

---

令和5年度 修士学位論文

物体持ち上げ操作における  
手指皮膚感覚に加わる力と重量知覚との  
関係性に関する研究

指導教員 池浦 良淳 教授

三重大学大学院工学研究科  
博士前期課程 機械工学専攻  
人間支援システム研究室

内田 雄大

# 目次

---

|                              |           |
|------------------------------|-----------|
| 目次.....                      | 1         |
| <b>第1章 序論.....</b>           | <b>1</b>  |
| 1.1 研究背景.....                | 1         |
| 1.2 研究目的.....                | 7         |
| 1.3 本論文の構成.....              | 8         |
| <b>第2章 重量感の変更方法.....</b>     | <b>9</b>  |
| 2.1 皮膚感覚への刺激による重量感の変更方法..... | 9         |
| 2.2 離地時間及び把持力の計測実験.....      | 13        |
| 2.2.1 実験装置の構成.....           | 13        |
| 2.2.2 離地時間計測実験の内容.....       | 15        |
| 2.2.3 離地時間計測実験の結果.....       | 17        |
| 2.2.4 把持力計測実験の内容.....        | 18        |
| 2.2.5 把持力測定実験の結果.....        | 18        |
| <b>第3章 重量感評価実験.....</b>      | <b>20</b> |
| 3.1 実験装置の構成.....             | 20        |
| 3.2 提示力のプロフィール.....          | 25        |
| 3.3 実験条件.....                | 26        |
| 3.4 実験手順.....                | 27        |
| <b>第4章 実験結果及び考察.....</b>     | <b>29</b> |
| 4.1 実験結果.....                | 29        |
| 4.2 実験結果の考察.....             | 34        |
| <b>第5章 結論.....</b>           | <b>41</b> |
| 5.1 まとめ.....                 | 41        |
| 5.2 今後の課題.....               | 42        |
| 参考文献.....                    | 43        |

謝辞..... 46

# 第1章

## 序論

### 1.1 研究背景

近年，日本では少子高齢化の影響により労働者の人口減少や高齢化が問題となっている。Fig. 1.1 に示すように 2022 年 10 月 1 日の時点で日本の総人口 1 億 2495 万人に対し，65 歳以上の高齢者の人口は 3624 万人となり，総人口に占める割合は 29.0%となった。また，少子高齢化問題は今後も深刻化していくと予想され，2070 年の総人口は 8700 万人まで減少し，65 歳以上の高齢者の割合は 38.7%に達すると推計されている。また，Fig. 1.2 に示すように，労働力人口に占める 65 歳以上の割合は上昇傾向にあることが分かる。内閣府の「高齢者の経済生活に関する調査」（全国の 60 歳以上の男女が対象）によると，Fig. 1.3 のように 2019 年の段階で 60 歳以上の男女の約 4 割が，働けるうちはいつまでも働きたいと回答しており，70 歳くらいまでもしくはそれ以上との回答と合計すると，約 9 割が高齢期においても高い就業意欲を持っていることが分かる。さらに Fig. 1.4 より，年齢に関わらず女性の就業率は比較的増加しており，社会進出をする女性が増えていることが分かる。以上のことから，高齢労働者や女性労働者の人口は増加していくと予想される。しかし，重量物の運搬などの身体的に大きな負担のかかる作業の機会が多い重筋作業現場において，比較的筋力の低い者が働くことは困難である。このような問題に対して，モータなどのアクチュエータにより作業に要する力の一部を補うことが可能なパワーアシスト装置の導入が有効であり，作業負担の軽減や作業効率の向上，高齢者や筋力の低い者の重筋作業への参加が期待できる。

パワーアシスト装置の研究は数多く行われており，制御方法に関する研究としては，Kazerooni らのアーム型パワーアシスト装置 Extender<sup>[1]</sup>や，林原らの負荷の重力成分と動的成分で異なったアシスト比を定めた制御法<sup>[2][3]</sup>，小菅らや池浦ら，神吉らなどのインピーダンス制御を適用したものなどがある<sup>[4]-[6]</sup>。また，移動性能の向上を目指した研究<sup>[7]-[9]</sup>や装着型のパワーアシストスーツに関する研究<sup>[10]-[13]</sup>など，幅広く行われてい

る。永井らはパワーアシスト装置の要求事項を力や動作の補助を目的とするものが第一次的要求、安全性、安心感、使いやすさを目的とするものが第二次的要求と分類している<sup>[14]</sup>。パワーアシスト装置は人と接触した状態で使用されるため、第二次的要求の向上は第一次的要求と同程度かそれ以上に重要な課題であるとしている。現状、パワーアシスト装置の研究は第一次的要求に関するものが大半であるが、本研究では第二次的要求を研究対象としている。それは下記の問題を重要視しているからである。

人の知覚プロセスでは、環境から身体にある感覚受容器への刺激を入力として、神経系でその感覚情報の強さや質を区別している (Fig. 1.5)。重さの感覚の場合、腕、手首、指の末節における固有受容感覚と指腹部における皮膚感覚の統合によって知覚されている。このような原理で普段、人は物体を持ち上げる際、初めに過去の経験や物体の外観から重量を予測し、それに応じた力を加え、物体が床から離地することで重量を知覚している。この予測した重量と物体を持ち上げて体感する重量が異なると、人は違和感を抱くことがあるが、日常生活においてはさほど影響しない。しかし、パワーアシスト装置を用いる場合、アシスト力により物体の重量は大幅に小さくなる。そのため、操作者が十分に機械の特性を理解していないと、予測していた重量と体感する重量が大きく異なり、違和感のみならず危険な操作に繋がる可能性がある。この予測重量と体感重量の違いによる重量感覚問題を解決する手法として、2つの方法が挙げられる。1つ目は予測重量を体感重量に近づける方法である。そのためには、人がパワーアシスト装置の特性を理解し、機械に合わせた操作を行う必要がある。しかし、パワーアシスト装置を使用する現場では、同じ物体を同じ装置を用いて持ち上げるだけでなく、様々な外観や重量の物体の持ち上げを行うと想定される。仮に、異なる物体を全て一定の重量になるようアシストしたとしても、物体の外観によって人の予測重量は変わるため、機械に合わせた操作を行うには十分な慣れが必要である。また、時間が経つと慣れが低減していくことや、人が同様の持ち上げを繰り返し行い続けるのは困難であることが考えられる。そのため、もう一方の体感重量を予測重量に近づける方法が有効であると考えられる。この場合、アシスト力を小さくして予測重量に合わせてはパワーアシスト装置の意味がないため、人の負担を変えずに重量感を変化させることが求められる。

本研究室では、様々な手法を用いて重量感を変化させる研究が行われている。Rahman らや多氣らは、パワーアシスト装置を用いて物体を持ち上げた際の、重力成分を小さくしたまま慣性成分を変化させることで重量感を変えられることを示している

[15][16]. また、池浦らは、Fig. 1.6 に示すような実験装置を製作し、物体が床から離地するまでの反力と人が加える力との関係を制御することで重量感を変化させられることを明らかにした[17].

パワーアシスト装置に焦点を当てていないが、皮膚感覚への刺激により重量感を再現することを目指した研究もある。南澤らは固有受容感覚を刺激せずとも指の皮膚感覚の刺激のみで重量感を伝達することが可能であることを明らかにした [18]. そして、物体を把持した際の指先の皮膚に加わる力を再現可能な指先装着型デバイス (Fig. 1.7 参照) を開発し、物体の質量は変えていないのにもかかわらず重量感を変化させることができることを示した。他にも、栗田らの指先のすべり量という観点から皮膚変形を指標化し制御することで、物体を持ち上げた時の感覚を呈示した研究[19]や、金らの指先に振動刺激を与えることで重量感を表現した研究[20]などがある。

図 1-1-2 高齢化の推移と将来推計

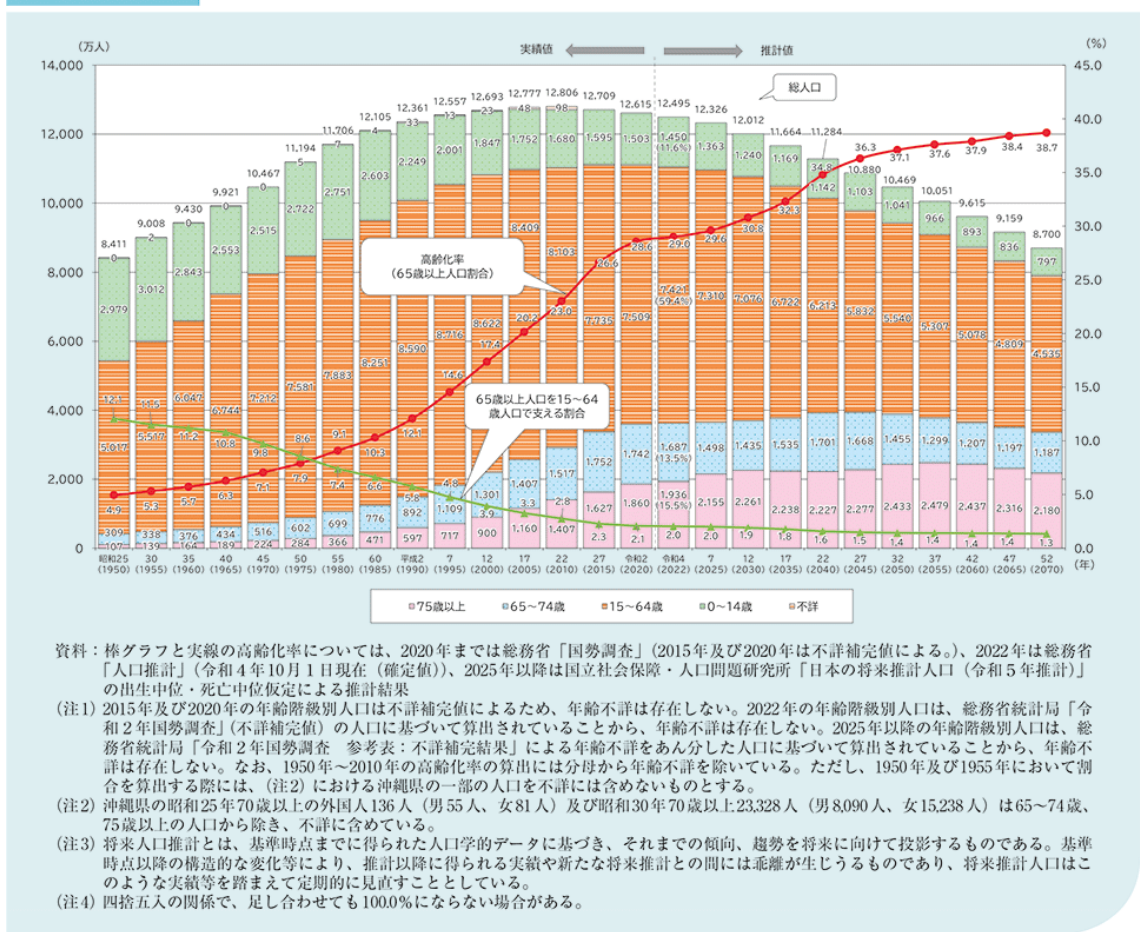
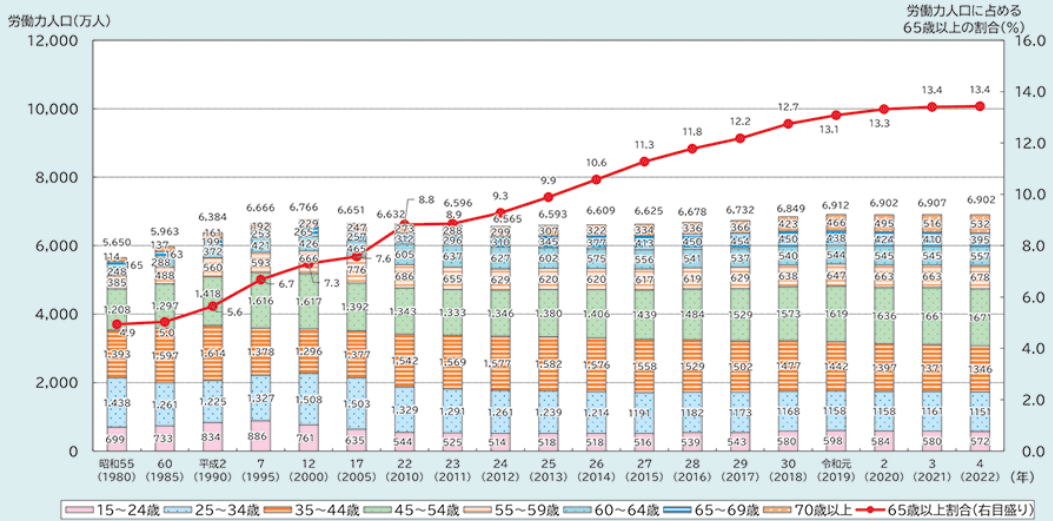


Fig. 1.1 Aging Population trends and future projections<sup>[21]</sup>

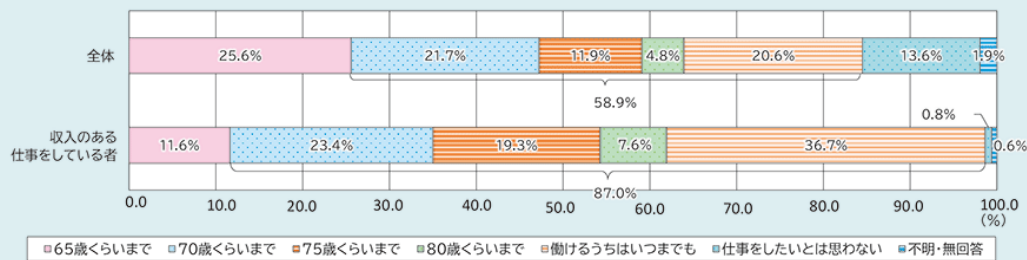
図1-2-1-9 労働力人口の推移



資料：総務省「労働力調査」  
 (注1) 年平均の値  
 (注2) 「労働力人口」とは、15歳以上人口のうち、就業者と完全失業者を合わせたものをいう。  
 (注3) 平成23年は岩手県、宮城県及び福島県において調査実施が一時困難となったため、補完的に推計した値を用いている。

Fig. 1.2 Changes in labor force<sup>[22]</sup>

図1-2-1-15 あなたは、何歳ごろまで収入を伴う仕事をしたいですか (択一回答)

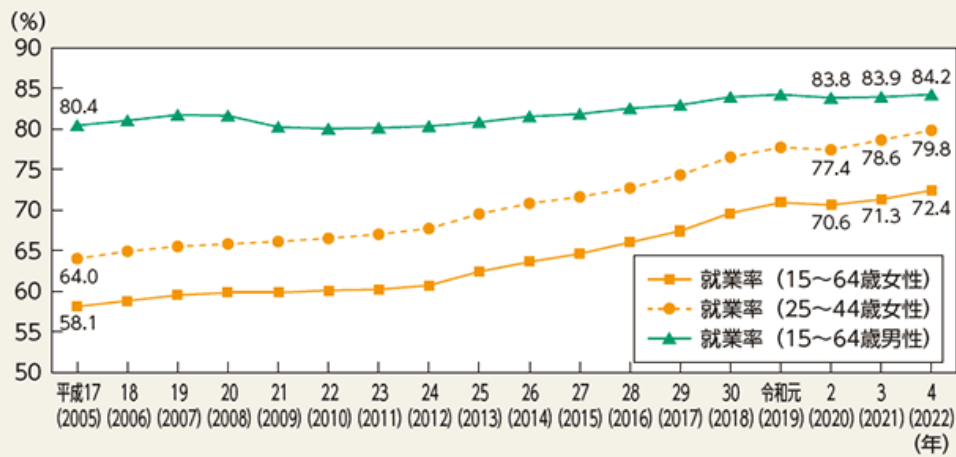


資料：内閣府「高齢者の経済生活に関する調査」(令和元年度)  
 (注1) 調査対象は、全国の60歳以上の男女  
 (注2) 四捨五入の関係で、足し合わせても100.0%にならない場合がある。

