

平成 24 年度 修士論文

パワーアシスト装置を用いた
物体持ち上げ動作における重量知覚特性解析

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

411M105 石橋 伸祐

三重大学大学院 工学研究科

目次

第1章 緒言	
1.1 研究背景	1
1.2 本研究室での先行研究	5
1.3 研究目的	6
1.4 本論文の構成	6
第2章 実験装置と制御アルゴリズム	
2.1 一自由度パワーアシスト装置	7
2.2 実験装置の制御アルゴリズム	13
第3章 物体持ち上げ動作実験	
3.1 実験方法	16
3.2 実験結果及び考察	18
第4章 重量知覚の差異検証シミュレーション	
4.1 実験システムの時間遅れ検証	35
4.2 シミュレーション方法と結果	39
4.2.1 シミュレーション方法	39
4.2.2 シミュレーション結果と考察	40
第5章 結言	
5.1 まとめ	48
5.2 今後の課題	49

参考文献	50
謝辞	52

第1章

緒言

1.1 研究背景

現在、国内では急速な少子高齢化が進んでおり、それに伴って労働者の高齢化や減少が問題になっている。Table1.1, Table1.2 は日本の1965年度と1998年度と2030年度の労働力人口、労働力率を示しており、労働力人口が最大であるといわれている1998年度より労働力人口が減少していくということと、逆に高齢者の労働力人口は増加していること、女性の労働力率の増加ということが分かる^[1]。この影響によって、工場のような生産現場においても加齢した労働者が増加し女性も進出してきている。高齢の労働者は体力や筋力等は若年者に比べ衰えは存在するが、技術や経験、作業に対する意識は高いということが挙げられ、女性の労働者に関しては男性に比べ体力や筋力という点で基本的には劣ってしまうということが特徴として挙げられる。また、消費者の多様な要求に応えるための多品種少量生産や生産効率の向上のためのセル生産方式の採用が増加している。このような工場では複雑な作業が必要なため、労働者が直接作業を行うことが必須である。労働者にとって、重量物の運搬といった肉体労働は大きな肉体的負担となり、労働効率を下げる要因にもなりうる。ここで上記の問題を解決し負担を低減させるための方法の一つとしてパワーアシスト装置がある。パワーアシスト装置とは、モータなどの動力（アクチュエータ）を利用する一種のロボットであり、人が加えた力を増幅し、重量物を小さい力で運搬することを可能にし、作業者の肉体的負担の低減、作業時間の短縮を目的としている。パワーアシスト装置の研究は数多く行われており^{[2][3][4]}、遡ると

1960年代に開発された Hardiman や Kazerooni らが提案した Extender^[5]をはじめとして、使用者の体に直接装着して動作の補助を行う外骨格型のパワーアシストシステム等が開発されている^{[6][7][8]}。他にも Fig.1.1 の池浦らの産業用パワーアシスト装置や Fig.1.2 の三好らの天井クレーンにおけるパワーアシストシステムのような生産ライン等、生産現場に用いられるパワーアシスト装置の開発が行われており^{[9][10][11]}、Fig.1.3 の村山らの自動車組立ラインのウィンドウ搭載支援ロボットや Fig.1.4 の山田らの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ような実用化されたものもある^{[12][13]}。パワーアシスト装置は人と装置が接触している状態で作業を行うので、自らの意図した動きをする等の違和感の与えないような人と協調して安全に快適に作業を行えることが必要になってくる^[14]。こうした人間とロボットの協調作業における制御システムに関する研究も行われている^{[15][16][17]}。このように各種研究が行われているが、パワーアシスト装置を用いた物体運搬時には操作者に恐怖を与えないような安全性・操作性が重要項目であり、実現のために物体に対する力の加え方や重量の感じ方といった人間の特性に合うパワーアシスト装置の最適な制御手法を考案する必要がある。パワーアシスト装置のパワー支援により人間は本来加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見て力を加える場合に、パワーアシストされていない物体を運搬するときと同じような力を加えてしまうという問題がある。これは、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無しの物体を持つ場合に感じる重さを区別できないことが関係している。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ち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。このことによって、パワーアシスト装置を用いた物体運搬でパワーアシストされていない物体を運搬するときと同じような力を加えてしまうと、人間の視覚によって推定した重量と実際に運搬した際に感覚的に認識した重量との差が大きすぎると正常な運搬ができない恐れがある。パワーアシスト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^[18]。しかし、パワーアシスト装置に関して、物体を持ち上げる過程での重量の知覚についての考察はなされていなかった。

また、パワーアシスト装置を用いた物体持ち上げ時の重量知覚は人間の視覚によって推定した重量に近づける必要があるが、まったく同じにすると通常の運搬と同じになってしまう。よって、人間の視覚によって推定した重量と実際に運搬した際に感覚的に認識した重量の知覚は同じで、実際の重量より軽く感じるような制御を目指すためにパワーアシスト装置を用いた物体運搬の際、物体に対する力の加え方や重量の感じ方の調査が必要となっていた。

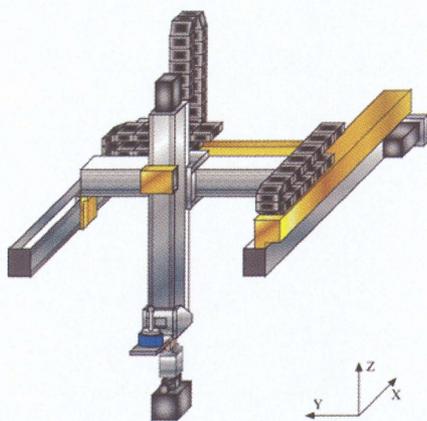


Fig.1.1 池浦らの産業用パワーアシスト装置



Fig.1.2 天井クレーンにおけるパワーアシスト

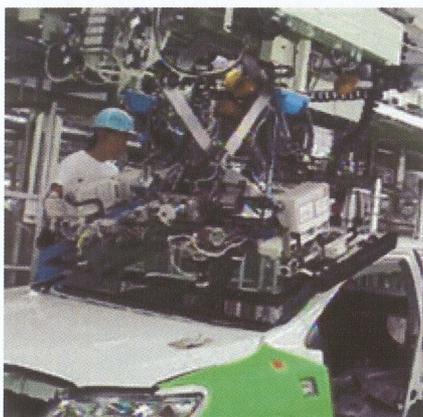


Fig.1.3 自動車組立のウィンドウ搭載支援ロボット



Fig.1.4 自動車組立工程のスキルアシスト

Table 1.1 労働力人口

年齢	男性			女性		
	1965年	1998年	2030年	1965年	1998年	2030年
総数	2884	4026	3268	1903	2767	2316
15～19	201	75	37	191	66	35
20～24	400	354	181	325	334	175
25～29	395	472	280	204	330	220
30～34	386	416	306	205	232	200
35～39	363	388	308	226	242	204
40～44	259	395	331	204	280	242
45～49	212	503	357	162	372	272
50～54	210	447	385	140	316	292
55～59	171	392	430	104	254	292
60～64	135	279	283	68	160	172
65歳以上	153	304	370	75	181	213

(単位：万人)

Table 1.2 労働力率

年齢	男性			女性		
	1965年	1998年	2030年	1965年	1998年	2030年
総数	81.7	77.3	65.9	50.6	50.1	42.5
15～19	36.3	18.7	16.4	35.8	17.3	16.6
20～24	85.8	74.2	69.1	70.2	73.4	69.8
25～29	96.8	96.1	93.9	49.0	69.2	76.7
30～34	97.0	97.7	96.5	51.1	55.8	65.8
35～39	97.1	98.0	96.7	59.6	62.2	66.3
40～44	97.0	97.8	97.0	63.2	70.2	73.4
45～49	96.8	97.7	96.9	60.9	72.4	75.3
50～54	95.0	97.0	95.7	55.8	67.8	72.1
55～59	90.0	94.5	93.2	46.8	59.1	61.8
60～64	82.8	74.8	70.9	39.8	40.1	41.0
65歳以上	56.3	35.9	22.6	21.6	15.2	11.1

(単位：%)

資料：総務省「労働力調査」

1.2 本研究室での先行研究

こうした背景より本研究室では、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が行われた^[19]。その研究では、パワーアシスト装置に取り付けられた物体持ち上げ時に、正常な持ち上げ（適切な力の加え方や運搬速度）をするため、視覚的印象から物体にかかる力に対する装置の挙動を人間の特性に合わせるよう、作業者の物体持ち上げ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の考案を目標とした。そして、その前段階として Fig.1.5 に示す AC サーボモータによるボールねじ駆動型一自由度パワーアシスト装置において、持ち上げ物体の質量のパラメータを慣性力項と重力項で分け、大きさを大、中、小で分ける場合に各条件で操作する人間の特性の調査を試みた。人間の特性とは、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、物体に対する運搬時の力の加え方と運搬過程での重量の感覚といったものである。結果として、Fig.1.6 のように被験者ごとに違いはあるものの、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（物体を持ち上げる際に加えた最大の力）が大きくなるという傾向があった。被験者に関して、アシストされた物体を持ち上げる時の力と変位の挙動、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(1.0kg の物体が 0.4kg に感じる)であるという点は共通しているが、持ち上げる力そのものはピーク力が明らかに大きくなったなど異なっているということが分かった。



Fig.1.5 先行研究の実験装置

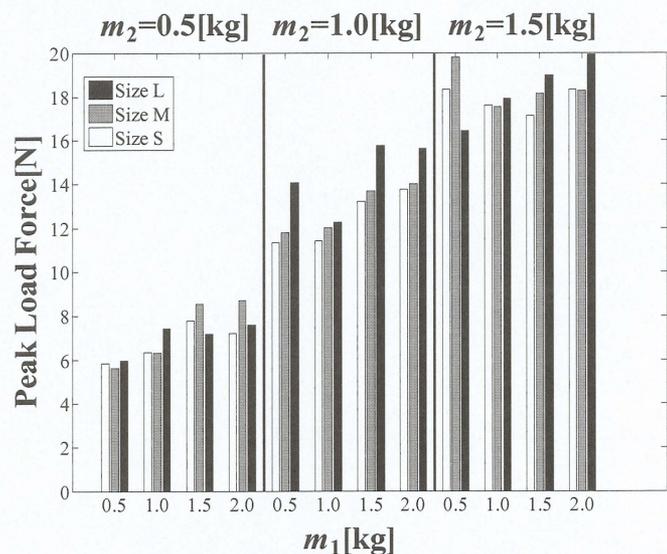


Fig.1.6 先行研究の実験結果の例

1.3 研究目的

先行研究では物体を持ち上げる際、パワーアシスト装置を用いると実際の物体の質量の 4 割程度に感じるという結果（1.0kg の物体が 0.4kg 程度に感じる）であったが、物体が軽く感じた原因は分かっていなかった。そこで、パワーアシスト装置の最適な制御手法の考案を目的とし、パワーアシスト装置を用いて物体を持ち上げる際に軽く感じた原因を明らかにする。そのため本研究では、原因を明らかにするために物体を持ち上げる際の力の加え方や重量の感じ方に関してパワーアシスト装置による影響を調査し、比較考察する。

1.4 本論文の構成

本論文の構成を以下に示す。まず、第 2 章では実験装置とその制御アルゴリズムについて説明する。次に、第 3 章では物体を持ち上げる際の力の加え方や重量の感じ方に関してパワーアシスト装置による影響を調査し、比較考察する。次に、第 4 章では第 3 章で得られた結果をもとに重量の感じ方の差異が実験装置等から発生する時間遅れによるものからと仮定し、シミュレーションで検証する。最後に、第 5 章では本研究のまとめと今後の課題について述べる。

第 2 章

実験装置と制御アルゴリズム

2.1 一自由度パワーアシスト装置

本研究で用いる AC サーボモータによるボールねじ駆動型一自由度パワーアシスト装置の外観を Fig.2.1 に示す。このパワーアシスト装置は AC サーボモータ(SGMJV-02ADA2C 安川電機社製)とボールねじ(SK3320A-0495-1-000H THK 社製)を組み合わせたものであり、Table1 と Table2 にそれぞれ仕様を示す。先行研究で用いたパワーアシスト装置からの変更点は、応答性を良くするために定格出力を大きくしたこと、以前はボールねじのストロークが短く、物体を持ち上げる際に制限があったため、自然な持ち上げを可能にするためにストロークを長くしていることである。また、物体を持ち上げる際のテーブルからの反力を測定するためのロードセルをあらたに設置した。

構築したシステム構成を Fig.2.2 に示す。ボールねじに取り付けられている AC サーボモータとエンコーダは、サーボアンプを経由してそれぞれ PC に搭載された D/A ボードとカウンターボードに接続されている。この PC によってモータを制御することで、物体を持ち上げる力に応じた速度で物体を持ち上げることが可能であり、モータに搭載されたエンコーダによって物体を持ち上げた際の変位を測定することができる。また、力センサと初期に物体を置いてあるテーブル部分のロードセルはストレインアンプを通して A/D ボード接続されており、人が物体へ加えた力及び物体がテーブルに置かれてから持ち上げるまでの反力を測定する。

Fig. 2.1 は物体が取り付けられる前の状態であり、物体に加えた力を計測するための力センサが取

り付けられている。Fig.2.3 に力センサを示す。寸法は横 $l_1=50\text{mm}$ ，奥行き $l_2=50\text{mm}$ ，高さ $l_3=40\text{mm}$ である。この力センサは物体を持ち上げる際の力を，ブリッジ回路を使用したひずみゲージとストレインアンプを組み合わせることによって測定できるようになっている。力センサは側面にネジ穴を切ることによって実験で用いる物体を取り付けられるようになっており，実験では被験者がこの物体を把持し，持ち上げ動作を行う。力センサに実験で用いる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. 2.4 に示す。

持ち上げ物体を Fig.2.5 に示す。持ち上げ物体は力センサの側面に厚さ 1mm のベークライトを取り付け，上部に厚さ 2mm のベークライト取り付けることによって完成する。寸法は横 $l_1=52\text{mm}$ ，奥行き $l_2=51\text{mm}$ ，高さ $l_3=120\text{mm}$ である。物体を持ち上げる際の重量の感じ方に関して，パワーアシスト装置に取り付けられた物体とフリーな状態の物体を持ち上げることによって比較するのだが，その比較対象の物体も寸法は同じである。以後，パワーアシスト装置に取り付けられた物体を物体 A と定義し，何も拘束されていない物体を物体 B と定義する。

物体がテーブルに置かれてから持ち上げるまでのテーブルからの反力を測定するロードセルを Fig.2.6 に示す。また，ロードセル (CB17-3k-11 ミネベア製) の仕様を Table3 に示す。ロードセルと 2 枚の台の間にアルミの板を挟むことに隙間を作り，ひずみを測定できるようになっている。

以上の装置で物体を持ち上げる際の力の加え方や物体の変位を計測することができる。

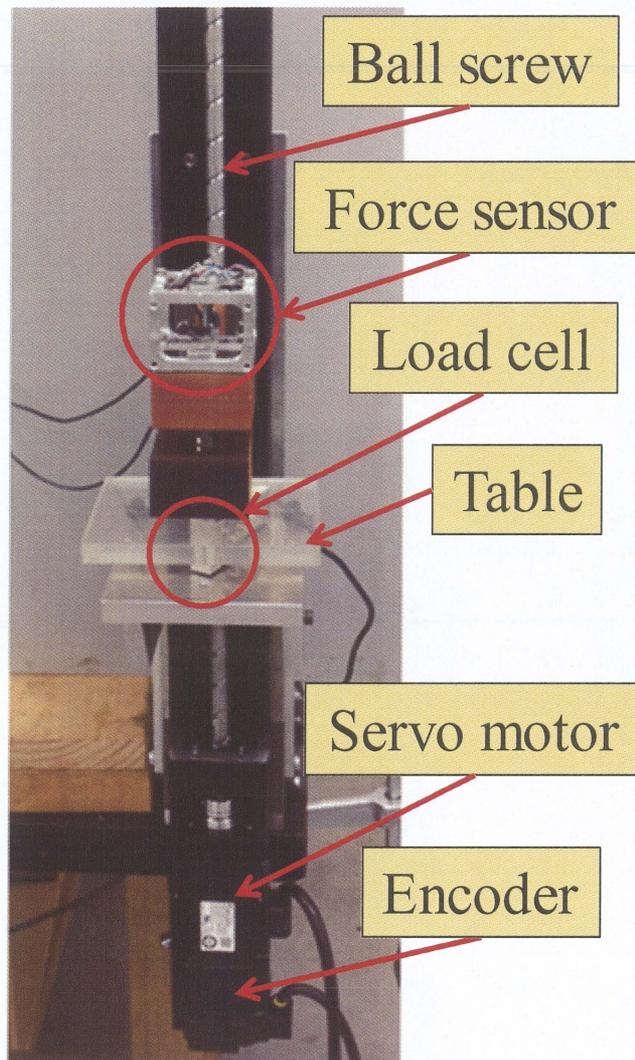


Fig.2.1 実験装置の外観

Table1 サーボモータの仕様

Rated output[W]	200
Rated torque[N·m]	0.637
Peak torque[N·m]	2.23
Rated current[Arms]	1.6
Peak current[Arms]	5.8
Declared engine speed[min^{-1}]	3000
Maximum speed of rotation[min^{-1}]	6000
Torque constant [N·m/Arms]	0.435

Table2 ボールねじの仕様

Lead[mm]				20
Rated speed[mm/s]				1000
Maximum mass capacity[kg]	Horizontal direction	Acceleration and deceleration	0.15G	-
			0.3G	24
			0.5G	20
	Vertical direction		0.15G	-
			0.3G	6
			0.5G	5
Rated thrust[N]				80
Maximum thrust[N]				238
Stroke[mm]				495
Maximum velocity[mm/s]				1780

