

物体把持時における複数指を対象とした接触力の関係解析

下林 秀輝[†] 中尾 恵^{††} 松田 哲也^{††}

[†] 京都大学工学部 〒606-8501 京都市左京区吉田本町

^{††} 京都大学大学院 情報学研究科 〒606-8501 京都市左京区吉田本町

E-mail: †hshimo@sys.i.kyoto-ac.jp, ††{megumi,tetsu}@i.kyoto-ac.jp

あらまし 人間と物体のインタラクションの中でも、手の把持動作を理解することは重要である。把持動作時における把持姿勢の分類や指先の接触力の解析は多く取り組まれている。しかし、様々な物体に対して自然な把持動作を行った際の複数指を対象とした接触力の計測は行われておらず、複数指の接触力の関係性も明らかにされていない。本研究では、異なる重さの円柱状物体を把持した際の母指、示指、中指の接触力を計測した。7名に対して計測を行い、被験者ごとに物体の重さに対する各指の接触力のバランスを算出した。3指の接触力のバランスについてサポートベクターマシンを用いて異なる重さの識別を試みた。その結果、重さによって各指の接触力のバランスが変化する被験者と変化しない被験者が確認された。

キーワード 手指操作分析, サポートベクターマシン, 物体把持, 指先力解析

Relational analysis on contact force of multiple fingers during grasping object

Hideki SHIMOBAYASHI[†], Megumi NAKAO^{††}, and Tetsuya MATSUDA^{††}

[†] Faculty of Engineering, Kyoto University Yoshida-honmachi, Sakyo-ku, Kyoto, 606-8501 Japan

^{††} Graduate School of Informatics, Kyoto University Yoshida-honmachi, Sakyo-ku, Kyoto, 606-8501 Japan

E-mail: †hshimo@sys.i.kyoto-ac.jp, ††{megumi,tetsu}@i.kyoto-ac.jp

Abstract Among human-object interactions, it is important to understand how to grasp objects by human hand. Many researchers tried to classify postures during grasping operations and tackled to understand transition of forces during grasping. However, contact forces of multiple fingers during natural grasping operations with various objects have not been measured and the relationship between contact forces was not clarified. In this study, we measure the contact forces of thumb, index and middle fingers during lifting cylindrical objects with different weights. Seven healthy subjects participated in user experiments to compute the balances of the contact forces for each weight, each subject. Then, the balances for each weight are clarified by support vector machine. The analysis results showed that the subjects were classified into two groups. A difference in the balance of the contact forces was found from the first group, and any difference was not found from the second group.

Key words finger manipulation analysis, support vector machine, grasping object, fingertip force analysis

1. はじめに

人間の手は複雑な動きを行えるため、物体との多彩なインタラクションが可能である。その中でも手の把持動作を理解することは重要であり、近年、バーチャルリアリティ (VR) やロボットの分野においてもインターフェース設計やロボットアームの動作計画などの用途で注目を集めている。しかし、手には多くの関節があり、自由度が高いことから把持動作の本質的な理解は大きな課題となっている。把持動作を扱った研究として、把持姿勢の分類を行った研究や、把持動作時における指先の力の定量的分析を行った研究が知られている。解剖学的特徴を考慮

した把持姿勢の分類の初期の研究として、Napier による把持姿勢の分類 [1] がある。この研究によって、把持姿勢は precision と power の 2 クラスに分類された。その後、この分類に基づいたさらなる分類手法の提案が行われている。近年の研究では、既存の把持姿勢の分類に対する分析や比較を通じて、新しい分類法への統合を目指した研究 [2] が行われた。これまでに、把持動作時において物体に与えられる力に注目した研究は多く行われている [3]。母指と示指を用いたつまみ動作を対象とした把持力の解析については、Johansson らにより多くの研究が行われた。彼らの初期の研究 [4] では、垂直方向に持ち上げる力である荷重力と把持力の関係性について実験装置を用いて分析が