Fig. 1.3 Questionnaire about how old you want to work with income up to what age<sup>[22]</sup>

2-1図 女性就業率の推移

○就業率は、近年男女ともに上昇傾向。令和4（2022）年は、15～64歳の女性は72.4%、25～44歳の女性は79.8%、15～64歳の男性は84.2%。



(備考) 1. 総務省「労働力調査（基本集計）」より作成。なお、労働力調査では令和4（2022）年1月分結果から算出の基礎となるベンチマーク人口を令和2（2020）年国勢調査結果を基準とする推計人口に切り替えた。当グラフでは、過去数値について新基準切り替え以前の既公表値を使用している。  
2. 平成23（2011）年の就業率は、総務省が補完的に推計した値。

Fig. 1.4 Percentage of women in the workforce<sup>[23]</sup>

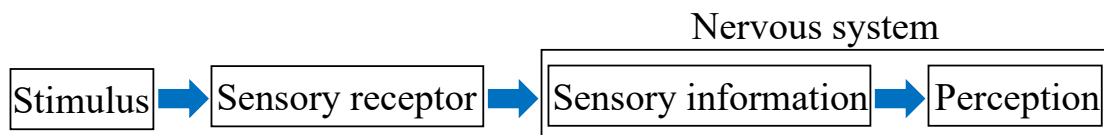


Fig. 1.5 Perception process



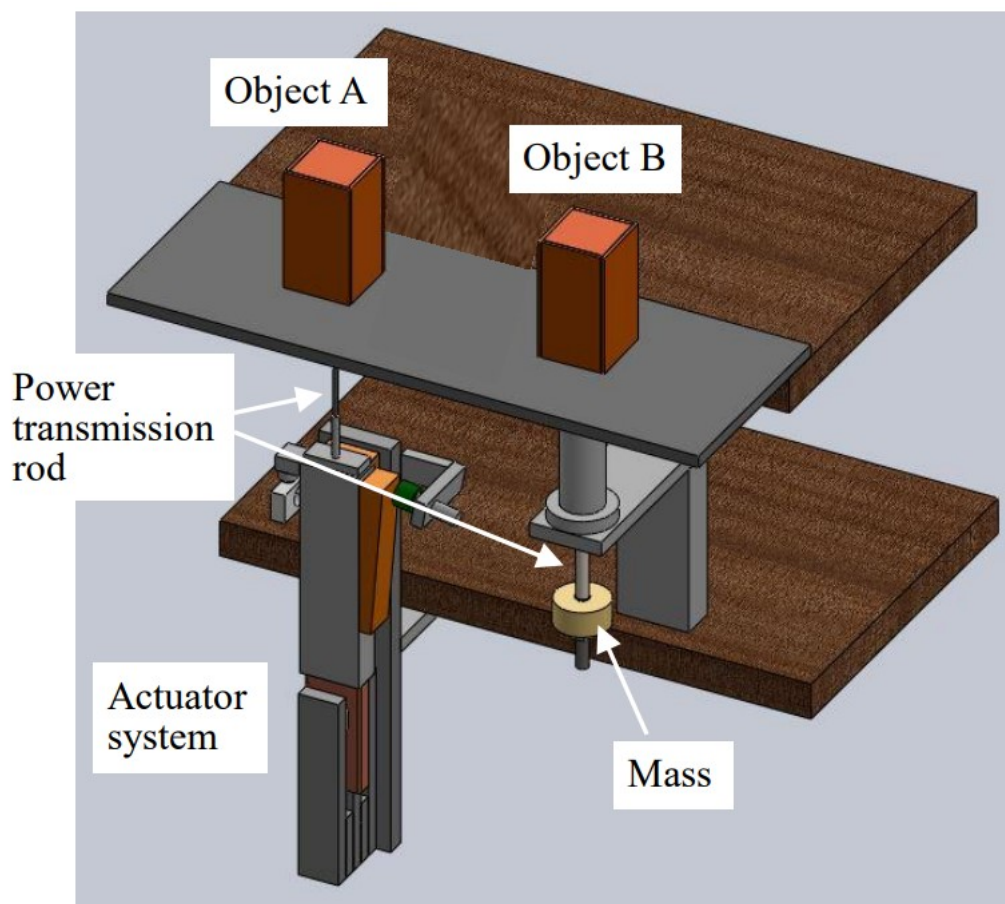


Fig. 1.6 Experimental device (Ikeura et al.)



Fig. 1.7 Fingertip-mounted devices (Minamizawa et al.)

## 1.2 研究目的

1.1 節で述べたように、パワーアシスト装置使用時の重量感覚問題を解決するためには、作業者の負担を変えずに体感重量を予測重量に近づけることが求められる。本研究の先行研究で提案された手法は重量感の制御に有効であった。しかし、いずれの手法も、アシスト力を制御することにより重量感を変化させたものであった。仮にアシスト力を制御せずに他の手法で重量感を変化させることができればパワーアシスト装置のシステム変更をする必要がなく、容易にパワーアシスト装置に組み込むことができると考えられる。また、その手法とアシスト力制御を組み合わせることができれば、より大きな重量感の変化を生み出すことができる可能性がある。

以上を踏まえ、本研究では Fig. 1.8 に示すような一軸鉛直駆動式グリップを搭載したパワーアシスト装置を提案する。このパワーアシスト装置は、持ち上げ力のアシストに加え、持ち上げ操作用グリップから把持する指のせん断方向に力を発生させる機能を持つ。物体を持ち上げた際の、指の皮膚感覚に加わるせん断方向の力をグリップから発生させた力により制御することで、重量感を変化させることが本提案の意図である。その実現のためには、まず指への力の加え方によって重量感が変化するかを調べる必要がある。そこで、本研究では指の皮膚感覚へのせん断方向の力の加え方と重量感の関係性を明らかにすることを目的とする。

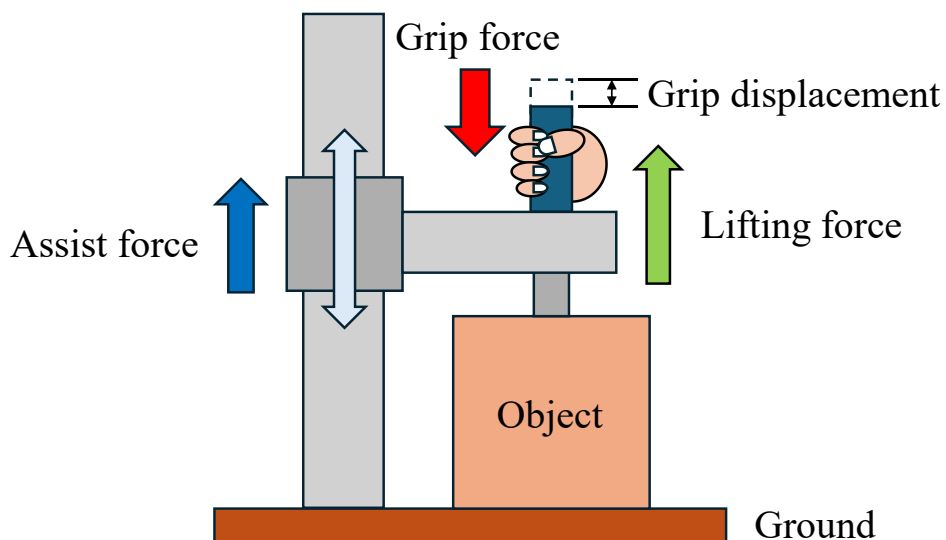


Fig. 1.8 Power assist device equipped with moving grip

### 1.3 本論文の構成

本論文の構成を以下に示す。まず、第2章では重量感の変更方法に関して述べる。第3章では実験装置及び実験方法について述べる。第4章では3章での実験の結果と考察を述べる。最後に第5章では本研究のまとめと今後の課題について述べる。

# 第2章

## 重量感の変更方法

本研究では、指の皮膚感覚へのせん断方向の力の加え方によって重量感を変化させる手法を提案した。そこで本章では、重量感の変更方法の詳細に関して説明する。

### 2.1 皮膚感覚への刺激による重量感の変更方法

物体に連結されたグリップを鉛直方向に持ち上げた時の様子を Fig. 2.1 に示す。人の持ち上げ力を  $f_h$ [N]、物体の質量を  $m$ [kg]、重力加速度を  $g$ [m/s<sup>2</sup>]、接地状態において物体の受けるテーブルからの反力を  $R$ [N]、物体以外の質量を無視できるとすると、力のつり合い式は(1)式で与えられる。

$$f_h + R = mg \quad (1)$$

この式より、 $f_h < mg$  のとき、物体はテーブルに接地した状態にある。そして、持ち上げ力  $f_h$  を増大させていき、 $f_h = mg$  になった瞬間に物体は床から離地する。持ち上げ力を加えてから物体が離地するまでの時間を  $t_d$ [s] とすると、持ち上げ力  $f_h$  は Fig. 2.2 に示すようなプロフィールを描き、人はこの時間の中に固有受容感覚と指の皮膚感覚で物体の重量を知覚している。この時、皮膚感覚を担うグリップを把持する指には、せん断方向の下向きに持ち上げ力  $f_h$  と等しい力が加わり、皮膚変形が起こることで重量を知覚している。そこで、本研究では物体が離地するまでの指に加わるせん断方向の力のプロフィールをグリップからの発生力によって変更することで、重量感を変化させる手法を提案し、検証を行った。

本手法を用いた実験では、物体の持ち上げ操作は行わず、Fig. 2.3 に示す実験装置モデルのような、一軸鉛直駆動式グリップがテーブルに固定されたものを使用した。本装置はグリップの内部のアクチュエータによって、鉛直方向に提示力  $f_a$ [N] を発生させることができる。持ち上げ操作を行う場合、皮膚感覚以外に固有受容感覚が刺激され

るだけでなく、持ち上げ力や把持力も考慮する必要があるため、本研究ではまず、指への力の加え方によって重量感が変化するかの検証を行う。1.1 節で述べた南澤らが固有受容感覚を刺激せずとも皮膚感覚の刺激のみで重量感を与えることが可能なことを示した結果から、持ち上げ操作を行わず、グリップを静的に把持した状態においても、Fig. 2.4 に示すように離地時間 $t_d$ と等しい制御時間 $t_c$ [s]で、重量 $mg$ と等しくなるような提示力 $f_d$ を与えることで、重量 $mg$ の物体を離地時間 $t_d$ で持ち上げた際の重量感を再現する。そして、制御時間 $t_c$ で $mg$ となる条件は変えずに、それまでの提示力 $f_d$ のプロファイルを様々な形に変更することで重量感を変化させる。その際の提示力 $f_d$ のプロファイルを微分したものを Fig. 2.5 に示す。プロフィール 1 では、制御開始から急激に提示力が増加していくことにより、人はそれを重いと感じ、対してプロフィール 3 では、制御後半まで提示力が小さく、増加し始めるタイミングが遅いため、他のプロフィールに比べて軽いと感じると仮定して、検証を行う。

