

令和 6 年 6 月 12 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H03526

研究課題名（和文）手の把握姿勢生成における運動規範モデルの解明とその形状デザインへの応用

研究課題名（英文）Elucidation of the kinematic normative model for grasping posture generation of hand and its application to product shape design

研究代表者

多田 充徳（Tada, Mitsunori）

国立研究開発法人産業技術総合研究所・情報・人間工学領域・研究チーム長

研究者番号：70392628

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,500,000円

研究成果の概要（和文）：製品開発において手で扱いやすい形状をデザインすることは、製品の操作性や安全性を向上させるために重要である。本研究では、CT画像から構築した手モデル、接触点におけるトルクの伝達を許容するソフトフィンガーコンタクトモデル、そして力学ソルバを構築することで、様々な姿勢において手の指先力と筋活動の同時推定を実現した。また、モーションキャプチャと力センサを用いた把握計測実験を行うことで、指先力の推定が概ね正しく行えていることを確認した。これらは、手の力学解析や把握姿勢の生成を実現するための基盤的な技術であり、製品デザインにおける今後の活用が期待できる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、与えられた手の把握姿勢に対する指先力と筋活動の同時推定を実現した。人の手は多数の骨格、関節、そして筋肉から構成される複雑かつ冗長な多自由度系であるが、筋活動の最小化を目的関数とした最適化問題に帰着させることで冗長性の問題を解決し、指先力と筋活動を一意に定めることができるようになった。近年では、コンピュータ上に人の構造や運動を再現したデジタルヒューマンモデルを構築し、そのモデルに製品の把持や操作を行わせることで、製品の操作性や安全性を評価する手法が求められている。本研究の成果はこのような評価に活用できる。これにより、製品開発の低コスト化や開発サイクルの高速化が期待できる。

研究成果の概要（英文）：In product development, it is important to design shapes that are easy to handle by hand to improve product operability and safety. In this study, a hand model constructed from CT images, a soft finger contact model that allows torque transmission at contact points, and a mechanics solver were used to simultaneously estimate fingertip force and muscle activity of the hand in various postures. We confirmed that the estimation of fingertip force was generally correct through grasp measurement experiments using motion capture and force sensors. These are fundamental technologies for analyzing hand mechanics and generating grasping postures and are expected to be used in product design in the future.

研究分野：デジタルヒューマン

キーワード：手 姿勢生成 ソフトフィンガー 筋負担最小化

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

製品開発において手で扱いやすい形状をデザインすることは、製品の操作性や安全性を向上させるために重要なことである。近年では、仮想空間に人の構造や運動を再現したデジタルヒューマンモデルを構築し、そのモデルに製品の把持や操作を行わせる手法が提案されている。これにより、コンピュータ上で製品の評価を行うことができ、製品開発の低コスト化や開発サイクルの高速化が期待される。

仮想空間で製品評価を行う場合、実際に人がその製品を把持するような姿勢や、その姿勢での把持に必要な力、その力を発揮するための筋活動度は未知である。そのため、把持姿勢や把持に必要な力、筋活動度を同時に推定する必要がある。また、様々な把持姿勢に対応するための接触モデルも必要となる。

把握解析に使われる接触モデルには主に、摩擦なし点接触、摩擦あり点接触、ソフトフィンガーコンタクト (SFC) の3種類が存在する。中でも SFC は接触点において指先で発揮される3軸の力 (指先力) だけでなく、接触面法線方向回りのトルク (指先トルク) も考慮した接触モデルである。また、SFC では指先トルクを考慮することで、他の2つの接触モデルでは解析できない2本指での把持の解析が可能である。そのため、仮想空間で様々な把持姿勢を生成するためには、SFC を使うことが有用だと考えられる。

2. 研究の目的

仮想空間上で様々な把持姿勢での製品評価を実現するために、本研究ではその前段として、SFC を用いた物体把持における力と筋活動度の同時推定手法を開発する。また、推定手法の精度検証を行うために必要な指先力計測装置の開発も行う。

3. 研究の方法

従来、人が物体を把持する時の力や筋活動度を推定する際、摩擦あり点接触モデルがよく用いられてきた。本研究では、摩擦あり点接触モデルでの推定手法を SFC に対応した手法に変更することで、物体把持時における力と筋活動度の同時推定を行う。開発した手法の推定精度を検証するために、物体把持時における力の推定値と計測値を比較して推定精度を定量的に評価する。また、先行研究において計測された物体把持時に活動する筋と推定した筋活動度を比較することで、筋活動度の推定精度を定性的に評価する。