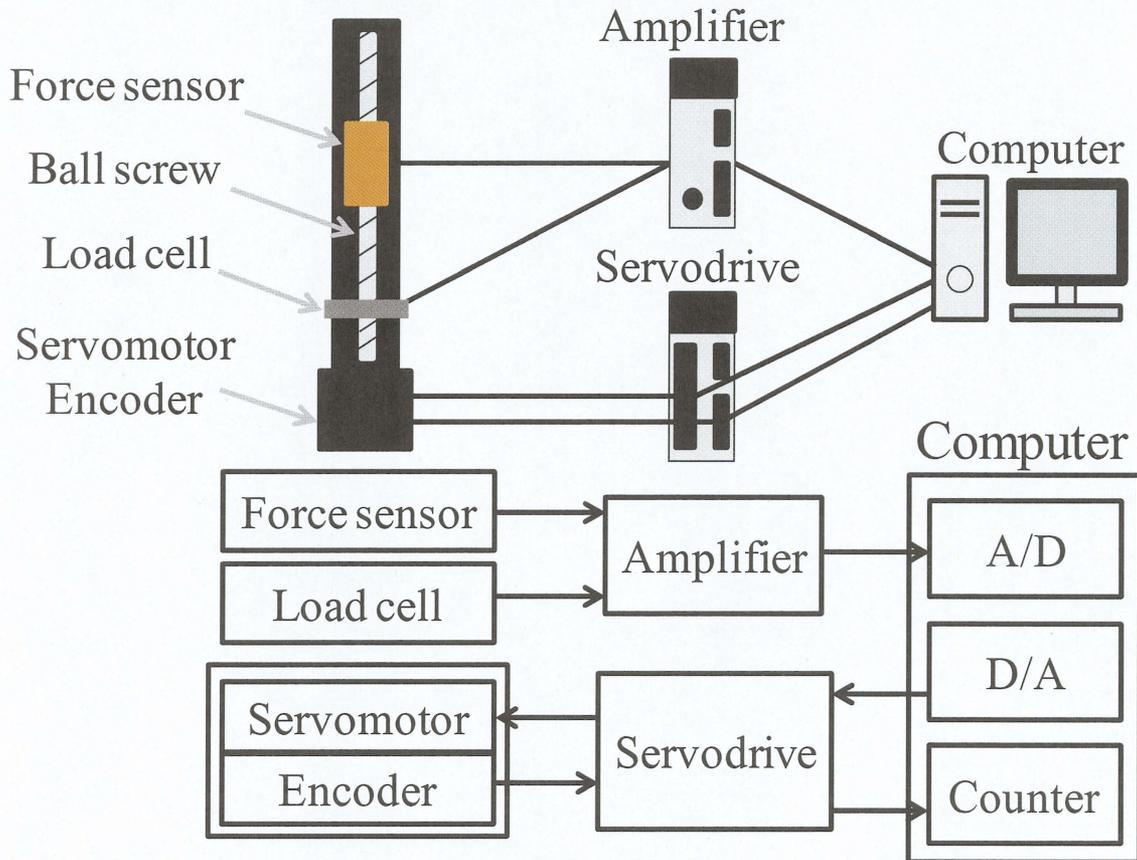


Fig.2.2 システム構成図

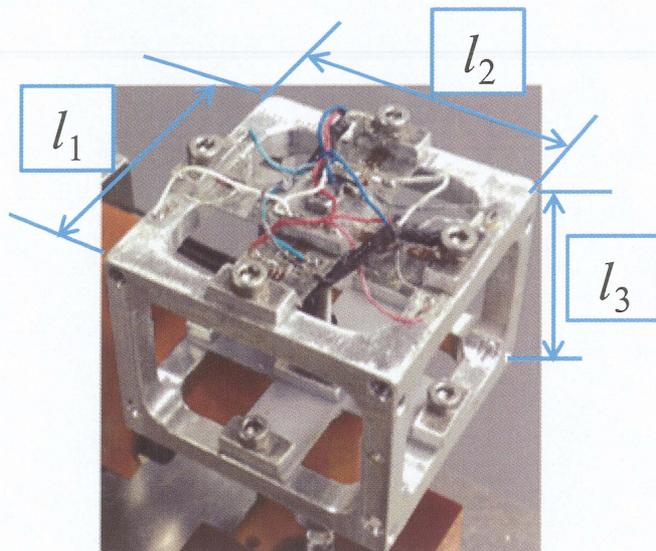


Fig.2.3 カセンサ



Fig.2.4 物体持ち上げ時の様子

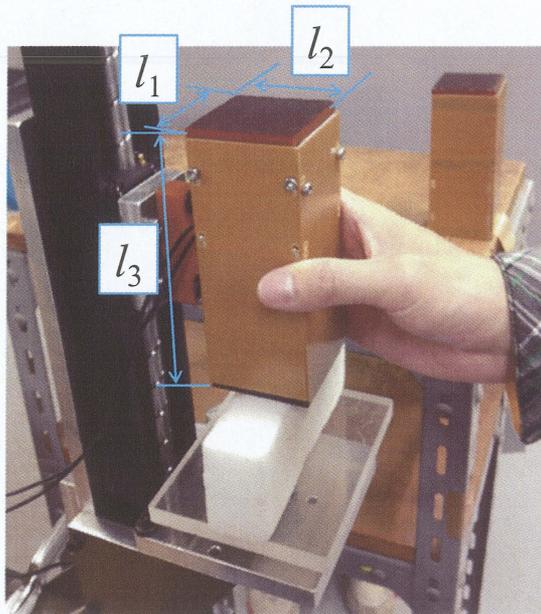


Fig.2.5 持ち上げ物体

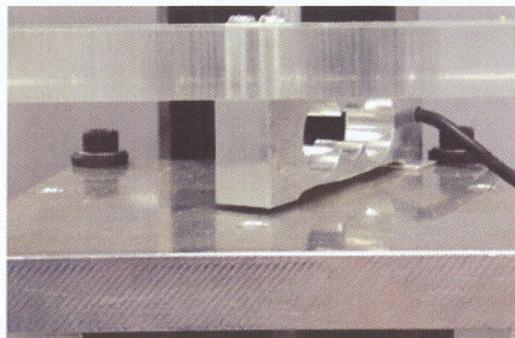


Fig.2.6 ロードセル

Table3 ロードセルの仕様

Rated capacity	29.42N
Safe overload rating	300%R.C.
Ultimate overload rating	400%R.C.
Rated output	1mV/V±0.1mV/V
Nonlinearity	0.02%R.O.
Hysteresis	0.02%R.O.
Repeatability	0.02%R.O.
Creep	0.02R.O./20min
Creep recovery	0.02R.O./20min

2.2 実験装置の制御アルゴリズム

物体を持ち上げる際にパワーアシスト装置に働く力を Fig.2.7 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質量を m [kg], 重力加速度を g [m/s²] 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 を物体に加える必要がある. パワーアシスト装置の駆動部がこの人間が加える力 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. 2.7 において, 制御したい目標モデルの式は

$$m \dot{x} = f_h - mg \quad (2.1)$$

と表記される. (2.1)式において, 右辺は物体に与えられる力を表している (ただし摩擦や空気抵抗は除く). (2.1) 式をもとにした本実験で用いる制御のブロック線図を Fig.2.8 に示す. Fig. 2.8 より, 人間が物体に加える力 f_h が入力となっており, サーボアンプに入る指令値が \dot{x}_d , 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. K は比例器ゲインを表している. また, 仮想質量 m 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, 物体 A の質量を自由に変更することができる. 本研究で用いる制御は, パラメータは仮想質量 m 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. 力から変位への変換に関して仮想質量パラメータ m 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.

実際の動きとしては, 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. 2.7 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, 加えた力と設定した仮想質量の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. 2.7 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。その数秒後に被験者は Fig.2.7 の物体 A に上向きの力を加えることによって物体を持ち上げる。そして、物体の中にある力センサ (Fig. 2.2 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ストレインアンプを通して A/D 変換器に送信される。ここでアナログ形式の電圧信号がデジタル形式に変換され、コンピュータに人間が物体に加えた力 f_h として伝達される。入力が人間が加えた力 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仮想質量にも依存する。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。そして、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。

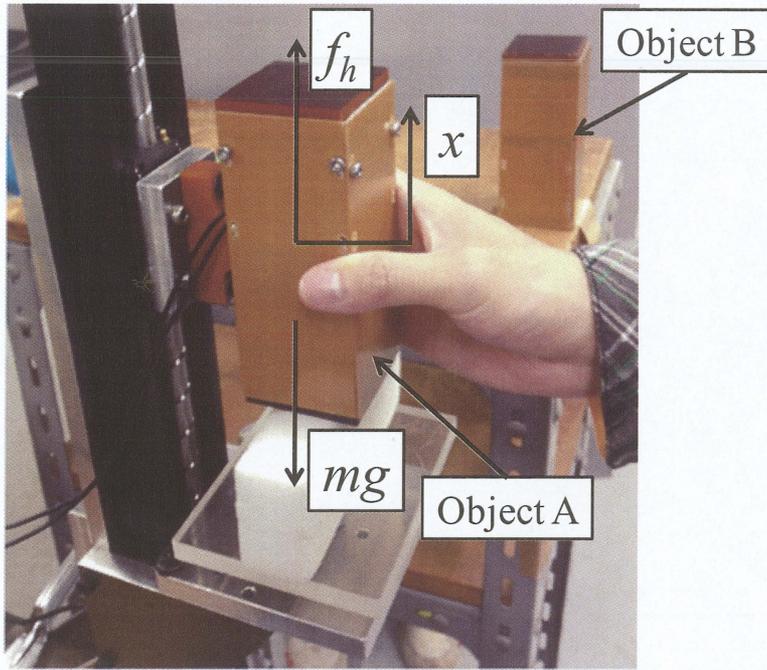


Fig.2.7 物体持ち上げ時に働く力

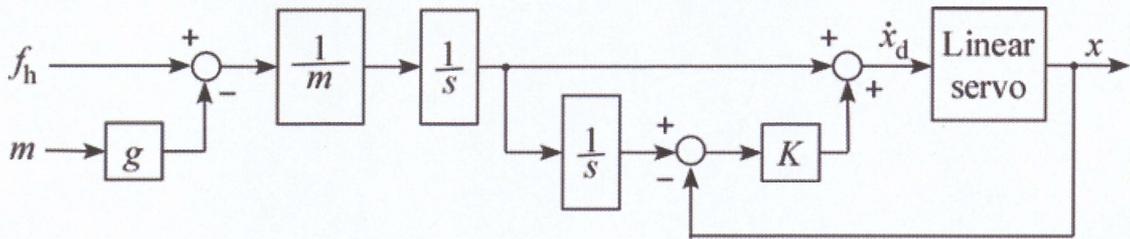


Fig.2.8 ブロック線図

第3章

物体持ち上げ動作実験

3.1 実験方法

本節では Fig.2.5 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.2.5 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、テーブル上のスポンジに置かれている。物体 A を右手で把持し、テーブル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、物体 A を把持したままテーブル上で数秒間保持した後に実験者の合図によって被験者が物体を持ち上げる。この実験のタスクは、持ち上げた瞬間の力の計測と重量の感じ方を目標とするため持ち上げる高さは指定せず、物体 A をパワーアシストのない実際の物体を持ち上げる時と同じように持ち上げ、持ち上げが終了すればその位置で 1-2 秒保持するというものである。なお、物体 A の仮想質量の決定は $m = 0.5[\text{kg}]$ から始める。

その後、物体 A の重量をどの程度に感じたかを調べるため、物体 A とサイズが同一で質量 0.5kg である物体 B を持ち上げることによって、物体 A を持ち上げた際に被験者が感じた重量を調べる。物体 B を用いて物体 A を持ち上げた瞬間に感じた重量を調べる場合、物体 A の設定する仮想質量を 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量が物体 B より軽かったか重かったかで判断してもらう。例えば、まず物体 B (0.5kg) と比較して、設定した仮想質量が $m = 0.5[\text{kg}]$ である物体 A を持ち上げた瞬間に感じた重量が 0.5kg より軽かったか重かったかを判別する。その後、さらに別の仮想質量に切り替えた物体 A と比較を繰り返す。詳しく言うと、物体 A の方が軽ければ

仮想質量を重くさせ、物体 A の方が重く感じるように変化するまで続け、物体 A の方が重ければ仮想質量を軽くさせ、物体 A の方が軽く感じるように変化するまで続ける。その結果、重量の知覚に関して物体 B (0.5kg)を持ち上げた際に、パワーアシスト装置を用いて持ち上げた物体 A が 0.6kg より重く 0.7kg より軽く感じたのであれば、被験者が感じた重さの範囲は 0.6kg-0.7kg であったことが分かる。

物体 A は仮想質量を 0.1kg ずつ変化させて物体 B と重量を比較していくのだが、0.1kg 刻みとした理由は、人間が知覚できる重量には限界があり、より細かい単位（例えば 0.05kg 刻み、0.025kg 刻みなど）になると感じた重量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。

そして重量の変化を感じたところが分かれば軽いと感じた方の仮想質量から-0.1kg, -0.2kg, 重いと感じた方の仮想質量から+0.1kg, +0.2kg の仮想質量(物体 B と比較して、物体 A の 0.7kg より軽く感じて 0.8kg より重く感じた場合は 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0kg) の物体がテーブルから離れる際の反力を順番はランダムで計 6 回の持ち上げ動作を 1 セット計測する。また、物体 B のテーブルに置かれてから持ち上げるまでのテーブルからの反力の測定を同時に行うため、パワーアシスト装置に取り付けられているロードセルで物体 A と同様に反力を測定する。

また、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、パワーアシスト装置を用いて物体を持ち上げる際にどのように力を加えているのか、どの程度の重さと感じているのかを確認し、物体を持ち上げる際の人間の特性を調査する。

3.2 実験結果及び考察

前節で記述した実験方法について、5名の健常な男子大学生5名で実験を行った。5名の被験者を以下ではそれぞれ被験者 A, B, C, D, E とする。パワーアシスト装置に取り付けられた物体 A を被験者が持ち上げるという実験であるが、このとき各被験者が物体 A を持ち上げた際の各サンプルデータを Fig.3.1～Fig.3.5 に示す。以後、パワーアシスト装置を用いた物体持ち上げを物体 A の持ち上げと定義し、なにも拘束されていない通常の持ち上げを物体 B の持ち上げと定義する。図中の横軸は時間 [s]であり、縦軸は上から順に、物体を持ち上げた際の変位[m], 速度[m/s], 加速度[m/s²], 加えた力[N], テーブルからの反力[N]を示している。また、加速度、反力に関しては、ノイズを消去するためにゼロ位相デジタルフィルタ処理をした。フィルタ次数は 30, カットオフ周波数は 50[Hz]とした。Fig.3.1 は被験者 A が仮想質量 $m = 0.5[\text{kg}]$ と設定したときに得られたデータである。 m が $0.5[\text{kg}]$ 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働いてい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。反力は仮想質量×重力加速度であり、今回の条件では仮想質量が $0.5[\text{kg}]$ で、重力加速度が $9.81[\text{m/s}^2]$ 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働いてい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。物体がテーブルに置かれている時点では反力の測定値は $4.905[\text{N}]$ 前後で表されているが、物体を持ち上げてテーブルからだんだん離れていった後には、物体がテーブルから完全に離れたところで反力が 0 になっている。それ以降は、Fig.3.2 は被験者 B が $m = 0.5[\text{kg}]$, Fig.3.3 は被験者 C が $m = 0.6[\text{kg}]$, Fig.3.4 は被験者 D が $m = 0.5[\text{kg}]$, Fig.3.5 は被験者 E が $m = 0.5[\text{kg}]$ と設定したときに得られたデータである。

これらのデータの中でも本研究では、先行研究で測定していなかったテーブルからの反力に着目する。Fig.3.6～Fig.3.10 は各被験者のテーブルからの反力を示しており、横軸は時間[s], 縦軸は反力[N]である。図のスタートの高さが異なるのは、先ほども述べたように反力は仮想質量×重力加速度であり、仮想質量は異なる 6 種類を用いるためそれに伴い反力も変化するためである。なお、各被

験者によって物体 A と物体 B の重量の比較をした際に重量の感じ方に差異が出たため、物体 A の仮想質量の範囲が異なっている。被験者 A, B, C, D は物体 B と比較して物体 A の仮想質量が 0.7kg と 0.8kg の間で重量の感じ方の差異を感じたため、仮想質量の範囲が 0.5kg ~1.0kg となっており、図の赤色、緑色、青色、水色、茶色、紫色のグラフはそれぞれ 0.5kg, 0.6kg, 0.7kg, 0.8kg, 0.9kg, 1.0kg の仮想質量である物体 A のテーブルからの反力を示している。また、被験者 E は物体 B と比較して物体 A の仮想質量が 0.8kg と 0.9kg の間で重量の感じ方の差異を感じたため、仮想質量の範囲が 0.6kg ~1.1kg となっており、図の赤色、緑色、青色、水色、茶色、紫色のグラフはそれぞれ 0.6kg, 0.7kg, 0.8kg, 0.9kg, 1.0kg, 1.1kg の仮想質量である物体 A のテーブルからの反力を示している。そして、すべてに共通する黒色のグラフは物体 B を持ち上げた際のテーブルからの反力を示している。

また、物体を持ち上げる瞬間の反力の測定値を比較するために、物体 A の持ち上げと物体 B の持ち上げにおける両方の反力の測定値が最大値から 0 に下がった時点 (Fig.3.6~Fig.3.10 中の実線の丸で囲んだ部分) を一致させ、また同様に、物体を持ち上げる瞬間の反力の測定値を異なる仮想質量でも比較しやすくするため、測定時の仮想質量と重力加速度で割ることにより正規化した各被験者の反力を Fig.3.6~Fig.3.10 中の点線で囲った部分を拡大し、Fig.3.11~Fig.3.15 に示す。正規化した反力の図の横軸は時間[s]、縦軸は反力[-]となっており、グラフの色は Fig.3.6~Fig.3.10 で定義したものと同一である。また、物体 A の持ち上げと物体 B の持ち上げにおける両方の反力の測定値が最大値から 0 に下がった時点の時間を 0 と置いている。

Fig.3.11 より被験者 A は物体 B の持ち上げとほぼ同じ重量と感じた物体 A の持ち上げの $m=0.7\text{kg}$ の場合の物体を持ち上げた際の反力の測定値がほぼ同じになっていることが確認できる。物体 B の持ち上げより軽く感じた物体 A の持ち上げの $m=0.5\text{kg}$, 0.6kg の場合の物体を持ち上げた際の反力の測定値を見ると、物体 B の持ち上げより物体 A の持ち上げの方が反力の値が 1 付近から 0 になるまでの時間が短かった。すなわち、物体を持ち上げ始めてからテーブルから離れるまでの時間が短いことが分かる。同様に、物体 B の持ち上げより重く感じた物体 A の持ち上げの $m=0.8\text{kg}$, 0.9kg , 1.0kg の場合の物体を持ち上げた際の反力の測定値を見ると、物体 B の持ち上げより物体 A の持ち上げの方が反力の値が 1 付近から 0 になるまでの時間が長かった。すなわち、物体を持ち上げ始めてからテーブルから離れるまでの時間が長いことが分かる。被験者 B も物体 B の持ち上げと、物体 A の持

ち上げの $m=0.7\text{kg}$ をほぼ同じ重量と感じたのだが、Fig.3.12 より物体 A の持ち上げの $m=0.7\text{kg}$ の場合と物体 B の持ち上げの場合の反力がほぼ同じになっている。他の仮想質量の場合も被験者 A と同様に $m=0.5\text{kg}$, 0.6kg の場合は物体 B の持ち上げより物体 A の持ち上げの方が物体を持ち上げ始めてからテーブルから離れるまでの時間が短く、 $m=0.8\text{kg}$, 0.9kg , 1.0kg の場合は物体 B の持ち上げより物体 A の持ち上げの方が物体を持ち上げ始めてからテーブルから離れるまでの時間が長かった。被験者 C は物体 B の持ち上げと比較して、物体 A の持ち上げの 0.7kg は軽く感じ、 0.8kg は重く感じたという結果であったが、Fig.3.13 より $m=0.5\text{kg}$, 0.6kg の場合は物体 B の持ち上げより物体 A の持ち上げの方が物体を持ち上げ始めてからテーブルから離れるまでの時間が短く、 0.8kg , 0.9kg , 1.0kg の場合は物体 B の持ち上げより物体 A の持ち上げの方が物体を持ち上げ始めてからテーブルから離れるまでの時間が長いというように被験者 A, B と同様の結果が出た。しかし、 $m=0.7\text{kg}$ の場合は物体 B の持ち上げより物体 A の持ち上げの方が物体を持ち上げ始めてからテーブルから離れるまでの時間が長くなった。被験者 D は物体 B の持ち上げと比較して、物体 A の持ち上げの 0.7kg は軽く感じ、 0.8kg は重く感じたという結果であったが、Fig.3.14 より $m=0.5\text{kg}$ の場合は物体 B の持ち上げより物体 A の持ち上げの方が物体を持ち上げ始めてからテーブルから離れるまでの時間が短く、 0.8kg , 1.0kg の場合は物体 B の持ち上げより物体 A の持ち上げの方が物体を持ち上げ始めてからテーブルから離れるまでの時間が長かった。 $m=0.6\text{kg}$, 0.7kg , 0.9kg の場合は物体 A の持ち上げと物体 B の持ち上げが物体を持ち上げ始めてからテーブルから離れるまでの時間がほぼ同程度だった。被験者 E は物体 B の持ち上げと比較して、物体 A の持ち上げの 0.8kg は軽く感じ、 0.9kg は重く感じたという結果であったが、Fig.3.15 より $m=0.6\text{kg}$, 0.7kg の場合は物体 B の持ち上げより物体 A の持ち上げの方が物体を持ち上げ始めてからテーブルから離れるまでの時間が短く、 1.1kg の場合は物体 B の持ち上げより物体 A の持ち上げの方が物体を持ち上げ始めてからテーブルから離れるまでの時間が長かった。 $m=0.8\text{kg}$, 0.9kg , 1.0kg の場合は物体 A の持ち上げと物体 B の持ち上げが物体を持ち上げ始めてからテーブルから離れるまでの時間がほぼ同程度だった。