行われた。さらに、把持物体の物理特性が荷重力と把持力に与える影響について、物体との接触面の材質 [5]、重さ [6]、視覚的な大きさ [7]、把持部の形状 [8] の違いに注目して詳細な分析を行った。Kinoshita らは、複数指を用いた物体の把持動作時における各指の力について、力センサを埋め込んだ物体を用いて計測を行った [9]。Johansson らや Kinoshita らによるこれらの研究では指先の触感が阻害されない利点が存在するが、実験室に固定された装置を用いて実験を行っており、日常的な把持タスクを対象とした計測は難しい。また、計測可能な把持物体が限定され、様々な物体に対する自然な把持動作の解析に適用することはできない。また、各指の力について分析することも困難である。特別な装置や物体を用いることなく複数の指を対象として各指の力を計測する手法として、データグローブや指先装着型の触覚センサ [10] [11] が提案されている。しかし、これらの提案手法では、指先に装着されたセンサにより指腹が覆われており、指先の感覚が阻害されるため自然に行われた把持動作の計測は難しい。指先感覚を阻害しない指先装着型のセンサを用いた研究として、示指を対象として指先の特徴量の解析を行った研究 [12] [13] や母指及び示指を対象としてつまみ動作とつかみ動作を分類する指先の動的特徴量を分析した研究 [14] が報告されている。これらの研究では、指先の感覚を妨げない指先装着型のセンサを採用して、自然な手指操作の計測に取り組んでいる。把持動作時における複数指の接触力の関係性については未だ明らかにされていない。

本研究では、母指、示指、中指の3指を対象とした把持動作における3指の接触力の同時計測を行い、各指の関係性について定量的な分析を試みる。本研究においても、指先の感覚を妨げないことが重要であるため、先行研究 [12-14] において用いられた指先装着型のセンサを用いる。指先の関係性に着目しているため、3指に拡張して計測を行う。物体把持時の母指、示指、中指に加わる力を計測することで、3指を用いた際の力の加え方や、各指が果たす役割といった指先の関係性について定量的に分析することができる。その際、把持する場所を制限することで被験者内で同一の把持姿勢を取るよう指定を行う。人間の手の自由度は高いため、同一のタスクであっても、被験者によって力の加え方が異なる可能性が示唆されており [15]、重さに応じて各指の果たす役割が変化する可能性もある。

本論文では、被験者実験を通して計測された各指の接触力を用いて、3指の接触力の関係性について解析する。各被験者における把持物体の重さに対する各指の接触力の関係性について定量的な解析を行い、被験者全体を対象とした接触力についても解析する。

2. 物体把持時の指先接触力の計測と関係解析

2.1 手法の概要

本研究では、複数指を用いた物体把持時における指先の接触力の関係について理解することを目指している。本論文では、母指、示指、中指の3指を用いて異なる重さの物体を持ち上げた時の指先の接触力について計測を行い、力の加え方や各指の果たす役割について分析する。その目的を満たすため、以下の

要素から成り立つ実験システムを構築する。

- 把持時に指先の接触力を複数指同時に測定する実験装置
- タスク遷移のタイミングを音で管理する実験プロセス
- 被験者負担の少ないセンサの較正プロセス
- 実験プロセス、較正プロセス及び計測値の取得を自動的に

に行う実験ソフトウェア

実験システムを説明した後、実験システムによって得られたデータから必要な領域の抽出を行い、接触力として取得する手法について説明する。

2.2 実験システム

2.2.1 実験装置

3指の接触力の計測には、先行研究 [12-14] で計測に用いられたテック技販製の Haplog を採用する。Haplog は指腹の横変形を 16 bit の分解能で計測するデバイスであり、様々な物体に対する自然な把持動作を対象として指先感覚を妨げない接触力の計測が可能である。その際、指腹の横変形の大きさをひずみセンサを用いて取得した値 (ひずみ値) と加速度センサによって計測された指先の加速度が記録される。Haplog センサは爪部分に装着されるが、装着する指の大きさや形状によってはセンサが外れやすくなったり、物体と接触しやすくなる場合がある。本研究では、これらの問題点に対して対策を講じる。前者に対しては、計測中に意図せずセンサの装着状況が変化することを避けるため、両面テープを用いて被験者の指にセンサを接着する。その際、マスキングテープを用いて被験者の皮膚の状態による影響を受けないようにする。後者に対しては、指先中央の膨大部を基準としてセンサの装着を行う。これにより、センサと物体の接触が軽減される。本研究では、把持動作における3指の接触力の計測を行うため、右手の母指、示指、中指の指先に Haplog センサを装着し、母指のひずみ値 F_1 、示指のひずみ値 F_2 、中指のひずみ値 F_3 の三つの計測値を得る。なお、計測値は 100 Hz の時系列データである。

