

平成28年度 修士論文

高出力パワーアシスト装置による
物体運搬の重量知覚特性解析に関する研究

指導教員 池浦 良淳 教授

三重大学大学院工学研究科機械工学専攻

システム設計研究室

415M1B1 BUI MINH NHAT

目次

第1章	緒言	1
1.1	研究背景	1
1.2	本研究室での先行研究	3
1.3	研究の目的	4
第2章	パワーアシスト装置モデルと制御方法	5
2.1	パワーアシスト装置モデリング	5
2.2	制御方法	5
2.2.1	物体が接地するときの制御方法	6
2.2.2	物体が非接地するときの制御方法	6
2.2.3	人の重量感覚の違和感を考慮した慣性制御方法	6
第3章	実験装置	9
3.1	システム設計	9
3.2	パワーアシスト装置	9
第4章	先行研究の実験結果を確認	17
4.1	先行研究の制御方法	17
4.1.1	物体が接地するときの制御方法	17
4.1.2	物体が非接地するときの制御方法	20
4.2	実験方法	20
4.3	実験結果及び考察	21
第5章	パワーアシスト装置による物体を持ち上げる実験	28
5.1	実験方法	28
5.2	実験結果及び考察	31
第6章	結言	50
6.1	まとめ	50
6.2	今後の課題	50
参照文献		52
謝辞		54

付録 55

第1章 緒言

1.1 研究背景

日本の総人口（平成26年）は1億2708万人と平成23年から4年連続の減少であった。図1-1に示すように、65歳以上の高齢者人口は過去最高3300万人となり、高齢者の割合は総人口の26%を占め、2050年には39.9%となることが推計されている⁽¹⁾。図1-2に示す高齢者人口の中、458万人は労働者であり、重工業や製造業において労働力の高齢化が急速に進行している⁽²⁾。さらに、図1-3に示す平成27年の女性の労働者人口は2842万人と前年と比べ18万人が増加し、男性の労働者は3756万人と前年と比べ8万人減少した⁽³⁾。高齢労働者と女性労働者は急激に増加していることが分かった。高齢労働者は体力や筋肉が若年労働者と比べ、衰えるが、工場での作業経験と知識を持っていることが挙げられる。女性労働者の場合、男性より体力が劣るが、微細な作業などが得意ということが挙げられる。高齢労働者と女性労働者に対して、生産現場で重量物を運搬する作業においては大きな肉体的負担となり、労働効率を下げる原因にもなってしまう。ここで、以上の問題に対して、高齢労働者と女性労働者の力を支えるため、パワーアシスト装置を用いて労働者と協調、作業することという解決方法がある。パワーアシスト装置とは、制御システムによるアクチュエータのトルクを出力させる一種のロボットであり、物体運搬作業などに労働者の力をアシストすることができ、人の肉体的負担を減少、作業する時間を短縮する目的としている⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾。パワーアシスト装置の研究は多く行われており⁽⁷⁾⁽⁸⁾⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾、例として、2015年に重量物の上げ下ろし動作時の身体負担を軽減する目的としてパナソニックは図1-4のアシストスーツAWN-03を開発した。作業者に装着でき、最大15kgf出力で作業をサポートすることが可能である⁽¹²⁾。また、生産現場において図1-5の池浦らの産業用パワーアシストシステムもある⁽¹³⁾。重量物を運搬作業するとき、パワーアシスト装置が人間の加えた力を減少することはもちろん、人間の知覚特性と合わせ、協調し、安全に作業することも必要である。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。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。それで、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。

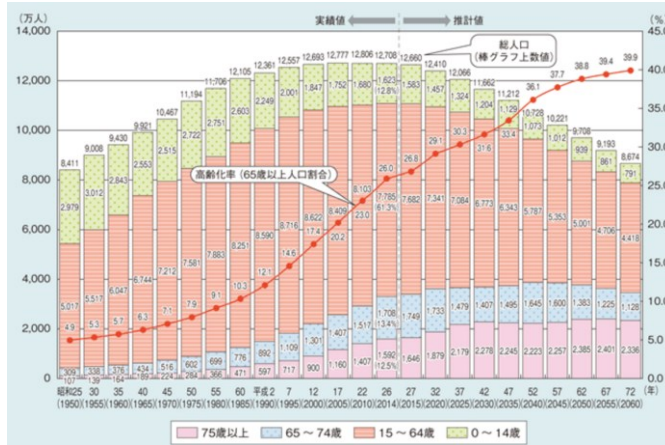


図 1-1 日本の総人口と加齢化の状況

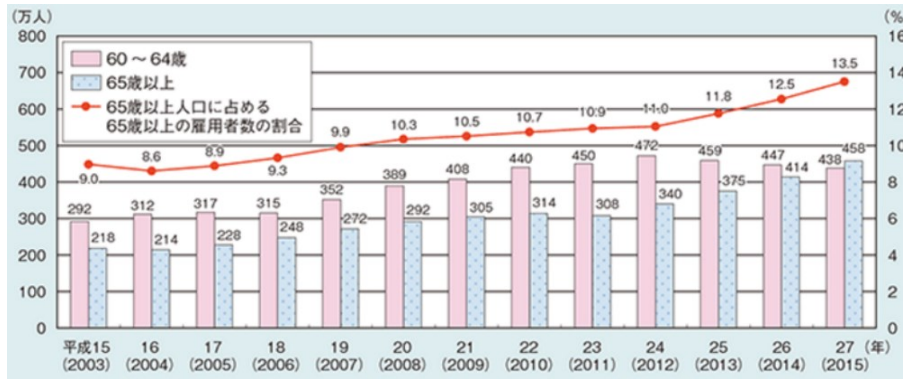


図 1-2 高齢者の職業状況

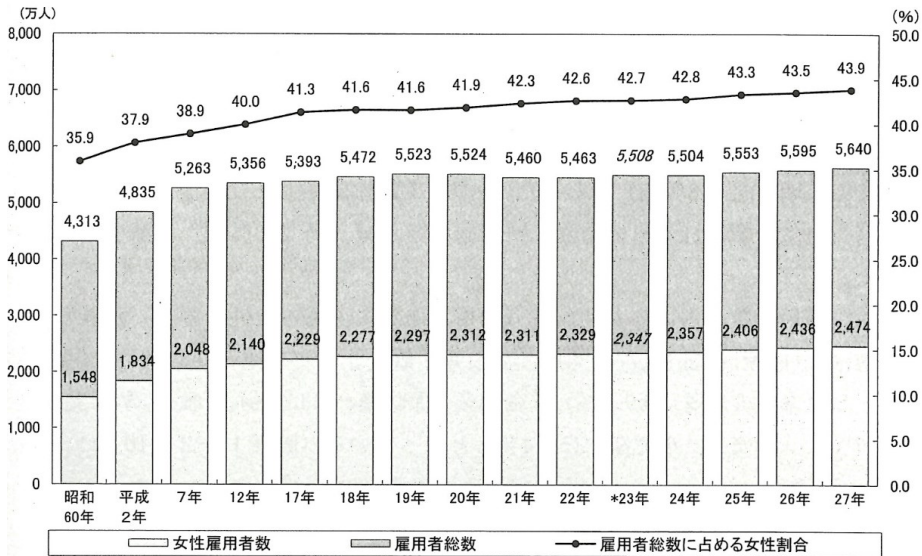


図 1-3 女性労働者の状況



図 1-4 アシストスーツ AWN-03

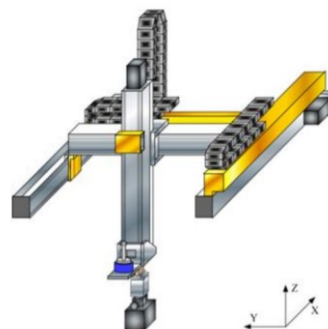


図 1-5 生産用パワーアシスト装置

1.2 本研究室での先行研究

本研究室では、パワーアシスト装置による物体を持ち上げる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。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を持ち上げ時に、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ける力に対する装置の挙動を人間の知覚特性に合わせるよう、作業者の物体持ち上げる時の特性に合ったパワーアシスト装置の最適な制御方法の考案を目標とした。前段階として、図 1-6 のように、ヴォイスコイルアクチュエータによる一自由度のパワーアシスト装置において、パワーアシストされる物体（装置に取り付けられた物体）とアシストされない物体の持ち上げ、二つ物体の重量感覚比較の実験を行い、操作する人間の特性を調査した。この実験によりパワーアシストされる物体を持ち上げた時、パワーアシスト出力により物体に人の力加え方を変えられ、重量感覚を評価した。結果の例として、図 1-7 に示す。結果によると、パワーアシスト装置の入出力特性が変わるに従って、人間の重量感覚は変わったことも分かった⁽¹⁴⁾⁽¹⁵⁾

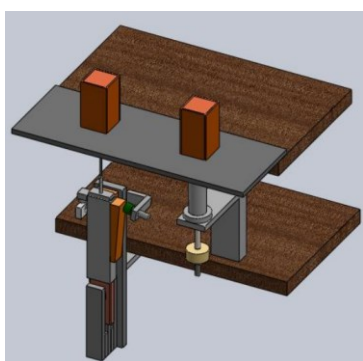


図 1-6 先行研究の実験装置

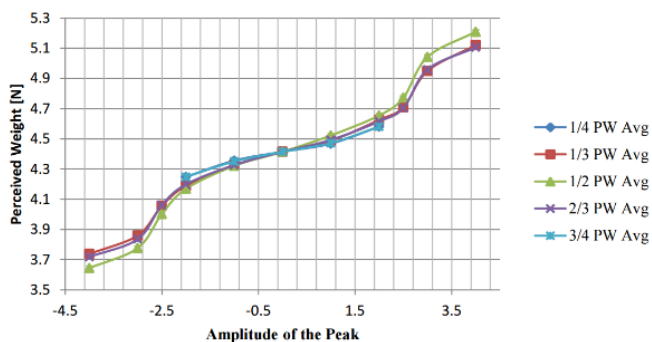


図 1-7 先行研究の実験結果

1.3 研究の目的

先行研究でパワーアシスト技術また理論を研究するため、小出力パワーアシスト装置を用いて、1 [Kg]の物体までしか持ち上げる操作をアシストしなかった。本研究では生産現場で実際10 [Kg]の重量物を運搬する労働者の力をサポートできるように、高出力パワーアシスト装置を設計、製作する。また、高出力パワーアシスト装置に対して、操作する者は違和感が発生すると、大きく違和感が発生して非常に危険な操作してしまう場合もある。人の重量感覚の違和感とは、図1-8に示すように、人間は物体を持ち上げる前に、物体を見て、今までの経験によって物体の重さを判定して、パワーアシストしてない物体を運搬するように大きな力を加え、予想以外、思った重量感覚と体性感覚的な重量感覚の差異が発生したものである。それで、本研究では高出力パワーアシスト装置を用い上げるとき、違和感を少なくし、安全に適切な操作をするために、装置の制御方法を提案する。

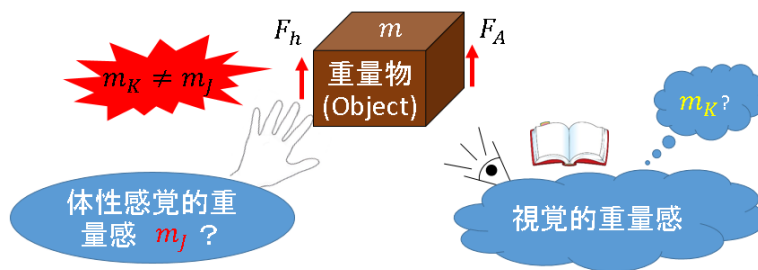


図 1-8 重量感覚の違和感の問題

第2章 パワーアシスト装置モデルと制御方法

2.1 パワーアシスト装置モデリング

本研究では生産現場で物体を持ち上げる作業をする労働者に力をサポートするパワーアシスト装置を制御対象とする。その装置のモデルを図 2-1 に示す。

制御対象の条件は以下ようになる。

- ① 1 自由度の持ち上げ作業において人の力をサポートできる。進行方向は x 軸となる。
- ② 人はホルダを掴んで、装置と協調し物体を持ち上げ時、物体に与える力は人の力 F_h 、パワーアシスト出力 F_A 、物体の重力 mg 、テーブルからの反力 R となる。

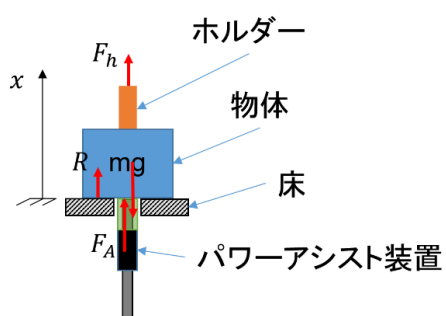


図 2-1 パワーアシスト装置モデル

表 2-1 装置モデルのパラメータ

x	物体の位置	[m]
F_h	人の力	[N]
F_A	パワーアシスト力	[N]
R	反力	[N]
m	物体の質量	[Kg]
g	重力加速度	[m/s ²]
c	アクチュエータの粘性係数	[N. s/m]

可動部分はパワーアシスト装置のアクチュエータの可動子、リニアガイドと物体がある。物体の質量 m とすると、モデルの運動方程式は式 (1) のようになる。

$$m\ddot{x} = F_A + F_h + R - mg - c\dot{x} \quad (1)$$

本研究では、入力 (F_h , R , \dot{x} , \ddot{x}) の情報は各センサから測定可能で、物体の質量も既知であるとする。それで、パワーアシスト装置の出力 F_A を求めることができる。

2.2 制御方法

パワーアシスト装置を用いて、人の力をサポートすると、可動部分を含む質量 m の物体を持ち上げるとき、人の重量感覚を仮想質量 m_d の物体を持ち上げる重量感覚と同じように、装置システムを制御する目標モデル式は式 (2) に示すようになる。

$$m_d\ddot{x} = F_h + R - m_dg - c_d\dot{x} \quad (2)$$

ただし、 m_d は仮想質量[kg]、 c_d は仮想減衰係数[N. s/m]である。

本研究では物体を持ち上げる操作は、物体の接地過程と物体の非接地過程の 2 段階に分ける。

2.2.1 物体が接地するときの制御方法

式(1)と式(2)から、物体が接地状態であるとき、加速度と速度は0となり、力の釣り合い式は以下ようになる。

$$0 = F_A + F_h + R - mg \quad (3)$$

$$0 = F_h + R - m_d g \quad (4)$$

式(3)から人の力 F_h を求めて、式(4)に代入すると、パワーアシスト装置の出力は式(5)のようになる。

$$F_A = (m - m_d)g \quad (5)$$

2.2.2 物体が非接地するときの制御方法

物体が接地状態で、パワーアシスト装置の出力は一定となり、人の力 F_h は $m_d g$ までなると、物体はテーブルを離れて、非接地状態となる。

物体が非接地状態である時、反力 R は0となり、物体が加速度され、始めに動く。式(1)と式(2)から、次の運動方程式となる。

$$m_d \ddot{x} = F_h - m_d g - c_d \dot{x} \quad (6)$$

$$m \ddot{x} = F_A + F_h - mg - c \dot{x} \quad (7)$$

パワーアシストされる物体の運動と目標モデルの運動を合わせて、式(6)から求めた加速度 \ddot{x} を、式(7)に代入すると、パワーアシスト出力 F_A は

$$F_A = \left(\frac{m}{m_d} - 1 \right) F_h + \left(c - \frac{m}{m_d} c_d \right) \dot{x} \quad (8)$$

と得る。

2.2.3 人の重量感覚の違和感を考慮した慣性制御方法

装置に取り付けられた物体を持ち上げようとするとき、人間は視覚印象から、物体の重さを判定して、図2-2に示す赤色の点線のように、物体の動きを予想する。しかし、判定した重さは実際物体の重さより、重い場合、物体を持ち上げると、図2-3に示す赤色の点線のように、持ち上げた瞬間から、物体の加速度が急激に上がって、人間は予想ずれを発覚して、急激に物体を減速し、不安全な操作してしまう。それで、その急激な動きがないように、物体を持ち上げた瞬間から、物体の慣性を制御することが必要である。図2-2に示す緑色の線のように、人の予想した物体の加速度に実際物体の加速を近づけることができると、図2-3に示す緑色の線のように人の力加え方も制御でき、人の重量感覚を変えられることが考えられている。それで、人の重量感覚を変えられるために、物体の慣性を制御する方法は次に述べる。

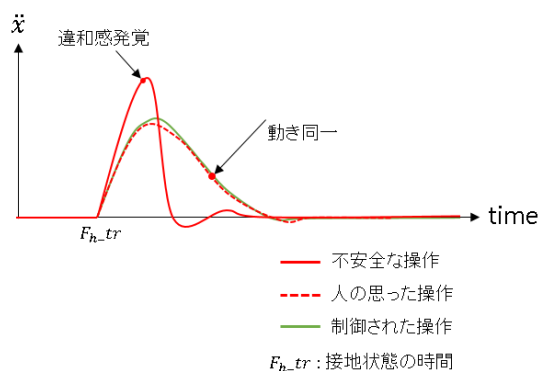


図 2-2 物体の慣性の例

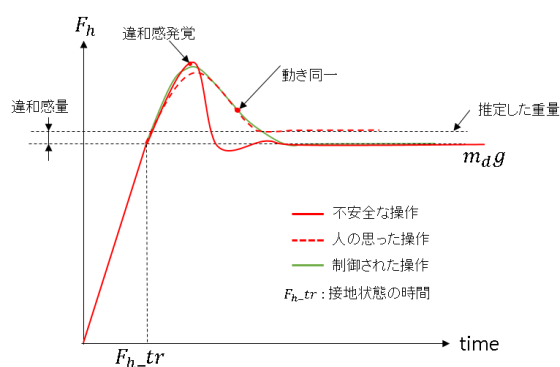


図 2-3 人の力加え方の例

節 2.2.2 に述べた物体が非接地状態である制御方法をブロック線図で表すと、図 2-4 に示すようになる。

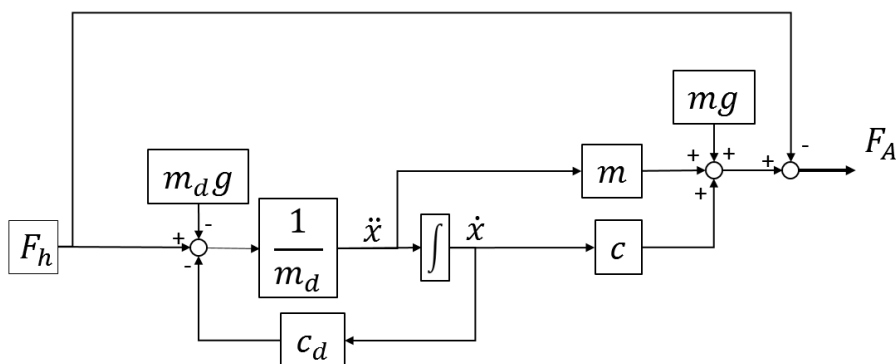


図 2-4 物体が非接地状態である制御方法

ここで、人の加える力を入力とし、物体の慣性を制御量とすると、目標モデルの物体の慣性または加速度をフィードバックすると、図 2-5 に示すようになる。

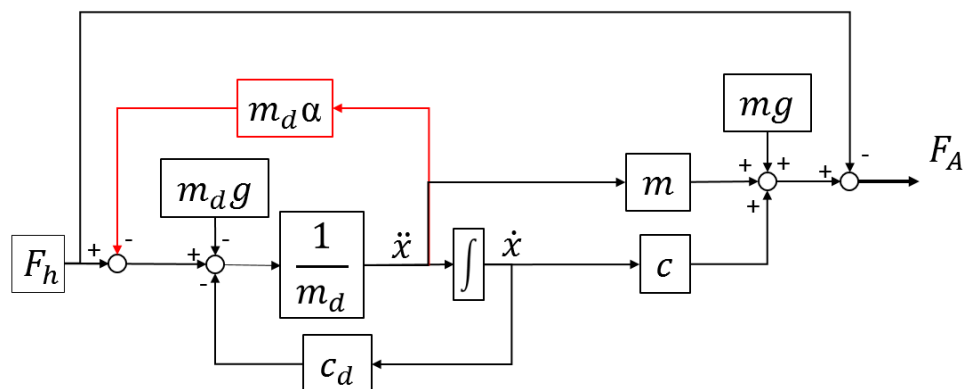


図 2-5 慣性フィードバック

慣性をフィードバックした後，目標モデルの物体の加速度は式 (9) に示すようになり，式 (7) に代入すると，出力 F_A を求めることができ，式 (10) に示すようになる．

$$\ddot{x} = \frac{F_h - m_d g - c_d \dot{x}}{(1 + \alpha) \times m_d} \quad (9)$$

$$F_A = \left[\frac{m}{m_d(1 + \alpha)} - 1 \right] F_h + \left[c - \frac{m}{m_d(1 + \alpha)} c_d \right] \dot{x} \quad (10)$$