以上の結果より、物体を持ち上げる際の重量の感じ方に関して、 0.7kg の物体 A の持ち上げと 0.5kg 物体 B の持ち上げが似たような重量と感じた被験者が多かった。よって、パワーアシスト装置を用いると実際の物体の質量の 6~7 割程度に感じるということが分かった。先行研究で用いたパワーアシスト

装置では、実際の物体の質量の4割程度に感じる（1.0kgの物体が0.4kgに感じる）という結果だったが、この違いは実験装置をあらたに作製したことが一番影響を与えていると考えられる。

また、人間が物体を持ち上げる際の力の加え方に関して、物体を持ち上げ始めてから離れるまでのテーブルからの反力が被験者によって多少の違いはあるものの、物体Bの持ち上げより物体Aの持ち上げの方が軽いと感じた仮想質量の場合、物体を持ち上げ始めてからテーブルから離れるまでの時間が物体のBの持ち上げより物体Aの持ち上げの方が短く、逆に物体Bの持ち上げより物体Aの持ち上げの方が重いと感じた仮想質量の場合、物体を持ち上げ始めてからテーブルから離れるまでの時間が物体Bの持ち上げより物体Aの持ち上げの方が長くなることが分かった。よって、物体Aの持ち上げと物体Bの持ち上げに関して、物体を持ち上げ始めてから離れるまでのテーブルからの反力と重量の感じ方が相関していることが分かった。

次の章では、パワーアシスト装置を使用した物体持ち上げより通常の物体の持ち上げの方が軽く感じた原因が時間遅れから発生したものと仮定し、本章の実験で測定した反力を用いてシミュレーションを行う。

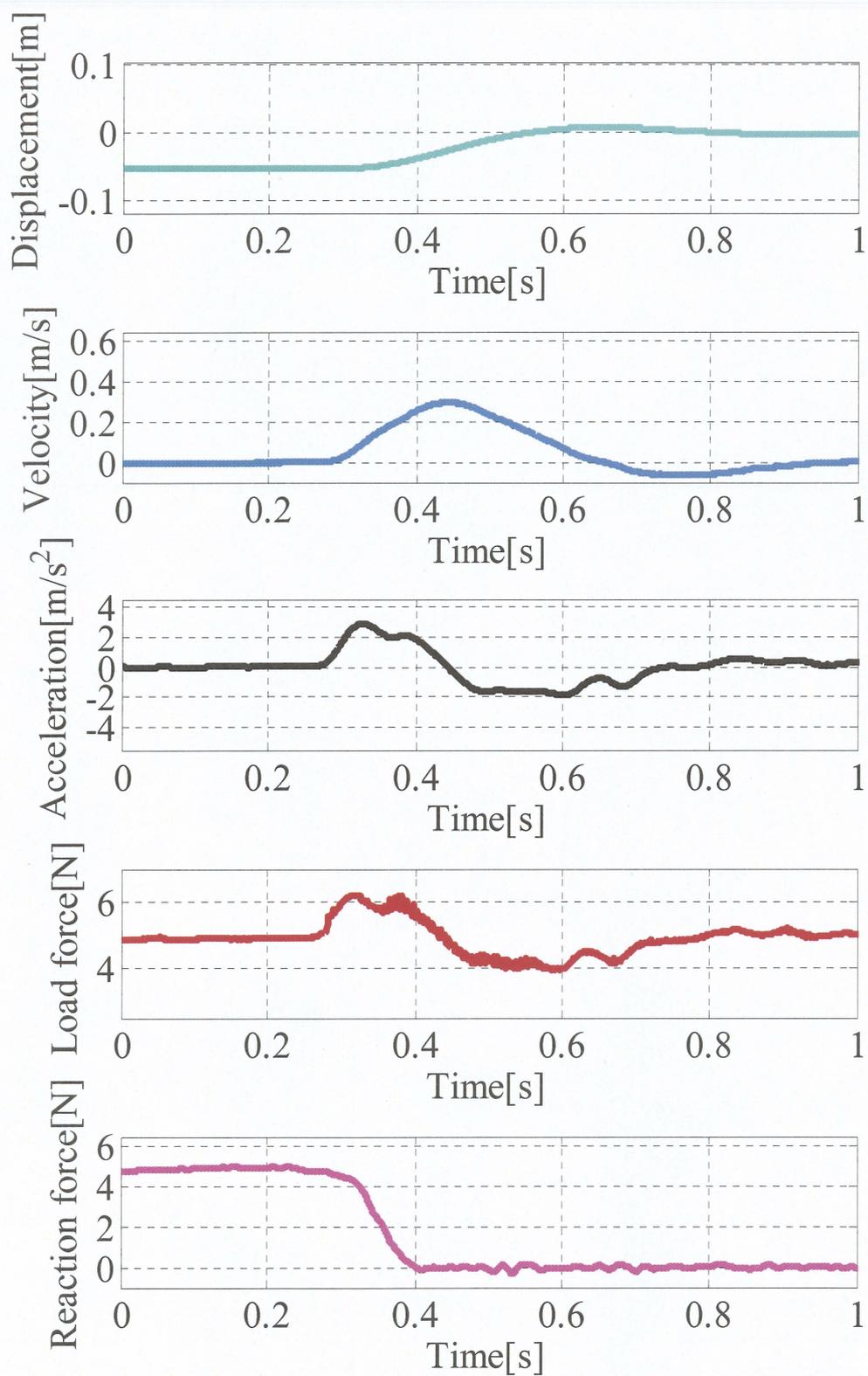


Fig.3.1 被験者 A のサンプルデータ ($m = 0.5\text{kg}$)

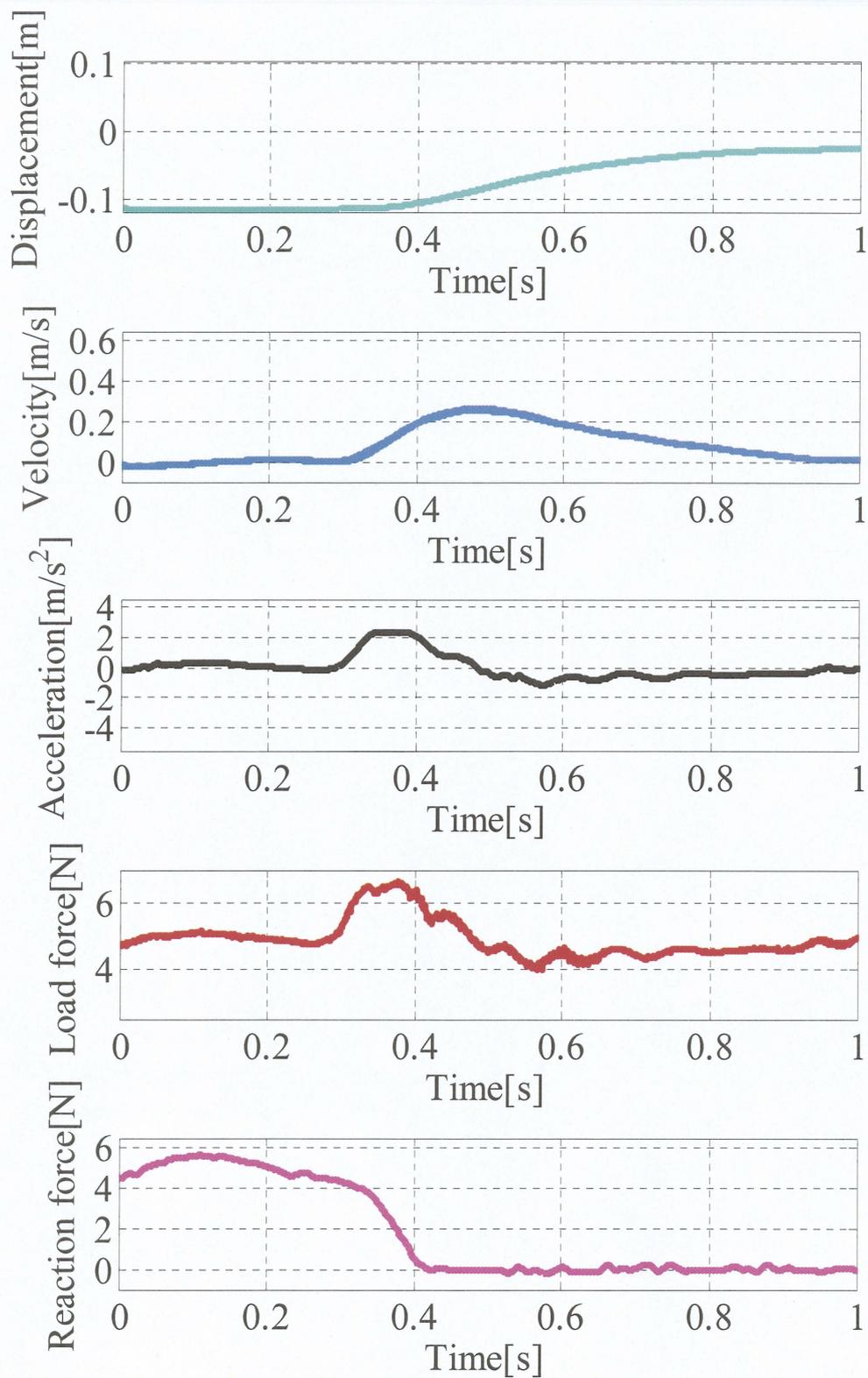


Fig.3.2 被験者 B のサンプルデータ ($m = 0.5\text{kg}$)

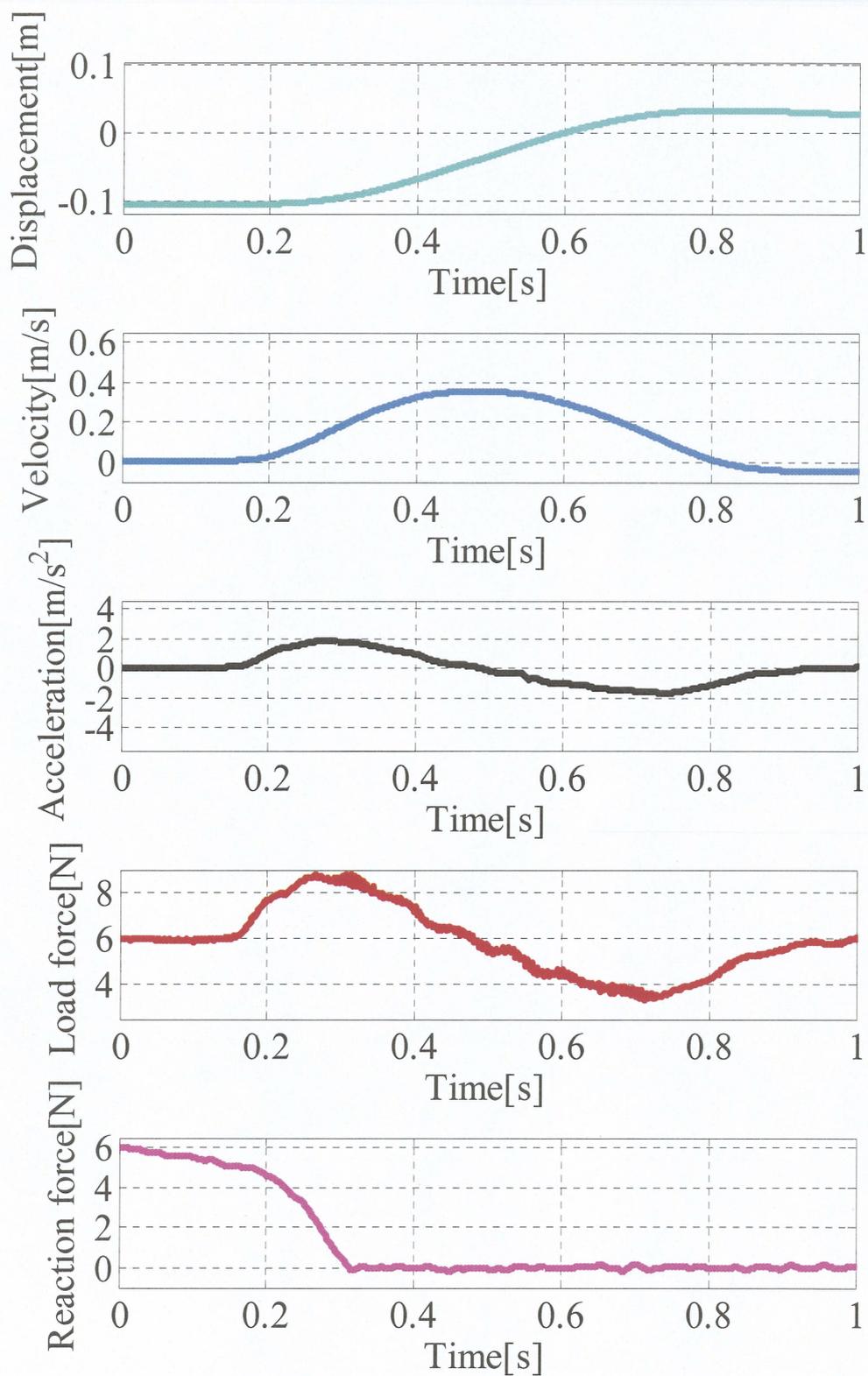


Fig.3.3 被験者 C のサンプルデータ ($m = 0.6\text{kg}$)

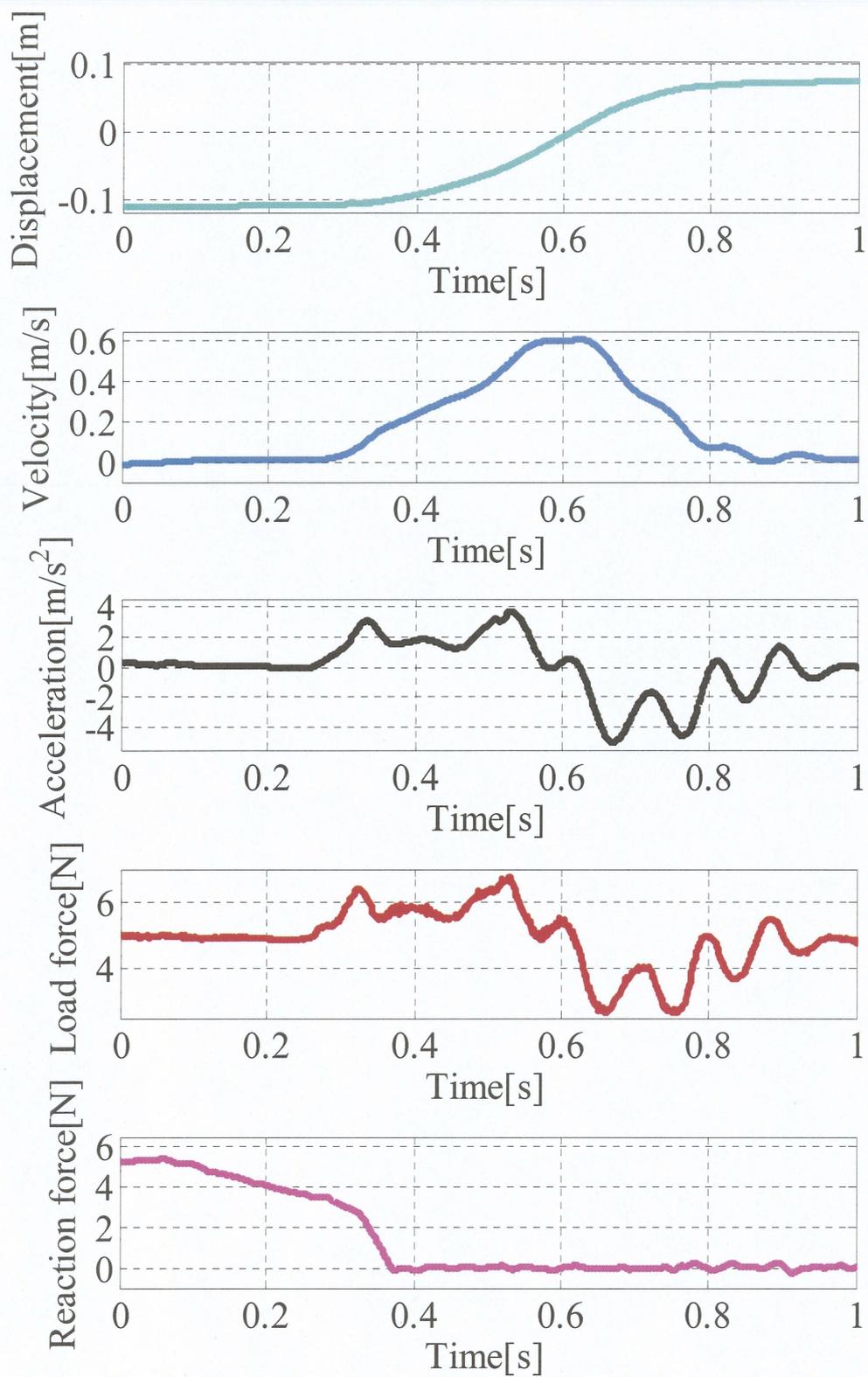


Fig.3.4 被験者 D のサンプルデータ ($m = 0.5\text{kg}$)

