
平成 30 年度 修士学位論文

物体持ち上げ操作における
人の物体重量予測と操作特性との
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
工学研究科機械工学専攻
システム設計研究室
多氣 淳史

目次

目次.....	1
第1章 序論.....	2
1.1 研究背景.....	2
1.2 研究目的.....	5
1.3 本論文の構成.....	6
第2章 人の持ち上げ操作.....	7
第3章 実験方法.....	11
3.1 実験装置.....	11
3.2 制御方法.....	14
3.3 実験条件.....	18
第4章 実験結果.....	22
4.1 持ち上げ力微分波形 fh [N/s].....	22
4.2 人の質量予測と操作特性との関係性.....	25
4.3 被験者それぞれの操作情報.....	28
第5章 結論.....	40
5.1 結論.....	40
5.2 今後の課題.....	41
参考文献.....	42
謝辞.....	46

第1章

序論

1.1 研究背景

日本では少子高齢化が進み、生産現場での労働人口が不足している。そこで、パワーアシスト装置の導入による、労働力不足問題の軽減が期待されている。生産現場では、重量物運搬作業などの重筋作業が多く見受けられ、パワーアシスト装置により作業者の支援を行えば、労働者の負担軽減、作業効率の向上、女性や高齢者の作業への参加が見込める。

パワーアシスト装置は、作業に必要な力の一部を機械側が担うことにより、作業者の負担を減らし、楽に作業を可能にするためのものである。パワーアシスト装置の研究は数多く行われている。アシスト装置の制御方法に関する研究としては、Kazerooni らの Extender^[1]や、林原らのアクチュエータへの飽和を考慮したもの^{[2][3]}、小菅らや池浦ら(図 1.1 参照)、神吉らなどのインピーダンス制御を適用したもの^{[4]-[6]}などがある。他にも、実用面に重きを置いた研究^{[7]-[10]}や、山田らによるスキルアシスト(図 1.2 参照)などの操作性の向上を目指したもの^{[11]-[14]}などがあり、パワーアシスト研究は多岐にわたっている。

本研究では重量物運搬作業の中でも操作の開始時点に近い物体の持ち上げ操作を研究対象としている。それは下記の事象を問題視しているからである。物体の持ち上げ操作では、人は過去の経験や持ち上げ物体の外観から物の質量を予測し、物体に力を加える。物体の重さを体感した後は予測と異なるのであれば力を調整する。通常であれば、人は物体の質量を正しく予測することができる。そのため、体感した質量と予測していた質量が異なるということは日常的には少なく、重さ体感後に慌てて物体に加える力を



Fig.1.1 Power assist device for industrial site (Ikeura et al.)



Fig.1.2 Skill assist device (Yamada et al.)

大幅に調整することはめったにない。しかし、パワーアシスト装置を用いる場合、アシストにより物体の質量は大幅に小さくなる。そのため、予測していた質量よりも体感した質量の方が小さく、予想よりも軽かったと感じることがある。そして予測質量と体感質量との差が大きいと人は違和感や驚きを感じ、急激な操作につながる。

他のパワーアシスト研究は上記の問題に焦点を当てていないが、本研究室ではこの問題を研究対象として取り上げてきた。

パワーアシストに関係なく人の持ち上げ操作における特性や重量感覚に関する研究

もある^{[15]-[18]}。川合らは、物を繰り返し持ち上げた際には、人が質量を体感するまでの間、直前の試技の力の加え方と似た力曲線を描くことを述べている^[19]。これも繰り返し持ち上げた質量を想定し持ち上げ操作を行う効果であると考えられる。しかし、この研究では繰り返し試技の後、繰り返し試技とは異なる質量の物体を持ち上げた際の人の力調整方法を目的としており、注目されているのは物体が持ち上がった後（質量を体感した後）の人の操作である。そのため、物体が持ち上がるまでの操作については定量的な関係性は示されていない。

著者らは物体持ち上げ操作における質量感に対する違和感と人の操作特性との関係性を調べ、操作開始から物体が持ち上がるまでの時間間隔が予測と異なると、違和感が大きくなることを述べた^[20]。したがって、違和感を小さくするためには、物体が持ち上がるまでの時間間隔が予測通りであればよい。そのためには機械側が、人が予測している持ち上がるまでの時間間隔、あるいは人が予測している物体重量を知り、その情報に基づいてアシスト力を調整すればよい。結局、物体が持ち上がる瞬間に、物体重量が予測重量にアシストされ、人の体感質量が予測質量と等しければよいと言える。違和感の発生メカニズムについては2.1節にて説明する。

Rahman らや Nhat らがアシスト力を調整し人の体感質量を変える制御方法に関する研究を行い、重力成分を小さいままに慣性成分を変更することによって人の体感質量を変えられることを示している^{[21][22]}。重力成分を大きくすると人にとって定常的な負荷となるが、慣性を大きくすることによって人の体感質量が大きくなるのであれば慣性変更手法の方が全体的な人の負荷が小さくできるという考えに基づいている。しかし、この研究では人の予測質量に関しては調査されていないため、体感質量を変更できても予測質量に近づけられるとまでは言えない。

予測質量に近づけるためには機械側が人の操作特性から予測質量を理解し、その質量に近い操作感を作り出すことが求められる。そのためには、人の操作特性と予測質量との関係性を知る必要があり、調査が必要であった。

1.2 研究目的

永井らがパワーアシスト装置の要求事項を分類している^[23]。パワーアシスト装置の第一次的要求は力や動作の補助である。また、人との相互作用が発生するため二次的要求として安全性や安心感、使いやすさを求められる。予測と体感が異なり違和感のある操作は人にとって安心感がなく使いづらい操作となってしまう。

前節で述べた通り、違和感を小さくするためには、体感質量と予測質量に近い量となればよい。そのためには二つの手法が考えられる。1つは体感質量を予測質量に近づける方法であり、もう1つは予測質量を体感質量に近づける方法である。前者はアシスト装置が人の特性に合わせてアシスト力を調整し、後者では人がアシスト装置の特性を理解し操作することが求められる。

同様の質量、同様の外観の質量を同様のアシスト装置を用いて操作する場合には後者でも問題は起こらない。しかし、そうでない場合、例えばアシスト装置が異なる物体を一定の重量に制御した場合にも、物体を見た際の人々の予測は変わる。その状況で人がアシスト装置に合わせるのには慣れていないと難しい。異なる装置を操作するような環境であればなおさらである。また、人にとっても自分自身が機械に合わせる必要のあるシステムよりも、自身が思った通りに操作を行えるシステムの方が使いやすい。よって本研究では前者の手法により、予測質量と体感質量の違いによる問題を解決することを目指している。

体感質量を予測質量に近づけると、機械側は人の予測質量を知っている必要があるが、人が物体の質量を体感するまでにその情報が必要である。機械側の予測質量理解が人の体感質量知覚後では体感質量を変えられないからである。したがって、予測質量と体感質量の違いによる違和感の問題を解決するためには、物体が持ち上がるまでの人の操作特性による機械側の予測質量理解が必要である。そのためには物体が持ち上がるまでの人の操作特性と人の予測質量との関係性を明らかとすることが肝要となる。本研究ではその関係性を明らかとすることを研究目的とする。

1.3 本論文の構成

本章では、パワーアシスト研究の必要性や、問題点などを研究背景として述べ、その後、本研究において人の操作特性と予測質量との関係性を調査する目的について述べた。始めに、第2章では人の持ち上げ操作について説明する。その後、第3章では実験に用いた装置や制御方法、実験方法について述べる。第4章では、実験で得られた情報から人の操作と予測質量との関係性について考察を行う。最後に、第5章では本研究の結論と今後の課題について述べる。

第2章

人の持ち上げ操作

本研究では人の予測質量の違いが人の物体持ち上げ操作の特性にどのような影響を与えるのかを調査する目的で実験を行った。本章では、人の持ち上げ操作について述べ、実験をするに至った動機や着眼点を説明する。

図 2.1 は物体の持ち上げ操作の様子を示している。図 2.1 の左図は物体が地面に接地している過程を表しており、物体が持ち上がるまでの様子である。物体の持ち上げ操作では、人が物体に力を加え、力の鉛直方向上向き成分が物体重量を超えると、地面からの拘束がなくなり物体が持ち上がる。図 2.1 の右図が物体が持ち上がった後の様子を表している。

実験における計測方法については次章で述べるが、持ち上げ操作において人が加えた持ち上げ力と速度の典型的な様子は図 2.2 のようになる。グラフの横軸が時間[s]、上側のグラフが人が物体に作用した持ち上げ力[N]、下側が物体の速度[m/s]を示している。

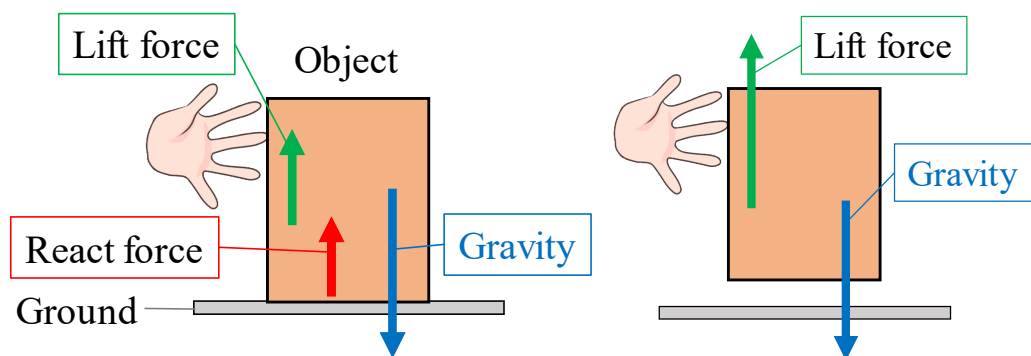


Fig.2.1 Human lifting operation

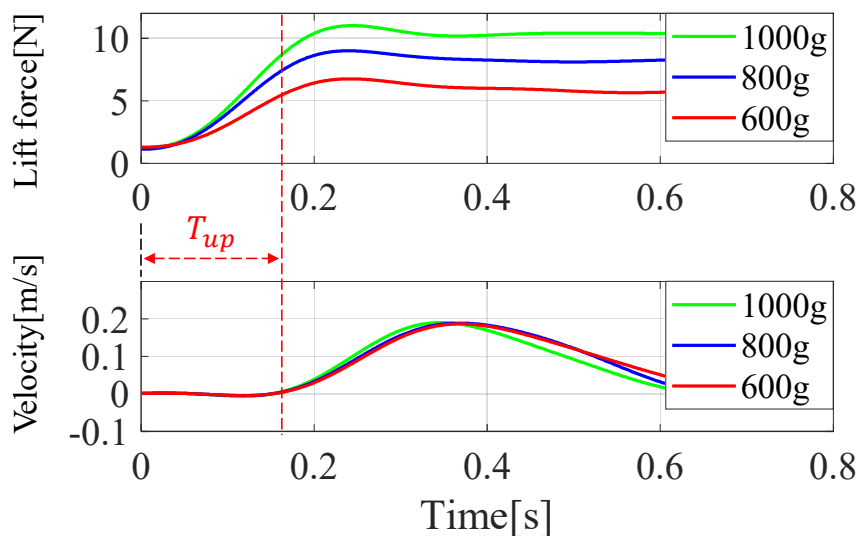


Fig.2.2 Example of operational information of human

図では、物体が持ち上がった瞬間に縦の破線を引いている。人が持ち上げ力を加え始めてから、物体が持ち上がるまでの時間を T_{up} とする。 T_{up} の間、人は真に物体重量を知覚することはできない。人が物体重量を知覚するのは、物体が持ち上がった直後である。しかしながら、通常、人は物体を持ち上げる際に、物体の重量を探るように徐々に力を大きくするわけではない。知覚する前であっても滑らかに操作する。それは物体の視覚情報や過去の経験から物体の重量をあらかじめ正しく予測できており、予測に基づいてフィードフォワード的に力を決定し加えているからである。

