

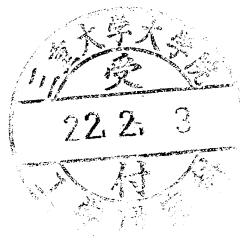
---

平成 21 年度 修士学位論文

パワーアシストされた物体操作における  
人間の重量知覚特性に関する研究

指導教官 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  
野邊 雅也



---

# 目次

---

|         |                        |    |
|---------|------------------------|----|
| 第 1 章   | 緒言                     | 1  |
| 第 2 章   | 物体運搬における人間の知覚          | 3  |
| 2. 1    | 人間の脳が引き起こす視覚的エラー       | 3  |
| 2. 2    | 人間の視覚による物体重量の認識        | 4  |
| 2. 3    | シャルパンティエ効果（大きさ - 重さ錯覚） | 5  |
| 第 3 章   | 実験装置                   | 9  |
| 3. 1    | パワーアシスト装置              | 9  |
| 3. 1. 1 | 人間協調型ロボットとしての装置        | 9  |
| 3. 1. 2 | 重量物運搬型パワーアシスト装置の現状     | 10 |
| 3. 2    | 実験装置の構成                | 11 |
| 3. 3    | 制御システムのモデル化            | 14 |
| 第 4 章   | 実験方法と結果                | 19 |
| 4. 1    | 実験方法                   | 19 |
| 4. 2    | 実験結果                   | 22 |
| 4. 2. 1 | 物体に与えた力と物体の変位          | 22 |
| 4. 2. 2 | 被験者が知覚した重量             | 30 |
| 4. 2. 3 | 考察                     | 34 |
| 4. 3    | 追加実験                   | 36 |
| 第 5 章   | 結言                     | 44 |
|         | 参考文献                   | 46 |
|         | 謝辞                     | 47 |

# 第1章

## 緒言

現在、国内において、急速な少子高齢化の影響で労働者の高齢化も進行している。工場のような生産現場においては、経験と技術に優れた熟練者が必要とされる場面が多いが、高齢の熟練者、または身体的に障害をもった者にとっては、重量物の運搬といった肉体労働は大きな負担となり、労働効率を下げる要因にもなりうる (1)(2)(3)。ここで、上記の問題を解決するために作製されたのがパワーアシスト装置である。パワーアシスト装置とは、重量物を小さい力で運搬することを可能とし、作業者の肉体的負担を軽減することを目的とした一種のロボットである。これにより、作業者は快適で効率の良い仕事を行うことができる。

本研究で対象とするパワーアシスト装置は、重量物運搬型パワーアシスト装置であり、作業を行う人間と協調して能率的に物体の運搬などを行うことができればならない。人間が相手となる人間協調型のロボットゆえに、装置は作業を行う人間の特性に可能な限り近似するように設計されなければならない。本研究で重視する人間の特性とは、第2章で詳しく述べるが、主に物体（装置に取り付けられた重量物）を見たときの人間の視覚的な印象、物体に対する力のかけ方と持ち上げる過程での重量の感覚といったものである。

作業者がパワーアシスト装置に取り付けられた物体を運搬しようとしたとき、物体を見た印象から過度の力をかけると、装置と物体は大きな速度で動く。作業者はその予想外の速度に驚き、正常な運搬が行えなくなるばかりでなく、装置の故障や事故につながる危険性がある。この問題を防止するためには、人間が物体見たときの印象からかける力によるパワーアシスト装置の挙動が人間の特性に合っている必要がある。作業者がどの程度の力をかけ、どのように物体を運搬させたかを調べた上で、作業者の物体運搬時の特性に合ったパワーアシスト装置の最適な制御手法を考案することが本研究の最終目標である。

本研究においては、まず初めに、物体運搬時の感覚とかける力について調査した心理学的実験による研究結果と比較するために、小さな物体を上方向に持ち上げたときの人間の運搬特性を調べる。そこで得られた結果を本格的な重量物パワーアシスト装置に適用するというのが研究を行う上での考え方である。本論文では主に、物体を置いてある状態から持ち上げる場合に、物体を見た人間の力のかけ方を調べる実験を行い、そこで得られた結果をもとにした考察を行っている。

## 第2章

# 物体運搬における人間の知覚

### 2.1 人間の脳が引き起こす視覚的エラー

人間の脳は、目にうつるものを誤って認識することがあり、しばしば錯覚を引き起こす。人間が目を通して脳で認識したものは、錯覚やエラーを含んだものになっている場合があり、絶対的に正しいとは限らない。この人間の視覚による錯覚現象は、本研究で対象とする重量の認識を含め、あらゆる状況で見られるものである。錯覚現象の例は幅広い分野で数多くあるが、代表的なものとして Fig. 2.1 に示されるような”Muller-Lyer錯視”があげられる。線の水平の長さは同じはずであるにもかかわらず、両端に矢羽があることで、初めて見た人間の中には Fig. 2.1 の下の線のほうが長いと誤って知覚する者がいる (4)。このように、時に人間の脳は見誤りをしてしまい、物理的性質を適切に見極めることが困難であると言える。人間の脳による錯覚現象は、単純な視覚のみによるエラーにとどまらず、力覚的にもあてはまることがある。以下では、視覚による力覚的エラーについて少し触れることとする。

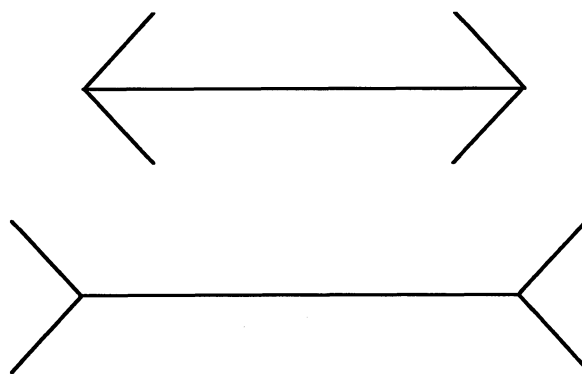


Fig. 2.1 An example of visual error

## 2.2 人間の視覚による物体重量の認識

作業者が物体（荷物）を運搬するときに、視覚的にその物体の重量をどのように認識するかについて考える。実際に物体を持ち上げようとするとき、人間は物体のサイズ、材料、形状などといった視覚による情報をもとに物体の重量を無意識のうちに推定しようとする。手順としては、人間は今まであらゆる物を持ったり運んだりした経験から目の前にある物体の重量を脳内で考えて、どの程度の力が必要かを予測した上で物体を自分の思い通りに運搬しようとするということである。ここで、実際に物体に触れてから力をかけて運搬しようとした瞬間に、物体の重量が実際にどの程度であったかが感覚的にもわかり、物体に触れる前の重量推定がどの程度正しかったかがわかるはずである。人間の視覚によって推定した重量と感覚的に認識した重量に大きな差があれば、物体の運搬に支障をきたす可能性がある。

以上のことを具体的に考える。人間が物体の重量を想定して、持ち上げた瞬間にわかる実際の重量が思っていたよりかなり大きかった場合、物体が思い通りに持ち上がらないため人間はより大きい力をかけようとする。逆に思ったより重量がかなり小さかった場合は、持ち上げた物体が予想以上に簡単にかつ速く持ち上がって、その瞬間に必要以上に力をかけていたことがわかる。思った通りの重量に近い値であれば、人間は無意識のうちに脳内でフィードバックを行うことにより、一瞬でその小さな重量の見誤りを修正して違和感なく物体を持ち上げる。

実際に、日常で人間が物体を持ち運びしている際には、これらの推定の誤りによって問題が生じることはほとんどないが、パワーアシスト装置を操作する場合に当てはめてみると無視できない異常が起こることがある。パワーアシスト装置に取り付けられている目の前の物体を見たときに、その物体から得られる視覚的情報により大きな力が必要だと人間が思ってしまい、過剰な力で運搬しようとすることがある。つまり、パワーアシストされている物体とはいえ、物体を目で見たイメージから本来必要とする力を大きく超えた力をかけてしまうということである。後述する1次元パワーアシスト装置の速度制御式より、本来かけるべき力を大きく超えた力でパワーアシスト装置に取り付けられた物体を持ち上げようすると、非常に大きな速さで物体が動いてしまい、持ち上げた人間は驚き、思い通りかつ適切に物体を操作することができな

くなるばかりでなく事故や故障につながる可能性があり危険である。装置が安全であり、操作者に恐怖を与えないということは最低条件であり、安全性・操作性は重要項目である(5)。本来のパワーアシスト装置の利点を十分に生かすためには、人間が物体を見てイメージした際にかかる力によるパワーアシスト装置の挙動が人間の特性に合うように設計されていなければならない。操作者が、パワーアシスト装置に取り付けられた物体を見た印象からどの程度の力をかけるか、どのように動かすかを調べた上で、操作者の物体運搬時の特性に合ったパワーアシスト装置の最適な制御手法を考案するというのが本研究の最終目的である。

その第一歩として、人間が物体を持ち上げる場合の力覚的な錯覚現象について調べた心理学の研究と比較するために、小さな物体を約 10cm 上方向に持ち上げたときの人間の特性を調べる。心理学の研究では物体を操作したときに人間が与えた力、加速度、さらには人間の感性についての結果が出ているが、本研究では、パワーアシスト装置に物体を取り付けた場合の人間（操作者）の特性を装置に適用することを考える。

### 2.3 シャルパンティエ効果(大きさ - 重さ錯覚)

人間が物体を持ち上げるときの心理学的影響をみるために、人間が物体の見た目の大きさ（以下サイズと呼ぶ）によって物体の重量をどのように感じるかについて述べることにする。物体のサイズは、視覚によって人間が得られる情報のひとつである。今ここに重量がまったく同じでサイズが異なる物体が複数個あると想像する。人間が同じようにそれらの物体を持ち上げた場合に、重量がまったく同じであるにもかかわらず、一般的にはサイズがより小さい物体の方をより重く感じるという現象がある。この現象は発見者の名前からシャルパンティエ効果と呼ばれ、または Size-weight illusionとも表記されることがある(6)。Size-weight illusionとは直訳すると”大きさ重さ錯覚”となるが、これも物体を目を通して認識した人間の脳が引き起こす錯覚現象のひとつである。”サイズが小さい＝軽い”という人間の思い込みからくるものであるが、錯覚現象だとわかっていても、人間の脳はやはり物体の重量を誤って知覚してしまい、正確な判断は困難である。

シャルパンティエ効果に関する研究は約100年間にわたり多くの人々によって、あらゆる方法で行われており、100g から 200g 程度の比較的軽い物体を扱っているものが多い(7)。研究の例としては、150g, 500g, 1000g のボール（参考文献ではコントロールと呼ぶ）を用いてシャルパンティエ現象を定量的に調べるといったものがある(7)。これは、3 種類のサイズのボール（最も小さいものはコントロールと同じサイズ）に砂を入れてコントロールと同じ重さと感じたときのボールの重量を確かめるという実験であり、例えば 150g のコントロールと同じ重さと感じたときのボールの重量の平均値はそれぞれサイズが小さいものから 149g, 195g, 235g となっており、シャルパンティエ効果の影響が顕著に現れている。また、現象の原因を見つけるため、物を持つときの腕の動きや筋電信号を計測するといった生体の力学的信号について調べたものなどがあり、実験回数、順番によっては物を持つ前から予測して腕を固くするなど、人間特有の心理的な動きが見られることもわかっている(8)。次に、シャルパンティエ効果に関する具体的な実験とその結果の一部を以下に示す。

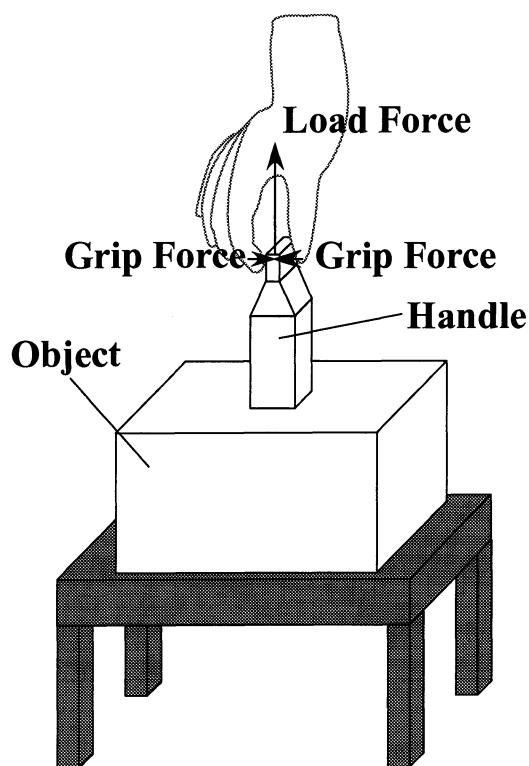


Fig. 2.2 Experiment to confirm size-weight illusion



Fig. 2.2 は見た目のサイズと人間の重量知覚との間の関係について調べた研究のために行われた実験の図である。この研究は A.M.Gordon 氏ら他によるものである (6)。Fig. 2.2に示す形状の物体がテーブルの上に置かれており、握る力(Grip Force)と持ち上げる力 (Load Force) を測るためのひずみゲージ式の力センサが物体に取り付けられたハンドル上部側面に装着されており紙やすりで覆われている。加えて赤色LEDセンサにより物体の位置が計測できるようになっている。ハンドル上部側面を Fig. 2.2 のように親指と人差し指でつかんで持ち上げて、先に述べた二種の力、箱の上下方向の変位・速度を測定する実験であるが、加えて被験者に物体の重量をどのように感じたかについてアンケートを行っており、シャルパンティエ効果による影響がどの程度出るかについて調査している。

実験方法としては、木造で灰色にペイントされた立方体の形状をした物体を、上に取り付けられたハンドルの上部側面を指でつかんで持ち上げるというものである。物体そのものの重量は 0.83kg であり、ハンドル付きの物体の重量は 1.03kg である。物体のサイズは3種類用意されており、小さいものから各辺 16cm, 20cm, 25cm の立方体でありそれぞれサイズ小, 中, 大と呼ぶ。各物体の体積の比はおよそ 1:2:4 となっている。また、指でつかむハンドル上部の面は 35mm × 35mm である。物体を持ち上げる高さは10cmとし、3-4秒の間、物体をその位置で保持した後に物体をFig. 2.2のようにテーブルに置いてある状態に戻す。それから別のサイズの物体に替えて同様に試行を繰り返す。

実験は年齢 23 ～ 47 歳の健康で右利き、かつ研究内容について知らされていない被験者 15 名（男性 2 名、女性 13 名）によって行われるが、センサが測定可能な 30N 以上の力を超えてハンドル面をつまんでしまう被験者については別の人と交代することとしていて、2 名の被験者が交代している。15 名の被験者は 5 人の 3 グループに任意に分けられ、それぞれの異なるサイズの箱から実験を始める。なお被験者はある程度物体から離れて、主にひじの動きによって物体を持ち上げるようにしている。各サイズの物体につき練習後にそれぞれ 6 回の試行を繰り返し、ひとりにつき計 18 回物体を持ち上げる。それから 3 種類のサイズの物体について、重く感じた順番を被験者に聞いてい

