

平成14年度

修士論文

下肢支持性欠如に起因する転倒の防止制御の検討

(A Study of a Control Method for Preventing from a Fall)

指導教員

井上 喜雄 教授

副指導教員

王 碩玉 教授

高知工科大学 大学院工学研究科
基盤工学専攻 博士課程(前期)
知能機械コース 1055049 田能 寿孝

1章 緒言	1
1.1 研究背景	1
1.2 従来の歩行訓練	3
1.3 本研究の目的	4
1.4 本論文の構成	4
2章 転倒パターン	6
3章 吊り上げ装置付き電動歩行支援機	8
3.1 概要	8
3.2 患者吊り上げ装置	10
4章 吊り上げ装置の制御	12
4.1 吊り上げ装置の仮想コンプライアンス制御	13
4.2 転倒防止制御	16
5章 吊り上げ装置の制御実験	17
5.1 仮想コンプライアンス制御実現性に関する確認実験	18
5.1.1 目的	18
5.1.2 方法	18
5.1.3 結果	19
5.1.4 考察	19
5.1.5 まとめ	19
5.2 歩行実験	20
5.2.1 歩行実験1	20
5.2.1.1 目的	20

5.2.1.2	方法	21
5.2.1.3	結果	23
5.2.1.4	考察	25
5.2.1.5	まとめ	25
5.2.2	歩行実験2	26
5.2.2.1	目的	26
5.2.2.2	方法	26
5.2.2.3	結果	27
5.2.2.4	考察	29
5.2.2.5	まとめ	29
5.3	転倒防止実験	30
5.3.1	変位を用いた場合	30
5.3.1.1	目的	30
5.3.1.2	方法	30
5.3.1.3	結果	31
5.3.1.4	考察	34
5.3.1.5	まとめ	35
5.3.2	モータ目標加速度を用いた場合	36
5.3.2.1	目的	39
5.3.2.2	方法	39
5.3.2.3	結果	40
5.3.2.4	考察	44
5.3.2.5	まとめ	46
6章	結言	47

謝辞・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 50

参考文献・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 51

付録

付録A 歩行訓練装置の系統図

付録B 歩行訓練装置の分類表

付録C 歩行訓練装置の概要

付録D 制御信号の系統図

付録E ACサーボモータ

付録F ロードセル

付録G モータドライバ

付録H 転倒防止制御のフローチャート

グラフ

グラフA 仮想コンプライアンス制御実現性に関する確認実験

図 5.1.1 ~ 図 5.1.9

グラフB 歩行実験1

図 5.2.1.1 ~ 図 5.2.1.27

グラフC 歩行実験2

図 5.2.2.1 ~ 図 5.2.2.27

グラフD 変位を用いた転倒防止実験

図 5.3.1.1 ~ 図 5.3.1.15

グラフE 転倒時のモータ目標加速度との比較

図 5.3.2.1 ~ 図 5.3.2.18

グラフF モータ目標加速度を用いた転倒防止実験

図 5.3.2.19 ~ 図 5.3.2.42

グラフG モータ目標加速度とモータ実測加速度で停止した場合の比較実験

図 5.3.2.43 ~ 図 5.3.2.45

1章 緒言

1.1 研究背景

2002年6月にマドリードで開かれた国連主催の「高齢化に関する世界会議」において、世界人口に占める65歳以上の高齢者の割合は、2000年は6.9%であったのに対して2050年には15.6%になると予想されている。

一方、我が国において、65歳以上の高齢者人口を「人口推計」(総務省)で見ると、2002年8月1日現在、2,351万人であり、総人口(1億2,732万人)に占める割合(高齢化率)はすでに18.5%となっている。

今後の高齢化の推移を「日本の将来推計人口」(国立社会保障・人口問題研究所、2002年1月推計)で見ると、65歳以上の高齢者人口及び高齢化率は、平均寿命の伸びや低い出生率を反映して今後も上昇を続け、2013年には高齢者人口は3,000万人以上になり、高齢化率は25%を超え、国民の約4人に1人が65歳以上の高齢者という本格的な高齢社会が到来するものと見込まれている。

また少子化も進んでおり、すでに65歳以上の人口は、14歳以下の年少人口(2002年には1,809万人)を上回っている。さらに、高齢化は全国的に進行し、2022年にはすべての都道府県で65歳以上の高齢世帯の割合が30%以上になり、高知県・秋田県など7県では40%以上と見込まれている。