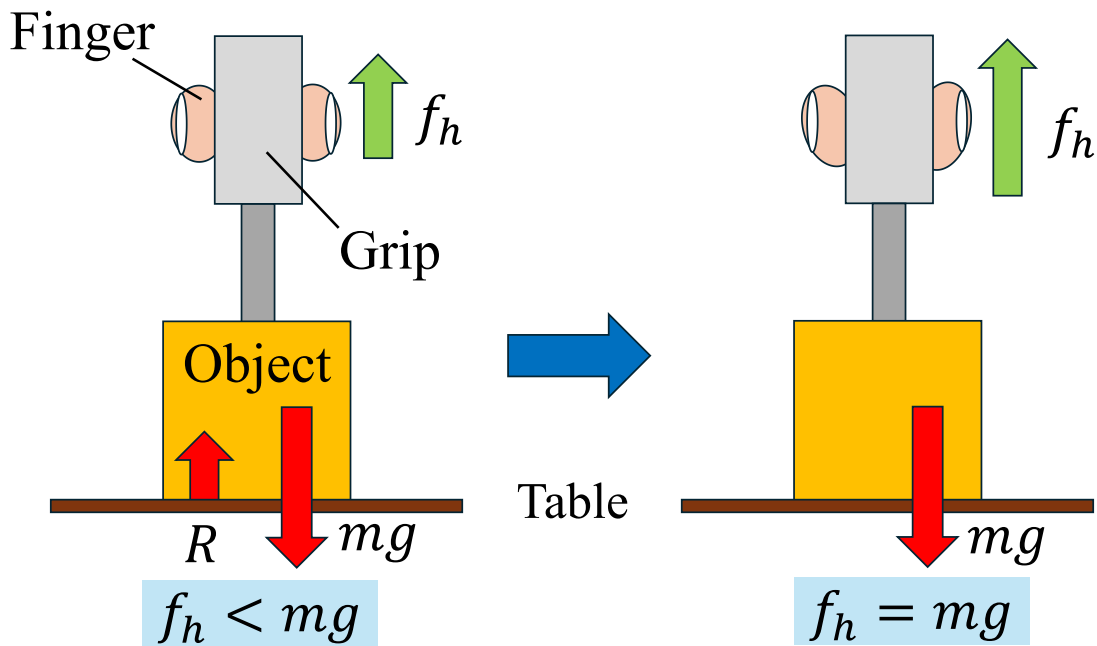


Fig. 2.1 Object lifting operation with grip

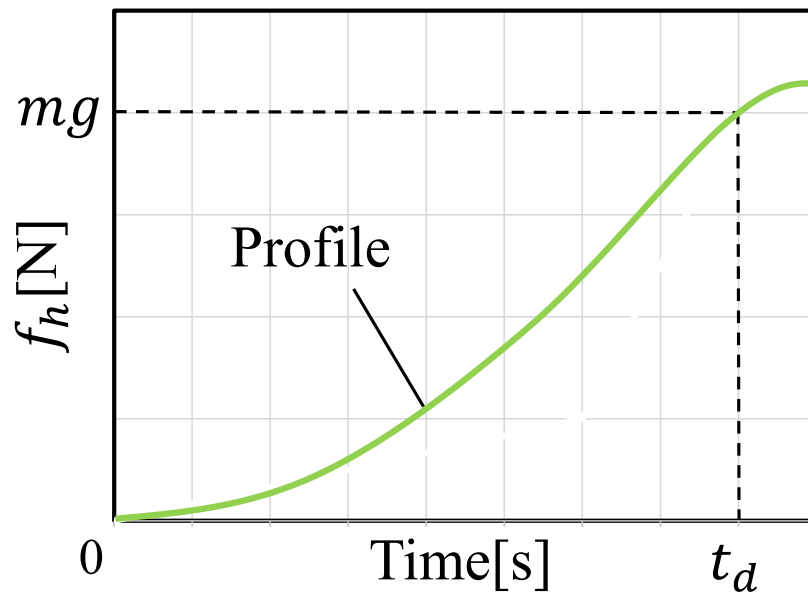


Fig. 2.2 Profile of lifting force in object lifting operation

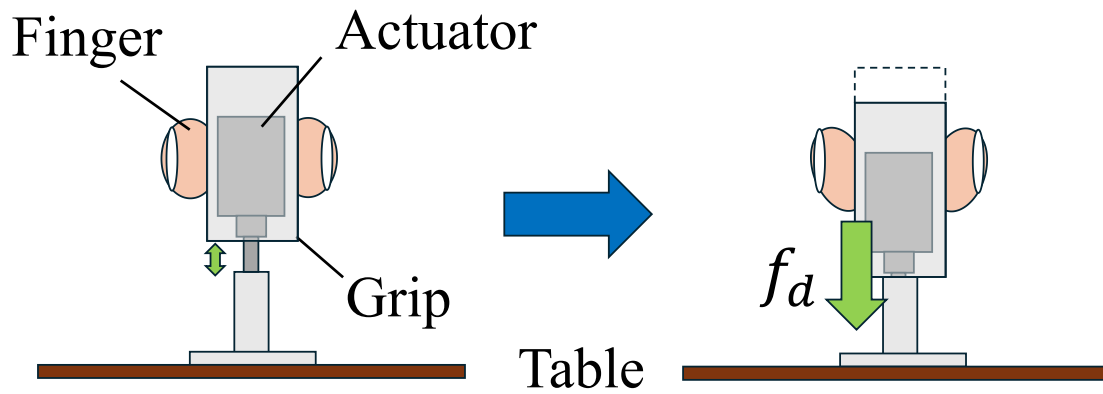


Fig. 2.3 Experimental device model with grip driven by actuator

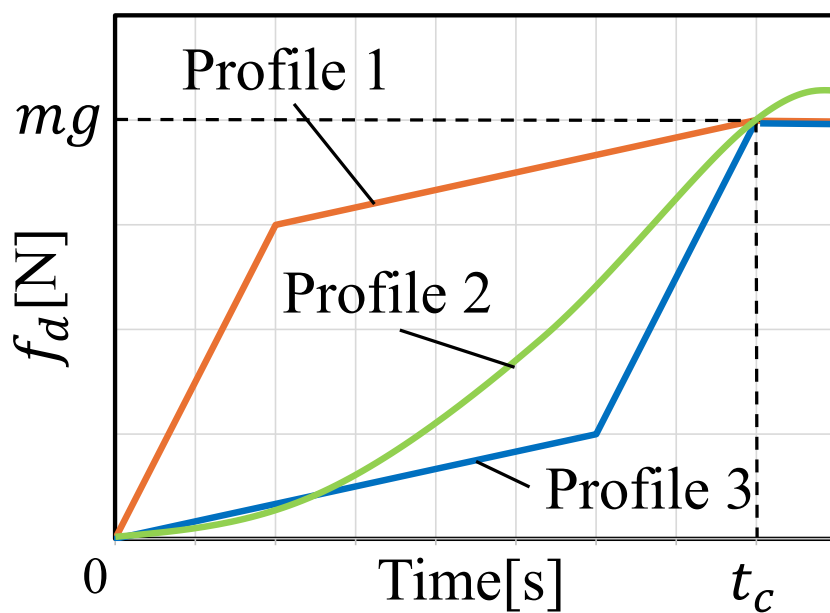


Fig. 2.4 Profiles of the displaying force generated by the grip

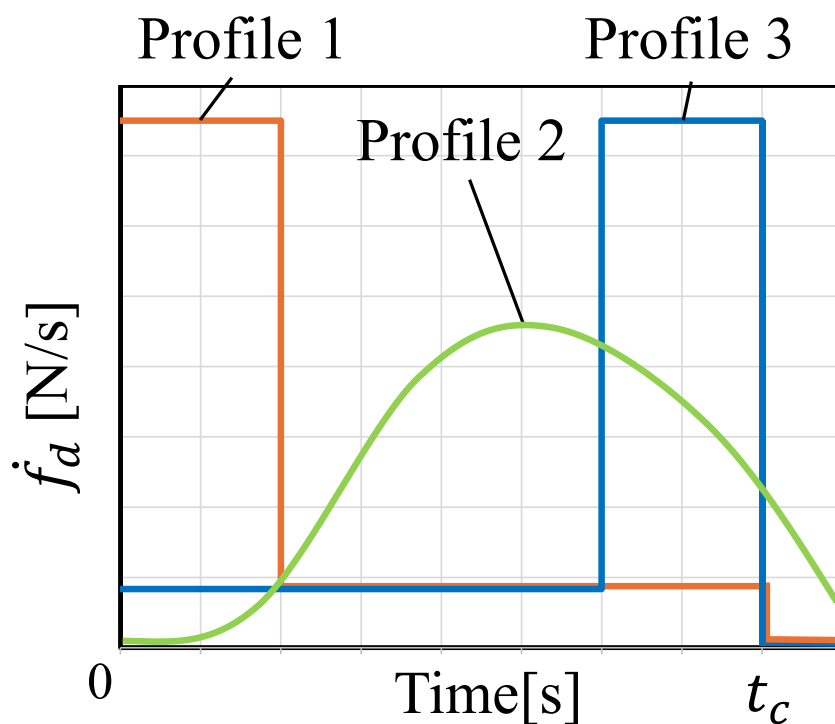


Fig. 2.5 Profiles of the displaying force differential generated by the grip

## 2.2 離地時間及び把持力の計測実験

前節で述べた，持ち上げ操作を行わずにグリップから提示力 $f_d$ を発生させ，把持する指のせん断方向に力を加えることで物体の持ち上げ操作を行ったときの重量感を再現し，提示力のプロフィールを変更することで重量感を変化させる手法では，オープンループの力制御でグリップから提示力 $f_d$ を発生させる．そのため，実際に物体を持ち上げた際の重量感を与えるには，質量 $m$ の物体を持ち上げたときの離地時間 $t_d$ と等しいグリップの制御時間 $t_c$ を定める必要があった．また，グリップを把持する力の大小により，指の皮膚変形の度合いも変化し，重量感も変わるため，物体を持ち上げた時のグリップを把持する力 $f_g$ [N]もあらかじめ求め，その強さでグリップを把持してもらう必要があった．以上を踏まえて本研究では，まず初めに持ち上げ操作における物体が離地するまでの時間を計測する実験とグリップを把持する力を計測する実験を行った．本節では，実験装置の構成，実験内容とその結果に関して述べる．

### 2.2.1 実験装置の構成

実験装置の構成図と外観を Fig. 2.6, Fig. 2.7 に示す．実験装置はグリップ，圧力センサ，アーム，スタンド，リニアガイド，おもり，テーブル，力センサなどから構成される．グリップはアームを介してリニアガイドに繋がっており，鉛直方向のみに動作する機構になっているため，Fig. 2.8 のようにグリップを把持して持ち上げることで，グリップに連結されたおもりがテーブルから離地する．スタンドには，グリップの直径より大きいスペースを設けているため，グリップはスタンドと干渉することなく持ち上げることができる．その時の把持力をグリップに取り付けられた圧力センサを介して，データレコーダで計測できる．また，テーブルに取り付けられた力センサのアナログ信号はひずみアンプで増幅され，3章にて述べる信号処理ユニットに入力されることで，力センサにかかる荷重を計測できる．加えて，カウンターウェイトによってグリップやアームなどの質量を無視できる構造になっているため，おもりのみを持ち上げるのと同等の操作を行うことが可能である．



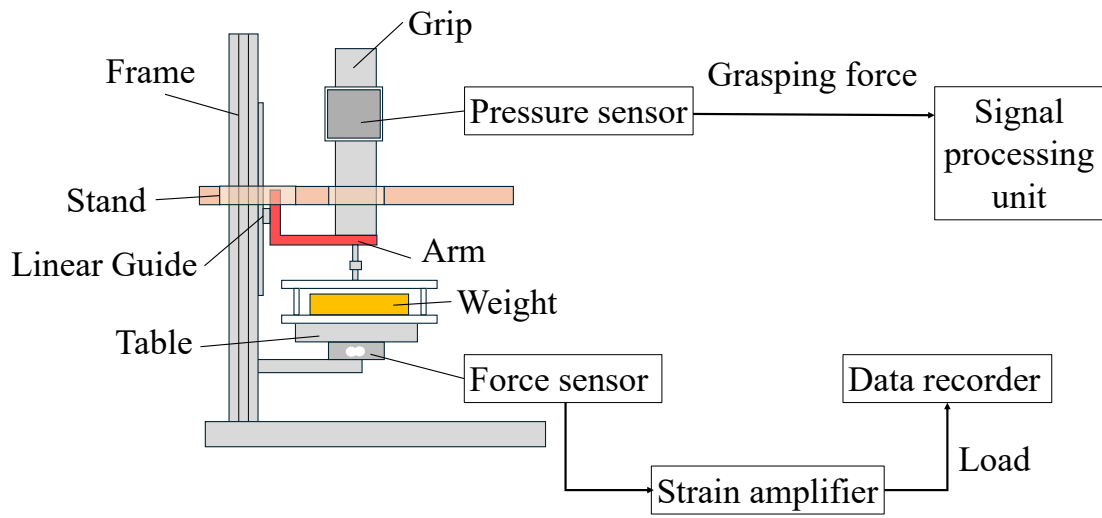


Fig. 2.6 Configuration of the experimental device

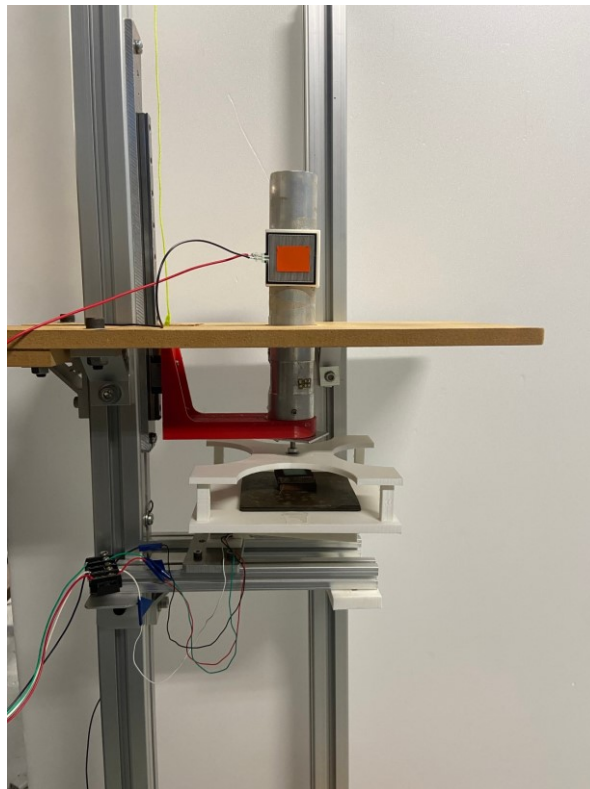


Fig. 2.7 Appearance of the experimental device

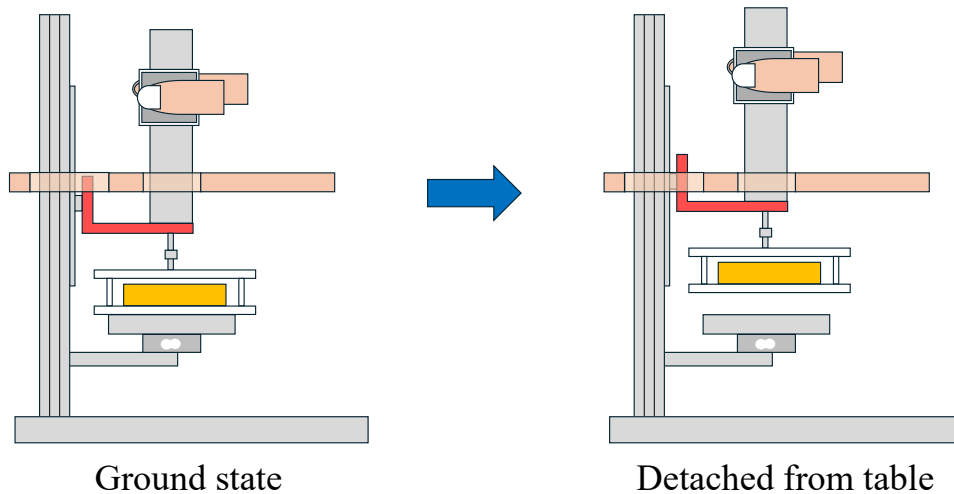


Fig. 2.8 Lifting operation using the experimental device

### 2.2.2 離地時間計測実験の内容

本実験は、グリップから発生させる提示力 $f_d$ の制御時間 $t_c$ を定めるために、実際に物体の持ち上げ操作を行ったときの、持ち上げ力を加えてから離地するまでの時間 $t_d$ を求めることを目的に行った。

おもりは 0.1kg, 0.3kg, 0.5kg の 3 種類を用いて実験を行い、各質量のおもりを持ち上げた時の離地時間 $t_d$ を測定した。Fig. 2.9 に示すように、実験協力者には示指と母指でグリップを把持し、手首はスタンドに固定した状態で、指の動きのみで 10mm 程度持ち上げを行うように指示した。これは、重量感を変化させる本提案手法では、持ち上げ操作は行わずに、グリップから把持する指のせん断方向に力を発生させることで、重量感を再現するため、その状況に合わせた離地時間を計測したかったからである。また、持ち上げ開始のタイミングは LED ライトによって合図を出し、目標高さまで持ち上げたら下して次の合図まで、グリップを把持したまま待機するように指示した。

実験手順を説明する。実験協力者にはまず、全体の流れと内容に関して説明を行った。続いて、持ち上げ操作に慣れるまで繰り返し練習を行ってもらい、データレコーダで計測した力センサからの信号波形が揃ってきたら、本番の実験を開始した。持ち上げてから下すまでを 1 回の持ち上げ操作として、30 回の持ち上げ操作を行ったら、操作をやるよう伝え、その後 3 分時間を空けて、次のおもりで練習から同様の手順で実験を行った。実験では、0.1kg, 0.3kg, 0.5kg のおもりの順に計測を行い、0.5kg のおもりで計測を行ったら終了とした。また、実験協力者は 6 名とした。

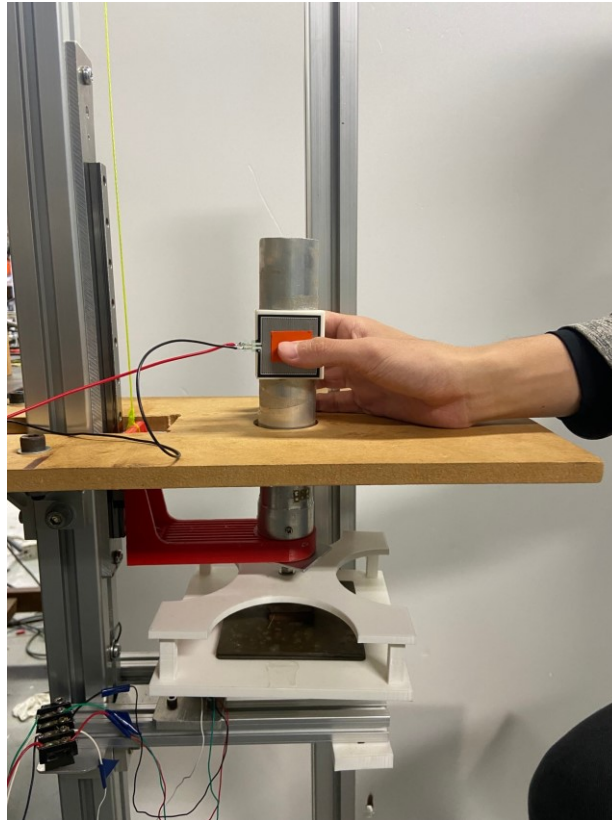


Fig. 2.9 How to lift the grip

### 2.2.3 離地時間計測実験の結果

Fig. 2.10 に、実験協力者 A の 0.5kg のおもりで実験を行った際のカセンサから得られた 1 回分の持ち上げ操作の計測結果を示す。グラフは計測データを最小値で割り、-1 を掛けることで正規化したものである。横軸は時間、縦軸はセンサからの出力を表している。波形の立ち上がりを持ち上げ開始点、出力値が 0 に達した瞬間を物体が離地した点として、その間の時間を離地時間と定めた。そして、30 本分のデータから外れ値を除いたものを平均した結果を、離地時間 $t_d$ とした。実験協力者毎の 0.1kg, 0.3kg, 0.5kg のおもりを持ち上げた際の離地時間 $t_d$ と標準偏差の結果を Table 2.1 に示す。