る。シャルパンティエ効果に従えば、サイズが最も小さい箱を持ち上げたときに最も重いと感じるはずである。

実験結果であるが、15名の被験者すべてがサイズ小の物体を最も重と感じており、12名の被験者がサイズ大の物体を最も軽と感じると答えた。一方で残り3名の被験者については、サイズ中の物体が最も軽と感じたという結果が出たものの、この実験においてもシャルパンティエ効果が厳密にとは言えないが正しかったということがわかる。

この実験に関しては、15名の被験者が物体を持ち上げたときの二種類の力（握る力と持ち上げる力）を力センサを用いて計測している。実験開始前の初期状態においては物体に力が作用していないが、指でハンドルをつかんだ瞬間に物体に握る力が発生し、持ち上げた瞬間にも上方向に力が加わる。これら二力のピーク値の平均（被験者15名、各サイズ試行6回）を見ると、ともにサイズ小の物体が最も小さく、サイズ大の物体が最も大きい。サイズ中はその間のピーク値を示す。物体を持ち上げた位置で保持しているときの力は、重さが等しいゆえにどのサイズでも定常で差は見られないが、持ち上げるために力を与える場合は、サイズが大きいほど被験者はより大きな力で持ち上げようとする。同じ重量の物体であっても、物体を見た被験者の”小さい物体は軽いだろう”という期待によって、サイズが小さい物体ほど物体を持ち上げるために与える力が小さくなり、その結果、期待していたほど容易には物体が持ち上がらずに、”小さい物体ほどより重く”感じるということである。まとめると、サイズが小さいほど被験者は軽いと勝手に思い込み（よりサイズが大きな物体を持ち上げるときより）小さな力で持ち上げようとするが、重量は同じなので感じる重量はより大きくなる。人間が物体を持ち上げるときに、人間の脳が感じる重量を決める要素は何なのかということが重要になってくるが、この実験において被験者が感じた重量は、物体のサイズとそのサイズによる力のピーク値に依存するということになる。

## 第3章

# 実験装置

### 3.1 パワーアシスト装置

#### 3.1.1 人間協調型ロボットとしての装置

パワーアシスト装置は一種の人間協調型のロボットといえる。かつてロボットは人間と隔離された空間での開発を想定したものが多かったが、近年は人間の日常生活に近い空間で用いられるために開発が進められており、ロボットとはいえ人間と協調して作業を行うようにならないといけない。人間とロボットが互いに接触し、動作空間を共有するようになりつつある中で、ロボットは人間の特性に合うように、言い換えれば、扱う人間がストレスなく扱えるように進歩していく必要がある。医療・介護の場で活躍する介護用ロボット、災害時に被害状況や危険に陥っている人の確認を行う救助ロボット、または現在開発途上ではあるが人間とコミュニケーションをとるための対話ロボットといったように、ロボットは人間の特性に近づくように発展を続けている。これらのロボットは当然、利便性は重要な項目ではあるが、同時に使用する人間のために安定性・安全性も考慮されなければならない。パワーアシスト装置においても同じことが当てはまり、いくら人間が出すべき力を軽減させることが可能であっても、危険で人間に恐怖を与えるものであってはならない。扱う人間と協調して円滑に作業を行うパワーアシスト装置の開発が望まれる。

人間が負担するべき力を軽減させるという意味でのパワーアシスト装置としては、“Man-amprifier”, “Hardiman” といったものが1960年代前半から存在していた(9)。これらの装置は、人間が物理的に出せる力を増加させるマニピュレータとして定義されており、かつてマスター・スレーブと呼ばれていた概念に近いものである(9)。加えて、直接的に力、情報信号をやりとりできるエクステンダーというものも研究されてきた。エクステンダーはキーボードや操作レバーなどがなく、人間が難しい訓練なしで

利用でき、以前のマスター・スレーブ式のものに比べて、自然に重い物体でも正確にかつ複雑に動かしながら操作できるという新たな利点を生み出した (9)。エクステンダーは工場、建設、船荷の操作などといった分野にも応用されており、主に産業の分野での活躍がめざましかった。

上の例のように、パワーアシスト装置には体に装着して身体障害者の生活を補助するものもあるが、本研究では主に工場などの生産現場で使用される重量物運搬型パワーアシスト装置を対象とする。この種のパワーアシスト装置は、重量物運搬といった肉体的に負担が大きい作業を行う際に、作業に要する力を軽減させるかたちで人間を支援するものであり、上記のような人間と協調して安全かつ快適に作業を行うことを目的としたロボットの一種である。

### 3.1.2 重量物運搬型パワーアシスト装置の現状

人間が出すことのできる力には個人差があり、物理的に限界がある (9)。生産現場では重い物体を何度も運搬、移動する場面が多く、作業を迅速にかつ効率良く行うために、重量物を楽に運べるようにしたいという願望が出てくるのは必然である。すなわち、人間の力では物理的に運搬が困難なものでも何らかの方法で動かせるようにならないかという願いが、重量物運搬型パワーアシスト開発の基礎となっている。

重量物運搬型のパワーアシスト装置の開発は多くの分野でなされてはいるにせよ、現時点では、人間が扱いやすいように作られているとはいえない (10)。装置を扱う人間が目的とする操作を問題なく行うために必要な円滑で脅威のない自然な運搬が困難だということである (10)。人間が負担すべき力を軽減させて、重量物でもより小さな力で扱えるようになるというのがパワーアシスト装置の本来の目的であるが、単純に装置からのアシストを受けて物体を軽く運搬できるとしても、その動作が円滑でなく実際に物体を運ぶような動作とかけ離れていれば、操作する人間側からすればストレスを感じ、扱いにくいものとなる。パワーアシスト装置により人間が本来与えるべき力は小さくなるはずであるが、装置に取り付けられた物体を目で見て力を与える場合に、アシストされていない物体を運搬するときと同じように力をかけてしまう場合がある。これには、人間はアシストされた物体を持つ場合に感じる重さと実際にあるアシ

ストなしの物体を持つ場合に感じる重さを区別できないということが関係している(10). アシストの有無に関係なく力をかけてしまう癖が、広義の意味での人間の特性であるとも言えるが、その結果、物体に過剰な力をかけてしまい物体は操作者の思いもよらぬ速度で動き、慌ててまた物体に適切でない力をかけることによって、操作者の安全と運搬作業の能率化を考慮した円滑な操作が不可能となる. 第1章でも述べたように、重量物パワーアシスト装置の利点を最大限に利用するためには、第2章と上記で述べたものも含めた、人間の特性を理解し、パワーアシスト装置をそれにできるだけ近づけるように設計、制御されなければならない. 本論文では度々”人間の特性”という概念を扱うが、人間が物体を見たときの視覚的なものも含めて、物体にどのように力を加えるかということも考慮する.

## 3.2 実験装置の構成

本節では、本研究で主に用いる1次元上下方向のパワーアシスト装置について記述する. パワーアシスト装置は速度制御の AC サーボモータで駆動し、目標位置、速度などの物理量に追従する制御を行っている. ”サーボ”という言葉が”召使い”から由来しているように、指令通りの位置へ位置決めをしたり、指令通りの速度で動く機構を通常サーボメカニズムと呼ぶが、パワーアシスト装置に取り付けられた物体を自分の思うように移動させるという意味では、適した機構であると言える.

Fig. 3.1 はパワーアシスト装置の図であり、これに物体を取り付けて持ち上げ動作を行う. このパワーアシスト装置はボールねじで駆動しており、ボールねじの回転数は3000rpm, リードは 0.003m であり、一条ねじとなっているのでリードはピッチに等しい. Fig. 3.1 は物体が取り付けられる前の状態であり、物体に与えられた力を計測するための荷重変換器と、モーメントによる力の影響を防ぐためのユニバーサルジョイントがその上に取り付けられている. 実験で使用する荷重変換器は、NEC Avio 赤外線テクノロジー株式会社が製造したものであり、型番は9E01-L44, 定格荷重は50N, 引張荷重のみを変換するものである. 荷重変換器に物体を取り付けた後で、被験者が物体を持ち上げようとしている様子を Fig. 3.2 に示す. Fig. 3.1 のパワーアシスト装置に、実験で用いる物体を取り付けたものが Fig. 3.2 となる.

パワーアシスト装置に取り付けられた物体（本章では以降便宜上”物体 A”と呼ぶ）を、操作者が持ち上げようと上向きの力を Fig. 3.2 の物体 A に与えると、パワーアシスト装置のアクチュエータが作動してボールねじ部が回転することにより、与えた力と設定したパラメータの値に応じた速度で物体 A が上方向へ移動する。実際に人間が物体を持ち上げるときと同じ動作を、Fig. 3.2 に示すパワーアシスト装置を媒介として行うということである。実験方法の詳細については第4章で述べることとする。

次に、実験装置全体の概要について記述する。実験装置のシステム構成の概略図は Fig. 3.3 に示す通りである。実験の手順としては、速度制御方式のサーボドライブのスイッチを ON に切り替えた直後に、ソフトウェア上のプログラム（3.3 節 Fig. 3.5 の In computer 部分）でシステムを作動させることによってパワーアシスト装置のボールねじ部分が回転し始め、実験の準備が始まる。その十数秒後に実験者の合図を受けて被験者は Fig. 3.2 の物体 A に上向きの力を与えることによって物体を持ち上げる。物体の中にある荷重変換機（Fig. 3.1 参照）によって、物体に加えられた力が計測されて、アナログ形式の電圧信号として増幅器（アンプ）を通して A/D 変換器に送信される。ここ

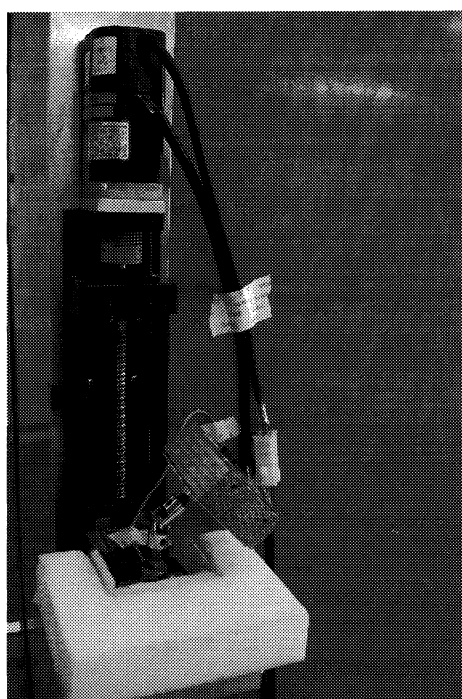


Fig. 3.1 Experimental device of power assist system

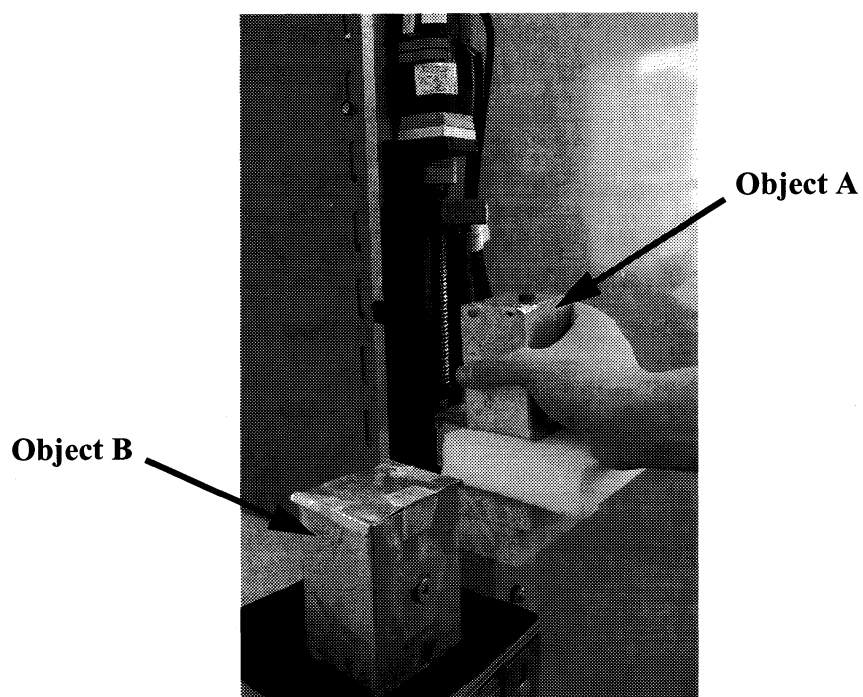


Fig. 3.2 Power assist system with object

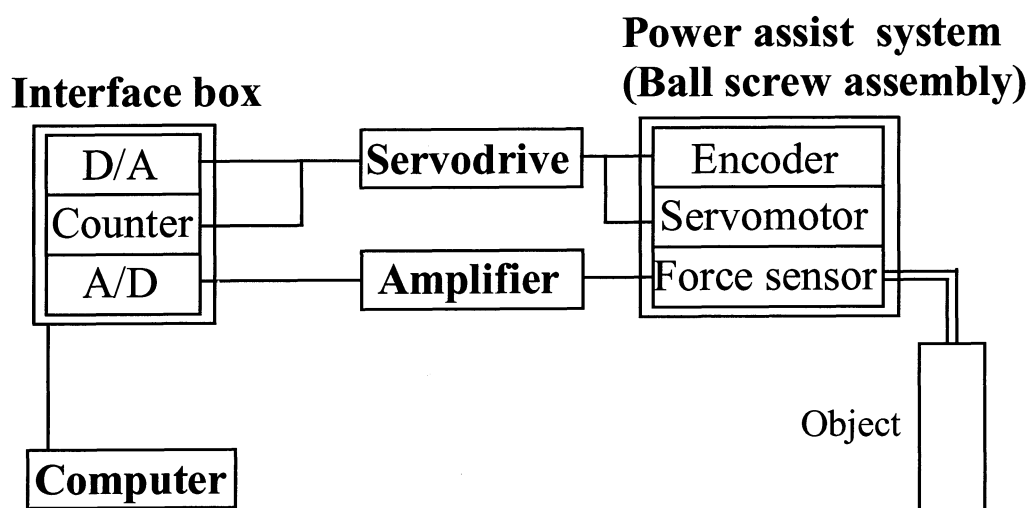


Fig. 3.3 Experimental setups of power assist system

でアナログ形式の電圧信号がデジタル形式に変換されて、コンピュータに人間の与えた力  $f_h$  として伝達される。入力が人間の与えた力  $f_h$  となってソフトウェア上で位置フィードバックを行うことによって変位  $x$  で出力され、その変位は  $f_h$  の他にソフトウェア上で設定した二種類の仮想質量にも依存する（3.3節参照）。つまり、デジタル形式の力  $f_h$  がソフトウェア上での制御によってデジタル形式の変位  $x$  になって出力され、D/A 変換器を通してアナログ形式の電圧となって、サーボドライブはその電圧を物体Aの変位の信号として受ける。エンコーダ・カウンタといった装置が物体Aの実際の変位を計測して、サーボドライブは受け取った信号としての変位と計測された実際の変位の差を読み取り、サーボモータに誤差を正すように信号を送る。フィードバック制御を行うことによって実際の変位からずれた誤差を修正できるようになっている。このような仕組みによって、アシストされた物体Aを操作する人間はわずかな力を与えるだけで物体を自分の思い通りの位置に持ち上げることが可能となるが、実際には簡単に運搬動作を行えるわけではない。以上が本研究で主に用いる実験装置の説明となるが、これをどのように利用して実験を進めていったかに関しては第4章で述べることとする。