1章で述べたようにパワーアシスト操作時には重量予測を正しくできない状況が発生する。文献[20]において著者らは、違和感が発生する場合には予測通りの操作に比べ T_{up} が異なることを述べている。図 2.3、図 2.4 を用いて違和感の発生メカニズムを説明する。図 2.3 は横軸が時間、縦軸は実線（左軸）が持ち上げ力、破線（右軸）が速度を表している。図 2.4 は横軸が時間、縦軸が持ち上げ力の微分値を表している。黒線の操作は違和感なく 1000g を持ち上げた場合である。青線の操作は 1000g を予測していたが実際には 800g を持ち上げた違和感のある場合である。両者で予測重量は等しいため、図 2.4 のように T_{up} までの操作は両者で似通っている。しかし、実際の持ち上げ重量は異なるため T_{up} が異なる。この場合、予測していたタイミングとは異なるタイミングで物

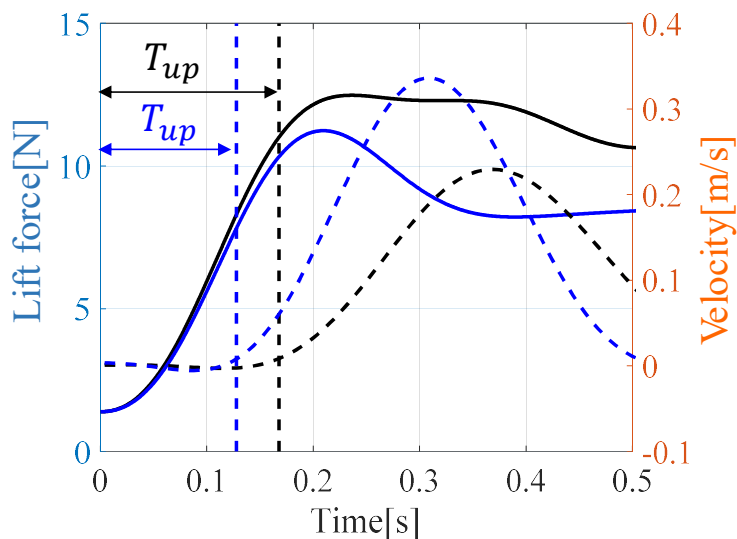


Fig.2.3 Human lifting operation leading to discomfort (Lift force and Velocity)

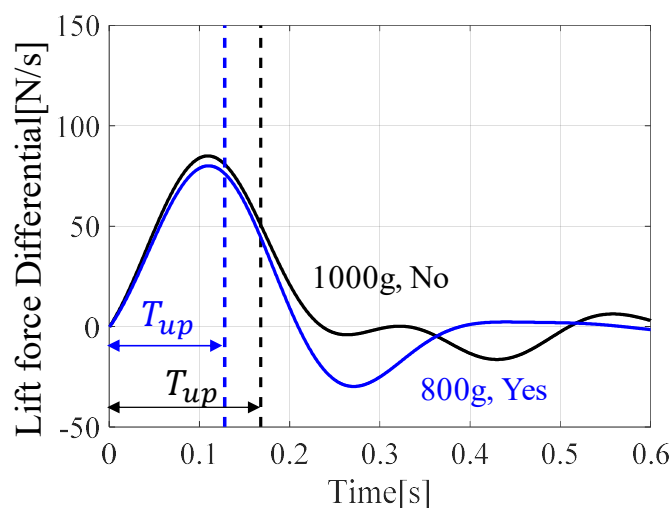


Fig.2.4 Human lifting operation leading to discomfort (Lift force Differential)

体が持ち上がるため、人が違和感を感じてしまう。また、 T_{up} 以降、違和感がない場合に比べ、速度の大きな操作となっており、思った通りに操作できていない。

先の違和感の発生メカニズムを考慮すると、 T_{up} を人の予想に近づくようにアシストすれば違和感を低減できると言える。図 2.3 で見れば、800g の操作において青の T_{up} 時点ではなく黒の T_{up} 時点で持ち上がるようにアシストできればよい。青の T_{up} 時点では物体が持ち上がらないようにアシストしたとすると 1000g と思って操作している青の操作は 1000g の曲線と乖離しない。よって、予測している T_{up} で物体が持ち上がるように

するには物体質量を 1000g にアシストすればよい。結局、 T_{up} が人の予想に近づくようにアシストすることは、アシストにより実現する重量を予測重量に近づけることと等価である。予測 T_{up} よりも予測質量の方が扱いやすいため、本研究では人の操作特性と予測質量との関係を明らかにしていく。

辻らは、フィードフォワード的に行える単純な作業を人が自然に行った場合、力の微分はベル型波形となることを述べているが^[24]、図 2.4 のように、持ち上げ操作においても力の微分量がベル型の操作波形となっており、人は予測重量や目標の動作に基づいてフィードフォワード的に力の加え方を決めていけると言える。人は重たい物を持つときの方が必要な力が大きいことを知っているため、軽いものを持つときと重たい物を持つときでは操作波形は異なる。ゆえに、予測質量に応じたベル型の力微分波形が存在するはずである。もちろん、目標とする動作によっても力の加え方は変わるため、予測重量だけで力の加え方が決定されるわけではない。人は両方を考慮して発揮する力をフィードフォワード的に決定する。そこで本研究では、複数の質量条件および目標動作条件を用意し、持ち上げ実験を行い、人の操作波形にいかなる傾向が見られるかを調査することとした。そして、実験によって得られた傾向を用いて、人の操作特性と予測質量との関係性を明らかとすることを目指す。

第3章

実験方法

実験において被験者にある質量の持ち上げ操作を繰り返し練習してもらい、練習後にデータ計測を行った。質量予測を正しく行えている状態での操作である。本研究では質量の設定は実物体を変えるのではなく、パワーアシストシステムを用いた。本章では装置の構成やアシスト手法、実験条件について説明する。

3.1 実験装置

実験装置の構成を図 3.1 に示す。実験装置は主に、物体、力センサ、位置センサ、アンプ、制御回路（アナログ回路）、アクチュエータ（ボイスコイルモータ）、ガイド、連結棒から成る。人が物体に上方向に力を加えると、力センサで力を計測することができるようになっている。実験装置の写真を図 3.2 に示す。センサ信号をアンプで増幅し 1N-2V の力-電圧の関係に調整してある。アンプには株式会社エー・アンド・デイ製の AC ストレンアンプ AS1803R^[27]を用いた。アンプで増幅された電圧値は、オシロスコープに表示されるとともに、アナログで構築された制御回路に入力される。このアナログ回

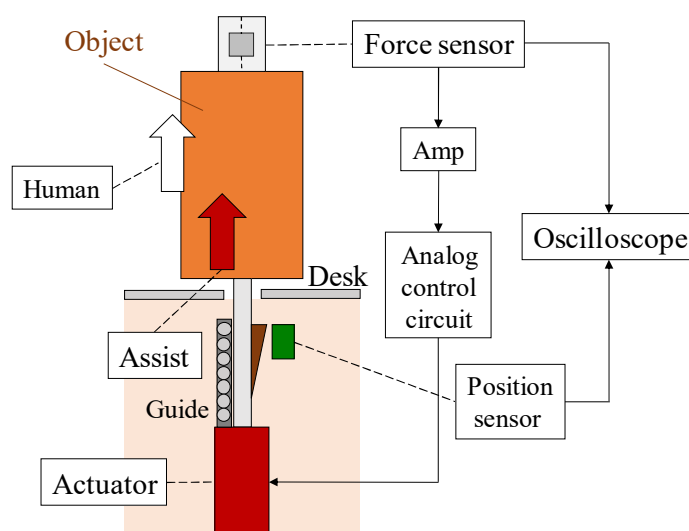


Fig.3.1 Configuration of experimental device

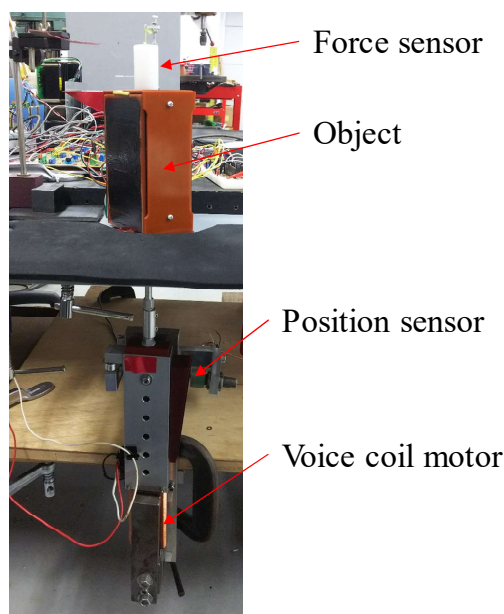


Fig.3.2 Picture of the experimental device

路では、オペアンプを用い入力電圧を増幅する。回路にはスイッチを用意し、3種類の増幅率をワンタッチで変更できる。アナログ回路で増幅された信号はアクチュエータの入力となる。ボイスコイルモータは入力電圧に比例した力を出力し、増幅率を変えると人から見た仮想的な質量を変えることができる。本実験では 600g, 800g, 1000g の3種類の仮想質量を用意した。物体はガイドにより拘束されており、鉛直方向1自由度の運動を行う。

力センサは三栄インスツルメンツ株式会社製のトルク変換器 9E01-L44-50N^[25]を用いた(図 3.3 参照)。9E01-L44-50N はモーメント荷重に弱いため、ひもを用いセンサには引っ張り荷重しかかからないようにした。センサ形状は図に示す。図 3.4 のように人の持ち上げ力(Lift Force)が外側の摘み板から作用する。摘み板から物体上部の板へ力が伝達され、物体上部に取り付けられた部材からひもを介して力センサに伝わる。力センサからひもを介し物体中央部に力が伝播する。この機構では、摘み板から力センサ上部までの質量を人が持ち上げた後にしか力センサは持ち上げ力を計測できない。持ち上げ力のグラフにおいて 140gf のオフセットが入っているのはこの部分の重量である。物体中央部は連結棒を介してアクチュエータからアシスト力を受ける。連結棒はガイドによる



Fig.3.3 Force sensor (9E01-L44-50N)

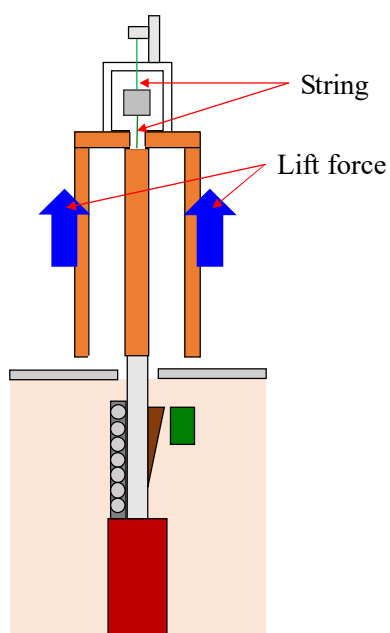


Fig.3.4 String and lift force

拘束を受ける。物体中央部には人が摘み板を把持するためのロードセルと、ロードセルへの力の負荷方向を限定するためのフリーベア、摘み板が外側に離れないように中央部へ引っ張るためのばねが取り付けられている。しかし、本論文では把持力に関する関係性を見つけることができず、今後の章で用いないため、詳細な機構は省略する。物体の表面は絶縁材料のベークライトを用い、センサへのノイズを軽減した。ベークライトは滑りやすい素材であるため、摘み板表面にはベークライトの上から液体ゴムを塗り、人が物体を持ち上げた際に滑り落ちないようにした。

位置センサには株式会社電子応用製のGAPセンサAEC-55シリーズのPU-20を用いた^[26]。

3.2 制御方法

物体が加速度を持っている場合（地面から離れている場合）、物体に加わる力は、重力、人が加える持ち上げ力、ボイスコイルモータが出力するアシスト力の3種類である。その様子を図3.5に示す。使用しているパラメータは表3.1のとおりである。本節ではアシスト力 f_a [N]の決定方法について述べる。