ただし， $m_d \alpha$ はフィードバックゲインとなる．ゲイン $m_d \alpha$ によって，パワーアシスト出力は比例制御され，物体の慣性に影響し，人の力加え方を変えられ，人の重量感覚を変えられることが可能である． α は慣性係数と呼ぶ．

第3章 実験装置

3.1 システム設計

パワーアシスト装置のシステムを図 3-1 に示す。各センサから取った情報をコントローラに入力され、コントローラの制御アルゴリズムにより指令が出力され、モータドライバに入力し、モータのトルク出力をコントロールすることができる。

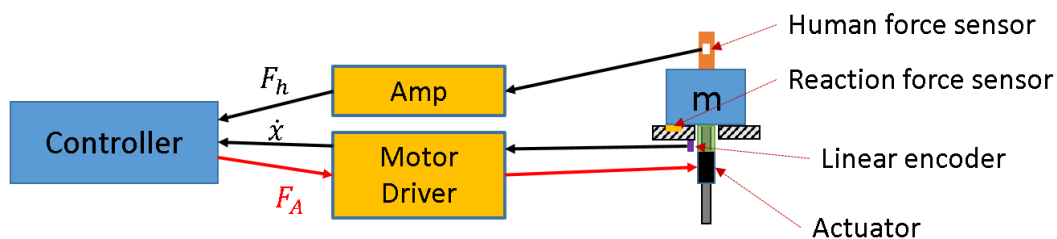


図 3-1 パワーアシスト装置のシステム構造

3.2 パワーアシスト装置

先行研究で用いたパワーアシスト装置は安定性が高いが、出力 0.5kgf しか出さなかったため、その点を高出力に改良し、作業する者は自然に操作できるように、ストロークを長くし、生産現場で応用できるように、新しいパワーアシスト装置を設計した。

本研究では GHC (株) のシャフトモータをアクチュエータとして利用する。図 3-2 のようにシャフトモータは磁石を円筒状 (シャフト) に構成したユニークな形状の直動 (リニア) モータである。本研究で利用したシャフトモータの仕様は表 3-1 に示す。

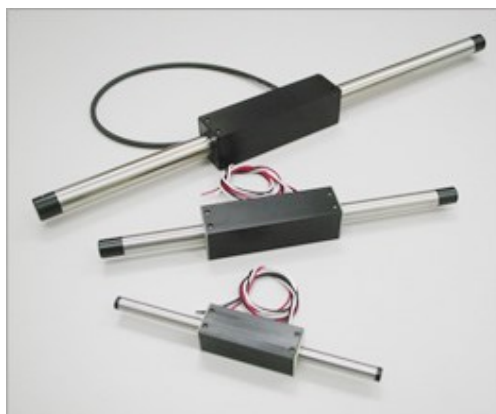


図 3-2 シャフトモータ (GHC 株式会社ホームページ
<http://www.ghc.co.jp/product/shaft.html>)

表 3-1 シャフトモータの仕様

シャフトモータ	GHC (株) S350Q
ストローク (mm)	500
定格推力 (N)	190
加速推力 (N)	760
定格電流 (A)	2.7
加速電流 (A)	11
コイルの長さ (mm)	280
コイルの重さ (kg)	2.4

GHC (株) S350Q のシャフトモータを利用, パワーアシスト装置の機械機構設計は図 3-3 に示す. 直動変換のボールねじなどを利用せず, 摩擦がなく, エネルギー損失も少ないという利点があるシャフトモータが直接にリニアガイドと組み立てられ, 物体に力を与える構造である. 一次自由度の可動部分はシャフトモータのコイル, リニアガイド, 物体を取り付ける台である. 物体が接地状態のとき, 反力を計測するために, 取り付け台は下にある反力センサと接触する. 操作する者の加えた力を計測するために, ホルダの中に力センサが搭載された. また, 可動部分の変位, 速度の情報はリニアエンコーダで計測される. 実際の製作したパワーアシスト装置は図 3-4 に示す. ホルダと人の力センサは図 3-5 のように示す. 操作する者は物体を持ち上げるとき, 適切にホルダを把持できるように, ホルダの材料は滑りにくいベークライトにし, 寸法の幅 55[mm] x 奥 55[mm] x 高さ 78[mm] として製作した.

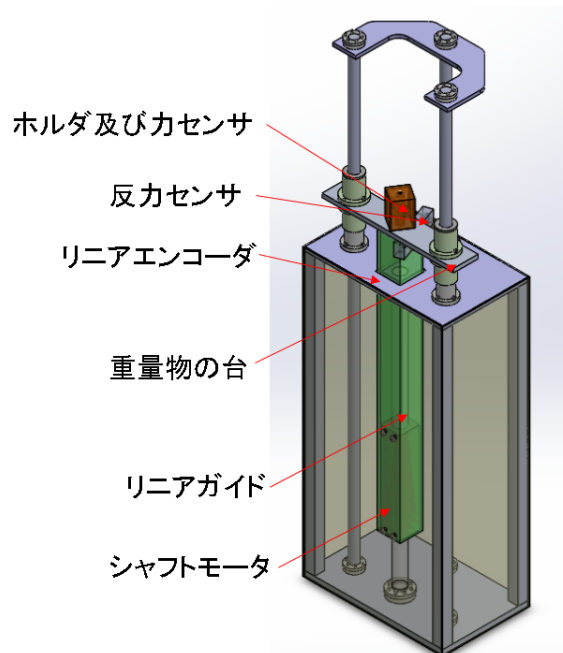


図 3-3 パワーアシスト装置の設計

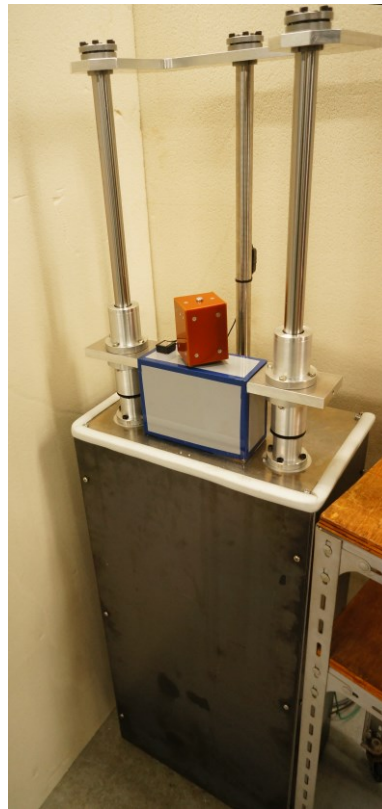


図 3-4 実験装置

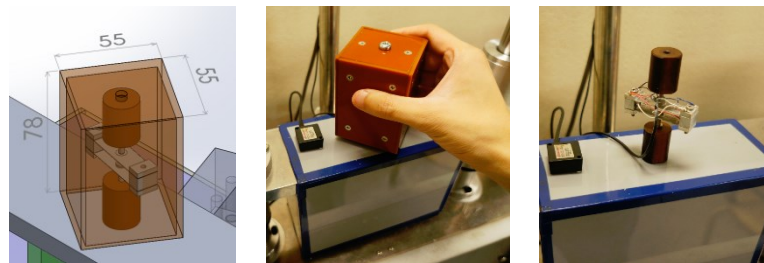


図 3-5 ホルダ及び人の力センサ

精密に計測できる人の力センサは両端自由梁型に作られた。センサの梁に4つのひずみゲージが付けられ、人が力を加えるとき、梁のひずみの変化によってひずみゲージの抵抗値が変化し、人の加えた力を電圧出力で計測することができる。人の力センサの仕様は表 3-2 のようになる。

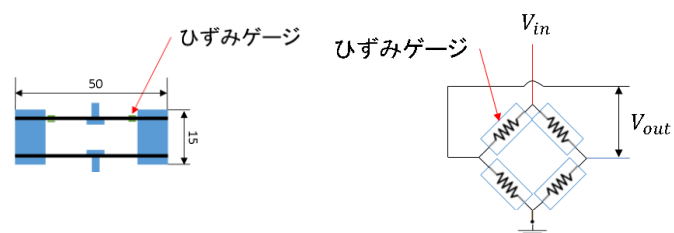


図 3-6 人の力センサの設計

表 3-2 人の力センサの仕様

定格容量 (質量) [N]	10 (1kg)
許容過負荷[N]	15
限界過負荷	20N
歪ゲージの抵抗[Ω]	120
推奨印加電圧	DC<5V

物体とモータの可動子 (コイル) などの可動部分の変位と速度を計測するリニアエンコーダは図 3-7 にしめすようになる。リニアエンコーダはセンサヘッドとリニアスケールがある。光学走査式のセンサヘッドは固定され、リニアスケールは可動部のリニアガイドに付けられ、可動部が動くと、センサヘッドが発光受光デバイスとして、スケールに発光して反射した光量の変化により、変位を検出し、TTL の信号を出力する。エンコーダの仕様は表 3-3 に示す。

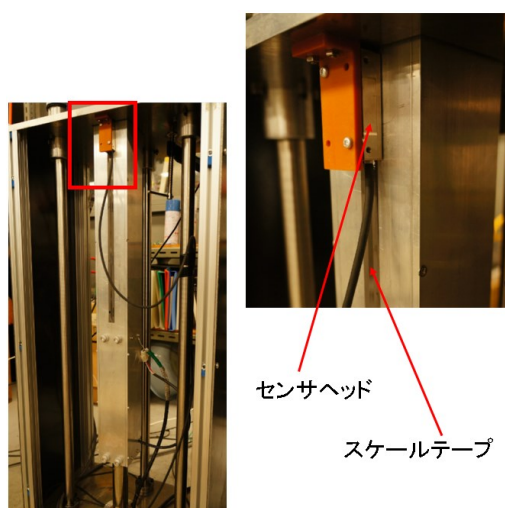


図 3-7 リニアエンコーダ

表 3-3 AK LIDA 27 リニアエンコーダ (HEIDENHAIN co. ltd)

Scanning Head	AK LIDA 27
Interface	TTL
Max speed[m/s]	6
Scale tape length [mm]	350
Signal Period[μm]	5x(4-fold)
Voltage supply[V]	DC 5
Current consumption[mA]	<155
Operating temperature(°C)	-10 to 70

Mass Scanning head[g]	20
Mass connecting cable[g/m]	30
Mass connector[g]	32

テーブルから反力を計測するロードセルは図 3-8 となり、ロードセルの仕様は表 3-4 に示す。

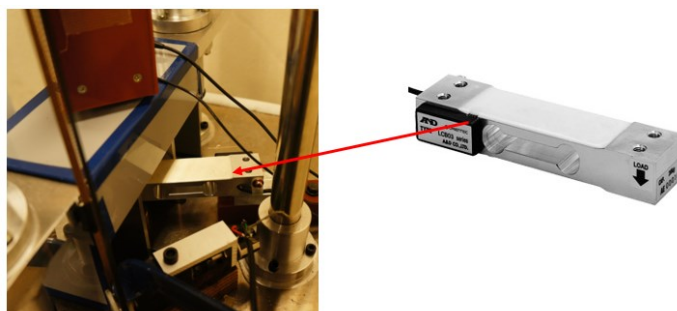


図 3-8 LCB03 ロードセル

表 3-4 A&D (株) の LCB03 ロードセル

型式名	LCB03-K010M
定格容量 (質量)	100N(10.20kg)
定格出力	2mV/V \pm 10%
許容過負荷	150% of R. C.
限界過負荷	200% of R. C.
総合誤差	0.02% of R. O.
推奨印加電圧	DC5~12V
最大印加電圧	DC15V
零バランス	\pm 5% of R. O.
入力端子間抵抗	420 \pm 30 Ω
出力端子間抵抗	350 \pm 5 Ω
絶縁抵抗	2000M Ω 以上/DC50V (B/E)
温度補償範囲	-10 $^{\circ}$ C~40 $^{\circ}$ C

コントローラから指令入力を受け、処理、シャフトモータのコイルに電流を流し、モータのトルク出力をコントロールするサーボランド (株) の SVF モータドライバは図 3-9 及び仕様を表 3-5 に示す。シャフトモータを正常に稼働できるように、モータのパラメータを設定することが必要である。

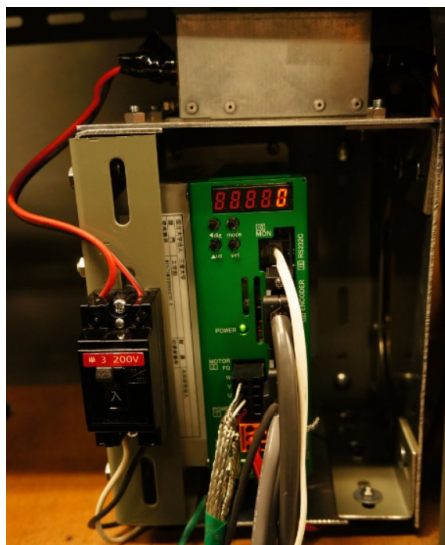


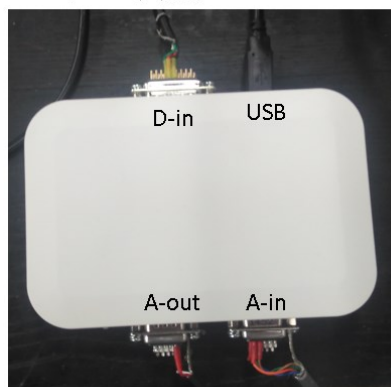
図 3-9 SVF-H8 モータドライバ

表 3-5 モータドライバの仕様

型式名	SVF-H8
主電源	単相 AC56~230V
電圧 (AC モータの場合)	168V
電流 (AC モータの場合)	7.5Amax
電力	1090W
重量	2.6Kg
周囲温度・湿度	0~40℃

各センサの信号を取り、処理してモータドライバに指令入力を出すコントローラは有馬電子機材(株)のAproc-1Plusを利用する。外観及び仕様は図3-10と表3-6に示す。

エンコーダ入力 PC



指令 センサ入力

図 3-10 Aproc-1Plus コントローラ

表 3-6 Aproc-1Plus コントローラの主な仕様

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, P I D制御, F I R, I I R, 移動平均, 時間遅延など
	演算周期	0. 1 m s ~ 1 0 0 m s
アナログ入力	チャンネル数	8
	電圧範囲/分解能	± 1 0 V, ± 5 V / 1 6 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 1 M Ω
	精度/非直線性	± 6 L S B (± 1 0 V 時) / ± 2 L S B 以内
	入力フィルタ帯域	1 2 K H z (± 1 0 V 時), 1 0 K H z (± 5 V 時)
	入力絶縁/保護	絶縁なし / ± 1 6 . 5 V まで保護
アナログ出力	チャンネル数	8
	電圧範囲/分解能	± 5 V / 1 6 ビット
	精度/非直線性	± 1 6 L S B / ± 1 L S B 以内
	出力絶縁/保護	絶縁なし / 合計出力 ± 5 0 m A に制限
デジタル	点数	入力 8, 出力 8 入出力
	電圧レベル	L V T T L (入力 は 5 V まで許容)
	エンコーダカウンタ	2 4 ビット 4 C H (デジタル入力と兼用)
P C 接続	通信方式	U S B 2 . 0 ハイスピードモード
寸法・重量	1 5 0 × 1 0 0 × 3 0 m m / 2 4 0 g	
消費電力	U S B バス電力 約 1 W (出力を除く)	

ここで, 全体システムの構成は, 次の図 3-11 に示す.

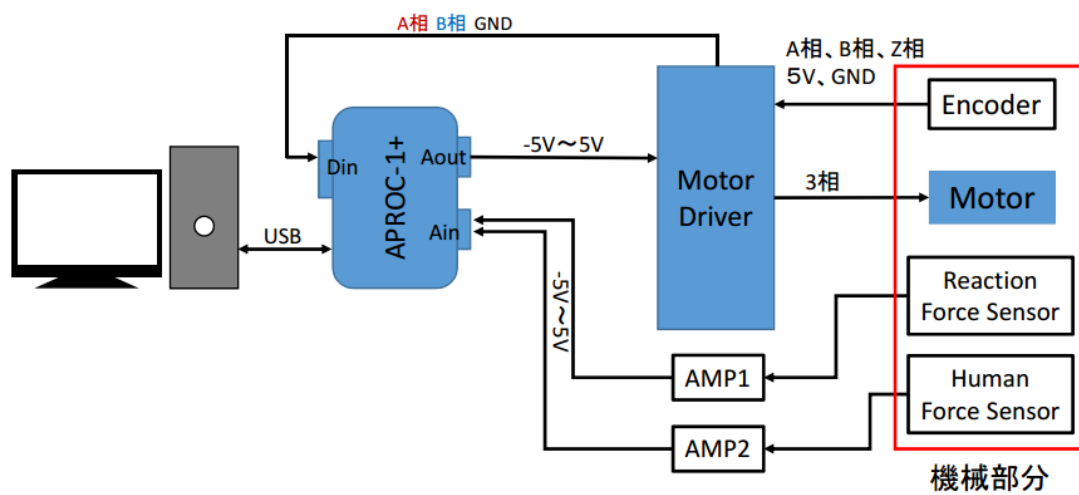


図 3-11 全体システムの構成

第4章 先行研究の実験結果を確認

4.1 先行研究の制御方法

先行研究では物体が接地するとき、人の加えた力とテーブルからの反力の関係を変えて、物体を持ち上げた瞬間に人の重量感覚を変える制御方法であった。詳しくいうと、以下のよう、制方法を述べる。

まず、制御対象の運動方程式は第2章の節2.1に述べた式(1)となる。また、人の重量感覚の目標モデルの運動方程式は第2章の節2.1に述べた式(2)となる。

4.1.1 物体が接地するときの制御方法

物体が接地する時、物体の速度と加速度は0となり、式(1)と式(2)から、力のつりあいの式は

$$F_h + R - m_d g = 0 \quad (1.1)$$

$$F_A + F_h + R - mg = 0 \quad (1.2)$$

と得る。式(1.1)により、人が物体に力を始め加えた時($F_h = 0$)から持ち上げる瞬間($F_h = m_d g$)まで、人の力と反力の関係は線形であることが分かる。仮に、この関係を線形ではなく、非線形とすれば、この接地段階でも人の重量感覚を変えられると考えられる。