### 3.3 制御システムのモデル化

本研究ではまず、2.3で述べた心理学実験をパワーアシスト装置にあてはめることを考える。ゆえに実験装置として扱うパワーアシスト装置は1次元上下方向の簡素なものであり、可動範囲も約18cmと比較的小さいものを使用している。実験装置の詳細については第4章で記述するが、本章ではこの実験装置に関する制御システムのモデル化について述べる。

作業者が1次元上下方向のパワーアシスト装置を操作する場合の概略図はFig. 3.4に示す。上下方向に座標  $x$  をとっており上方向を正としている。パワーアシスト装置を操作した際の物体の仮想質量を  $m$ 、重力加速度を  $g$  とすると、下向きに重力  $mg$  がはたらき、操作する人間が物体を持ち上げるためには、上向きの力  $f_h$  を物体にかける必要があ



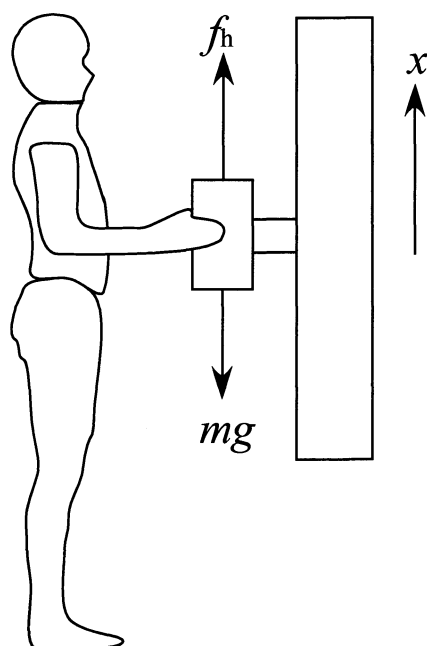


Fig. 3.4 Forces on power assist system

る。パワーアシスト装置の駆動部がこの人間が与える力 $f_h$ に応じた速度で動き、物体運搬の補助をするという仕組みになっている。

Fig. 3.4 において、人間によって持ち上げられる物体にのみ着目すると、運動方程式は

$$m\ddot{x} = f_h - mg \quad (3.1)$$

と表記される。

式 (3.1) において、右辺は物体に加えられる力を表している（ただし摩擦や空気抵抗は除く）。両辺に存在する質量 $m$ に注目すると、左辺の $m$ は慣性力項の質量であり、右辺の $m$ は重力項の質量である。実際に物体を持ち上げるときにはこの二つの $m$ は同じものとみなすのが普通であるが、本研究においては、この二つの $m$ を別々のものと扱って制御を行う。慣性力と重力では、物体を持ち上げたときの感性が異なるのではないか

と考えたためである．慣性力項の質量を  $m_1$ 、重力項の質量を  $m_2$  とおくと、運動方程式 (3.1) は以下のように書き換えられる．

$$m_1 \ddot{x} = f_h - m_2 g \quad (3.2)$$

式 (3.2) が本研究で行う実験の制御に関する考え方であり、二つの  $m$  をパラメータとしてソフトウェア上で複数の値に変えて制御を行っている．実験方法については第4章で詳しく述べるが、 $m_1$ 、 $m_2$  を変えて計12の組み合わせを用いて、力を計測してさらにその際に感じた重さを調べる実験を行う．この実験を行うことによって、操作者が持ち上げ動作を行うために物体に与える力とそのときに感じた重量が、二種類の  $m$  にどのように依存するかをある程度調べることができる．例えば、 $m_2$  が同じ値でも、 $m_1$  が異なるとどのように結果が異なってくるか、言い換えれば、慣性力項の質量  $m_1$  が人間が物体を持ち上げる際にどのような影響を及ぼすかをみることができる．

次に、パワーアシスト装置に取り付けられた物体を操作する速度について考える．式 (3.2) の両辺を  $m_1$  で除して、さらに時間  $t$  で積分すると

$$\dot{x} = \int \left\{ \frac{(f_h - m_2 g)}{m_1} \right\} dt \quad (3.3)$$

のように書き表すことができる．本論文では式 (3.3) を速度制御式と呼ぶ．

速度制御式 (3.3) は、本研究で扱うパワーアシスト装置を用いて操作者が物体を持ち上げる場合に、アシストされることによって物体が移動する速度についての式となっている．この式により、操作者が物体に与える力  $f_h$  が大きくなればなるほど、物体が高速で動いてしまうことがわかる．物体を持ち上げるために操作者は力を与えるが、その力が過大になると、物体の加速度、速度も追従して過大なものとなり、安定した操作が困難となる．式 (3.3) は  $m_1$ 、 $m_2$  も速度に影響を及ぼすパラメータとなっており、 $m_1$ 、 $m_2$  の値によって、人間が与えるべき力も変動する．式 (3.3) を見ると、慣性力項の質量  $m_1$  が小さくなると、物体を安定して操作しにくくなることがわかる．さらに、重力項の質量  $m_2$  が大きくなると、物体を持ち上げるために大きな力を要することがわか

る。ただ後者の場合は、アシストされていない実際にある物体を持ち上げるときにも同じことがあてはまり、重い物体ほど人間は大きな力を与えて持ち上げなければならないことは明らかである。このことから、 $m_2$  が物体を操作するときの人間の挙動に主に依存することが予想できる。物体を安全かつ快適に、操作者の思い通りに動かすためには、適切な力をかける必要があるのと同時に、ソフトウェア上におけるパラメータ  $m_1$ ,  $m_2$  の値を状況によって選択することも重要となる。

制御システムのモデル化に関して、本研究で用いる制御のブロック線図の概略を Fig. 3.5 に示す。Fig. 3.5 より、人間が与える力  $f_h$  が入力となっており、物体の加速度を二回積分したものである位置  $x$  が制御システムの出力となっていることがわかる。G は電圧のゲイン、D/A は DA 変換器をそれぞれ表している。また、 $m_1$ ,  $m_2$  の値はソフトウェア上でパラメータとして複数の値に設定できる。実験装置については 3.2 節で詳しく述べたのでここでは簡単な流れについてのみ記述するが、人間が物体に与えた力  $f_h$  はアナログの電圧からデジタルの電圧に変換された後ソフトウェア上に組み入れられて、変位（位置）という形式で DA 変換器を通じてアナログの電圧として出力されることになる。位置は速度制御のサーボモータによって制御され、位置フィードバック制御が行われている。本研究で用いる制御は、パラメータは質量  $m_1$ ,  $m_2$  のみという単純なものであるが、位置ベースのインピーダンス制御とすることができる。力から変位への

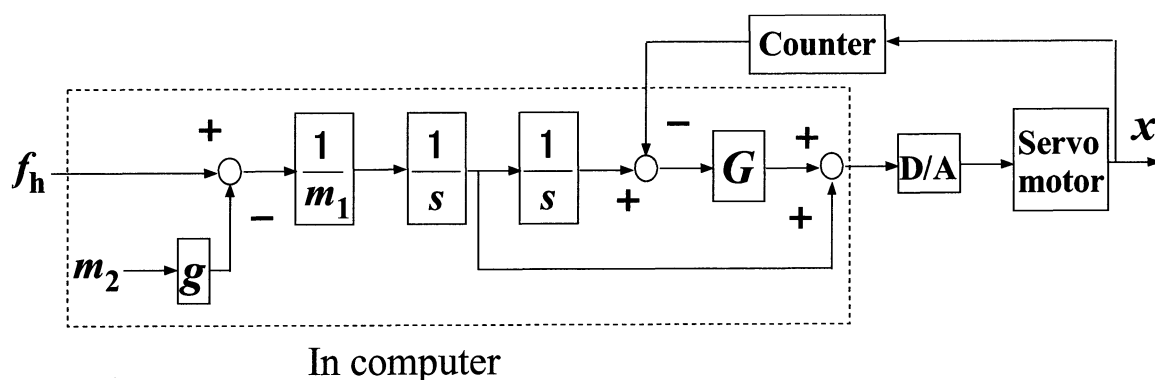


Fig. 3.5 Block diagram of control system

変換に関して二つの質量パラメータ  $m_1$ ,  $m_2$  が用いられ, 目的とする作業のためにこれらのパラメータを都合の良い値に設定して制御を行うことがインピーダンス制御の基本的な考えであり, 効率良い作業のためにこの考えが必要となる場合がある.

## 第4章

# 実験方法と結果

### 4.1 実験方法

本節では Fig. 3.2 に示されるパワーアシスト装置を用いた実験方法について記述する。Fig. 3.2 の物体 A は図のようにボールねじ式の 1 次元パワーアシスト装置に取り付けられており、スポンジ状の台の上に置かれている。物体 A がこの台の上に置かれた状態でソフトウェア、ハードウェア上のシステムを作動させて（このときを時間： $t=0[s]$ とする）その位置で物体を保持した後で、十数秒後に実験者の合図によって被験者が物体を右手で持ち上げる。この実験のタスクは、物体 A を目印のある 10cm ほどの高さまで実際の物体を持ち上げる時と同じように持ち上げてから、その位置で 1-2 秒保持するというものである。10cm 程度持ち上げる実験なので、物体に与える力は小さくて済むはずである。Fig. 3.2 の物体 A をタスクに従って持ち上げた後、その重さをどの程度と感じたかについて被験者に調べてもらう。物体 A とサイズが同一である、すぐ横にある物体 B を用いることによって、アシストされた物体 A を持ち上げた瞬間に被験者が感じた重さを調べる。物体 B は中におもりを取り付けることによって外観を変えずに重量だけを変えられるようになっている。つまり、外観を物体 A と同一にしたままで重量を 0.1-1.5kg の範囲で自由に変えることができるということである。物体 B を重量比較用の物体として持ち上げることで、物体 A を持ち上げたときに感じた重さを調べるというのが、本実験で被験者が感じた重さを調べるための方法である。以上のことをまとめると、被験者がアシストされた物体 A を 10cm の高さまで持ち上げてそのときに感じた重量を比較用の物体 B を用いて調べるということである。さらに荷重変換機とカウンターによって物体に与えられた力と物体の実際の変位を調べる。

実験で用いる Fig. 3.2 の直方体状の物体 A, B について述べる。物体は A, B ともに薄い 0.5mm のアルミニウム片を組み合わせたものであり、重量は極めてわずかである。

物体Bの外観はFig. 4.1のようになっており、Fig. 4.1左図が物体Bの表側を表し、右図が裏側を表している。感じた重量を調べるためのおもりはFig. 4.1右図のように取り付ける。当然、実験を行う際にはFig. 4.1左図のように表側を向けて使用する。また、物体はA、Bともに3種類のサイズを用意する。3種類のサイズを用意する目的としては、第2章で述べたように見た目のサイズによって人間が物体に与える力がどのように変化するかを調べるためである。各サイズの物体は幅が60mm、奥行きが50mmであるのは共通だが、高さが大きいものから順に160mm、120mm、87mmとなっており、以下サイズ大（Size L）、サイズ中（Size M）、サイズ小（Size S）と書き表す。Fig. 4.1は左図右図ともに左から順にサイズ大、中、小となっている。物体を構成するアルミニウム片は薄く質量もごくわずかなので、サイズの違いによる影響はほとんどない。物体Bを用いてアシストされた物体Aを持ち上げた瞬間に関した重量を調べる場合、物体Bに取り付けるおもりの重量は0.1kg、0.2kg、0.3kg、……、1.5kgというように0.1kg刻みとして、被験者が物体Aを持ち上げたときに感じた重さが、物体Bより軽かったか重かったかで判断してもらう。例えば、物体Bに0.2kgのおもりを取り付けた場合に、アシストされた物体Aを持ち上げた瞬間に感じた重さが0.2kgより軽かったか重かったかが判別できる。さらに別の重量に切り替えた物体Bと比較を繰り返すことによって例えば0.2kgより重く0.3kgより軽く感じたという結果となると、被験者が感じた重さの範囲は0.2-

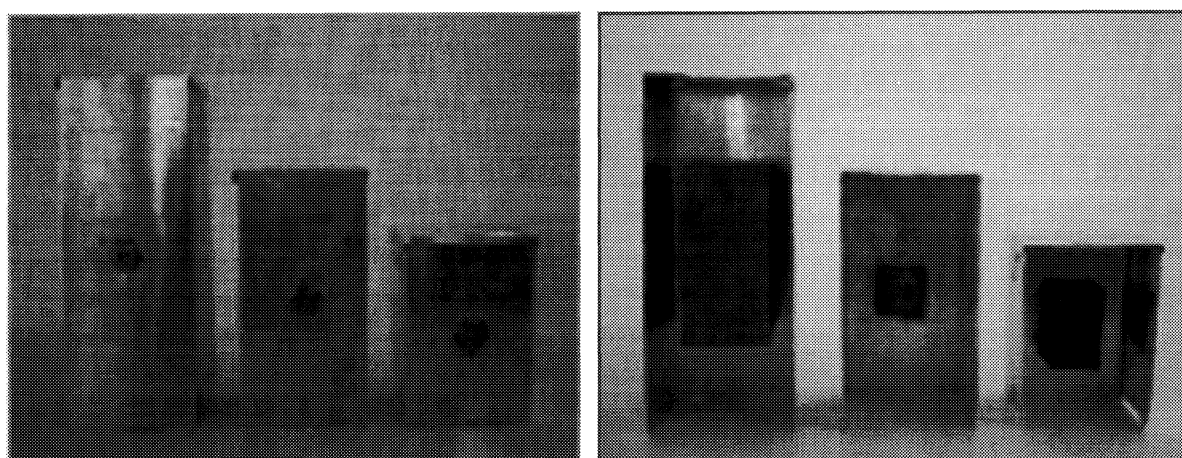


Fig. 4.1 Frontside and Backside of object B

0.3kg であったことがわかる。0.1kg 刻みとした理由は、人間が知覚できる重量にはやはり限界があり、より細かい単位（例えば 0.05kg 刻み、0.025kg 刻みなど）になると感じた重さを正確に判断することがより困難と判断したためである。