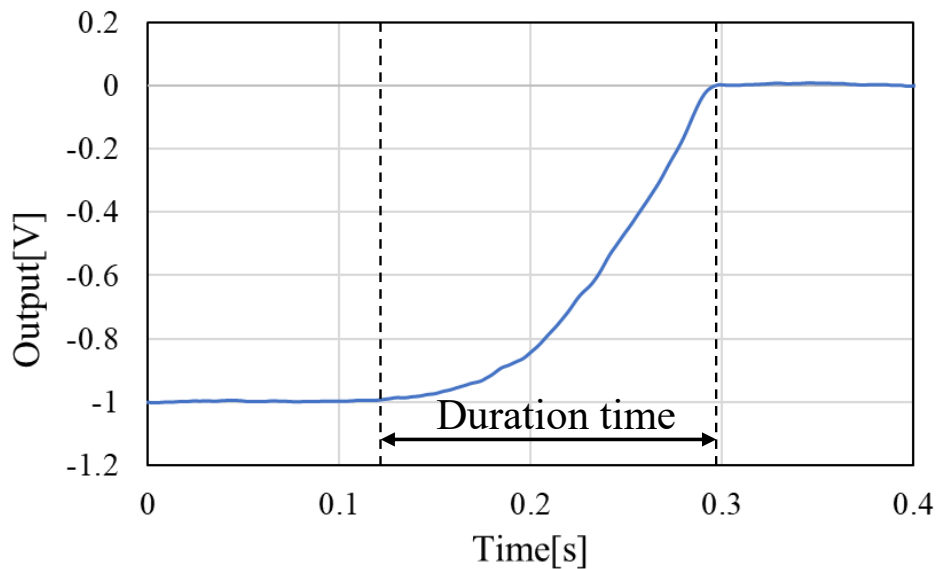


Fig. 2.10 One-time lifting data of subject A

Table 2.1 Results detached time

| Subject | 0.1[kg]   |                       | 0.3[kg]   |                       | 0.5[kg]   |                       |
|---------|-----------|-----------------------|-----------|-----------------------|-----------|-----------------------|
|         | $t_d$ [s] | Standard deviation[s] | $t_d$ [s] | Standard deviation[s] | $t_d$ [s] | Standard deviation[s] |
| A       | 0.099     | 0.013                 | 0.145     | 0.022                 | 0.164     | 0.022                 |
| B       | 0.093     | 0.021                 | 0.122     | 0.018                 | 0.163     | 0.026                 |
| C       | 0.135     | 0.032                 | 0.179     | 0.020                 | 0.204     | 0.017                 |
| D       | 0.078     | 0.013                 | 0.093     | 0.015                 | 0.090     | 0.013                 |
| E       | 0.091     | 0.020                 | 0.172     | 0.017                 | 0.211     | 0.027                 |
| F       | 0.115     | 0.016                 | 0.132     | 0.016                 | 0.190     | 0.017                 |

### 2.2.4 把持力計測実験の内容

本実験は、重量感を変化させる手法を検証する際にグリップを把持する力を指定する必要があったため、実際に物体を持ち上げた際の把持力を求めることを目的に行った。

2.2.2 項で述べた離地時間計測実験と同様に、0.1kg, 0.3kg, 0.5kg の3種類のおもりを準備し、示指と母指でグリップを把持してもらい、手首をスタンドに固定した状態で、指の動きのみで10mm程度持ち上げるように指示した。また、持ち上げるタイミングは50BPMに設定したメトロノームから発生する一音ごとに合わせて持ち上げて下す動作を連続で行ってもらった。加えて、下している間もグリップを離さず、軽く触れた状態で、持ち上げる時は把持することを意識せず、自然な持ち上げを行うように指示した。

実験手順を説明する。実験協力者にはまず、全体の流れと内容に関して説明を行った。続いて、音に合わせて持ち上げて下す操作の練習を行い、慣れてきたら本番の実験を開始した。連続で11回の持ち上げ操作を行ったら、操作をやめるように伝え、3分時間を空けて、次のおもりに変更し、同様の手順で実験を行った。実験では、0.1kg, 0.3kg, 0.5kgのおもりの順に計測を行い、0.5kgのおもりで計測を行ったら終了とした。また、離地時間計測実験と同様の実験協力者6名で実験を行った。

### 2.2.5 把持力測定実験の結果

Fig. 2.11に実験協力者Aの0.5kgのおもりで実験を行った際の圧力センサから得られた計測結果を示す。横軸は時間、縦軸はセンサからの出力を表している。グリップを把持する力が大きくなるほど出力値が減少するため、急激に減少し始めた点を持ち上げ開始点、波形の谷の最小値を物体が離地した点、出力値が急激に増加し始めた点を下し開始点として扱った。そして、物体が離地した瞬間の出力値をその持ち上げ操作の把持力として定め、2回目から11回目の計10回の持ち上げ操作のデータを平均したものを把持力 $f_g$ とした。実験協力者毎の0.1kg, 0.3kg, 0.5kgのおもりを持ち上げた際の把持力 $f_g$ と標準偏差の結果をTable 2.2に示す。

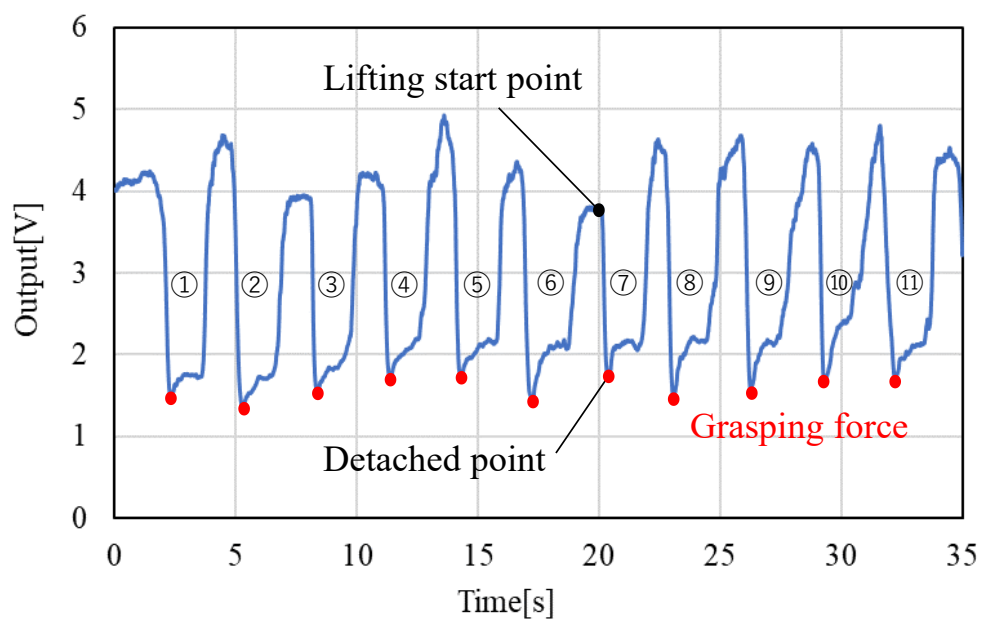


Fig. 2.11 Continuous lifting data of subject A

Table 2.2 Results grasping force

| Subject | 0.1[kg]   |                       | 0.3[kg]   |                       | 0.5[kg]   |                       |
|---------|-----------|-----------------------|-----------|-----------------------|-----------|-----------------------|
|         | $f_g$ [V] | Standard deviation[V] | $f_g$ [V] | Standard deviation[V] | $f_g$ [V] | Standard deviation[V] |
| A       | 2.954     | 0.138                 | 1.879     | 0.125                 | 1.603     | 0.138                 |
| B       | 2.909     | 0.236                 | 2.115     | 0.190                 | 1.645     | 0.076                 |
| C       | 2.213     | 0.096                 | 2.440     | 0.142                 | 1.819     | 0.138                 |
| D       | 3.013     | 0.206                 | 2.394     | 0.096                 | 1.927     | 0.092                 |
| E       | 3.007     | 0.268                 | 2.399     | 0.165                 | 1.867     | 0.106                 |
| F       | 2.925     | 0.160                 | 2.173     | 0.129                 | 1.622     | 0.155                 |

# 第3章

## 重量感評価実験

本研究では、グリップが鉛直方向に一自由度で動作する実験装置を製作し、把持する指のせん断方向にグリップから提示力を発生させることで重量感を再現した。そして、提示力のプロフィールを変更することで重量感を変化させることが可能かを検証した。本章では実験装置の構成と提示力のプロフィールの選定、実験の内容に関して説明する。

### 3.1 実験装置の構成

実験装置の構成図を Fig. 3.1.に、また実際の外観を Fig. 3.2 に示す。本実験で使用した実験装置は、2.2.1 項で述べた実験装置を改良したものである。改良点としては、リニアアクチュエータ、レーザー変位センサ、支え、ディスプレイが追加されている。グリップの内部にリニアアクチュエータが固定されており、グリップが鉛直一自由度で動作する。また、おもりとテーブルを取り外し、フレームに固定された力センサとリニアアクチュエータのロッドが直接結合されているため、力センサではグリップから発生した提示力を計測できる。また、グリップの上部には、レーザー変位センサが取り付けられており、グリップの鉛直方向変位を計測できる。加えて、スタンドには指の動きを拘束するための支えが固定されている。実験装置を使用している様子の概略図を Fig. 3.3 に示す。本実験装置では、圧力センサ、力センサ、レーザー変位センサからのアナログ信号は信号処理ユニットに入力される。信号処理ユニットは Fig.3.4 に示す有馬電子機材（株）の Aproc-1 Plus<sup>[24]</sup>を使用した。Aproc-1 Plus は A/D 変換及び、D/A 変換の機能を有しており、アナログ信号を A/D 変換してデジタルデータとして取り込み、演算処理を行う。専用ソフトを PC にインストールして USB 接続することで、プログラムを本体に読み込ませて使用する。Aproc-1 Plus からの指令値は、DC アンブに出力され、増幅後リニアアクチュエータへの入力電圧となり、グリップは目標の力になるように動作する。また、専用ソフトの機能により、Aproc-1 Plus に入力された時

系列データを csv 形式で保存することができる。本実験においてもこの機能を活用してデータを取得した。Aproc-1 Plus の仕様を Table 3.1 に示す。次に SMAC 製のムービングコイルアクチュエータ CBL35-010-75-1<sup>[25]</sup> (Fig. 3.5 参照) の仕様を Table 3.2 に示す。