4. 研究成果

(1) 指先力と筋活動度の同時推定手法の開発

仮想空間上で人の指先力と筋活動度を推定するために、図1に示すデジタルハンドモデルを使用した。デジタルハンドモデルは関節の動きを表現するリンクモデルと手の形状を表現するスキンメッシュから構成される。リンクモデルは25個の関節、22の自由度を持つ。スキンメッシュは日本人男性 (身長: 1.69 m, 体重: 63 kg, 年齢: 50 歳) の手の CT スキャン画像から作成した。また、スキンメッシュ上にはモーションキャプチャの計測データとのフィッティングや、個人の手の形状を再現した個人別手モデルの作成に使用される特徴点が付いている。

人が物体を把持している時、物体に働く力と指先力及び指先トルクはつり合う。指先力と指先トルクは関節トルクによって発生するため、指先力及び指先トルクと関節トルクはつり合う。関節トルクは筋活動によって発生する力によって発揮されるため、関節トルクと筋活動によって発揮される力はつり合う。また、物体を把持するためには指と物体が滑らない必要がある。これらの条件を制約条件として筋活動度の二乗和の最小化問題を解くことで、指先力と指先トルク及び筋活動度を同時推定が可能となった。

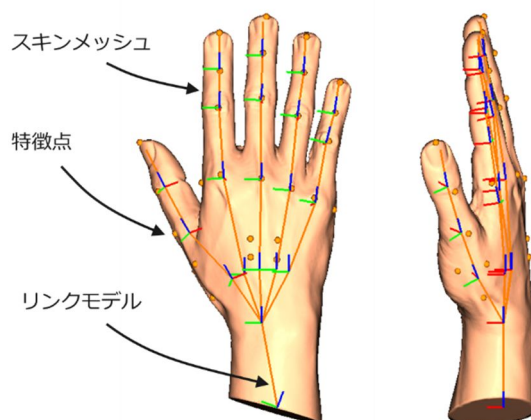


図1 デジタルハンドモデル

(2) 指先力と筋活動度の同時推定手法の精度検証

開発した手法で推定した指先力及び指先トルクと計測値を比較することで、SFC による指先力と指先トルクの推定精度を検証した。

物体を把持している時に発揮する力を計測するために、図 2 に示す指先力計測装置を開発した。指先力計測装置は 6 軸力覚センサ、アンプ、バッテリー付き Wi-Fi モジュールから構成される。6 軸力覚センサの表面には接触面の摩擦係数を変えるためのプレートを貼り付けられる。指先力計測装置はバッテリーで駆動し、力覚センサで計測されたデータは RS-422 でマイコンに出力され、Wi-Fi 通信によって PC に送信される。そのため、指以外の外部との物理的な接触なしで計測が可能である。指先力計測装置の質量は 134.6g であり、接触面のプレートを貼り付けた時の力覚センサの間の距離は 45mm である。また、計測される力とトルクの分解能はそれぞれ 0.005N と 0.05Nmm である。

推定値と計測値の比較では指先力計測装置の表面にスエードと紙やすり (No.220) を貼付し、摩擦係数を変更した際の把持姿勢を計測した。本研究では図 3 に示すように、縦にした指先力計測装置を母指と示指で把持した姿勢 (縦持ち姿勢) と、横にして把持した姿勢 (横持ち姿勢) の 2 通りの姿勢で推定精度の検証を行った。把持のために発揮する指先トルクにおいては、縦持ち姿勢は指先トルクが小さい姿勢であり、横持ち姿勢は指先トルクが大きい姿勢である。なお、これらの姿勢は従来使われてきた摩擦あり点接触モデルでは解析できない姿勢である。把持姿勢の計測では、17 台のモーションキャプチャカメラを使用して計測した。指先力計測装置には 4 点のマーカ、被験者の手には図 4 に示すように 28 点のマーカを貼付して姿勢を計測した。把持姿勢が静止し、指先力と指先トルクがおおよそ一定となっている時の 1 フレームのみを対象として、推定値との比較を行った。計測値と推定値の比較を行う上で被験者の手の形状の影響を考慮するために、モーションキャプチャで計測したマーカ位置と 22 か所の手寸法を用いて個人別手モデルを作成した。