このような高齢社会の進行により、加齢にともなう筋力や体力の低下、骨折、脳血管障害などが原因で歩行機能に障害を持つ人々が増えてきている⁽¹⁾。高齢者が自立した生活を送るための前提条件としては、日常生活の基本動作である歩行・移動機能が充足されることが必要であり、歩くことは高齢者にとって肉体的・精神的な健康を保つ上で非常に重要である⁽²⁾。また逆に、ひとたび歩行が困難になると、生活の質は著しく低下し、本来の疾患は重症でないにも関わらず、連鎖反動的にその他の身体的機能も衰える「廃用性症候群」として、最終的に寝たきりの状態に結びつく危険性も指摘されている⁽³⁾⁽⁴⁾。

高齢者の自立という点からみれば、歩行機能に支障ができればすぐに車いすや

電動三輪車を使用するというのではなく、歩行器の活用も検討するなどして、高齢者の残存機能を活かすことも重要である。それは、これらの機器を提供されたことにより、外出はするが自身の体力を使わないためにさらに筋力が落ちることや、判断の甘さや操作に不慣れなことから事故に遭う場合もあるからである⁽⁵⁾。また、脚筋力が低下すると平衡機能も低下して転倒する機会が増えるともいわれている⁽⁶⁾。

高齢者にとって身体活動や運動をすることは、疾病を予防するだけでなく、運動機能や判断力を高め、転倒による骨折などにより寝たきりになることを防ぐ。また、寝たきりは「寝かせきり」から生じるものであり、適切なりハビリテーションやケアによって予防できることは容易に想像できる。

したがって、そのような高齢者に対して歩行機能の回復訓練は重要な課題のひとつになっている。またさらに、寝たきり患者の人口を増やさないための予防的手段としても非常に重要である。

歩行機能に障害のある患者が歩行リハビリテーション（以下歩行リハ）を行う場合には、多数の人手と時間を要する。一般には理学療法士や看護師ら（医療者）が患者に付き添い、体を支えながら行っているのが現状である。しかし、このような方法は介助する側の身体的・心理的負担は非常に大きい。また、介護を行える若年人口の減少も避けられないため、今後さらに高齢化が進み歩行リハを必要とする患者が増加すれば、医療者の身体的・心理的負担が増すばかりでなく、それぞれの患者に必要とされる歩行リハの時間も十分にとれなくなる可能性もある。

このような理由から、歩行機能に障害のある患者の歩行リハの促進と医療者の身体的負担を軽減するために、患者がある程度自立して歩行リハを行うことを可能にする歩行支援機の開発が望まれている。そして、このような歩行支援機には患者が安全に歩行リハを行えるように、患者の動作状態を認識し、転倒などの異常を検知し対応する機能が要求される。

1.2 従来の歩行訓練^{(7)~(35)}

一般的には、術後早期にベッド上における筋力強化訓練から始まる。これは、術後の関節や筋肉が固くなっている状態を改善し、徐々に筋肉をつけるものである。次にベッド上で起座、そして車椅子での移動訓練へと進む。これらと平行して傾斜台を用いた起立訓練をおこなう。これは、患者を仰臥位の状態から徐々に台を傾斜させ、起立位までもっていくものである。そして、平行棒、歩行器、松葉杖による歩行訓練を開始する。このような段階的訓練は、能力と意欲に合わせておこなえる利点がある反面、患者の上肢の力により体を支えておこなうものであるため、患者自身の努力と忍耐に負うところが多い。また、平行棒は長さが約3.6mあり方向転換をするときに非常に困難をとまなう。さらに、歩行器や松葉杖ではいずれも、転倒の危険性がある。そのため、介助者には、患者の支持という肉体的負担が生じ、彼らの腰痛も大きな問題になっている。

また、プールを用いた水中歩行訓練もおこなわれている。これは水の浮力を利用したものであり、足にかかる負担も小さく効果も高いと言われ、高齢者にとっては温泉療法と似たような感覚があり馴染みのある訓練方法である。しかし、プールの設備のない病院も多い、医療スタッフも毎日水に入らなければならない、水質等の衛生管理にも費用がかかるなどの理由で実施には適さないことが多い。