図4-1に人の加えた力と反力の関係を示す。元の線形関係は図4-1の(ア)であるが、制御された後、この関係は非線形となり、図4-1の(イ)に示すようになる。

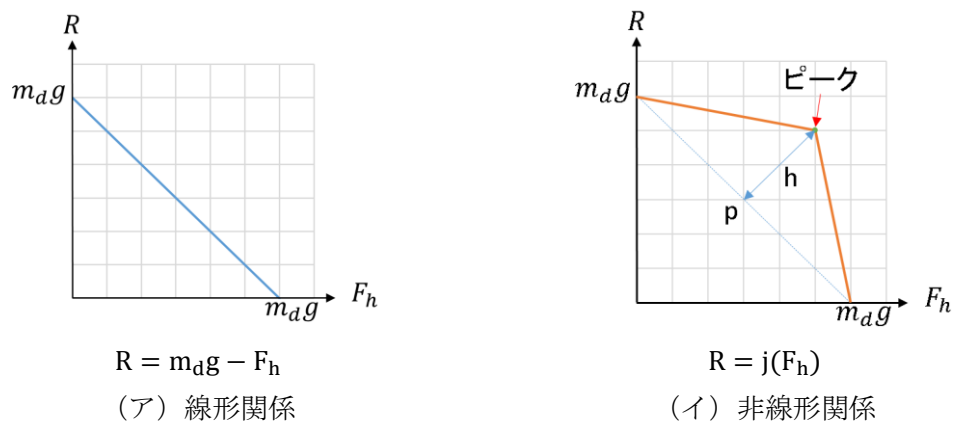


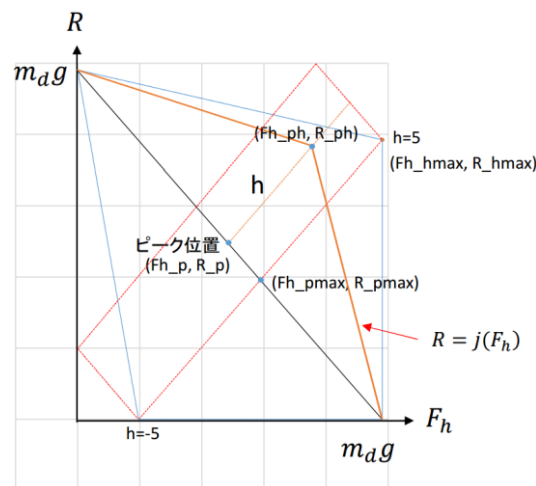
図 4-1 人の力と反力の関係

制御されたあと、人の力とテーブルからの反力の関数 $R = j(F_h)$ となる。ここで、関数 $R = j(F_h)$ を作成するために、以下のパラメータが必要である。

表 4-1 関数 $R = j(F_h)$ を作成するパラメータ

p	ピークの位置	Fh_hmax	h=5 のとき, ピークの座標
h	ピークの高さ	R_hmax	
pmax	ピーク位置の最大値	Fh_p	ピークの位置 p による, 交点 P の座標
Fh_pmax	ピーク位置の最大値 pmax	R_p	
R_pmax	による交点 P の座標	Fh_ph	p と h による, 計算したピークの座標
		R_ph	

表 4-1 のパラメータを座標空間のグラフで表すと, 図 4-2 となる.

図 4-2 関数 $R = j(F_h)$ を作成方法

幾何学式と座標式を用いて, 以上のパラメータを求めると, 次の式 (1 3) ~ (1 6) となる. ただし, 各パラメータ pmax, p, h の値は範囲 (-5, 5) にあり, 既に設定されている.

$$\begin{cases} Fh_pmax = \frac{m_d g}{2} \left(1 + \frac{pmax}{5}\right) \\ R_pmax = \frac{m_d g}{2} \left(1 - \frac{pmax}{5}\right) \end{cases} \quad (1 3)$$

$$\begin{cases} Fh_hmax = m_d g \\ R_hmax = m_d g - Fh_pmax + R_pmax \end{cases} \quad (1 4)$$

$$\begin{cases} Fh_p = \frac{m_d g}{2} \left(1 + \frac{p}{5}\right) \\ R_p = \frac{m_d g}{2} \left(1 - \frac{p}{5}\right) \end{cases} \quad (1 5)$$

$$\begin{cases} Fh_ph = \frac{h}{5} (Fh_hmax - Fh_pmax) + Fh_p \\ R_ph = \frac{h}{5} (R_hmax - R_pmax) + R_p \end{cases} \quad (1 6)$$

以上の式 (5) ~ (7) を式 (8) に代入すると, 式 (9) のピークの座標を求めることができる

$$\begin{cases} Fh_{ph} = \frac{h m_{dg}}{5} \left(1 - \frac{p_{max}}{5}\right) + \frac{m_{dg}}{2} \left(1 + \frac{p}{5}\right) \\ R_{ph} = \frac{h m_{dg}}{5} \left(1 - \frac{p_{max}}{5}\right) + \frac{m_{dg}}{2} \left(1 - \frac{p}{5}\right) \end{cases} \quad (17)$$

式(9)には、パラメータ(p, h, pmax)が分かると、ピークの座標を求めることができる。それで、関数R = j(Fh)を次の式(18)のように求めることもできる。

$$R = \begin{cases} Fh \frac{R_{ph} - m_{dg}}{Fh_{ph}} + m_{dg} & | 0 \leq Fh \leq Fh_{ph} \\ R_{ph} \frac{Fh - m_{dg}}{Fh_{ph} - m_{dg}} & | Fh_{ph} < Fh \leq m_{dg} \end{cases} \quad (18)$$

式(18)によると、Fh=0のときR=m_{dg}、Fh=m_{dg}のときR=0となることは人の力とテールからの反力の関係の最初値と最終値の条件を満たす。

以上の関係R = j(Fh)をシミュレーションしてみると、図4-3のようになる。シミュレーション結果は図4-4に示すようになる。

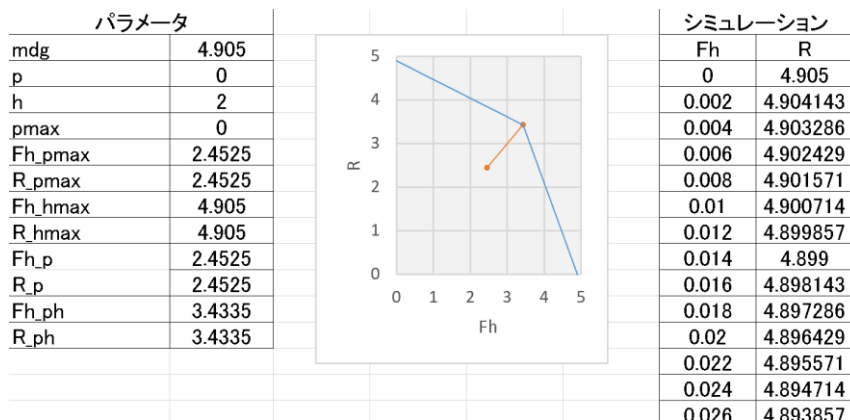


図 4-3 関係R = j(Fh)のシミュレーション

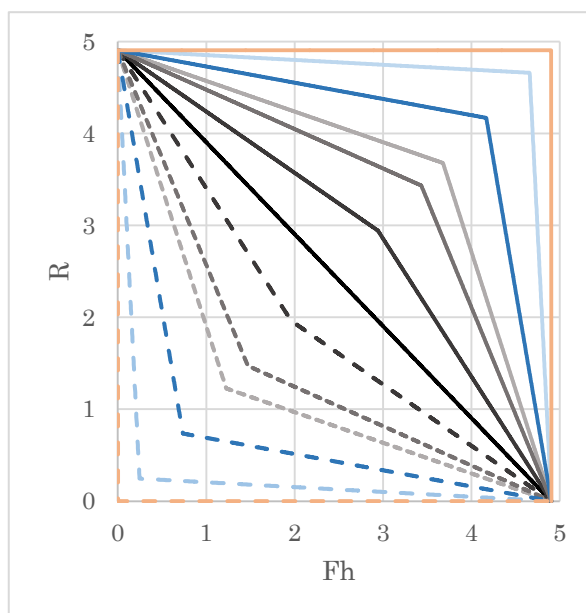


図 4-4 パラメータピークの高さhによって、関係R = j(Fh)のシミュレーション結果

ここで、式(18)の関数 $R = j(F_h)$ を式(12)に代入すると、パワーアシスト力 F_A を求めることができる。

$$F_A = m_d g - j(F_h) - F_h \quad (19)$$

4.1.2 物体が非接地するときの制御方法

物体がテーブルから離れて始めに動くと、反力 R は0となり、式(1)と式(2)から、次の運動方程式となる。

$$m_d \ddot{x} = F_h - m_d g - c_d \dot{x} \quad (20)$$

$$m \ddot{x} = F_A + F_h - m g - c \dot{x} \quad (21)$$

パワーアシストされる物体の運動と目標モデルの運動を合わせて、式(20)から求めた加速度 \ddot{x} を、式(21)に代入すると、パワーアシスト出力 F_A は式(22)に示すように求めることができる。

$$F_A = \left(\frac{m}{m_d} - 1 \right) F_h + \left(c - \frac{m}{m_d} c_d \right) \dot{x} \quad (22)$$

4.2 実験方法

節4.1.1に述べた制御方法により、パラメータ(p, h, pmax)を設定すると、式(18)の人の加えた力を変えて、物体が接地するときのパワーアシスト出力を制御し、人間の重量感覚にどのぐらい影響できるか実験を行った。図4-5に示すように、アシストされた後、物体Aの目標質量 m_d を固定され、物体Bの重さを0.4[Kg]から0.7[Kg]を調整可能である。パラメータピークの高さhを設定して、物体Aと物体Bの重さを比較して人の重量感覚を調査する実験を行った。実験方法は以下に述べる。

ステップ1：制御のパラメータを設定

関数 $R = j(F_h)$ のピークの高さhを設定する。h=-4からはじめ、次は+1ずつ設定する。パラメータピークの高さhにより人の重量感覚を調査するため、ほかのパラメータが一定とされる。ピークの最大値pmax=0であり、ピークの位置p=0となる。

ステップ2：被験者はホルダを掴んで物体Bを持ち上げる

ステップ3：被験者は物体Aを持ち上げる。

ステップ4：被験者の重量感覚と物体B質量の結果を登録する。

被験者は二つ物体Aと物体Bの重さを比較して、どちらの方は重いか軽いかまたは同じか答える。答えは重かった場合、「+」で、軽かった場合、「-」で、同じの場合、「=」で結果を登録する。

ステップ5：被験者の重量感覚の結果は「=」でない場合物体Bの質量を調整して、ステップ2に繰り返す。物体Bの質量の調整方は錘増加パターンの場合0.4[Kg]からはじめ、一回0.02[Kg]増加し、錘減少パターン場合0.7[Kg]からはじめ、一回0.02[Kg]減少する。

ステップ6：ピークの高さ h は4を設定するまで、ステップ1に繰り返す。

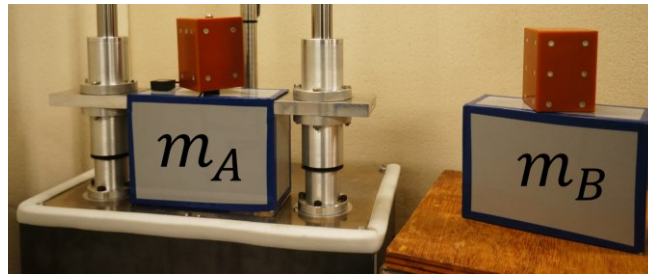


図 4-5 持ち上げる物体

4.3 実験結果及び考察

2名の健常な男子大学生で実験を行った。2名の被験者をそれぞれ被験者 D, E とする。物体 A の重さを物体 B の重さと比較した被験者の答えは表 4-2 及び表 4-3 に登録された。横はピークの高さ h であり、各高さ h に物体 B の質量調整は増加パターン A と減少パターン D がある。縦は物体 B の質量である。同じの答え（「？」記号）をグラフで表すと、及び図 4-9 に示す。答えの結果をみると、人の重量感覚はピークの高さ h によって変化しなかった。また、ピークの高さ $h = \{-4, 0, 4\}$ によって、テーブルからの反力、人の加えた力及び指令出力 F_a を調べると、被験者 D の場合、図 4-8～図 4-10 に、被験者 E の場合、図 4-11～図 4-13 に示す。テーブルからの反力と指令出力 F_a は変化したけど、人の加えた力は変化しなかったと分かった。原因を考えると、出力 F_a が変化すると、その変化力はテーブルからの反力はすべて補償されて、人の加えた力に影響できなかったと考えられる。それで、本研究では高出力パワーアシスト装置を用いて物体を持ち上げる時、先行研究の物体が接地するときの制御方法により、人の重量感覚を変えられなかった。一方、関係 $R = j(F_h)$ のシミュレーションと実際実験するときの結果は図 4-14 に示すようになった。

表 4-2 被験者 D の重量感覚

ph/ the mass of the object B	-4		-3		-2		-1		0		1		2		3		4	
	A	D	A	D	A	D	A	D	A	D	A	D	A	D	A	D	A	D
0.4	+		+		+		+		+		+		+		+		+	
0.42	+		+		+		+		+		+		+		+		+	
0.44	+	+	+		+		+		+		+		+		+		+	
0.46	=	=	+	+	+		+		+	+	=	+	=			+		
0.48	-	=	=	=	=	+	+		=		=	=	-	=	-	+	=	
0.5	-	-	-	=	-	=	=	+	-	+	-	-		-		+	-	+
0.52		-		-		=	-	=		=		-		-		=		=
0.54		-		-		-		-		-		-		-		-		-
0.56		-		-		-		-		-		-		-		-		-
0.58		-		-		-		-		-		-		-		-		-
0.6		-		-		-		-		-		-		-		-		-

表 4-3 被験者 E の重量感覚

ph/ the mass of the object B	-4		-3		-2		-1		0		1		2		3		4	
	A	D	A	D	A	D	A	D	A	D	A	D	A	D	A	D	A	D
0.4	+		+		+		+		+		+		+		+		+	
0.42	+		+		+		+		+		+		+		+		+	
0.44	+		+		+		+		+		+		+		+		+	
0.46	+	+	+	+	+	+	+		+		+		+	+	=		+	
0.48	=	+	+	+	=	=	=		+	+	+	+	=	=	-	+	=	+
0.5	=	=	=	=	-	=	-	+	=	=	=	+	=	-		+	-	=
0.52	-	=	-	=		-	-	=	-	=	-	=	-	-		=		-
0.54	-	-	-	-		-		-		-		-		-		=		-
0.56		-		-		-		-		-		-		-		-		-
0.58		-		-		-		-		-		-		-		-		-
0.6		-		-		-		-		-		-		-		-		-