異なる重さの物体を把持した際の指先接触力について分析するため、外観に差がなく重さが異なる4種類の把持物体 (図 1(a)) を作成した。把持物体は全て直径 70 mm、高さ 35 mm の円柱状物体とし、把持部分は高さ 30 mm の ABS 樹脂とした。把持物体の中心に重りを入れる空間を設けており、挿入する鉄製の重りの数を調整して4種類の重さの物体を用意する。物体把持時の滑りによる影響を軽減するため、物体は先行研究よりも軽いものを採用した。軽い順から 96 g、194 g、292 g、390 g となっており、把持物体の重心は中心に固定されるよう設計した。これにより、重さの異なる物体に対する自然な把持動作の計測が可能となる。本論文では、把持姿勢が把持ごとに変ってしまうことを避けるため、把持物体上部のオレンジ色の指示板と物体側面に貼ったテープで把持できる場所 (把持部) を指定した。被験者は視覚的にも触覚的にも把持部を判別することができる。

2.2.2 実験プロセス

先行研究 [16] によると、把持動作は準備区間、把持の瞬間、操作区間の3つの区間に分けられる。本研究では、把持している物体を持ち上げてから下ろすまでの操作区間を物体把持時と

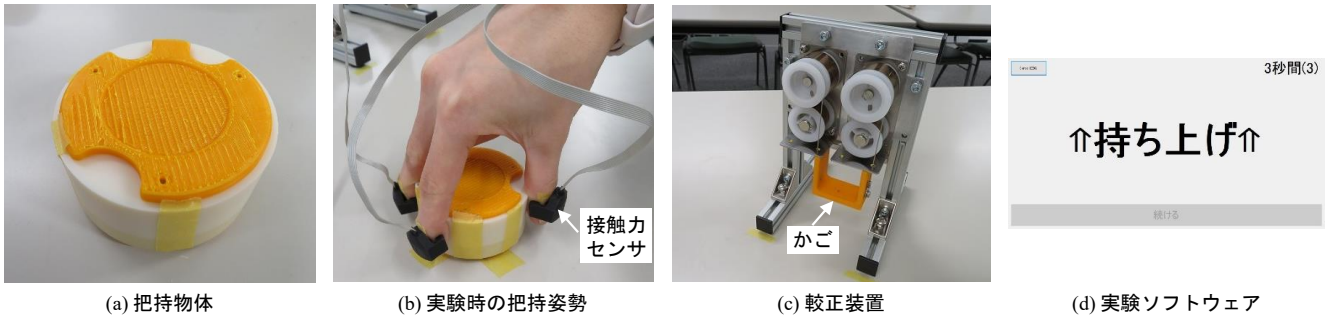


図 1 実験システム

して定義する。また、本研究で指定する把持姿勢は、図 1(b) に示すように、円柱状物体に対して母指、示指、中指の 3 指を用いて把持を行い、薬指及び小指を畳んだ姿勢とする。

本研究では、指定した把持姿勢で物体を把持した後、その姿勢で行う一連の動作（トライアル）として持ち上げ動作、下ろし動作の 2 動作を設定する。被験者はピープ音が鳴ったら各動作を開始するように指示される。動作の指示は 3 秒毎に鳴るピープ音に合わせて交互に行われ、被験者は 1 回分の計測（1 セッション）あたり 30 秒間、合計 5 回のトライアルを行う。最初の動作を行う 6 秒前に指定した把持姿勢で物体を把持するように指示され、最後の動作が終わった後に物体を離すように指示される。また、被験者が物体を把持した際に、指定された把持部に指が収まっているか確認する。このようにして、1 回の実験プロセスでは 1 セッション分、合計 38 秒間の 3 指についてのひずみセンサの値 ε が記録される。

2.2.3 較正プロセス

次に、較正プロセスについて説明を行う。較正の目的について説明を行った後、先行研究での較正手法に触れ、本論文で用いる較正手法について説明する。なお、各較正プロセスは各実験プロセスが行われる直前に行われる。得られるひずみ値は、指腹の横変形の大きさをひずみセンサを用いて取得した値である。指腹の横変形の度合いは、指先に何も接触していない状態であっても、指先の動きや関節の動きにより変動する。また、ひずみ値は、被験者の指の大きさや厚みなどによって異なり、センサの装着状態によっても値が変動する。本研究では、物体把持時における 3 指の接触力に着目して分析するため、ひずみ値を接触力に変換する必要がある。ひずみ値を接触力に変換する際に用いる値 ε_{600} , ε_0 を較正プロセスで取得する。

本論文では、被験者に対する負担を軽減するために、図 1(c) に示す定荷重バネを用いた較正装置を使った較正プロセスを提案する。この手法では、定荷重バネによって合計 5.88 N (0.6 kgf) の力で引っ張られているかごを、1 本の指を用いて下ろし、数秒間維持することで指先に荷重を加える。提案する較正プロセスの具体的な流れを以下に示す。