物体の運動方程式を立てると、次式のようになる。

$$m\ddot{x} = f_a + f_h - mg \quad (1)$$

本実験では、被験者が指定した質量（ $=m_a$ [kg]）の物体の持ち上げ操作を行うことを目標とする。よって目標インピーダンスモデルを次式とする。

$$m_a\ddot{x} = f_h - m_a g \quad (2)$$

式(1)と式(2)より加速度 \ddot{x} を消去し、 f_a について解くと式(3)のようになり、アシスト力を決めることができる。

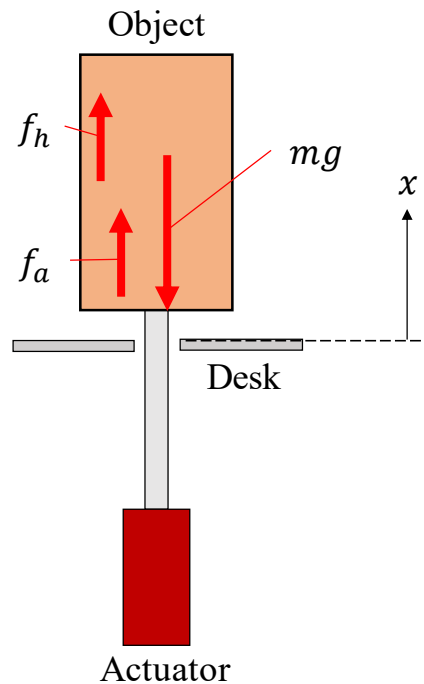


Fig.3.5 Force applied to the object not on the desk

Table 3.1 Parameter of experimental model

Parameter	Symbol	Unit
Lift force	f_h	N
Position	x	m
Assist force	f_a	N
React force	R	N
Mass of device	m	kg
Target mass	m_d	kg
Gravitational acceleration	g	m/s ²

$$f_a = \left(\frac{m}{m_d} - 1\right) f_h \quad (3)$$

式(3)からわかる通り，人の持ち上げ力 f_h を $\left(\frac{m}{m_d} - 1\right)$ 倍に増幅すると目標モデルを実現できることが分かる．前節にて述べた，アナログ制御回路部で増幅回路を構築したのはこのためである．ブロック線図で表すと図 3.6 のようになる．物体の運動モデル(式(1))には f_h と f_a の合力が入力され， \ddot{x} が出力されるが，結局 f_h が目標モデル(式(2))に入力された場合と同じ現象が得られる．目標質量 m_d は 1000g, 800g, 600g の 3 種類を用意した．

さて，上記の説明は物体が加速度を持っている場合（地面から離れている場合）であったが，人が物体を持ち上げる場合，物体は地面と接地している状態から操作は始まることとなる（図 3.7 参照）．この場合物体は地面からの束縛力（反力）を受けることとなる．加速度を 0 とし物体の運動方程式を立てると次式のようなになる．

$$0 = f_a + f_h - mg + R \quad (4)$$

これに式(3)を代入すると，式(5)のようなになる．

$$0 = f_h - m_d g + \frac{m_d}{m} R \quad (5)$$

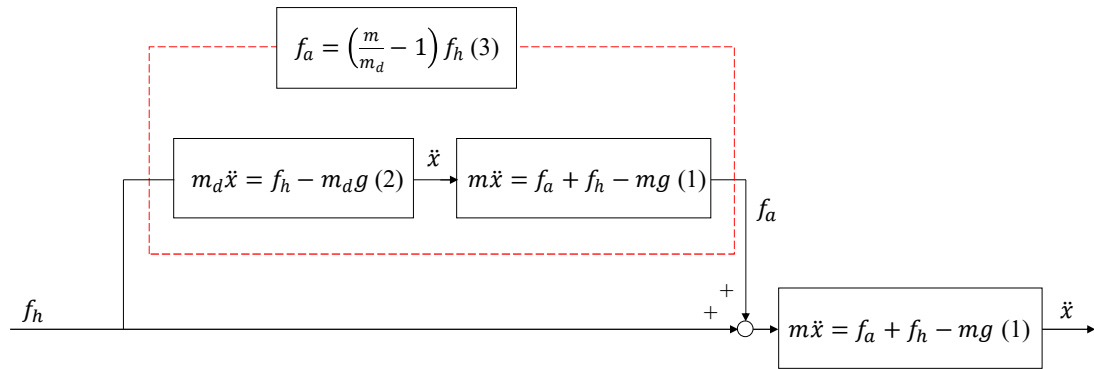


Fig.3.6 Block diagram of control system

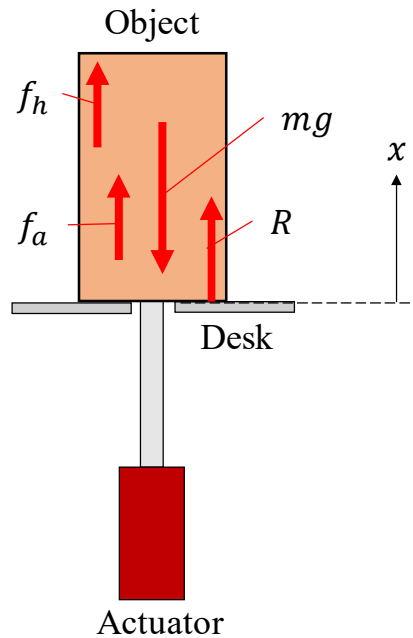


Fig.3.7 Force applied to the object on the desk

式 (5)を反力 R について解くと式(6)のようになる.

$$R = \frac{m}{m_d} (m_d g - f_h) \tag{6}$$

通常, 質量 m_d の物体の接地過程の持ち上げ動作のモデルは次式の通りである.

$$0 = f_h - m_d g + R \tag{7}$$

式(6)の場合, 式(7)を目標インピーダンスモデルとしたときと比べて反力 R が $\frac{m}{m_d}$ 倍されて

いる. しかし, 人間がこの反力を知覚することはなく, いずれの場合も人が $m_d g$ の力を

発揮したときに物体が持ち上がるため、式(5)のモデルに制御できれば人から見た物体の仮想質量を m_d と等しくできる。図3.8は式(6)と(7)の比較を行っている。赤が式(6)青が式(7)を示している。いずれの場合も人の持ち上げ力 f_h が $m_d g$ に達したときに反力がなくなり物体は机からの束縛を失い鉛直方向上向きに加速度を発生する。これらより、地面との接地過程と非接地過程いずれにおいてもアシスト力の決定方法は式(3)により行った。

上記の制御方法によって人から見た仮想質量が m_d [kg]となるように制御を行う。実験では3種類の m_d (1000g, 800g, 600g)を用意した。

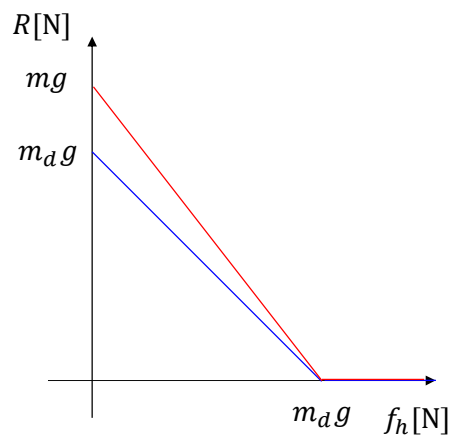


Fig.3.8 Reaction force and lift force

3.3 実験条件

本実験は人の予測質量と操作特性との関係性を調査する目的で行った。前節で述べたが、目標質量（人が体感する質量）を3種類用意した。また、持ち上げの際には質量だけでなく操作速度が変わったときの関係性も得たい。人は常に一定の操作速度で物を持つわけではなく、ゆっくり持ち上げたり速く持ち上げたりというバリエーションを持っているからである。そこでメトロノームを用意し、音の鳴る間隔(BPM : Beat Per Minute)により被験者に操作速度の目安を与えた。BPMは4種類用意した。質量と操作速度の条件を整理すると表3.1の通りである。被験者は健常な男子大学生5名に対し行い、一人につき2セット分実験を行った。表3.2上側が1セット目の実験順序、下側が2セット目の実験順序である。順番による効果をなくすために、表のように2セット目は1セット目とは逆の順番で実験を行った。

Table.3.1 Experiment order

Mass \ Metronome	1000g	800g	600g
80BPM	1	2	3
100BPM	4	5	6
120BPM	7	8	9
140BPM	10	11	12

Mass \ Metronome	1000g	800g	600g
80BPM	12	11	10
100BPM	9	8	7
120BPM	6	5	4
140BPM	3	2	1

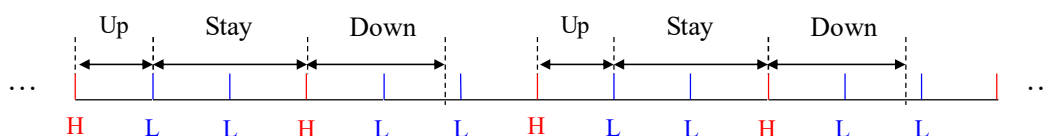


Fig.3.9 Instruction by metronome

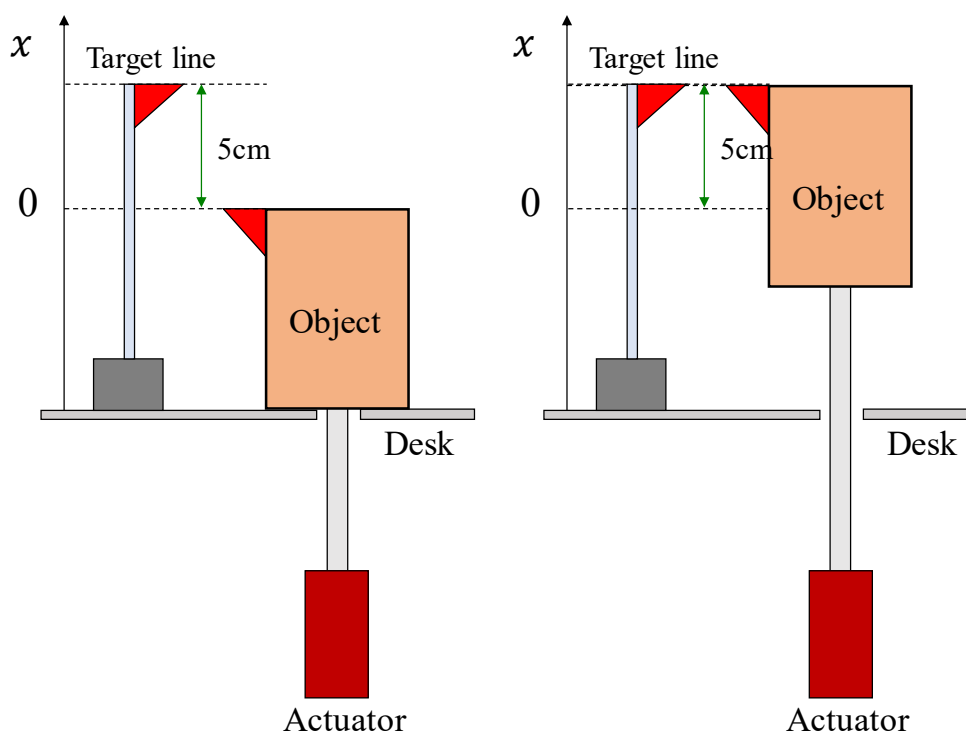


Fig.3.10 Instruction by target line

メトロノームとターゲットラインにより被験者に動作指示を与えた。メトロノームは高い音と低い音を一定の時間間隔で発する。図3.9にメトロノームによる指示方法を示す。図中の赤の縦線が高い音、青の縦線が低い音を示している。被験者は高い音を目安として物体に上方向の力を加え、物体を持ち上げる(図中のUp)。その際ターゲットラインにより指示された高さまで物体を持ち上げる。指定された高さに到達するとそこで物体を保持する(Stay)。さらに次の高い音で保持状態から物体を下げる(Down)。図3.10はターゲットラインによる指示を表しており、ターゲットラインは机から5cm上方に取り付けられている。図左の状態から人が力を加え、接地状態からターゲットラインまで持

Table.3.2 Ratio of high sound

Metronome	Ratio of high sound
80BPM	1 of 3
100BPM	1 of 3
120BPM	1 of 4
140BPM	1 of 5