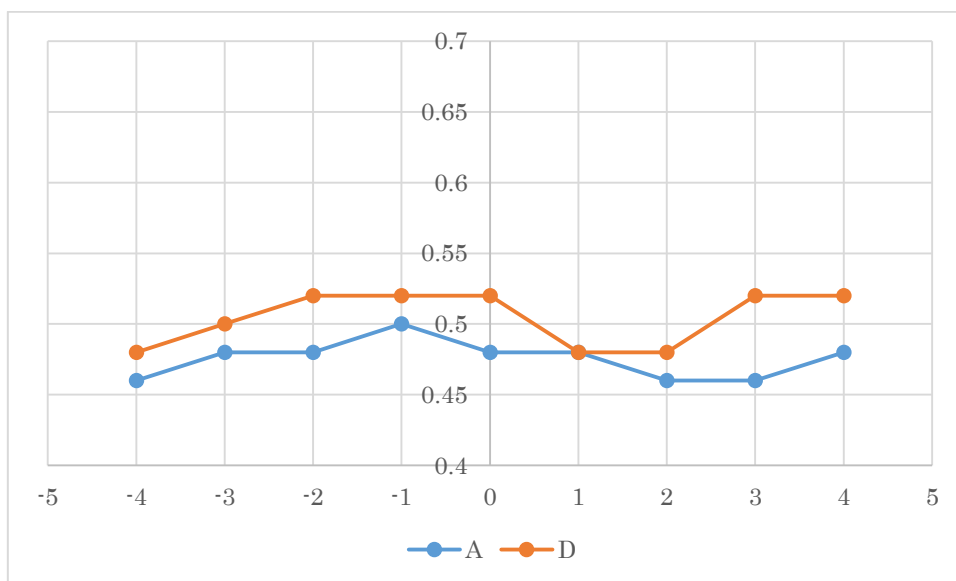


図 4-6 被験者 D の重量感覚

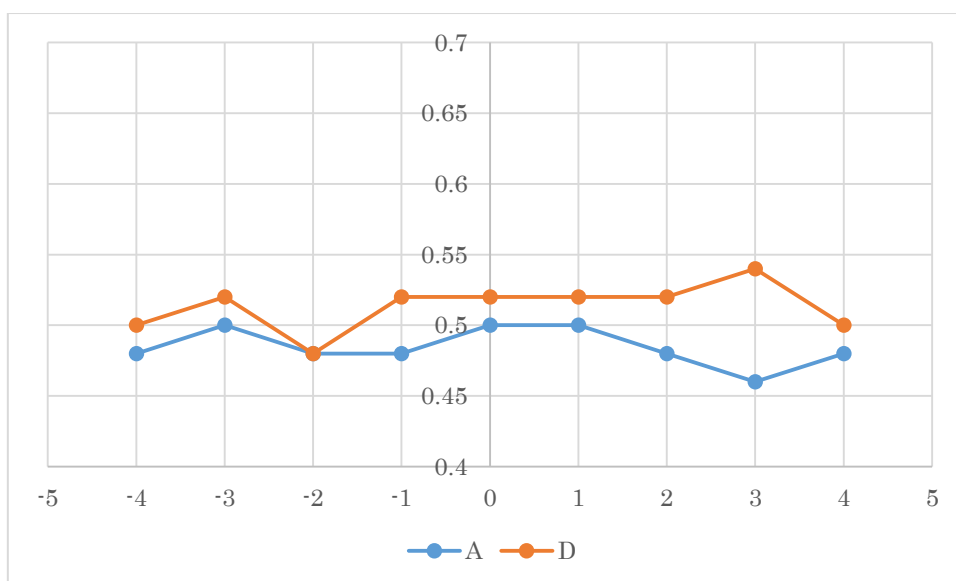


図 4-7 被験者 E の重量感覚

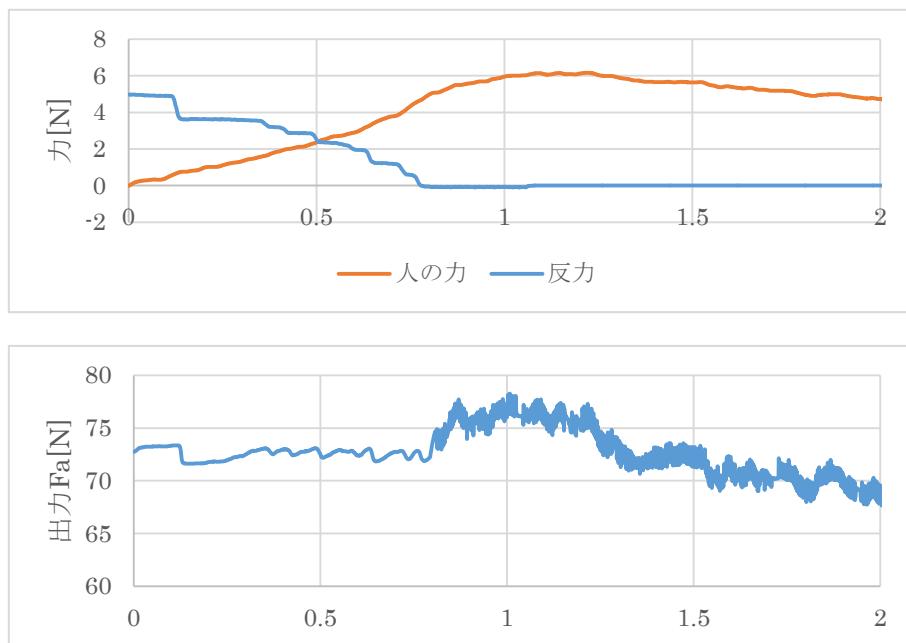


図 4-8 h=0 のとき，被験者 D の操作情報

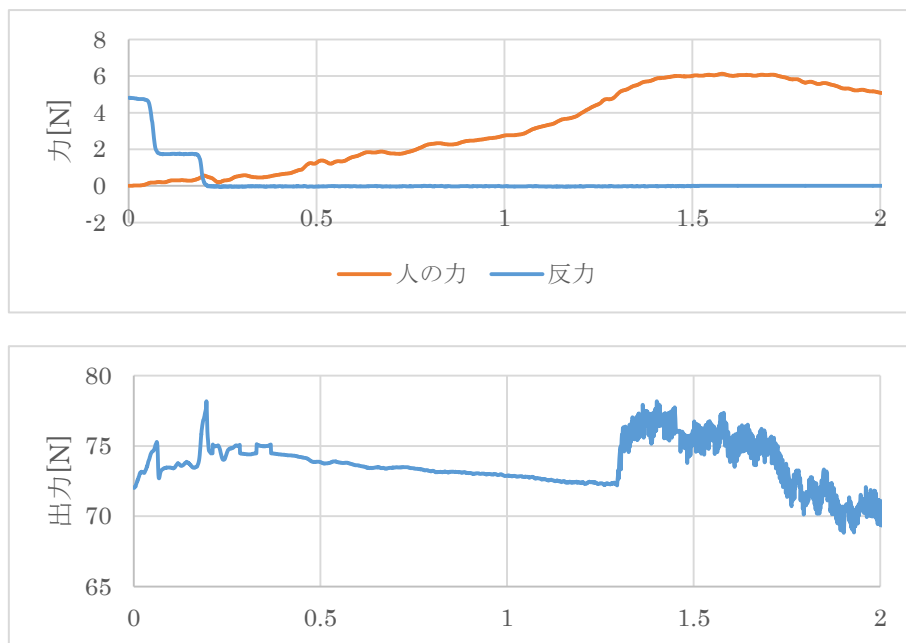


図 4-9 h=-4 のとき，被験者 D の操作情報

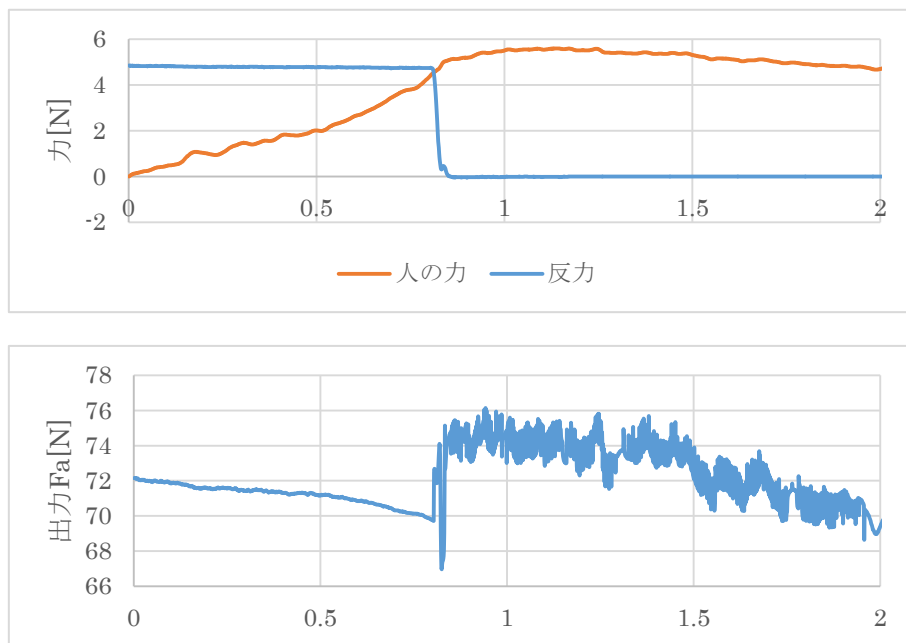


図 4-10 h=4 のとき，被験者 D の操作情報

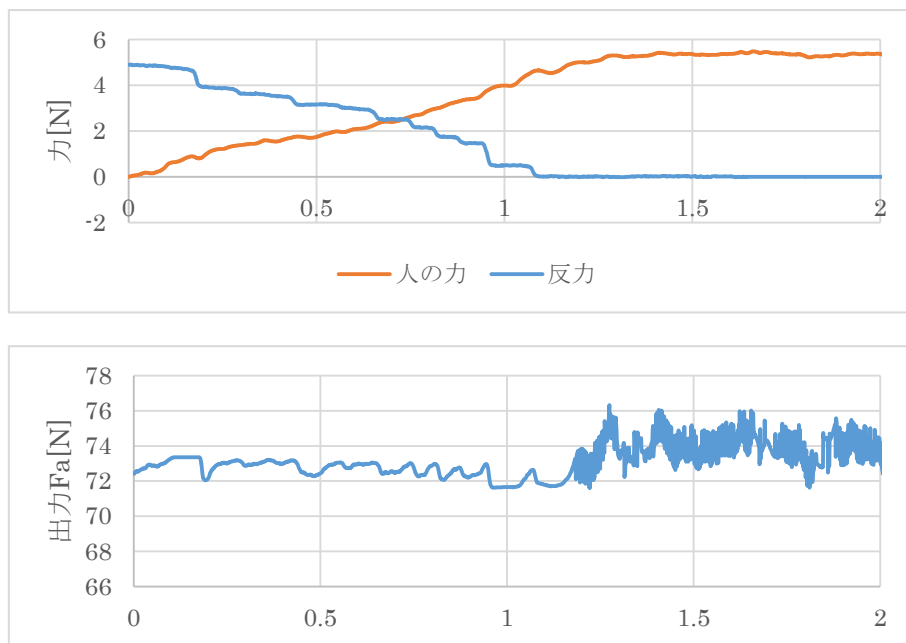


図 4-11 h=0 のとき，被験者 E の操作情報

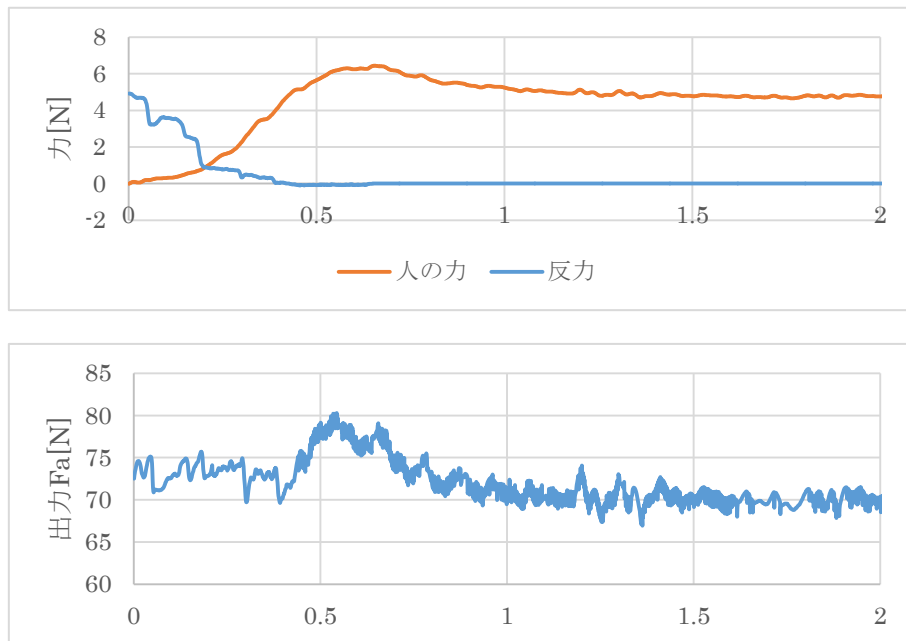


図 4-12 $h=-4$ のとき，被験者 E の操作情報

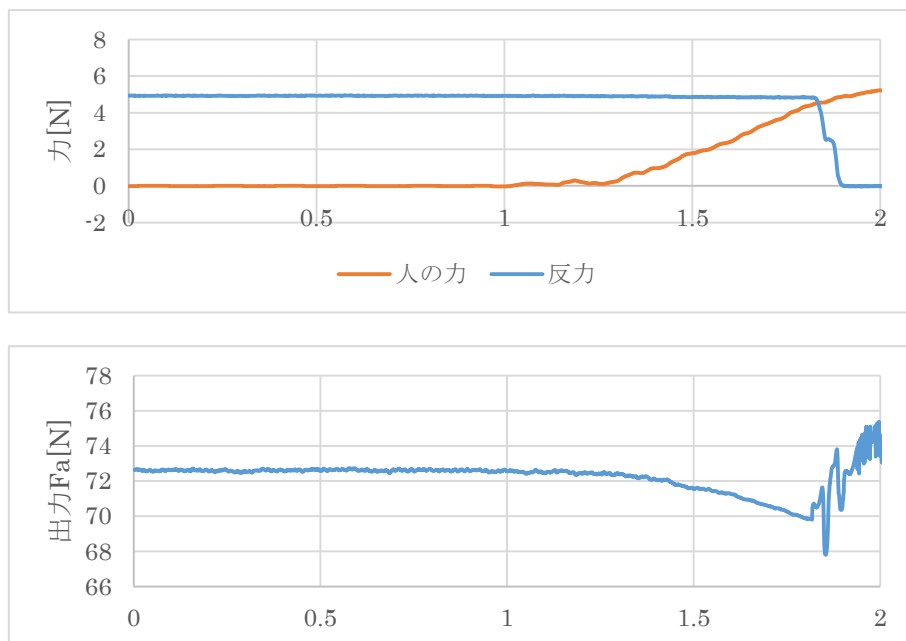


図 4-13 $h=4$ のとき，被験者 E の操作情報

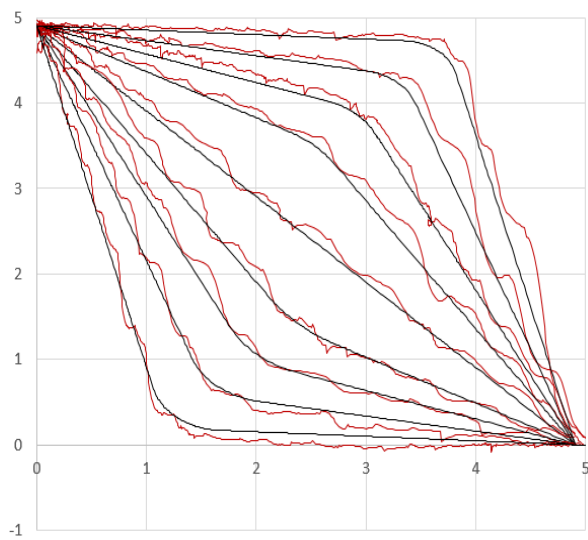


図 4-14 関係 $R = j(F_h)$ シミュレーションと実験結果

第5章 パワーアシスト装置による物体を持ち上げる実験

5.1 実験方法

実験の目的は節 2.2.2 の制御方法 によって、パワーアシストされる物体を持ち上げる時、被験者の重量感覚を解析する。詳しく言うと、節 2.2.2 の通り、慣性係数 α によって、被験者の重量感覚はどのくらい変化したか実験を行う。図 5-1 のように、パワーアシスト装置に取り付けられている物体 A とテーブルに置いている物体 B がある。物体 A の質量は 8[Kg]であり、物体 B の質量は調整可能で、0.4[Kg]から 0.84[Kg]となる。二つの物体の質量は異なっているが、被験者の視覚印象が変わらないように、二つの物体の外観が同じとなっている。ここで、実験の条件は次の表 5-1 に示す。

表 5-1 実験の条件

取り付けられる物体 (物体 A) の質量	m_A	8 [Kg]
物体 A の仮想質量の設定	m_d	0.5 [Kg]
アクチュエータの減衰係数	c	98 [N. s/m]
物体 A の仮想減衰係数の設定	c_d	16 [N. s/m]

実験手順は以下のようになる。

ステップ 1 : 式 (10) の慣性係数 α を設定する

慣性係数 α は $\{-0.6, -0.45, -0.3, -0.15, 0, 1.5, 3, 4.5, 6\}$ それぞれ順番に設定する。

ステップ 2 : 先に被験者は物体 B を持ち上げる。

図 5-3 に示すように、被験者は物体 B の前に立ち上がって脇を閉め、ホルダを掴んで物体 B を持ち上げる。持ち上げた後、すぐにテーブルに置く。物体 B の重量感覚が覚えられるように、何回も持ち上げる。

ステップ 3 : 被験者は物体 A を持ち上げる。

被験者は物体 B の重さが覚えられた後、物体 B の持ち上げる方と同じように、図 5-2 に示すように、物体 A の前に立ち上げて、脇を閉め、物体 A のホルダを掴んで持ち上げる。

ステップ 4 : 被験者の物体 A と物体 B の重さ比較の答えと物体 B 質量の結果を登録する。

物体 A と物体 B の重さ比較の答えは物体 A の方は重かった場合、「+」で、軽かった場合、「-」で、判別出来ないそれとも同じの場合、「=」で結果を登録する。

ステップ 5 : 被験者の重量感覚の結果は「=」ではない場合、物体 B の質量を調整して、ステップ 2 に繰り返す。物体 B の質量の調整方は重量増加させるパターンの場合、0.4[Kg]からはじめ、一回 0.02[Kg]ずつ増加させる。重量を減少させるパターン場合、0.84[Kg]からはじめ、0.02[Kg]ずつ減少させる。

ステップ 6 : 慣性係数 α の設定は 6 まで、ステップ 1 に繰り返す。

上の実験手順を図 5-4 に示す。

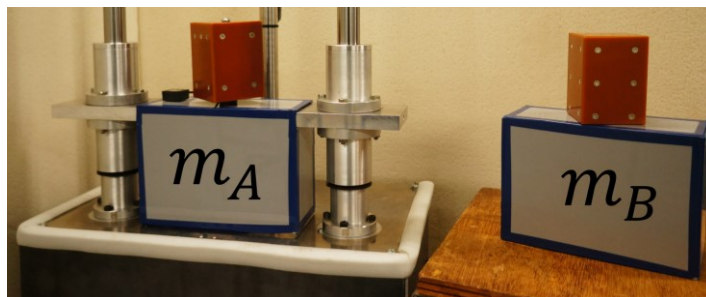


図 5-1 持ち上げる物体



図 5-2 物体 A を持ち上げ方



図 5-3 物体 B を持ち上げ方

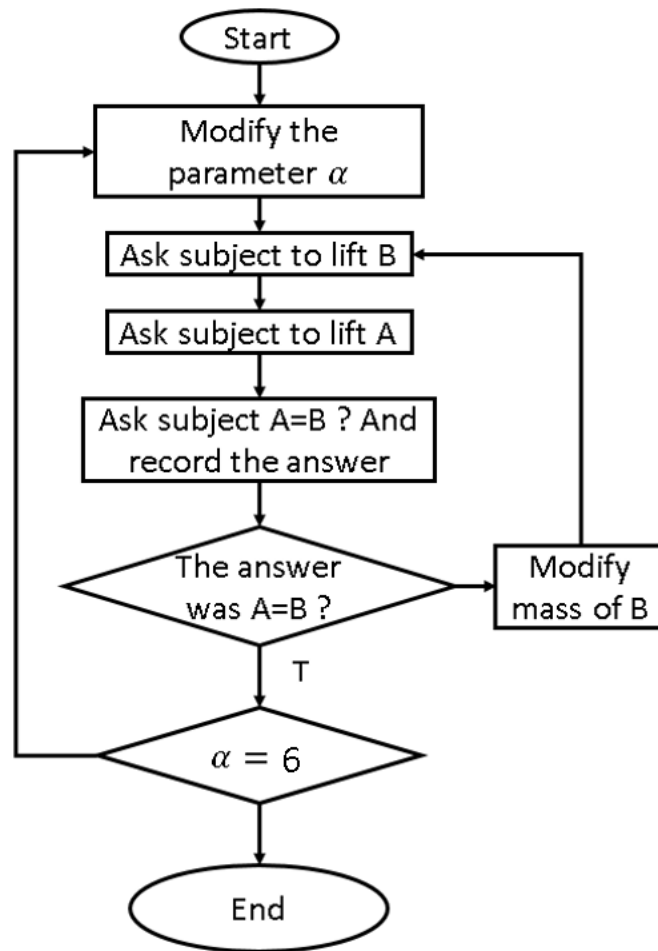


图 5-4 实验方法

5.2 実験結果及び考察

前節で記述した実験方法について、3名の健常な男子大学生で実験を行った。3名の被験者をそれぞれ被験者 A, B, C とする。物体 A の重さを物体 B の重さと比較した被験者の回答は表 5-2, 表 5-4, 表 5-6 のようになった。横は慣性係数 $\alpha = \{-0.6, -0.45, -0.3, -0.15, 0, 1.5, 3, 4.5, 6\}$ であり、各 α に物体 B の質量増加パターン A と質量減少パターン D がある。縦はパワーアシストされない物体 B の質量である。調整した物体 B の重さは物体 A の重さと比べ、被験者の重量感覚は結果のアンケート表のように、物体 A は物体 B より重たいで「+」、物体 A は物体 B より軽いで「-」、物体 A と物体 B の重さと同じか判別できないで「=」となった。回答の表を見ると、一つの慣性係数 α で物体 B の質量を調整しても、物体 A の重さが物体 B と同じである答え（「=」の記号）は2回、3回また4回も連続にあった。なぜなら、立ち姿勢の作業で人間の重量変化弁別閾が大きくなったからだと考えられる。物体 B の質量調整の刻みは 0.02[kg]で、人間の重量変化弁別閾より、細かいので、一回物体 B の質量を調整したら、被験者は物体 B の重量変化が分からなかった。ほかの原因は被験者の力の加え方に影響されることもある。慣性係数 α に対して、「=」の答えであるときの物体 B の重さを平均して、表 5-3, 表 5-5, 表 5-7 に物体 A を持ち上げた被験者の平均重量感覚の結果を示す。また、その平均重量感覚をグラフで表すと図 5-5, 図 5-6, 図 5-7 のようになる。慣性係数 α の値は-0.6 から 0 を設定して、物体 A を持ち上げたとき、被験者 A の重量感覚は物体 B の質量増加パターンで 0.42~0.51[Kg]で、物体 B の質量減少パターンで 0.45~0.5[Kg]であった。被験者 B の重量感覚は増加パターンで 0.45~0.5[Kg]で、減少パターンで 0.44~0.49[Kg]であった。被験者 C の重量感覚は増加パターンで 0.42~0.5[Kg]で、減少パターンで 0.42~0.52[Kg]であった。慣性係数 α の値は-0.6 であるとき、3名の被験者の重量感覚は仮想質量 $m_a = 0.5$ [Kg]より、ほぼ 0.05[kg]から 0.1[Kg]を軽く感じられたことが分かった。慣性係数 α の値は 0 から 6 を設定して、物体 A を持ち上げたとき、被験者 A の重量感覚は物体 B の質量増加パターンで 0.51~0.63[Kg]で、物体 B の質量減少パターンで 0.5~0.66[Kg]であった。被験者 B の重量感覚は増加パターンで 0.51~0.77[Kg]で、減少パターンで 0.52~0.81[Kg]であった。被験者 C の重量感覚は増加パターンで 0.5~0.74[Kg]で、減少パターンで 0.52~0.75[Kg]であった。慣性係数 α の値は 6 であるとき、被験者 A の重量感覚は仮想質量 $m_a = 0.5$ [Kg]より、ほぼ 0.16[Kg]を重く感じられ、被験者 B と被験者 C の重量感覚は最大 0.29[Kg]と 0.24[Kg]も重く感じられたことが分かった。また、各被験者の操作に対して、慣性係数 α は-0.6, 0, 6 であったとき、物体 A の変位と速度、被験者の加えた力 F_h とパワーアシスト出力指令値 F_a を被験者 A の場合、図 5-8~図 5-10 に、被験者 B の場合、図 5-12~図 5-14 に、被験者 C の場合、図 5-16~図 5-18 に示すようになる。-0.6 から 6 の慣性係数 α によって重ねられた被験者の加えた力は被験者 A, B, C のそれぞれ図 5-11, 図 5-15, 図 5-19 に示す。各被験者は物体 A を持ち上げたとき、-0.6 から 6 の慣性係数 α によって物体 A の速度は大きく変化しなかったが、被験者の加えた力 F_h の加速力はだんだん大きくなり、逆にパワーアシスト出力指令 F_a の加速力は小さくなったと分かった。