次に、第3章で述べた二種類の仮想質量  $m_1$ ,  $m_2$  についてどのように値を設定したかについて述べる。先に説明した実験方法について、各  $m_1$ ,  $m_2$  の組み合わせをランダムに変更して行うわけだが、その組み合わせについて Tab. 4.1 に示す。慣性力項の質量  $m_1$  に関しては 0.5, 1.0, 1.5, 2.0kg の4種類、重力項の質量  $m_2$  に関しては 0.5, 1.0, 1.5kg の3種類の数値を用意し、計 12 個の組み合わせで実験を行う。実験者はこの 12 個の組み合わせをランダムに MATLAB と SIMLINK というソフトを用いて設定して、被験者が物体 A を持ち上げる。ランダムで設定するということは、例えば不規則に  $(m_1, m_2)=(1.0, 0.5)$ ,  $(m_1, m_2)=(2.0, 1.5)$ , ……というように設定して被験者にその値を知られないようにするということである。この組み合わせの中で  $(m_1, m_2)=(0.5, 0.5)$ ,  $(m_1, m_2)=(1.0, 1.0)$ ,  $(m_1, m_2)=(1.5, 1.5)$  は重力項の質量と慣性力項の質量が等しく、実際に物体を持ち上げるときの様子を仮想している。被験者が感じた重さや物体に与える力に直接影響を与えるのは重力項の質量  $m_2$  であるのは実験開始前から予想がつくかもしれないが、慣性力による影響がどのように実験結果に表れるかを  $m_1$  を用いて見ることができるようになっている。本研究においては、パワーアシスト装置に取り付けられた物体を持ち上げるときに、慣性力と重力では感じ方が違うのではないかという仮定の下、両力に含まれる質量を別々に設定した。本実験では、各サイズでこの 12 種類の組み合わせを設定することで計 36 回の持ち上げ動作を行いそれを 1 セットとする。任意の組み合わせにおいての 3-5 回の練習後に、各被験者は 1 セットないし 3 セットで実験を行って、物体に与えられた力と物体の変位、持ち上げたときに感じた重さ

Tab. 4.1 Sets of inertial and gravitational mass

| $m_1$ [kg] | $m_2$ [kg] |     |     |
|------------|------------|-----|-----|
| 0.5        | 0.5        | 1.0 | 1.5 |
| 1.0        | 0.5        | 1.0 | 1.5 |
| 1.5        | 0.5        | 1.0 | 1.5 |
| 2.0        | 0.5        | 1.0 | 1.5 |

について調べる．過剰な力または速度で持ち上げることによって，パワーアシスト装置の可動範囲を超えて物体を移動させたり操作が困難なほど大きい振動が装置と物体の間で起きれば，その試行はもう一度やり直しとなる．ここで得られた結果から各組み合わせにおいて被験者は物体をどのように持ち上げるか，どの程度の重さと感じるかをみて，小型のパワーアシスト装置を使用して物体を持ち上げたときの人間の特性を調査する．

## 4.2 実験結果

Tab. 4.2 Each subjects data

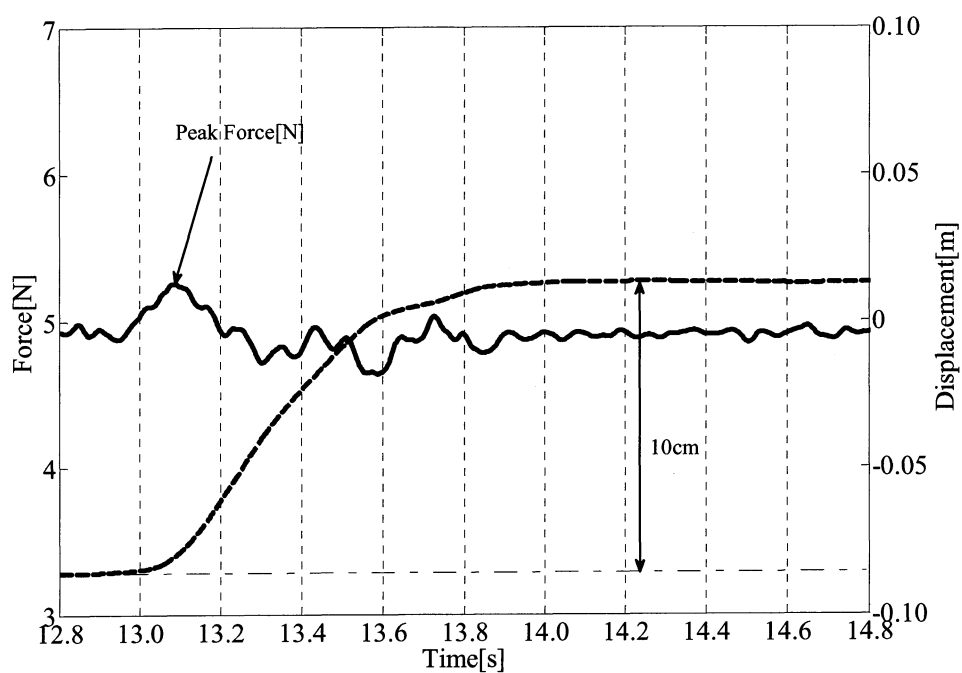
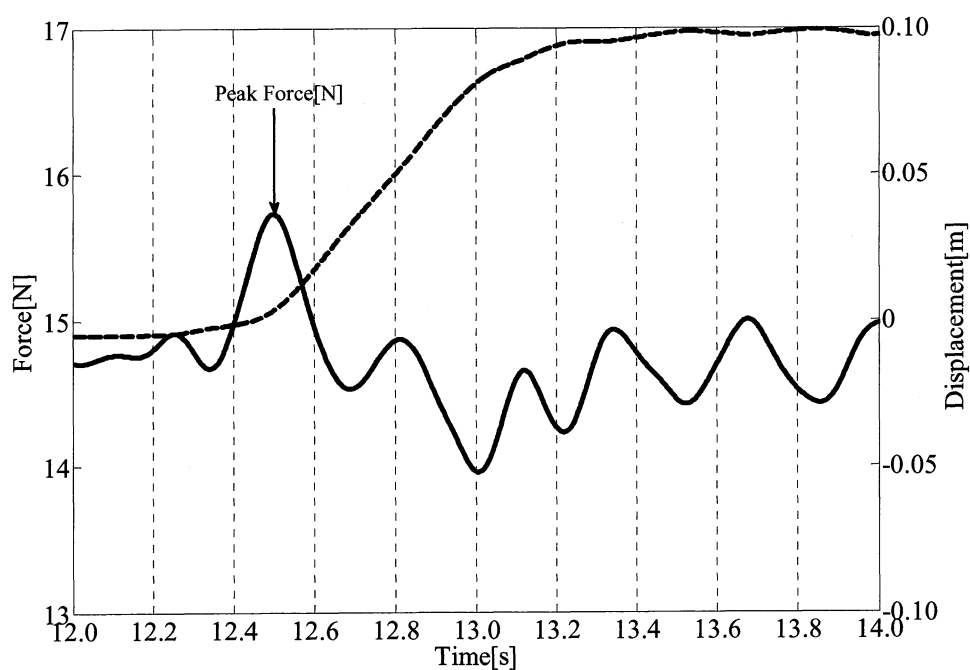
| Subject | Age | Height[cm] |
|---------|-----|------------|
| A       | 29  | 168        |
| B       | 25  | 161        |
| C       | 24  | 174        |
| D       | 24  | 170        |

前節で記述した実験方法について，4名の被験者（男性）で実験を行った．各被験者の年齢，身長については上の Tab. 4.2 に示す．4名の被験者を以下ではそれぞれ被験者 A, B, C, D とする．実験開始前に任意の組み合わせで5回程度練習をしてから本番の実験を行い，各3種類のサイズ×12個の組み合わせを1セットとして，被験者 A, B は3セット，C, D は1セットの実験を行った．

### 4.2.1 物体に与えた力と物体の変位

床から 120cm の高さにある台に置いた物体を，合図を受けて被験者が目印によって 10cm の高さまで持ち上げるという実験であるが，このとき被験者が物体に与えた力に関する結果を示す．物体を上を持ち上げるとき，被験者は上向きの力で物体を上方向に持ち上げる．このときの力と変位の挙動に関して以下に4個のサンプルデータを以下に示す．図はいずれも横軸が制御システム作動時を  $t=0[s]$  としたときの時間  $t[s]$  であり，左横軸が荷重変換器によって計測された物体に与えられた力  $[N]$ ，右横軸がエンコーダとカウンタによって計測された物体の実際の変位  $[m]$  を表しており，図の実線が力を，破線が変位をそれぞれ表す．なお，力，変位ともに上向きを正ととっている．



Fig. 4.2 Sample data (1) ( $m_1=0.5, m_2=0.5$ , Size S, Subject A)Fig. 4.3 Sample data (2) ( $m_1=2.0, m_2=1.5$ , Size S, Subject B)

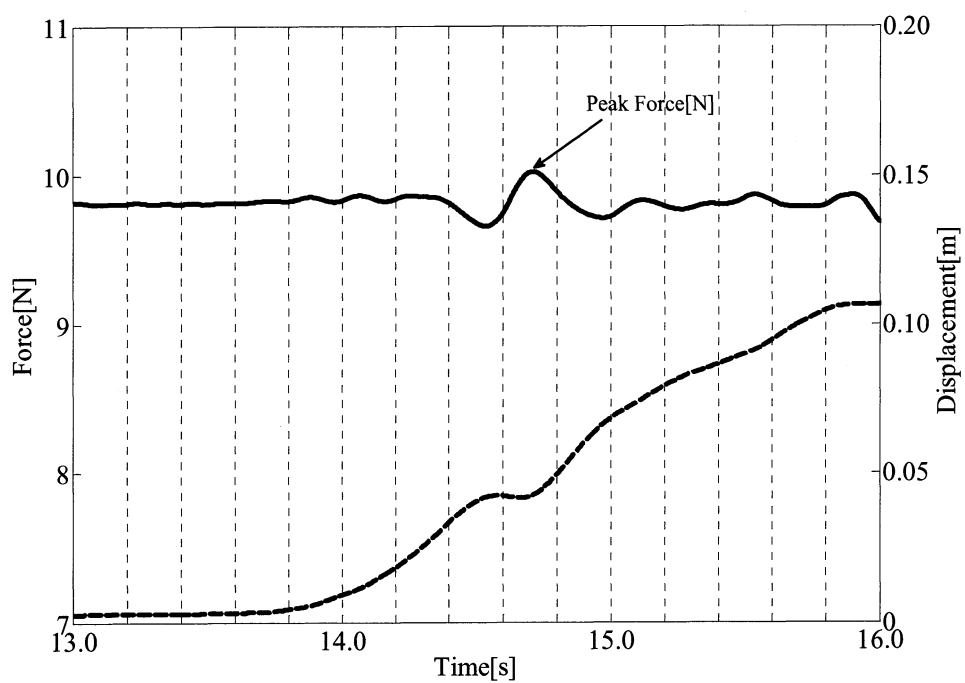
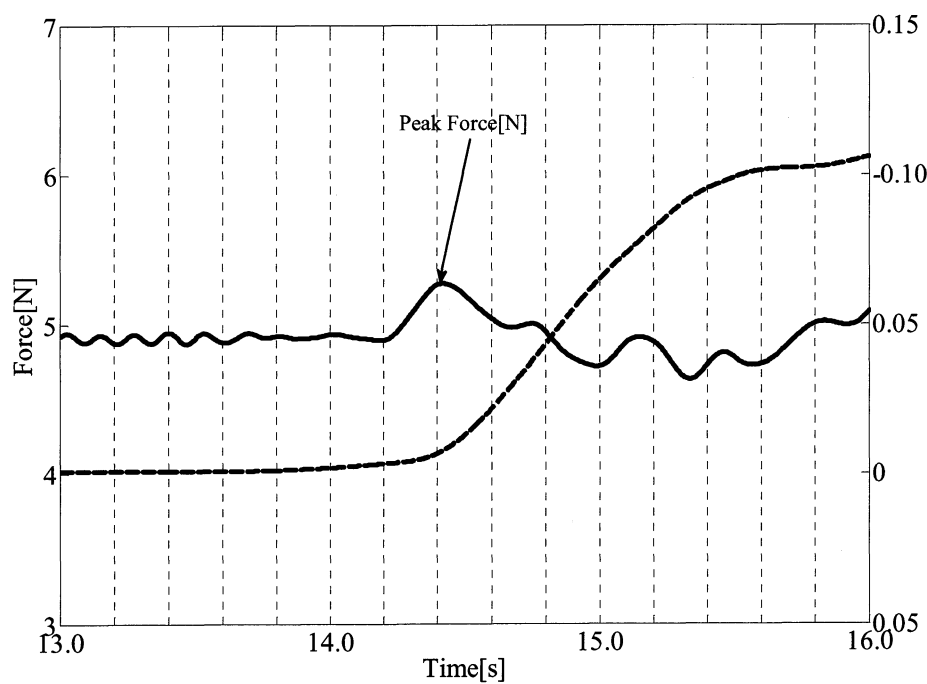
Fig. 4.4 Sample data (3) ( $m_1=0.5, m_2=1.0$ , Size M, Subject D)Fig. 4.5 Sample data (4) ( $m_1=2.0, m_2=0.5$ , Size L, Subject D)

