

---

令和元年度 修士学位論文

物体持ち上げ動作において  
グリップの変位が重量知覚に  
与える影響に関する研究

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

人間支援システム研究室

芹川 聡



# 目次

---

目次.....	1
第1章 序論.....	3
1.1 研究背景.....	3
1.2 研究目的.....	7
1.3 本論文の構成.....	9
第2章 実験装置・制御方法.....	10
2.1 実験装置.....	10
2.2 グリップの目標変位.....	19
2.2.1 負のステップ指令.....	19
2.2.2 仮想ばねの挿入.....	21
第3章 重量感評価実験.....	24
3.1 実験内容.....	24
3.2 実験結果.....	27
3.3 考察.....	29
第4章 最も重く感じる制御開始条件を特定する実験.....	31
4.1 実験内容.....	32
4.2 実験結果.....	33
4.3 考察.....	37
4.4 各被験者の操作波形.....	40
第5章 結論.....	44
5.1 まとめ.....	44

---

目次

---

5.2 今後の課題.....	45
参考文献.....	46
謝辞.....	50

# 第1章

## 序論

### 1.1 研究背景

近年、我が国の生産年齢人口は少子高齢化の影響によって減少傾向にあり、労働者人口の低下や生産現場における高齢化が問題となっている。この生産現場では身体的負担の大きい重量物運搬作業の機会が多く見受けられる。このような問題に対して、人の筋力を増幅し運搬作業をサポートするパワーアシスト装置の導入が有効であり、作業者の負担軽減や作業効率の向上及び、筋力の低い者や高齢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を使用して物体を持ち上げる際、操作者が自身の想定と異なる質量や持ち上げ挙動を知覚し違和感を抱くことがある。通常、人は物体を持ち上げる際、最初に物体の外観や過去の経験から持ち上げ時に体感する質量を予測し、これに基づき持ち上げる力を決定する。そして物体に力を加え始め、物体が離地することで質量を体感する。しかし、パワーアシスト装置を介した物体の持ち上げ動作において、操作者はパワーアシスト装置の発揮する力を考慮に入れて質量を予測する。したがって、操作者がパワーアシスト装置の特性を十分に理解していないと、誤った質量予測に基づき操作を行う場合がある。また、人は物体の質量を正確には判断できない。例えば、同質量で大きさの異なる2つの物体を持ったとき、小さい方が大きい方よりも重く感じる「size-weight illusion」という錯覚が存在する。もし操作者が質量予測を誤った状態でパワーアシスト装置を操作し、自身の想定と異なる質量を体感すると、操作に違和感を覚えることや、操作性が悪いと感じることがある。この問題を本研究では重量感覚問題と称して取り扱う。重量感覚問題はパワーアシスト装置の急激な操作の原因となり、事故を誘発

する危険性を孕んでいる。

パワーアシスト装置に関する研究は、アーム型のパワーアシスト装置 Extender<sup>[1]</sup>をはじめ、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<sup>[2][3]</sup>や、池浦ら（図 1.1 参照）のようなインピーダンス制御を適用したもの<sup>[4]-[6]</sup>、図 1.2 に示す山田らのスキルアシストのような操作性の向上を目指したもの<sup>[7]-[10]</sup>、実用面に重きを置いた研究や<sup>[11]-[14]</sup>など多岐にわたる。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した第一次的要求と安全性、安心感、使いやすさを目的とした第二次的要求に分類している<sup>[15]</sup>。現状、パワーアシスト研究は第 1 次的要求に関するものがその大半を占めている。先に述べた重量感覚問題の解決は第二次的要求に分類される。

パワーアシスト研究とは異なるが、人の重量感覚や持ち上げ動作を対象にした研究<sup>[16]-[18]</sup>も存在する。川合らは、物体離地前の段階における人の持ち上げ力の加え方は、人の予測質量に依存することを明らかにした<sup>[19]</sup>。そこで本研究室の多氣らは、物体離地前の人の持ち上げ動作特性に着目し、違和感の発生メカニズムについて調べた<sup>[20]</sup>。その結果、人は想定と異なる物体離地のタイミング及び、持ち上げ速度を知覚することで操作に違和感を覚え、これらの知覚は人の予測質量と体感質量の差異に起因することが解明された。即ち、重量感覚問題を解決するためには予測質量と体感質量の差異を小さくすることが求められる。その実現には予測質量を体感質量に近づける方法と、体感質量を予測質量に近づける方法が考えられる。前者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こと、後者は機械側が人の操作特性や操作意図を理解し人に合わせた支援を行うことを意味する。重量感覚問題を解決するためには、人が装置特性を理解するだけでなく、人の重量知覚特性を考慮した支援の実現が肝要である。

体感質量を予測質量に近づける方法として、人が重量を知覚する前、即ち物体が離地する前にアシスト装置が人の操作特性を読み取り、そこから予測質量を推定し、その質量を実現するようにアシストする方法が挙げられる。この方法においてアシスト装置は、人の予測質量の推定と重量感覚操作の 2 つの作業を行う必要がある。

著者らは人の予測質量の推定を目指し、人の予測質量と持ち上げ動作特性の関係を調べた<sup>[21]</sup>。その結果、持ち上げ力の微分波形の形状から予測質量を推定可能であることが分かった。ただし、この方法を実際のパワーアシスト装置で実現するためには、計測した持ち上げ力をリアルタイムで微分することが求められる。デジタルデータの微分はノイズの影響を大きく受けるため、ノイズ除去フィルタの運用は必須である。しかし、ノイズ除去フィルタを介した波形計測では微分波形の取得に遅れが生じ、予測質量の推定が物体離地に間に合わない。よって现阶段では予測質量の推定は実現に至っていない。

また、人の重量感覚制御については本研究室の Rahman らや Nhat らが慣性制御により可能であることを示している<sup>[22][23]</sup>。この研究はアシスト装置の実現する仮想的な重量と慣性力を分離し、重力成分を小さくしたまま慣性成分を大きくすることで、操作者の定常的な負担を抑えながら重量感覚を操作したいという考えに基づいて行われた。



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



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



## 1.2 研究目的

予測質量と体感質量が等しいとき、操作者は想定通りのタイミングで物体を離地させている。対して、前節で述べた多気らの研究により、予測質量と体感質量の異なる持ち上げ動作において、物体離地のタイミングが操作者の想定と異なることが解明された。よってこのタイミングを制御することで、操作者の重量感覚を制御できる可能性がある。Rahman らの提案した慣性制御は人の重量感覚制御に有効であった。ただし、この方法は重力項と慣性項のパラメータが操作者の予測質量に依存するため、パワーアシスト装置の操作特性も予測質量に依存する。もし物体離地のタイミングを操作者の想定に近づけることで重量感覚問題を解決できるのなら、離地後の操作感まで予測質量に依存させる必要は無くなる。

また、現状パワーアシスト装置に使われるアクチュエータの一つとしてボールねじアクチュエータが挙げられる。本研究室もボールねじアクチュエータに位置制御ベースのインピーダンス制御を適用したパワーアシスト装置を過去に開発している。ただし、この制御方法は環境との接触時に振動特性を持つ欠点が存在する。対して力制御の場合この振動は発生しないため、パワーアシスト制御に有利である。ただし、ボールねじアクチュエータに力制御を適用する場合、以下のような課題が存在する。ボールねじアクチュエータはガイドにより、モータの回転を直動運動に変換しているため、力制御においてガイド摩擦の補償が不可欠である。一般的に動摩擦の補償は速度の符号に応じて補償する向きを判断するが、速度 0 付近では微分ノイズの影響で値が正負に頻繁に切り替わるため、速度に不感帯域を設けなければならない。不感帯域内では静止と運動の判断ができず、静止摩擦の補償が不可能である。したがって、物体離地のタイミングにおいて正確な力制御ができない。もし物体離地のタイミングが人の重量知覚に与える影響が大きい場合、このことは重量感覚問題を解決する上で大きな課題となる。

以上を踏まえ、本研究は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。図 1.3 に提案モデルを示す。このパワーアシスト装置は持ち上げ力の支援に加え、操作

者の掴むグリップが物体に対して鉛直方向に変位する機能を有する。先に述べたようにボールねじアクチュエータは物体離地のタイミングにおいて正確な力制御ができないため、操作者は想定と異なる物体離地のタイミングを知覚する可能性がある。そこでグリップの動きにより操作者の知覚する物体離地のタイミングを制御することがこの提案装置の狙いである。

駆動式グリップを搭載したパワーアシスト装置を開発する上で、まずは物体離地を知覚するタイミングの変更が重量感に与える影響を明らかにする必要がある。そこで本研究では駆動式グリップを搭載した物体を制作し、グリップの制御によって離地を知覚するタイミングの変更を試みた。また、これが人の重量感に与える影響を調べた。

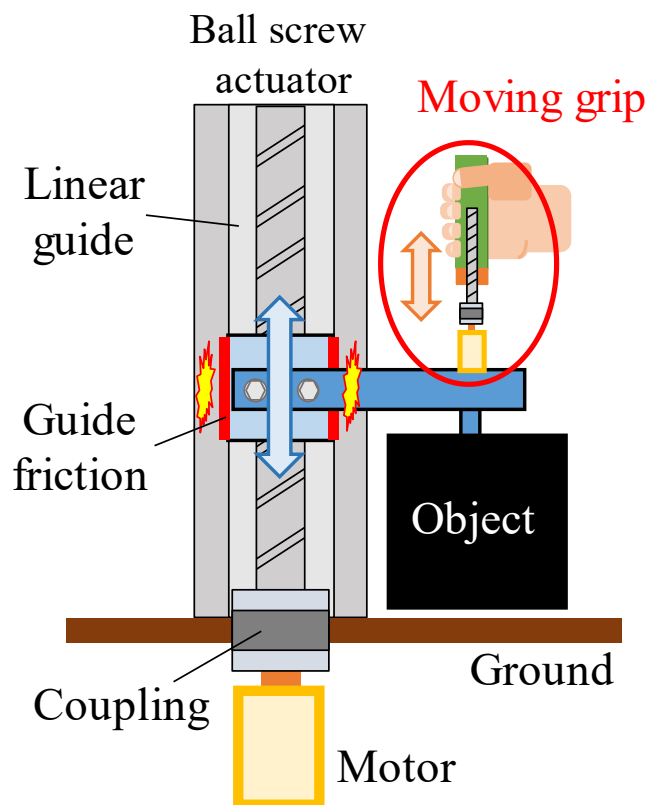


Fig.1.3 Power assist device equipped with moving grip

### 1.3 本論文の構成

本章では、パワーアシスト装置使用時に発生する重量感覚問題、その解決方法及び、本研究室の取り組みなどを背景として述べた。そして、新たに駆動グリップを搭載したパワーアシスト装置を提案し、その開発の一環として行った本研究の内容及び、その目的について述べた。

第2章では、実験に用いた装置及び、その制御方法について述べる。

第3章では、グリップの動かし方による重量感の違いを評価する実験について述べる。実験内容を説明した後、得られた結果を示し考察をする。

第4章では、前章の実験結果を受けて行った追加実験について述べる。実験内容及び、その結果を示し、グリップの動きによって重量感が変化する理由について考察する。

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

## 実験装置・制御方法

---

駆動式グリップを搭載したパワーアシスト装置を開発する上で、離地を知覚するタイミングの変更が重量感に与える影響を明らかにする必要がある。そこで本研究では、パワーアシスト装置本体側の制御性能に左右されないシステム構成で持ち上げ実験を行い、グリップの変位が重量感にどのように影響するかを検証した。

### 2.1 実験装置

実験装置は駆動式グリップを備えた持ち上げ物体及び、制御機器によって構成される。前者の外観及び、構成を図 2.1, 図 2.2 に示す。こちらは主に、グリップ、ボールねじ軸、ボールねじナット、ロードセル、DC ギヤドモータ、ポテンシオメータ、物体、リニアブッシュ、リニアシャフト、レーザ式変位センサにより構成される。円筒形状のグリップには軸の中心に貫通穴が開いており、ボールねじ軸のねじ部が貫通している。グリップの穴径はボールねじ軸の径を上回るように設計されており接触はしない。グリップとボールねじナットは図 2.3 に示すように対称に配した 2 つのロードセルを介して結合されている。ナットには摩擦の影響を考慮しリニアガイド等は取り付けしていない。操作者がグリップを掴みナットの回転を抑えることで、ボールねじ軸の回転に伴いグリップが鉛直方向に動く。また、グリップに加わる持ち上げ力はこれら 2 つのロードセルに分割して伝達されるため、後の演算処理で出力の和をとり合計値を算出する。ロードセルに接触する部品についてはノイズ対策を考慮し、絶縁性の高い樹脂系材料を用いた。ボールねじ軸の下端はカップリングによりギヤド DC モータの回転軸と結合しており、モータ回転力がボールねじ軸に伝達される。カップリングを覆うカップリングケースに