そのようなことから、患者に苦痛を与えず、効率的・長期的な訓練支援をし、介助者の負担軽減を可能にする機器として、患者の体幹を支えたり上から吊るタイプのものが研究されており、その中のいくつかはすでに実用化されている（付録Aに歩行訓練装置の系統図、付録Bに歩行訓練装置の分類表、付録Cに歩行訓練装置の概要を示す）。

この種の装置は患者の身体支持を訓練装置にゆだねることで、介助者の身体的・時間的負担を軽減し、訓練時間や回数の効果的な増加が可能になる。さらに、訓練内容の評価や患者の精神的ケアに専念できるというメリットもある。

特に患者を上から吊るタイプは、患者にとって安全で、自然に近い歩き方ができると考えられる。しかし、従来の吊り上げ機構をもつタイプは、どれも体重免荷歩行を目的につくられており、左右同時に一定荷重で吊り上げる機構になっている。そのため左右別々に吊り上げ力を変えることはできない。

また、急激な荷重の変化が起こるような転倒をした場合には、ロック機構が働き停止するタイプはあるが、姿勢復帰ができるようにはなっていない。そのため患者を拘束した状態で安全を確保したものになっている。これは「アームや肘置きなどで身体を拘束しないこと」と、転倒のような危険な状態になった場合に、「早期に対応し安全を確保すること」は相反することであり、ふたつを両立させるのは難しいためだと考えられる。

さらに、従来のものは定荷重バネや圧縮空気というメカニカルな方法で歩行の動きに追従するようしており、制御を用いて患者の好みや症状に合わせて変化できるようにはなっていない。

1.3 本研究の目的

そこで本研究では、以下の3点について吊り上げ装置の制御方法を検討した。

通常の歩行時には、患者をできるだけ拘束せず動きに追従させる。

転倒が発生した場合には、早期に安全を確保し、元の姿勢に復帰させる。

患者の好みや症状に合わせて、左右別々に柔らかさを変えられる。

1.4 本論文の構成

1章：研究背景および研究目的について述べる。

2章：歩行リハの現場で問題となっている転倒現象について述べる。

3章：本研究で試作した吊り上げ装置付き電動歩行支援機について述べる。

4章：歩行時と転倒時における吊り上げ装置の制御方法について述べる。

5章：吊り上げ装置の制御実験について述べる。

まず，吊り上げ装置をコンプライアンス制御した場合の動作確認実験について述べる．次に，2種類の歩行実験をおこない吊り上げ装置の追従動作を確認した．その結果をふまえて，転倒を検知する基準として，まず変位をしきい値に用いた転倒防止実験をおこない，問題点を明らかにした．そして，問題点を改良した方法として，モータ目標加速度を用いた転倒防止実験をおこない，比較した結果を述べる．

6章：結言として，歩行時には患者を拘束せず，転倒時は早期に安全を確保する吊り上げ装置の制御方法についてのまとめを述べる．

2章 患者の転倒パターン⁽³⁶⁾

歩行リハを安全におこなうためには、訓練中の転倒事故を防ぐことが重要である。医療現場において、一般的に使用される歩行器を用いて歩行リハを行う場合に見られる転倒現象として、以下に示す典型的な2つのパターンがある。

転倒パターン1 (図2.1)

歩行器と患者の水平方向の距離が徐々に離れていき、転倒に至るパターン。歩行器の動きに患者の足の運びが追いつかずに、前傾姿勢になり転倒してしまうのが特徴である。



図2.1 転倒パターン1

転倒パターン2 (図2.2)

下肢の支持性が欠如し、足が体重を支えられなくなることにより、患者の膝が折れ、主に鉛直方向に崩れ落ちるパターン。この転倒は、歩行器の動きに関わらず、非常に短時間で起こるのが特徴である。



図2.2 転倒パターン2

本研究ではとくに転倒パターン 2 についての防止制御の検討をおこなった。このような「膝折れ転倒」をおこすと、患者は顔・肩・膝などに強い衝撃を受けることになり、高齢の患者にとっては非常に危険である。さらに、外傷を受けない場合でも転倒したことを挫折体験のように感じ、その後の歩行訓練に恐怖感をもつなど、精神活動にも影響を与えることもあり⁽³⁷⁾、歩行機能が低下してしまう。それを防ぐために、前述のように介助者がそばに付き添い常に体や腰を支えながら訓練をおこなっているのが現状である。