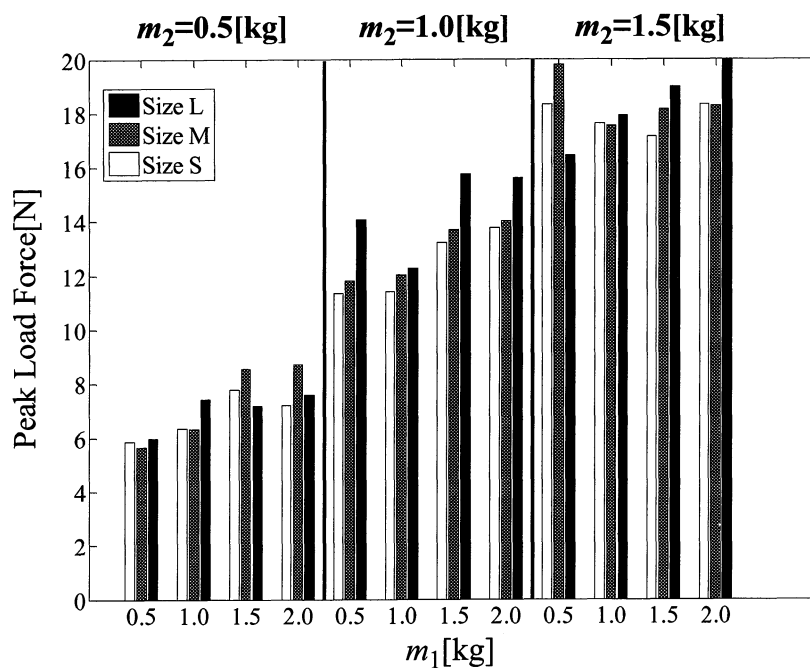
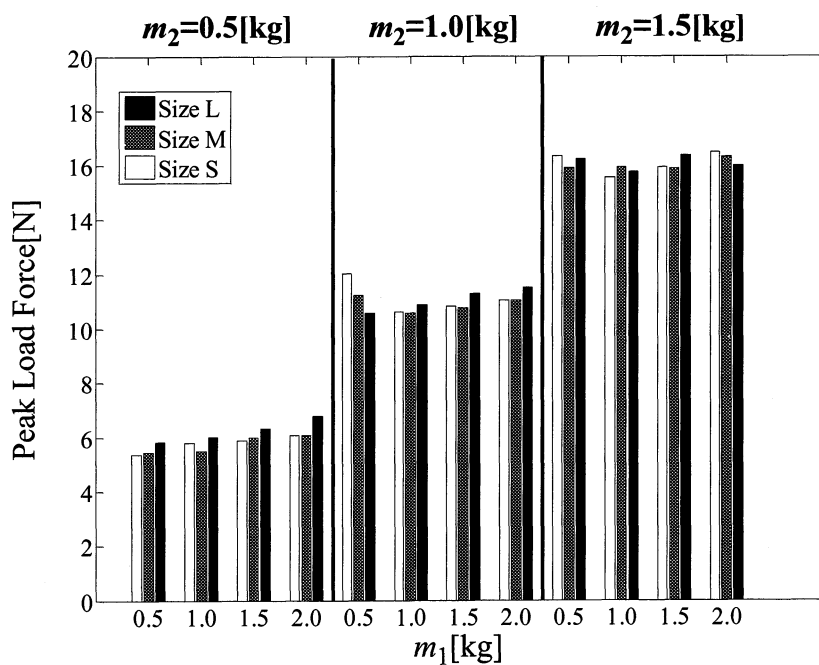
Fig. 4.2 は被験者 A がサイズ小の物体を用いて  $m_1=0.5$ ,  $m_2=0.5$  (両質量とも最小) と設定したときに得られたデータである。Fig. 4.2 の力と変位の曲線より、実験開始時間 (被験者が合図を受けて物体を持ち上げ始める時間) が 12.8-13.0[s] にあることがわかり、このとき物体に上向きの力がかかり、物体が真上方向に持ち上げられる。Fig. 4.2 の場合における実験条件では、重力項の質量  $m_2$  が 0.5kg となっているので、重力加速度を  $9.81[\text{m/s}^2]$  と仮定すると物体には約  $4.905[\text{N}]$  の力が垂直抗力としてはたらいてるとみなすことができる。ゆえに持ち上げる直前までは荷重変換機が  $4.905[\text{N}]$  前後の力を読み取っている。物体が持ち上げられるためには、その力を上回る鉛直方向の力を物体に与えなければならない。物体を持ち上げるために与える大きな力を本研究ではピーク力と呼び、被験者、サイズ、組み合わせごとにピーク力を測定する。Fig. 4.2 の場合、13.1[s] 前後で被験者が物体を持ち上げるために与えた力が最大となり、このときの力がピーク力を表している。また、変位に関しては 13.0-13.9[s] において 1 秒弱かけて変化しているのを読み取ることができ、タスク通り床から約 10cm (この場合厳密には 9.9cm) の高さまで持ち上げられているのがわかる。物体が目標位置に到達した後は、物体をその位置で保持するだけなので変位、力ともに定常に近い値を示す。以上のことをまとめると、被験者は合図を受けて物体を持ち上げるために上向きの力を与えて、物体が上方向に動けば力を微調整しながら目標位置まで運び、その後は保持するために仮想重力と等しい力を物体に与えようとするということである。これはアシストされていない実際の物体を持ち上げるときに人間が無意識に行っている一連の動作と近似しており、持ち上げ動作の基本である。

Fig. 4.3 は被験者 B がサイズ小の物体を用いて  $m_1=2.0$ ,  $m_2=1.5$  (両質量とも最大) と設定したときに得られたデータである。物体に与えられた力と物体の変位の挙動に関しては Fig. 4.2 と共通する部分が多いが、この場合は重力項の質量  $m_2$  が 1.5kg となっているので、持ち上げるためにはより大きな力—仮想重力  $14.715[\text{N}]$  に打ち勝つ上向きの力—をかける必要がある。Fig. 4.3 においては、12.5[s] でピーク力となることがわかるが、物体の変位が上昇している間、すなわち物体を持ち上げている間や、さらに物体を保持している間における力の挙動が不自然になっていることが読み取れる。ピーク力に達した後の力の振れ幅が大きくなっており、アシストされていない物体を持ち上

げるときのような自然な力のかけ方に近いとは言えない。Fig. 4.3 であらわされる挙動は、実験装置の特性、被験者の力のかけ方、設定したパラメータなど複数の要因があげられる。

Fig. 4.4 は被験者 D がサイズ中の物体を用いて  $m_1=0.5$ ,  $m_2=1.0$  と設定したときに得られたデータである。Fig. 4.2, Fig. 4.3 と比較して物体を持ち上げる過程でより多くの時間を要するために時間を表す横軸を 3 秒分とっている。物体を持ち上げる過程で時間を要するということは、微小な力で物体を持ち上げていることの裏返しであると言える。Fig. 4.2, Fig. 4.3 と比較して変位の挙動が不自然であるとともに、持ち上げ始めたときではなく 4cm ほど持ち上げたときにピーク力に達している。Fig. 4.5 も被験者 D による力と変位の挙動を表したデータであるが、Fig. 4.4 と同様に、物体を持ち上げる過程で要する時間が少しだけ長い。図中ではわかりにくいですが、時間 14.0-16.0[s]にかけて物体が緩やかに上に移動している。Fig. 4.2-Fig. 4.5 で示したサンプルデータは一部でありすべてを表示することはできないが、例えば被験者 D は長い時間をかけて物体を持ち上げる傾向がみられるなどというように、各被験者が各試行においてアシストされた物体をどのように持ち上げているかがある程度読み取ることができる。

先に述べたように、物体を持ち上げるために被験者が与える力のピーク値を本論文ではピーク力と呼ぶ。Fig. 4.2-Fig. 4.5 で "Peak Force" として示しているものである。次にこのピーク力に関して、被験者、 $m_1$ ,  $m_2$  の組み合わせ、サイズごとにピーク力を示し、 $m_1$ ,  $m_2$  の組み合わせ、サイズによってピーク力がどのように変化するかを調べる。実験はアシストされた物体を持ち上げて与えたピーク力とそのときの被験者が物体を持ち上げた瞬間に感じた重さについて調べるというものであるが、まず本節ではピーク力に関して結果をまとめる。各被験者が物体に与えたピーク力は以下に示す。

Fig. 4.6 Relationship between peak load force and  $m_1, m_2$  ( Subject A)Fig. 4.7 Relationship between peak load force and  $m_1, m_2$  ( Subject B)

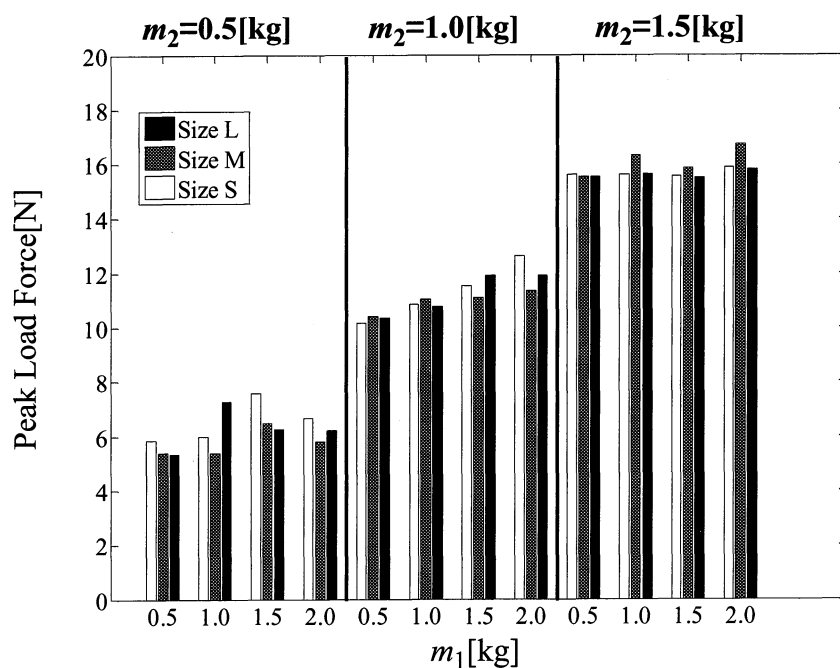
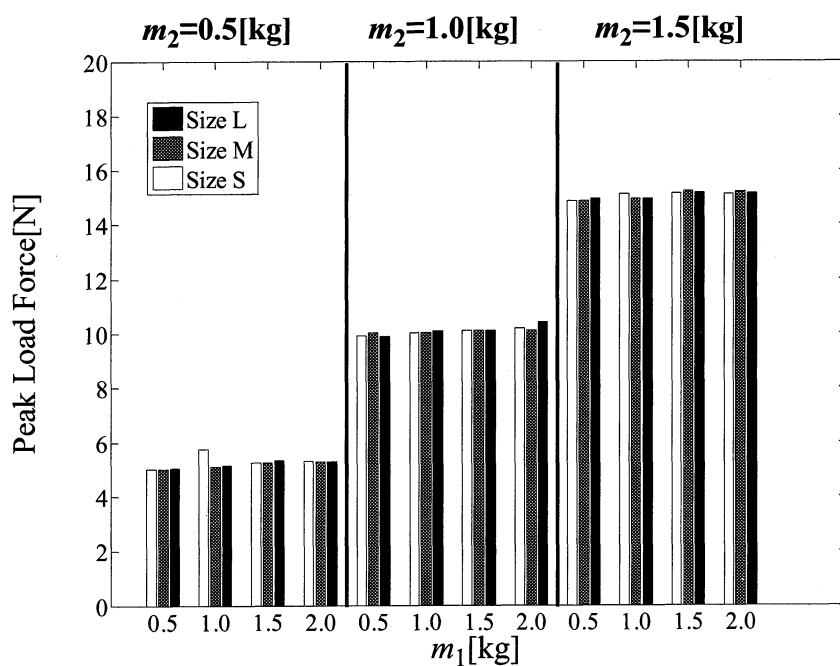
Fig. 4.8 Relationship between peak load force and  $m_1, m_2$  ( Subject C)Fig. 4.9 Relationship between peak load force and  $m_1, m_2$  ( Subject D)

Fig. 4.6-Fig. 4.9 は被験者ごとのピーク力を表しており、それぞれ Fig. 4.6 から順に被験者 A, B, C, D のものである。図の縦軸はピーク力であり、横軸は質量パラメータである。12 個の組み合わせは、 $m_2$  ごとに 3 個のグループに分割されている。それぞれ、左のグループは  $m_2=0.5[\text{kg}]$ 、中央のブロックは  $m_2=1.0[\text{kg}]$ 、右のブロックは  $m_2=1.5[\text{kg}]$  のときの各  $m_1$  ごとのピーク力を表しており、重力項の質量  $m_2$  が同一であっても慣性力項の質量  $m_1$  の違いによって結果がどのように出るかを判断することができるようになっている。また、各質量パラメータにおけるサイズ大、中、小の物体を持ち上げたときのピーク力をそれぞれ黒色、灰色、白色の棒グラフで表示する。

Fig. 4.6-Fig. 4.9 から読み取れる結果について記述する。まず、ピーク力そのものの数値を見てみると、“物体を 10cm の高さまで持ち上げる”というタスクの下、急な速度で持ち上げないように指示していることもあって、仮想重力（主に  $m_2$  に依存）にわずかの力を加えた程度のものになっている。数回の練習後に、微小な力で物体を持ち上げることが可能であるとわかれば、10cm の高さまで持ち上げるためにはそれほど大きな力を必要としないと考えると推定できる。当然、被験者ごとの癖が見られ、被験者 A は他の 3 人と比べて明らかに大きなピーク力で物体を持ち上げており、対照的に被験者 D は極めて微小な力で持ち上げている。ピーク力の数値だけで判断すると、物体を持ち上げるために与える力としては被験者  $A > B, C > D$  ということになる。余談ではあるが、被験者 A は大きな力を与えるためか滑らかな操作が困難となることが時々あり、変位の挙動を見ても自然に持ち上げられていないことがある。

質量パラメータごとのピーク力に関して、 $m_2$  ごとに分割したグループ別に見ると、 $m_2$  が大きいほどアシストされた物体の仮想重力が大きくなるため、それに打ち勝って持ち上げようと大きな力をかけるのでピーク力も大きくなる。この結果については容易に予想可能かもしれないが、慣性力項の質量  $m_1$  がピーク力に及ぼす影響について考えてみることにする。Fig. 4.6 より、被験者 A に関してはすべてのパラメータにおいては、全体的に  $m_1$  が増加するほど大きな力をかけていることがわかる。差が小さく識別困難であるが、Fig. 4.7, Fig. 4.9 より被験者 B, D に関しても全体的に  $m_1$  が増加するほど大きな力をかけている。ただいずれにしても、必ず  $m_1$  が増加すれば大きなピーク力をかけているとは断言できず、特に  $m_1=0.5[\text{kg}]$  の場合において最も  $m_1$  が小さ

いにもかかわらず力が大きくなっている。原因についてははっきりと断言できないが、 $m_1$  が小さいと式 (3.2)(3.3) より物体を操作する際に加速度・速度が大きくなり振動が起こりやすくなるので、振動に逆らおうと無意識に力をかけてしまう場合があるのではないかと推測する。

最後にサイズごとのピーク力についての結果をまとめる。2. 3 節で参考とした実験では、被験者が物体に与えた力とサイズには相関があるということが明らかになっている (6)(7)。今回の実験結果から見ると、与えた力が微小であることもあるかもしれないが、必ずしもサイズが大きいほどピーク力が大きいという結果にはなっていない。例えば Fig. 4.6 を見ると、被験者 A の場合は 12 個の組み合わせのうち 9 個でサイズ大のときにピーク力が最大、3 個でサイズ中のときに最大となっており、また 6 個でサイズ小のときにピーク力が最小となっている。Fig. 4.7 より被験者 B においても、12 個の組み合わせのうち 8 個でサイズ大のときにピーク力が最も大きくなり（他 1 個でサイズ中のときにピーク力最大、残り 3 個でサイズ小のときにピーク力最大）、見た目のサイズによる影響はあるのではないかと考えられるが、7 個でサイズ中のときにピーク力が最も小さくなるというようにサイズ中の物体ではサイズ小よりも小さな力で持ち上げることが多い。被験者 C に関しては Fig. 4.8 からピーク力はサイズに依存していないことが見て取れる。本実験における 4 人分のデータからは、サイズの違いによってピーク力がどのように異なるかをはっきりと述べるのは難しいといえる。