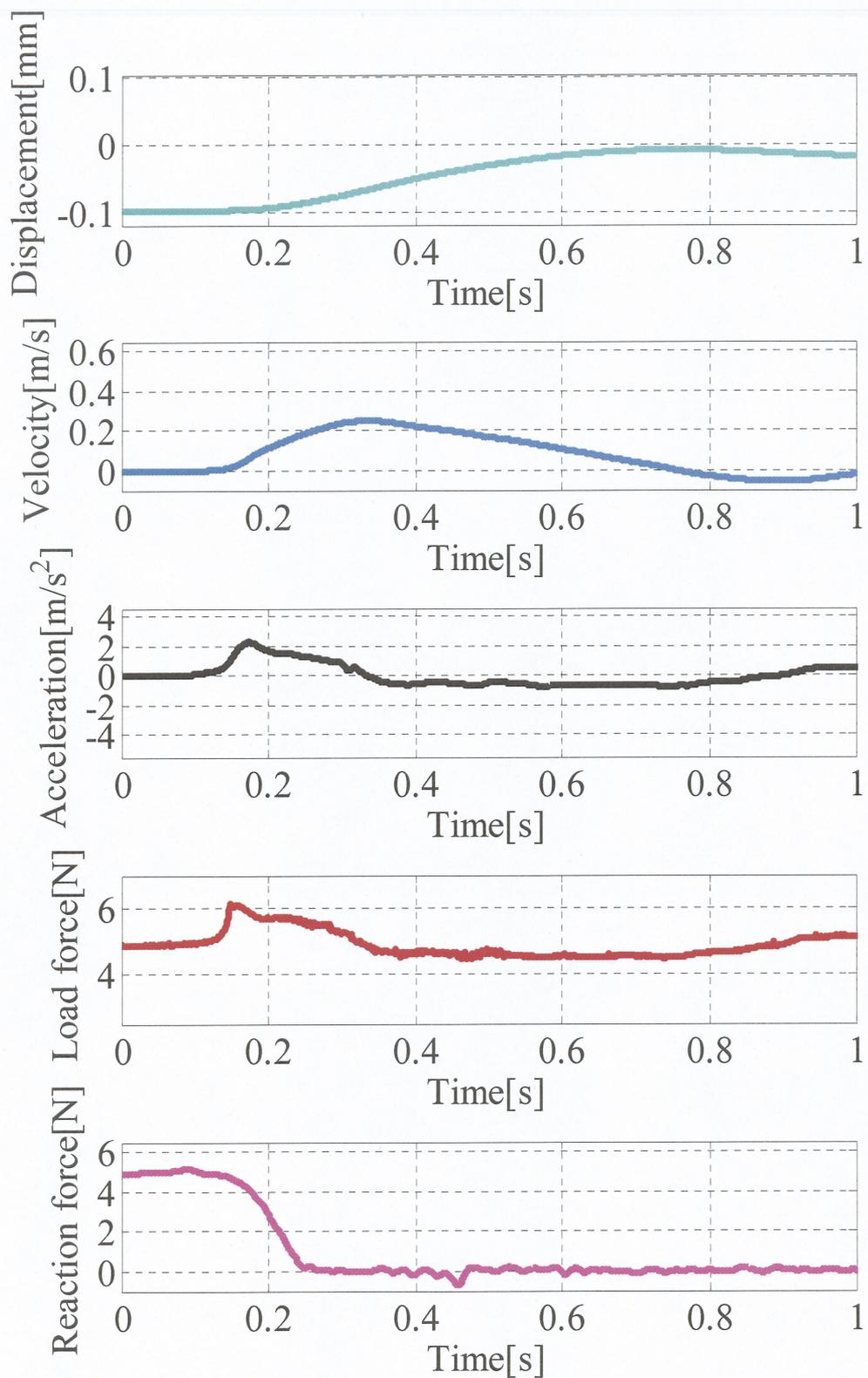
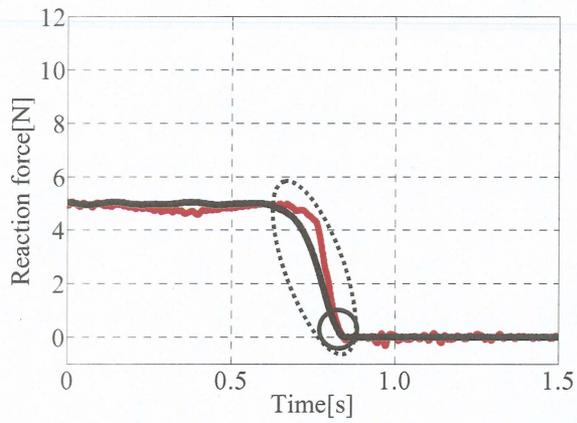
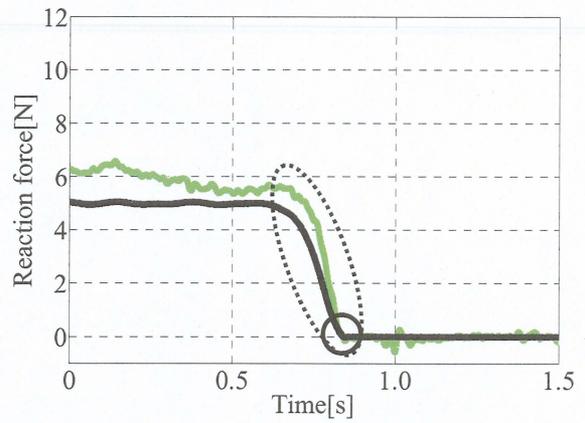


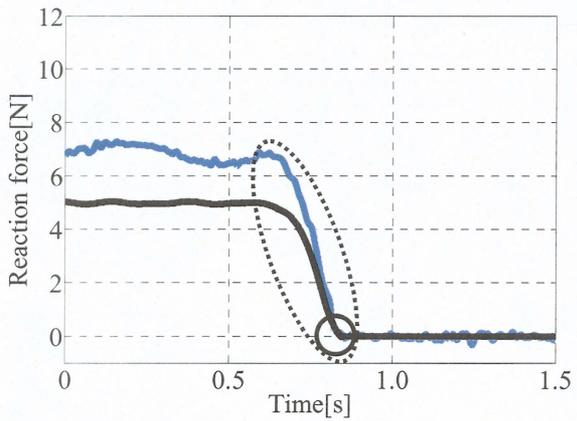
Fig.3.5 被験者 E のサンプルデータ ($m = 0.5\text{kg}$)