- (1) 母指を用いて、かごを下げる。
 - (2) 下げた状態を 5 秒間維持する。
 - (3) 示指、中指についても同様に (1), (2) の手順を行う。
 - (4) 何も掴まず把持姿勢を取り、5 秒間静止する。
- (1)-(3) で計測したデータ及び (4) で計測したデータのうち後半

の 3 秒間のデータを用いて平均値を算出し、それぞれ ε_{600} , ε_0 とする。このようにして、較正プロセスが行われる毎に各指についての ε_{600} , ε_0 が得られる。

2.2.4 実験ソフトウェア

最後に、実験時に用いる実験ソフトウェアについて説明を行う。実験ソフトウェアを実行すると、較正プロセス、実験プロセスが 1 回ずつ自動的に行われ、計測値が CSV ファイルに保存される。実行時には、ディスプレイ上に図 1(d) の指示画面が表示され、被験者への指示が行われる。指示内容の切り替え時にはピープ音が鳴り、被験者の注意を促す。

2.3 接触力の算出

実験システムにより取得された計測データから必要な領域の抽出を行い、接触力として取得する手法について説明する。解析は全て MathWorks 社の MATLAB を用いて行う。物体把持時における各指の接触力について定量的な分析を行うため、計測データを分割して分析に必要なデータを抽出した後、ひずみ値を接触力に変換する。

まず、計測データから分析に必要なデータを抽出する。1 回のトライアルは、把持物体の状況に注目すると、上昇時、静止時、下降時の 3 区間に分割できる。本論文では、物体把持時において静止している状態に注目する。本研究では予めデザインされた実験デザインに基づいて、被験者に対して指示や音が提示されている。そのため、得られた時系列データの時間成分に注目することで、物体把持時において静止している状態の計測データを抽出することが可能である。実験デザインに基づいて、持ち上げる動作を行っている 3 秒間について抽出した後、把持した物体が静止していると考えられる後半の 1.5 秒間のデータを、静止時の計測値として取得する。1 セッションの時系列データから 5 トライアル分の物体を持ち上げて静止している状態のデータが得られる。

次に、抽出したひずみ値を接触力へ変換する。計測値は指腹の横変形の大きさをひずみセンサを用いて取得した値（ひずみ値）であり、ひずみ値と接触力の関係性からひずみ値を接触力に変換する必要がある。取得した ε_{600} , ε_0 を式 1 に代入して、ひずみ値 $\varepsilon(i, t)$ を接触力 $F(i, t)$ [N] に変換する。

$$F(i, t) := \frac{\varepsilon(i, t) - \varepsilon_0(i)}{\sum_{i=1}^N (\varepsilon_{600}(i) - \varepsilon_0(i)) / N} \times 5.88 \quad (1)$$

式 (1) で、 i はセッション番号、 t は時系列、 N はセッション数の合計に対応している。 ε_0 はセンサの装着状況に依存して

いるため、較正プロセス毎に取得する。その際、 ε_{600} も較正プロセス毎に得られるが、同一被験者であっても較正装置に対する指の姿勢などによって値が変化する。そのため、式 1 では $(\varepsilon_{600} - \varepsilon_0)$ の平均を算出することで、計測誤差の低減を行う。本論文では、このようにしてひずみ値を変換して得られた、把持した物体が静止している状態における各指の接触力のデータ F_1 , F_2 , F_3 を用いて分析する。

3. 被験者実験

3.1 実験概要

本研究では、被験者として 20 代の健常男性 6 名、女性 1 名が実験に参加した。右利きが 5 名、左利きが 2 名であった。把持物体として、4 種類の重さの円柱状物体を使用した。重量が軽い順に実験を行い、各重量について 1 セット (3 セッション, 15 トライアル) 分の計測を行った後、より重い物体に変更を行った。変更の際、まず被験者に変更後の物体の把持を行ってもらい、重さがわかるようにした。被験者の指の発汗による影響を避けるため、室温を摂氏 20 度に設定した部屋で実験を行った。椅子を机に対して向き合うように固定し、把持物体を机上のマーカース上に設置した。被験者は正面中央に把持物体と正対するように着席した。被験者実験全体の流れや実験方法を説明した後、全ての被験者に対して以下の手順で計測を行った。

- (1) 被験者は右手の母指、示指、中指にセンサを装着する
- (2) 4 種類の重さの把持物体について把持動作を練習する
- (3) 較正プロセスを実行し、 ε_{600} , ε_0 を取得する
- (4) 実験プロセスを実行し、 ε を取得する
- (5) センサの装着状態を確認する