以上より、ピーク力は重力項の質量  $m_2$  に主に依存し、慣性力項の質量  $m_1$ 、サイズにも少なからず影響を受けることがわかる。アシストされた物体に関して、慣性力が大きくなると物体を動かし始めるために与える力が大きくなり、サイズが大きくなると無意識にかける力がより大きくなることが多いということである。ただし、これらの特性もすべての人間に確実に当てはまるというわけではない。

#### 4.2.2 被験者が知覚した重量

前項では、アシストされた物体を操作する被験者が物体に与える力について、その最大値を持ち上げるために必要なピーク力として結果を表示した。次に、持ち上げた瞬間に知覚する重量、すなわち感じる重さについて調査した。



Tab. 4.3 Perceptual weight for lifting object (subject A)

| $m_1$ [kg] | $m_2$ [kg] | Perceptual weight[kg] |                |                |
|------------|------------|-----------------------|----------------|----------------|
|            |            | Size L                | Size M         | Size S         |
| 0.5        | 0.5        | >0.2,>0.2,>0.2        | >0.2,>0.2,>0.2 | >0.2,>0.2,>0.2 |
| 1.0        |            | >0.2,>0.2,>0.2        | >0.2,>0.2,>0.2 | >0.2,>0.2,>0.2 |
| 1.5        |            | >0.2,>0.2,>0.2        | >0.2,>0.2,>0.2 | >0.2,>0.2,>0.2 |
| 2.0        |            | >0.2,>0.2,>0.2        | >0.2,>0.2,>0.2 | >0.2,>0.2,>0.2 |
| 0.5        | 1.0        | >0.4,>0.4,>0.4        | >0.4,>0.4,>0.4 | >0.4,>0.4,>0.4 |
| 1.0        |            | >0.4,>0.4,>0.4        | >0.4,>0.4,>0.4 | >0.4,>0.4,>0.4 |
| 1.5        |            | >0.4,>0.4,>0.4        | >0.4,>0.4,>0.4 | >0.4,>0.4,>0.4 |
| 2.0        |            | >0.4,>0.4,>0.4        | >0.4,>0.4,>0.4 | >0.4,>0.4,>0.4 |
| 0.5        | 1.5        | >0.6,>0.6,>0.6        | >0.6,>0.6,>0.6 | >0.6,>0.6,>0.6 |
| 1.0        |            | >0.6,>0.6,>0.6        | >0.6,>0.6,>0.6 | >0.6,>0.6,>0.6 |
| 1.5        |            | >0.6,>0.6,>0.6        | >0.6,>0.6,>0.6 | >0.6,>0.6,>0.6 |
| 2.0        |            | >0.6,>0.6,>0.6        | >0.6,>0.6,>0.6 | >0.6,>0.6,>0.6 |

Tab. 4.4 Perceptual weight for lifting object (subject B)

| $m_1$ [kg] | $m_2$ [kg] | Perceptual weight[kg] |                |                |
|------------|------------|-----------------------|----------------|----------------|
|            |            | Size L                | Size M         | Size S         |
| 0.5        | 0.5        | >0.2,>0.2,>0.2        | >0.2,>0.2,>0.2 | >0.2,>0.2,>0.2 |
| 1.0        |            | >0.2,>0.2,>0.2        | >0.2,>0.2,>0.2 | >0.2,>0.2,>0.2 |
| 1.5        |            | >0.2,>0.2,>0.2        | >0.2,>0.2,>0.2 | >0.2,>0.2,>0.2 |
| 2.0        |            | >0.2,>0.2,>0.2        | >0.2,>0.2,>0.2 | >0.2,>0.2,>0.2 |
| 0.5        | 1.0        | >0.4,>0.4,>0.4        | >0.3,>0.4,>0.4 | >0.4,>0.4,>0.4 |
| 1.0        |            | >0.4,>0.4,>0.4        | >0.4,>0.4,>0.4 | >0.4,>0.4,>0.4 |
| 1.5        |            | >0.4,>0.4,>0.4        | >0.4,>0.4,>0.4 | >0.4,>0.4,>0.4 |
| 2.0        |            | >0.4,>0.4,>0.4        | >0.4,>0.4,>0.4 | >0.4,>0.4,>0.4 |
| 0.5        | 1.5        | >0.6,>0.6,>0.6        | >0.5,>0.5,>0.6 | >0.6,>0.6,>0.6 |
| 1.0        |            | >0.6,>0.6,>0.6        | >0.6,>0.6,>0.6 | >0.6,>0.6,>0.6 |
| 1.5        |            | >0.6,>0.6,>0.6        | >0.6,>0.6,>0.6 | >0.6,>0.6,>0.6 |
| 2.0        |            | >0.6,>0.6,>0.6        | >0.6,>0.6,>0.6 | >0.6,>0.6,>0.6 |

Tab. 4.5 Perceptual weight for lifting object (subject C)

| $m_1$ [kg] | $m_2$ [kg] | Perceptual weight[kg] |        |        |
|------------|------------|-----------------------|--------|--------|
|            |            | Size L                | Size M | Size S |
| 0.5        | 0.5        | >0.2                  | >0.2   | >0.2   |
| 1.0        |            | >0.2                  | >0.2   | >0.1   |
| 1.5        |            | >0.2                  | >0.2   | >0.2   |
| 2.0        |            | >0.2                  | >0.2   | >0.2   |
| 0.5        | 1.0        | >0.4                  | >0.3   | >0.3   |
| 1.0        |            | >0.3                  | >0.3   | >0.3   |
| 1.5        |            | >0.3                  | >0.3   | >0.3   |
| 2.0        |            | >0.3                  | >0.3   | >0.3   |
| 0.5        | 1.5        | >0.5                  | >0.5   | >0.5   |
| 1.0        |            | >0.5                  | >0.5   | >0.5   |
| 1.5        |            | >0.5                  | >0.5   | >0.5   |
| 2.0        |            | >0.5                  | >0.5   | >0.5   |

Tab. 4.6 Perceptual weight for lifting object (subject D)

| $m_1$ [kg] | $m_2$ [kg] | Perceptual weight[kg] |        |        |
|------------|------------|-----------------------|--------|--------|
|            |            | Size L                | Size M | Size S |
| 0.5        | 0.5        | >0.2                  | >0.2   | >0.2   |
| 1.0        |            | >0.2                  | >0.2   | >0.2   |
| 1.5        |            | >0.2                  | >0.2   | >0.2   |
| 2.0        |            | >0.2                  | >0.2   | >0.2   |
| 0.5        | 1.0        | >0.4                  | >0.4   | >0.4   |
| 1.0        |            | >0.4                  | >0.3   | >0.3   |
| 1.5        |            | >0.4                  | >0.3   | >0.4   |
| 2.0        |            | >0.4                  | >0.3   | >0.4   |
| 0.5        | 1.5        | >0.6                  | >0.6   | >0.5   |
| 1.0        |            | >0.7                  | >0.6   | >0.5   |
| 1.5        |            | >0.6                  | >0.5   | >0.6   |
| 2.0        |            | >0.6                  | >0.5   | >0.5   |

Tab. 4.3-Tab. 4.6はアシストされた物体を持ち上げた瞬間に知覚した重量について、被験者ごとにまとめたものであり、それぞれ Tab. 4.3 から順に被験者 A, B, C, D のものである。先に述べたように、被験者 A, B については3サイズ×12個の組み合わせでそれぞれ3回ずつ、被験者 C, D についてはそれぞれ1回ずつ調べた。4. 1 で述べたように、知覚した重量を調べるためには Fig. 4.1 に示す内側におもりを取り付けたアシストなしの物体を使用して、重量を比較する。アシストなしの物体の外観は、パワーアシストに取り付けられた（アシストされた）物体のそれと同じであり、おもりを取り付けることによって外観を変えずに重量だけを変更することができる。おもりの重量、すなわちアシストなしの物体の重量は 0.1kg から 0.1kg 単位で増加する。

表の見方について記述する。アシストされた物体について被験者が知覚した重量は 0.1kg 単位で表されるわけであるが、表の数値はどの程度の重量より重く感じたかについての最大値を表示している。例えば、 $>0.2[\text{kg}]$  となっていれば、被験者は 0.2kg より重く感じた（0.3kg より重いとは感じなかった、また当然 0.1kg より重いと感じていた）ということになる。0.3kg, 0.4kg, 0.5kg, 0.6kg…というようにおもりの重量を変えていったときに、アシストされた物体を被験者が持ち上げた瞬間に知覚した重量が 0.5kgより重かったが0.6kgよりは軽かった、すなわち0.5kgと0.6kの間の範囲にあると判断した場合には、知覚した重量より小さいおもりの重量の中で最大であるのは0.5[kg]なので “ $>0.5[\text{kg}]$ ” と表す。サイズ、質量パラメータごとに被験者が知覚した重量がどの程度であるかについて、Tab. 4.3-Tab. 4.6 に記載する。これらはすべて、 $m_1$ ,  $m_2$  の12個の組み合わせを  $m_2$  ごとに分割してあり、上の4個が  $m_2=0.5[\text{kg}]$ 、中央の4個が  $m_2=1.0[\text{kg}]$ 、下の4個が  $m_2=1.5[\text{kg}]$  の場合に知覚した重量を表している。

Tab. 4.3-Tab. 4.6の結果から読み取れることとして、まず被験者が知覚した重量は、被験者ごとにわずかに異なる値となっはいるものの、主に  $m_2$  に依存していることがあげられる。反面  $m_1$  やサイズには依存していないともいえる。物体を持ち上げるために、重力項の質量  $m_2$  が大きくなればそれだけ大きな力を与えなければならないことは前項で述べたことであるが、たとえ  $m_1$  やサイズがピーク力に影響を与えることがあっても、結果を見る限りでは知覚した重量には影響がないと考えることもできる。ただし、0.1kg 刻みで比較を行うことで知覚した重量を調べるというもののなので、この刻み

範囲では差が明確に表れないと判断できるかもしれない。ただ、人間が精度良く知覚できる重量は 0.1kg 範囲が限界であることを考えると、より細かい範囲で知覚した重量を調べるという試みは意味を成さない。ふたつめに、被験者が知覚した重量は設定した重力項の質量  $m_2$  よりもかなり小さくなっていることがわかり、興味深い結果となった。Fig. 4.3 から、被験者 A に関しては全組み合わせ、全サイズにおいて設定した  $m_2$  の 40% 強程度の重量と感じていることがわかり、Fig. 4.4, Fig. 4.6 から被験者 B, D に関してもほぼ 30-40% 強程度の重量と感じていることが読み取れる。さらに Fig. 4.5 から、被験者 C は他の 3 人と比べて  $m_2=1.0[\text{kg}]$ ,  $m_2=1.5[\text{kg}]$  でより知覚した重量が小さくなるという結果となっている。知覚した重量は  $m_2$  に依存していて、ほぼ比例関係となっていることは明らかであるが、アシストされた物体を持ち上げたときの重量を  $m_2$  そのものの値よりはかなり軽く感じているということである。

### 4.2.3 考察

以上が第 3 章、第 4 章で記述した実験に関して得られた結果である。以上の結果より、パワーアシストに取り付けられた物体を持ち上げるという動作に被験者ごとに少しずつではあるが独特の癖があること、持ち上げるために物体に与える力は各質量パラメータに依存していること、アシストされた物体を持ち上げたときに設定した重力項の質量  $m_2$  に比例しながらもその値よりかなり軽い重量で知覚していることなどがわかる。

ここで、被験者が知覚した重量とピーク力に関連があるかについて考える。要はピーク力が大きいということは物体を大きな力で持ち上げているということであり、大きな力を要するということはそれだけ物体を重く感じていると考えられるのではないかということである。まず重力項の質量  $m_2$  と照らし合わせてみると、被験者が知覚した重量とピーク力はともに  $m_2$  に依存しているので、全被験者に関して知覚した重量はピーク力と関連があると言える。ところが、被験者 A, B に関しては慣性力項の質量  $m_1$  が大きくなると若干ピーク力が大きくなったにもかかわらず (Fig. 4.6, Fig. 4.7 参照), 知覚した重量の結果 (Tab. 4.3, Tab. 4.4) を見ると、ほとんど  $m_1$  に依存していない。被験者 C, D においても、まず知覚した重さ自体が  $m_1$  に依存していないので、ピー

ク力と知覚した重量の関係を読み取るのは難しい。結果のみを見れば、”慣性力項の質量  $m_1$  はピーク力には多少の影響を与えるものの、人間が知覚する重量には関連がない”と判断することもできなくはないが、知覚した重量に関しては人間の主観によるところが大きく厳密で正確な判定は難しいということもあって、この実験結果から判断を下すことは困難である。

それでは、なぜパワーアシスト装置を用いて物体を持ち上げたときに設定した重力項の質量  $m_2$  よりかなり軽い重量で知覚するのかに関して考察を加えることとする。これは全被験者に共通してみられる傾向であり、全体的に設定した  $m_2$  の 30-40% 強の重量しか知覚できていないということになる。アシストされた物体には  $m_2$  に応じて仮想の重力がはたらいていて、被験者は物体を持ち上げるために仮想重力を上回る力を物体に与えなければならないことは何度も述べてきた。ところが、Fig. 4.2-Fig. 4.5 をはじめとした力の挙動のデータ、または Fig. 4.6-Fig. 4.9 で表されるピーク力の数値を見れば、 $m_2$  がおよぼす仮想重力以上の力を物体に与えているのは明らかであるにもかかわらず、アシストされた物体を持ち上げた被験者は、設定した  $m_2$  より軽い重量で知覚しているということである。例えば、 $m_2=0.5[\text{kg}]$  とした場合には、最低でも仮想重力である 0.5kgf 以上の力で物体を持ち上げているにもかかわらず、知覚した重量としては 0.2kg 程度である。これは 0.5kgf の力を物体に与えながらも、0.2kg 程度の重量しか知覚できていないという点で非常に不可解な現象である。別の見方をすれば、この場合に実際に 0.2kgf の上向きの力を物体に与えていたのでは物体は下方向へ動いて持ち上げることは不可能であるが、このような現象が起こらないことを考えると、知覚した重量と物体に与える力では感じ方が違うのではないかとみることでもある。

アシストされた物体を持ち上げるときに設定した重力項の質量より軽く感じる原因に関しては、本研究で用いるパワーアシスト装置そのものの特性によるものなのか、または人間の脳が起こす重量の知覚の錯覚によるものなのかは不明ではあるが、本論文ではアシストされた物体のみではなく、重量を比較するために用意したアシストなしの物体でも力と変位の挙動を確かめることにした。人間が物体の重量を知覚する要因のひとつが、物体に対する力の与え方と持ち上げ方にあるのではないかと推測したためである。