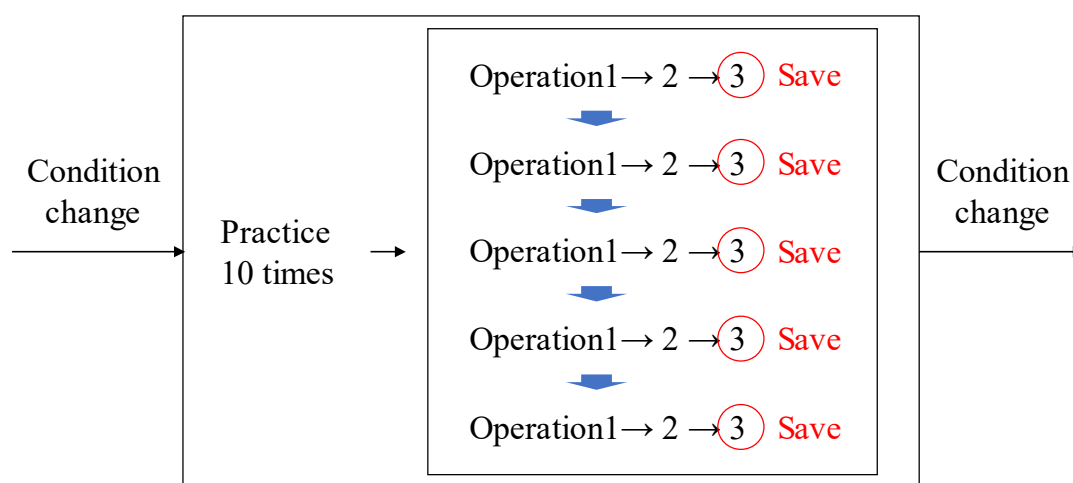


Fig.3.11 Procedure of changing experimental condition

ち上げ，図 3.10 右の状態でも保持する．図 3.9 では 3 回に 1 回高い音を発しているが，BPM により高い音の割合を表 3.2 のように変更した．BPM の大きい条件で高い音の割合が 3 回に 1 回であると準備時間がなくなってしまうからである．

表 3.1 のように 12 条件があるが，条件に対して実験を行う前に，被験者は装置に慣れるため練習を行う．装置に慣れたら実験に移り，表 3.1 のような順番で条件を変える．操作条件が変わるたびに被験者は 10 回の練習を行う．10 回でもタイミングがまだ取りづらい場合には被験者がタイミングを取れるようになるまで練習を行う．その後 3 回持ち上げ操作を行い 3 回目のデータを保存する．データを保存したら同様に被験者が 3 回持ち上げ操作を行い実験者が 3 回目のデータを保存する．1 つの操作条件に対して 5 本のデータを取得する．図 3.11 に条件変更から次の条件変更までの実験手順を示す．

条件変更の際には被験者に条件が変わることを伝える．条件変更時を除けば，常に同

じ質量同じテンポで操作を繰り返すこととなるため、被験者が物体を持ち上げるときの予測質量は直前の試技で体感した質量と同じである。また、練習後の実験中に被験者は練習中の繰り返し経験と同様の質量を予測するが制御により実現する質量も練習と等しいため、被験者の質量予測は正しい。条件変更の度に10回練習を行うのは、BPMと質量に慣れるためであり、質量に慣れると予測質量をそろえることができる。

第4章

実験結果

実験データから、被験者の操作と予測質量との間の関係性を発見した。本章では、実験結果よりその関係性について説明し、考察する。

4.1 持ち上げ力微分波形 \dot{f}_h [N/s]

本章では持ち上げ力微分値を用いて、人の予測質量と操作特性との関係性について述べる。計測した情報は持ち上げ力と変位である。操作波形の例を図4.1に示す。図では上から持ち上げ力[N]、速度[m/s]、持ち上げ力の微分値[N/s]を示している。人の持ち上げ操作については2章でも紹介したが、ここでは持ち上げ力微分値に着眼して人の持

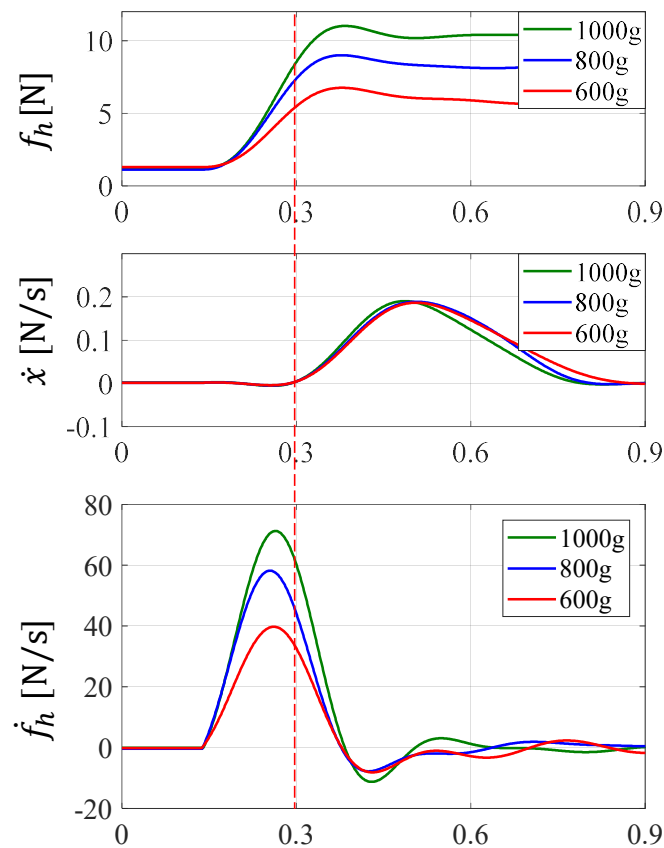


Fig.4.1 An example of waveform of human lifting operation

ち上げ操作について考察する．文献[24]でも人の力変化パターンがベル型になることが述べられているが，図4.1のように本実験でも持ち上げ力微分値は多くの操作で波形がベル型となった．さらに波形に注目すると，持ち上げ力微分のピーク値は予測質量が大きい方が大きくなっている（緑：1000g，青：800g，赤：600g）．人が毎回同じような速度で操作をした場合，この関係性だけで人の予測質量が推定できる．しかし，実際には人は様々な速度で物体を持ち上げる．そのため，3章表3.1で述べたように質量条件だけでなく動作条件も変更しながら実験を行ったわけである．動作条件が異なると，持ち上げ力微分ピーク値だけでは予測質量との関係を表現することはできない．

持ち上げにかかる時間(T_{up} [s])が異なる場合，図4.2のような波形となる．これまでと同様に物体が持ち上がった瞬間に縦の破線を引いているが，グラフ中の時間軸は操作の開始を揃えているのではなく物体が持ち上がった瞬間に揃えている．橙が T_{up} [s]が小さく力増加が遅い場合，青が T_{up} [s]が大きく力増加が速い場合である．青の方が物体を持ち上げるのに時間を要しているということである．質量条件については矢印で示した．

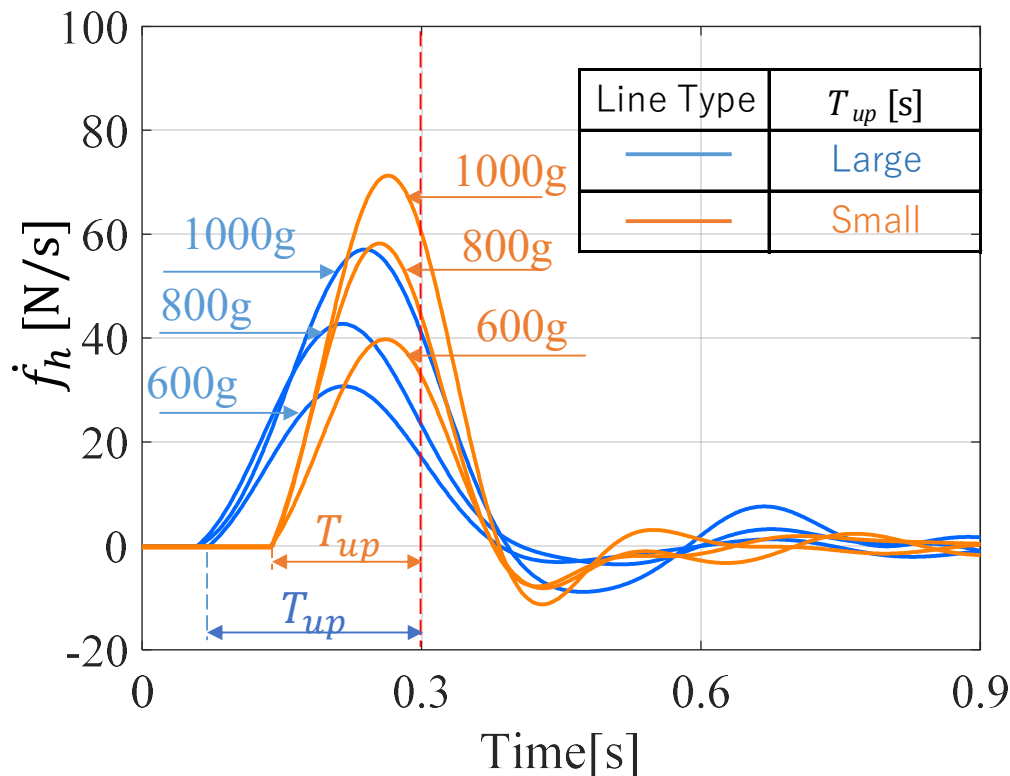


Fig.4.2 Difference in T_{up} [s]

図 4.2 からわかるように速い操作（橙）の 800g と遅い操作（青）の 1000g はピーク値はほぼ等しい。そのため、この 2 種類の予測質量を持ち上げ力微分値という 1 つの操作特性から分類することはできない。しかし、力変化が速い操作同士、遅い操作同士を比較すると、いずれも予測質量が大きい方が持ち上げ力微分値が大きくなっている。また、同じようなピーク値を取るような操作同士を比較すると、力変化が遅い操作の方が予測質量が大きいとすることができる。

したがって、持ち上げ力微分波形の振幅に関する情報と周期に関する情報があれば、人の予測質量は、持ち上げ力微分波形から分類できる。周期に関する情報がわかれば力変化が速いか遅いかがわかる。そして先の述べた通り「同じ力変化速度同士であれば予測質量が大きい方が持ち上げ力微分のピーク値（波の振幅）が大きい」ため、この 2 つの情報から予測質量の大小がわかるのである。

以上より、本研究の目標としていた「人の操作特性と予測質量との関係性」を明らかにすることができた。まとめると以下のことが言える。

1. 人の予測質量は、持ち上げ力微分波形により分類可能である。
2. 力微分波形において、周期が同様の波同士では、振幅が大きな波の方が予測質量が大きい。
3. 力微分波形において、振幅が同様の波同士では、周期が大きい操作の方が予測質量が大きい。

4.2 人の質量予測と操作特性との関係性

前節で述べた考えに基づき、波の波形を物理量で表現するために、「波の周期」に係する時間的な量と「波の振幅」を表す持ち上げ力微分値のピーク値を定義する。図 4.3 に示すように t_{peak} [s]と $\dot{f}_{h_{peak}}$ [N/s]を定義する。持ち上げ力微分値の立ち上がりから波のピークまでの時間を t_{peak} [s]とし、持ち上げ力微分値のピークの値を $\dot{f}_{h_{peak}}$ [N/s]とした。

先に定義した t_{peak} [s]と $\dot{f}_{h_{peak}}$ [N/s]を用いて、 t_{peak} - $\dot{f}_{h_{peak}}$ 平面を作成し、その平面上に各被験者の操作特性をプロットする。図 4.4 がプロット結果である。プロットした点数は全部で 600 点である。図中の緑が 1000g、青が 800g、赤が 600g を示している。実線は、式(8)の曲線に近似したものである。