そこで、このような転倒に対処するには、吊り上げ機構が有効であると考え、患者を拘束せずに安全に歩行リハをおこなえる吊り上げ装置の制御方法を検討することとした。

次章では、吊り上げ装置を備えた電動歩行支援機について述べる。

3章 吊り上げ装置付き電動歩行支援機⁽³⁸⁾

本章では、吊り上げ装置付き電動歩行支援機の概要と、患者用吊り上げ装置の詳細について述べる。

3.1 概要

本歩行支援機の概観を図3.1に、図3.2に歩行支援機の模式図を示す。

本機には、駆動装置、制御装置、患者吊り上げ装置、患者用手動ブレーキ、ハンドル部力覚センサ等が取り付けられており、種々のセンサ情報に基づいて内蔵した制御用コンピュータにより制御できるようにしている。また、バッテリーも搭載されており(図3.3)、自立走行も可能である。さらに、周囲への安全性と見た目の安心感に配慮し、曲面を中心とした丸みのあるデザインを取り入れたFRP製のカバーを取り付けた。

また、四肢や体幹の筋力低下があり起立位姿勢の保持が困難な患者や、手の障害もあって平行棒や歩行器のハンドルがしっかり握れないような患者にも対応できるように、肘掛けを押し力でも操縦が可能である。さらに、足の位置や力のかけ具合でも駆動速度を調節できるようにしてあるため、多くのタイプの患者に適用が可能である。(制御信号の系統図を付録Dに示す。)