図 2 開発した指先力計測装置

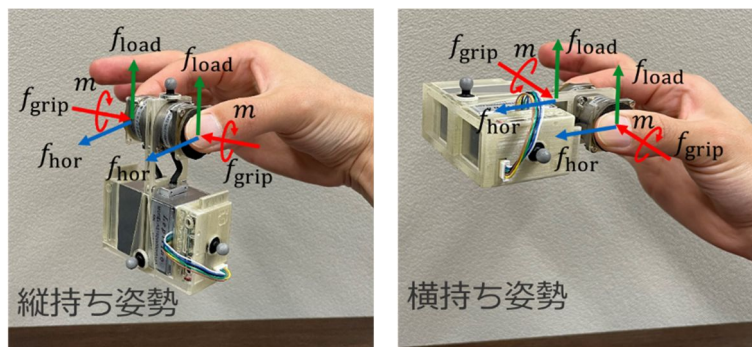


図 3 縦持ち姿勢と横持ち姿勢

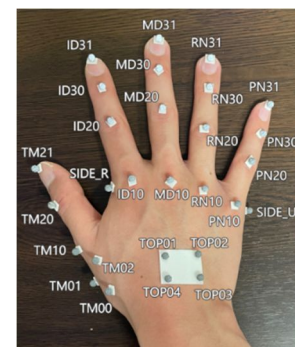


図 4 手のマーカ位置

指先力と指先トルクの計測値及び推定値を図 5 に示す。なお、指先力は図 3 に示す指先力計測装置が持つ座標系で表している。つまり、 f_{grip} は握む方向の力、 f_{load} は重力方向の力、 f_{hor} は f_{grip} と f_{load} に直交する前後方向の力、 m は f_{grip} 回りの指先トルクを示す。スエードの方が紙やすりよりも摩擦係数が小さいため、より大きな指先力と指先トルクを発揮する必要があるが、推定結果でも同様の傾向が見られた。また、横持ち姿勢の方が縦持ち姿勢よりも大きな指先トルクを発揮する必要があるが、推定結果でも同様の傾向が見られた。そのため、本手法を用いることで大きな指先トルクが必要な把持姿勢や、2 本指で物体をつまむような把持姿勢について、おおむね妥当な指先力や指先トルクを推定できると考えられる。計測値と推定値を比較すると、握む方向の力の推定値は計測値よりも小さい傾向があった。これは本研究では人が物体を把持する時の安全率を考慮していなかったためと考えられる。人は外乱などによって物体と指の接触面におい

て滑りが発生しないように、必要最低限以上の力を発揮して物体を把持している。一方、推定では筋活動度が最小化されるように指先力と指先トルクを算出しているため、必要最低限の力で物体を把持していたと考えられる。その結果、推定値と計測値の誤差が大きくなったと考えられる。