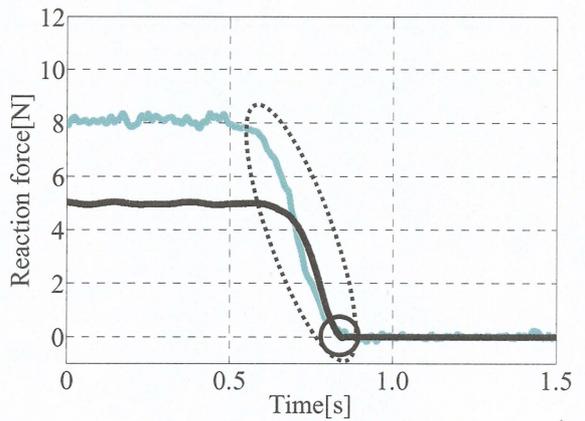
(a) $m = 0.5\text{kg}$



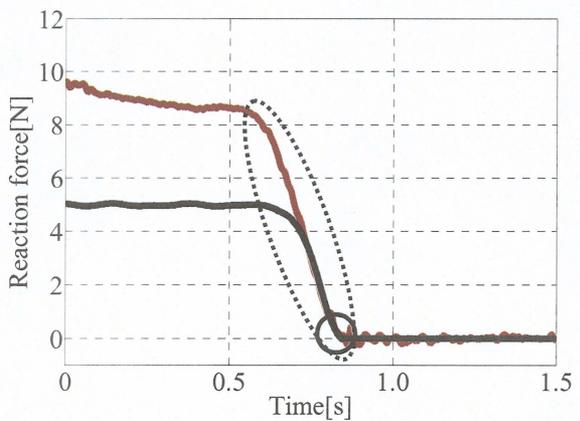
(b) $m = 0.6\text{kg}$



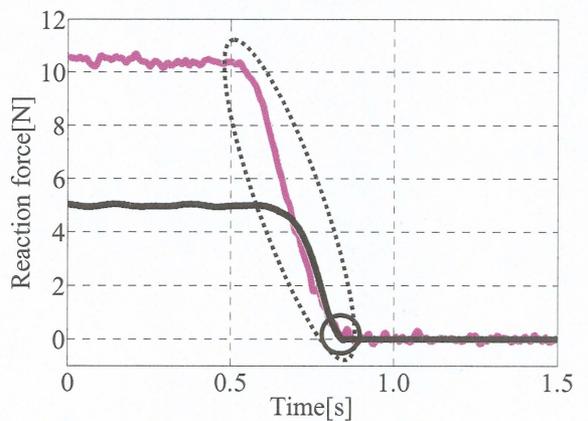
(c) $m = 0.7\text{kg}$



(d) $m = 0.8\text{kg}$

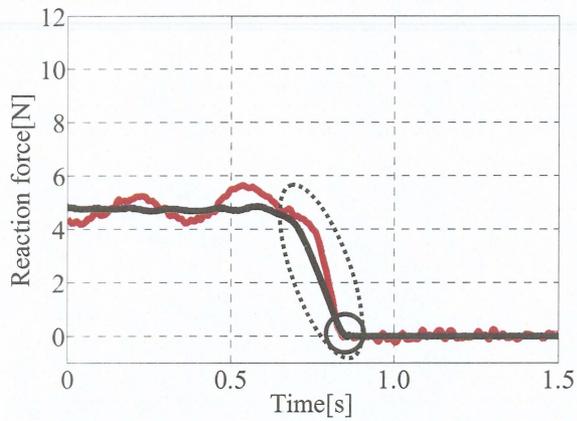


(e) $m = 0.9\text{kg}$

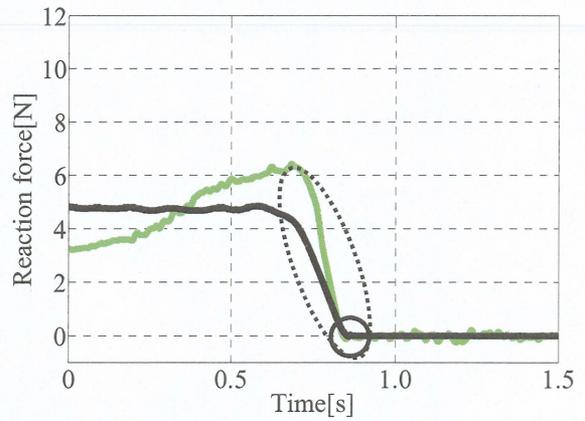


(f) $m = 1.0\text{kg}$

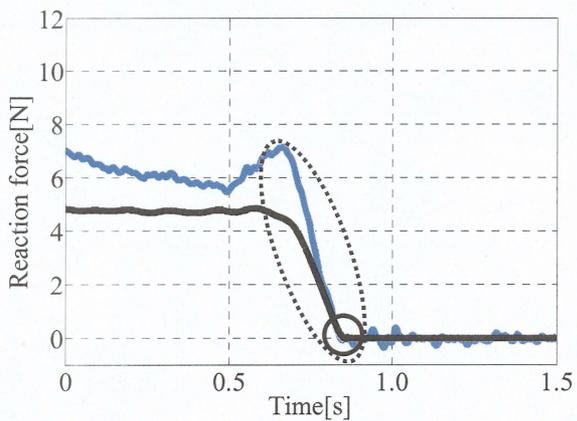
Fig.3.6 被験者 A の反力測定値



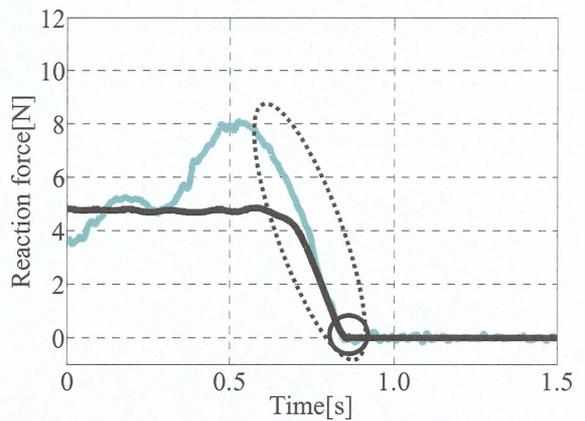
(a) $m = 0.5\text{kg}$



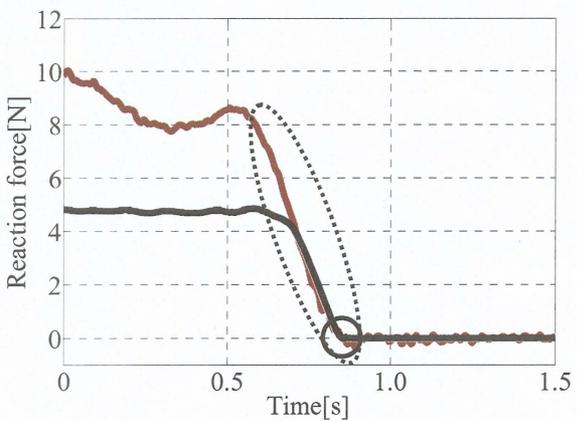
(b) $m = 0.6\text{kg}$



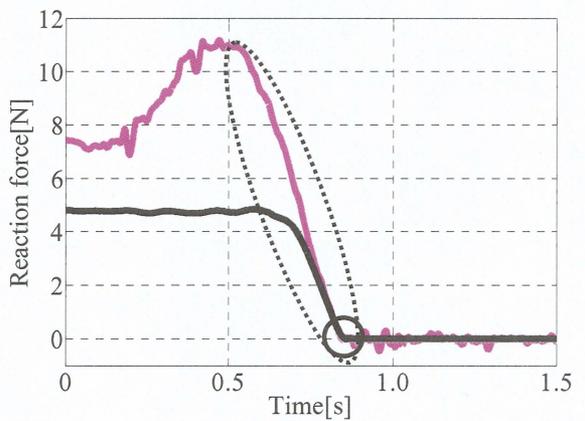
(c) $m = 0.7\text{kg}$



(d) $m = 0.8\text{kg}$

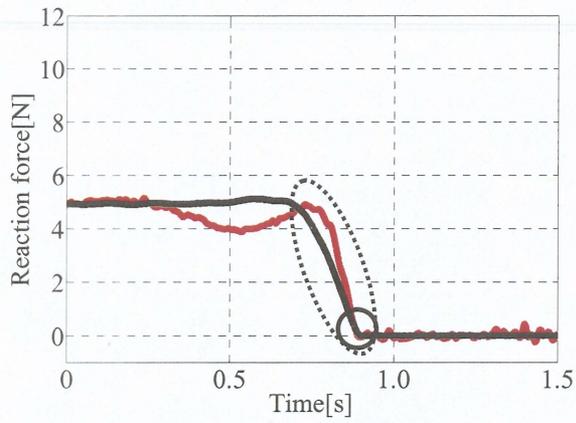


(e) $m = 0.9\text{kg}$

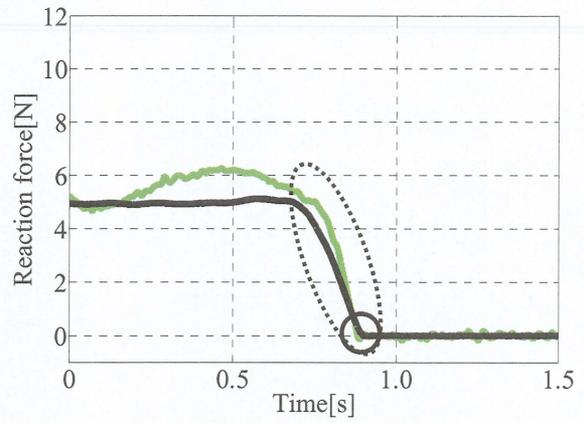


(f) $m = 1.0\text{kg}$

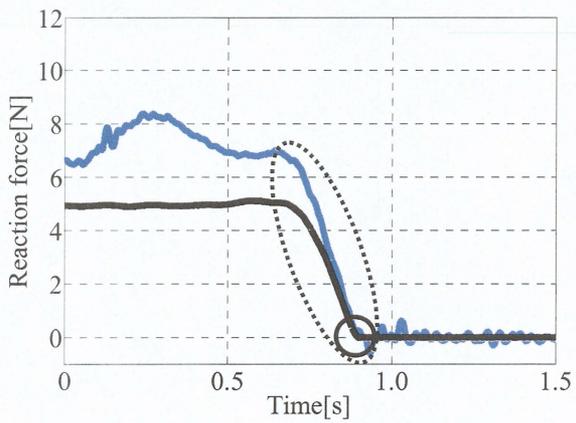
Fig.3.7 被験者 B の反力測定値



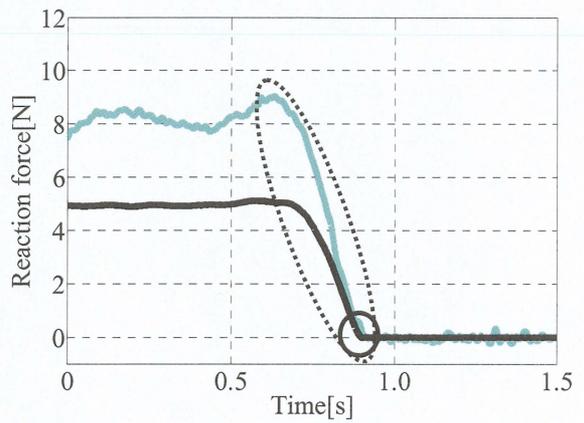
(a) $m = 0.5\text{kg}$



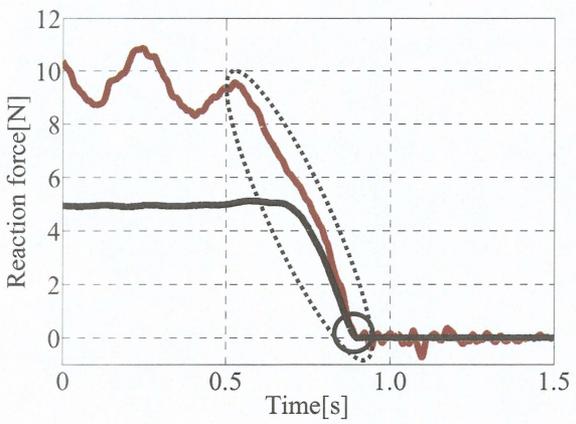
(b) $m = 0.6\text{kg}$



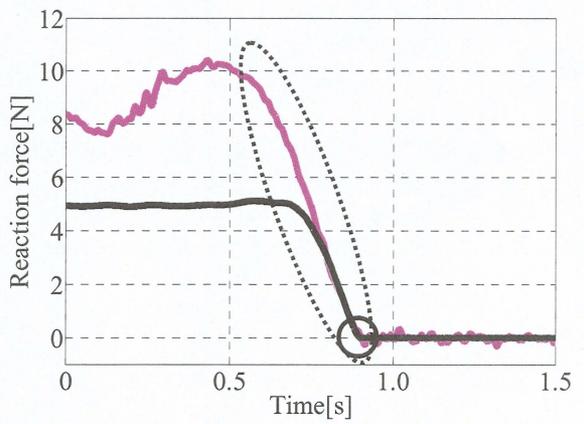
(c) $m = 0.7\text{kg}$



(d) $m = 0.8\text{kg}$

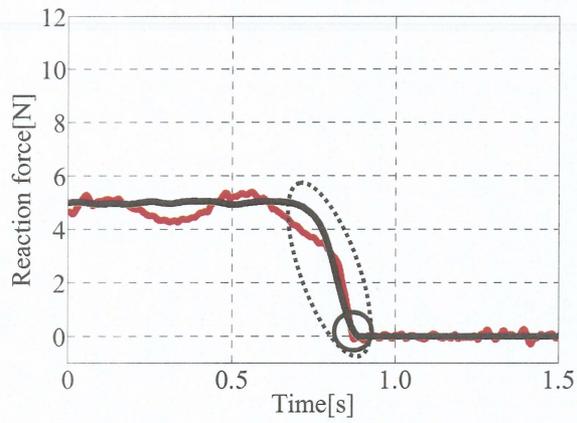


(e) $m = 0.9\text{kg}$

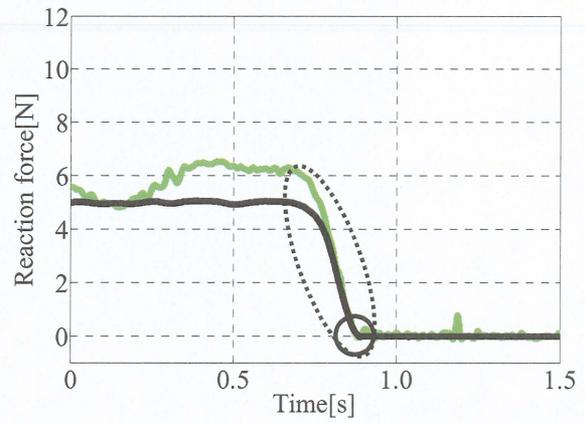


(f) $m = 1.0\text{kg}$

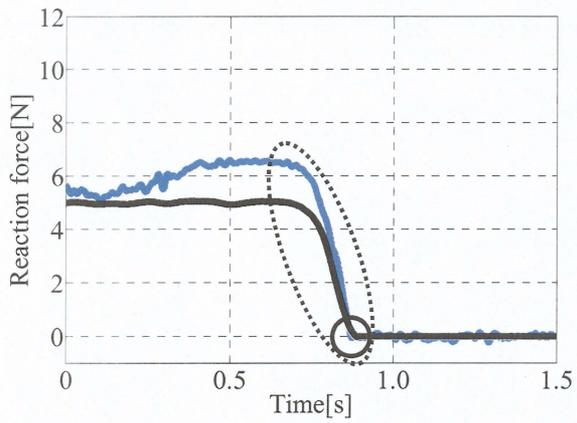
Fig.3.8 被験者 C の反力測定値



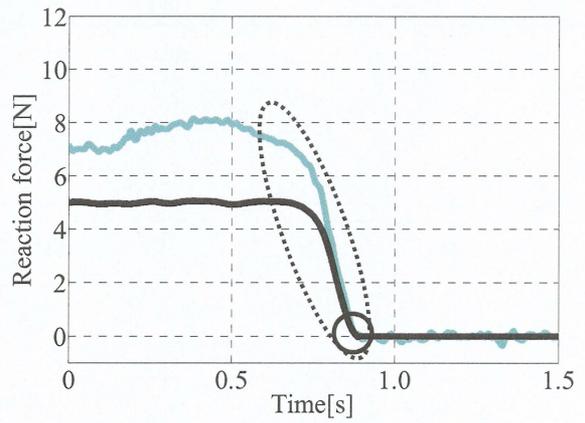
(a) $m = 0.5\text{kg}$



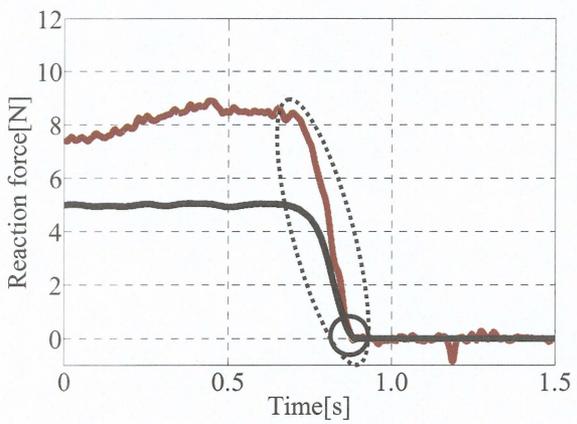
(b) $m = 0.6\text{kg}$



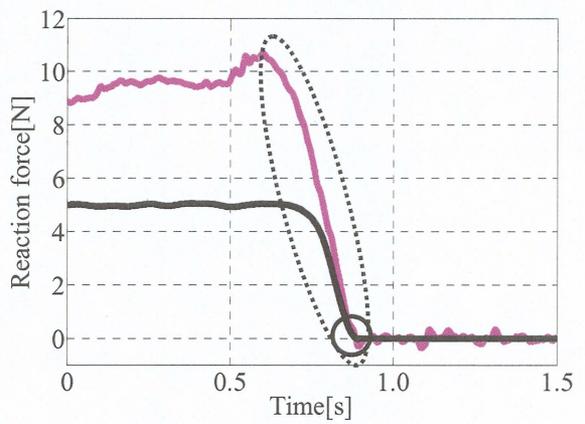
(c) $m = 0.7\text{kg}$



(d) $m = 0.8\text{kg}$

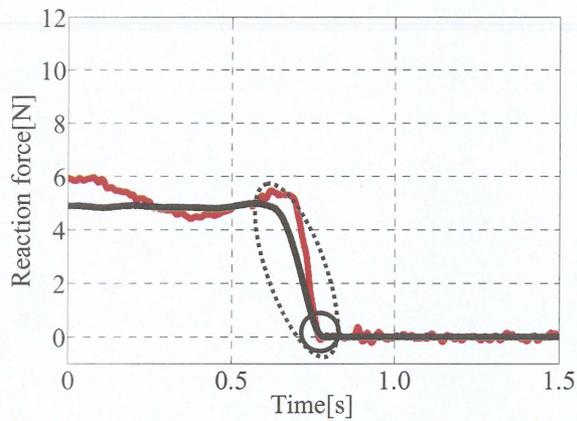


(e) $m = 0.9\text{kg}$

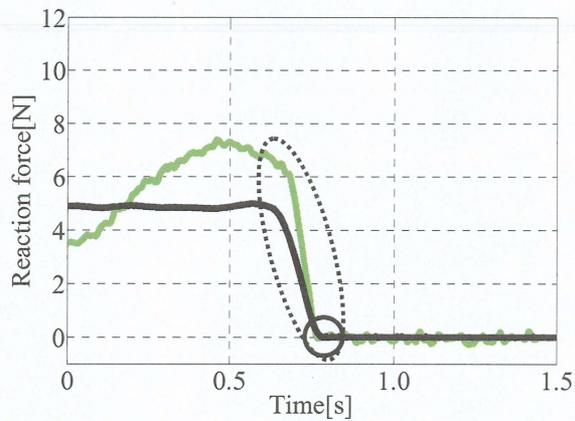


(f) $m = 1.0\text{kg}$

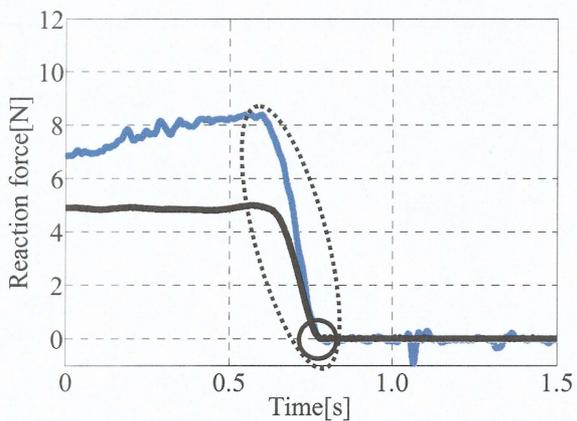
Fig.3.9 被験者 D の反力測定値



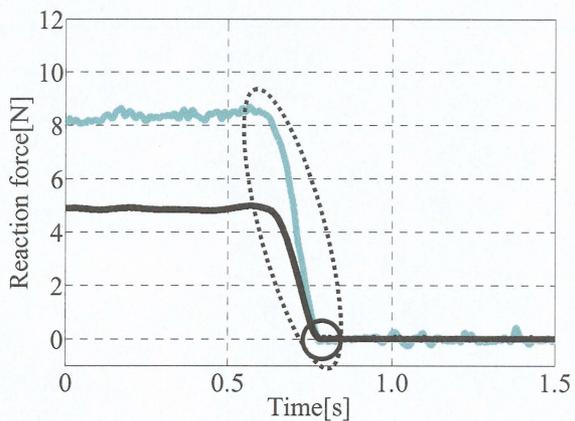
(a) $m = 0.6\text{kg}$



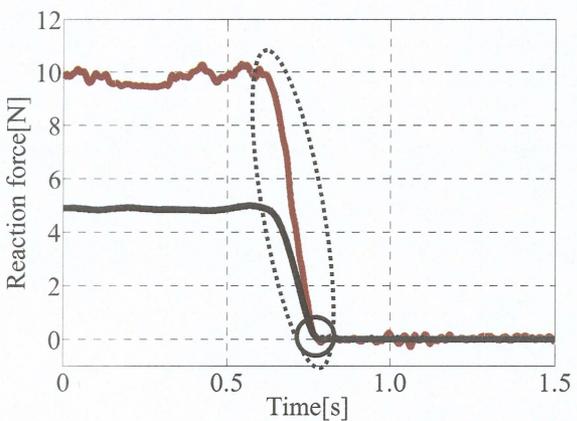
(b) $m = 0.7\text{kg}$



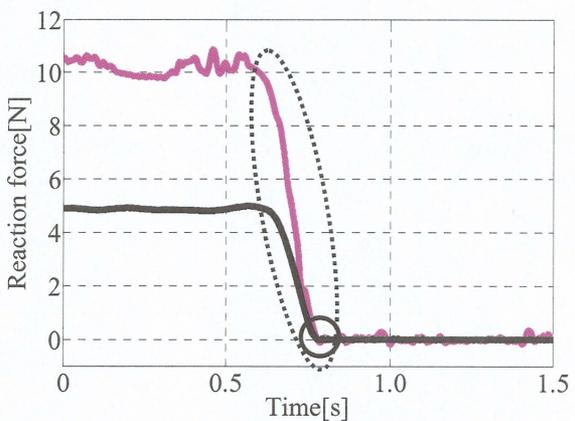
(c) $m = 0.8\text{kg}$



(d) $m = 0.9\text{kg}$



(e) $m = 1.0\text{kg}$



(f) $m = 1.1\text{kg}$

Fig.3.10 被験者 E の反力測定値

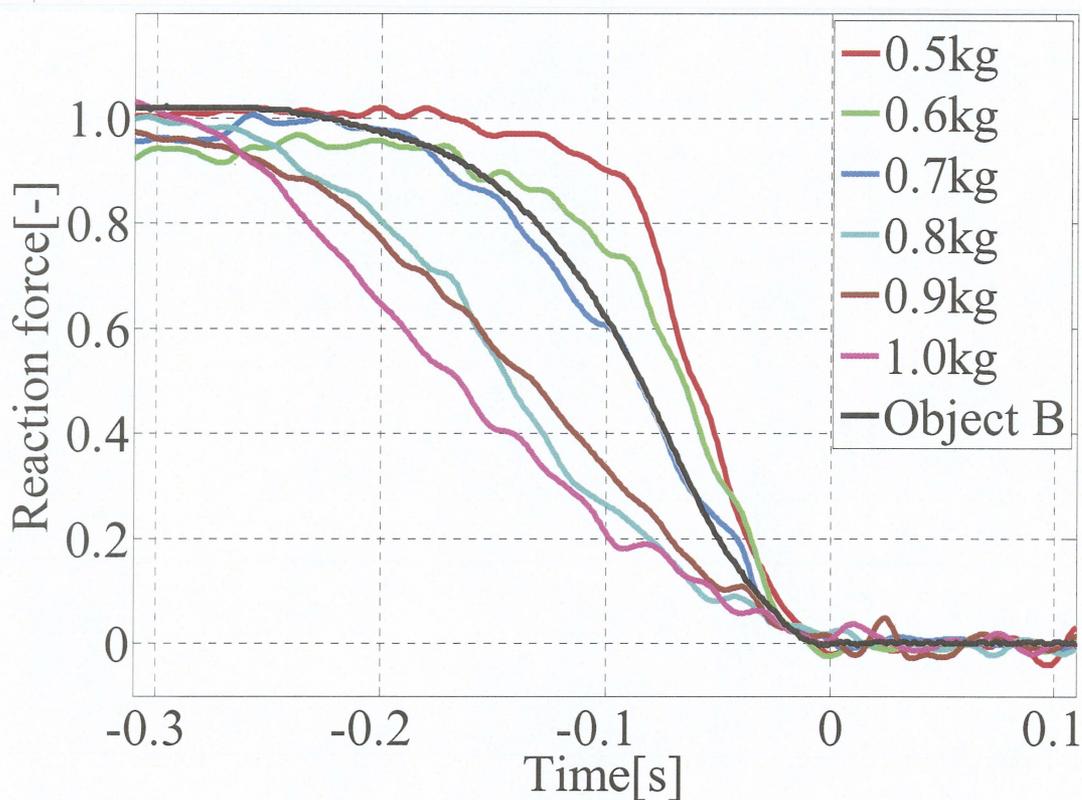


Fig.3.11 正規化された反力測定値 (被験者 A)

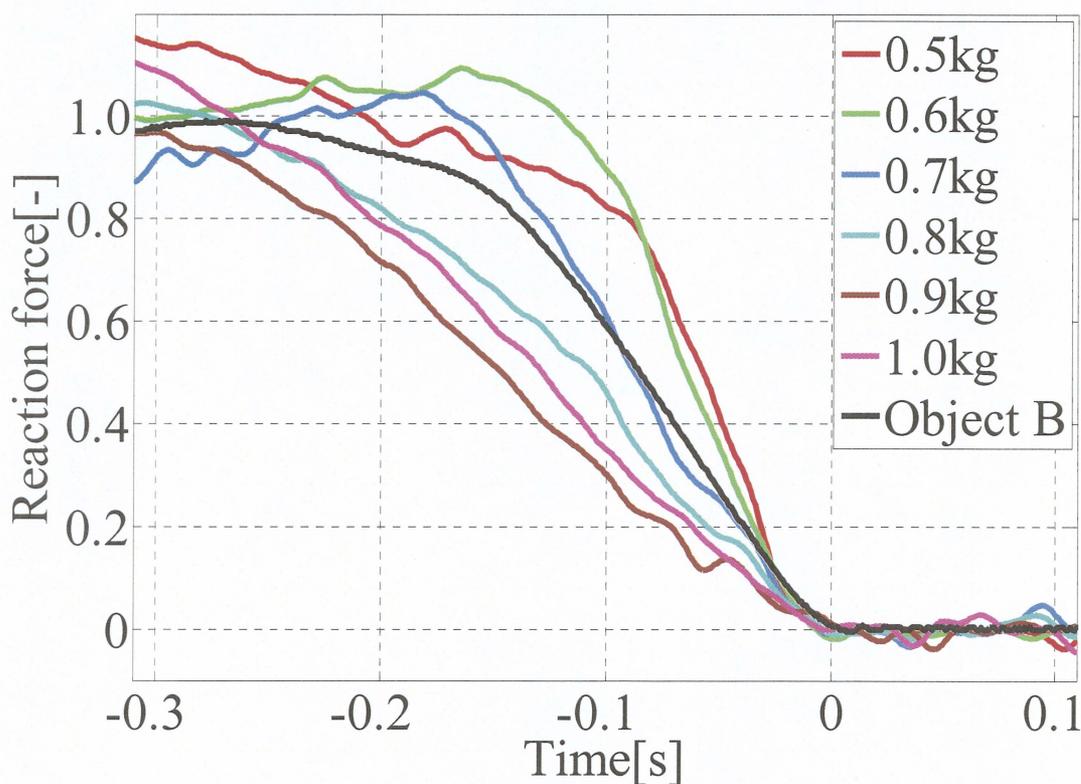


Fig.3.12 正規化された反力測定値 (被験者 B)

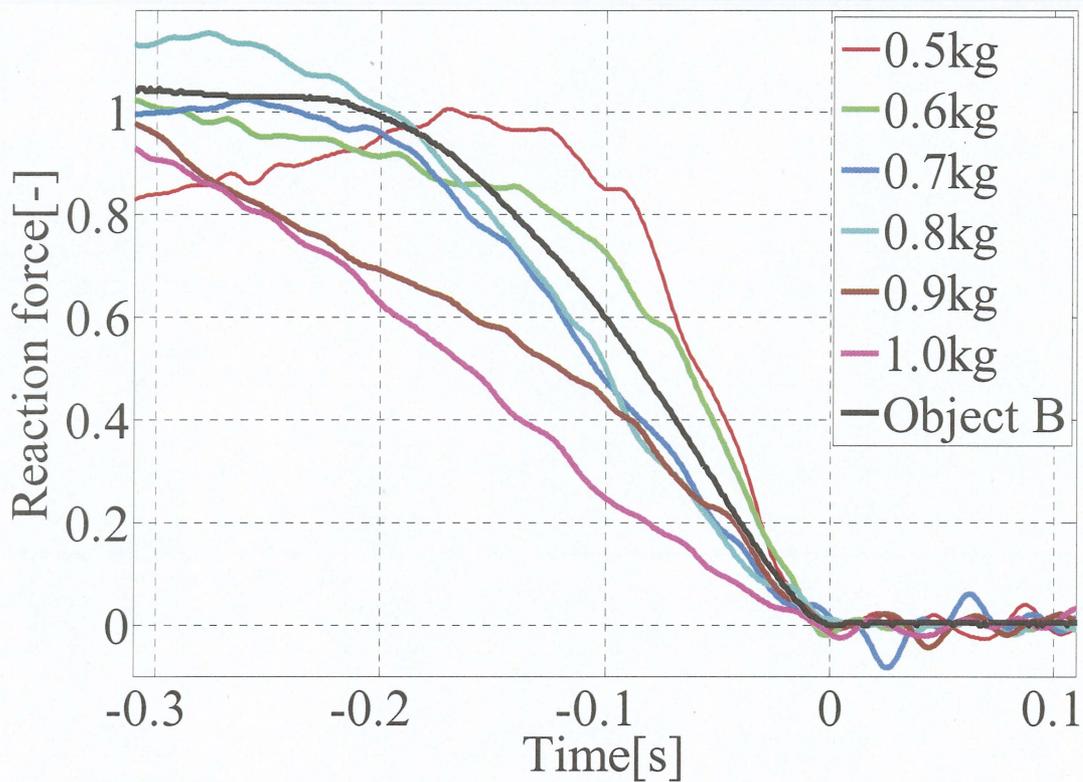


Fig.3.13 正規化された反力測定値 (被験者 C)

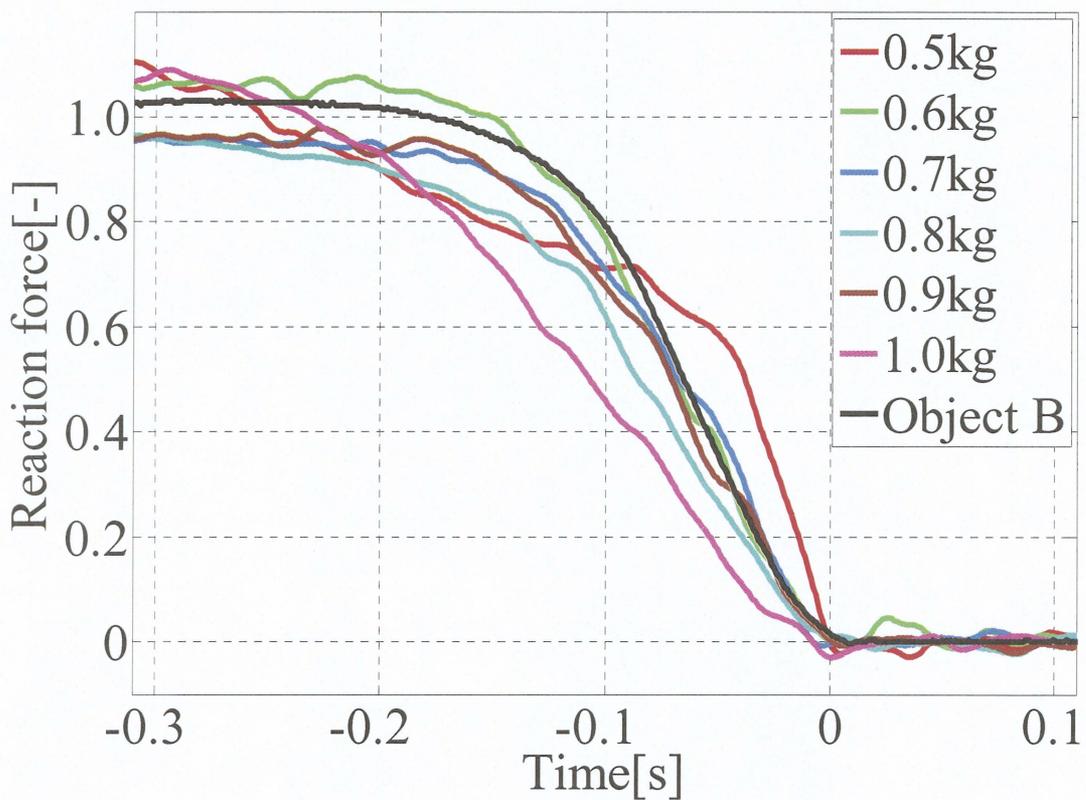


Fig.3.14 正規化された反力測定値 (被験者 D)