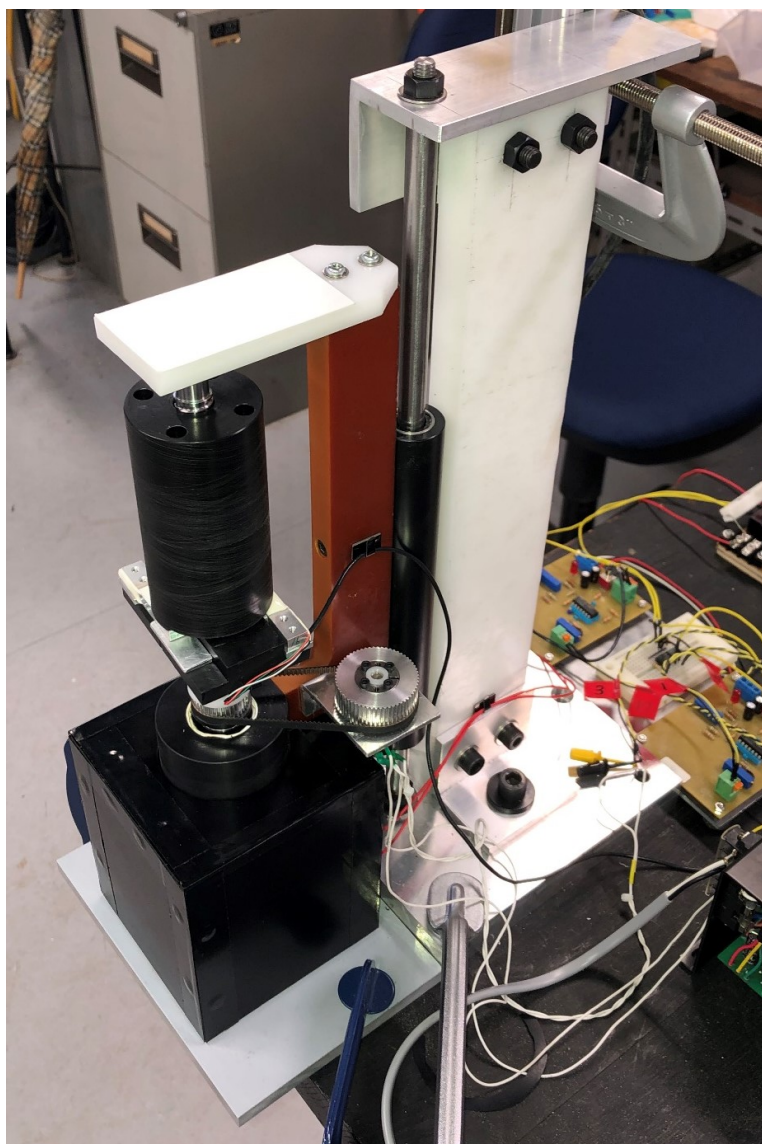


Fig.2.1 Appearance of object with moving grip

はアンギュラ玉軸受けがペアで組み込まれ、ボールねじ軸のラジアル荷重及び、スラスト荷重を受けている。さらに、ボールねじ軸上端にも深溝玉軸受けを配し、こちらはラジアル荷重を受けている。グリップの変位についてはモータ回転角から算出する。モータ回転角はポテンシオメータの出力から計測される。図 2.2 に示すように、モータの回転角がタイミングプーリ及び、それに巻き付けたタイミングベルトを通じて、減速された状態でポテンシオメータに伝達される仕様である。また、モータ及び、カップリングケースは直方体の黒い箱に覆われており、本実験ではこの箱を持ち上げ物体として取り

扱う。以降この箱を物体と称する。物体の動きはリニアブッシュ及び、リニアシャフトにより拘束され、その鉛直方向変位はボールねじ軸上端よりさらに上部に取り付けられたレーザ式変位センサによって計測される。物体が机上に置かれた状態を初期状態とし、操作者がグリップを握って鉛直方向に力を加えることで物体が持ち上がる。持ち上げ動作の様子を図 2.4 に示す。

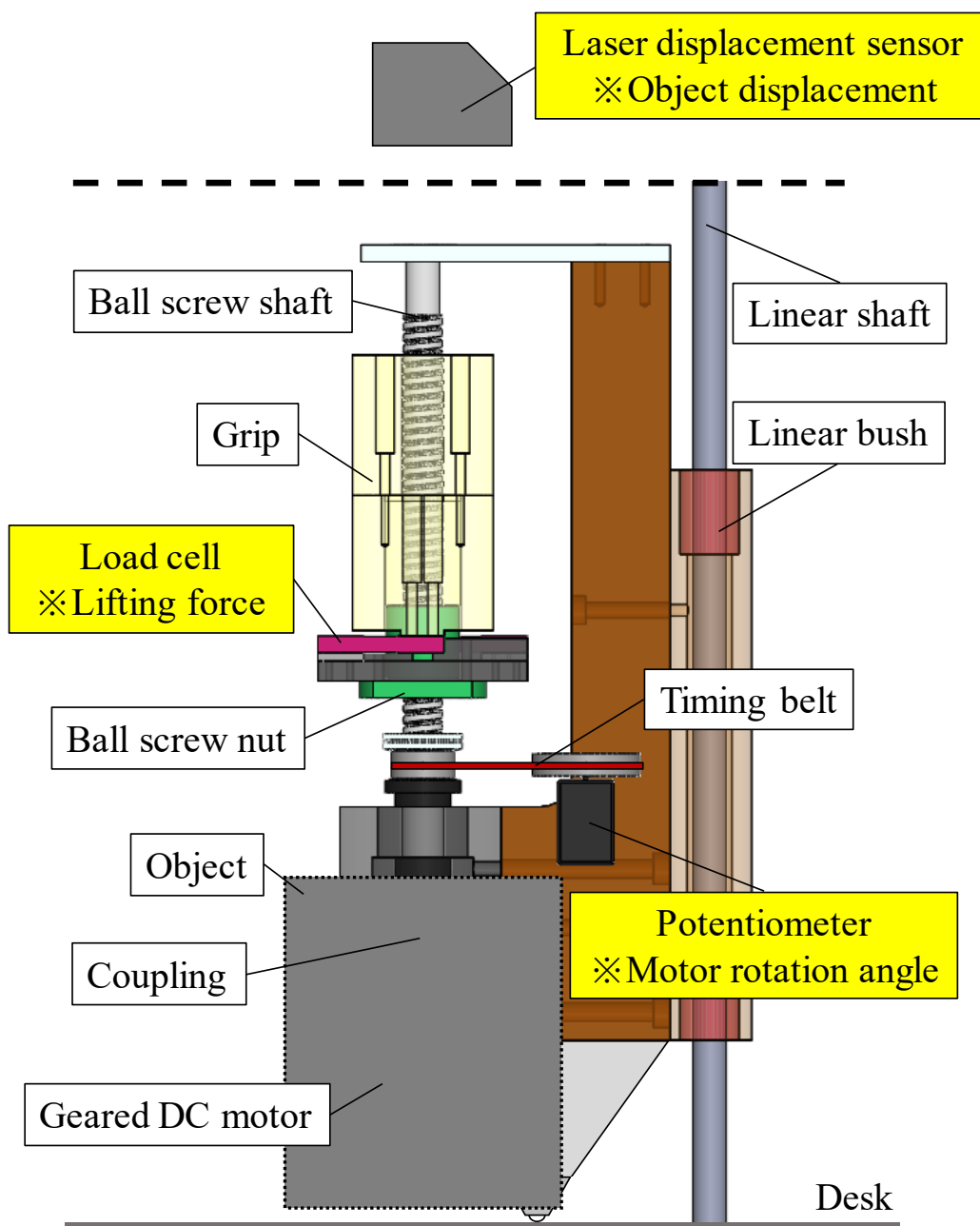


Fig.2.2 Configuration of object with moving grip

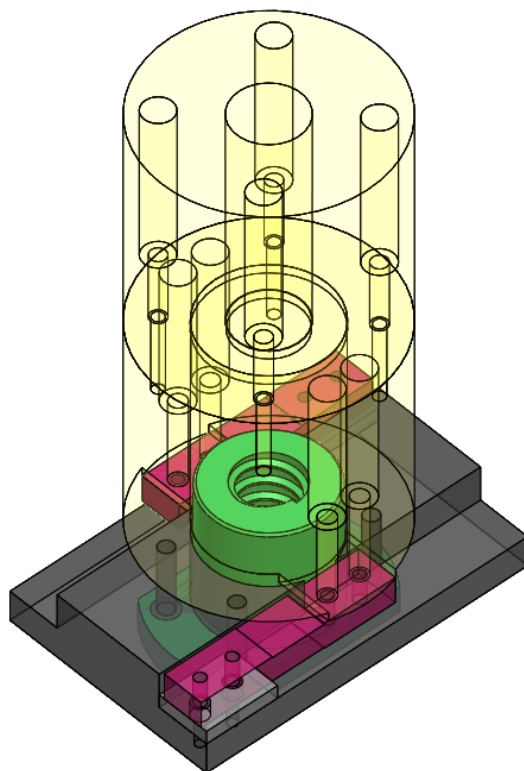


Fig.2.3 Connection of grip and ball nut

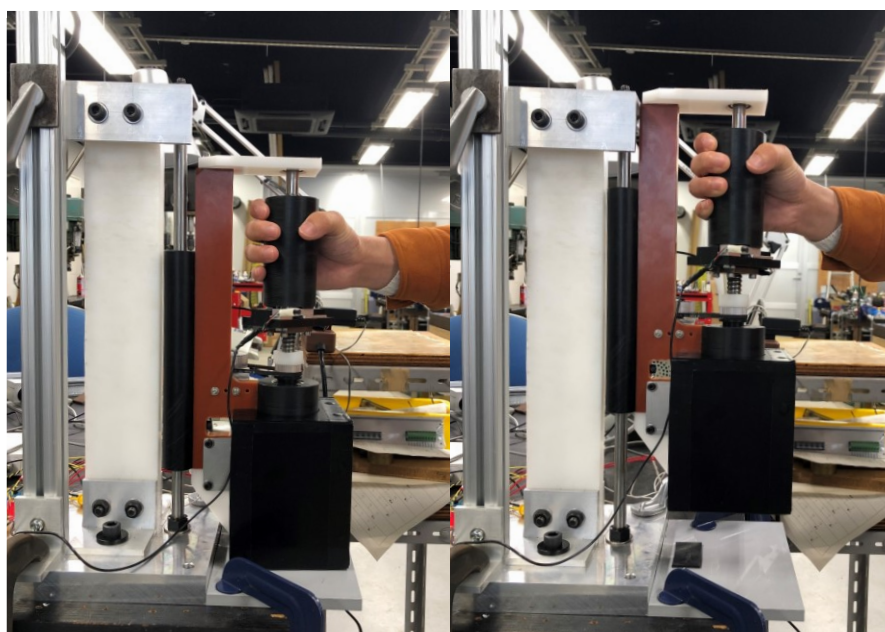


Fig.2.4 State of lifting motion (motor not running)



実験装置のシステム構成を図 2.5 に示す。ポテンショメータ，レーザ式変位センサ，のアナログ信号はコントローラに入力される。ロードセルのアナログ信号もこれら同様に，ひずみアンプによる増幅後コントローラに入力される。コントローラは図 2.6 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 は演算処理機能の他に A/D 変換及び，D/A 変換の機能を有している。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。本実験ではアナログ信号を Aproc-1 Plus で A/D 変換してデジタルデータとして取り込み，内部で演算処理を行う。ここではあらかじめ設定したグリップの目標変位と現在の変位の偏差から，PD 制御によりモータへの指令値が算出される。そして，この指令値はアナログ信号に変換された後，パワーアンプへ出力される。パワーアンプにより増幅された信号はモータへの入力電圧となり，グリップは先の目標変位に追従するように変位する。また，専用ソフトの機能により，Aproc-1 Plus に入力された変位，力の時系列データを 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各種データを取得した。