(3)-(4) を軽い把持物体から順に用い、各把持物体について 1 セット (3 セッション, 15 トライアル) の計測を行った。4 通りの重さに対し合計 4 セット (12 セッション, 60 トライアル) 行った。

本論文では、被験者実験によって得られた 7 名のデータのうち、計測エラーがあった男性 1 名を除く被験者 6 名のデータについて分析を行った。被験者ごとのデータを用いて接触力の解析と各指の接触力のバランスの解析を行った後、被験者全体のデータを用いて解析を行う。

3.2 接触力の解析

接触力の算出手法に基づいて、被験者実験で取得したひずみ値から定量的な分析が可能な接触力 F_1 , F_2 , F_3 を得た。まず、各被験者、各指毎に異なる重さの物体に対する得られた接触力の変化を見る。

母指、示指、中指の接触力 F_1 , F_2 , F_3 について、被験者ごとに箱ひげ図でそれぞれ図 2, 3, 4 として図示した。破線は最小二乗法によって求められた把持物体の重さに対する回帰直線を表している。母指の接触力に関しては全ての被験者で重さの増加に伴って増加する傾向が認められた。示指及び中指の接触力に関しては、被験者 2 を除く被験者で母指と同様に重さの増加に伴って増加する傾向が認められたが、被験者 2 では重さに対する接触力の変化は小さかった。これは、0.1 kg~0.4 kg の重量の違いに対して把持力の変動が少ない物体把持が行われる場

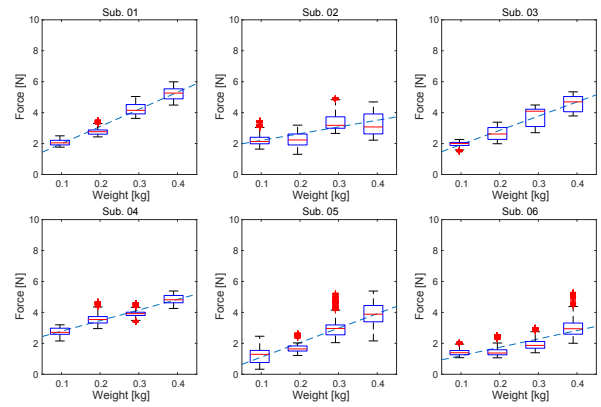


図 2 母指の接触力 F_1 の箱ひげ図

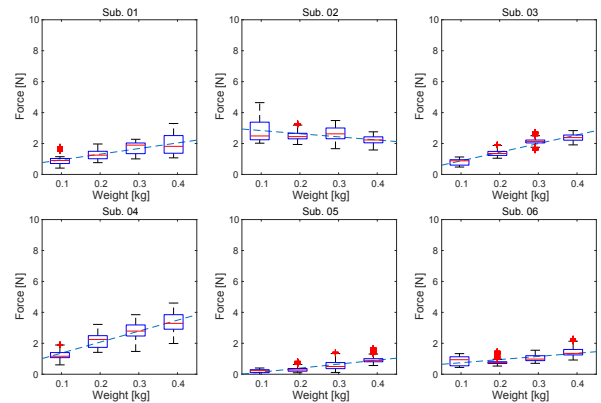


図 3 示指の接触力 F_2 の箱ひげ図

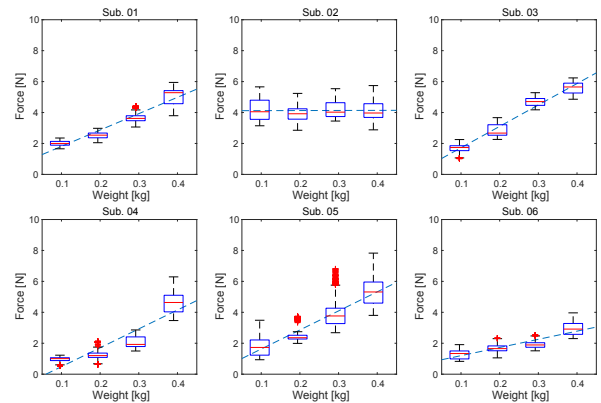


図 4 中指の接触力 F_3 の箱ひげ図

合があることを示している。また、図 4 で示したように被験者 4 の中指では回帰直線の切片が負の値となった。被験者 4 の中指は、重さに対する働きが他の被験者と異なる可能性がある。

3.3 各指の接触力のバランスの解析

次に、各指間の接触力の関係性について検討するため、各指の接触力のバランスについて解析する。各指の接触力のバランスは各トライアルにおいて 3 指の接触力の合計に対する各指の接触力の割合を計算することによって算出される。被験者ごとに各指の接触力のバランスが重さに対して変化しているか否か