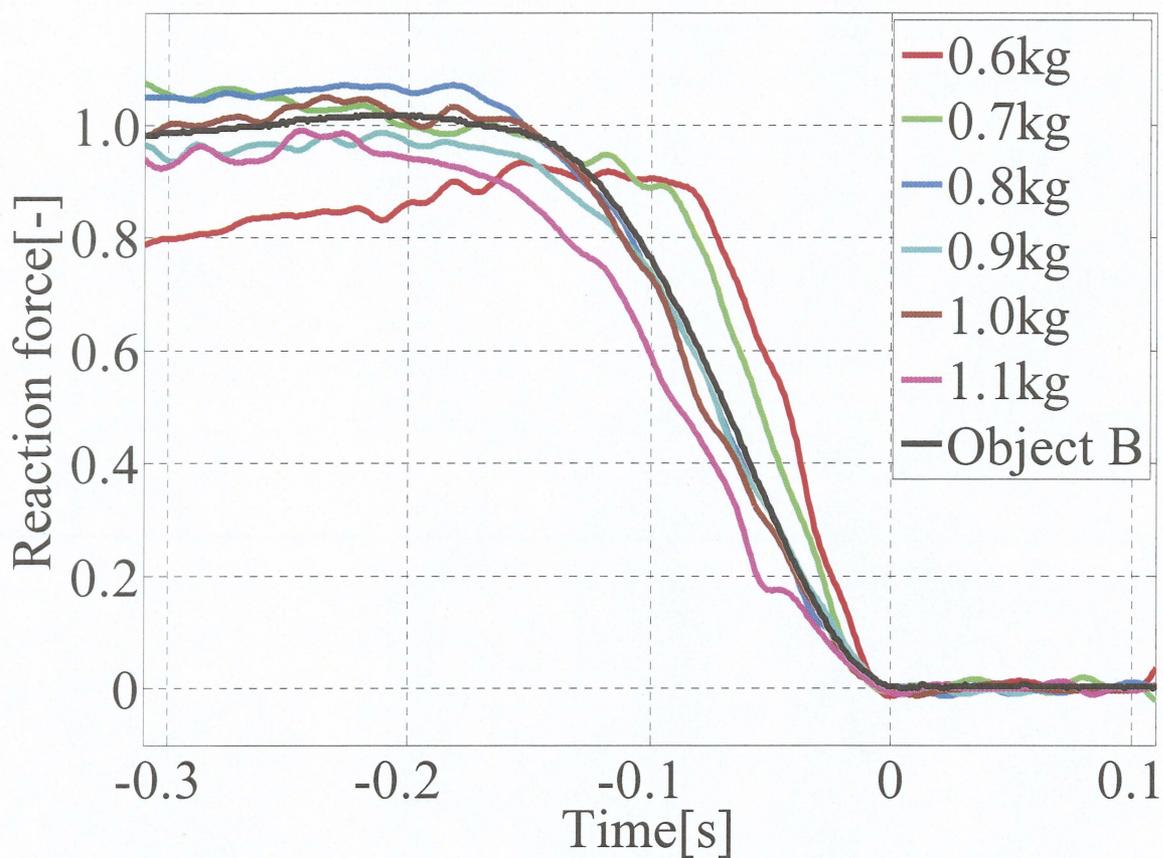


Fig.3.15 正規化された反力測定値 (被験者 E)

第4章

重量知覚の差異検証シミュレーション

4.1 実験システムの時間遅れ検証

第3章で分かった物体Aの持ち上げ時と物体Bの持ち上げ時の重量の差異が実験システムの時間遅れによるものと仮定し、実際は物体Aの持ち上げの際は実験システムの遅れが入っているが、入っていない場合の物体Aの持ち上げをシミュレーションで行い、時間遅れが重量の差異を発生させた原因であるのかを検証する。その検証のためにまず、実験装置にどのくらいの時間遅れが入っているのかを調査する。

実験システムの時間遅れ検証のためのブロック線図を Fig.4.1 示す。実験システムは第3章と同じで、ステップ応答をサーボドライブに入力し、入力された速度に応じて物体の変位が発生するので、その変位の微分と入力した指令速度を比較する事によって、遅れがどのくらい発生したのかを確認する。今回の実験システムは一次遅れなので一次遅れは時定数を調べる事によって推定する。時定数は Fig.4.2 のように立ち上がり (0%) 時の傾斜のまま最終点 (100%) まで到達したと仮定した時間で表現するが、実測により立ち上がり時の傾斜から時定数を正確に求めるのは困難なので一次遅れの計算式から時定数に相当する時間経過したときの値を求めると約 63%になるので、63%に到達する時間を計って時定数を求める^[20]。第3章の物体持ち上げ動作実験で測定された物体Aを持ち上げる最高速度が 0.6[m/s]程度だったのだが、実験装置のストロークの問題もあり、指令速度が 0.1～0.5[m/s]の範囲で時間遅れがどのくらい発生するのかを検証する。

実験システムの遅れ検証の結果を Fig.4.3～Fig.4.7 に示す。横軸がシステム作動時を $t=0[s]$ としたときの時間 $t[s]$ であり、今回はシステムが作動してから 2 秒後にステップ応答が入力されるようになっており、縦軸は速度[m/s]である。Fig.4.3～Fig.4.7 は順に、速度が 0.1[m/s], 0.2[m/s], 0.3[m/s], 0.4[m/s], 0.5[m/s] の場合で、(a) はシステムが作動してから速度をステップ入力し、速度が変化している 2 秒後から ± 0.1 秒の結果を示し、(b) は (a) の拡大図を示している。そして、ステップ入力の指令速度が赤色で、物体の変位の微分を青色で示している。Fig.4.3 を見ると指令速度が 0.1[m/s] で、時定数が 0.063[m/s] 地点になるので、対応する時間は 0.012[s] となった。Fig.4.4～Fig.4.7 も同様に、時定数に対応する時間は 0.012[s] となった。よって、一次遅れを 0.012[s] として、遅れの有無によるシミュレーションを行う。

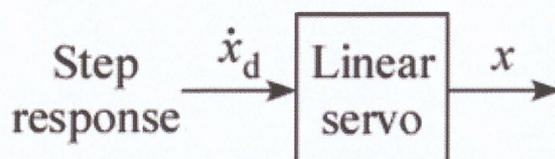


Fig.4.1 ブロック線図

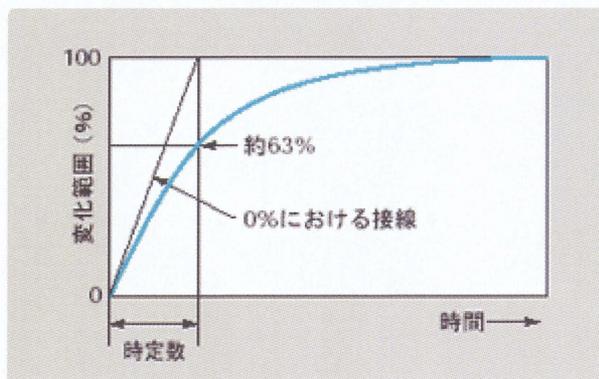
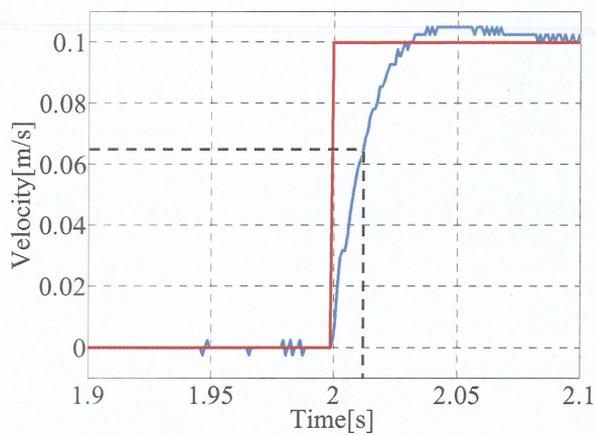
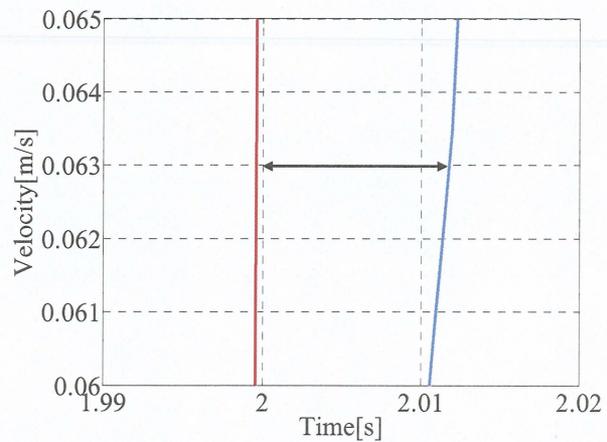


Fig.4.2 時定数の求め方

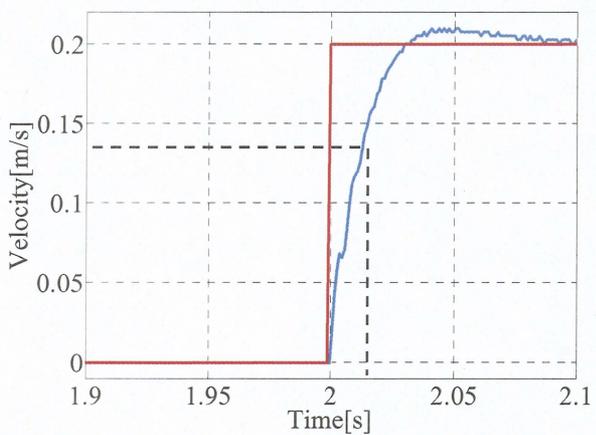


(a)速度変化付近

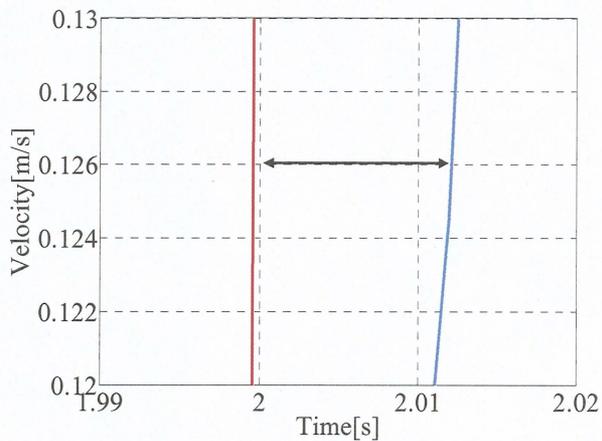


(b)拡大図

Fig.4.3 指令入力速度 0.1m/s

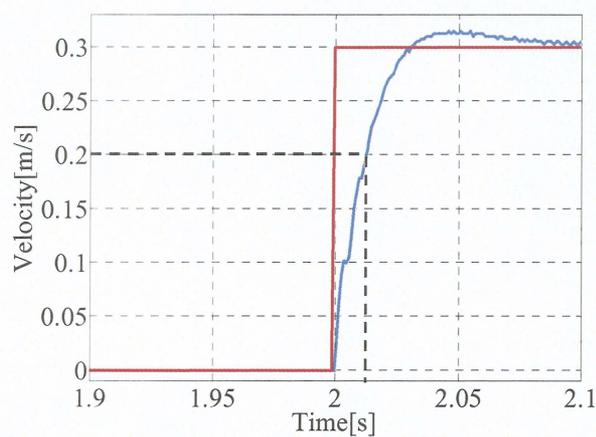


(a)速度変化付近

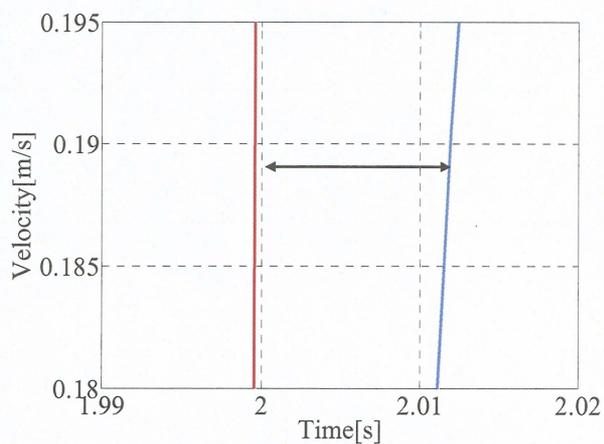


(b)拡大図

Fig.4.4 指令入力速度 0.2m/s

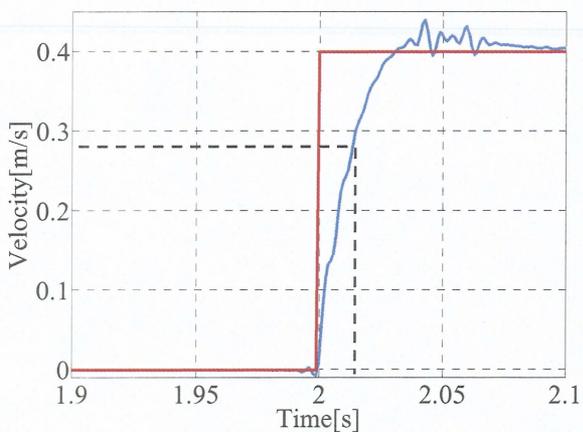


(a)速度変化付近

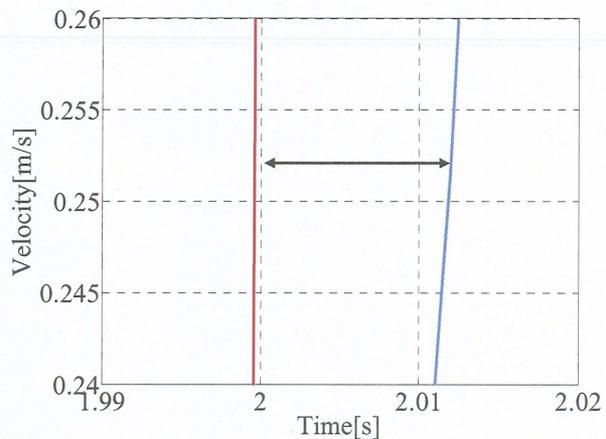


(b)拡大図

Fig.4.5 指令入力速度 0.3m/s

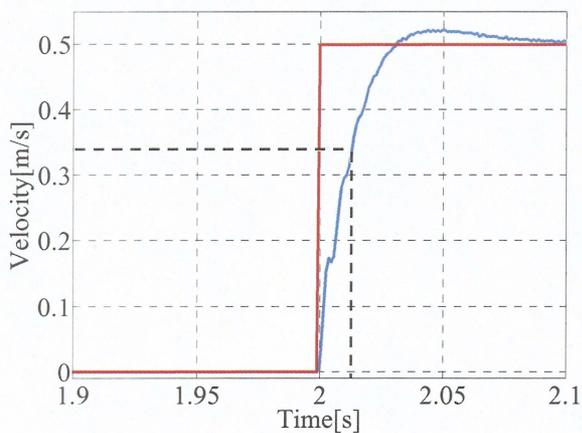


(a)速度変化付近

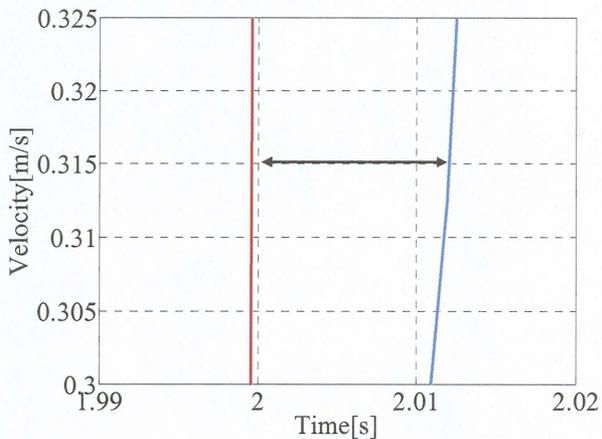


(b)拡大図

Fig.4.6 指令入力速度 0.4m/s



(a)速度変化付近



(b)拡大図

Fig.4.7 指令入力速度 0.5m/s

4.2 シミュレーション方法と結果

4.2.1 シミュレーション方法

物体が持ち上がるまでの時間が時間遅れの有無によってどのような差が表れるかをシミュレーションで検証する。シミュレーションは第3章の実験システムをもとに行う。Fig.4.5, Fig.4.6 にシミュレーションで用いたブロック線図を示す。Fig.4.5 は実際の実験装置と同様に速度指令が入るサーボドライブの位置に時間遅れが入っており、4.1 節で判明した時定数 $0.012[\text{m/s}]$ を用いる。Fig.4.6 は実際の実験装置とは異なり時間遅れが入っていない。第3章で用いた制御の目標モデルの式は

$$m \dot{x} = f_h - mg \quad (4.1)$$

と持ち上げる力を入力としていたが、シミュレーションでは第3章では仮想質量と重力加速度をかけたもの mg から第3章で測定したパワーアシスト装置を用いて物体を持ち上げた際のテーブルからの反力 R を引いたものを、物体を持ち上げた際に加えた力 $mg-R$ を入力とし、(4.1)式を

$$m \dot{x} = (mg-R) - mg \quad (4.2)$$

とする。

また、実際の実験装置ではスポンジの上に物体を置き、スポンジが少し沈んでから物体を持ち上げるので、スポンジのバネ-ダンパ特性を考慮して物体を持ち上げる際に加える力にばね定数 K に変位を掛けたものとダンパ定数 C に速度を掛けたものをフィードバックしている。よって、(4.2)式は

$$m \dot{x} = (mg-R) - C \dot{x} - Kx - mg \quad (4.3)$$

となる。この式を用いてシミュレーションを行い、出力の変位 x を比較することによってパワーアシスト装置を用いて物体を持ち上げた際に通常の物体持ち上げより軽く感じた原因を調査する。