ここで，実験装置に使用したコントローラ及びギヤド DC モータの仕様を示す。初めに，コントローラ及びデータロガーとして使用した Aproc-1 Plus の仕様を表 2.1 に示す。次にツカサ電工（株）製のギヤド DC モータ，TG-06D-KU-16-KA,12V<sup>[25]</sup>（図 2.7 参照）の仕様を表 2.2 に示す。

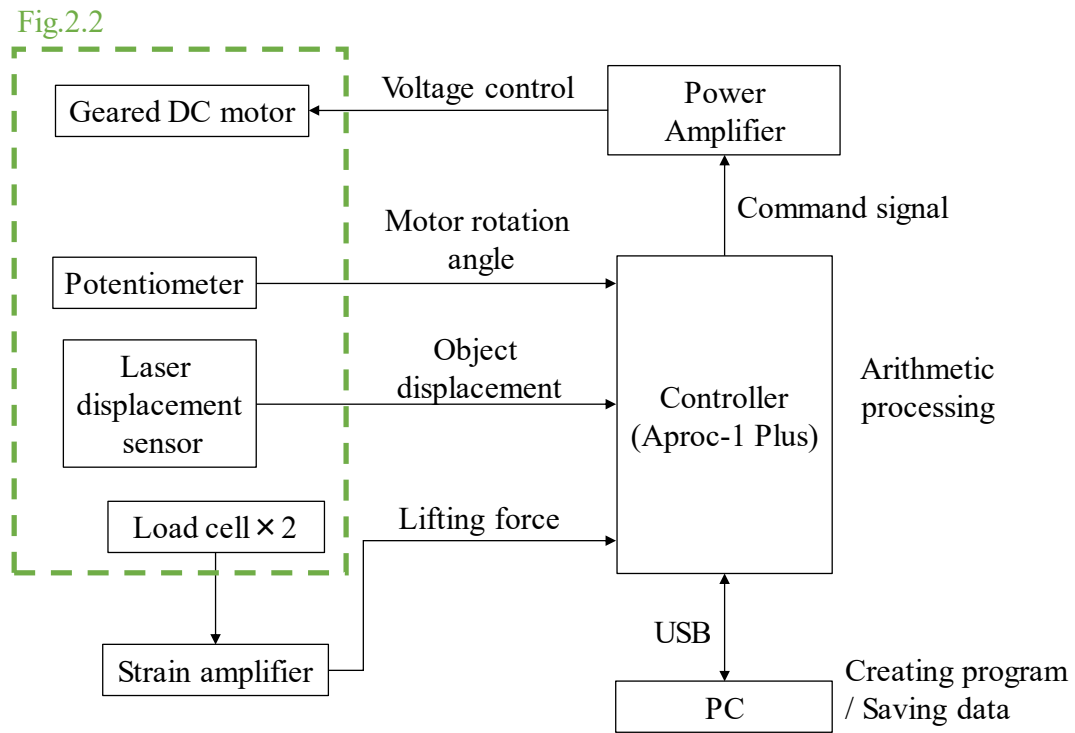


Fig.2.5 System configuration

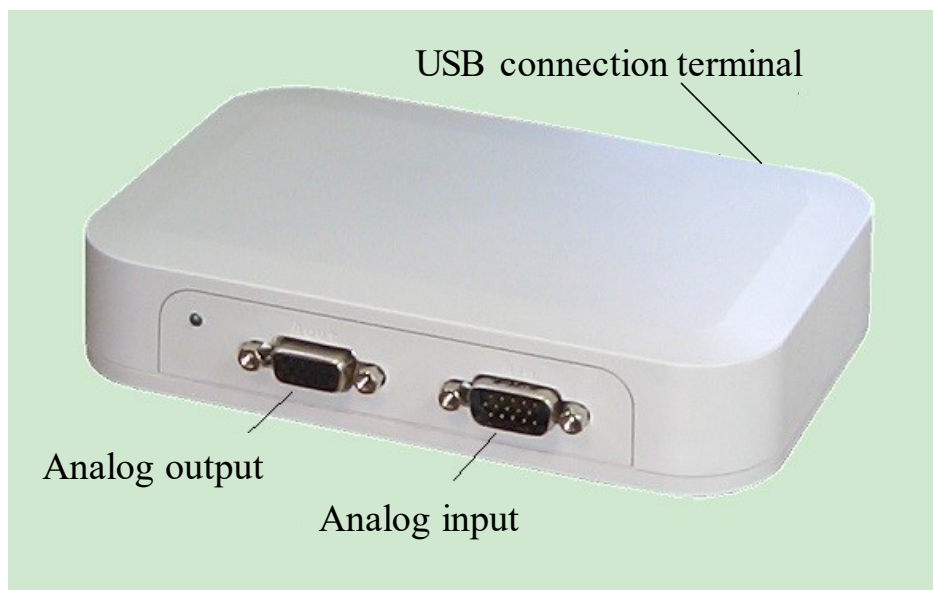


Fig.2.6 Aproc-1 Plus

Table2.1 Controller 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 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)
	出力絶縁/保護	絶縁なし/合計出力±50mAに制限
アナログ 出力	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・重量	150×100×30mm / 240g	
消費電力	USBバス電力 約 1W (出力を除く)	



Fig.2.7 TG-06D-KU-16-KA, 12V

Table2.2 Motor specifications

減速比	16
無負荷回転数[rpm]	318.5
定格トルク[mN・m]	117.6
定格回転数[r/min]	261.8
電気ノイズ対策	バリスタ・セラミックコンデンサ
定格電圧[V]	12
無負荷電流[mA]	95
定格電流[mA]	538
質量[g]	255

## 2.2 グリップの目標変位

重量感覚問題は人が重量を知覚したタイミング, 即ち物体離地のタイミングに発生するものであり, 持ち上げ後の重量感はこの問題には関与しない. なぜなら, 重量感覚問題とは操作者がフィードフォワード的に力を加えたときの想定と, 実際の知覚の間に生じるギャップによるものであり, 重量知覚後のフィードバック的な操作が介入する領域ではこのギャップが発生しづらいからだ. そこで本研究では物体離地のタイミングに焦点を絞った重量感覚制御を目指し, 物体離地の直前にグリップを動かした場合に生ずる, 人の重量感の変化について調べる. 以下の 2.3.1 節及び, 2.3.2 節において, 実験で用いたグリップの目標変位について述べる.

### 2.2.1 負のステップ指令

本節では物体離地の瞬間の重量感を重くするための, グリップの変位方法について述べる. 人は指先の皮膚変形により重量感を判断している. そこで, 栗田らは指先接触面の滑り量を制御することで重量感・摩擦感を提示する手法を提案している<sup>[26]</sup>. 本実験では物体が離地する直前にグリップを下方方向に変位させ, グリップを把持している手の皮膚に下向きの変形を与え, 実際の重量より重く感じさせることが可能か検証した. 人の持ち上げ力を $f_h$ [N], グリップを含めた持ち上げ対象の全質量を $M$ [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机からの反力を $R$ [N], 絶対座標系における $M$ の変位を $x_M$ [m]としたとき, グリップが停止し物体が接地している状態の実験装置モデルは図 2.8 で表され, 力のつり合い式は(1)式で与えられる.

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

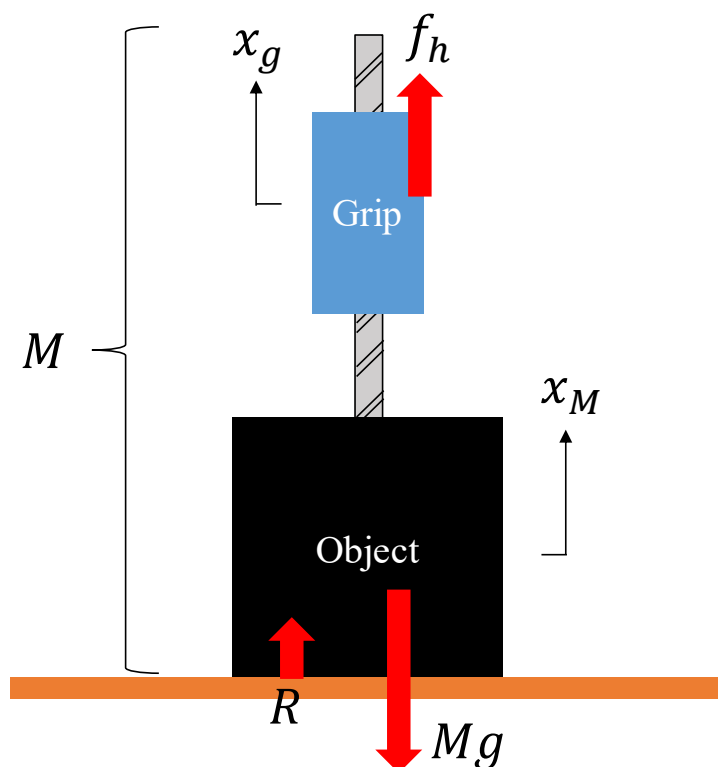


Fig.2.8 Model of Experimental device

この式より、 $R > 0$ のとき物体は接地した状態にある。そして $f_h$ が増加し、 $Mg$ に達すると $R = 0$ になり物体が離地する。

本制御法において、グリップを動かす始めるタイミングを $f_h = m_d g$ のタイミングに定める。 $m_d$ は制御開始のタイミングを決めるための仮想的な質量であり、その大きさは $0 < m_d \leq M$ とする。即ち、グリップの動き出すタイミングは人の加える持ち上げ力の大きさに依存し、物体離地の以前に動き出す。そして、物体に対するグリップの相対変位を $x_g[\text{m}]$ 、 $x_g$ の目標変位を $x_d[\text{m}]$ としたとき、 $f_h = m_d g$ のタイミングで $x_d = L$ のステップ入力を与える。ここで、 $L[\text{m}]$ は負の定数であり、制御開始に伴いグリップは下方向に動く。

本実験において使用する $L$ の内、最も変位量の大きい $L = -0.01\text{m}$ のステップ入力を加えたとき、 $x_g$ が定常状態になるまで約 $0.35\text{s}$ 要する。このとき、グリップの最大加速

度は約  $0.4\text{m/s}^2$ , グリップの質量は  $0.43\text{kg}$  である. したがって, 物体にはグリップの加速する反作用として, 最大で約  $0.172\text{N}$  の慣性力が加わる. 本実験装置の  $M$  は  $2.35\text{kg}$  であるため, この慣性力は  $Mg$  の  $1\%$  未満である. よって, グリップの動きによって物体の受ける慣性力は, 人の重量感に影響を与えないものと判断し無視する.

## 2.2.2 仮想ばねの挿入

本節では持ち上げの瞬間の重量感を軽くするための, グリップの変位方法について述べる. 前節では  $f_h = m_d g$  のタイミング ( $0 < m_d \leq M$ ) で制御を開始し, グリップを下方向に変位させた. これに対して, 制御開始の条件は変えず, グリップの変位方向を上向きに変更することで, 物体が離地する前にあたかも離地したような触覚を与えられると考えた. ただし, 前節同様にステップ入力を与えてグリップをフィードフォワード的に動かしてしまうと, 場合によっては操作者の手よりグリップが先行して上方に変位し, 自身が持ち上げている感覚ではなく, 装置に引っ張り上げられるような感覚を与えてしまう. よって, 人の操作量に応じたグリップの動かし方が求められる. そこで, グリップと物体の間に制御による仮想ばねを挿入したモデルでグリップ変位を制御する.