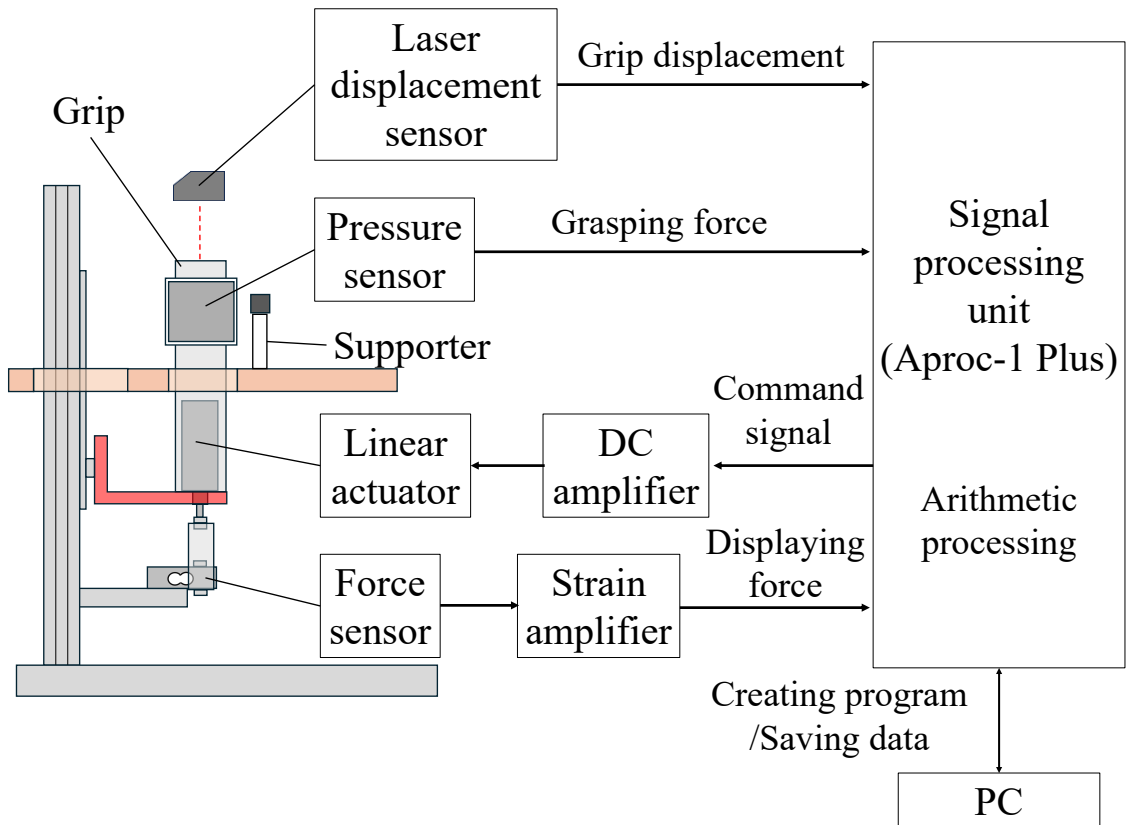


Fig. 3.1 Configuration of the experimental device



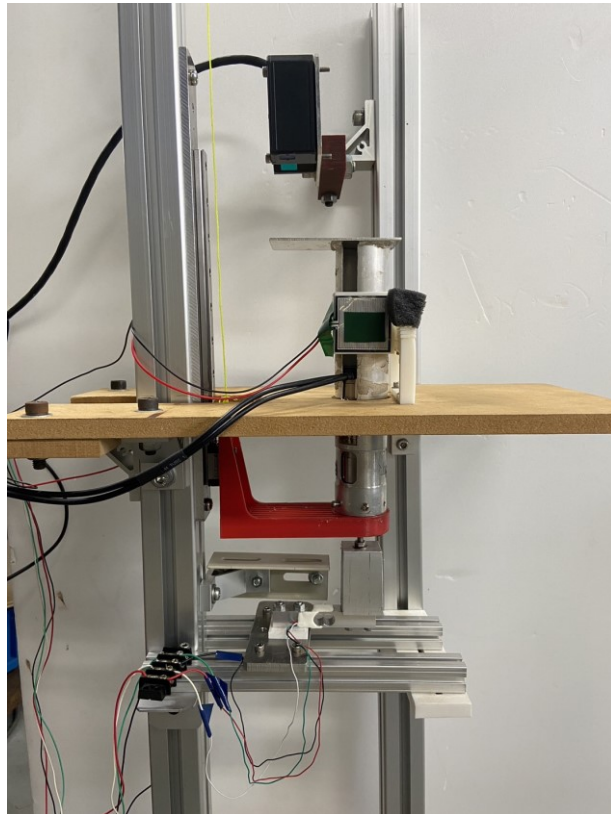


Fig. 3.2 Appearance of the experimental device

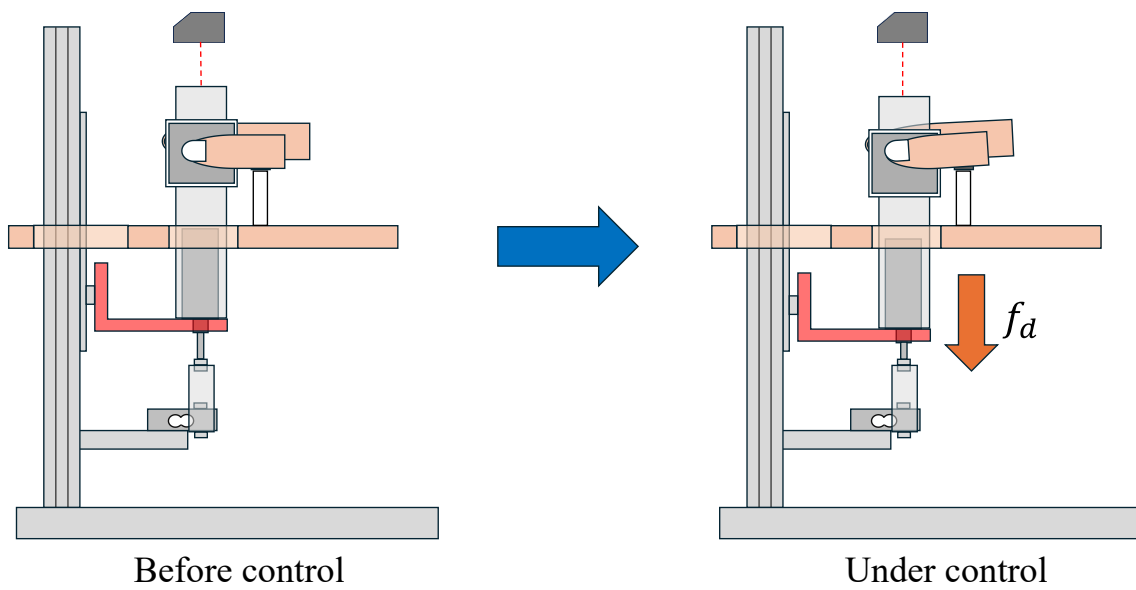


Fig. 3.3 Schematic of experimental device in use

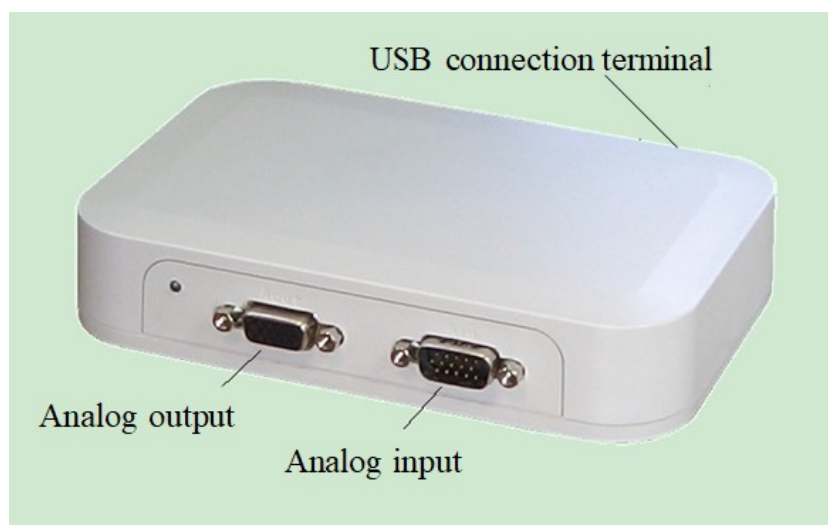


Fig. 3.4 Aproc-1 Plus

Table 3.1 Aproc-1 Plus specifications

|            |  |   |
|------------|--|---|
| 演算部        | 四則演算, 論理演算, 比較, 平方根, 三角関数, 逆三角関数, 指数関数, など |   |
|            | フィルタ                                       | 1次, 2次, 微分, 積分, 位相進み遅れ, PID制御, FIR, IIR, 移動平均, 時間遅延など |
|            | 演算周期                                       | 0.1ms ~ 100ms   |
| アナログ<br>入力 | チャンネル数                                     | 8   |
|            | 電圧範囲/分解能                                   | ±10V, ±5V / 16ビット                                     |
|            | サンプリング方式                                   | 全チャンネル同時サンプリング  |
|            | 入力インピーダンス                                  | 約 1MΩ   |
|            | 精度/非直線性                                    | ±6LSB (±10V時) / ±2LSB以内                               |
|            | 入力フィルタ帯域                                   | 12KHz (±10V時), 10KHz (±5V時)                           |
| アナログ<br>出力 | 出力絶縁/保護                                    | 絶縁なし/合計出力±50mAに制限                                     |
|            | チャンネル数                                     | 8   |
|            | 電圧範囲/分解能                                   | ±5V / 16ビット   |
|            | 精度/非直線性                                    | ±16LSB / ±1LSB以内                                      |
| 出力絶縁/保護    | 絶縁なし / 合計出力±50mAに制限                        |   |
| PC接続       | 通信方式                                       | USB2.0 ハイスピードモード                                      |
| 寸法<br>重量   | 150×100×30mm / 240g                        |   |
| 消費電力       | USBバス電力 約 1W (出力を除く)                       |   |



Fig. 3.5 CBL35-010-75-1, 48V

Table 3.2 Acuator specifications

|          |                          |
|----------|--------------------------|
| 型式       | CBL35-010                |
| 駆動電圧     | 48 V                     |
| ストローク    | 10 mm                    |
| 本体寸法     | Φ35×111 mm               |
| 全体質量     | 0.45 kg                  |
| 可動質量     | 40 g                     |
| ピーク推力/電流 | 48 V : 22 N / 1.6 A      |
| 推力定数     | 48 V : 13.4 N/A          |
| エンコーダ仕様  | Quad ABZ (差動), 分解能 : 5μm |

### 3.2 提示力のプロフィール

2.2節で計測した 0.1kg, 0.3kg, 0.5kg の質量のおもりを持ち上げた際の離地時間 $t_d$ を基に, Fig. 3.5 に示すようなグリップから発生させる提示力のプロフィールを決定した. 横軸は時間, 縦軸は提示力を示しており, Fig. 3.3 のように鉛直下向きを正とするため, グリップが発生する提示力は下方方向に次第に増大していく. 制御時間 $t_c$ と離地時間 $t_d$ の値は等しく,  $m$ はおもりの質量を表しており, グリップからの提示力によりおもりを持ち上げた際の重量感を再現する. 本実験では, 指への力の加え方による重量感の違いを評価するために, 各質量条件に対し 3 種類ずつプロフィールを準備した. 制御を開始してから提示力 $f_d$ が  $1/4t_c$  で  $3/4mg$  になるように急激に増加していき, その後は  $t_c$  で  $mg$  となる制御をプロフィール 1,  $mg/t_c$  の傾きで線形に増加していく制御をプロフィール 2, プロフィール 2 を軸としてプロフィール 1 と対象となる制御をプロフィール 3 として定めた. 2.1 項で述べたように, プロフィール 1 では他のプロフィールに比べ, 早いタイミングから大きな提示力が指に加わるため最も重く感じ, 対してプロフィール 3 では大きな提示力が加わるタイミング遅いため最も軽く感じるという仮説を基に定め, その検証を行った.

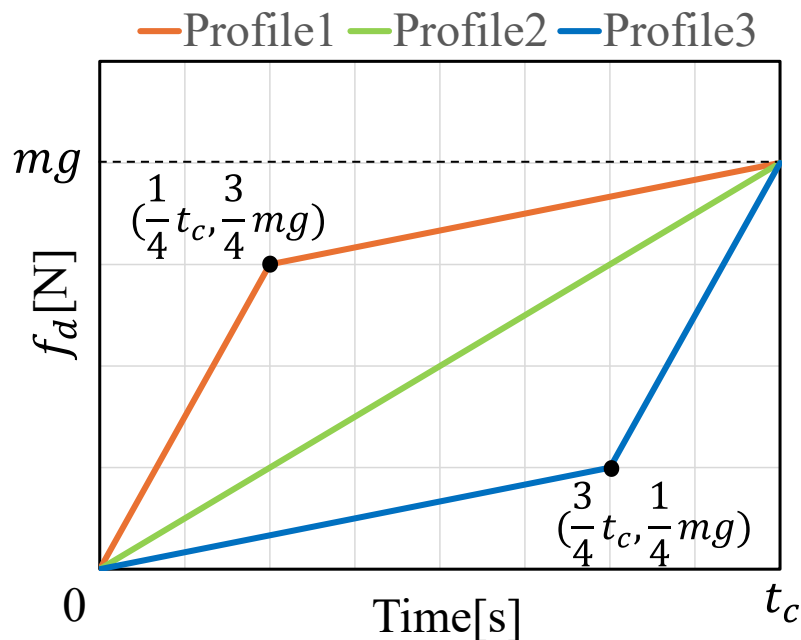


Fig. 3.6 Three types of displaying force profiles determined

### 3.3 実験条件

Fig. 3.7 に示すように，示指と母指でグリップに取り付けられた圧力センサの中心を把持し，指と手首は動かないようにそれぞれ支えとスタンドに固定した．これは，指や手首が動くことで固有受容感覚も刺激されてしまうため，極力その影響を減らしたかったからである．また，グリップを握る強さは，2.2 項で述べた，把持力計測実験で得られた把持力の値になるように質量条件ごとに指定した．加えて，視覚情報によって重量感に影響が出る可能性があったため，制御の瞬間は目を閉じるように指示した．Table 3.3 に3つの質量条件に対して3種類のプロフィール，計9種類のプロフィールで検証を行った際の，実験協力者毎の制御時間 $t_c$ 及び把持力 $f_g$ の値をまとめたものを示す．実験は離地時間，把持力計測実験と同様の実験協力者6名で行った．



Fig. 3.7 Weight evaluation experiment

Table 3.3 Experimental conditions

| Mass conditions | Profile | Subject  |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
|-----------------|---------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|                 |         | A        |          | B        |          | C        |          | D        |          | E        |          | F        |          |
|                 |         | $t_c[s]$ | $f_g[V]$ | $t_c[s]$ | $f_g[V]$ | $t_c[s]$ | $f_g[V]$ | $t_c[s]$ | $f_g[V]$ | $t_c[s]$ | $f_g[V]$ | $t_c[s]$ | $f_g[V]$ |
| 0.1kg           | 1       |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
|                 | 2       | 0.099    | 2.954    | 0.093    | 2.909    | 0.135    | 2.213    | 0.078    | 3.013    | 0.091    | 3.007    | 0.115    | 2.925    |
|                 | 3       |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| 0.3kg           | 1       |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
|                 | 2       | 0.145    | 1.879    | 0.122    | 2.115    | 0.179    | 2.440    | 0.093    | 2.394    | 0.172    | 2.399    | 0.132    | 2.173    |
|                 | 3       |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| 0.5kg           | 1       |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
|                 | 2       | 0.164    | 1.603    | 0.163    | 1.645    | 0.204    | 1.819    | 0.090    | 1.927    | 0.211    | 1.867    | 0.190    | 1.622    |
|                 | 3       |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |

### 3.4 実験手順

実験協力者には、まず全体の流れに関して説明した後、指と手首を固定した状態でグリップを把持してもらう。続いて、ディスプレイに表示されたリアルタイムの把持力と目標の把持力の値を見てもらいながら、目標値に揃うまで練習を行う。揃ってきたら、その把持力を維持した状態のまま、本番に移る。本番開始の合図と同時に実験協力者には目を瞑ってもらい、ランダムに選んだ質量条件のプロフィール 2 の提示力を基準プロフィールとして与える。次に約 3 秒間の間隔をおき、同一の質量条件の中からランダムにプロフィール 1, 2, 3 のいずれかを比較プロフィールとして与える。その後、実験協力者に基準プロフィールと比べた、比較プロフィールの重量感の変化量を評価してもらい、それをアンケートにて回答してもらう。評価項目は-3, -2, -1, 0, 1, 2, 3 の合計 7 段階とし、正の値が大きくなるほど重たく感じ、負の値が大きくなるほど軽く感じたことを意味しており、0 は重量感が変わらなかったことを意味する。例えば、基準プロフィールに比べて、比較プロフィールの方が重いと感じたら正の値で回答する。これを 1 回の試行とし、グリップ握って再び把持力を揃えるところから、残りの比較プロフィールで同様の手順を繰り返す。全ての質量条件において、基準プロフィールと比較プロフィール 1, 2, 3 での重量感評価が終わったら、つまり 9 回の試行を行ったらここまですを 1set とし、これを全部で 3set 行ったら実験を終了とした。実験の流れを Fig. 3.8 に示す。

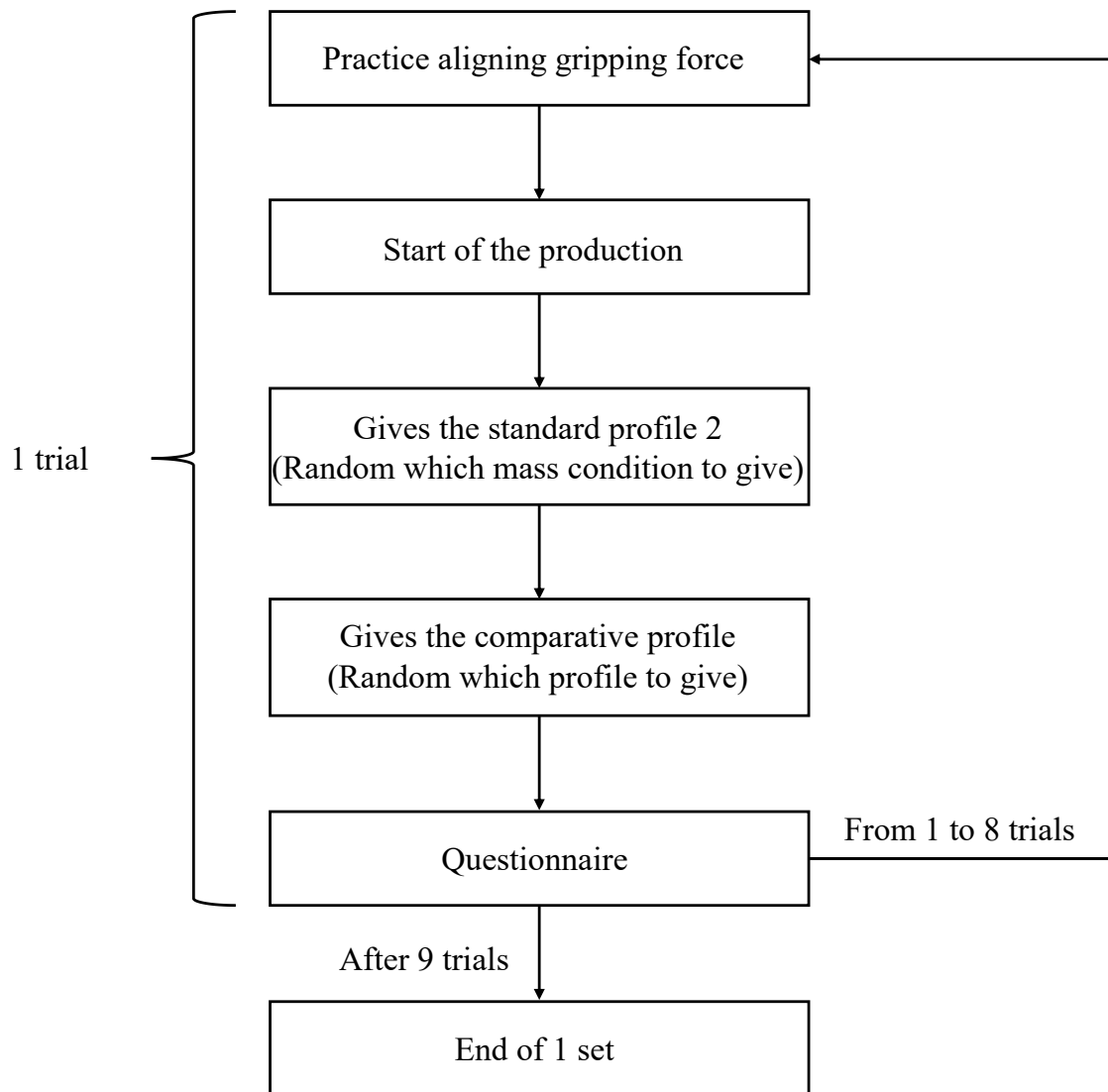


Fig. 3.8 Flow of experiment

# 第4章

## 実験結果及び考察

本章では 4.1 節において、3 章にて説明した実験の結果を示す。また 4.2 節ではその考察を述べる。

### 4.1 実験結果

実験協力者 6 名の基準プロフィールに対する比較プロフィールの重量感の評価結果とその平均値、標準偏差をまとめたものを Table 4.1 に示す。また、プロフィール 1 では正、プロフィール 2 は 0、プロフィール 3 では負の値以外の回答は黄色で塗りつぶしている。初めに 0.1kg のプロフィールについて述べると、プロフィール 1 では“重量感の変化を感じない”という回答が 5 個あり、このうち実験協力者 B は 3set すべてにおいて“重量感の変化を感じない”と回答し、またプロフィール 3 では“重量感の変化を感じない”という回答が 4 個あった。0.3kg のプロフィール 1 では、“重量感の変化を感じない”という回答が 3 個、プロフィール 3 では“重い”という想定とは反対の回答が 1 個だけ存在した。0.5kg のプロフィールでは、プロフィール 1 のみ“重量感の変化を感じない”という回答が 3 個あった。次にプロフィール 2 に着目すると、“軽い”という回答が 0.1kg, 0.3kg, 0.5kg において、それぞれ 2 個, 2 個, 1 個存在した。全体を通して、各質量条件の各プロフィールにおいて、想定通りの回答が大部分を占めており、平均値も想定 of 回答の値となっていることが分かる。