### 4.3 追加実験

本研究で実験のために用いたパワーアシスト装置について、被験者が知覚した重量が設定した質量パラメータと比べてかなり小さくなった原因を調べるために、アシストされていない物体を持ち上げた場合の力と変位の挙動を調べてアシストされた物体のそれと比べるという実験を行った。人間が日常生活において物体を持ち上げる場面を想定し、アシストなしの物体を持ち上げたときに物体に与えられた力と物体の実際の変位を見てアシストされた物体を持ち上げたときの挙動と比べることによって、人間の重量知覚が物体の操作方法に依存しているか否かを調査できるのではないかと推測したためである。

物体 B（以下、第3章同様にアシストされた物体を物体 A、アシストなしの物体を物体 B と呼ぶ）に与えられた力と物体の変位を調べるために、物体 B の内側に、パワーアシスト装置を操作するときの実験にも使用した荷重変換器をおもりとともに取り付けて力を計測する。使用する荷重変換器は Fig. 3.1 と同じものである。変位について、レーザーセンサという装置を用いて計測することとした。レーザーセンサによって放出されるレーザー光が物体の変位を計測し、持ち上げられる物体 B の位置がどのように変化するかを見ることができる。Fig. 4.10 は実験に用いる物体 B とレーザーセンサのセンサヘッド部を示している。レーザーセンサは株式会社キーエンスが製造した超ロングレンジタイプのものであり、型式はセンサヘッド部が LD-300、アンプユニット部が LD-1200、光源は赤外半導体レーザ、基準距離は300mm、測定範囲は200mm(±100mm)となっている。パワーアシスト装置を用いた実験において物体 A を持ち上げる高さはおよそ 10cm となっているので、物体 B を同じように持ち上げる場合の変位は計測可能範囲内にある。荷重変換器とレーザーセンサを用いることによって、物体 B に与えられた力と変位の双方を同時に計測することが可能となる。なお、物体 B の裏側に取り付けられた荷重変換器とおもりは Fig. 4.11 のようになっており、初期状態で荷重変換機には力がはたらいておらず、人間が与えた力を直接測定できるようになっている。

4.1 節の方法によって得られた実験結果においては、設定した重力項の質量パラメータ  $m_2$  と比べて被験者の知覚した重量がかなり小さかった。例えば、 $m_2=0.5[\text{kg}]$  において物体 A を持ち上げたときに被験者が知覚した重量は、Tab. 4.3-Tab. 4.6 より被験者 C

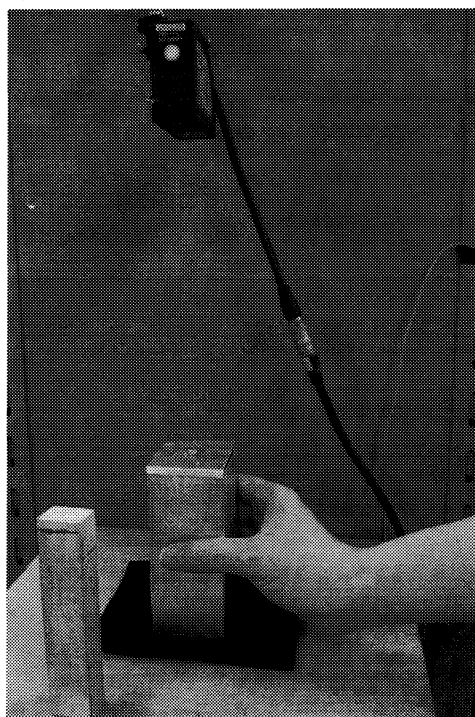


Fig. 4.10 Actual object and laser sensor head

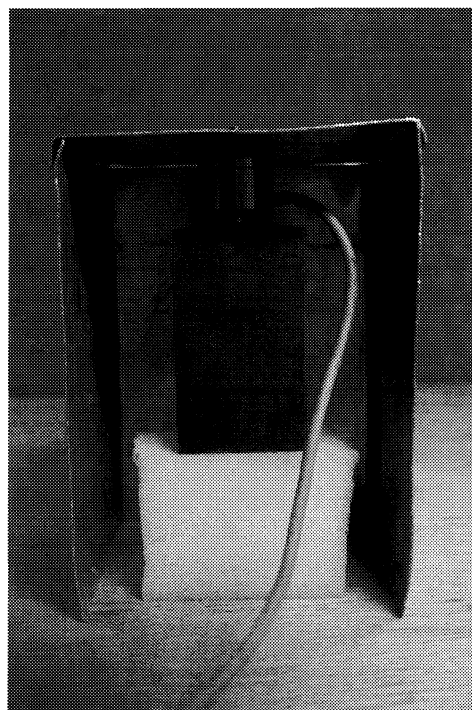


Fig. 4.11 Inside of actual object with loadcell and weight

の一部を除いて  $>0.2\text{kg}$  となっている。  $0.5\text{kg}$  という質量パラメータを与えて、これによって生じる仮想重力  $0.5\text{kgf}$  を上回る力で持ち上げているにもかかわらず、  $0.2\text{kg}$  という知覚となっていることから、物体 B に  $0.5\text{kg}$  と  $0.2\text{kg}$  の重量のおもりを取り付けて力と位置の波形を見る。

以上の話をふまえた上で実験方法を述べる。実験方法としては、荷重変換器とおもりを取り付けた物体Bを台から約10cmの高さまで持ち上げるという簡素なものである。被験者が物体Aと同じように持ち上げようとするときにどのように物体を移動させるかが、得られた力と位置の波形からわかる。  $m_2=0.5[\text{kg}]$  で被験者は  $0.2\text{kg}$  とほぼ同等か少し重く感じたということなので、  $m_2=0.5[\text{kg}]$  に設定したときの実験で得られた波形とこの追加実験で  $0.5\text{kg}$ ,  $0.2[\text{kg}]$  のおもりを取り付けて持ち上げたときにそれぞれ得られた波形を見比べる。実験は  $0.5\text{kg}$ ,  $0.2[\text{kg}]$  のおもりで3回ずつ持ち上げて、これを Fig. 4.1 で示される物体 A を持ち上げたときと同様の3種類のサイズで持ち上げるので、1名につき物体 B を18回持ち上げる。この実験は被験者 A, B の2名で行った。このときに得られた波形の一部を以下に示す。

Fig. 4.12, Fig. 4.13 はそれぞれ  $0.5\text{kg}$ ,  $0.2[\text{kg}]$  のおもりを取り付けた物体 B に被験者 A が与えた力とその物体の変位である。 Fig. 4.2-Fig. 4.5 と同様、横軸に時間  $[\text{s}]$ , 左縦軸に人間が与えた力  $[\text{N}]$ , 右横軸に物体の変位  $[\text{m}]$  をとっており、図中の実線が力、破線が変位を表している。 Fig. 4.12, Fig. 4.13 は得られたデータのひとつであるサンプルとしてあげているだけであるが、物体 A (パワーアシストされた物体) で被験者 A がサイズ小の物体を用いて  $m_1=0.5$ ,  $m_2=0.5$  と設定したときに得られたデータのひとつである Fig. 4.2 と見比べてみることにする。注意すべき点としては、物体 A が物体に与えられた力として、始めは台からの反力と人間が与えた力の合力であり、被験者が持ち上げようとして物体 A が台から離れた瞬間に人間の与えた力のみを荷重変換器が感知するということである。ゆえに本論文で示した実験装置においては物体 A の場合は台から離れるまでは人間の与えた力のみを計測することができていない。このことから考えると、単純に物体に与えられた力 (例えばここでは Fig. 4.2, Fig. 4.12, Fig. 4.13 の実線部) で重量を知覚する要因を決定するのは現実的ではない。さらに、Fig. 4.12, Fig. 4.13 からわかるように、変位を測るレーザーセンサの時間遅れが大きいという問題もある。



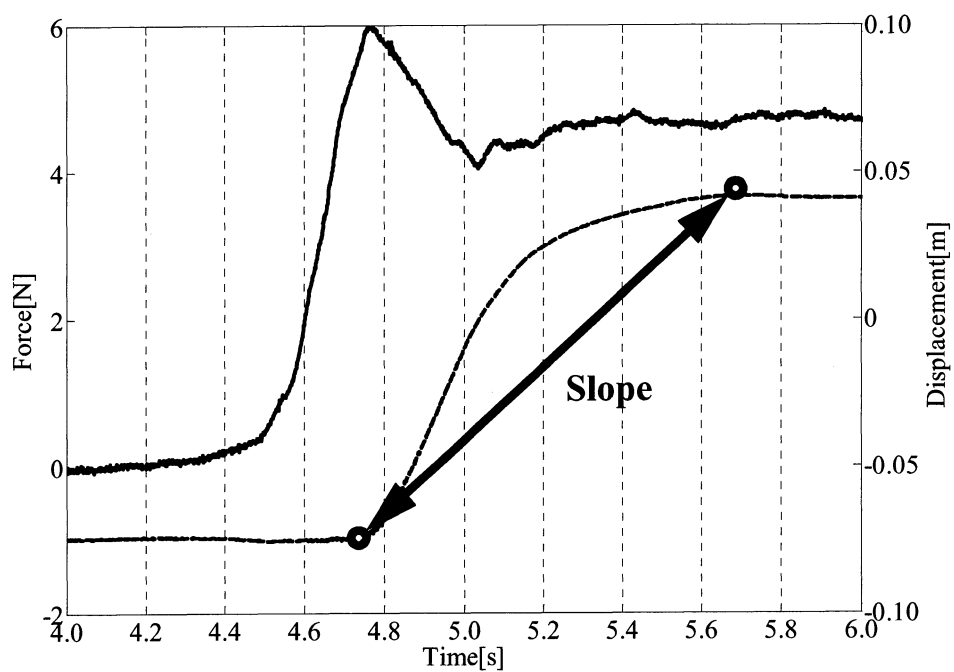


Fig. 4.12 Sample data by using laser sensor (0.5kg,Size S,Subject A)

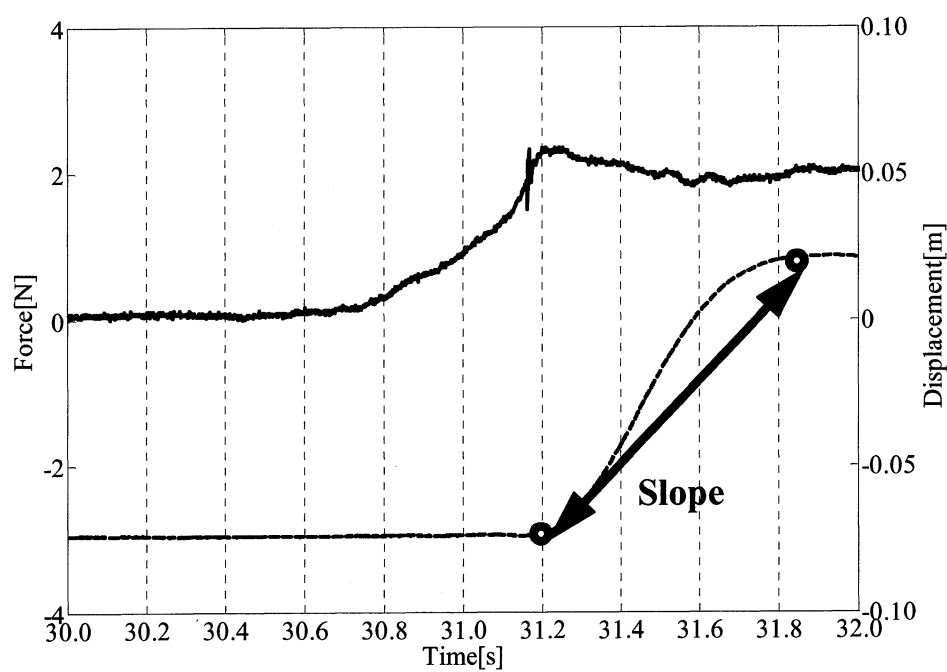


Fig. 4.13 Sample data by using laser sensor (0.2kg,Size S,Subject A)

物体 B を持ち上げた場合に被験者が与える力の最大値をピーク力として、物体 A と同じように求める。心理学実験では知覚した重量はピーク力によって決定されるということであるが、本実験ではどのように結果が出るかを確かめてみる (6)。

Fig. 4.14, Fig. 4.15 は 0.5kg, 0.2kg の物体 B を持ち上げたときのピーク力をサイズ別に表したものである。三個のグループに分割してあるうちの、左のグループが物体 A の  $m_1=0.5[\text{kg}]$ ,  $m_2=0.5[\text{kg}]$  のときのピーク力を表しており、Fig. 4.6, Fig. 4.7 のデータの一部でもある。中央と右のグループはそれぞれ 0.5kg, 0.2[kg] の物体 B を持ち上げたときのピーク力である。Fig. 4.14, Fig. 4.15 において左と中央のグループを比較すると、ピーク力そのものの値はパワーアシストされた物体 A よりもアシストなしの物体 B の方が若干大きいことがわかる。確かに心理学実験ではピーク力が高いと知覚する重量は大きくなるという結果が出ていたが、Fig. 4.14, Fig. 4.15 を見るとアシストされた物体を持ち上げる際に知覚する重量がかなり小さくなるという 4. 2 節の結果が明確に見えるほどにピーク力による影響が出ていたとは言えないであろう。現に、Fig. 4.14, Fig. 4.15 中の右、0.2kg の物体 B を持ち上げたときのピーク力よりもかなり大きいピーク力でパワーアシストされた物体を持ち上げているのだが、知覚する重量は 0.2[kg] 程度という理解しがたい現象が図からも読み取れる。付け加えておくと、アシストなしでもやはり被験者 A の与える力が被験者 B と比べて全体的に大きい。

次に、変位による影響を考えてみる。サンプルデータ Fig. 4.2, Fig. 4.12, Fig. 4.13 のみを見てみると、アシストされた物体を約 10cm 持ち上げるために要する時間は約 1 秒であるが、アシストなしの 0.5kg の物体の場合は約 0.9 秒、0.2kg の物体の場合は約 0.6 秒とおおよその見当をつかることができる。ここでは、時間当たりの変位の変化率というかたちで、実験開始時から被験者が目標とする位置まで物体を持ち上げた時間で変位がどのくらい変化したかを傾きとして求めることを考える。Fig. 4.14, Fig. 4.15 中で太い矢印で "Slope" と書かれているものがそれに相当する。アシスト有無の物体について両方でこの傾きなるものを求めることによって、ある程度は物体をどの程度の緩急で持ち上げたかの目安となるはずである。