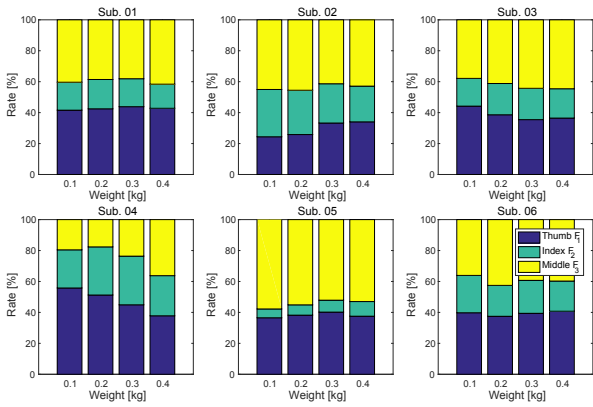


図 5 各指の接触力のバランスの平均値

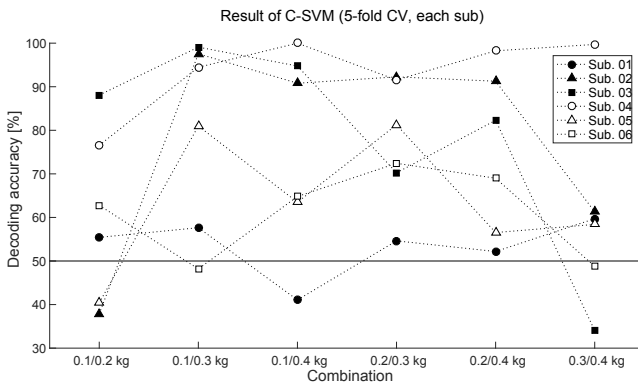


図 6 SVM を用いた各指の接触力のバランスの識別結果

を検討する。

その後、3 指の接触力のバランスとして得られる 3 次元データを用いて、各把持物体における各指の接触力のバランスに差異があるか否かを検討する。4 種類の重さの把持物体から 2 種類を選択する 6 通り ($=4C_2$ 通り) の把持物体の組み合わせについて、線形カーネルの Support Vector Machine (SVM) を用いて各指の接触力のバランスの識別を試みる。過学習を避けるため、5 分割の交差検証を行い、平均の識別率を算出する。その際、MATLAB Statistics and Machine Learning Toolbox の fitcsvm を使用し、SVM のハイパーパラメータの調整を行う。

各重さに対する各指の接触力のバランスについて、それぞれ 15 トライアル分の平均を算出し、図 5 に棒グラフで示す。被験者 4 では各把持物体で比較的バランスが大きく変わっていることが確認できる。また、被験者 5 では示指の接触力のバランスが比較的小さいことが認められる。

次に、異なる重さの把持物体を把持した時の各指の接触力のバランスを、SVM を用いて識別した結果を図 6 に示す。被験者 1, 5, 6 については識別率が比較的低くなり、被験者 2, 3, 4 については識別率が高くなった。識別率が高ければ、その把持物体の組み合わせに対する各指の接触力のバランスのパターンが異なることを表している。つまり、被験者 1, 5, 6 は重量の変化に対する力の加え方の変化が比較的小さい被験者群と考えられる。識別率が比較的高い被験者については、被験者によって識別率の高い重さの組み合わせが異なった。被験者 4 では全

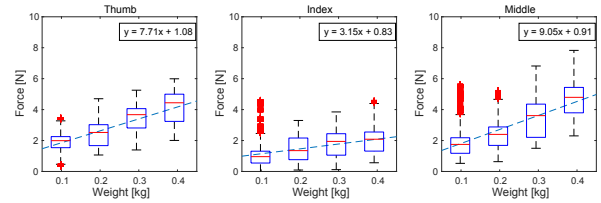


図 7 被験者全体を対象とした各指の接触力の分布と回帰直線

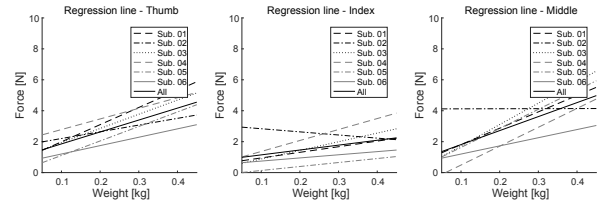


図 8 被験者全体の回帰直線と各被験者の回帰直線の比較

ての組み合わせで比較的高い識別率を示した。しかし、被験者 2 では 0.1 kg と 0.2 kg の組み合わせ及び 0.3 kg と 0.4 kg の組み合わせにおいて識別率が低くなり、被験者 3 では 0.1 kg と他の重さの組み合わせ以外では識別率が相対的に低くなった。このことから、識別率が比較的高い被験者については、被験者によって識別率の傾向が異なり、力の加え方の変化自体が多様である可能性がある。