パワーアシスト出力指令 F_a の加速力は小さくなると、物体 A の動きまた速度が抑えられるはずであるが、被験者は大きく加速して物体の速度を思った通りの速度を支持する。それで、被験者の重量感覚もだんだん重く感じられた。図 5-11, 図 5-15 及び図 5-19 の各被験者の加えた力を見ると、慣性係数 α の値は $-0.6 \sim 0$ であったとき、被験者の加えた力は大きく変化しなかった。被験者の重量感覚は大きく変化しなかったと合っている結果が分かった。慣性係数 α の値は $0 \sim 6$ であったとき、被験者の加えた力は明らかに大きく変化した。被験者の重量感覚の結果と合っていると分かった。

表 5-2 被験者 A の重量感覚を調査した結果

物体 B の 重さ	-0.6		-0.45		-0.3		-0.15		0		1.5		3		4.5		6	
	A	D	A	D	A	D	A	D	A	D	A	D	A	D	A	D	A	D
0.4	=	+	+	+	+	+	+		+		+		+		+		+	
0.42	=	+	+	+	=	+	+		+	+	+		+		+		+	
0.44	=	=	=	=	=	+	=	-	+	+	+		+		+		+	
0.46	-	=	=	=	=	=	=	-	+	+	+		+		+		+	
0.48	-	-	=	-	=	=	=	=	-	=	+	+	+		+		+	
0.5		-	-	-	-	=	=	=	=	=	=	+	+	+	+		+	
0.52		-	-	-	-	=	-	-	=	=	=	=	=	+	+		+	
0.54		-		-		-	-	-	-	-	-	=	=	=	=	+	+	
0.56		-		-		-		-	-	-	-	=	=	-	=	+	+	
0.58		-		-		-		-		-		=	-	-	-	=	+	
0.6		-		-		-		-		-		-	-	-	-	+	=	+
0.62												-		-		=	=	+
0.64												-		-		-	=	+
0.66												-		-		-	=	=
0.68												-		-		-	-	+
0.7												-		-		-	-	-
0.72																		
0.74																		
0.76																		
0.78																		
0.8																		
0.82																		

表 5-3 被験者 A の平均重量感覚

α	物体 B の重さ増加 パターン	物体 B の重さ減少 パターン
-0.6	0.42	0.45
-0.45	0.46	0.46
-0.3	0.48	0.49
-0.15	0.5	0.49
0	0.51	0.5
1.5	0.51	0.55
3	0.54	0.54
4.5	0.55	0.6
6	0.63	0.66

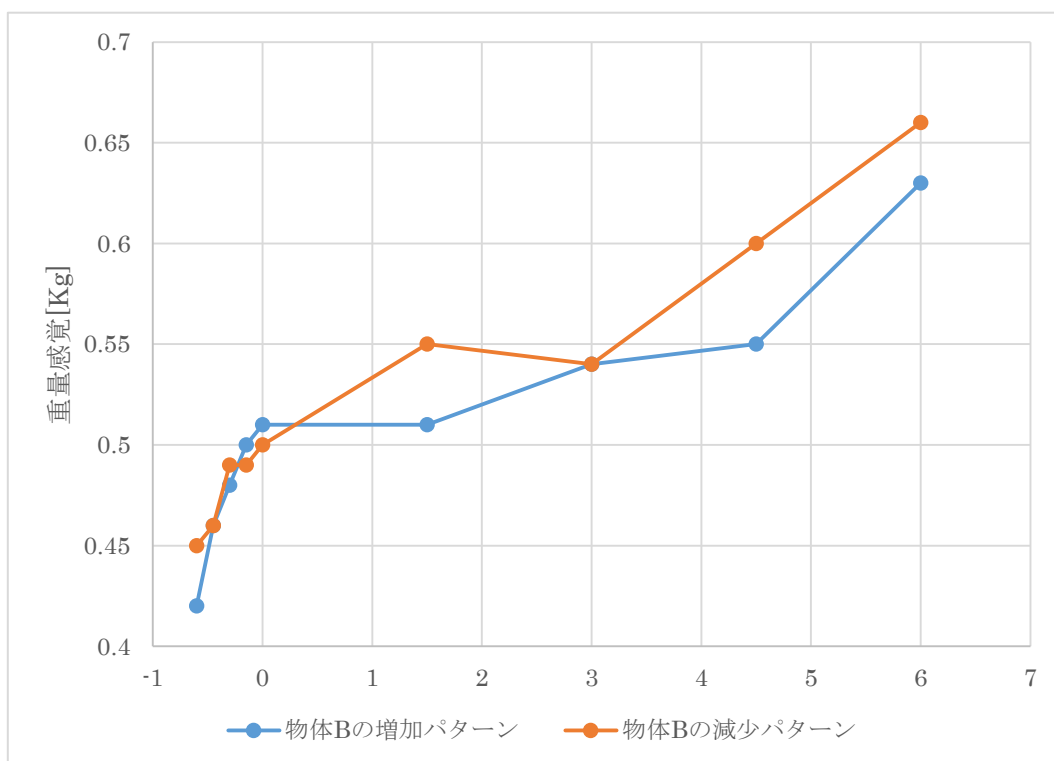


図 5-5 被験者 A の平均重量感覚

表 5-4 被験者 B の重量感覚を調査した結果

物体 B の 重さ	-0.6		-0.45		-0.3		-0.15		0		1.5		3		4.5		6	
	A	D	A	D	A	D	A	D	A	D	A	D	A	D	A	D	A	D
0.4	+	+	+	+	+		+		+		+		+		+		+	
0.42	+	=	+	=	+		+	+	+		+		+		+		+	
0.44	=	=	+	=	=	+	+	+	+		+		+		+		+	
0.46	=	=	=	=	=	+	+	=	+	+	+		+		+		+	
0.48	-	-	=	=	=	=	=	=	=	+	+		+		+		+	
0.5	-	-	=	=	=	=	=	=	=	=	+		+		+		+	
0.52	-	-	-	-	=	=	=	=	=	=	=	+	+		+		+	
0.54	-	-	-	-	-	=	-	-	=	=	=	+	+		+		+	
0.56		-		-	-	-	-	-	-	-	=	=	+		+		+	
0.58		-		-		-			-	-	=	=	+		+		+	
0.6		-		-		-			-	=	=	+		+		+		
0.62											-	=	+		+		+	
0.64											-	-	+		+		+	
0.66												-	=		+		+	
0.68												-	=	+	+	+	+	
0.7												-	=	+	+	+	+	
0.72												-	=	=	+	=	+	
0.74												-	-	=	=	=	=	+
0.76												-	-	=	=	=	=	+
0.78												-		-	=	=	=	+
0.8												-		-	-	-	=	=
0.82															-	-	-	=

表 5-5 被験者 B の平均重量感覚

α	物体 B の重さ増加 パターン	物体 B の重さ減少 パターン
-0.6	0.45	0.44
-0.45	0.48	0.46
-0.3	0.48	0.51
-0.15	0.5	0.49
0	0.51	0.52
1.5	0.56	0.59
3	0.69	0.74
4.5	0.76	0.76
6	0.77	0.81

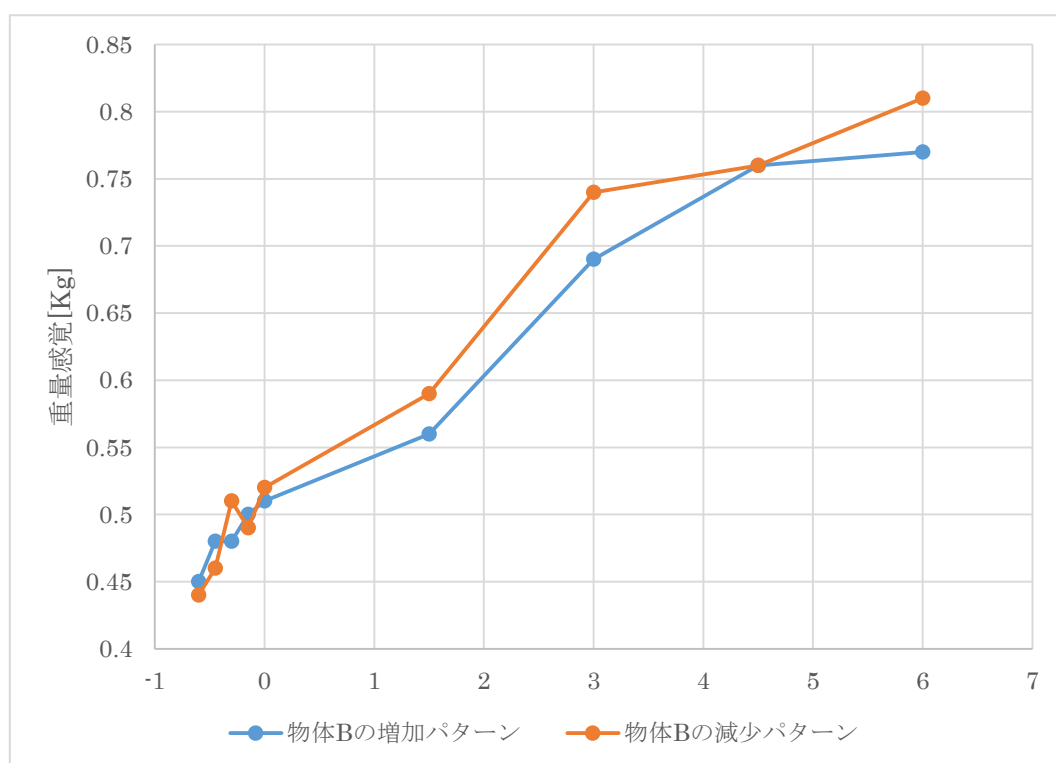


図 5-6 被験者 B の平均重量感覚

表 5-6 被験者 C の重量感覚を調査した結果

物体 B の 重さ	-0.6		-0.45		-0.3		-0.15		0		1.5		3		4.5		6	
	A	D	A	D	A	D	A	D	A	D	A	D	A	D	A	D	A	D
0.4	=	=	+	+	+	+	+		+		+		+		+		+	
0.42	=	=	+	+	+	+	+		+		+		+		+		+	
0.44	=	=	=	+	=	=	+	+	+		+		+		+		+	
0.46	-	-	-	=	=	=	=	+	+	+	+		+		+		+	
0.48	-	-	-	-	-	-	=	=	=	+	+		+		+		+	
0.5		-		-	-	-	=	=	=	=	=		+		+		+	
0.52		-		-		-	-	-	=	=	=	+	+		+		+	
0.54		-		-		-	-	-	=	=	+	+	+	+		+		
0.56		-		-		-		-	-	-	=	=	+	+		+		
0.58		-		-		-		-	-	-	=	=	=	+		+		
0.6		-		-		-		-	-	-	=	=	=	=		+		
0.62											-	-	=	=		+		
0.64											-	-	=	=	+	+		
0.66											-		-	-	+	+		
0.68											-		-	-	=	+	+	
0.7											-		-		=	+	+	
0.72											-		-		=	=	=	
0.74											-		-		-	=	=	
0.76											-		-		-	=	=	
0.78											-		-		-	-	=	
0.8											-		-		-	-	-	
0.82																		

表 5-7 被験者 C の平均重量感覚

α	物体 B の重さ増加 パターン	物体 B の重さ減少 パターン
-0.6	0.42	0.42
-0.45	0.44	0.48
-0.3	0.45	0.45
-0.15	0.48	0.45
0	0.5	0.52
1.5	0.52	0.61
3	0.6	0.57
4.5	0.62	0.7
6	0.74	0.75