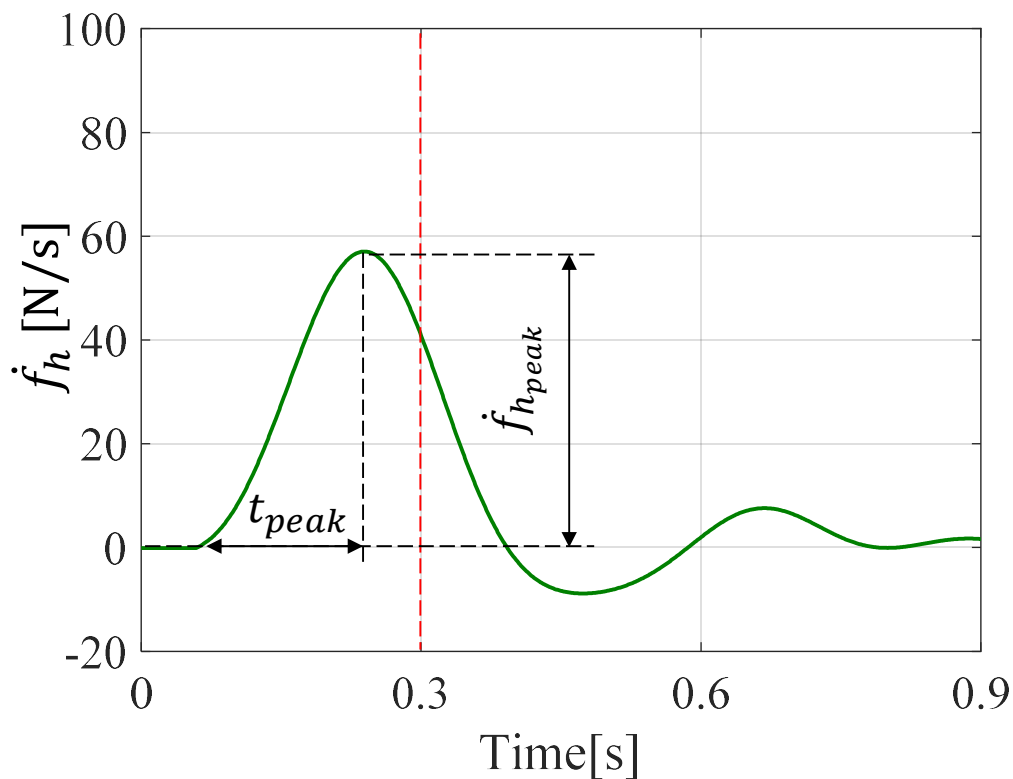
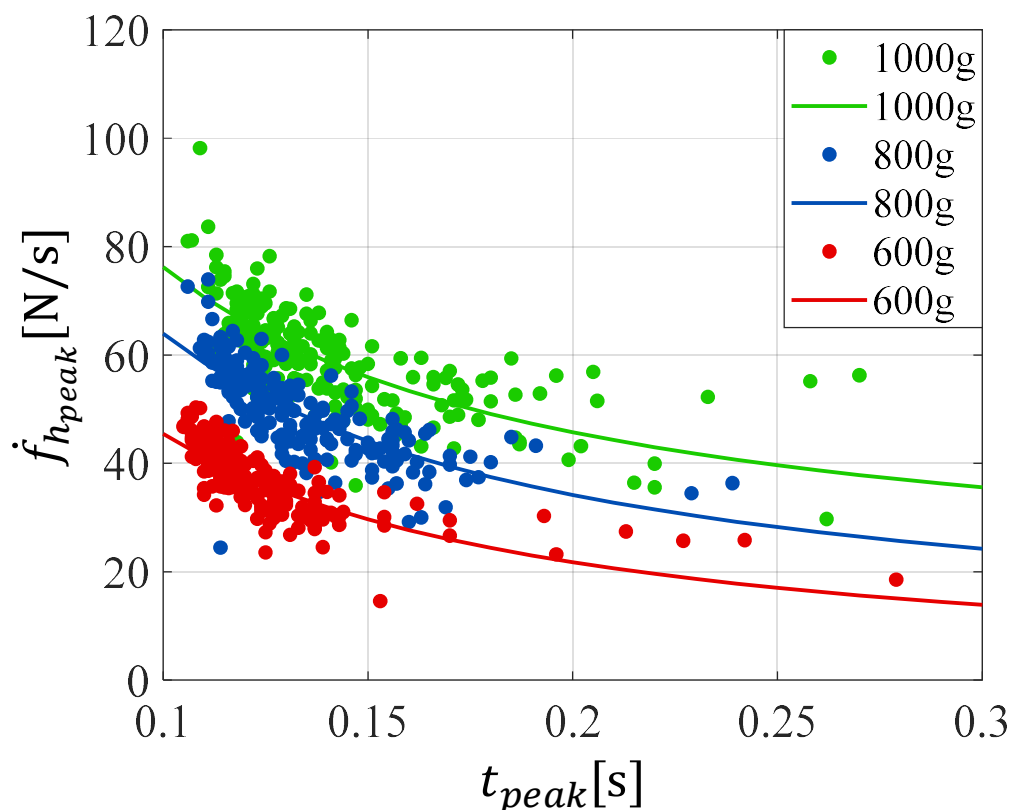


Fig.4.3 Define of t_{peak} and $\dot{f}_{h_{peak}}$

Fig.4.4 Plane of t_{peak} - $\dot{f}_{h_{peak}}$

$$\dot{f}_{h_{peak}} = \frac{a}{t_{peak}} + b \quad (8)$$

式(8)における定数(a, b)は表 4.1 の通りである.

図 4.4 より, 前節で述べた傾向が確認できる. 同程度の t_{peak} の操作同士を比較すると, $\dot{f}_{h_{peak}}$ [N/s]の大きい操作の方が予測質量が大きい. また, 同程度の $\dot{f}_{h_{peak}}$ [N/s]の操作同士を比較すると, t_{peak} [s]の大きい操作の方が予測質量が大きい.

各質量の点群は右肩下がりのカーブ上に乗っている. 右肩下がりのカーブとなるのは, 同じ質量の物体を持つときに, 力の増加が大きければ, 持ち上がるのにかかる時間が小さく, 力の増加が大きければ, 持ち上がるのにかかる時間が大きくなるからである. そこで, $\dot{f}_{h_{peak}}$ [N/s]が t_{peak} [s]に反比例 (+オフセット量) する曲線(8)で近似したものをグラフ中に載せている.

Table.4.1 Constant value(a and b) in equation (8)

mass	a	b
1000	6.1	15.3
800	6.0	4.4
600	4.7	-1.9

t_{peak} [s]と $\dot{f}_{h_{peak}}$ [N/s]を定義したことにより、図4.4のような人の予測質量の定量的な関係性を明らかにした。人の操作波形がわかれば、その波形の t_{peak} [s]と $\dot{f}_{h_{peak}}$ [N/s]が定義できる。その値が図4.4の t_{peak} - $\dot{f}_{h_{peak}}$ 平面上のどの位置にあるかにより、人の予測質量がわかる。得られた t_{peak} [s]と $\dot{f}_{h_{peak}}$ [N/s]の値を平面にプロットした際に、緑の分布に近ければ人の予測質量は1000gに近く、青の分布では800g、赤の分布では600gに近い、と言える。




グラフのところどころに見られる各質量のまとまりから外れたところに存在する点は力微分波形がピークが中央に来ていないものである。波前半部が長かったり、逆に短かったりする波形やピークが2回出てくるような波形も存在した。原因としてはメトロノームの指示にうまく対応できなかった場合や、ガイドに押し付けるような力成分による装置の機械的な振動が伝達されてしまった場合が考えられる。また、 t_{peak} [s]が大きい範囲では波形がベル型から崩れるものが多かった。これは、人間の自然な持ち上げ動作から見るとメトロノームのテンポが遅く、人がメトロノーム側に操作を合わせるためにフィードバック的な操作が現れたからであると考えられる。しかしながら、実際には t_{peak} [s]が大きい範囲では力変化が小さいため、物体が持ち上がったとき急激な操作となりにくい。そのため、質量予測との関係性は t_{peak} [s]の大きい領域では予測質量の推定は重要度が低く、 t_{peak} [s]の大きい領域でのばらつきは問題にはなりづらいと考えられる。

4.3 被験者それぞれの操作情報

本節では被験者個々の実験結果を示す。

図 4.5~図 4.14 に被験者それぞれのデータを示す。表 4.2 のように今後のグラフでは緑の実線を 1000g, 青の実線を 800g, 赤の実線を 600g として表記する。被験者は 20 代の健常な男子大学生 5 名であり, A~E の文字で表記する。1 人につき 2 セット実験を行っているため, 例えば被験者 A の 1 セット目の実験結果を「Subject A-1」と表記する。グラフでは横軸が時間で, 縦軸が上から持ち上げ力, 持ち上げ力微分, 変位, 速度の順にデータを示している。全ての操作において時間軸は物体が持ち上がった瞬間に合わせて表示している。物体が持ち上がった瞬間には赤色の縦の破線が引いてある(0.5s 時点)。各質量 20 本 (動作条件は 4 種類) ずつの合計 60 本の操作軌跡を示している。

Table.4.2 Line Type and Mass in Experimental result

Line Type	Mass[g]
	1000
	800
	600

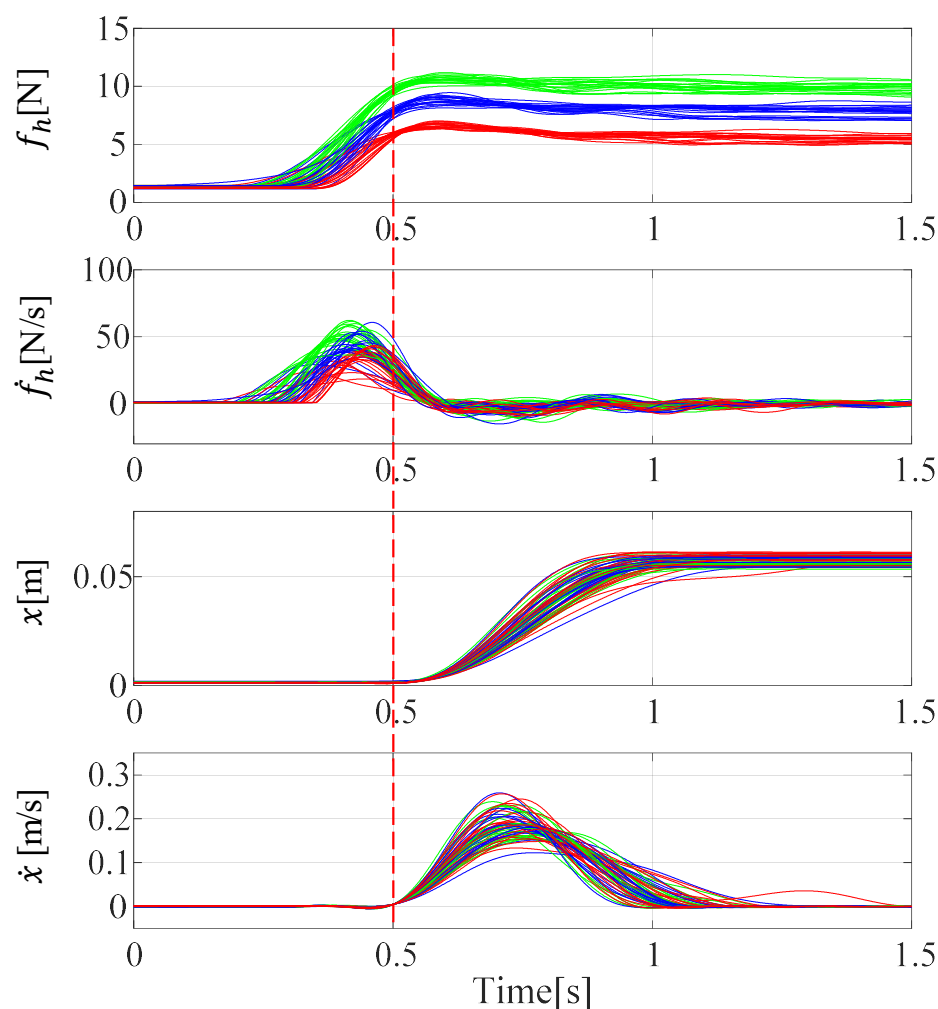


Fig.4.5 Experimental result (Subject A-1)

