORDINATION AND GRASPING IN RELATION TO THE ROM BOUNDARY --, 25th Congress of International Society of Biomechanics, 2015/07/14, Glasgow, Britain.

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

宮田 なつき (MIYATA NATSUKI)

産業技術総合研究所・人間情報研究部門・主任研究員

研究者番号 : 90344225