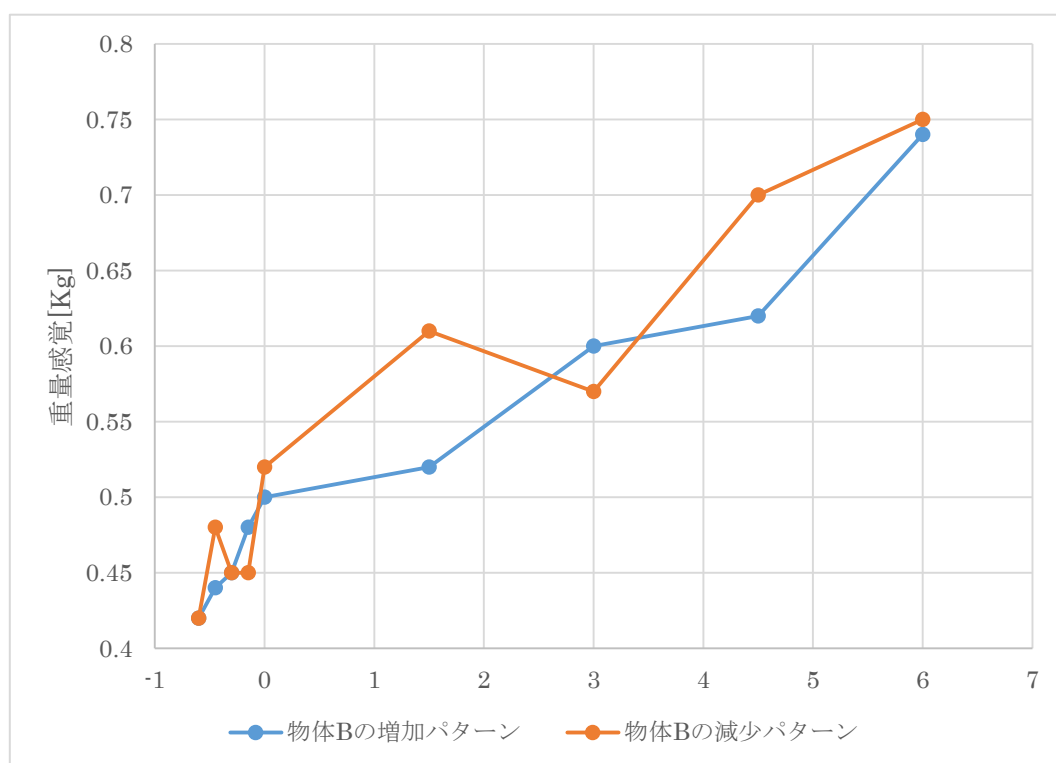


図 5-7 被験者 C の平均重量感覚

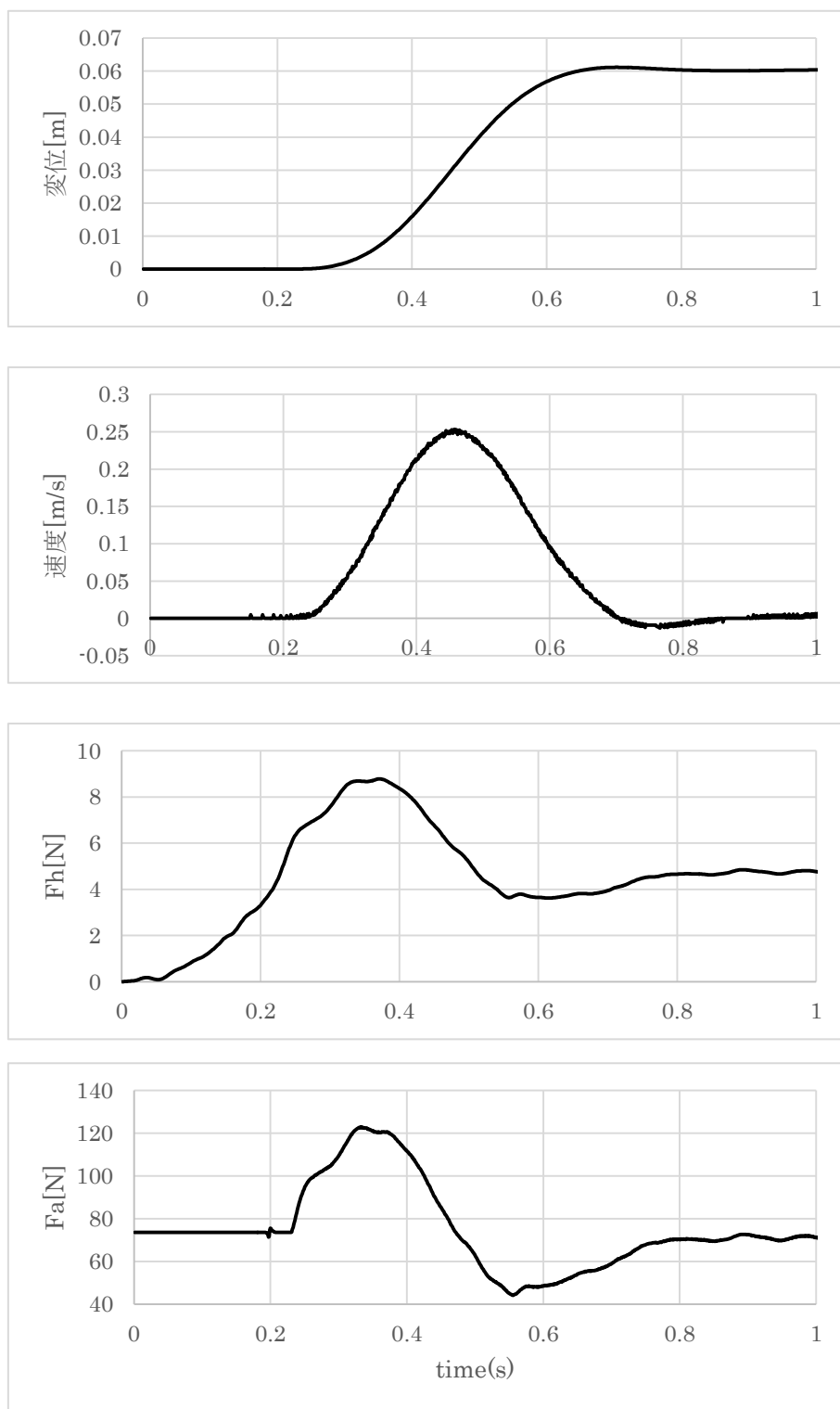


図 5-8 $\alpha=0$ のとき, 被験者 A の操作情報

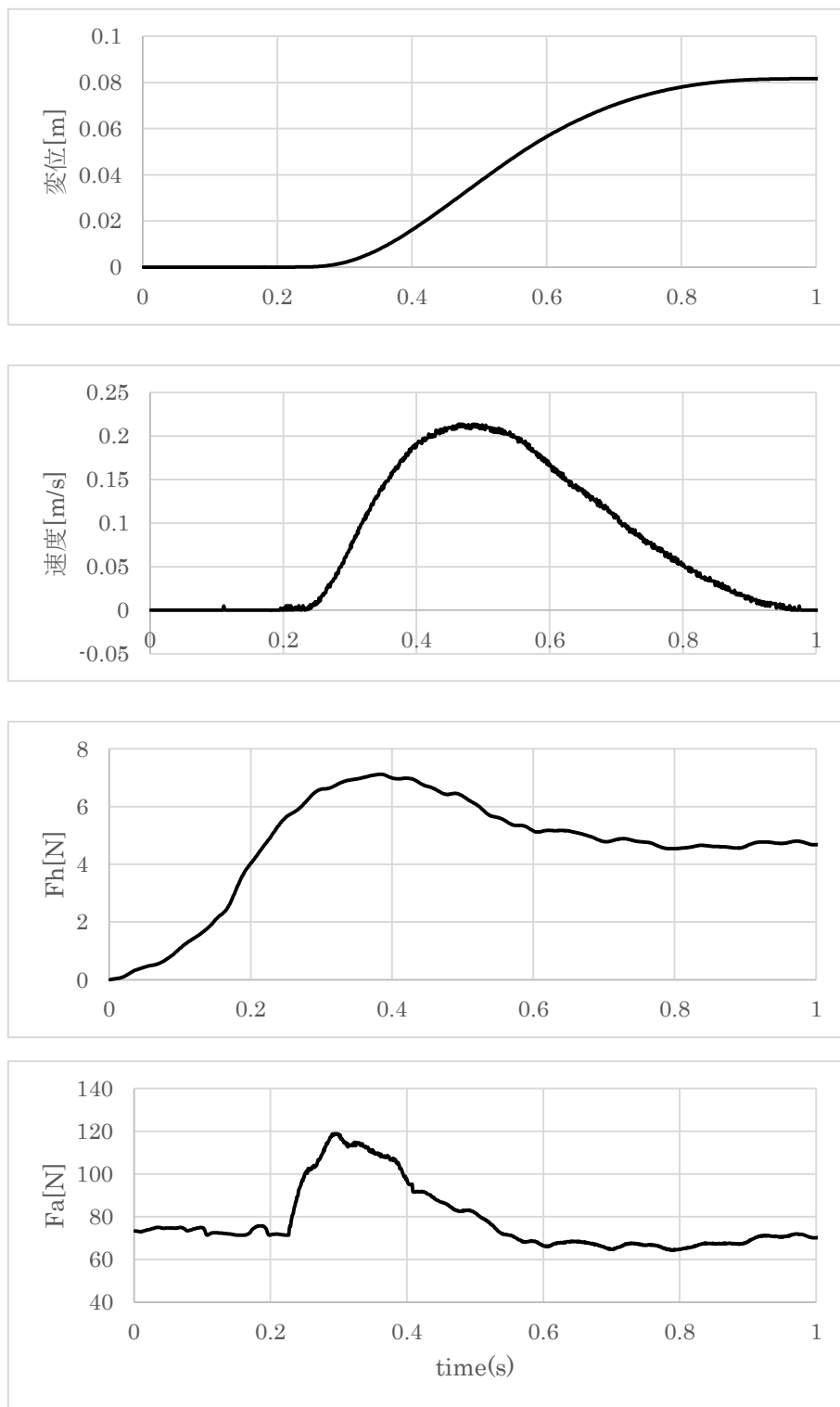


図 5-9 $\alpha=-0.6$ のとき，被験者 A の操作情報

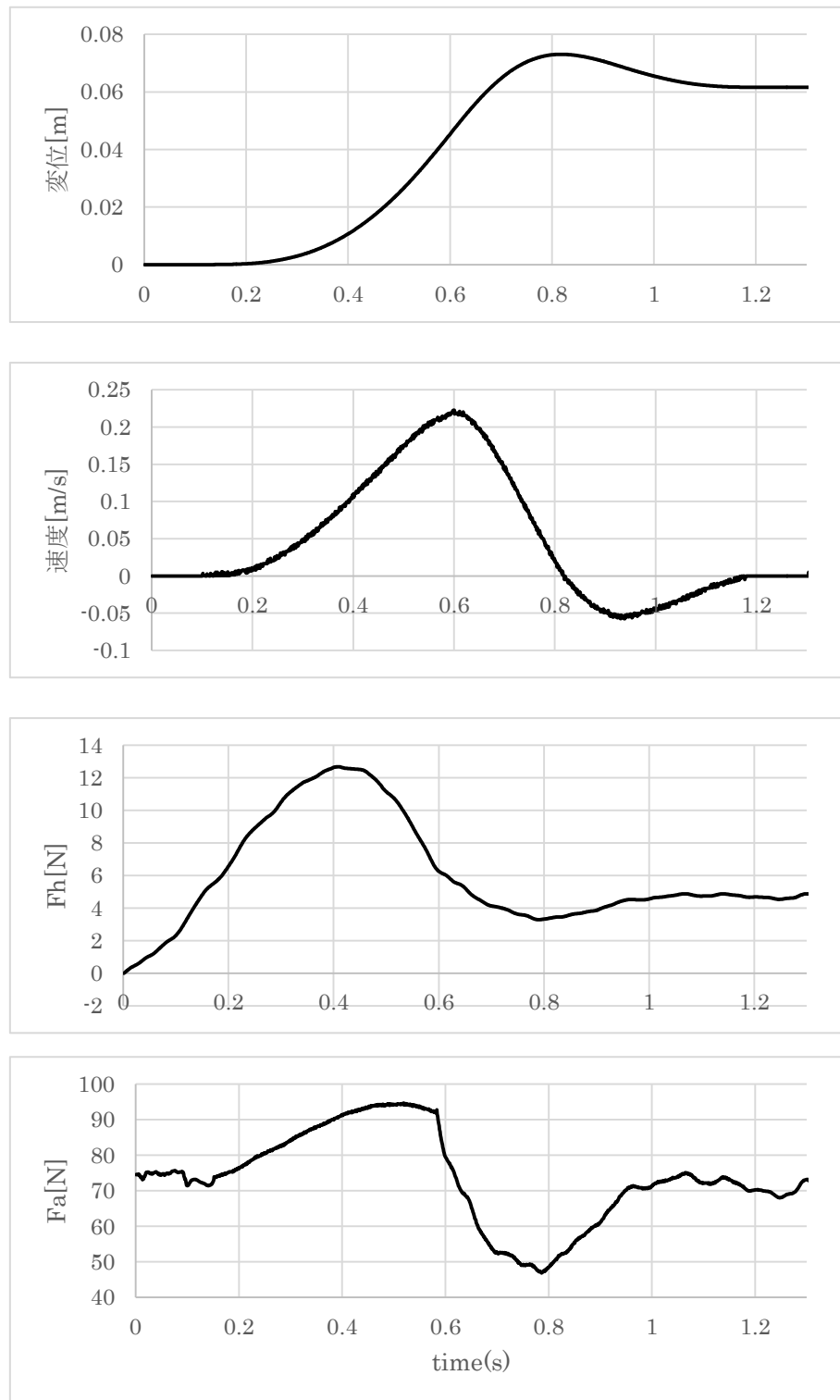


図 5-10 $\alpha=6$ のとき，被験者 A の操作情報

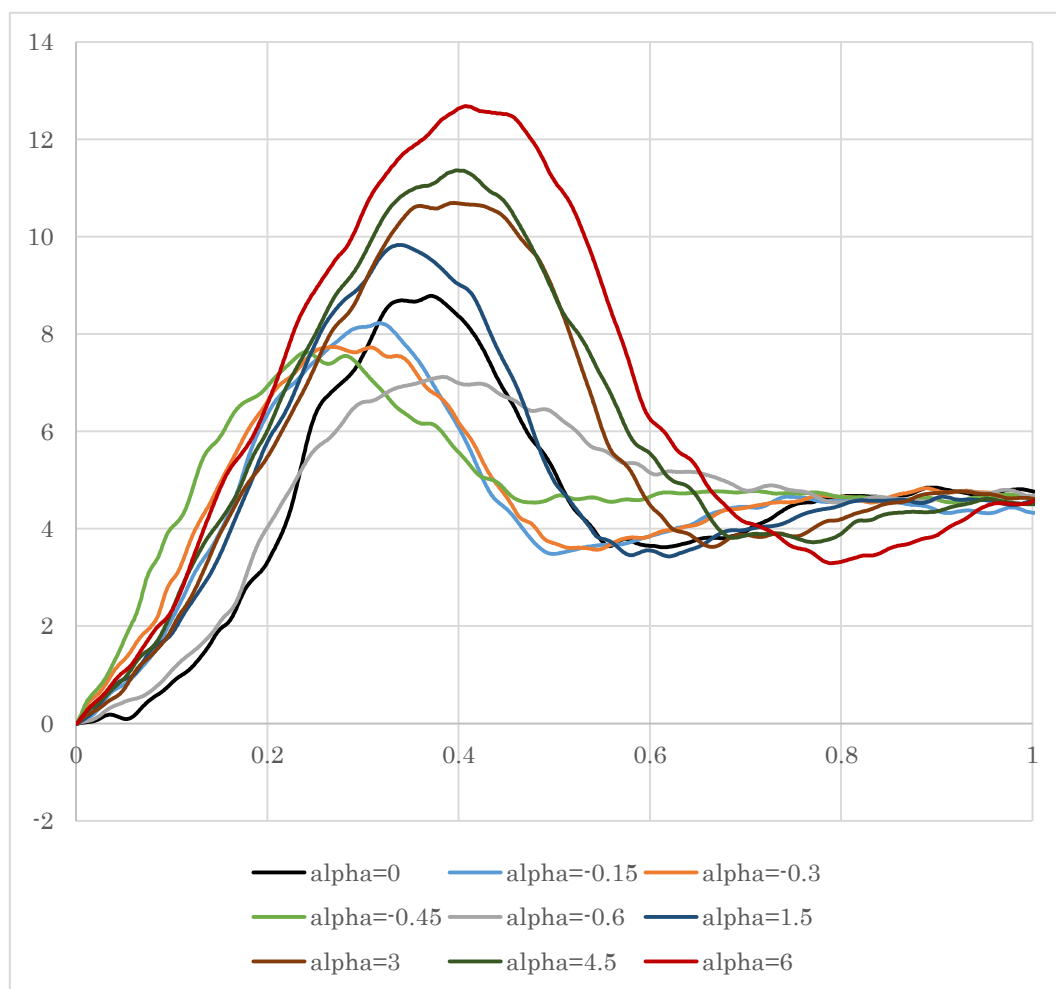


図 5-11 慣性係数 α によって被験者 A の加えた力

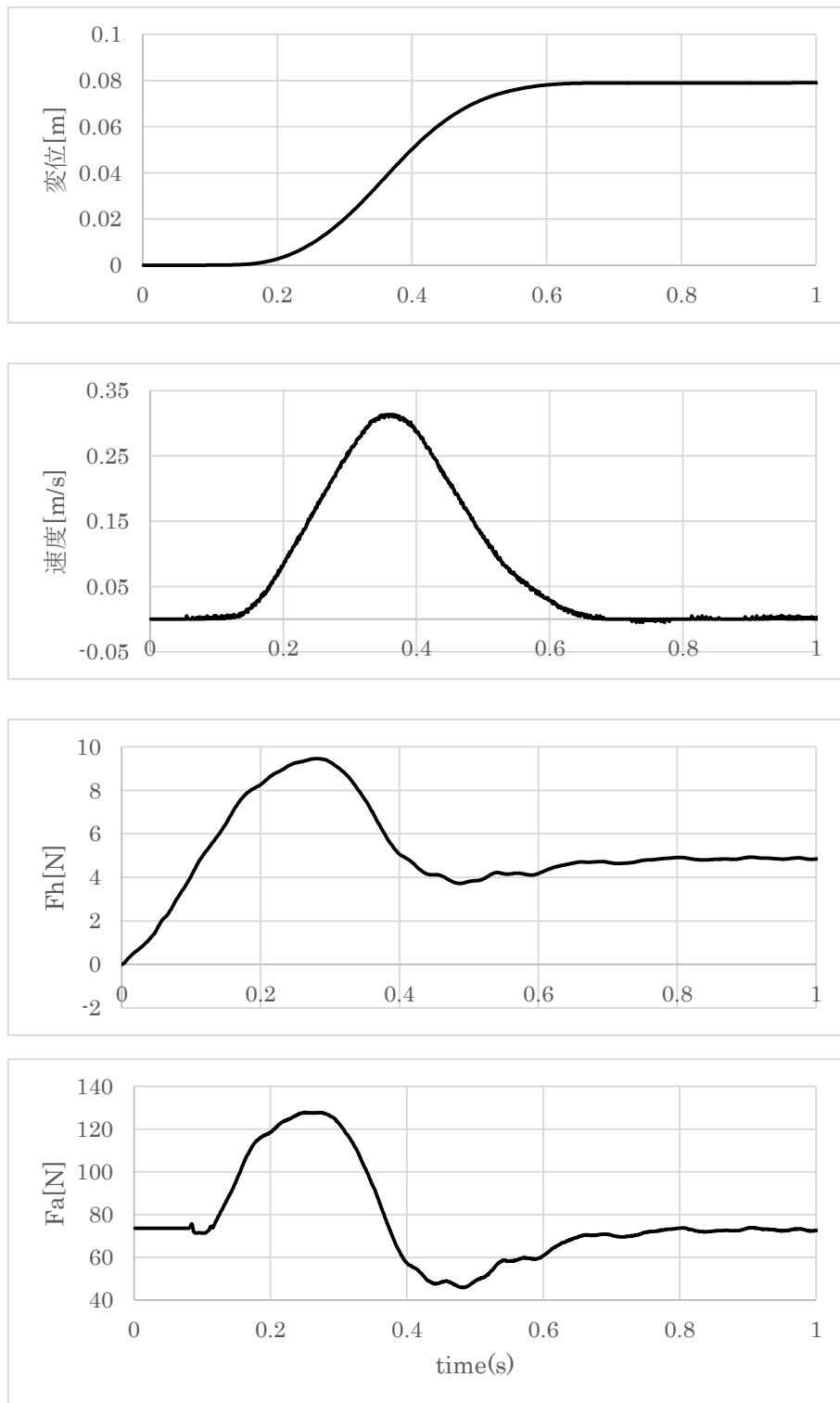


図 5-12 $\alpha=0$ のとき，被験者 B の操作情報

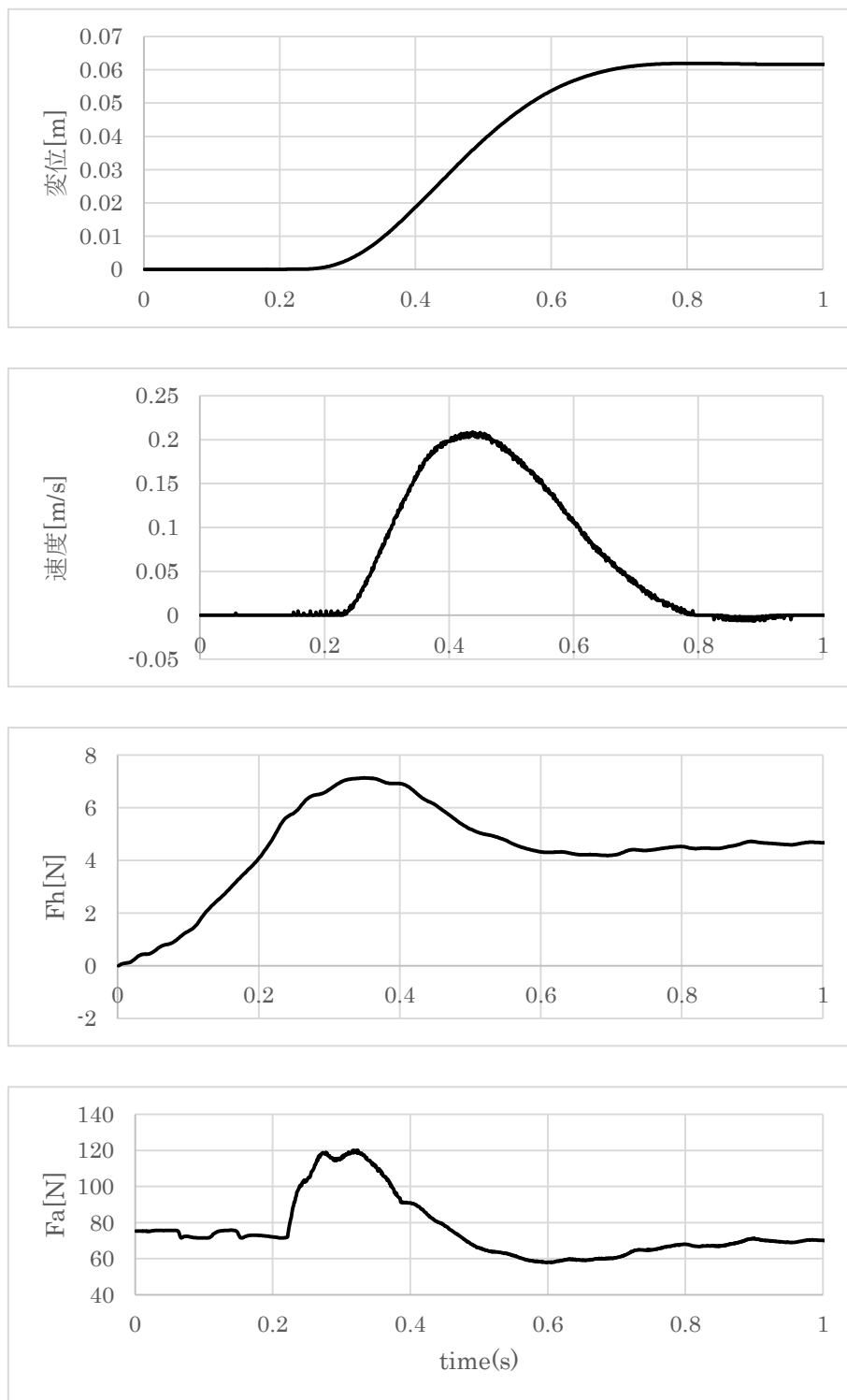


図 5-13 $\alpha = -0.6$ のとき，被験者 B の操作情報

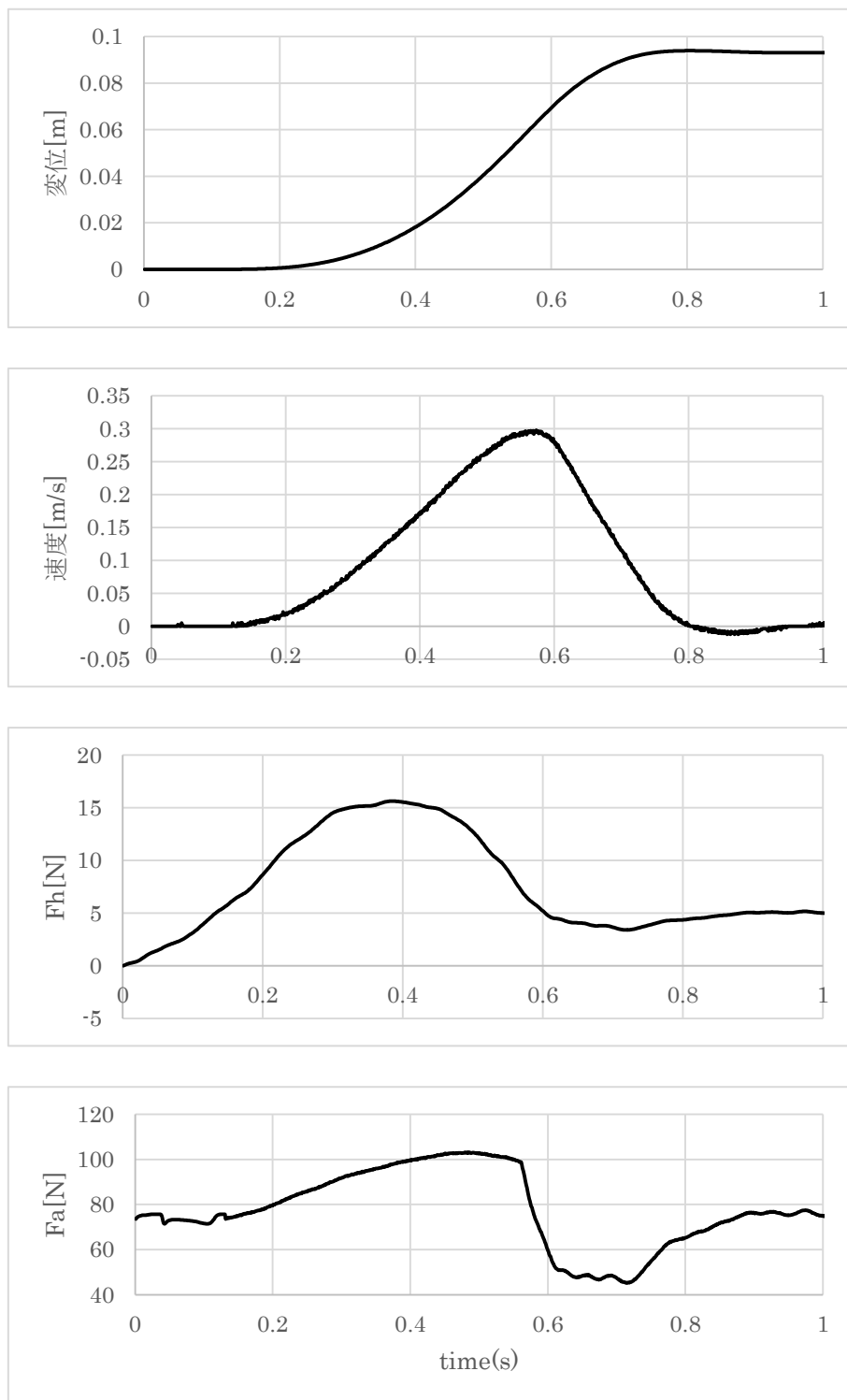


図 5-14 $\alpha=6$ のとき，被験者 B の操作情報

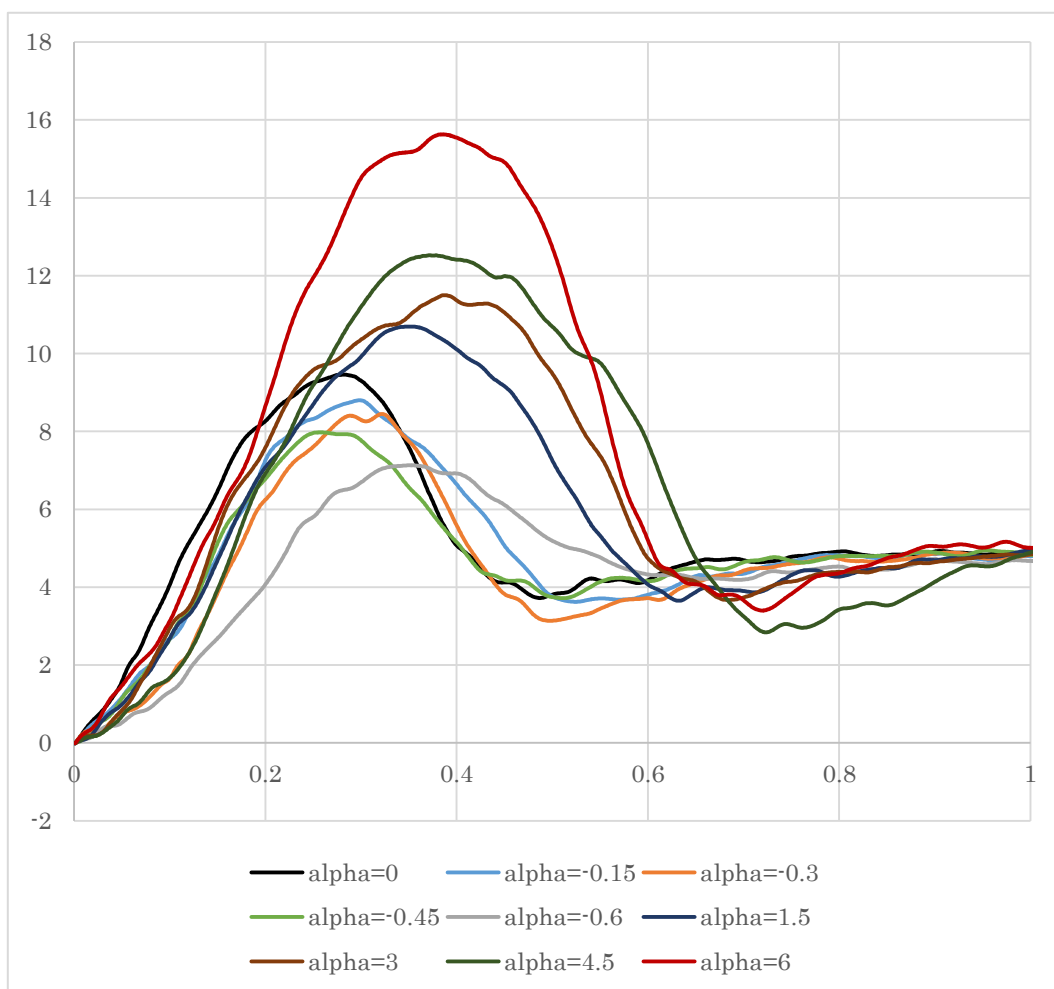