図 4.5 が被験者 A の 1 セット目の操作である。持ち上げ力[N], 持ち上げ力微分[N/s], 変位[m], 速度[m/s]について緩やかな変化をするものもあれば急な変化をするものもある。これは、メトロノームの BPM を変えながら実験を行った効果である。グラフの上から 2 番目の持ち上げ力微分では、多くの波形がベル型の波形となっている。ところどころベル型ではない波形が見られるが、前節で述べたようにこれが図 4.4 の分布から外れたものとなっている。

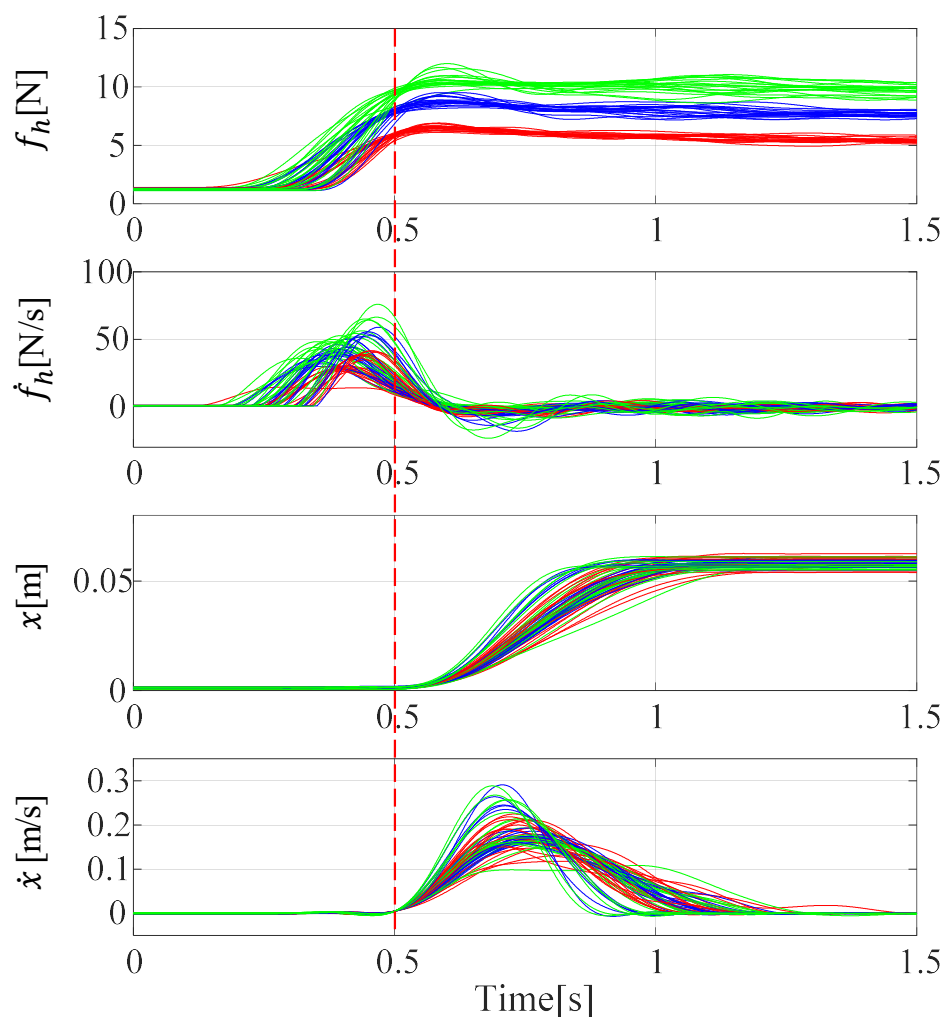


Fig.4.6 Experimental result (Subject A-2)

図 4.6 が被験者 A の 2 セット目の操作となっている。表 3.1 の通り、2 セット目は速い操作から実験を開始している。被験者 A では速度 \dot{x} [m/s] の最大値の大きな操作が多く、順番効果が存在する可能性がある。ただし、以降の他の被験者の操作を見ると個人差があり、効果の有無は人によって異なる。

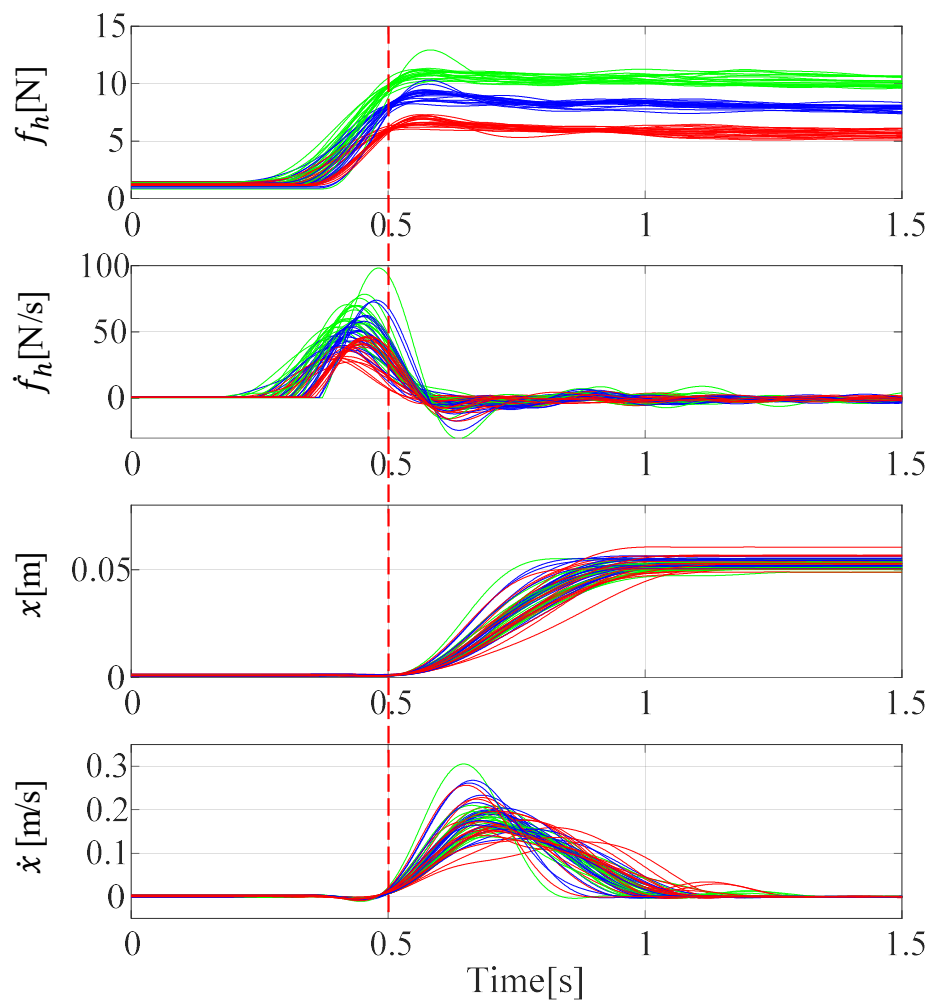


Fig.4.7 Experimental result (Subject B-1)

図 4.7 は被験者 B の 1 セット目の操作波形を示している。以降同様に被験者の操作情報を図に示す。

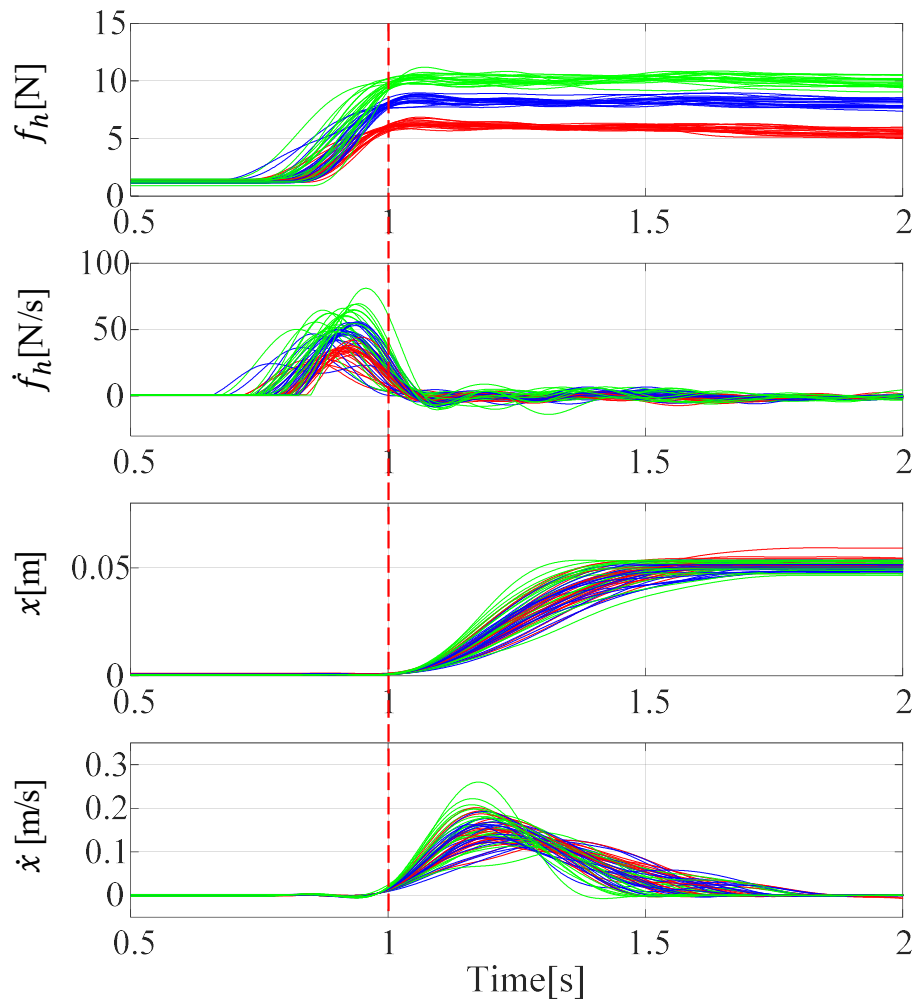


Fig.4.8 Experimental result (Subject B-2)

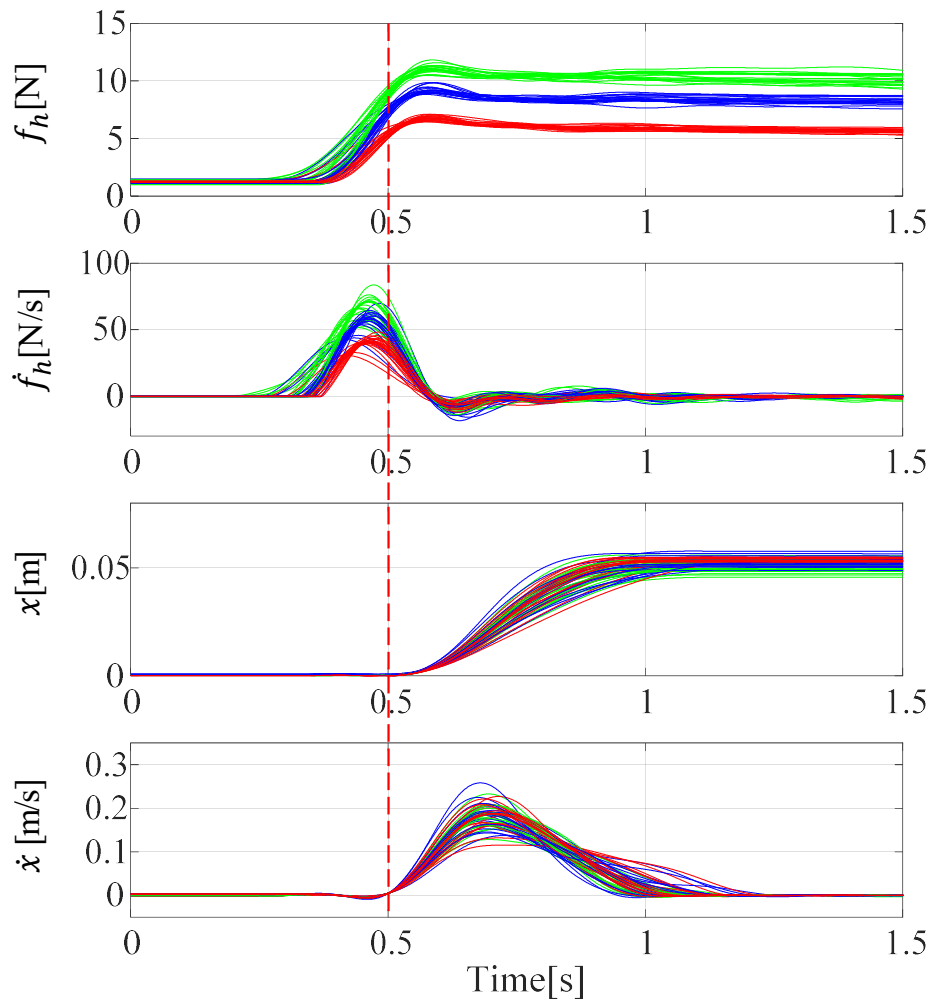


Fig.4.9 Experimental result (Subject C-1)