続いて、プロフィール 1, 2, 3 の回答結果を比較し、本手法による重量感の制御の有効性を評価するために、質量条件 0.1kg, 0.3kg, 0.5kg 毎に HSD 法による多重比較を行った。平均値、標準偏差、有意差をグラフにまとめたものを Fig. 4.1 から Fig. 4.3 に示す。p1, p2, p3 はそれぞれプロフィール 1, 2, 3 を表し、エラーバーは標準偏差を表している。多重比較の結果、すべての質量条件において、各プロフィール間に有意水準 1% で有意差が確認された。また、Fig. 4.4 に示すように、質量条件を除いてプロフィール 1, 2, 3 の多重比較を行ったところ、各プロフィール間に有意水準 1% で有意差



が確認された。次に、質量条件による重量感の変化度合いを比較するために、プロフィール1と3で多重比較を行った。その結果、プロフィール1では全ての質量条件間において有意差が確認されなかった一方、プロフィール3では0.1kgと0.3kg、0.1kgと0.5kgの間に有意水準1%で有意差が確認された。Fig. 4.5とFig. 4.6にプロフィール1とプロフィール3の結果を示す。

Table 4.1 Results of subjective evaluation of weight

| Subject            | Set | Mass conditions |          |          |          |          |          |          |          |          |
|--------------------|-----|-----------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|                    |     | 0.1kg           |          |          | 0.3kg    |          |          | 0.5kg    |          |          |
|                    |     | Profile1        | Profile2 | Profile3 | Profile1 | Profile2 | Profile3 | Profile1 | Profile2 | Profile3 |
| A                  | 1   | 1               | 0        | -1       | 1        | 0        | -3       | 1        | 0        | -3       |
|                    | 2   | 2               | 0        | 0        | 2        | 0        | -2       | 1        | 0        | -1       |
|                    | 3   | 1               | 0        | -2       | 1        | 0        | -2       | 1        | 0        | -3       |
| B                  | 1   | 0               | 0        | -1       | 1        | 0        | -1       | 3        | 0        | -2       |
|                    | 2   | 0               | 0        | -1       | 1        | 0        | -2       | 3        | 0        | -3       |
|                    | 3   | 0               | 0        | -1       | 1        | 0        | -2       | 2        | 0        | -2       |
| C                  | 1   | 0               | 0        | -1       | 0        | 0        | 1        | 1        | 0        | -2       |
|                    | 2   | 1               | 0        | -1       | 2        | 0        | -1       | 2        | 0        | -2       |
|                    | 3   | 1               | 0        | -2       | 1        | 0        | -2       | 1        | 0        | -2       |
| D                  | 1   | 1               | -1       | -2       | 1        | 0        | -3       | 1        | 0        | -2       |
|                    | 2   | 0               | 0        | -1       | 2        | 0        | -1       | 1        | 0        | -2       |
|                    | 3   | 1               | -1       | 0        | 2        | 0        | -3       | 2        | 0        | -2       |
| E                  | 1   | 2               | 0        | 0        | 1        | 0        | -3       | 2        | -1       | -1       |
|                    | 2   | 1               | 0        | -1       | 0        | 0        | -3       | 0        | 0        | -3       |
|                    | 3   | 1               | 0        | 0        | 1        | 0        | -3       | 2        | 0        | -1       |
| F                  | 1   | 1               | 0        | -2       | 1        | 0        | -3       | 1        | 0        | -2       |
|                    | 2   | 1               | 0        | -1       | 2        | -1       | -2       | 0        | 0        | -2       |
|                    | 3   | 1               | 0        | -2       | 0        | -1       | -1       | 0        | 0        | -1       |
| Average            |     | 0.83            | -0.11    | -1.06    | 1.11     | -0.11    | -2.00    | 1.33     | -0.06    | -2.00    |
| Standard deviation |     | 0.60            | 0.31     | 0.70     | 0.66     | 0.31     | 1.05     | 0.88     | 0.23     | 0.67     |

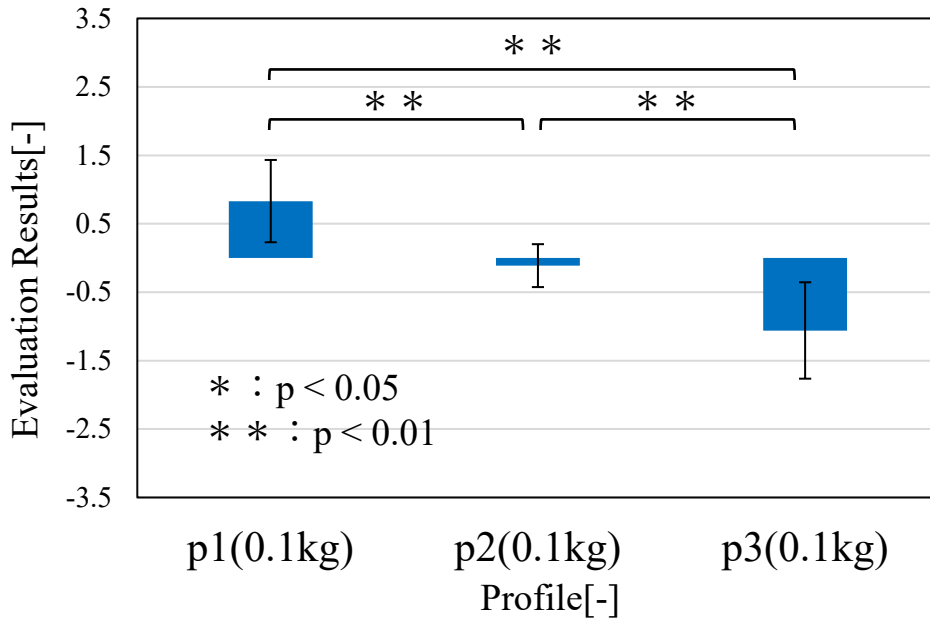


Fig. 4.1 Comparison of evaluation results between profiles at 0.1 kg mass condition

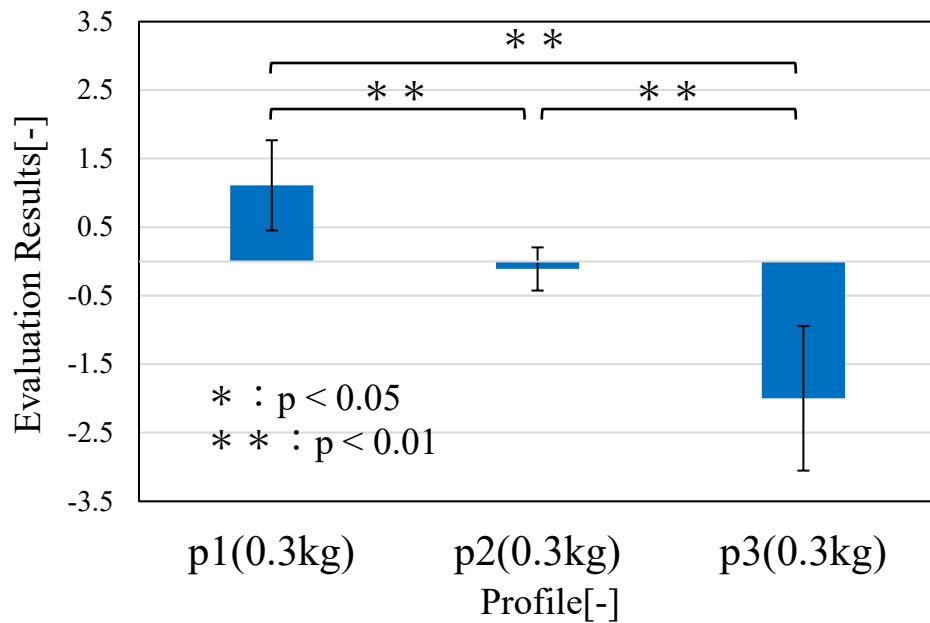


Fig. 4.2 Comparison of evaluation results between profiles at 0.3 kg mass condition

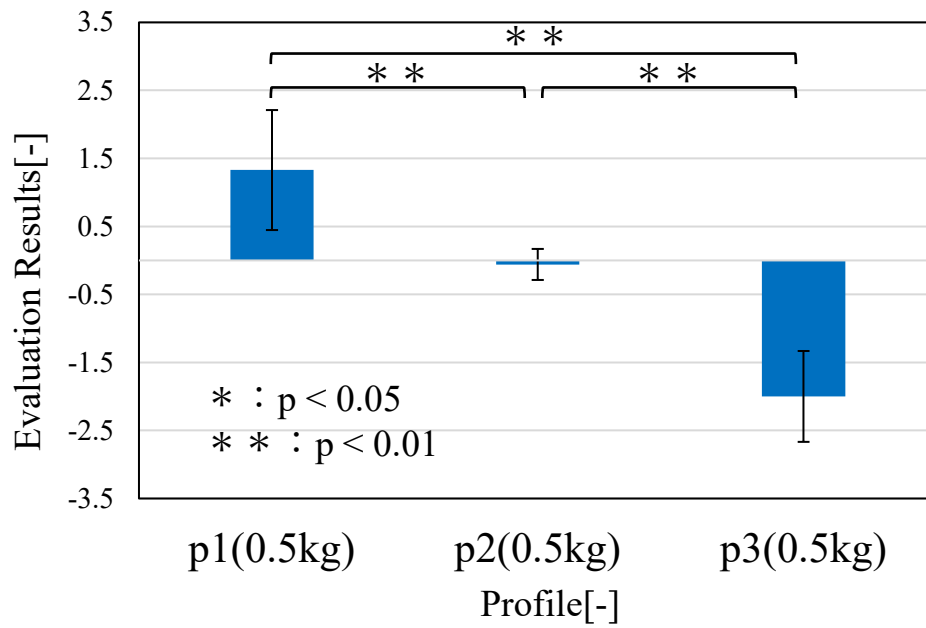


Fig. 4.3 Comparison of evaluation results between profiles at 0.5 kg mass condition

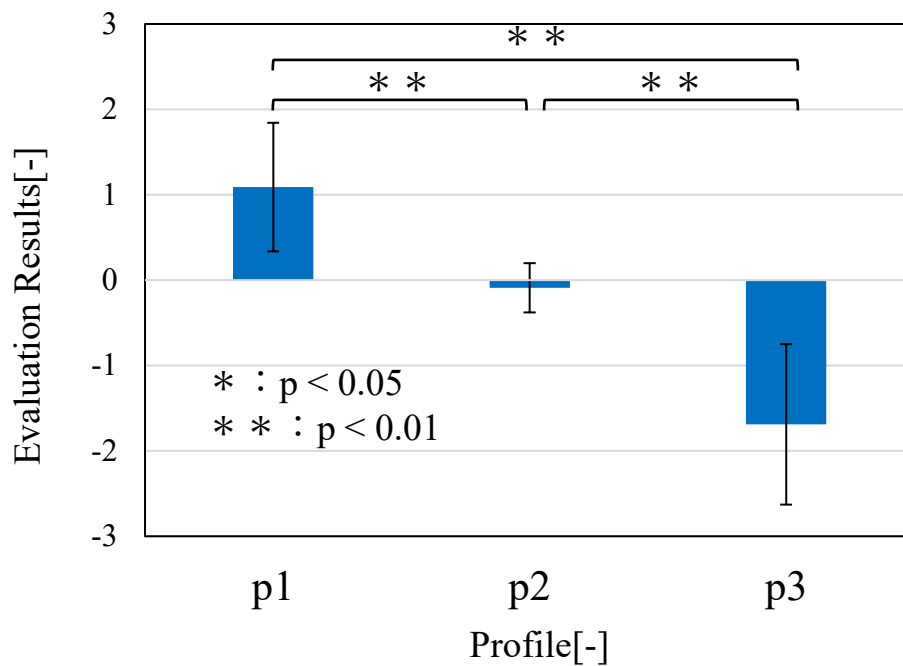


Table 4.4 Comparison of evaluation results between profiles when mass condition is omitted