制御の目標モデル及び, このモデルにおいてグリップに加わる力を図 2.9 に示す.  $K[\text{N/m}]$  はばね定数,  $m_d$  は制御により実現するグリップの質量である. 以降  $f_h$  の増加に伴う目標モデルの状態変化の流れを説明する.  $f_h < m_d g$  の条件下では  $x_g, x_M$  はともに  $0$  であり, ばねは自然長を保つ.  $f_h$  が  $m_d g$  を超えると  $x_g > 0$  となり, 下向きのばね力がグリップに加わる. この時, 力のつり合い式は (2) 式で与えられる.

$$f_h = Kx_d + m_d g \quad (2)$$

さらに  $f_h$  が増加すると, ばねによる引っ張り力も増加し,  $f_h = Mg$  に達すると,  $x_M > 0$  となり物体が離地する. この時のばねの伸び量  $L_s[\text{m}]$  は (3) 式で与えられる.

$$L_s = \frac{M - m_d}{K} g \quad (3)$$

ボールねじのストローク及び、制御機器の制約により、実現可能な $L_s$ に限界が存在する。加えて、次章の実験において物体離地タイミングを変化させるために、 $m_d$ の値を任意に定めたい。これらの理由から、 $m_d$ 、 $L_s$ の値を予め与え、それに応じて(3)式よりばね剛性を決定する。(2)式より、グリップの目標変位は(4)式で与えられる。本実験ではこの式を実現するよう制御を行う。

$$x_d = \frac{f_h - m_d g}{K} \quad (4)$$

また、上式における  $x_d < 0$  の条件下では、モータへの入力電圧を 0V とした。そして物体が離地したタイミング、即ち、 $x_d > L_s$  を満たしたタイミングで制御を停止する。ただし、実際は制御系の遅れやモータの慣性の影響により、物体が離地したタイミングから若干遅れてグリップが止まる。以上をまとめると、 $f_h = m_d g$  でグリップが変位し始め、 $f_h = Mg$  に達したら物体が離地しグリップの動きは停止する。そして、その遷移過程における操作感は仮想ばねにより滑らかになる。



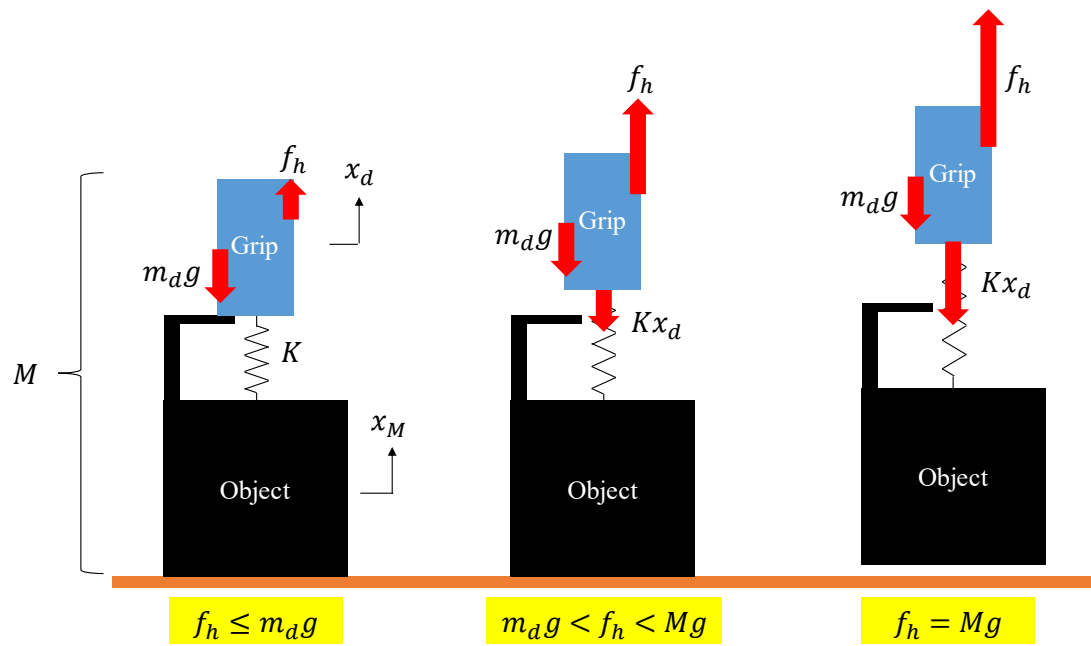


Fig.2.9 Model with virtual spring inserted

# 第3章

## 重量感評価実験

### 3.1 実験内容

本実験は物体離地直前におけるグリップの変位が人の重量感に与える影響を確認することを目的に実施した。表 3.1 に本実験で使用した 7 つの変位条件を示す。被験者には各条件で持ち上げを行ってもらい、重量感の違いを評価してもらった。負のステップ指令を与える制御方法において、 $m_d$ の値を $M$  (2.35kg) に近い 2.2kg に統一した。これは、離地の瞬間にグリップを動かすことで重く感じさせるためである。また、 $L$ の値を 2 種類用意した。これは、変位量の違いによる重量感の違いを評価するためである。仮想ばねを挿入する制御において、 $m_d$ と $L_s$ の条件をそれぞれ 2 種類用意した。 $m_d$ に変化を持たせた理由については、物体離地タイミングの違いによる重量感の違いを評価するためである。 $L_s$ に変化を持たせた理由については、ばね剛性の違いによる重量感の違い

Table3.1 Experimental conditions

条件番号	制御方法	制御パラメータ
1	停止	
2	負のステップ指令	$m_d = 2.2\text{kg}, L = -0.005\text{m}$
3		$m_d = 2.2\text{kg}, L = -0.01\text{m}$
4	仮想ばねの挿入	$m_d = 0.1\text{kg}, L_s = 0.005\text{m}$
5		$m_d = 0.1\text{kg}, L_s = 0.01\text{m}$
6		$m_d = 0.5\text{kg}, L_s = 0.005\text{m}$
7		$m_d = 0.5\text{kg}, L_s = 0.01\text{m}$

を評価するためである。また、 $m_d$ の値を $M$ に比べて小さくした理由は、物体離地を知覚するタイミングを早めるためである。

実験の流れを説明する。始めに実験装置に慣れる練習として、被験者には条件 1, 2, 3, 5, 6 で持ち上げ動作を繰り返してもらい、各制御方法における $m_d$ 及び、変位量の上下限を体感させつつ実験時間を短縮する目的で条件 4, 7 を省略した。持ち上げ動作の繰り返し回数については、各条件 10 回ずつとした。また、本実験で行う持ち上げ動作において、ストロークやタイミングに関する指示は与えず、被験者には自然な持ち上げ動作の実施を心がけてもらった。ただし、本研究は物体離地を知覚したタイミングの重量感を評価対象とするため、重量感を知覚次第、物体を下ろすように伝えた。練習が終わったら本番の実験へ移行する。本番の実験の流れを図 3.1 に示す。この本番の実験では、被験者は終了の合図を受けるまで持ち上げ動作を繰り返す。繰り返し回数は 6 回から 10 回のランダムとする。この繰り返し回数を $n$ としたとき、1 から $n-1$ 回目においてグリップの動き方は毎回同じである。ただし最後の $n$ 回目ではグリップの動きを停止する。被験者にはこれを伝えるが $n$ の値は伝えず、制御の停止を予見させない。最後のグリップ停止時の持ち上げ動作で感じた、“持ち上げの瞬間における重量感の変化量”を評価してもらい、それをアンケートにて回答してもらい、評価項目については、(-3, -2, -1, 0, +1, +2, +3)の合計 7 段階とした。負の値が大きくなるほど軽く感じ、正の値が大きくなるほど重く感じたことを意味する。また、0 は重量感の変化を感じていないことを意味する。例えば、1 から $n-1$ 回の繰り返しに対して、 $n$ 回目のグリップ停止時に重く感じた場合、アンケートには正の値で回答する。アンケートへの回答が終了次第、次の条件に移行し、同様の手順を繰り返す。ただし、各条件の実施順序はランダムとした。また、グリップの動きの有無による重量感の評価に当たり、モータの駆動音を被験者に極力聞かせたくなかった。そこで、本実験における全ての持ち上げ動作においてヘッドフォンの装着を義務化することにより、外部の音を遮断した。そして、各条件における繰り返し動作の開始及び、終了の

合図は、視覚で判断可能な挙手により与えた。

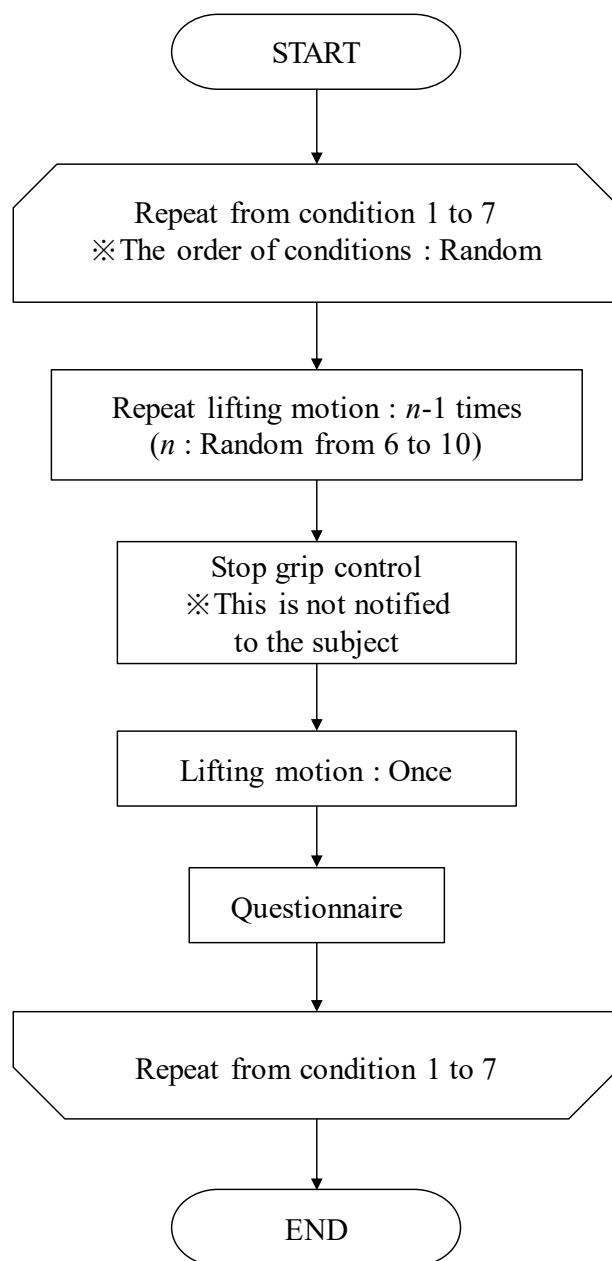


Fig.3.1 Flow of experiment

## 3.2 実験結果

実験は健常な男子大学生 10 名を対象に行った。表 3.2 にアンケートの結果を示す。初めに、重たく感じさせることを目的とした条件 2, 条件 3 での結果を述べる。表 3.2 より、 $L = -0.005$ の条件 2 において、“重くなった”と感じた被験者は 2 名だった。対して“軽くなった”と感じた被験者は 3 名だった。残りの被験者 4 名は重量差を感じなかった。また、 $L = -0.01$ の条件 3 において、“重くなった”と感じた被験者は 7 名だった。対して“軽くなった”と感じた被験者は 2 名だった。残りの被験者 1 名は重量差を感じなかった。条件 2 と条件 3 の比較より、条件 2 よりも条件 3 の方が多くの被験者に対して“重くなった”と感じさせることができた。次に、軽く感じさせることを目的とした条件 3 から条件 6 において、 $m_d$ の値で分類して結果を述べる。 $m_d = 0.1$ の条件 4 と条件 5 において、どちらの条件においても“軽くなった”と感じた被験者は 3 名だった。対してどちらの条件においても“重くなった”と感じた被験者は 2 名だった。また、 $m_d = 0.5$ の条件 4 と条件 5 において、どちらの条件においても“軽くなった”と感じた被験者は 3 名だった。対してどちらの条件においても“重くなった”と感じた被験者は 1 名だった。条件 4 から条件 7 すべてにおいて軽く感じた被験者は C, I の 2 名だが、どちらの被験者においても $m_d$ の減少に応じた重量感の減少を確認できなかった。本実験において仮想ばねを挿入するモデルでは、 $m_d$ と重量感の間に関係を見いだせなかった。最後に、軽く感じさせることを目的とした条件 3 から条件 6 の結果を、 $L_s$ の値で分類して述べる。 $L_s = 0.005$ の条件 4 と条件 6 において、どちらも“軽くなった”と感じた被験者は 3 名だった。対してどちらも“重くなった”と感じた被験者は 2 名だった。また、 $L_s = 0.01$ の条件 5 と条件 7 において、どちらも“軽くなった”と感じた被験者は 4 名だった。対してどちらも“重くなった”と感じた被験者は 3 名だった。条件 4 から条件 7 すべてにおいて“軽くなった”と感じた被験者 C, I の内、被験者 C に限り $L_s$ の増加に伴いより軽く感じる傾向がみられた。

Table3.2 Subjective evaluation of weight

被験者	実験条件						
	停止	負のステップ指令		仮想ばねの挿入			
	1	2	3	4	5	6	7
A	0	0	1	1	-2	0	-1
B	0	0	-1	-1	0	-2	1
C	0	-2	-2	1	3	1	3
D	0	0	-2	-1	-2	2	-3
E	0	1	-2	-1	1	0	1
F	0	2	-2	-1	2	0	2
G	-1	0	-1	2	1	1	-1
H	1	0	-1	-2	0	-1	-2
I	0	-1	0	1	3	2	1
J	0	1	2	-1	-1	0	-3

### 3.3 考察

実験の結果, 全条件の中で条件3の動かし方が最も多数の被験者に所定の重量感を与えることができた. しかし, この条件においても2名の被験者は“軽くなった”と感じており, 重量感の知覚には個人差があることを確認した. 図3.2に重く感じさせる制御と軽く感じさせる制御の両方に対して逆の評価を下した被験者Jの操作波形を示す. 黒線は条件1, 青線は条件3, 赤線は条件7に対応している. グラフの縦軸は上から順に, 持ち上げ力 $f_h$ [N], 絶対座標系における物体速度 $\dot{x}_M$ [m/s], 物体に対するグリップ速度 $\dot{x}_g$ [m/s], 絶対座標系におけるグリップ速度 $\dot{x}_{g\_abs}$ [m/s], その加速度 $\ddot{x}_{g\_abs}$  [m/s<sup>2</sup>]を表す. 横軸は時間を表す. 各条件の時系列は $f_h$ の立ち上がるタイミングに揃えた. 以降このグラフを参考にして, 重量感の変更が上手くいかなかった理由を考察する.