これらの各指の接触力のバランスの解析結果から、重量の変化に対して各指の接触力のバランスが変わらないように指先の制御が行われる被験者もいれば、各指の接触力のバランスを変えるように制御する被験者もいると考えられ、被験者によって物体把持に対する戦略や力の加え方に差異が認められる可能性が示された。

3.4 被験者全体の解析

各被験者の接触力をまとめて被験者全体のデータとして扱い、解析を行う。被験者全体のデータをまとめて解析することによって、被験者間で共通に現れる 3 指の接触力の傾向について検討する。その後、被験者による個人差を分析し、力の加え方の差異がどこに現れるかを検討する。まず、被験者全体の異なる重さの物体に対する各指の接触力の変化を見る。その後、被験者全体のデータの回帰直線を求め、被験者ごとの回帰直線との比較を行う。次に、合計の接触力及びそれに対する各指の接触力のバランスについて検討する。各把持物体における被験者全体のデータを用いて、合計の接触力と各指の接触力のバランスについて平均と標準偏差をそれぞれ求める。

まず、被験者全体を対象とした各指の接触力の分布を箱ひげ図で図 7 に示す。また把持物体の重さに対する接触力の回帰直線もあわせて示している。被験者全体で見れば、把持物体の重さが増加すると各指の接触力が増加する傾向が認められる。また、最も軽い物体を把持した際に示指と中指の接触力は分散が大きくなった。母指と中指の回帰直線の傾きは、示指に対して大きく、切片は比較的近い値となった。このことから、示指及び中指の力の使い方は母指の力の使い方に比べて、被験者による差が大きいたことが示された。把持物体の重さに対する接触力

表 1 被験者全体を対象とした合計の接触力及び各指の接触力のバランス

	Total force		Thumb		Index finger		Middle finger	
Weight	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
[kg]	(N)		(%)		(%)		(%)	
0.1	5.1	2.3	0.40	0.10	0.20	0.09	0.40	0.12
0.2	6.2	1.8	0.39	0.08	0.21	0.08	0.40	0.12
0.3	8.6	2.2	0.40	0.05	0.21	0.08	0.40	0.09
0.4	10.8	2.3	0.38	0.04	0.19	0.06	0.43	0.06

の回帰直線を被験者ごとに図 8 に示す。図 7 に示した被験者全体を対象とした回帰直線もあわせて示している。各被験者についての回帰直線に注目すると、被験者ごとに傾きや切片は異なり、被験者によって力の加え方が異なることが示された。母指では各被験者についての回帰直線が被験者全体の回帰直線と類似した傾向を示すのに対して、示指及び中指では被験者全体の回帰直線と異なる傾向を示す被験者が認められた。また、示指の回帰直線の傾きは、母指及び中指の回帰直線の傾きに比べて小さいことが示された。

次に、被験者全体に対する接触力の合計及びそれに対する各指の接触力のバランスの分析結果を表 1 に示す。ここで、Mean は平均、SD は標準偏差を表す。先行研究 [4] [6] [9] と同様に、接触力の合計（把持力）の平均は重さに従って線形的に増加することが示された。接触力の合計の標準偏差は変化が少なかった。また、各指の接触力のバランスの平均は 0.1 kg～0.4 kg では変化がほとんど認められなかった。各指の接触力のバランスの標準偏差は、把持物体の重さが増えるに従って減少する傾向が認められた。このことから、被験者の力の加え方の差異は軽い物体であれば大きい、大きい物体であれば小さくなること示された。

4. おわりに

本研究では、物体把持時における親指、示指、中指の接触力に着目し、異なる重さの物体に対する各指の接触力の変化について分析した。物体を持ち上げ、静止している状態における 3 指の接触力に注目し、各指の接触力のバランスを求めた。また、SVM を用いて、異なる重さの物体を把持した際の接触力のバランスを対象として 2 値判別を複数の組み合わせについて行った。各被験者の識別率に基づいて、重量の変化に対する力の加え方の変化が比較的少ない被験者群と、力の加え方の変化が多様である被験者群に分けられた。その後、被験者全体のデータを用いて被験者全体の傾向や被験者ごとの力の加え方の差異についても分析した。