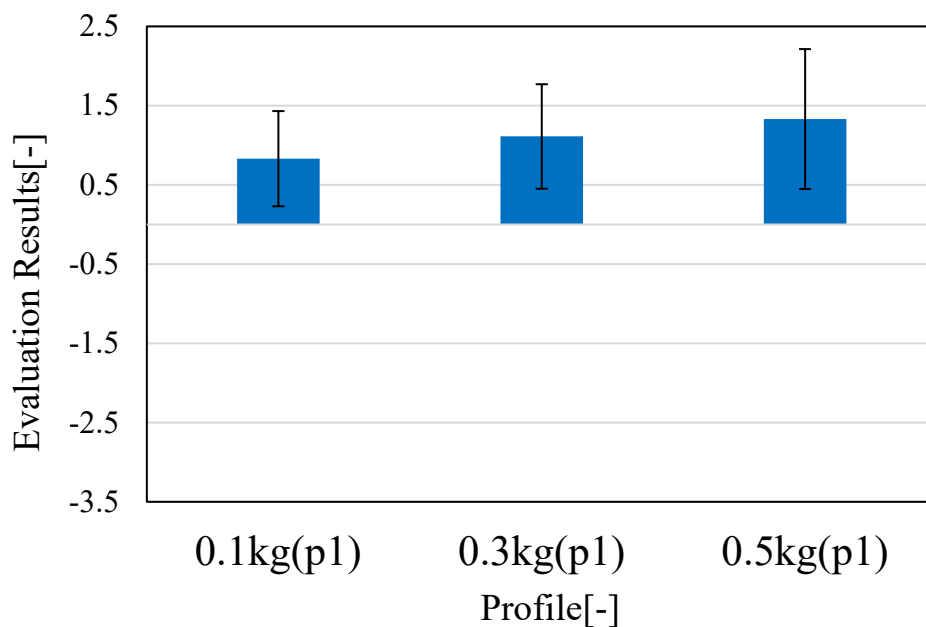


Fig.4.5 Comparison between mass conditions in Profile 1

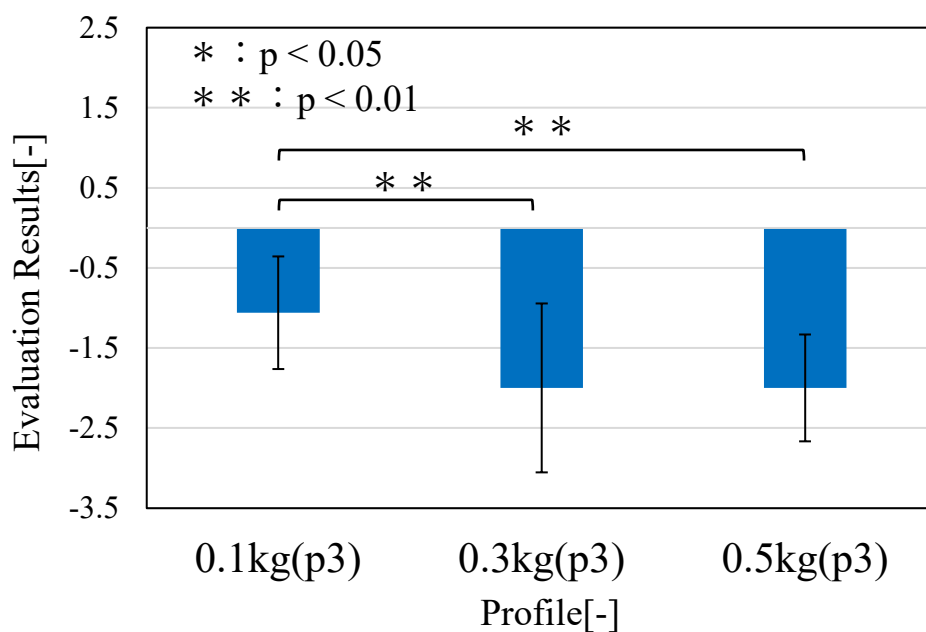


Fig. 4.6 Comparison between mass conditions in Profile 3

## 4.2 実験結果の考察

Fig. 4.1 から Fig. 4.3 で示した，すべての質量条件において各プロフィール間に有意水準 1% で有意差が確認された結果から，提示力の制御時間と最終値が同じだとしても，プロフィールを変更することで，重量感を変化させることが可能なことが示された．制御開始から急激に提示力が増大していくプロフィール 1 が最も重く感じ，対して制御後半になるまで提示力が小さいプロフィール 3 が最も軽く感じたことから，大きな提示力が加わるタイミングが早いほど，重く感じると考えられる．また，質量条件を除いたプロフィール間の多重比較においても有意差が確認されたことから，質量条件に関係なく重量感を変化させることができることが示された．さらに，プロフィール 1 において質量条件間に有意差が確認されなかったことから，重く感じさせる場合であれば異なる質量条件であっても同じ重量感の変化度合いを感じさせることができると推測できる．対して，プロフィール 3 において 0.1kg と他の質量条件間に有意差が確認され，0.1kg の条件の重量感の変化度合いが最も小さくなっていることから，元々重量感が軽いものをより軽く感じさせるには限界があると考えられる．

これらの重量感の変化について，計測したグリップの変位から考察する．実験協力者 A の 0.5kg におけるプロフィール 1 のグリップの変位と速度の波形を Fig. 4.7, Fig. 4.8 に示す．縦軸は変位または速度，横軸は時間，橙色の波形はプロフィール 1，黄緑色の波形は基準プロフィールとして与えたプロフィール 2 を表す．本実験は指を固定した状態で行ったため，計測されたグリップの変位を指の皮膚の変形量に近いものとして考えると，基準プロフィール 2 に比べてプロフィール 1 の方が急激に大きく変形していることがわかる．対して，Fig. 4.9, Fig. 4.10 に示すように，基準プロフィール 2 に対する青色のプロフィール 3 の変形量は緩やかで小さいことがわかる．また，Table 4.2 に全実験協力者のグリップ変位の最小値の平均と標準偏差を示し，その結果を質量条件毎にグラフにし，プロフィール間の有意差を表記したものを Fig. 4.11 から Fig. 4.13 に示す．全ての質量条件において，プロフィール 1 の平均値が最も大きく，プロフィール 3 が最も小さくなっており，各プロフィール間に有意水準 1% で有意差が確認された．さらに，一例として Fig. 4.14 に 0.5kg のプロフィール 1 のグリップ変位とグリップ速度を示し，縦軸は実線（右軸）が変位，破線（左軸）が速度，横軸は時間，また緑色の縦線は変位と速度の最小値の時間を表している．この変位の最小値の時間に対する速度の最小値の時間の割合を全質量条件のプロフィールで算出し，プロフィール毎に平均した結果，プロフィール 1 が最も小さい値となり，また他のプロフィールと有意水準 1% で有意差が確認された (Table 4.3, Fig. 4.15)．

以上のことから、プロフィールを変更することで重量感が変化したのは、指に大きな提示力が加わるタイミングが早いほど、皮膚の変形量が早い段階から急激に大きくなり、人がそれを重いと知覚するからであると考えられる。

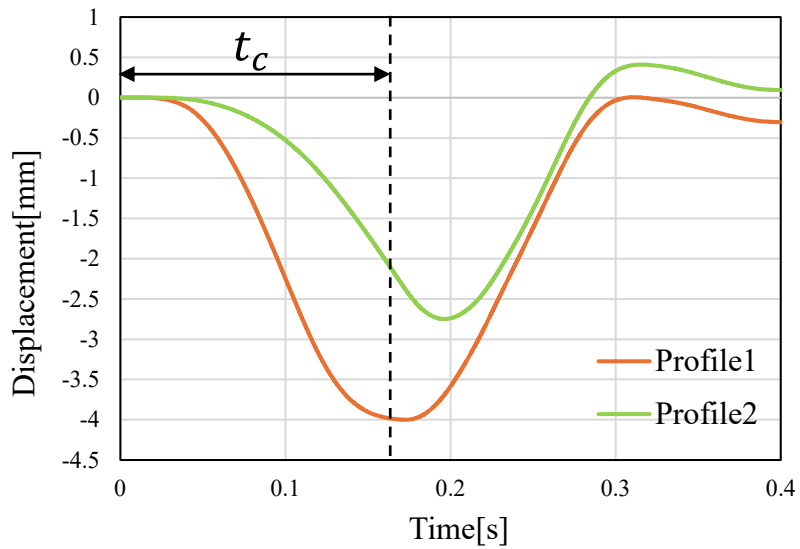


Fig. 4.7 Grip displacement in profiles 1 and 2 for subject A

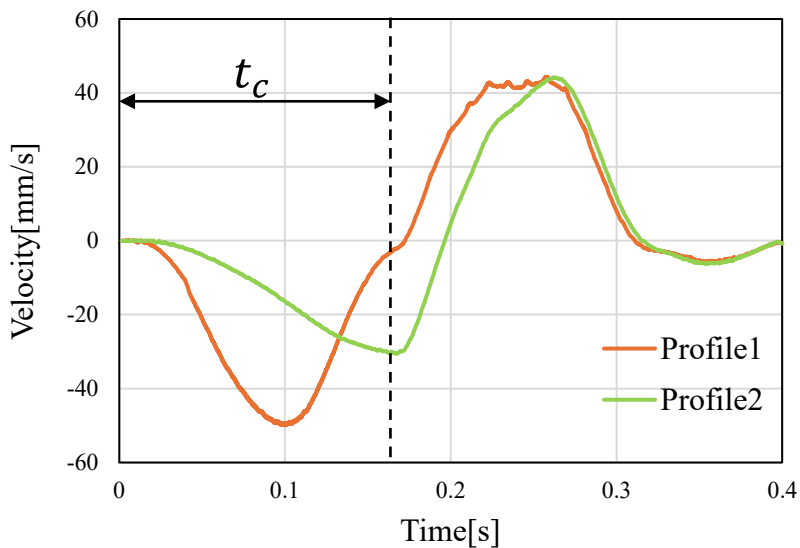


Fig. 4.8 Grip velocity in profiles 1 and 2 for subject A

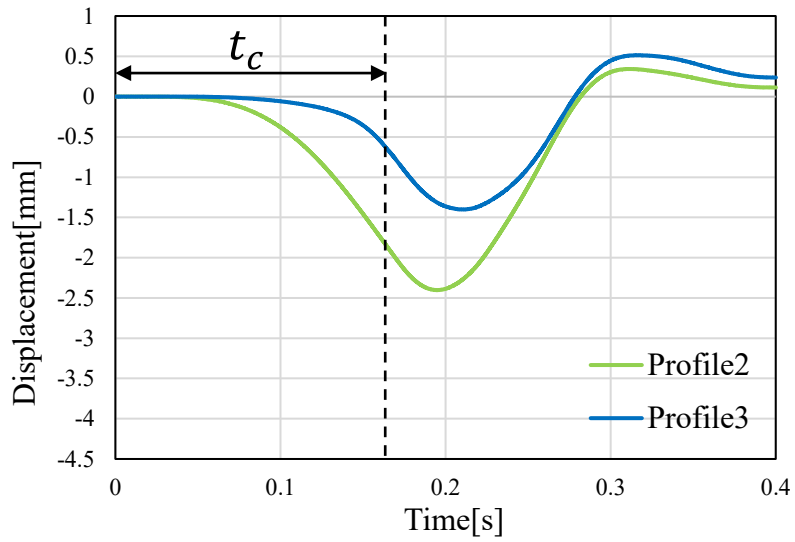


Fig. 4.9 Grip displacement in profiles 3 and 2 for subject A

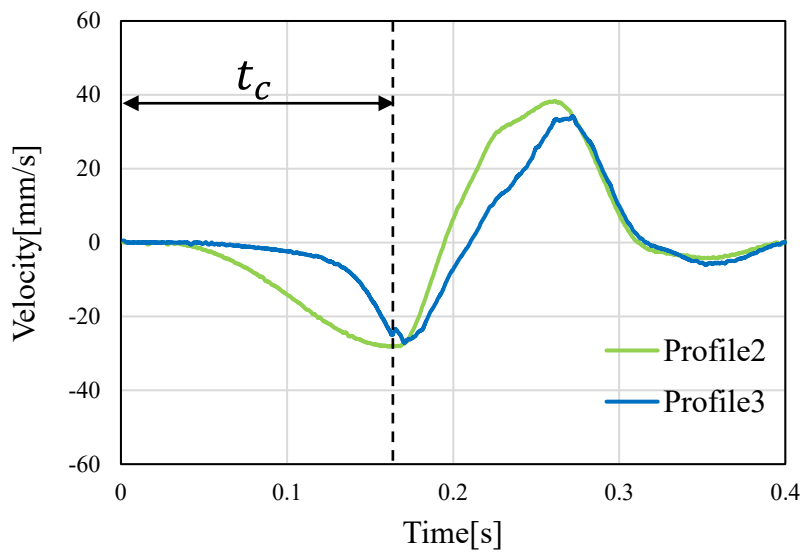


Fig. 4.10 Grip velocity in profiles 3 and 2 for subject A

Table 4.2 Average of the minimum grip displacement

| Profile | Mass conditions           |                         |                           |                         |                           |                         |
|---------|---------------------------|-------------------------|---------------------------|-------------------------|---------------------------|-------------------------|
|         | 0.1kg                     |                         | 0.3kg                     |                         | 0.5kg                     |                         |
|         | Displacement average [mm] | Standard deviation [mm] | Displacement average [mm] | Standard deviation [mm] | Displacement average [mm] | Standard deviation [mm] |
| 1       | -0.375                    | 0.120                   | -2.144                    | 0.529                   | -3.416                    | 0.811                   |
| 2       | -0.211                    | 0.074                   | -1.434                    | 0.367                   | -2.499                    | 0.877                   |
| 3       | -0.110                    | 0.035                   | -0.758                    | 0.235                   | -1.362                    | 0.440                   |

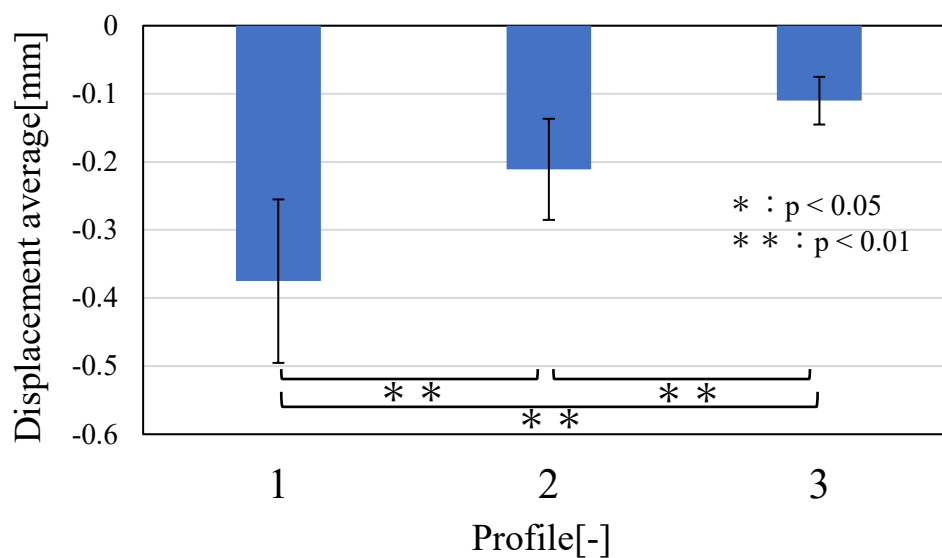


Fig. 4.11 Comparison of grip displacement between profiles at 0.1 kg mass condition



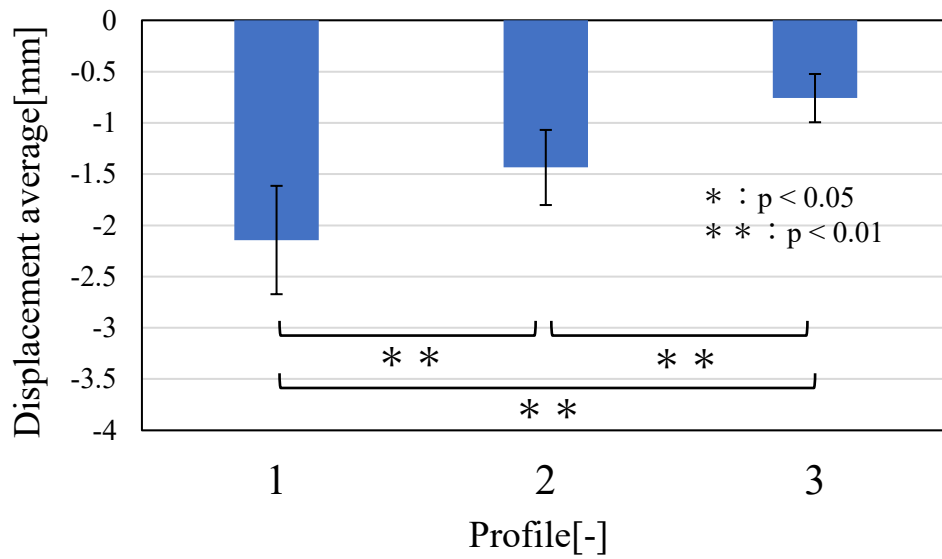


Fig. 4.12 Comparison of grip displacement between profiles at 0.3 kg mass condition

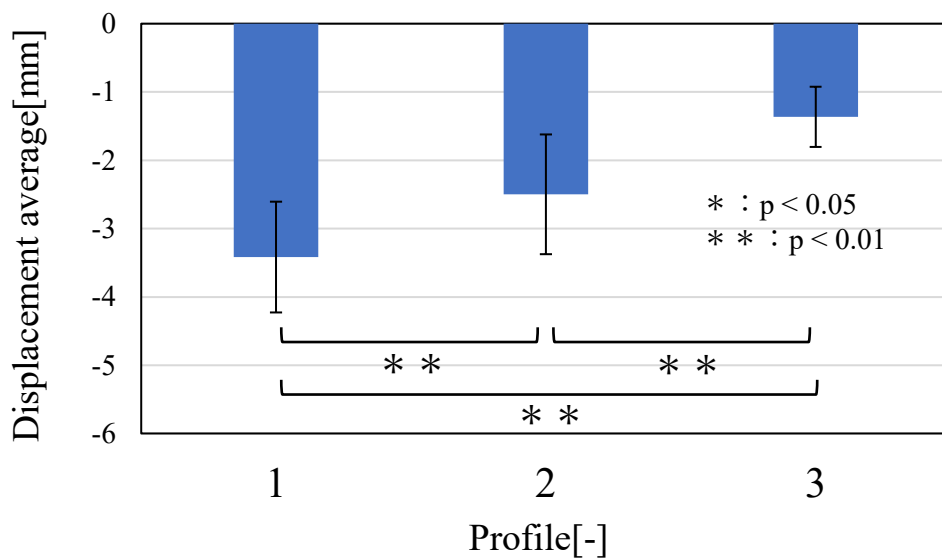


Fig. 4.13 Comparison of grip displacement between profiles at 0.5 kg mass condition