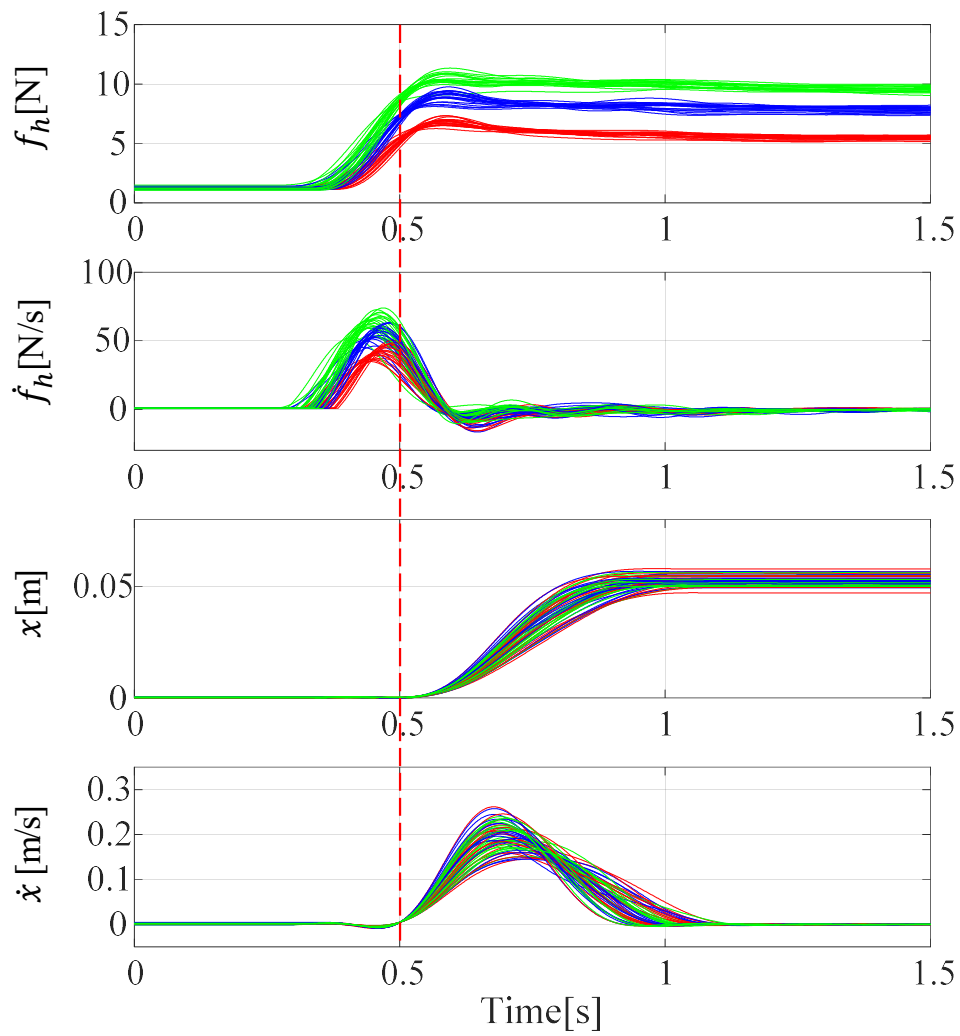


Fig.4.10 Experimental result (Subject C-2)

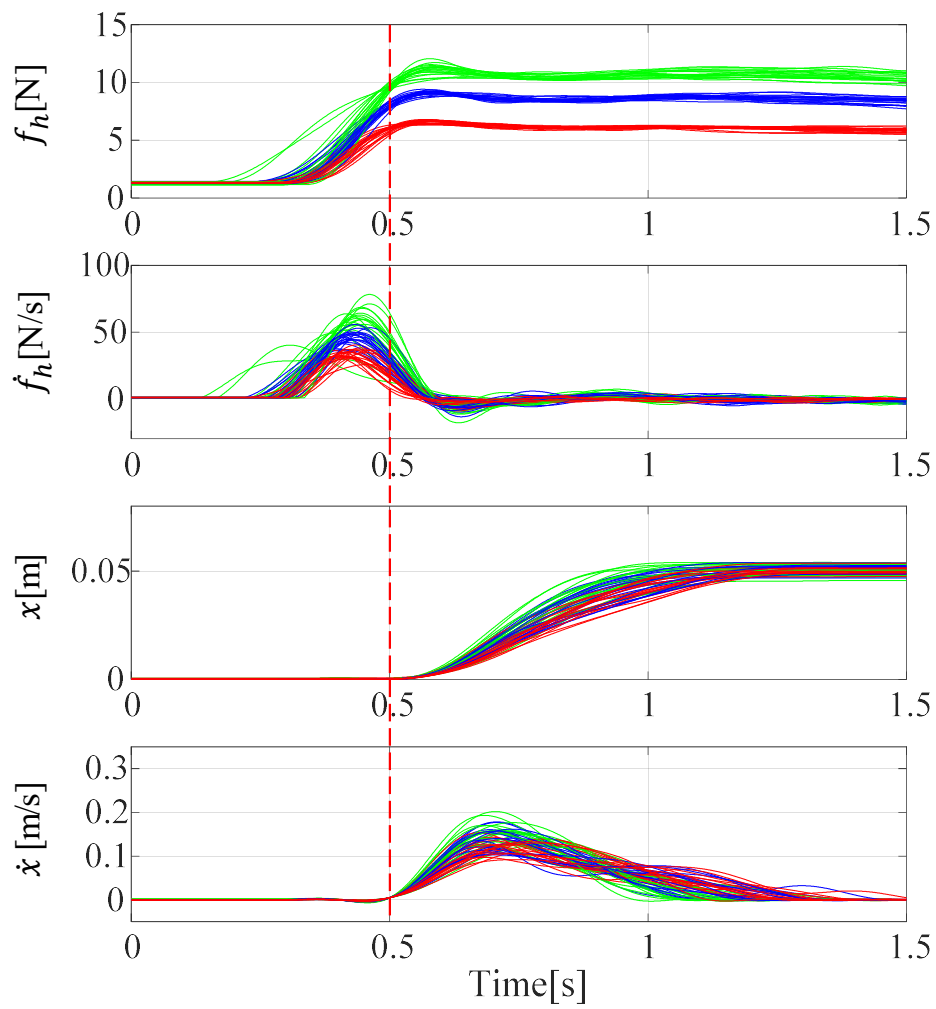


Fig.4.11 Experimental result (Subject D-1)

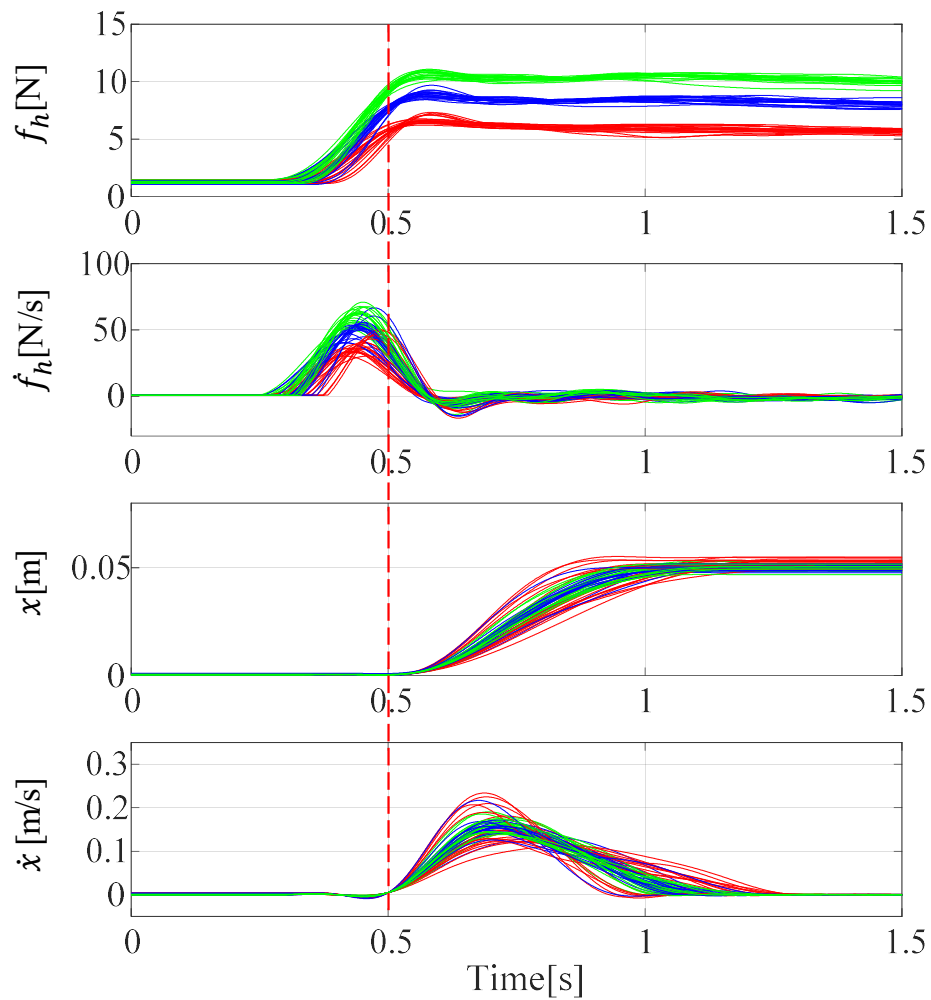


Fig.4.12 Experimental result (Subject D-2)