被験者全体のデータを用いた分析結果では、把持物体の重さが増加すると各指の接触力の平均が線形的に増加し、各指の接触力のバランスは変化しないことが確認され、先行研究と同様の結果が得られた。しかし、被験者ごとに分析を行った結果、重さの違いに対して把持力の変動が少ない被験者や重さに対する中指の働きが異なる被験者が確認され、被験者によって物体把持に対する戦略や、力の加え方が異なる可能性が示された。

また、各指の接触力のバランスが重量によって変化する被験者が存在した。今後の研究では、把持している物体の姿勢を取得するため、物体や指の位置について同時に測定することが求められる。

文 献

- [1] J. R. Napier, "The Prehensile Movements of the Human Hand", *The Journal of Bone and Joint Surgery*, Vol. 38-B, No. 4, pp. 902-913, Nov. 1956.
- [2] T. Feix, J. Romero, H. Schmiedmayer, A. Dollar, and D. Kragic, "The GRASP Taxonomy of Human Grasp Types", *IEEE Trans. On Human-Machine Systems*, Vol. 46, No. 1, pp. 66-77, Feb. 2016.
- [3] V. M. Zatsiorsky and M. L. Latash, "Multifinger Prehension: an Overview", *Journal of Motor Behavior*, Vol. 40, No. 5, pp. 446-476, 2008.
- [4] G. Westling, R. S. Johansson, "Factors Influencing the Force Control during Precision Grip", *Experiential Brain Research*, Vol. 53, No. 2, pp. 277-284, Jan. 1984.
- [5] R. S. Johansson, G. Westling, "Roles of Glabrous Skin Receptors and Sensorimotor Memory in Automatic Control of Precision Grip when Lifting Rougher or More Slippery Objects", *Experiential Brain Research*, Vol. 56, No. 3, pp. 550-564, Oct. 1984.
- [6] R. S. Johansson, G. Westling, "Coordinated Isometric Muscle Commands Adequately and Erroneously Programmed for the Weight during Lifting Task with Precision Grip", *Experiential Brain Research*, Vol. 71, No. 1, pp. 59-71, Jun. 1988.
- [7] A. M. Gordon, H. Forssberg, R.S.Johansson, G. Westling, "Visual Size Cues in the Programming of Manipulative Forces during Precision Grip", *Experiential Brain Research*, Vol. 83, No. 3, pp. 477-482, Feb. 1991.
- [8] P. Jenmalm, R. S. Johansson, "Visual and Somatosensory Information about Object Shape Control Manipulative Fingertip Forces", *The Journal of Neuroscience*, Vol. 17, No. 11, pp. 4486-4499, Jun. 1997.
- [9] H. Kinoshita, T. Murase, and T. Bandou, "Grip Posture and Forces during Holding Cylindrical Objects with Circular Grips", *Ergonomics*, Vol. 39, No. 9, pp. 1163-1176, Sep. 1996.
- [10] E. Battaglia, M. Bianchi, A. Altobelli, G. Grioli, M. G. Catalano, A. Serio, M. Santello and A. Bicchi, "Thimble-Sense: A Fingertip-wearable Tactile Sensor for Grasp Analysis", *IEEE Trans. on Haptics*, Vol. 9, No. 1, pp. 121-133, 2016.
- [11] M. Nakao, R. Kitamura, T. Sato and K. Minato, "A Model for Sharing Haptic Interaction", *IEEE Trans. on Haptics*, Vol. 3, No. 4, pp. 292-296, 2010.
- [12] M. Nakao, M. Senoo, T. Matsuda, "Fingertip-Based Feature Analysis for the Push and Stroke Manipulation of Elastic Objects", *IEEE Trans. on Haptics*, Vol. 10, No. 4, pp. 523-532, 2017.
- [13] 妹尾 昌幸, 中尾 恵, 松田 哲也, "実物体を対象とした手指による押し込み及びなぞり操作に関する定量分析", *電子情報通信学会技術報告 (MBE)*, Vol. 113, pp. 55-60, Mar 2016.
- [14] 山下 達也, 中尾 恵, 松田 哲也, "つまみ及びつかみ操作に関する指先の動的特徴量の分析", *生体医工学*, Annual 56, pp. 71-72, Jun 2018.
- [15] F. Gao, S. Li, Z. M. Li, M. L. Latash, V. M. Zatsiorsky, "Matrix Analyses of Interaction among Fingers in Static Force Production Tasks", *Biological Cybernetics*, Vol. 89, No. 6, pp. 407-414, Dec. 2003.
- [16] 池内 克史, "人間の把持行動観察によるロボットの把持戦略の生成", *日本ロボット学会誌*, Vol. 18, No. 6, pp. 792-797, 2000.