図 5-15 慣性係数 α によって被験者 B の加えた力

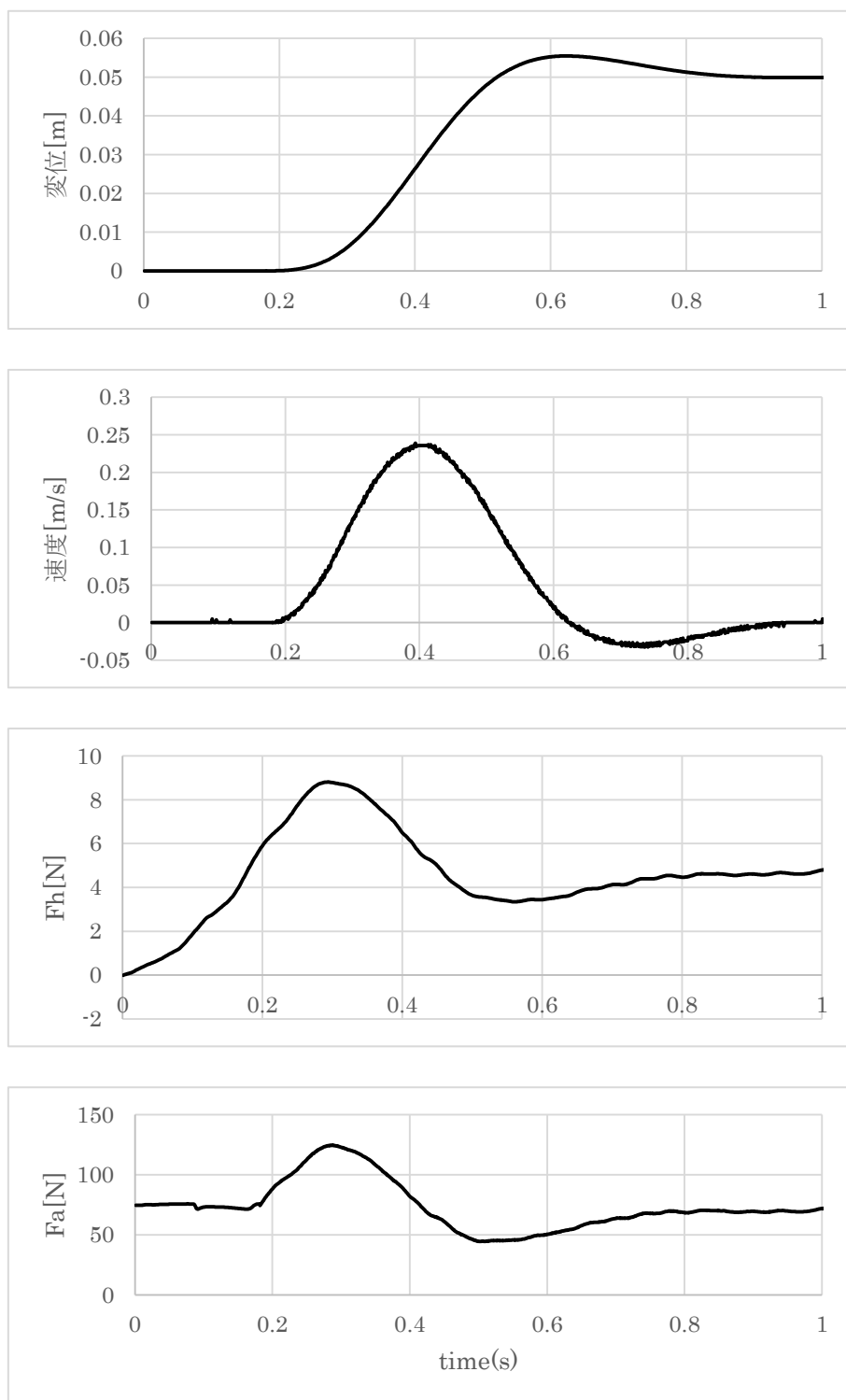


図 5-16 $\alpha=0$ のとき，被験者 C の操作情報

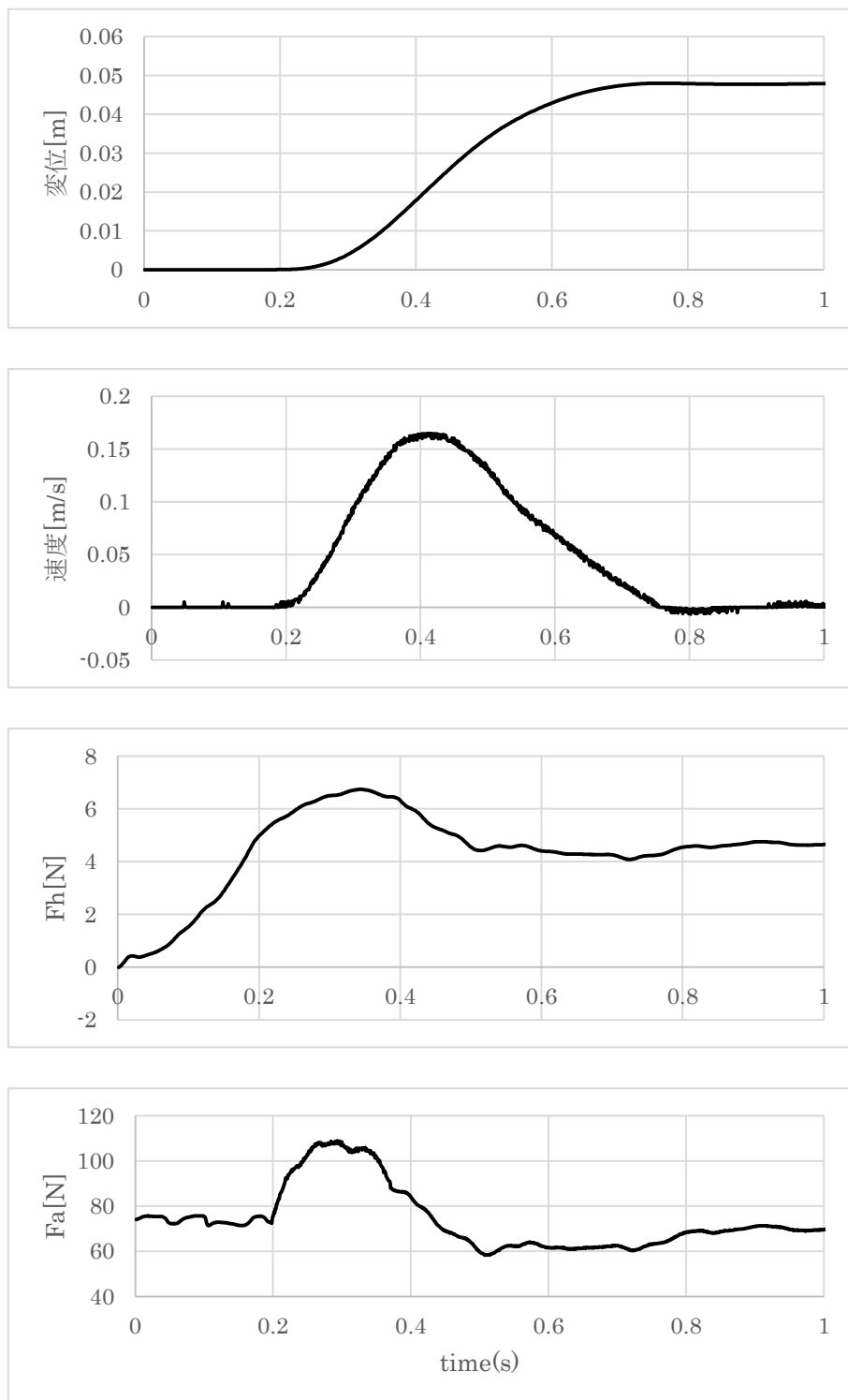


図 5-17 $\alpha = -0.6$ のとき，被験者 C の操作情報

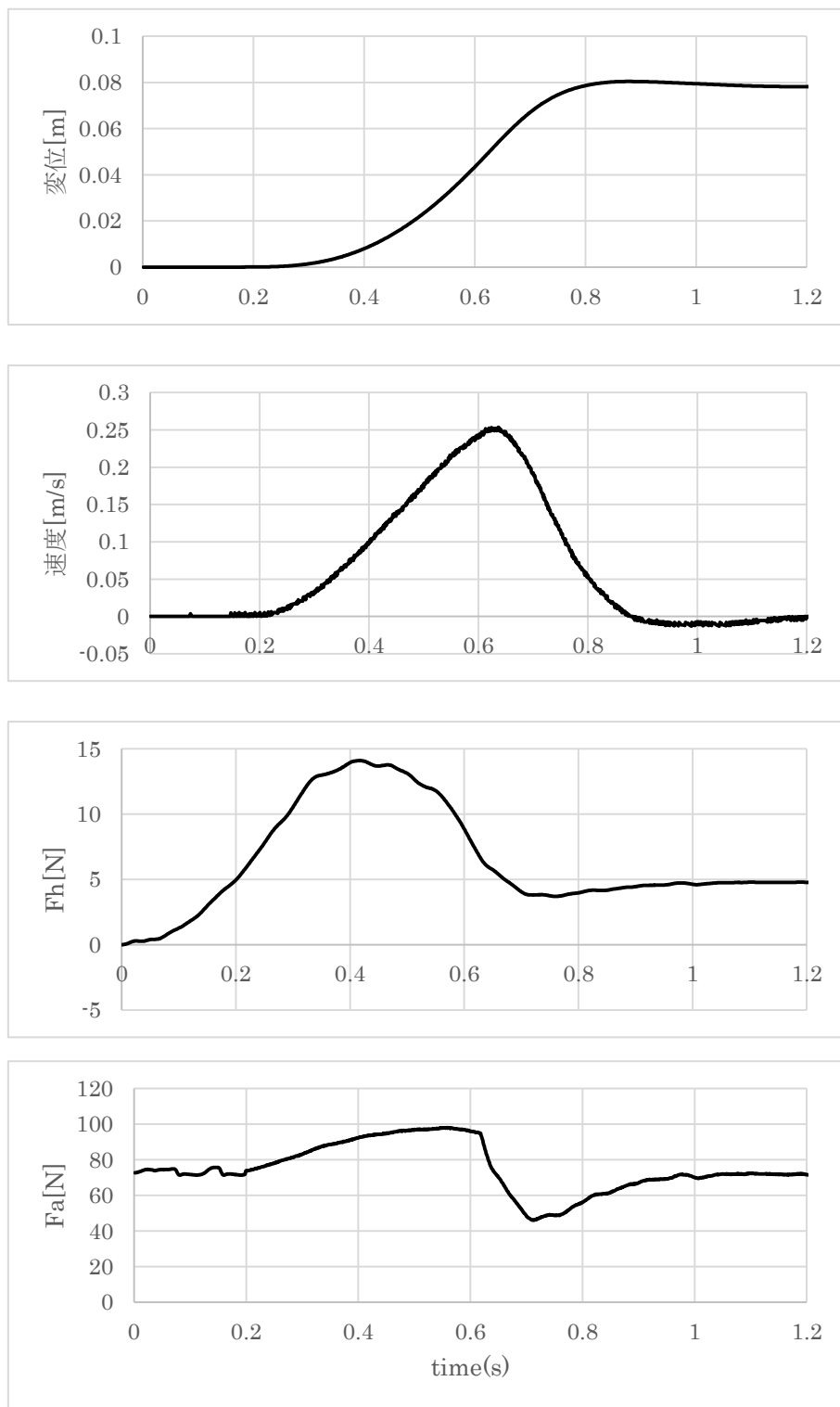


図 5-18 $\alpha=6$ のとき，被験者 C の操作情報

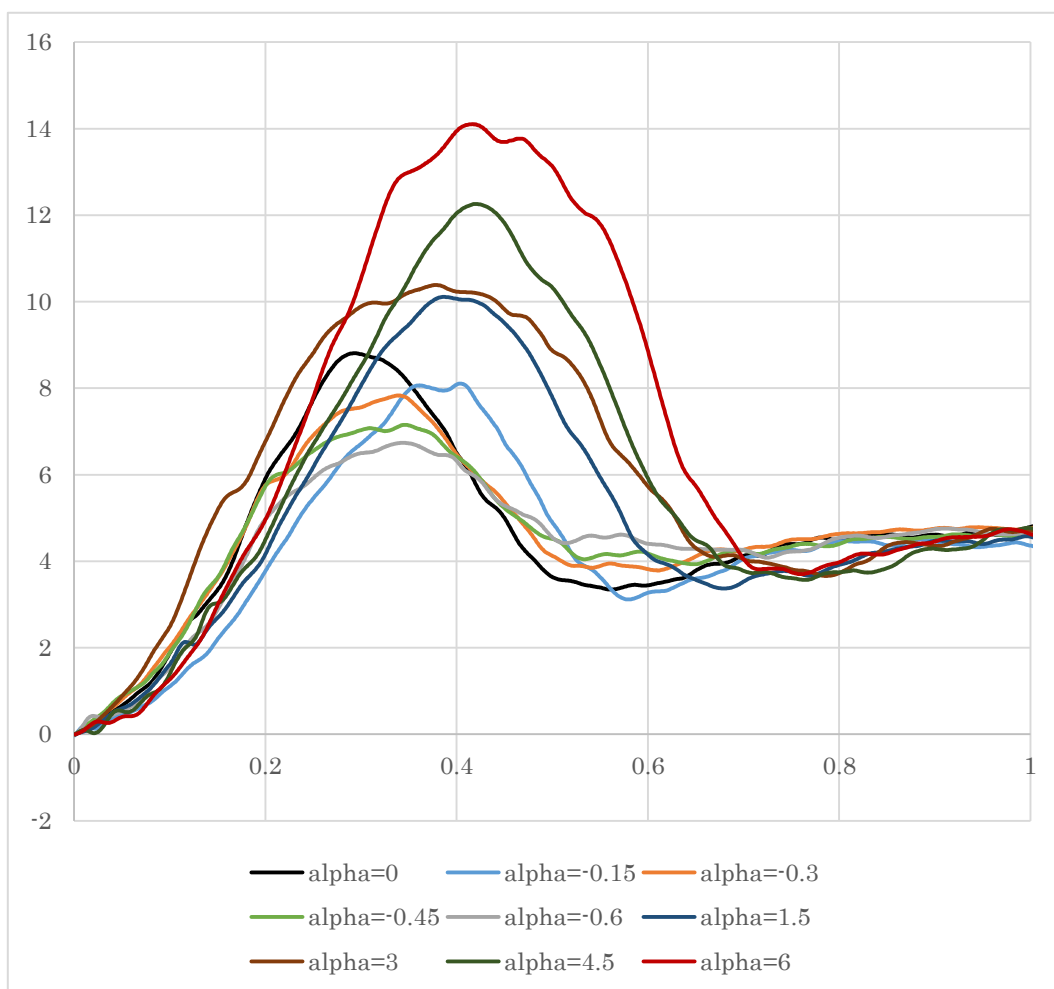


図 5-19 慣性係数 α によって被験者 C の加えた力

第6章 結言

6.1 まとめ

本研究ではパワーアシスト装置を用いて重量物を持ち上げたとき、人間の重量感覚の違和感が発生した場合、安全に適切な操作ができるよう、違和感を少なくするために、慣性制御方法で装置の出力を制御した。慣性制御で人間の重量感覚にどのくらい影響できるか人間の重量感覚を調査する実験を行った。制御方法により、慣性制御の慣性係数 α を設定すると、パワーアシスト装置の入力として物体の慣性が制御され、装置の出力を変えられ、人の力加え方に影響し、人の重量感覚も変えられる理論である。実験結果として、慣性係数 α によって、パワーアシストされた物体を持ち上げた被験者の重量感覚が変わったことが明らかに確認できた。