今回, 仮想ばねを用いた制御方法において, 軽く感じさせるという目標に対する有効性をほとんど確認できなかった. これについては, 操作者がばね抵抗を受けながら力を加えることで, 物体離地直後の速度が小さくなったことが理由として考えられる.  $\dot{x}_{g\_abs}$ のグラフより, 条件7の操作波形は条件1に比べて, 物体離地後の速度勾配が小さいことが分かる. 即ち, 仮想ばねを挿入した制御法においては, 物体が離地直後に持つ速度が小さくなるので, これを操作者が上がりづらいと判断した場合, 重く感じると考えられる.

次に, グリップの変位に負のステップ指令を与える制御方法について述べる.  $\dot{x}_M$ 及び,  $\dot{x}_{g\_abs}$ のグラフより, 条件3の制御法において, 物体離地のタイミングと, グリップが正の速度を持ち操作者が触覚により離地を知覚するタイミングの時間差が小さいことが分かる. 本制御法における本来の目的は, 物体離地を知覚するタイミングを遅らせ, 重量感を増加させることであった. しかし, 今回の実験では $m_d$ の値が $M$ に近すぎたため, 物体離地のタイミングとグリップが正の速度を持つタイミングがほぼ一致してしまい, 重量感にあまり変化を与えられなかったと考えられる. また, 2.3.1節で述べたように, 本実験装置において $L = -0.01\text{m}$ のステップ指令を与えたときのグリップの最大

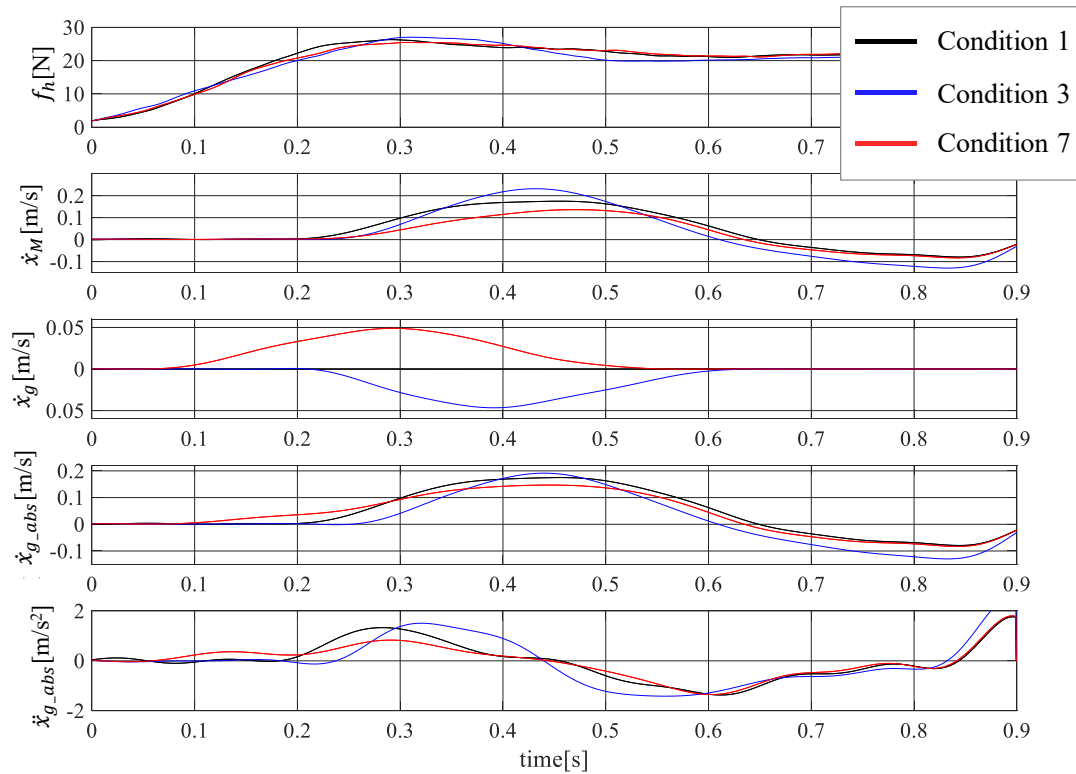


Fig.3.2 Lifting motion under conditions 1, 3, and 7 (Subject J)

加速度は  $0.4\text{m/s}^2$  である。グリップが物体に対して加速する場合と減速する場合どちらも同程度の加速度が発生する。また、 $M$ からグリップの質量を差し引いた物体質量は約  $1.87\text{kg}$  である。これより、グリップが減速するタイミングにおいて、グリップは物体から約  $0.75\text{N}$  の慣性力を受け上方向に引っ張り上げられる。物体重量に比べ微小な力ではあるが、これを知覚することで軽くなったと感じた可能性も考えられる。以上より、グリップを下向きに動かすタイミングが物体離地のタイミングに近すぎると、重量感が変化しない、あるいは軽いと感じることがある。人がグリップの動きと自身の持ち上げを分離して知覚しない範囲でグリップの動き出しのタイミングを早めることが、重く感じさせるためには有効かもしれない。よって次章ではグリップの動き出しのタイミングを変えて重量感を評価する実験を行う。



---

# 第4章

## 最も重く感じる 制御開始条件を特定する実験

---

3章の実験では、グリップの変位に負のステップ指令を与える制御方法が、重量感の変更において最も有効性を確認できた。この制御法で重量感を評価するにあたり、 $m_d$ の値を $M$ の値に近い2.2kgに設定し、物体離地直前にグリップが動き出すようにした。しかし実験の結果、“重くなった”と感じない被験者が存在した。これは3.3節で述べたように、グリップの動き出すタイミングが物体離地とほぼ同時であるために、離地の知覚をあまり遅らせることができなかつたことが原因として考えられる。仮にこの考察が正しい場合、 $m_d$ の値を下げればグリップの動き出しのタイミングが早まるので、いずれ重く感じ始めるはずである。ただし、 $m_d$ の値を下げすぎると、グリップの動きに対する重量感の知覚と、物体離地の知覚が分離してしまい、重量感が変わらなくなる。即ち、この制御法を用いて重量感を制御するにあたり、 $m_d$ の値を $M$ から徐々に下げていけば最も重いと感じる $m_d$ が存在すると考えられる。そこで本章では、グリップの変位に負のステップ指令を与える制御方法において、最も重いと感じる $m_d$ を特定する実験を行う。そして、離地を触覚するタイミングの遅れと重量感の関係を明らかにする。

## 4.1 実験内容

本実験では $m_d$ の変更によりグリップの動き出すタイミングを変化させ、最も重く感じる $m_d$ を特定する。全ての持ち上げ動作に対して、グリップの変位に負のステップ指令を与える制御法を適用し、グリップの変位量 $L$ の値を $-0.01\text{m}$ で統一する。 $m_d$ の値が一定の場合、持ち上げ力の加え方に応じてグリップの動き出しのタイミングが変化する。したがって、持ち上げ力の加え方は被験者内であるべく統一する必要がある。そこで、被験者にはメトロノームの指示に合わせて持ち上げ動作を行ってもらった。このメトロノームは一定の間隔で音を鳴らし続ける。持ち上げ力を加え始めてから物体が離地するまでを音の間隔とし、被験者の自然な持ち上げ動作にテンポを調整した。

本実験の流れを説明する。実験は、最も重いと感じる $m_d$ の値の目安を探す実験と、その結果を基により正確な値を特定する実験の2段階で構成される。1段階目の実験では、 $m_d$ の値を $2.2\text{kg}$ から $0.2\text{kg}$ まで、 $0.5\text{kg}$ の刻み幅で順番に下げていき、各条件における基準条件に対する重量感を評価しアンケートに回答してもらおう。この基準条件とは $m_d = M$ の持ち上げ動作に相当し、実験の初めに基準条件で10回練習を行う。また、アンケートは前章の実験同様に重量感を7段階で評価する形式であり、基準条件に対する重量感を回答する。アンケートの結果、最も重いと回答した $m_d$ を $m_{d1}$ とし、2段階目の実験に移行する。もし最も重いと感じた $m_d$ が複数存在する場合は、最大値を $m_{d1}$ とする。2段階目の実験では、 $m_d$ の値を $m_{d1} + 0.7\text{kg}$ から $0.1\text{kg}$ 刻みで10段階下げていき、最も重いと感じた試行を口頭で回答してもらおう。重量感が下がり続ける場合は同様の刻み幅で5段階分の試行を追加して重量感の評価を行う。最も重いと回答した $m_d$ を $m_{d2}$ とする。もしこの値が複数存在する場合は、最大値を $m_{d2}$ とする。また、1段階目の実験において1度も重いと評価しなかった被験者については、本制御法では重く感じない被験者と判断し、2段階目の実験は行わない。実験の最後に、 $m_{d2}$ の持ち上げ動作波形を3本取得する。

## 4.2 実験結果

本実験は前章の実験と同じ被験者を対象に行った。表 4.1 に本実験における重量感の評価結果を示す。表の中列に 1 段階目の実験結果を示し、 $m_{d1}$  を青く塗りつぶした。また、右端の列に最も重いと感じた  $m_{d2}$  の値を示す。表より、10 人中、7 人の被験者に最も重いと感じる  $m_d$  が存在した。残り 3 人の被験者については、全員軽いと感じる  $m_d$  が存在した。この 3 人の被験者については、グリップの動き出すタイミングで重さ及び、離地を知覚した可能性がある。即ち、早く持ち上がったので軽い物を持ち上げたと判断した可能性がある。対して、 $m_{d2}$  の存在した 7 人の被験者については、グリップが下方方向に動き出すタイミングでは離地を知覚していないと考えられる。以降、この 7 人の被験者を対象に、前章の実験における条件 1、条件 3 ( $m_d = 2.2$ ) 及び、 $m_d = m_{d2}$  の操

Table4.1 Value of  $m_{d1}$  and  $m_{d2}$ 

被験者	$m_d$ [kg]					$m_{d2}$ [kg]
	2.2	1.7	1.2	0.7	0.2	
A	0	-1	-2	0	-2	
B	0	-2	-1	-1	-1	
C	-2	2	3	2	3	1.8
D	-2	2	2	0	-2	1.6
E	0	1	2	1	0	1.4
F	-2	-3	-2	-1	-2	
G	0	1	1	0	-1	1.3
H	-1	1	2	0	-2	1.4
I	-1	0	1	-1	0	1.4
J	-1	-2	-2	-2	1	0.8

作を比較する.