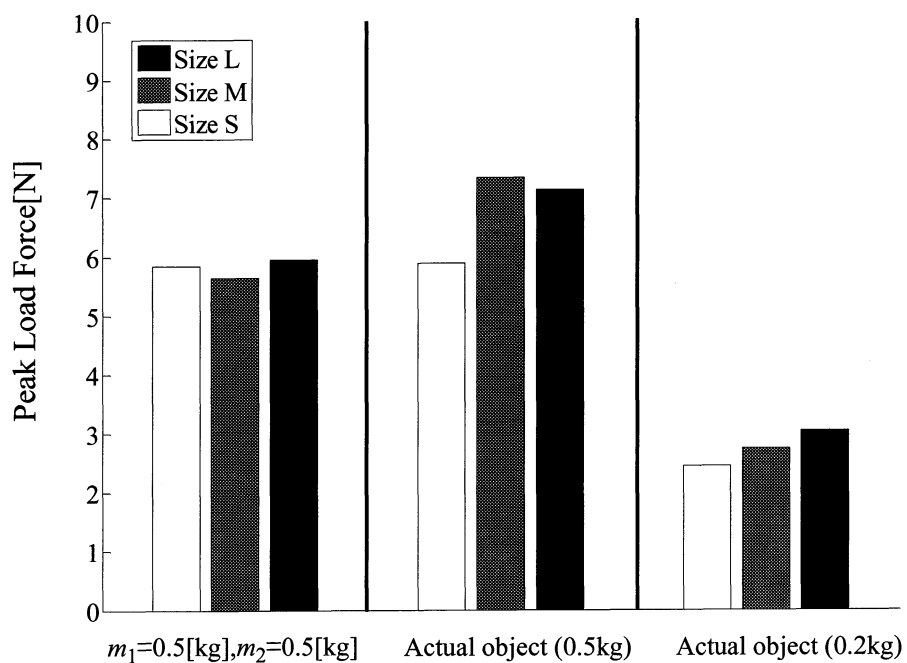


Fig. 4.14 Peak load force for actual object (subject A)

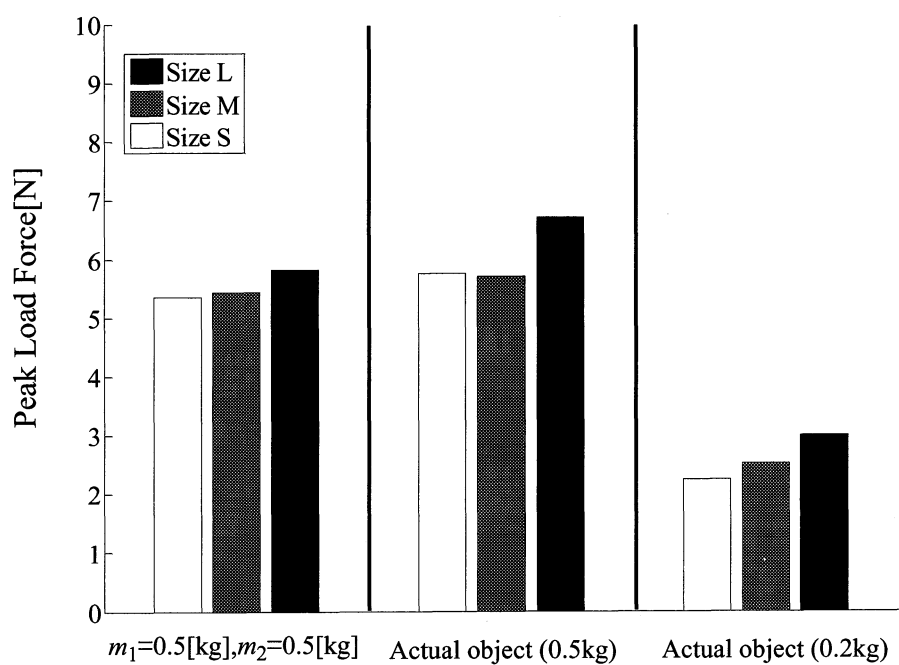


Fig. 4.15 Peak load force for actual object (subject B)

Fig. 4.16, Fig. 4.17 は 0.5kg, 0.2kg の物体 B を持ち上げた瞬間から目標位置まで持ち上げたときの時間に関する変位の傾きをサイズ別に表したものである。物体の変位を物体を持ち上げた瞬間から目標位置まで持ち上げたときの時間で除したものをここでは傾きと呼ぶこととする。三個のグループに分割してあるうちの、左のグループが物体 A の  $m_1=0.5[\text{kg}]$ ,  $m_2=0.5[\text{kg}]$  のときの傾きを表しており、中央と右のグループはそれぞれ 0.5kg, 0.2kg の物体 B を持ち上げたときの傾きである。Fig. 4.16, Fig. 4.17 より、傾きは被験者 B のサイズ L を除いて傾きはアシストされた物体の方が小さくなっている。特に被験者 A の場合はその傾向が顕著に現れており、アシストなしの物体と比較してアシストされた物体を緩やかに持ち上げていることが読み取れる。緩やかに持ち上げることによって物体の重量が小さく知覚されるのではないかというひとつの推測が立つ。しかし、アシストされた物体を持ち上げるときの変位の傾きは、0.2kg のアシストなしの物体と比較すると小さくなっておりアシストされた物体の重量を 0.2kgf と知覚する最大の要因とはなっていないことにも注意する必要がある。

以上より、アシストされた物体については変位の傾きが緩やかであることから、ゆっくり持ち上げることによる人間の手の感覚が重量知覚に影響を及ぼす原因のひとつとなっていることが考えられる。アシストされた物体に取り付けられた荷重変換器では人間の力のみを計測することが不可能であることから、人間が与えた力による重量知覚について直接調べるのは難しいが、アシストされた物体を持ち上げるまでの人間が与えた力の挙動を調べることによって人間が軽く重量知覚する原因を探ることが本研究の今後の展望である。

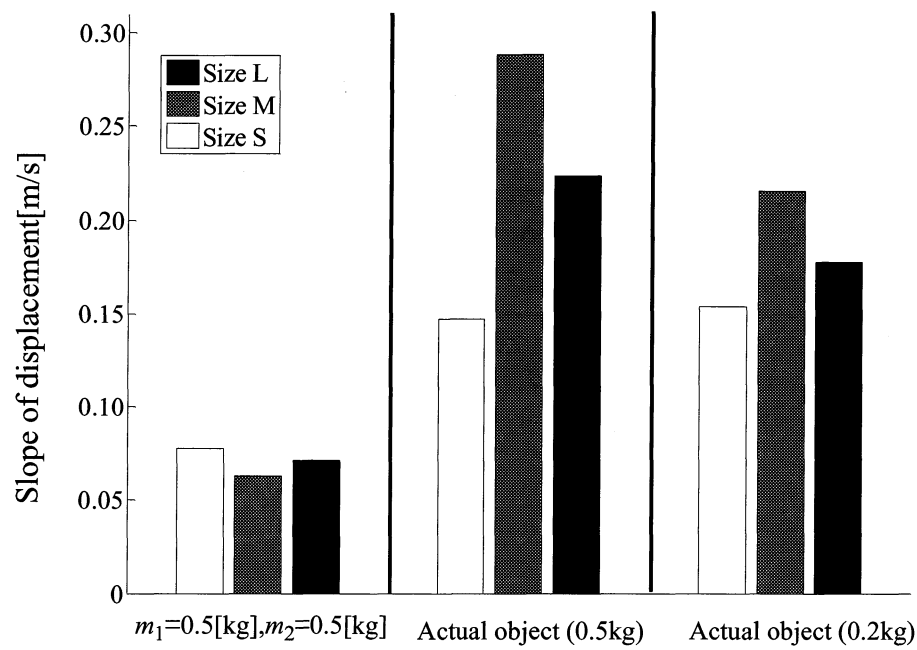


Fig. 4.16 Slope of displacement for actual object (subject A)

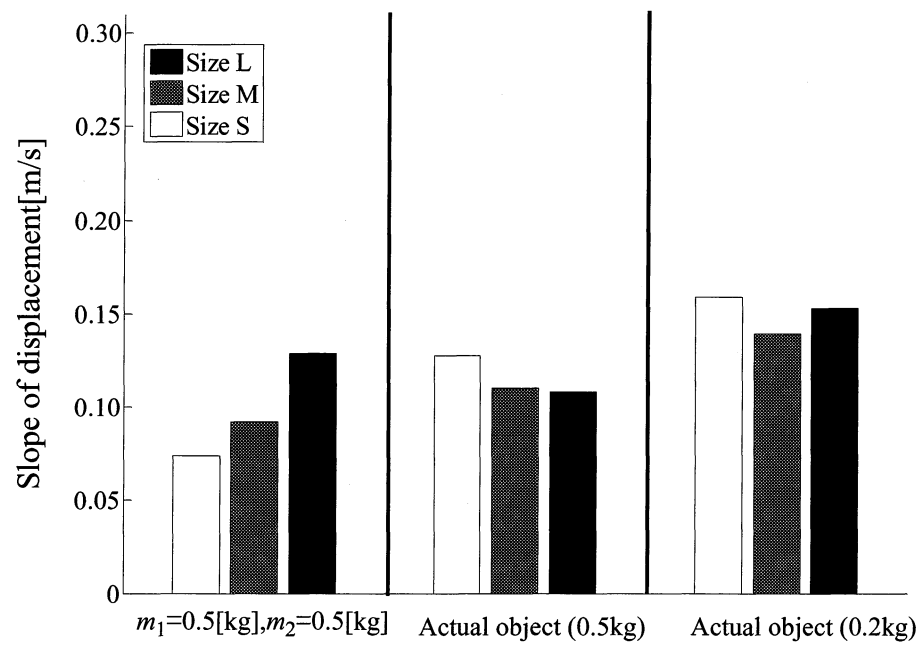


Fig. 4.17 Slope of displacement for actual object (subject B)

# 第5章

## 結言

本研究では、本格的な多自由度の重量物パワーアシスト装置を扱う前の段階として、1次元上下方向のパワーアシスト装置を用いて、各条件で操作する人間の特性の調査を試みた。

二種類の質量パラメータ、三種類のサイズによる影響について、被験者ごとに違いはあるものの、全体的に質量パラメータのひとつを構成する慣性力が大きくなるほど、またはサイズが大きくなるほどピーク力が大きくなるという傾向がある。しかしこれは全被験者に明確に現れる現象ではなく、特にサイズに関してはまったく影響を受けない被験者がいた。重力のみならず、慣性力がわずかながら人間が物体に与える力に依存していることは少し興味深い。ただ人間の特性をより正確に調査するためには、より多くの被験者でより多くの回数、より多くの実験条件で実験を行う必要があり、本研究で行った実験結果から理想とする制御手法を考案するのは現実的ではないかもしれない。

被験者ごとに共通する特性、異なる特性について考えてみる。アシストされた物体を持ち上げるときの力と変位の挙動、さらに知覚した重量が設定した重力項の質量の4割前後であるという点は共通していると言える。反面、力の挙動は共通する傾向が見られても、力そのものの値は被験者ごとに異なっており、それぞれの癖が現れている。特に被験者Aはピーク力が明らかに大きくなっており、他と比べて持ち上げるために必要とする力を多く見積もっている可能性もある。対照的に、かなり小さい力で低速で物体を持ち上げる被験者もいて、アシストなしの物体の運搬との性質の違いに戸惑っている様子も見られた。また特定の質量パラメータにおいて操作が極めて困難な被験者がいたり、その質量パラメータでも問題なく操作できていた被験者もいるという違いが現れた。具体的には、例えば慣性力項を小さく設定すると（本研究では

$m_1=0.5[\text{kg}]$  物体とボールねじとの間で振動が起こりやすくなり、より慎重な操作が求められ、思うような操作が困難だということがある。

これらの結果から、すべての人間の特性に当てはまるパワーアシスト装置の開発は容易とはいえないが、少なくとも、大まかな傾向からできるだけ多くの人間が安全に扱えるような装置の設計を行うことが重要である。本研究で用いたパラメータも含め、装置を扱いやすいものにするための最適パラメータ設定も制御の一環として考えることと、さらに装置の制御手法が人間の重量知覚特性にどのように影響を与えているかをより深く考えた上での設計がなされることによって人間が扱いやすいパワーアシスト装置が開発されることが理想である。

本研究の将来の展望としては、被験者の人数、実験回数を増やして人間が物体を運搬するときの特性を様々な角度から検証した上で、多自由度の重量物運搬型パワーアシスト装置の制御に応用すること、加えて人間の出した力のみを計測することによって人間の重量知覚特性を明らかにすることがあげられる。

## 参考文献

- (1) 山田陽滋, 鴻巣仁司, 森園哲也, 梅谷陽二: ”自動車組立工程における搭載作業のためのスキルアシストの提案”, 日本機械学会論文集 C 編 68(666), pp509-516 (2002)
- (2) 加藤寛之, 池浦良淳, 中村久, 水谷一樹: ”パワーアシスト装置のインピーダンス制御とパラメータ推定”, 日本機械学会東海支部三重地区講演会講演論文集, pp156-157 (2003)
- (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)”, 日本機械学会論文集 C 編 65(629), pp198-205 (1999)
- (4) 原正之, 樋口貴広, 黄健, 藪田哲郎: ”視覚的奥行き情報が大きさ重さ錯覚に及ぼす影響”, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集, 2P1-A16(1) (2006)
- (5) 関弘和, 堀洋一: ”位置と力に基づくパワーアシストロボットの制御とその被験者評価による解析”, 平成 15 年電気学会全国大会, Vol3, pp132-133 (2003)
- (6) A.M.Gordon, H.Forssberg, R.S.Johansson, G.Westling: ”Visual size cues in the programming of manipulative forces during precision grip”, *Exp Brain Res*, pp477-482 (1991)
- (7) 井頭均: ”重さの知覚 (その 4): シャルパンティエ効果”, 日本保育学会大会研究論文集 (39), pp74-75 (1986)
- (8) 小池康晴: ”生体の力学的信号に基づくコミュニケーション”, 研究報告会講演要旨集, pp56-67 (2003)
- (9) H.Kazerooni: ”Extender: a case study for human-robot interaction via transfer of power and information signals”, *IEEE International Workshop on Robot and Human Communication*, pp10-20 (1993)
- (10) S.M.Mizanoor Rahman, Ryojun Ikeura, Masaya Nobe, Soichiro Hayakawa, Hideki Sawai: ”Weight-Perception-Based Model of Power Assist System for Lifting Objects”, *International Journal of Automation Technology Vol.3 No.6*, pp681-691 (2009)



---

## 謝辞

---

本研究を行うにあたり、適切かつ親切にご指導して頂きました指導教官の池浦良淳教授に深く感謝いたします。

実験装置の作成、調整はもちろん、実験に対する助言を数多く賜りました澤井秀樹技官に深く感謝いたします。

本研究を行うにあたって数多くの助言や指導をして下さいました早川聡一郎准教授に深く感謝いたします。

さらに、本研究を進めるにあたり、未熟な自分に対し、親切かつ丁寧にご指導頂きました共同研究者の Mizanoor Rahman 先輩に深く感謝するとともに、今後の発展を願っております。

最後に、大学生活を楽しいものにしていただいたシステム設計研究室の皆様に深く感謝の意を表し、本論文の結びとします。