先行研究の実験結果の再確認に関して、パラメータピークの高さ h の設定により関係 $R = f(F_h)$ を変えてもパワーアシストされた物体（物体A）を持ち上げたとき、被験者の重量感覚は0.5[Kg]前後の重さしかを感じなかった。制御理論により、物体が接地状態であるとき、人の力とテーブルから反力の関係を変えられたら、人の重量感覚に影響できると予想した。先行研究の実験でこの予想を確認したが、本研究では人の重量感覚に影響することができなかった。原因を調べるため、装置システムの遅れ時間も検証した。しかし、装置の遅れ時間の原因の一部であり、先行研究の制御理論により、10[Kg]の量物を持ち上げた人の重量感覚を変えることに対して効果がなかったこともあった。

6.2 今後の課題

第2章に述べた制御方法により、人間の重量感覚を変えることができたが、その方法で、人間の重量感覚の違和感はいつそしてどのくらい大きさが発生したら、適切な制御をできなかった。今後の課題として、人の力加え方により、人間の重量感覚の違和感の大きさを評価することが必要であり、その違和感の大きさによって、適切な装置の出力を出せる制御方法を提案する。また、人間の重量感覚に影響するファクタは多数あるが、特に視覚印象、操作の姿勢また使った筋肉を詳しく調べに行く。実験装置に関して、現在装置の構造は理論研究の目的で製作されたので、アクチュエータのガイドの質量は5.6[Kg]もある。物体を取り付けなくても、可動部分（アクチュエータ可動子とガイド）は8[Kg]となり、アクチュエータは無駄な力を出してしまう。そして、この構造で実際現場の物体や荷物を取り付けにくいので、生産現場で利用できるように、ガイドを軽量化し、図6-1に示すように簡単な機械機構を改良していく。

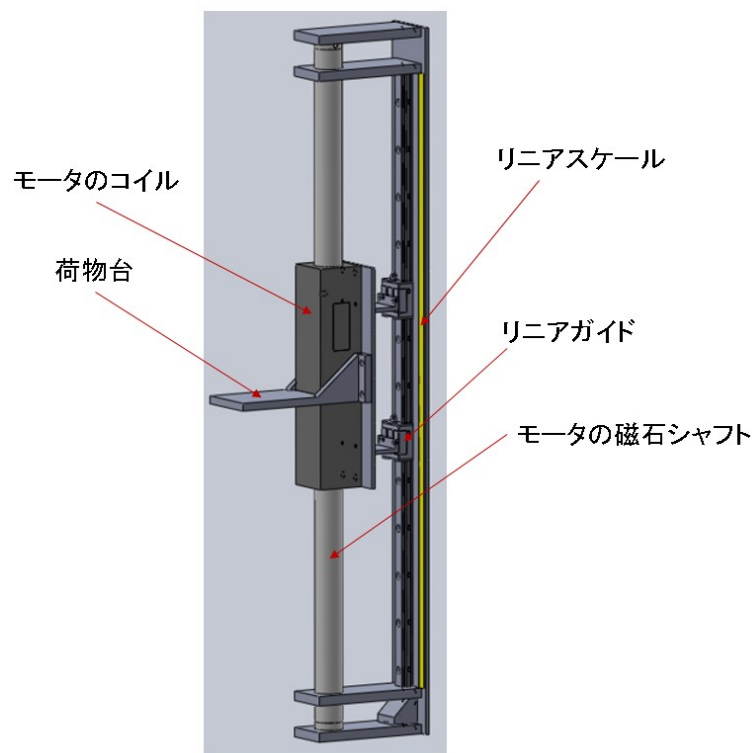


図 6-1 今後の課題として装置の設計案

参考文献

- [1] 内閣府 (2015): 「高齢社会白書」, p. 日経印刷社発行
- [2] 内閣府ホームページ/高齢者の就業
http://www8.cao.go.jp/kourei/whitepaper/w-2016/html/zenbun/s1_2_4.html
- [3] 「女性労働の分析2015年」公益財団法人21世紀職業財団発行
- [4] 石橋, 伸祐 (2013): 「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」, 三重大学平成24年度修士学位論文
- [5] 石橋伸祐, 池浦良淳, 早川聡一郎, 澤井秀樹 (2011): 「物体持ち上げ動作における重量知覚特性」, 日本機械学会第22回バイオフィロンティア講演会講演論文集
- [6] 石橋 伸祐, 池浦 良淳, 早川 聡一郎, 澤井 秀樹 (2012): 「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」, 平成24年度電気関係学会東海支部連合大会 講演論文集
- [7] 石井峰雄, 山本圭治郎, 兵頭和人 (2006): 「完全独立型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. 2006-3, no. 05-0548, p. 175-182
- [8] 神吉厚之, 森川寛也, 横川隆一, 柴田 浩, 積際 徹 (2005): 「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, no. 1P1-N-065
- [9] 土井達也, 山田宏尚 (2009): 「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」, 日本機械学会論文集.C 編, Vol. 75, No. 752, pp. 970-976
- [10] 林原靖男, 谷江和雄, 荒井裕彦, 渡嘉敷浩樹 (1999): 「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
- [11] 高橋徹, 米谷史雄, 奥田裕之, 稲垣伸吉, 鈴木達也 (2008): 「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)
- [12] ActiveLink ホームページ/アシストスーツ Awn-03B:
<http://activelink.co.jp/doc/1672.html>
- [13] 加藤寛之, 池浦良淳, 野口真平, 水谷一樹, 中村久, 本田朋寛 (2006): 「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
- [14] Itzel Jared Rodriguez Martinez, Ryojun Ikeura and Soichiro Hayakawa (2014): 「Characteristics of the Human Weight Perception When Lifting Objects with a Power Assist System」, 2014 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics

- [15] Itzel Jared Rodriguez Martínez, Ryojun Ikeura and Soichiro Hayakawa (2015) : 「Control Based on the Modification of the Relation between the Reaction Force and the Human Force and its Effects on the Weight Perception」 Proceedings of The 24th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication
- [16] Rodriguez Martinez Itzel Jared (2015) : 「Evaluation of the Weight Perception With a Control Based on the Modification of the Relation between the Human and the Reaction Force」, 三重大学平成27年度修士学位論文
- [17] 有住卓朗, Rodriguez Itzel, 池浦良淳, 早川聡一郎, 澤井秀樹 (2015) : 「パワーアシスト装置による物体持ち上げ動作における重量知覚特性の制御」, 日本機械学会東海支部第64期総会・講演会講演論文集, No.153-1
- [18] S.M. Mizanoor Rahman (2010) : 「Design and control of a power assist robot system for lifting objects based on human's weight perception」, 三重大学平成22年度博士学位論文
- [19] 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研究に関する有益な御助言を頂き，深く感謝致します。厚く御礼申し上げます。

また，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，御鞭撻を親身になって行って頂き，深く感謝致します。心より御礼申し上げます。

さらに，実験装置の改良にあたり，親身な御協力，御尽力，アドバイスをくださった澤井秀樹研究員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，惜しみ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。

付録

コントローラ Aproc-1 Plus のプログラム

Aproc-1Plus コントローラを利用すると、簡単に入出力をコンピュータのプログラミング言語で設定することができる。第2章の制御方法で作成したプログラムは表 0-1 に示す。

表 0-1 コントローラの制御プログラム

```

m=8;
g=9.81;
c=95;
Fh_scale=2.5;
var sR_scale=20;
Fa_scale=42.5;
var Fh_offset=0;
var sR_offset=0;
var rst_btn=0;
var sysError=0;
var k_Fa=1;
proc
{
  if (imd<0.4) || (imd>1) {md=1;} else {md=imd;}
  rst_btn=Din(3,1,0);
  if (rst_btn==1) && (x<3) {
    x=Cin(0,0);
    Fh_offset=Ain(0,0,1);
    if (Ain(1,sR_offset,1)!=0) {
      if (sR<30) {sR_scale=md*g/Ain(1,sR_offset,1);}
    }
    sysError=0;
  }
  if (x>3) {
    sR_offset=Ain(1,0,1);
  }
  x=Cin(0,0.005)/1000;
  vel=deriv(x,0.001);

```

```

Fh = Ain(0, Fh_offset, Fh_scale);
isR=Ain(1, sR_offset, sR_scale);
sR=lag1(isR, 0.005);
if (sR>=(md*g)) {
    ModeSwitch=0;
}
if (Fh>=(md*g)) {ModeSwitch=1;}
if (ModeSwitch==0) {
    R=md*g-Fh;
    dR=(R-sR);
    if abs(dR)<=5 {kP=10*pow((1-abs(dR)/5), 8);} else {kP=0;}
    Fa=(m-md)*g-kP*dR;
    k_Fa=1;
    check_k_Fa=0;
    tFa=Fa;
    dFh=limit(deriv(Fh, 0.02), 0, 200);
    s_time=currTime();
}
else {
    R=0;
    lR=0;
    if (abs(tFa-Fa)<0.5)&&((currTime()-s_time)>0.03) {k_Fa=0;}
    K=k_Fa*limit(alpha, -2, 20)*md;
    if (vel>=0) {
        Fa=(m/(md+K)-1)*Fh+(c-(m/(md+K))*cd)*vel+(1-md/(md+K))*m*g;
    }
    else{
        Fa=(m/(md+K)-1)*Fh+(c-(m/(md+K))*cdd)*vel+(1-md/(md+K))*m*g;
    }
    if (Fh<0.5) {
        if (vel<-0.3) {FallingError=1;}
        if (Fh>1) || (x<1) {FallingError=0;}
        if (FallingError==1) {Fa=(m-md)*g;}
        oFa=lag1(Fa, 0.005);
    }
    Aout(0, 0, Fa_scale, Fa); }

```

ドライバのパラメータの設定

本研究はサーボランド（株）のSVF-H8 モータドライバを利用している。モータとドライバの性能を合わせる必要があるため、モータが正常に出力できるように、設定したモータドライバのパラメータを表 0-2 のように示す。パラメータ設定方法はドライバを RS323C コネクタでパソコンに接続し、サーボランド（株）のドライバ専用ソフトウェアの上でコードを入力し、ドライバのパラメータを設定することができる。

表 0-2 モータドライバの設定したパラメータ

番号	名前	数値
#0	エンコーダ基本分解能	70000
#1	リニアモータ有効長さ	350
#2	ボール数	23
#3	モータ定格電源	27
#4	電流リミット電源	100
#7	最大回転数	3000
#8	検査モード	10046
#9	指令モード	1110
#12	初期モード	37
#17	位置ループ時定数	14
#18	速度ループ時定数	5
#19	加速度ループゲイン	3000
#46	自動力率検知ゲイン係数	1
#64	電流ループ比例ゲイン	1000
#65	電流ループ積分ゲイン	40

実験装置の時間遅れ検証

図 0-1 のように、装置の遅れはドライバの電流フィードバックのゲインによって、変化することが分かった。それで、電流フィードバックゲインの値を設定し、装置のどのぐらい時間遅れになったか調査する。

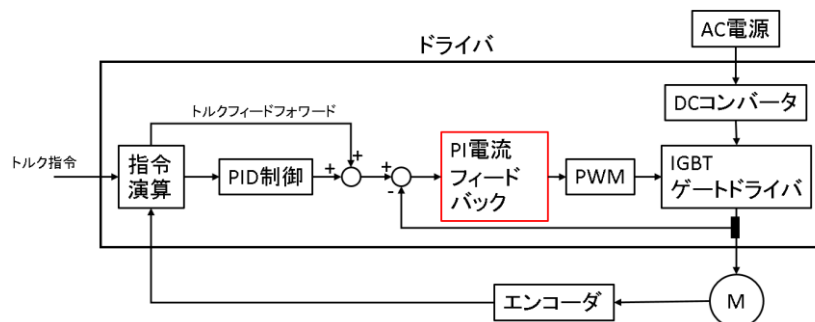


図 0-1 ドライバのシステム

図 0-2 に、装置の時間遅れ検証のブロック線図を示す。ドライバにステップ入力でトルク指令すると、モータが力を出し、物体を支える。トルク指令を物体の重力より小さい値で入力し、反力センサが反応してくる信号を登録する。反力センサのデータから時間遅れを確認できる。遅れの求め方は図 0-3 のように示す。遅れ時間または時定数 t_d は立ち上がり (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⁽¹⁹⁾。遅れ時間 t_d はどのくらいであるか調べに行った結果として図 0-4 に示すようになる。図 0-4 により、ドライバの電流フィードバックゲイン K_p が大きければ、大きいほど、遅れ時間 t_d が小さくなるが、行き過ぎ量が大きくなり、発振する場合がある。それで、電流フィードバックゲイン設定するとき、遅れ時間 t_d を出来るだけ小さくする目指が、システム安定のため、行き過ぎ量と妥協しなければならない。本研究で電流フィードバックゲイン $K_p=1000$, $K_i=40$ を設定する。この場合、指令値 F_a は 20N, 40N, 60N でドライバにステップ入力して、装置の時間遅れを確認した。結果として、図 0-5~図 0-7 に示す。ステップ応答から時間遅れ t_d 求めると、 $t_d=0.015(s)$ となった。

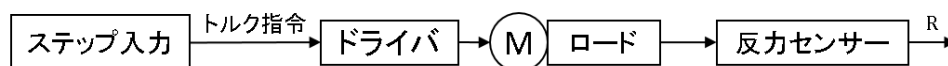


図 0-2 装置の時間遅れ検証のブロック線図

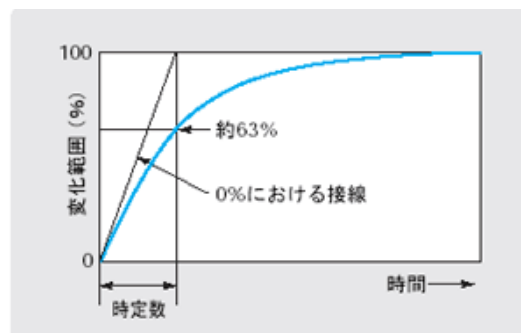


図 0-3 時間遅れの求め方

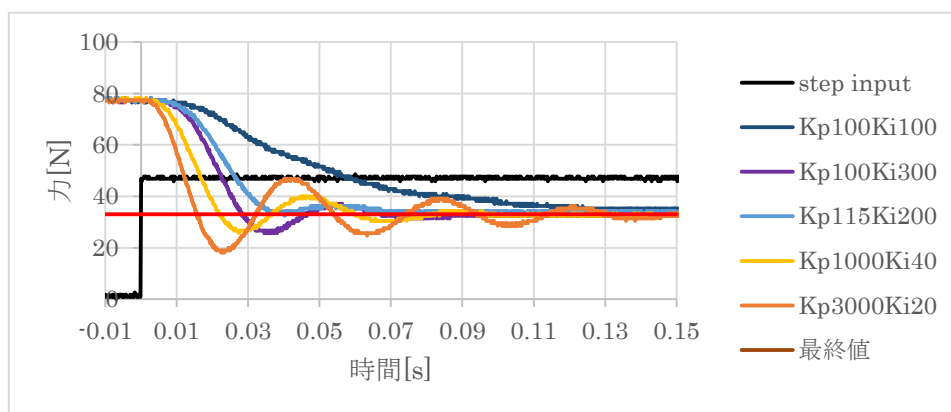


図 0-4 ドライバの電流フィードバックゲインによって装置のステップ応答

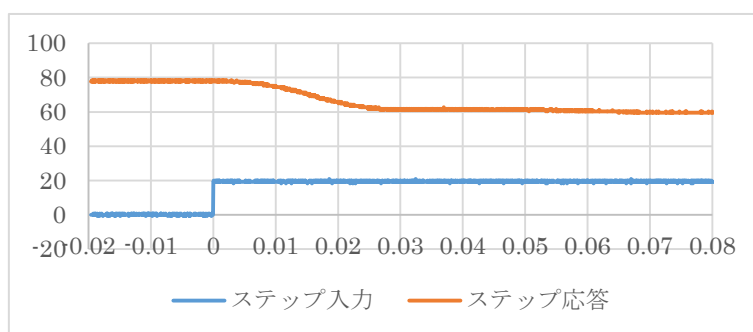


図 0-5 ステップ入力 20 [N] の時, 装置のステップ応答

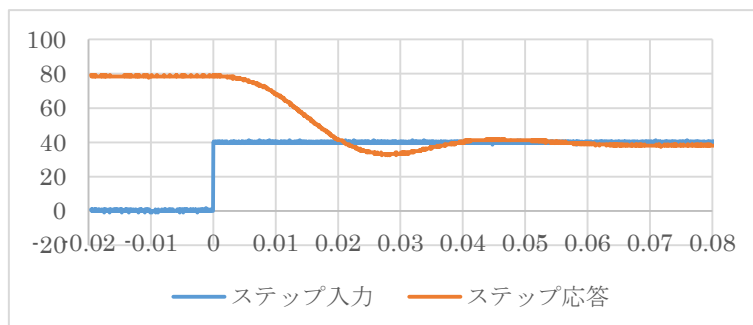


図 0-6 ステップ入力 40 [N] の時, 装置のステップ応答

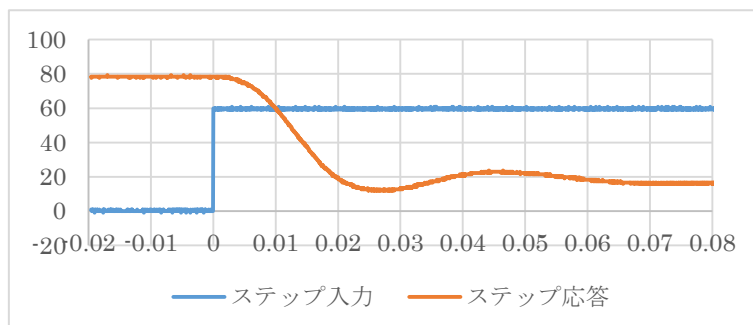


図 0-7 ステップ入力 60 [N] の時, 装置のステップ応答