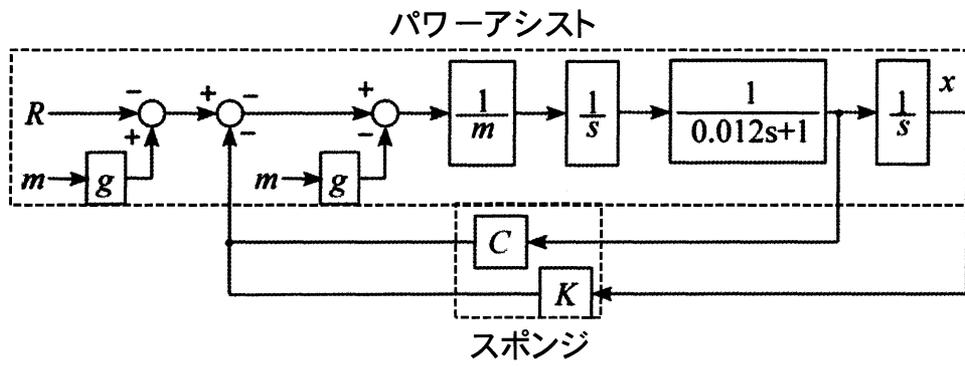


Fig.4.8 時間遅れ有りのシミュレーションのブロック線図

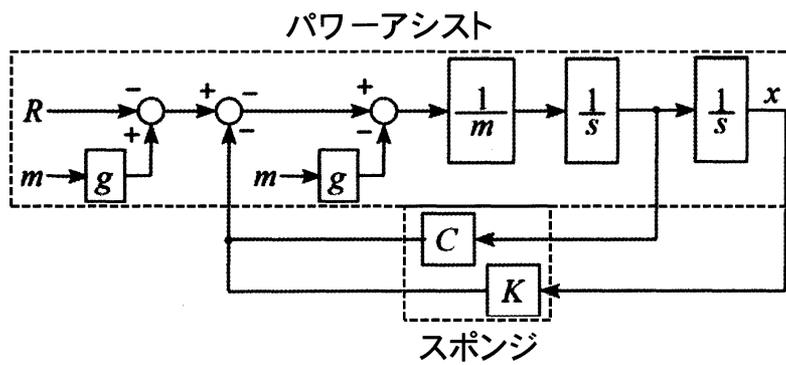


Fig.4.9 時間遅れ無しのシミュレーションのブロック線図

4.2.2 シミュレーション結果と考察

4.2.2 シミュレーション結果と考察

時間遅れの有無による物体持ち上げ時のシミュレーションの結果を Fig.4.10 から Fig.4.19 に示す。Fig.4.10～Fig.4.14 はパワーアシスト装置を用いて仮想質量 $m=0.5[\text{kg}]$ の物体を持ち上げた際の反力を用いた場合の各被験者の結果であり、赤が時間遅れ無しの場合、青が時間遅れ有りの場合である。図中の横軸は時間 [s] であり、縦軸は物体を持ち上げた際の変位[m]を示している。図の初期位置が -10mm から始まっているのは物体の仮想質量が $0.5[\text{kg}]$ で、スポンジのばね定数が $490[\text{N/m}]$ なので、スポンジが沈んだ分を初期位置としているためである。また、ダンパ定数を $25[\text{Ns/m}]$ としている。Fig.4.15～Fig.4.19 は Fig.4.10～Fig.4.14 を拡大し、物体が持ち上がる寸前の変位が 0m 付近のシミュレーション結果を示したものである。

Fig.4.15～Fig.4.19 も赤が時間遅れ無しの場合、青が時間遅れ有りの場合の実験結果であり、図中の横軸は時間 [s] であり、縦軸は物体を持ち上げた際の変位[m]を示している。Fig.4.15 の被験者 A の結果をみると、物体がスポンジから離れる場所である 0m 付近を見ると時間遅れが入っている方が入っていない方より 0.02 秒程度速く物体が持ち上がっていることが分かる。また、Fig.4.16～Fig.4.19 より、別の被験者でも時間遅れが入っている方が入っていない方より $0.02\sim 0.03$ 秒程度速く物体が持ち上がっていることが分かった。

以上の結果より、全ての被験者において時間遅れが入っていない場合より入っている場合の方が物体を持ち上げ始めてから物体がスポンジから離れるまでの時間が短いことが分かった。第 3 章の結果より物体の仮想質量が軽くなればなるほど、物体を持ち上げ始めてから物体がスポンジから離れるまでの時間が短くなったので、物体が速く持ち上げれば上がるほど、その物体の重量は軽く感じることが分かった。よって、時間遅れが入ったことによって時間遅れが入っていない場合より物体が速く持ち上がったことが、同じ質量でもパワーアシスト装置を用いた物体持ち上げ時に通常の物体持ち上げ時より軽く感じた原因ではないかと考えられる。シミュレーションでは時間遅れが入っている方が入っていない方より $0.02\sim 0.03$ 秒程度速く物体が持ち上がっていることが分かったが、実際に仮想質量が 0.5kg の場合のパワーアシスト装置を用いた物体持ち上げ時と 0.5kg の通常の物体持ち上げでは、時間遅れの入っているパワーアシスト装置を用いた物体持ち上げの方が 0.1

秒ほど早く物体が持ち上がっている。シミュレーションで設定した遅れ時間とスポンジのばね定数やダンパ定数は、実際の実験システムやスポンジの特性を模擬しているが、スポンジは非線形なのでまったく同じにはならず異なるので、このような誤差が発生したと考えられる。

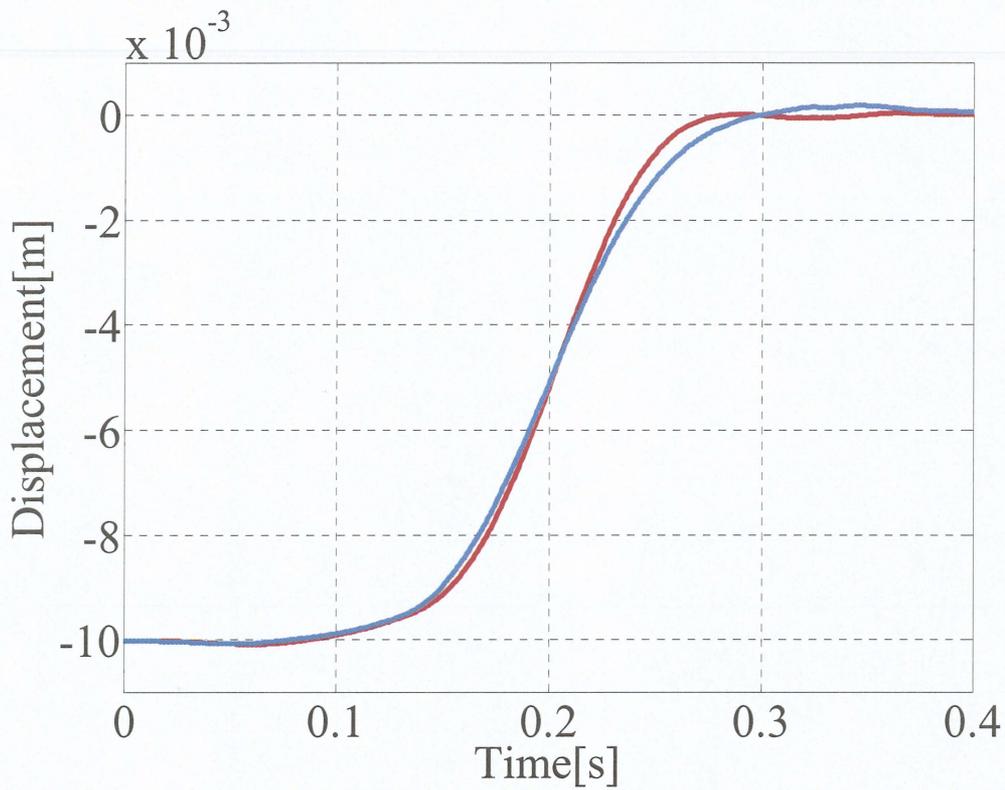


Fig.4.10 物体持ち上げ時の変位 (被験者 A)

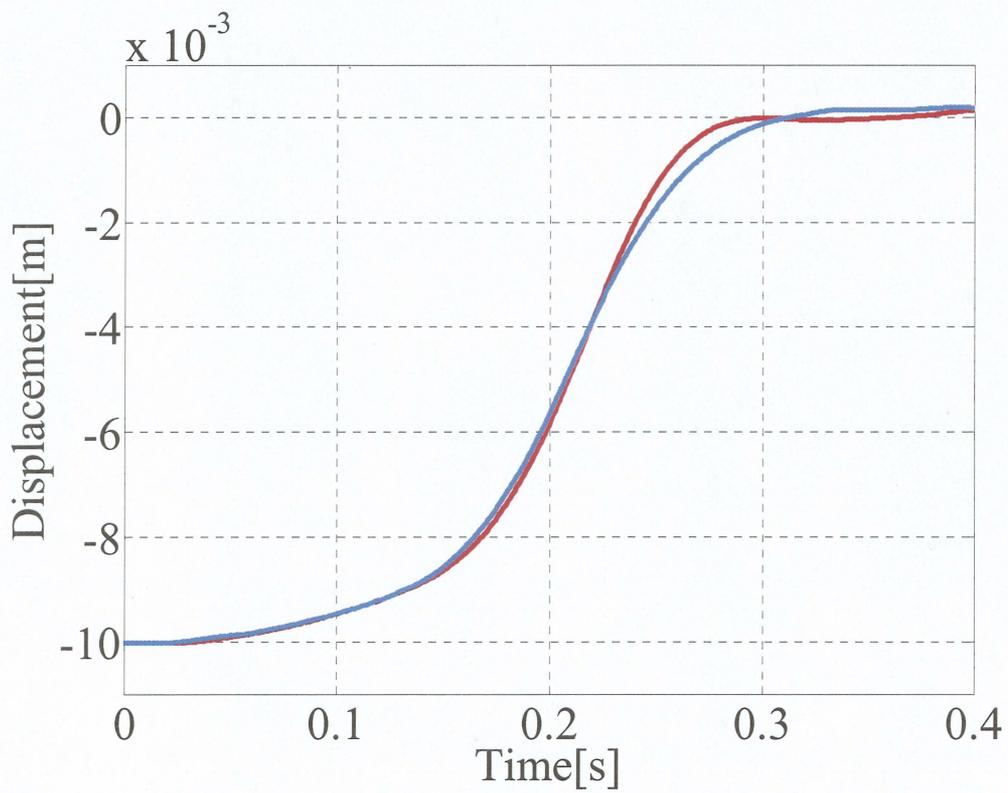


Fig.4.11 物体持ち上げ時の変位 (被験者 B)

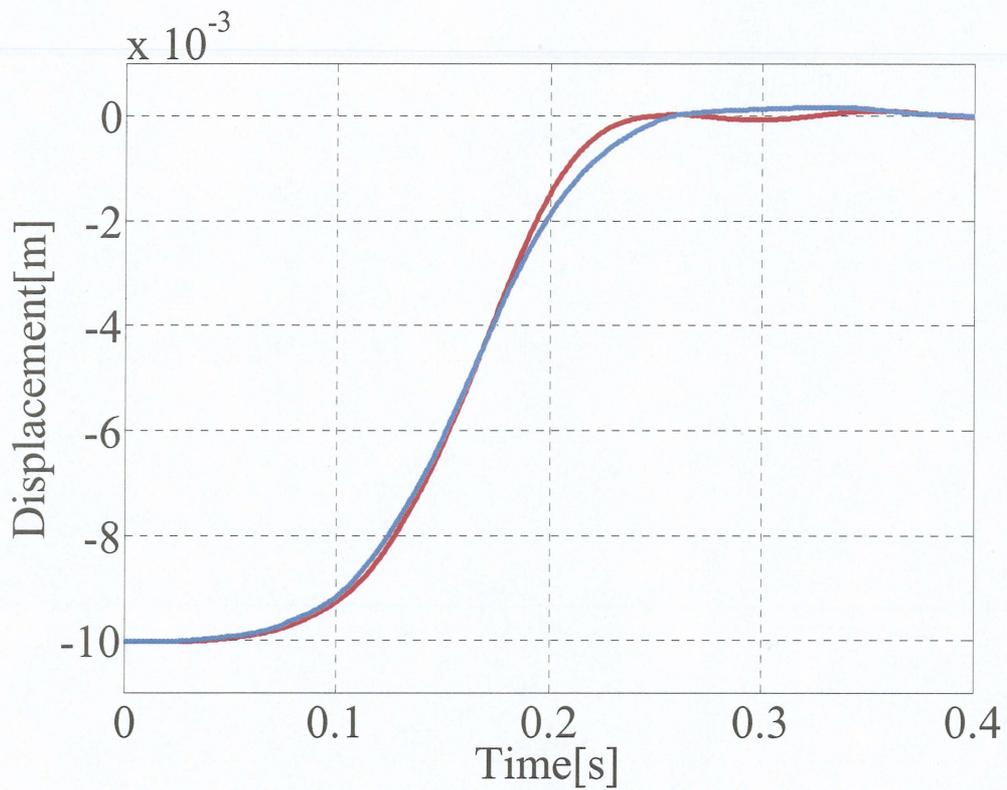


Fig.4.12 物体持ち上げ時の変位 (被験者 C)

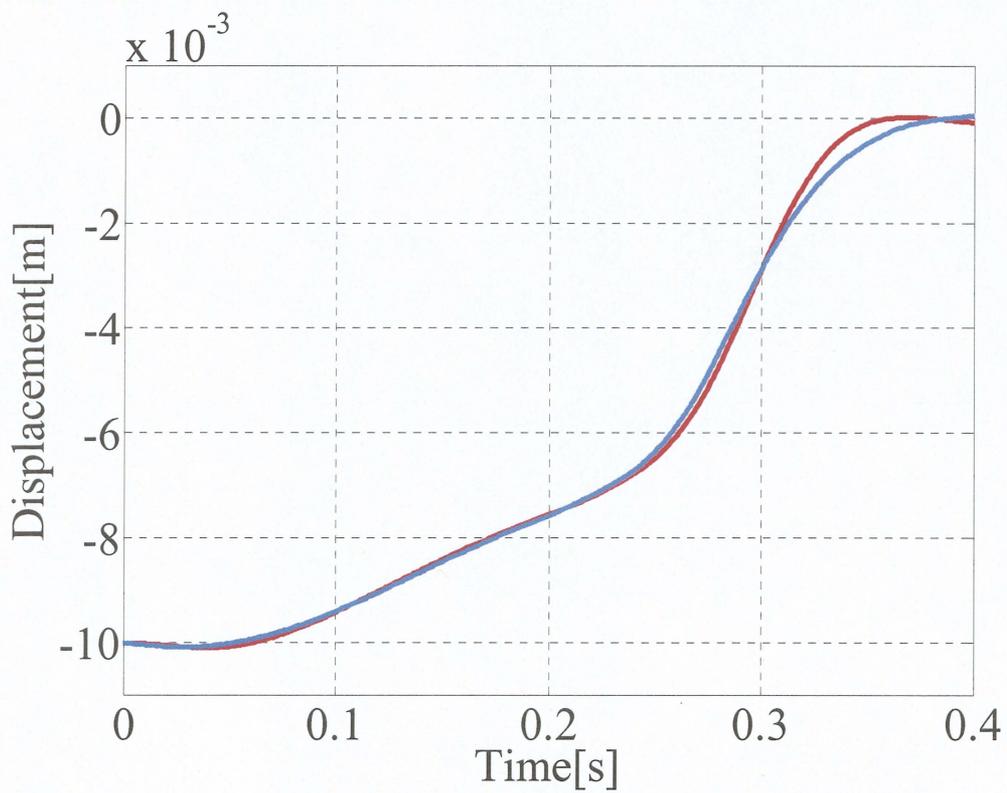


Fig.4.13 物体持ち上げ時の変位 (被験者 D)

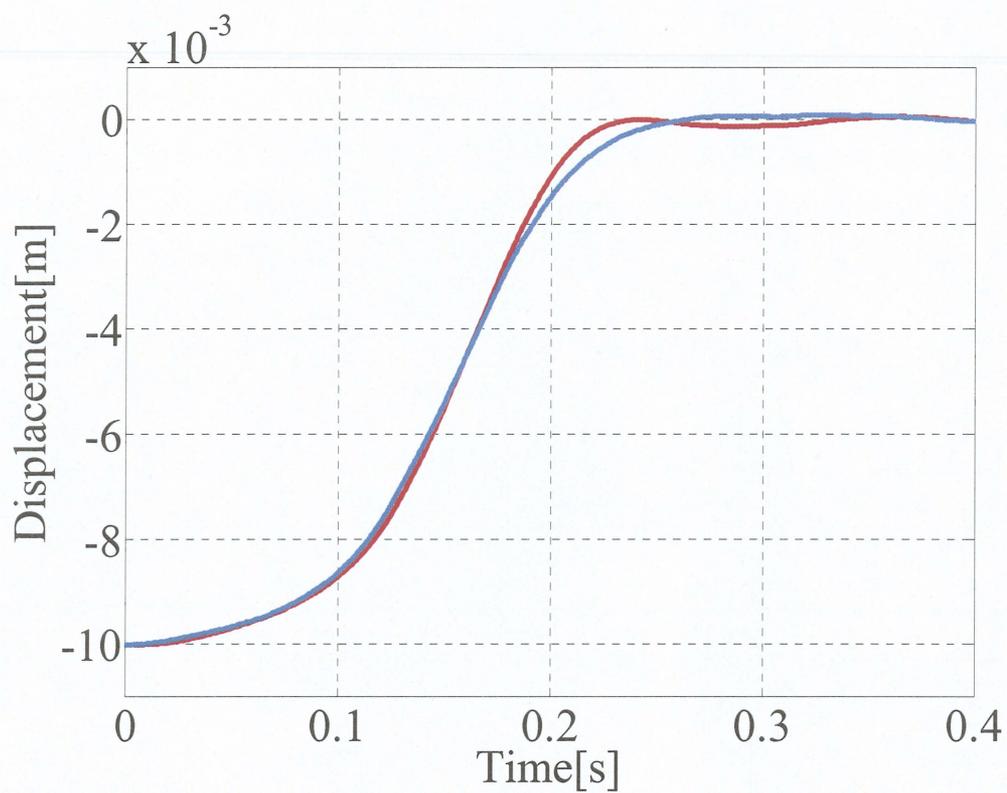


Fig.4.14 物体持ち上げ時の変位 (被験者 E)