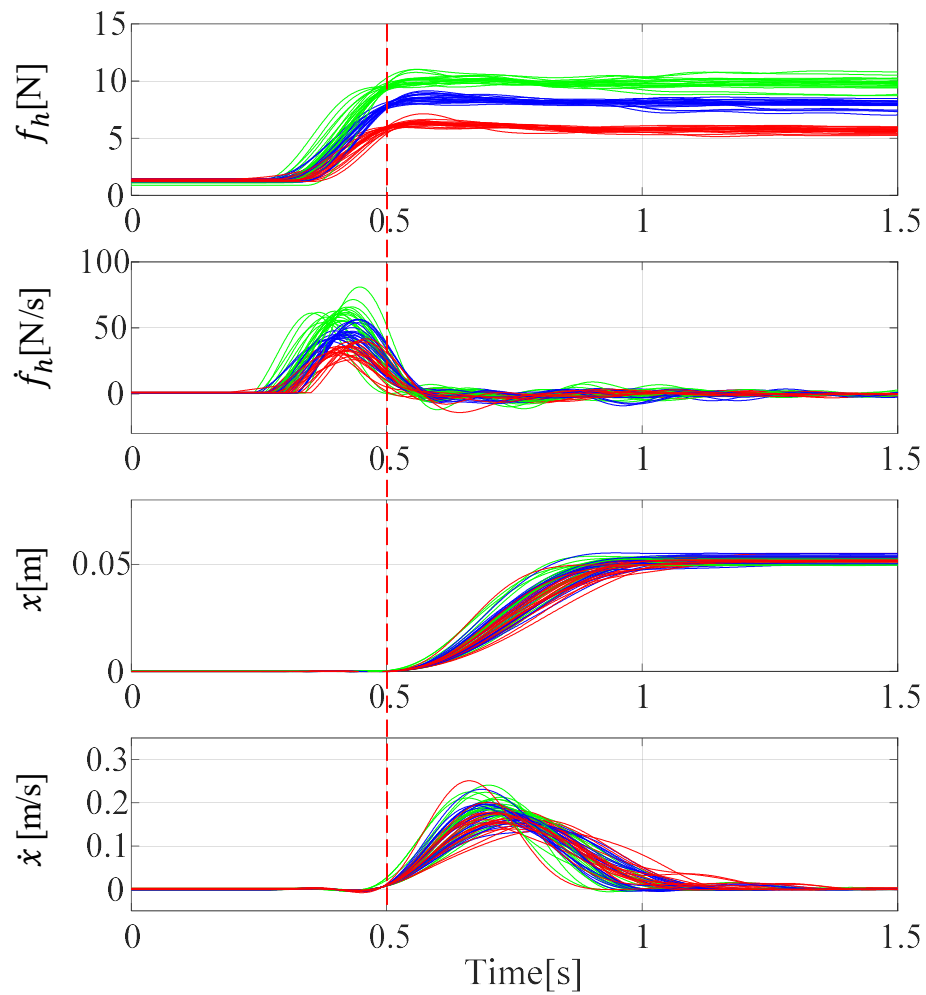


Fig.4.13 Experimental result (Subject E-1)

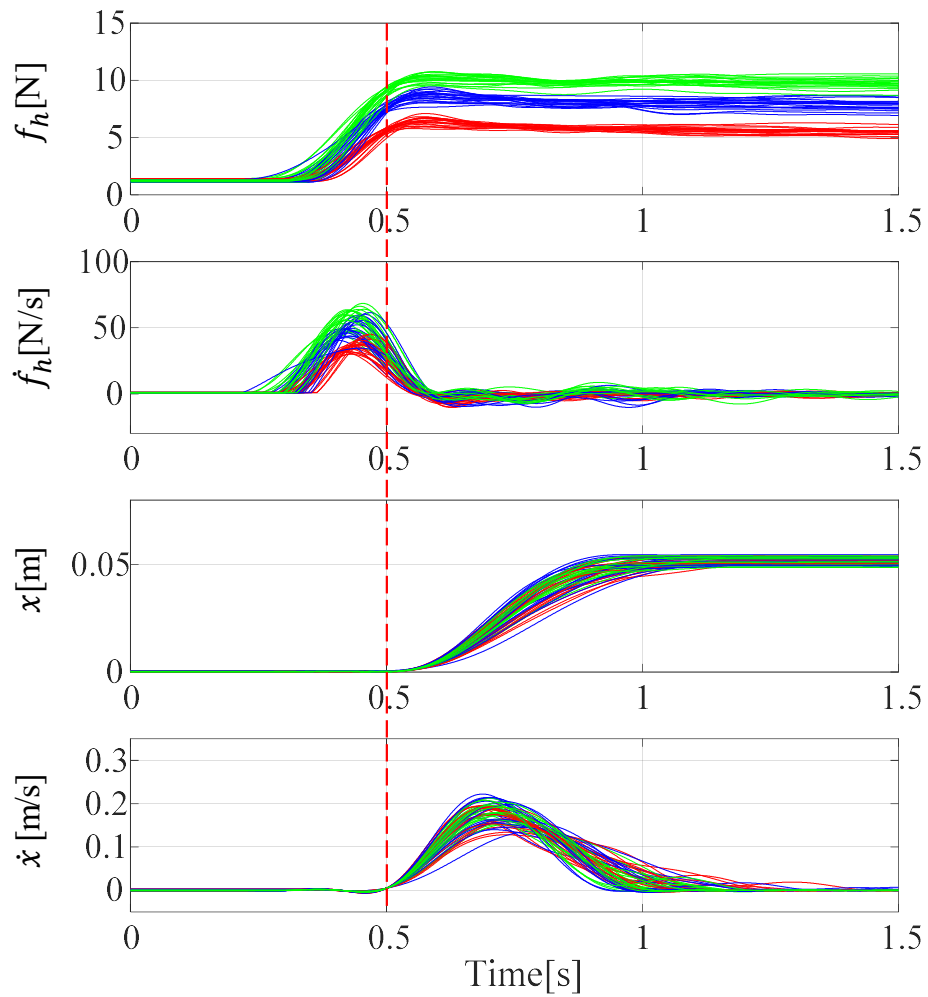


Fig.4.14 Experimental result (Subject E-2)

本節では、被験者 A から E の 10 セット分の操作情報を示してきた。操作情報から、様々な速度の操作が見て取れ、メトロノームによる指示により、被験者が速く持とうとしたり遅く持とうとしたりしていることがわかる。また、変位も 5cm 付近で保持されており、ターゲットラインによる指示も守られている。また、持ち上げ力微分波形の中にはベル型の波形とはなっていないものも見受けられた。これが図 4.4 におけるばらつきの原因となっている。この場合、被験者はメトロノームのタイミングに合わせようという意識から自然な操作ができていなかったのではないかと考えているが、本研究では原因を突き止めるに至らなかった。今後その原因を明らかにし、より正確な関係性を提唱することを目指す。

第5章

結論

5.1 結論

違和感のないパワーアシスト装置を実現するためには、操作感を人の予測している感覚に近づけることが必要である。したがって、予測質量に合わせてアシスト力を調整し体感質量を調整することが求められる。そのためには機械側が人間の予測質量を知っていなければならない。しかし、これまでに人の予測質量と操作特性との関係性についての調査はされておらず、機械側が人の予測質量を知ることができなかった。ゆえに、本研究では人の予測質量と操作特性との関係性を明らかにすることを目的とした。

本研究では、質量と動作の条件を合計 12 パターン用意し、持ち上げ操作実験を行った。実験結果より、人が物体を持ち上げる際に予測している重量は力の微分波形に現れることを述べた。力微分波形はおおよそベル型の波形となり、同じような振幅の波同士を比較すればピークの大きな波の方が予測質量が大きかった。周期が長くなれば、ピークは小さくなるが、同等な周期の操作同士を比較すればピークの大きな波の方が予測質量が大きかった。これらの関係性から、力微分波形の周期に関する量と振幅に関する量がわかれば人の予測質量を明らかにできることを述べた。

先の関係を定量的に扱うために $t_{peak}[s]$ と $\dot{f}_{h_{peak}}[N/s]$ を定義し、実験結果を $t_{peak}-\dot{f}_{h_{peak}}$ 平面上にプロットしたところ、質量ごとに分布が分かれた。このことから、 $t_{peak}-\dot{f}_{h_{peak}}$ 平面上の位置によって人の予測質量がわかるようになった。

5.2 今後の課題

本研究の先にある最終目標は違和感のないパワーアシストであるが、先に述べた関係性をそのまま制御に適用することはできない。リアルタイムでの予測重量推定では人の操作情報に周波数の低いカットオフのローパスフィルタを入れることはできないからである。カットオフ周波数が小さいと遅れが大きくなり、物体が持ち上がった後に予測質量がわかるというシステムになってしまいかねない。しかし、現実にはノイズやセンサ周りの機械的な振動などによりピークが複数出てくるようなデータとなるため、いかにそこを解決していくかが今後の課題となる。

本実験では持ち上げる高さも限定的な結果となってしまった。実験装置作成段階で摩擦の影響を恐れスライダー部のストロークを小さくしたため、ターゲットラインによる条件を 5cm より大きくできなかった。今後、異なる持ち上げ高さに対しても調査が必要である。質量に関しても、本実験では 1000g, 800g, 600g の 3 種類であった。図 4.4 のように各質量によって異なる分布が得られるのではないかと推測できるが、異なる質量に対する持ち上げ操作に対する調査を行い確認する。

4.3 節でも述べたが、ベル型となっていない波形が本研究の推定方法におけるばらつき最大の原因となっている。その場合の被験者の操作をよく観察し、原因を突き止めることが必要であり、より正確な関係性の提唱を目指す。

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)」, Vol.61, pp.4318-4325(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] 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).
- [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] 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, pp.857-864(2006).
- [11] 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).
- [12] 植村充典, 猪口久仁, 上西 智, 金岡克弥, 川村貞夫:「人間・アクチュエータ・機械的弾性要素の協調を用いたパワーアシストシステムの実験的検討」, 日本ロボット学会誌, Vol.25, pp.881-886(2007).
- [13] 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).
- [14] 猪瀬 洸樹, 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).
- [15] Westling, G., & Johansson, R. S. : 「Factors influencing the force control during precision grip」, Exp. Brain Res., Vol.53, 277-284(1984).
- [16] Johansson, R. S., & Westling, G. : 「Roles of glabrous skin receptors and sensorimotor memory in automatic control of precision grip when lifting rougher or more slippery objects」, Exp. Brain Res., Vol.56, pp.550-564(1984).
- [17] 柳澤秀吉, 勇木徳仁:「物体の表面属性に対する視覚的感性が持ち上げ時の体性感覚に与える影響(感覚モダリティの遷移における予測感性)」, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.78, No.789, pp.1913-1924(2012).
- [18] 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)

- [19] 川合悟, 木下博, 生田香明:「物体重量の変化と摘み力の関係からみた精密把握運動の摘み力制御について」, 体力科学, Vol.43, pp.247-258(1994).
- [20] Atsushi Tage, Satoru Serikawa, Ryojun Ikeura, Hideki Sawai, Shigeyoshi Tsutsumi, Soichiro Hayakawa:「Analysis of characteristics of human lifting operation leading to discomfort caused by the difference between assumed mass and perceived mass」, Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, Vol.1, pp.752-758(2018).
- [21] 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).
- [22] 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).
- [23] 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).
- [24] 辻敏夫, 三木義民, 伊藤宏司:「拘束動作における人間の手先入力パターンと仮想軌道仮説」, 計測自動制御学会論文集, Vol.28, No.3, pp.366-373(1992)
- [25] 三栄インスツルメンツ株式会社 (発行年不明)「9E01-L44 /引張用・超小形ロードセル」, <http://www.sanei-inst.co.jp/item_loadcell_mrdt.html>2019年1月22日アクセス.
- [26] 株式会社電子応用 (発行年不明)「AEC-55 シリーズ PU-20」, <<http://www.aec-jpn.com/products/aec-55/pu-20.html>>2019年1月22日アクセス.
- [27] 株式会社エー・アンド・デイ (発行年不明)「AC スtrenアンプ AS1803R」<<http://www.aandd.co.jp/adhome/products/signalconditioner/as1803r.html>

>2019年3月13日アクセス.

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，深く感謝致します。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 野村由司彦教授に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研究に関する有益なご助言を頂き，深く感謝致し，厚く御礼申し上げます。

また，三重大学工学研究科機械工学専攻 堤成可助助教には研究に関する有益な御助言を頂き，ご指導を親身になって行って頂き，深く感謝致し，厚く御礼申しあげます。

また，澤井秀樹研究員には実験装置の製作や改良にあたり，親身な御協力，御尽力，アドバイスをくださり，厚く御礼申し上げます。

また，藤原明子秘書には事務手続きを始め，研究しやすい環境をおつくり頂き，厚く御礼申し上げます。

そして，忙しい中で実験に協力していただいた被験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。

本研究にあたり，ともに実験を行った，芹川聡氏には研究に関する助言を頂いたことだけでなく，日々の研究生活を楽しく有意義なものとしてくれたことにも厚く御礼申し上げます。深く感謝しております。

また，同期の近藤伸哉氏，田中捷氏，戸田雄也氏，羽柴洋太氏，巴洪強氏には研究に関する助言を頂いたことだけでなく，日々の研究生活を楽しく有意義なものとしてくれたことにも厚く御礼申し上げます。

また，研究室での生活を楽しく豊かにしていただいた，修士1年生と4年生の皆様

に感謝し、今後のご活躍を期待しております。

最後に、大学生活をする上で惜しめ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。