本制御方法によって生じる離地の知覚遅れを, (5)式の $\Delta t_{up}$ [s]を用いて評価する.

$$\Delta t_{up} = t_{grip\_up} - t_{M\_up} \quad (5)$$

図4.1のグラフを用いて各パラメータの説明をする. 縦軸は上から順に, 人の持ち上げ力 $f_h$ , 絶対座標系における物体速度 $\dot{x}_M$ , 絶対座標系におけるグリップ速度 $\dot{x}_{g\_abs}$ を表し, 横軸は全て時間を表す.  $t_{M\_up}$ [s]は人が力を加えてから物体が離地するまでの時間を表す. グリップの動きを停止した通常持ち上げ動作において, 人はこのタイミングで離地を知覚する. また,  $t_{grip\_up}$ [s]は人が力を加えてから, グリップが正の速度を持つまでの時間を表す. 本実験で $m_{d2}$ の存在した被験者7人については, この $t_{grip\_up}$ のタイミングで離地を知覚したと判断する. 即ち,  $\Delta t_{up}$ は物体が離地してからグリップが正の速度を持つまでの時間を表し, これを離地の知覚遅れ時間として評価する.

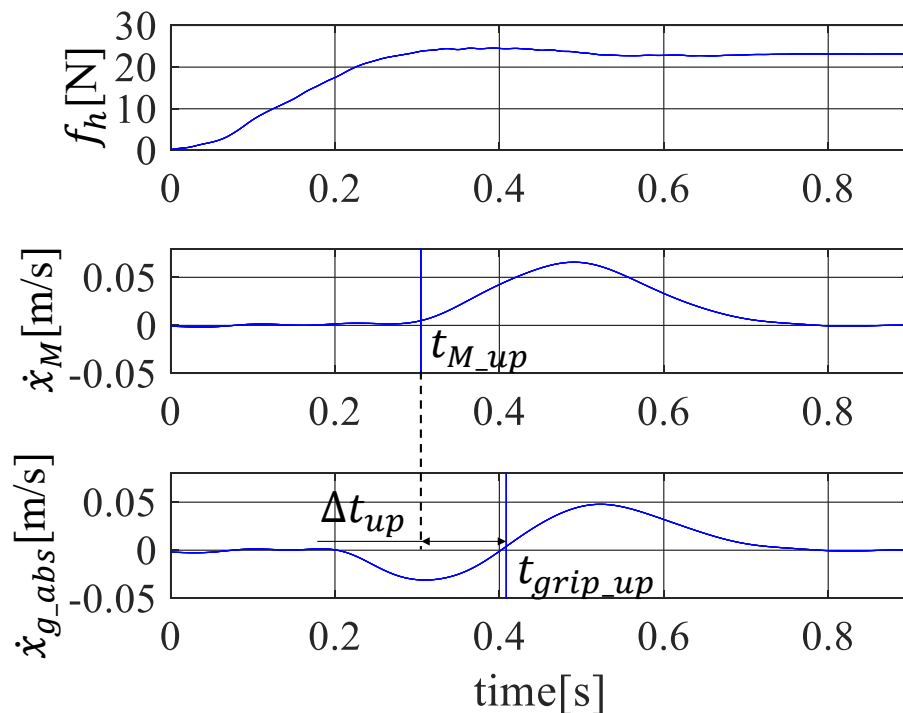


Fig.4.1 Definition of  $\Delta t_{up}$

前章の実験における条件3の $m_d$ は2.2kgであり、本章の実験で特定した各被験者の $m_{d2}$ に比べて大きいことが分かる。これに伴い、前章の実験に比べて物体離地の知覚がさらに遅れ、 $\Delta t_{up}$ の値も大きくなると考えられる。そこで、 $m_d = 2.2$ と $m_d = m_{d2}$ で、 $\Delta t_{up}$ の平均値を比較したところ、有意水準5%で有意差を確認した。図4.2に $\Delta t_{up}$ の平均値を示す。エラーバーは標準誤差を表す。また、 $t_{M\_up}$ のタイミングにおいて $f_h$ が $Mg$ に達し、 $M$ が正の加速度を持ち始める。このとき人は、物体離地の知覚遅れの影響でまだ物体が持ち上がっていないと判断しているため、持ち上げ力を増加させている。したがって、グリップ速度が正の方向に反転し、人が離地を触覚する $t_{grip\_up}$ のタイミングにおいて、 $f_h$ は $Mg$ より大きな値をとる。即ち、離地を知覚したタイミングにおける $f_h$ の値が通常の持ち上げ動作より大きくなるため、操作者の重量感に負荷が加わると考えられる。そこで、グリップを停止した状態、 $m_d = 2.2$ 、 $m_d = m_{d2}$ の3条件で、 $t_{grip\_up}$ のタイミングにおける $f_h$ の平均値を算出し、多重比較を行った。図4.3に各条件における $f_h$ の平

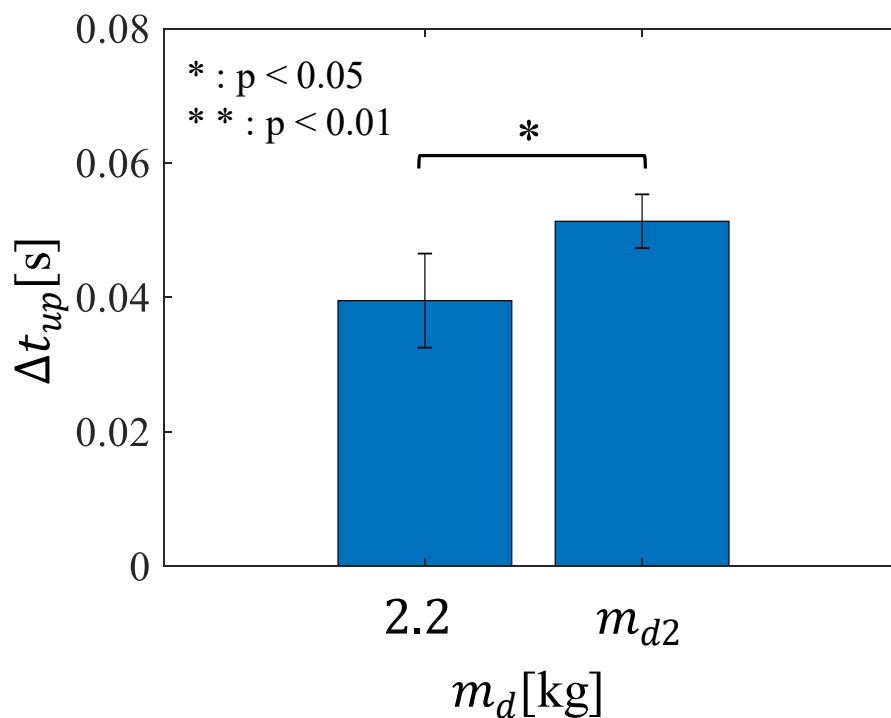
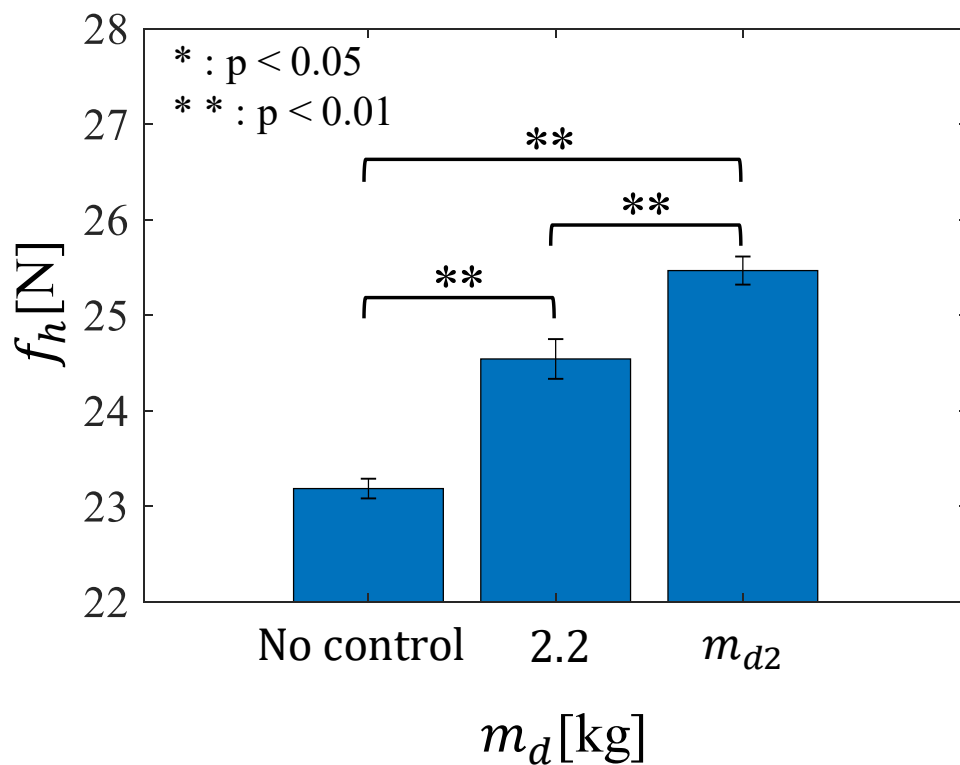


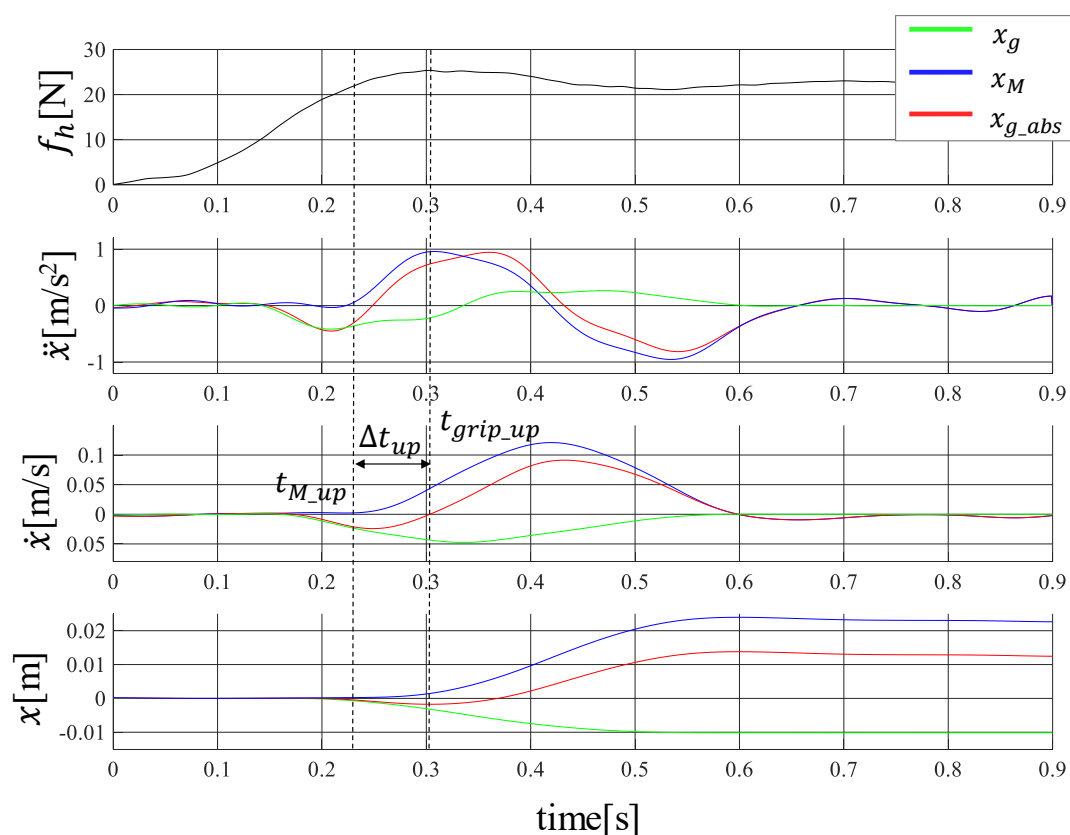
Fig.4.2 Delay in perception of lifting

均値，標準誤差を示す．多重比較の結果，各条件間に1%水準で有意差を確認した．前述した $\Delta t_{up}$ の平均値の比較結果と組み合わせて考察すると， $m_d$ の値が $M$ から小さくなるにつれて $\Delta t_{up}$ の値が大きくなり，それに伴い離地を知覚したタイミングにおける $f_h$ の値が大きくなったと言える．また，制御無しと $m_d = 2.2$ における $f_h$ の平均値の差は約1.3Nであった． $\Delta t_{up}$ の小さい被験者の場合，この差がさらに小さくなると考えられるため，重量感の変化を知覚できていない可能性が存在する．前章の実験において条件2，3で“重量感が変わらない”という評価をした被験者については，これが理由として考えられる．

Fig.4.3  $f_h$  in  $t_{grip\_up}$

## 4.3 考察

ここでは本実験により得た結果を踏まえ、本制御方法による重量感の変更が有効であった理由を考察する. 図 4.4 に,  $m_d = m_{d2}$  における代表的な被験者の操作波形を示す. グラフの縦軸は上ら順に持ち上げ力, 加速度, 速度, 変位を表す. 横軸は時間を示す. 緑はグリップの物体に対する相対座標, 青は物体の絶対座標, 赤はグリップの絶対座標の波形を表す. グリップの速度が負から正に切り替わる  $t_{grip\_up}$  のタイミングに着目すると,  $\dot{x}_M$  が正の値をとることが分かる. 即ち, 人が離地を触覚したタイミングにおいて物体はすでに持ち上がっている. ここで, グリップの質量を  $M_g[\text{kg}]$  としたとき, 物体質量は  $M - M_g$  で表される. グリップと物体間の伝達力を  $f_t[\text{N}]$  とすると, グリップと物体には図 4.5 のように力が加わる. このとき, 物体離地後のグリップ及び, 物体の運動方程式は以下の(6)式, (7)式で表される.