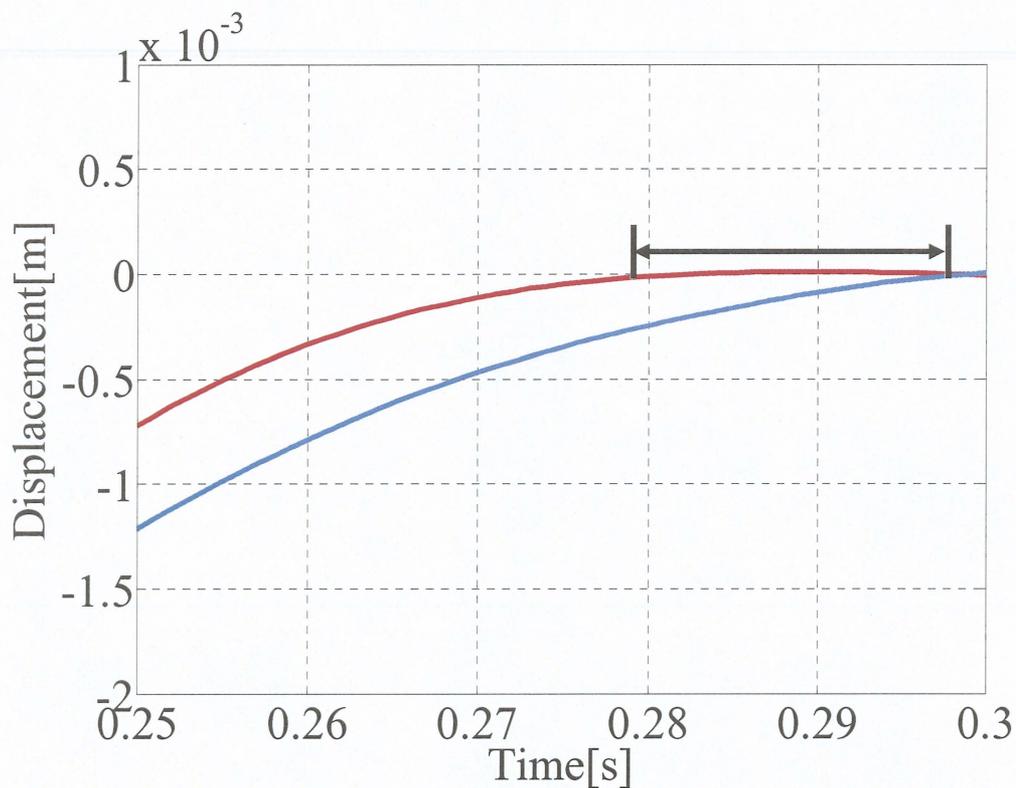


Fig.4.15 0 付近の物体持ち上げ時の変位 (被験者 A)

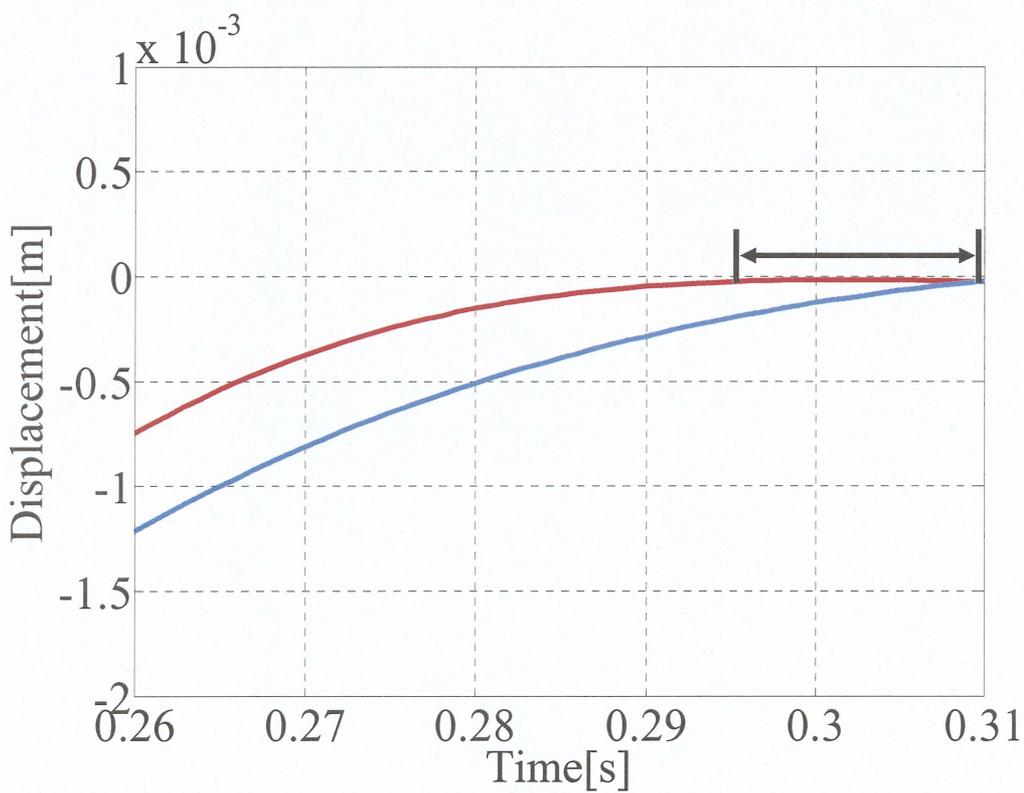


Fig.4.16 0 付近の物体持ち上げ時の変位 (被験者 B)

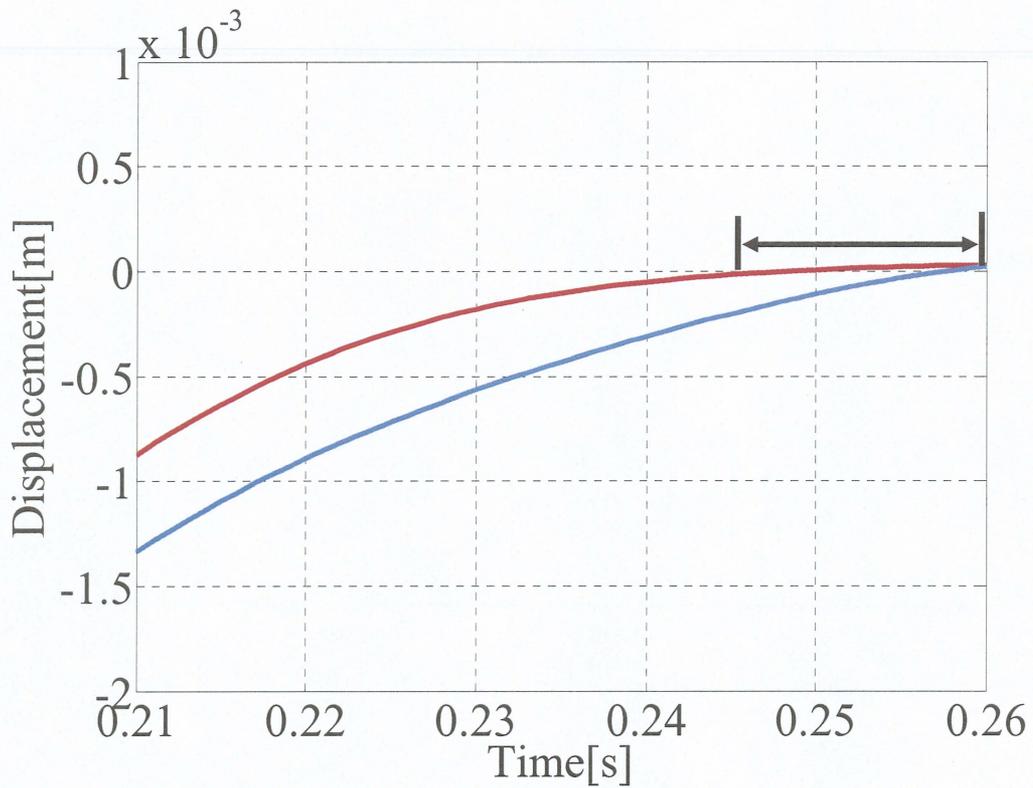


Fig.4.17 0 付近の物体持ち上げ時の変位 (被験者 C)

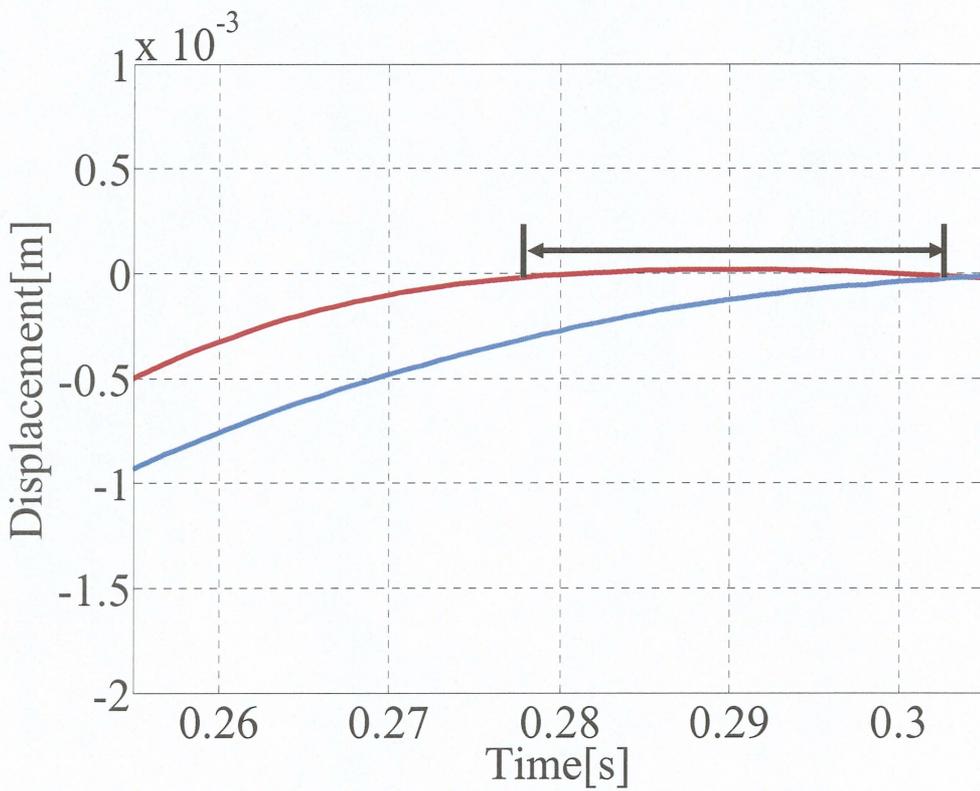


Fig.4.18 0 付近の物体持ち上げ時の変位 (被験者 D)

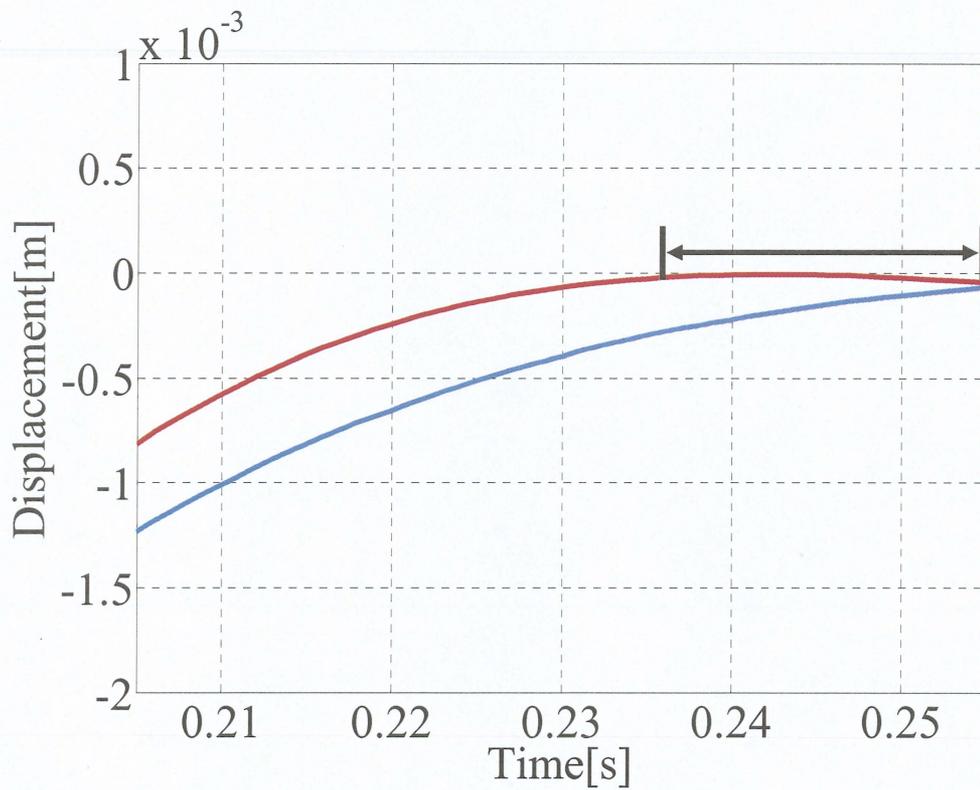


Fig.4.19 0 付近の物体持ち上げ時の変位 (被験者 E)

第5章

結言

5.1 まとめ

パワーアシスト装置の最適な制御手法の考案を目的とし、パワーアシスト装置を用いて物体を持ち上げる際に軽く感じた原因を明らかにするために物体を持ち上げる際の力の加え方や重量の感じ方に関してパワーアシスト装置による影響を検証した。

まず、物体を持ち上げる際の力の加え方や重量の感じ方がパワーアシスト装置によって差異が発生するのかを AC サーボモータによるボールねじ駆動型一自由度パワーアシスト装置によって検証した。重量の感じ方に関しては、パワーアシスト装置を用いて物体を持ち上げる場合と通常の拘束されていない物体を持ち上げることによって重量の比較を行った。その結果、パワーアシスト装置を用いると実際の物体の質量の 6~7 割程度に感じる (0.7kg の物体が 0.5kg に感じる) ことが分かった。物体を持ち上げる際の力の加え方に関しては、物体を持ち上げ始めてから離れるまでのテーブルからの反力を測定することで検証した。その結果、被験者ごとに違いはあるものの、パワーアシスト装置を用いた物体持ち上げ時と通常の物体持ち上げ時に関して、パワーアシスト装置に取り付けられた物体の仮想質量が重くなるにつれて、物体を持ち上げ始めてからテーブルから離れるまでの時間が長くなることが分かり、物体を持ち上げる際の重量の感じ方と物体を持ち上げ始めてから離れるまでのテーブルからの反力が相関していることが分かった。

次に、パワーアシスト装置を用いて物体を持ち上げる際に通常の物体を持ち上げる際より軽く

感じた原因を解明するために、原因が時間遅れによるものと仮定し、時間遅れの有無によって物体を持ち上げる際にどのような差異が出るのかをパワーアシスト装置を用いた物体持ち上げ時のテーブルからの反力を用いてシミュレーションすることで検証した。その結果、全ての被験者において時間遅れ無しの場合より有りの場合の方が物体を持ち上げ始めてから物体がスポンジから離れるまでの時間が短いことが分かった。物体を持ち上げる際の力の加え方の検証で物体が速く持ち上げれば上がるほど、その物体の重量は軽く感じていることが分かったので、時間遅れが入ったことによって時間遅れが入っていない場合より物体が速く持ち上がったことが、同じ質量でもパワーアシスト装置を用いた物体持ち上げ時に通常の物体持ち上げ時より軽く感じた原因ではないかと考えられる。

5.2 今後の課題

今後の課題として、本研究では持ち上げ物体の寸法が一種類だったが、寸法を変えることによって物体を持ち上げる際の力の加え方や重量の感じ方がどのように影響するのかを調査していく。また、今回は物体が床から離れた際の反力を測定し、パワーアシスト装置を用いた物体持ち上げの方が通常の物体持ち上げより早く持ち上がったことが分かったが、速く持ち上がってしまうと正常に装置を扱えない場合があるので、その現象を防止する制御方法を考案する必要がある。

参考文献

- [1] 統計局ホームページ/労働力調査, <http://www.stat.go.jp/data/roudou/index.htm>
- [2] 土井達也, 山田宏尚: 「人間を考慮したパワーアシスト装置のシミュレーション」, 日本機械学会論文
文集.C 編, Vol.75, No.752, pp.970-976 (2009)
- [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, Vol.65, No.629, pp.198-205 (1999)
- [4] 高橋徹, 米谷史雄, 奥田裕之, 稲垣伸吉, 鈴木達也: 「表面筋電位と力センサを併用したパワーアシ
ストシステムの開発」, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集,
Vol.2008, pp.1A1-D06(1)-1A1-D06(4) (2008)
- [5] 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*, pp.10-20(1993)
- [6] 木口量夫, Rahman Mohammad Habibur: 「外骨格型ロボットによる上肢日常動作補助」, 日本機械学会
年次大会講演論文集, Vol.2004, No.5, pp.351-352 (2004)
- [7] 李秀雄, 山海嘉之: 「装着型下肢用パワーアシストシステムによる振り運動での仮想インピーダンス
調整に関する研究」, 日本機械学会論文集.C 編, Vol.71, No.705, pp.1686-1695 (2005)
- [8] 佐々木大輔, 則次俊郎, 高岩昌弘, 片岡佑介: 「空気圧ゴム人工筋を用いたマスタ・スレーブ型ウェ
アラブル訓練支援装置の開発」, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集, Vol.2006,
pp.2P2-A29(1)-2P2-A29(3) (2006)
- [9] 加藤寛之, 池浦良淳, 野口真平, 水谷一樹, 中村久, 本田朋寛: 「接触操作を考慮した産業用パワー
アシスト装置のインピーダンス制御」, 日本機械学会論文集.C 編, Vol.72, No.714, pp.514-521 (2006)
- [10] 三好孝典, 鈴木裕一, 寺嶋一彦: 「天井クレーンにおけるパワーアシストシステムの構築」, 日本機
械学会論文集.C 編, Vol.70, No.696, pp.2427-2434 (2004)
- [11] 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, No.716, pp.1178-1183 (2006)
- [12] 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, Vol.68, No.666, pp.509-516 (2002)
- [13] 村山英之, 武居直行, 松本邦保, 鴻巣仁司, 藤本英雄: 「自動車組立ラインのウィンドウ搭載支援ロボ
ット」, 日本ロボット学会誌, Vol.28, No.5, pp.624-630 (2010)
- [14] 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」,
電気学会全国大会講演論文集, Vol.2003, No.3, pp.132-133 (2003)
- [15] 浜口雅史, 谷口隆雄, 矢野賢一: 「動作支援用6自由度マニピュレータのインピーダンス制御 (忘

- 却性を考慮したインピーダンスパラメータのオンライン学習法) 」, 日本機械学会論文集.C 編, Vol.76, No.772, pp.3520-3527 (2010)
- [16] 積際徹, 横川隆一, 柴田浩: 「人間とロボットの力学的な協調を実現するインピーダンス制御法～安全・安心社会を創生する介護・福祉ロボットの実現を目指して～」, 日本機械学計算力学講演会講演論文集, Vol.2007, No.20, pp.48-49 (2007)
- [17] 田窪朋仁, 荒井裕彦, 林原靖男, 谷江和雄: 「人とロボットによる長尺物の協調運搬: 仮想非ホロノック拘束による 3 次元空間内の制御手法」, 日本機械学会論文集.C 編, Vol.68, No.667, pp.906-913, (2002)
- [18] 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*, pp.681-691 (2009)
- [19] 野邊雅也: 「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」, 三重大学平成 21 年度修士学位論文(2010)
- [20] 計装豆知識 一次遅れ要素と時定数, <http://www.m-system.co.jp/mstoday/plan/mame/1996-1997/9702/>

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 池浦良淳教授には適切に丁寧に研究の方針等の御指導、御助言を頂き、深く感謝致します。

また、御多忙の中本論文を査読して頂くとともに、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 矢野賢一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終始多大なる御指導、御鞭撻を行って頂き、深く感謝致します。

さらに、実験装置の製作にあたり、親身な御協力、御尽力、アドバイスをくださった澤井秀樹技官に厚く御礼申し上げます。

本研究を行うに際しまして、御多忙の中実験に協力していただきました被験者の皆様には貴重な時間を割いていただき、厚く御礼申し上げます。

そして、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。これら各位のご指導、ご協力に対し、心より御礼申し上げます。

最後に、学部・修士の間、惜しめない援助を送ってくださった家族のお陰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。