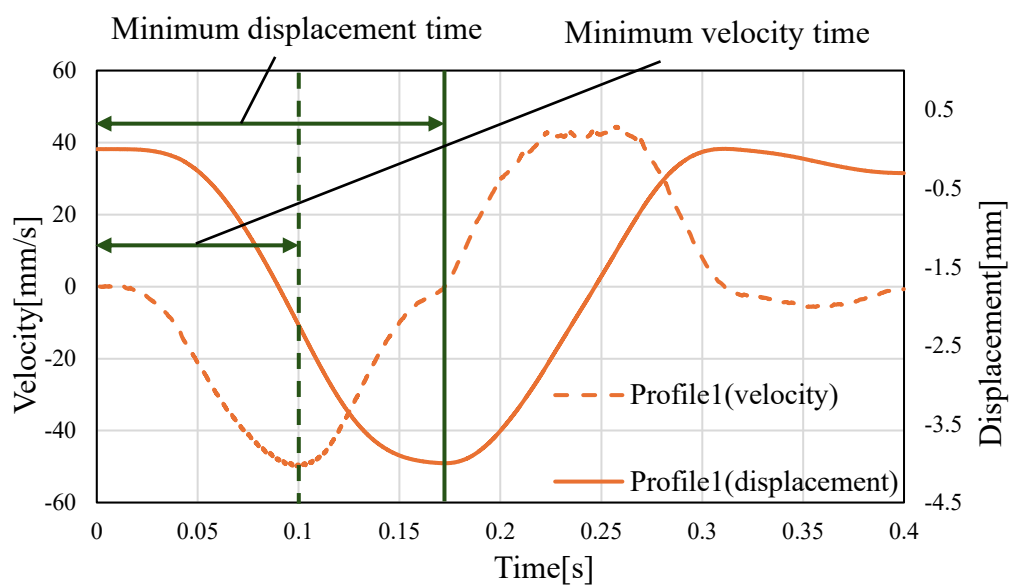


Fig. 4.14 Grip displacement and velocity in profiles 1 for subject A

Table 4.3 Percentage of time of minimum velocity to time of minimum displacement

| Profile | Average [%] | Standard deviation [%] |
|---------|-------------|------------------------|
| 1       | 61.4        | 8.7                    |
| 2       | 77.1        | 6.2                    |
| 3       | 79.6        | 4.8                    |

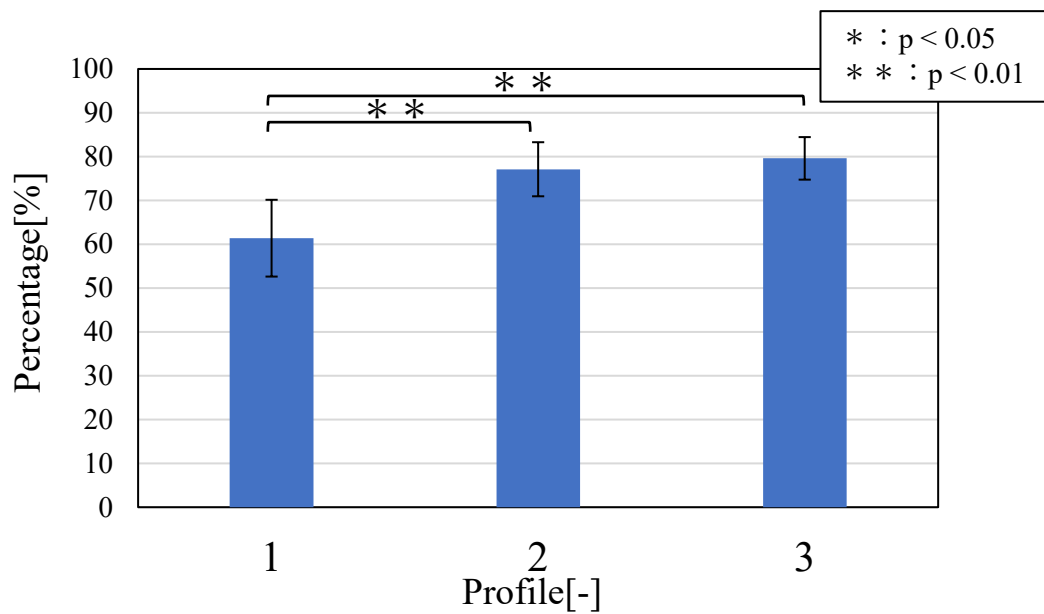


Fig. 4.15 Percentage comparison between profiles

---

# 第 5 章

## 結論

---

### 5.1 まとめ

パワーアシスト装置使用時に発生する重量感覚の問題を解決するためには予測重量と体感重量を近づけることが求められる。そのため、本研究では物体持ち上げ時の指の皮膚感覚に加わるせん断方向の力を制御し、重量感を変化させることが可能なグリップを搭載したパワーアシスト装置を提案した。そこでまず、指の皮膚感覚へのせん断方向の力の加え方と重量感の関係性を明らかにすることを目的とした。

本研究では持ち上げ操作を行わず、鉛直一自由度で動作するグリップを把持した状態で、グリップから発生させる鉛直下向きの提示力のプロフィールを変更することで、重量感が増えるかの検証を行いたかった。そこで、実際に物体を持ち上げた際の重量感を再現するため、まず初めに 3 種類の質量条件のおもりを持ち上げた際のおもりが離地するまでの時間とグリップを把持する力の計測実験を行った。そして、計測した離地時間をグリップの制御時間とし、提示力が制御終了時に各おもりの重量と等しくなるプロフィールを準備した。提示力が制御開始から急激に増加していくもの、線形に増加していくもの、制御後半まで緩やかに増加していくものの 3 種類を質量条件毎に準備し、それぞれをプロフィール 1, 2, 3 とした。実験は、先に与えた基準プロフィール 2 と比べて、その後にランダムに与えた比較プロフィール 1, 2, 3 の重量感がどのように変化したかを評価してもらった。実験の結果、全質量条件においてプロフィール 1 が最も重く、プロフィール 3 が最も軽く感じることを確認した。このことから、提示力の制御時間と最終値が同じだとしても、大きな提示力が加わるタイミングが早いほど重く感じると考えられる。また、計測したグリップの変位と速度のデータから、大きな提示力が加わるタイミングが早いほど、皮膚の変形量が急激に大きくなるため、重量感が増大すると考察した。

## 5.2 今後の課題

本実験では、プロフィールを変更することで重量感を変化させられることが示されたが、検証を行ったプロフィールは1つの質量条件に対して3種類であり、より重く感じるプロフィールまでは特定できていない。そのため、プロフィール1の傾きが変わる点の座標の微調整や、直線を曲線に変更するなどしてプロフィール数を増やし、重量感とプロフィールの具体的な関係性を明らかにしていくことが求められる。また、本実験で使用した実験装置ではアクチュエータの性能の都合上、0.5kgの質量条件までしか実験を行えなかった。したがって、今後0.5kg以上の質量条件においてもプロフィールを変更することで、重量感を変化させることができるかを調べる必要がある。そして、本提案手法が物体を持ち上げた場合でも有効であるかを検証できていない。本実験が、持ち上げ操作を行わず指定された把持力でグリップを握ってもらったのに対し、持ち上げ操作を行う場合では皮膚感覚以外に固有受容感覚が刺激されるだけでなく、操作者によって異なる持ち上げ力と把持力が発生するため、これらの点を考慮した制御が求められる。

---

## 参考文献

---

- [1] H. Kazerooni : 「The extender technology at the University of California, Berkeley」, 計測と制御, Vol.34, pp.291-298(1995).
- [2] 林原靖男, 谷江和雄, 荒井裕彦 : 「パワーアシスト装置の研究 (第1報, 重力負荷と動的負荷に異なるアシスト比を設定する制御法の提案)」, 日本機械工学会論文集 C 編, Vol.61, pp4318-4325(1995).
- [3] 林原靖男, 谷江和雄, 荒井裕彦, 渡嘉敷浩樹 : 「パワーアシスト装置の研究 (第2報, 重力負荷と動的負荷に異なるアシスト比を設定する制御法の多自由度システムへの適用)」, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.65, pp.198-205 (1999).
- [4] 小菅一弘 : 「仮想ツールダイナミクスに基づく人とロボットの協調作業」, 計測と制御, Vol.34, pp.303-306(1995).
- [5] 池浦良淳, 加藤寛之, 野口真平, 水谷一樹, 中村久 : 「産業用パワーアシスト装置のインピーダンス制御」, 第10回ロボティクスシンポジウム予稿集, Vol.1, No.1, pp.191-196(2005).
- [6] 神吉厚之, 森川寛也, 横川隆一, 柴田浩, 積際徹 : 「人間とロボットの協調作業系におけるインピーダンス制御法を用いたパワーアシストシステム」, Proceedings of the 2005 JSME Conference on Robotics and Mechatronics, Vol.1, 1P1-N-065(1)- 1P1-N-065(2) (2005).
- [7] 鴻巣仁司, 荒木勇, 山田陽滋 : 「自動車組立作業支援装置スキルアシストの実用化」, 日本ロボット学会誌, Vol.22, pp.508-514(2004).
- [8] 早津昌樹, 山田学, 田川泰敬, 山口大助 : 「懸垂機構を用いた多自由度型パワーアシスト吊搬装置の開発 (第1報, 実規模試験装置の試作と制御手法の検討)」, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.68, pp.2009-2015(2006).
- [9] 山口大助, 田川泰敬, 山田学, 今岡静男 : 「懸垂機構を用いたパワーアシスト搬送装置における対象物移動性能の向上」, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.72, pp.1178-1183(2006).
- [10] 山本圭治郎, 兵頭和人, 石井峰雄, 松尾崇 : 「介護用パワーアシストスーツの開発」, 日本機械学会論文集 C 編, Vol. 67, pp.1499-1506 (2001).
- [11] 石井峰雄, 山本圭治郎, 兵頭和人 : 「完全独立型パワーアシストスーツの開発 (機

- 構の改良と実用可能性)」, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.72, pp857-864(2006).
- [12] 吉岡将孝, 吉川裕一郎, 上本和広, 梁宏博, 朱赤 : 「パワーアシストシステムにおける脳波を用いた筋電推定手法の提案」, 日本機械学会論文集, Vol.83, pp.1-12(2017).
- [13] 猪瀬 洗樹, 毛利 駿, 山田 泰之, 横山 和也, 菊谷功, 中村太郎 : 「腰部の形状を考慮した空気圧アクチュエータによる内骨格型パワーアシストスーツの開発および補助効果検証」, 日本ロボット学会誌, Vol.35, No.1, pp.70-77(2017).
- [14] 永井清, 中西功 : 「パワーアシスト機能を有する福祉ロボット・アシスト機器の機構と制御」, システム制御情報, Vol.44, No.12, pp.688-695(2000).
- [15] S. M. M. Rahman, R.Ikeura, S. Hayakawa, and H. Sawai, : 「Design and control of a power assist system for lifting objects based on human operator's weight perception and load force characteristics」, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.58, pp.3141-3150(2011).
- [16] 多氣淳史, Bui Minh Nhat, 池浦良淳, 早川聡一郎 : 「パワーアシストによる物体持ち上げ作業の重量知覚特性解析に関する研究～慣性制御が人の重量知覚特性に与える影響～」, 第 18 回システムインテグレーション部門講演会(SI2017), Vol.1, No.1, pp.754-757(2017).
- [17] 池浦良淳, Rodrigues Itzel, 小田晃士, 早川聡一郎, 澤井秀樹 : 「パワーアシスト装置操作時の人間の重量知覚特性」, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2016, No.0, 1P1-12a4-(2016).
- [18] 南澤孝太, 深町聡一郎, 梶本裕之, 川上直樹, 舘暲 : 「バーチャルな物体の質量および内部ダイナミクスを提示する装着型触力覚ディスプレイ」, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol13, No.1, pp.15-23(2008).
- [19] 栗田雄一, 米澤智, 池田篤俊, 小笠原司 : 「指先接触面の滑り量制御による重量・摩擦呈示デバイス」, 日本ロボット学会誌, Vol.30, No.2, pp.205-212(2012).
- [20] 金起鍊, 岡本正吾, 秋山靖博, 山田陽滋 : 「指先への振動刺激提示による重さ錯覚の発生条件と錯覚強度」, 第 22 回システムインテグレーション部門講演会(SI2021), pp.1F3-09(2021).
- [21] 内閣府 : 「令和 5 年版高齢社会白書 (全体版), 高齢化の現状と将来像」  
[[https://www8.cao.go.jp/kourei/whitepaper/w-2023/html/zenbun/s1\\_1\\_1.html](https://www8.cao.go.jp/kourei/whitepaper/w-2023/html/zenbun/s1_1_1.html)]
- [22] 内閣府 : 「令和 5 年版高齢社会白書 (全体版), 就業・所得」  
[[https://www8.cao.go.jp/kourei/whitepaper/w-2023/html/zenbun/s1\\_2\\_1.html](https://www8.cao.go.jp/kourei/whitepaper/w-2023/html/zenbun/s1_2_1.html)]

- 
- [23] 内閣府：「男女共同参画白書 令和 5 年版，2-1 図，女性就業率の推移」  
[[https://www.gender.go.jp/about\\_danjo/whitepaper/r05/zentai/html/zuhyo/zuhyo02-01.html](https://www.gender.go.jp/about_danjo/whitepaper/r05/zentai/html/zuhyo/zuhyo02-01.html)]
- [24] 株式会社有馬電子機材（発行年不明）：「Aproc-1 の概要と使用例」 [<http://www.e-arma.com/features/features.htm>]
- [25] SMAC（発行年不明）：「製品情報，シリンダ，CBLシリーズ」 [<https://www.smac-mca.com/products/electric-cylinders/cbl-series>]



# 謝辞

本研究を進めるにあたり、三重大学大学院工学研究科機械工学専攻 池浦良淳教授には研究に関する有益なご助言を頂き、深く感謝し、厚く御礼申し上げます。

また、三重大学大学院工学研究科機械工学専攻 早川聡一郎准教授には多大なるご指導を親身になって行って頂き、的確なアドバイスをして頂き、深く感謝致し、厚く御礼申し上げます。

また、大変お忙しい中、本論文を査読して頂くと共に、多数のご教示、ご助言を賜りました三重大学大学院工学研究科機械工学専攻 加藤典彦准教授に厚く御礼申し上げます。

そして、吉田俊一研究員には実験装置の製作にあたり、親身な御協力、御尽力、ご助言をいただき、技術的な面で多大なるサポートをしていただいたことを厚く御礼申し上げます。

本研究を行うに際しまして、お忙しい中で実験に協力して下さった実験協力者の方々には貴重な時間を割いていただき、深く感謝いたします。

また、苦楽を共にし、お互いに切磋琢磨して研究生活を充実したものにして頂いた後藤倫太郎氏、鈴木理央氏、棚瀬直浩氏、谷口泰誠氏、西村晟央氏、菱川直輝氏、三岩功季氏、森井省吾氏には心より感謝の意を表します。

最後に、大学院在籍中、惜しみない援助を送ってくださった家族のおかげで充実した素晴らしい勉強・研究生活を送ることができました。感謝の気持ちを述べることで謝辞の最後とさせていただきます。