Fig.4.4 Operation waveform at  $m_d = m_{d2}$

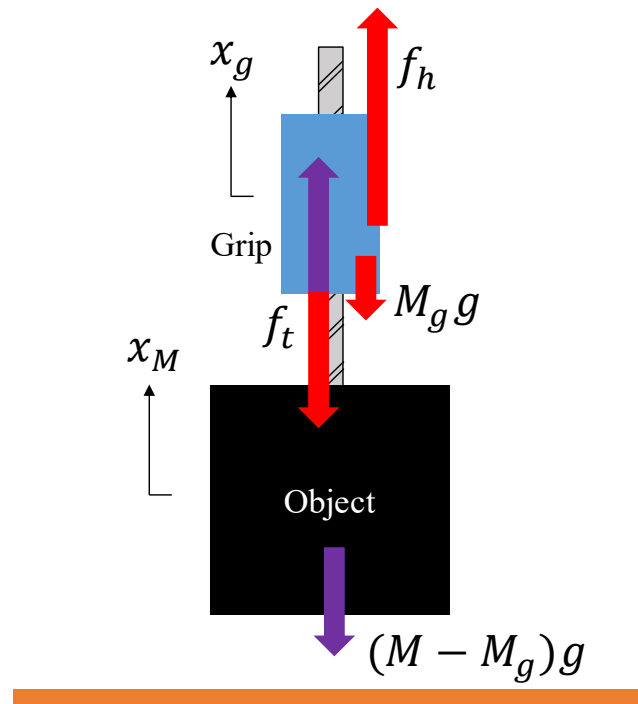


Fig.4.5 Force applied to grip and object

$$M_g \ddot{x}_{g\_abs} = f_h - M_g g + f_t \quad (6)$$

$$(M - M_g) \ddot{x}_M = -(M - M_g)g - f_t \quad (7)$$

(6)式, (7)式より  $f_h$  について整理すると(8)式となる.

$$f_h = M_g + M_g \ddot{x}_{g\_abs} + (M - M_g) \ddot{x}_M \quad (8)$$

グリップの制御を行わない通常の持ち上げ動作において,  $f_h = M_g$  のタイミングで離地を知覚する. したがって, 物体離地後に重量感を知覚する本制御法では(8)式より, グリップの慣性力と物体の慣性力の分だけ大きな力を加えた状態で離地を知覚している. これ故に, 物体重量が一定にも関わらず, 重量感が増加したと考えられる.



図 4.4 の速度のグラフより,  $\Delta t_{up}$  はグリップの負の速度を正の速度に回復させるのに要する時間とも捉えられる. よって, グリップの負の速度が大きいほど離地の知覚も遅れ, 重量感は重くなる方へとシフトしていく. 本実験は  $m_d$  の値を下げるによりグリップの動き始めのタイミングを早めた. これはグラフ中において,  $\dot{x}_g$  の波形を左へずらすことと同義である. これにより,  $t_{M\_up}$  における  $\dot{x}_g$  の値が減少するため, それを回復するために必要な  $f_h$  が大きくなり, 結果として  $\Delta t_{up}$  の値も大きくなったと考えられる. ただし  $m_d$  の値を下げ続け,  $\dot{x}_g$  の波形を左へずらしていくと,  $t_{M\_up}$  における  $\dot{x}_g$  の値が増加する領域に入る. これにより,  $\Delta t_{up}$  の値は減少していく. 本実験において, 各被験者の  $m_{d2}$  が 0 付近まで下がりきらなかったことも, これが理由として考えられる.

## 4.4 各被験者の操作波形

本節では、本実験により取得した各被験者の操作波形を図 4.6 から図 4.12 に示す。ただし、 $m_{d2}$  を特定できた 7 名の被験者に限る。各操作において 3 本ずつデータを取得したため、実線、破線、点線の 3 種類の線種で各持ち上げを分類した。線の色については、図 4.4 と同じ割り当てをした。また、被験者 D, E, I については、持ち上げ初期局面において長時間微小な力を加えていた。したがって、グラフの見やすさを考慮し、これらの被験者については  $f_h = 5\text{N}$  以降の操作波形を表示する。