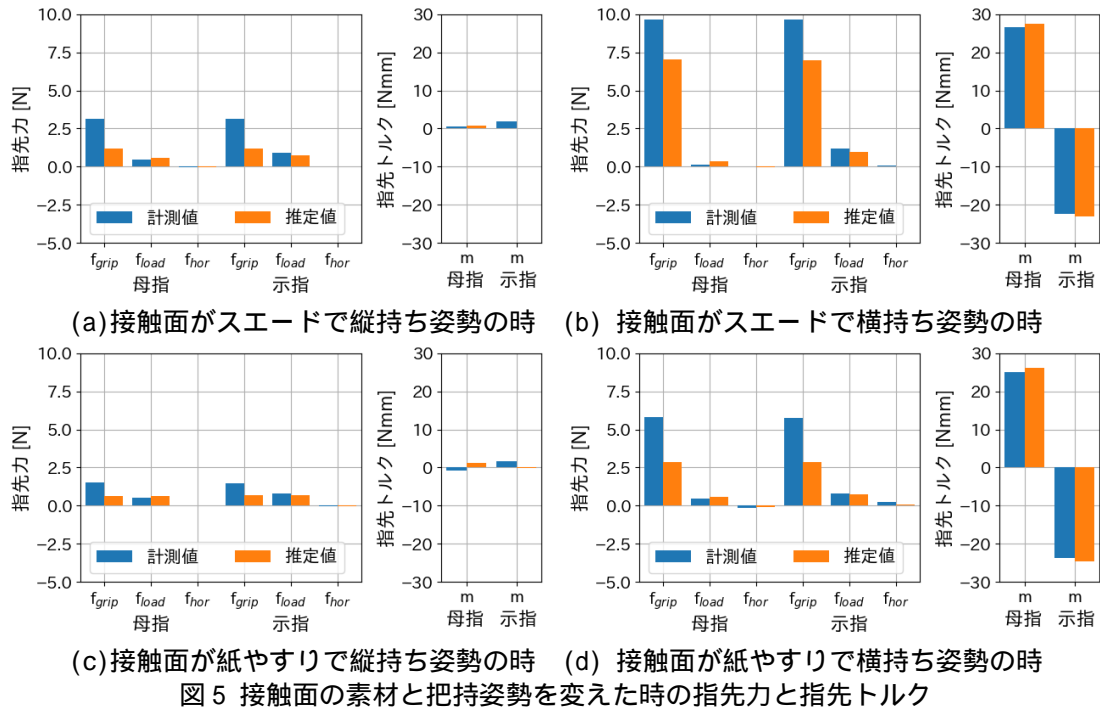
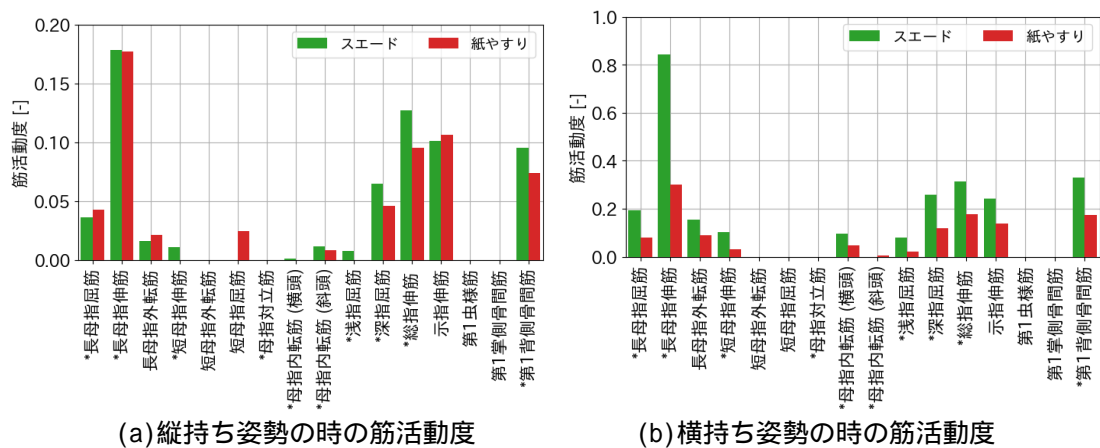


図5に物体把持時における筋活動度を示す。筋の名前の先頭に*が記入されている筋は、精密把握動作時に活動すると報告されている筋を示す。推定結果にて活動した筋と先行研究にて活動すると報告された筋を比較すると、縦持ち姿勢において接触面がスエードの時は母指対立筋と母指内転筋（横頭）、接触面が紙やすりの時は短母指伸筋、母指対立筋、母指内転筋（横頭）、示指浅指屈筋以外の筋が活動していた。また、横持ち姿勢において接触面がスエードと紙やすりの時は、母指対立筋と母指内転筋（斜頭）以外の筋が活動していた。そのため、把持時に活動する筋はおおむね先行研究の報告と一致しており、妥当な筋活動度を推定できたと考えられる。一方で、一部の筋で先行研究の報告と一致しなかった。この要因としては、先行研究と同じ姿勢で把持を行っていないことが考えられる。また、実際の人の手では姿勢によってモーメントアーム長は異なるが、本研究ではモーメントアーム長を固定としていたことも要因の一つと考えられる。



5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Takayuki Nakajima, Yuki Asami, Yui Endo, Mitsunori Tada, Naomichi Ogihara	4. 巻 12
2. 論文標題 Prediction of anatomically and biomechanically feasible object grasping posture of the human hand based on minimization of muscle effort	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 13247
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-022-16962-1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 野原 隆樹, 尾形 正泰, 荻原 直道, 多田 充徳
2. 発表標題 ソフトフィンガーコンタクトを用いた把握解析
3. 学会等名 第24回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	遠藤 維 (Endo Yui) (40599073)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・情報・人間工学領域・主任研究員 (82626)	
研究分担者	尾形 正泰 (Ogata Masayasu) (60783818)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・情報・人間工学領域・研究員 (82626)	
研究分担者	荻原 直道 (Ogihara Naomichi) (70324605)	東京大学・大学院理学系研究科（理学部）・教授 (12601)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------