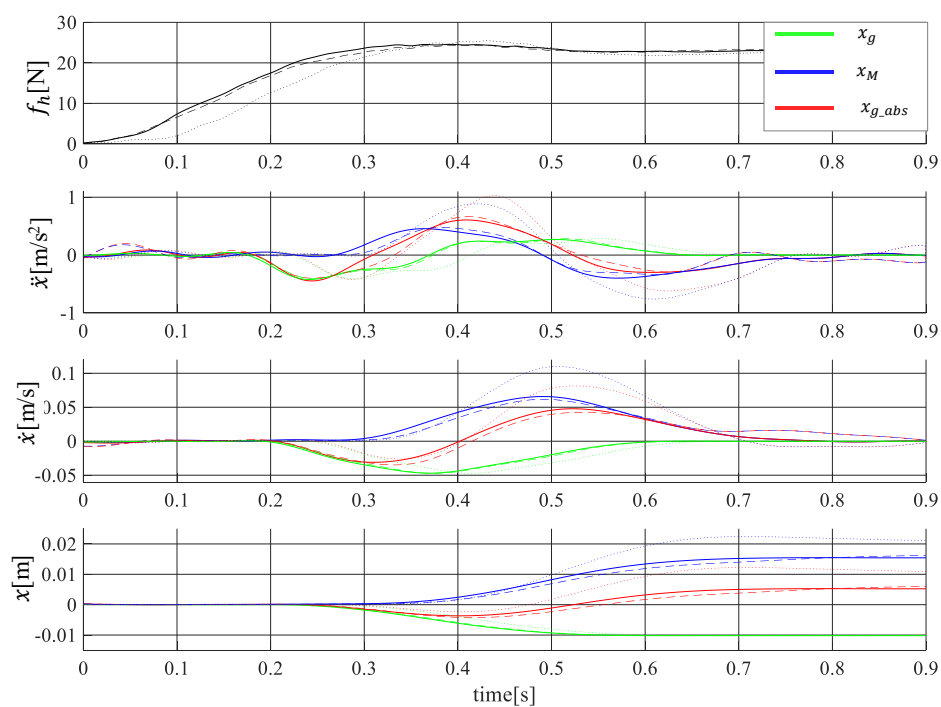


Fig.4.6 Operation waveform of subject C

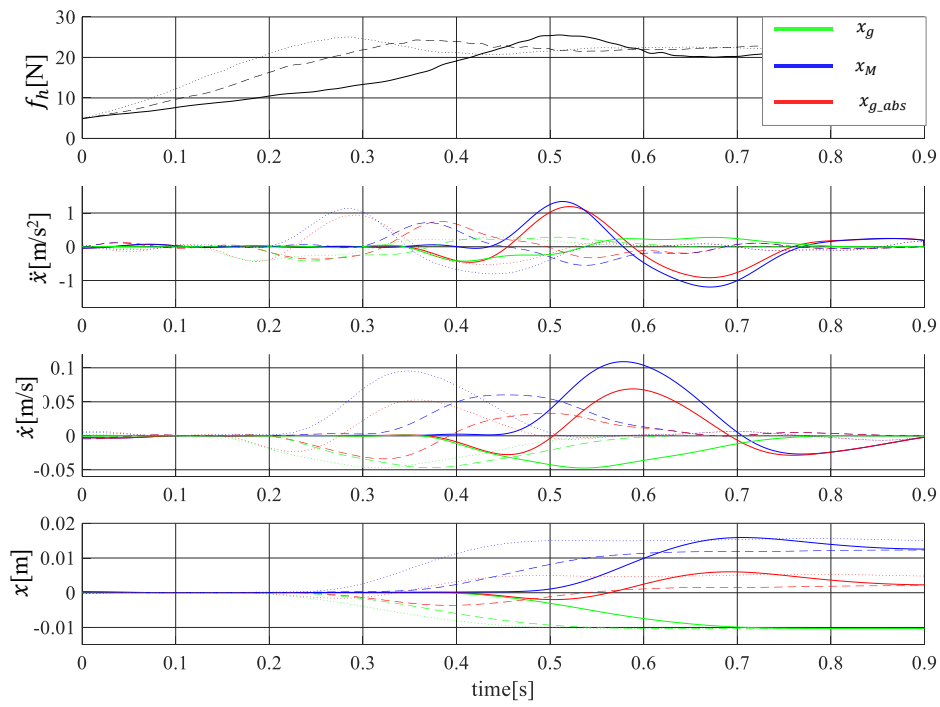


Fig.4.7 Operation waveform of subject D

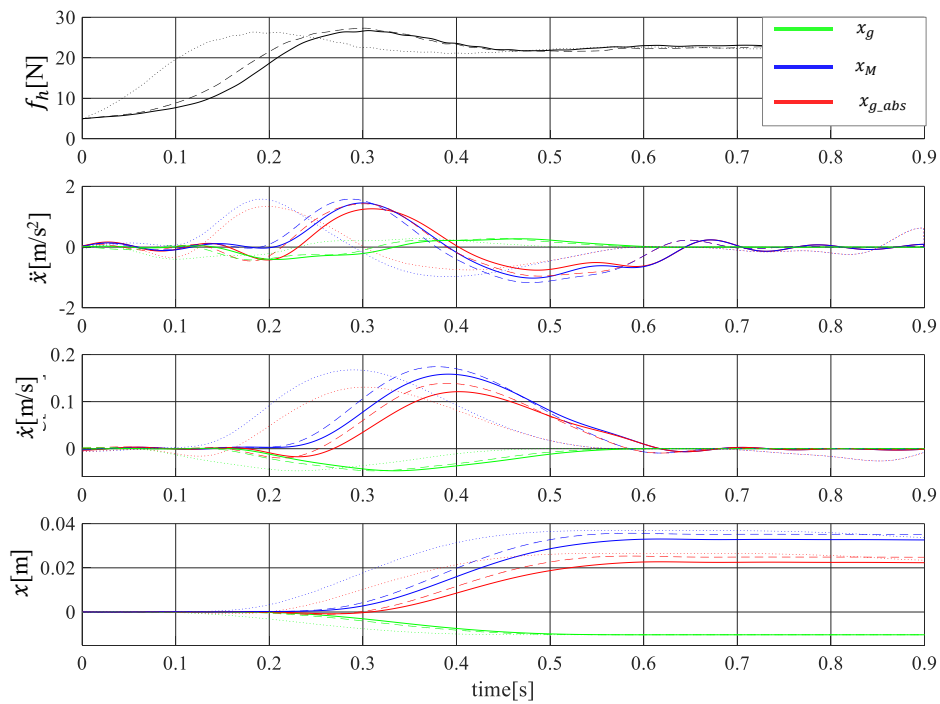


Fig.4.8 Operation waveform of subject E

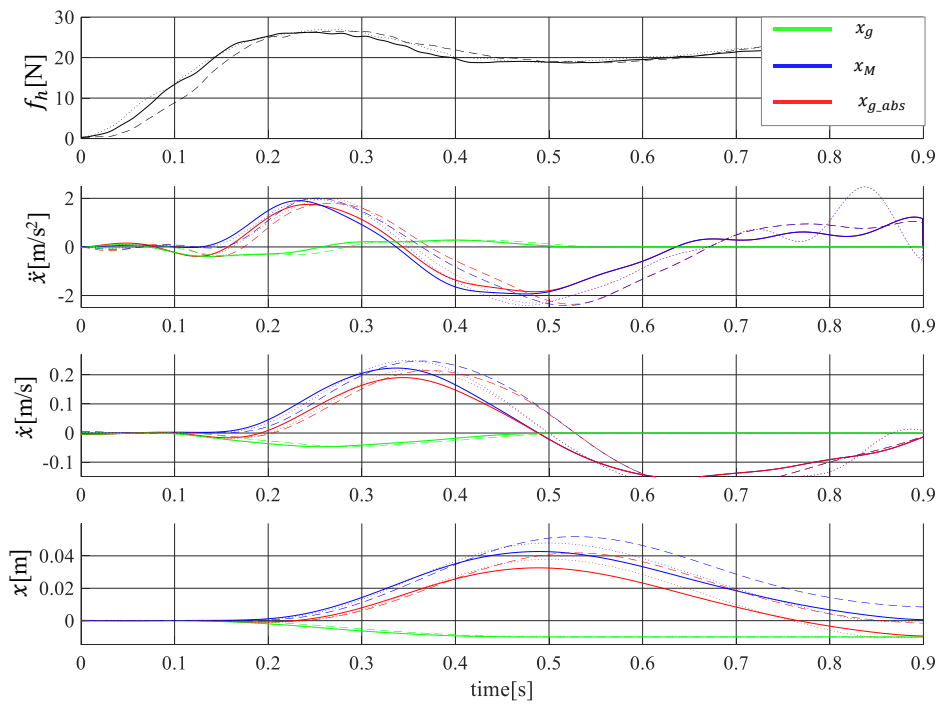


Fig.4.9 Operation waveform of subject G

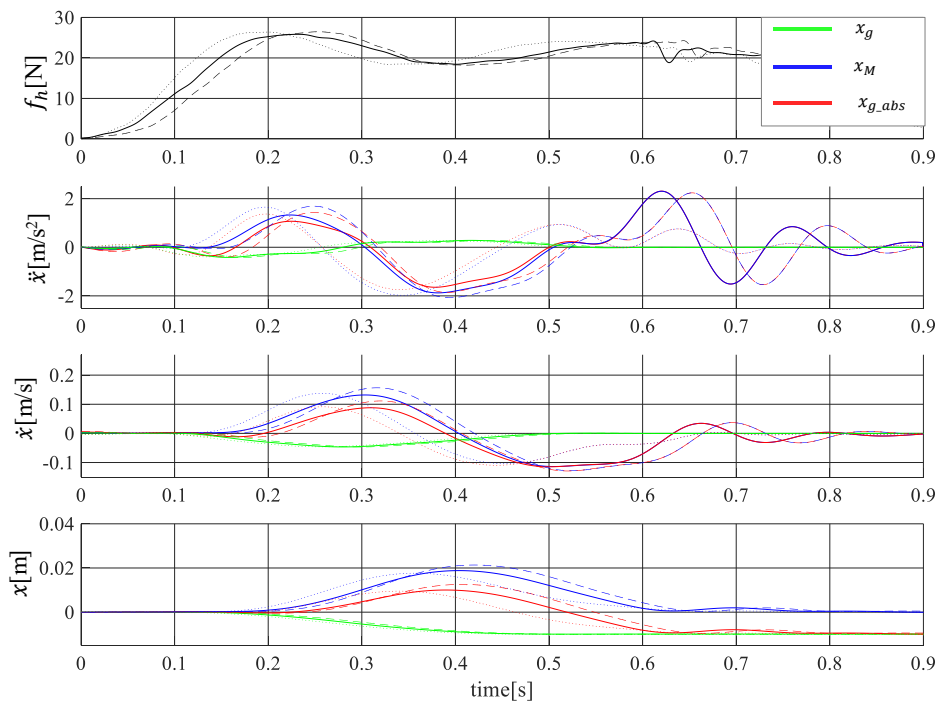


Fig.4.10 Operation waveform of subject H

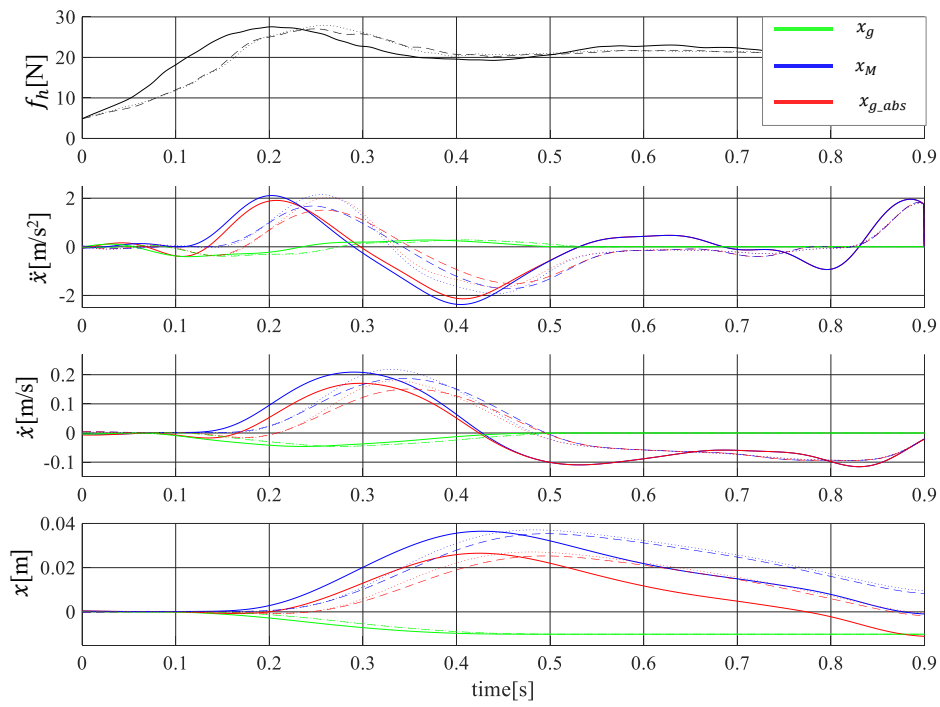


Fig.4.11 Operation waveform of subject I

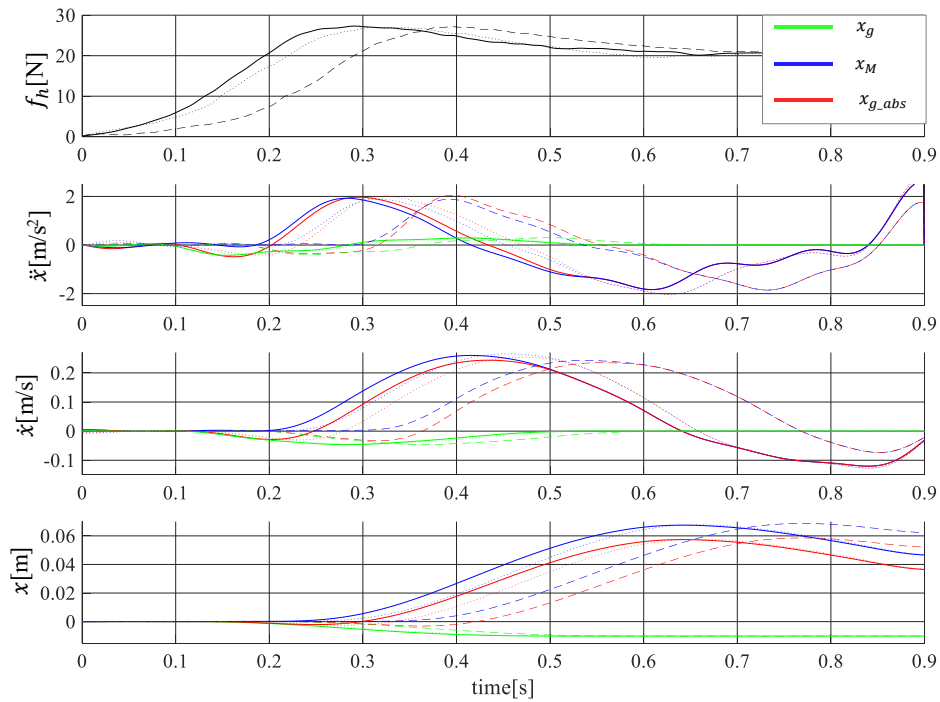


Fig.4.12 Operation waveform of subject J

---

# 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問題を解決するためには、操作者の予測質量と体感質量を近づける必要がある。その方法の一つとして、操作者の予測質量の推定に基づいた重量感覚制御が挙げられる。物体持ち上げ動作において人が物体離地を知覚するタイミングは、重量感覚問題発生時と通常時で異なるため、このタイミングに絞った重量感覚制御が有効と考えられる。そこで本研究では、物体離地のタイミングの変更が人の重量知覚に与える影響を調べるために、グリップの変位を制御可能な物体を制作し、離地を知覚するタイミングの変更を試みた。また、持ち上げ実験を行い、アンケートを用いて重量感を評価した。

グリップの動き方として、グリップと物体の間に仮想ばねを挿入し離地の知覚を早める方法と、物体離地前にグリップをフィードフォワード的に下方向へ動かす方法の2種類を用意した。実験の結果、前者の方法では有効性を確認できなかった。対して、後者の方法においては一定の効果を確認できた。ただし、その重量感の変化量は小さく改善の余地を残した。そこで追加実験として、グリップの動き始めるタイミングを変更し、最も重く感じるものを被験者毎に特定した。そして、本制御法における離地の知覚遅れと、離地を知覚したタイミングにおける持ち上げ力の増加を確認し、物体重量が変化しないにも関わらず重量感が増加する現象のメカニズムを解明した。さらに、グリップの動き出しのタイミングの違いが離地の知覚遅れに与える影響について考察した。

## 5.2 今後の課題

本研究の結果, 仮想ばねの挿入によって離地の知覚を早める制御モデルでは, 望ましい効果が得られなかった. したがって, 今後より有効性の高い制御方法を模索していく必要がある. また, 本実験で使用した実験装置には物体重量を変えられないという制約があったため, 実現可能な離地の知覚遅れ時間には限界があった. 実際のパワーアシスト装置に駆動式グリップを適用し離地のタイミングを遅らせる場合, グリップの変位制御に加えて物体側の制御も可能になるため, 離地の知覚をより長時間遅らせる制御の実現が可能と考えられる. また, 本研究では物体離地の視認が, 離地を知覚するタイミングに与える影響を明らかにしていない. グリップの変位により重量感覚を制御するにあたり, 視覚による影響の有無を解明する必要がある. そして, 本論文では取り扱っていないが, 重量感覚問題を解決するためには, リアルタイムでの人の予測質量の推定が肝要である. 現状, 先行研究により, 人の操作波形と予測質量の定量的な関係は解明されたものの, リアルタイムでの予測質量推定は実現できていないため, その方法の確立が求められる.

---

## 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)」, 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] 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).
- [5] 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).
- [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] 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).



- [9] 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).
- [10] 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).
- [11] 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).
- [12] 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).
- [13] 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).
- [14] 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).
- [15] 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).
- [16] Westling, G., & Johansson, R. S. : 「Factors influencing the force control during precision grip」, Exp. Brain Res., Vol.53, pp.277-284(1984).
- [17] 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).
- [18] 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).
- [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] Satoru Serikawa, Ryojun Ikeura, Soichiro Hayakawa, Shigeyoshi Tsutsumi and Hideki Sawai: 「Relationship between characteristics of human lifting motion and predicted mass」, Proceeding of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, Vol.1, pp.959-963(2019)
- [22] 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).
- [23] 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).
- [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://e-arima.com/features/features.htm#Aproc1Plus>>2020 年 1 月 16 日アクセス.
- [25] ツカサ電工株式会社 (発行年不明) 「(TG-06 | KU) : ギヤモーター・ギヤポンプのツカサ電工」, <<https://www.tsukasa-d.co.jp/motor/products/index.php/item?cell003=TG->

06&cell004=KU&label=1&name=&id=2232>2020年1月16日アクセス.

- [26] 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)

---

# 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，三重大学大学院工学研究科機械工学専攻 堤成可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，アドバイスを頂き，深く感謝致します。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。

また，先輩方，同期各氏，後輩各氏のおかげで，充実した研究室生活を送ることができました。厚く御礼申し上げます。

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。