図3.1 歩行支援機の概観

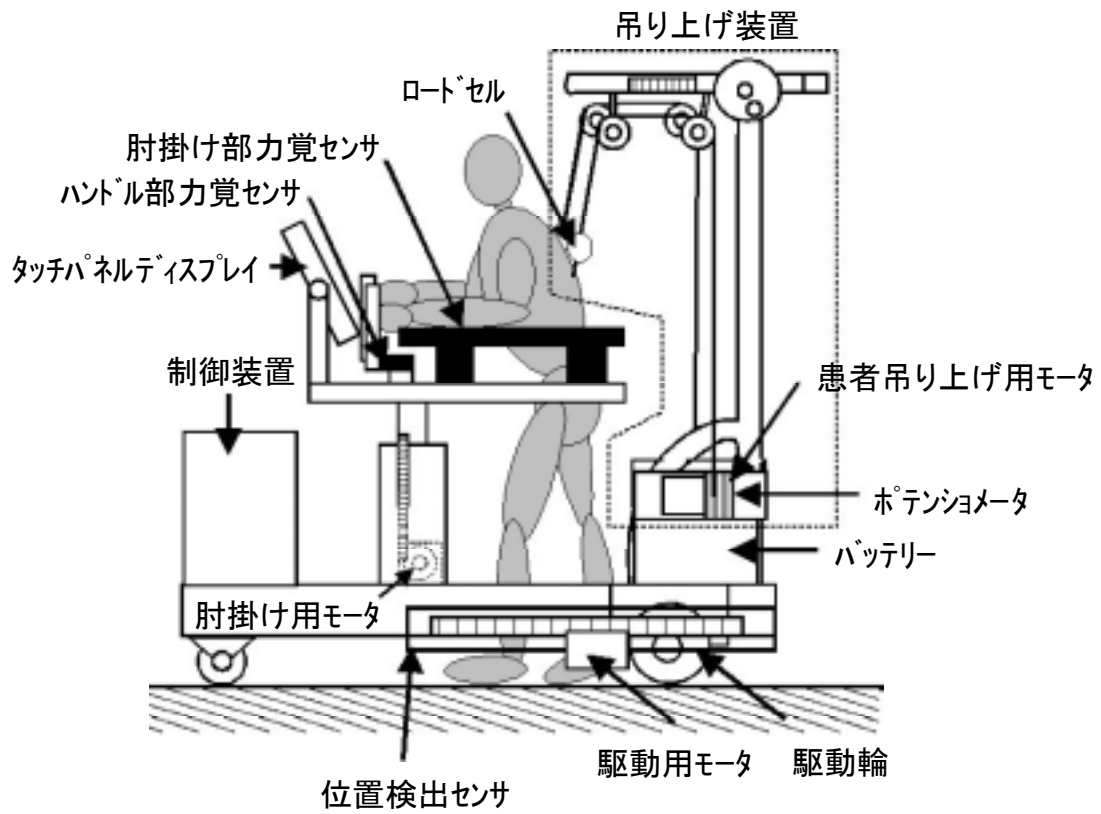


図 3.2 模式図

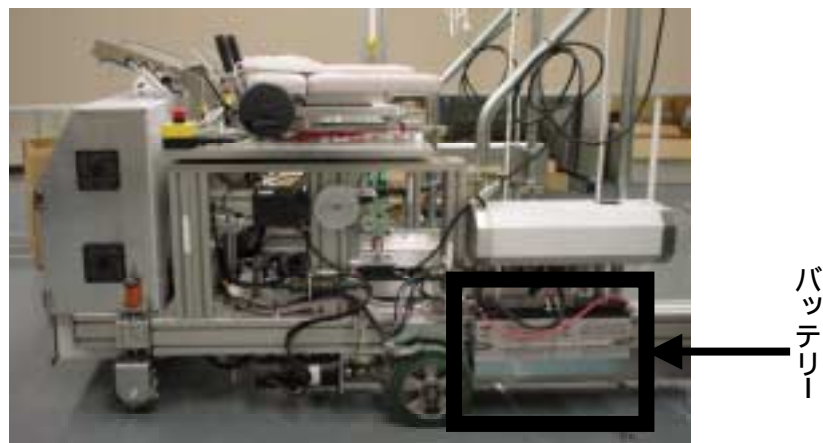


図 3.3 バッテリー取り付け位置

3.2 患者吊り上げ装置

本歩行支援機には、患者が崩れ落ちた後、安全を確保し患者が元の姿勢へ復帰できるように、図 3.4 に示すように患者吊り上げ装置を設け、患者の上下方向の崩れ落ちに対処できるようにした。この装置は、支柱部、患者を吊り上げるための左右2つのACサーボモータ(付録E参照)、ロードセル(付録F参照)、ナイロン性ロープ(直径12mm、破断強度530kgf、バネ定数4900N/m)、減速器(1/50)、ポテンショメータ、患者吊り上げ用固定ベストおよび股下用衝撃力保護帯(図3.5に装着時の様子を示す)からなる。



図 3.4 患者吊り上げ装置

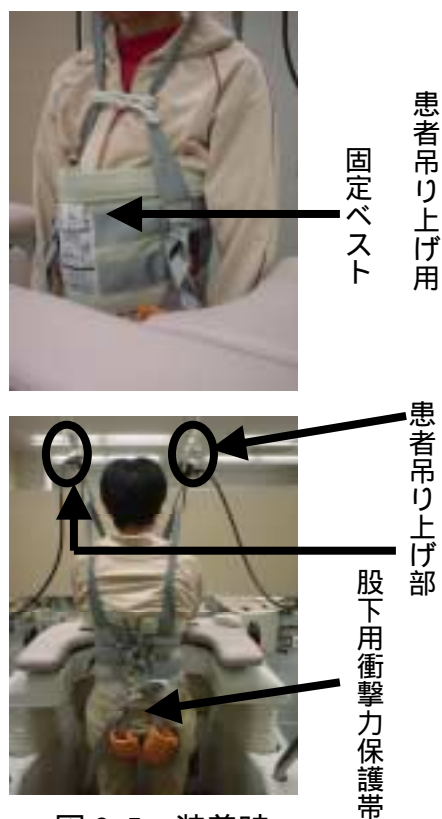


図 3.5 装着時

本装置は、制御用コンピュータからの指令信号がバッテリー対応ACサーボドライバ(付録G参照)を介してACサーボモータへ伝えられ駆動する。また、本装置があまりに高速に駆動すると、患者に不安や恐怖感を与えてしまう恐れ

があり、安全性の観点からも好ましくないので、患者を吊り上げる部分（以下吊り上げ部）の最高速度を 160[mm/s]にしている。

さらに、図 3.6 に示すように本装置の支柱の上部は、ハンドル部を回すことにより前後に可動し、患者の体格に合わせた調節が可能である（調節後はストッパーにより固定される）本装置が不要な患者の場合は、図 3.7 に示すように、取り外すことも可能である。

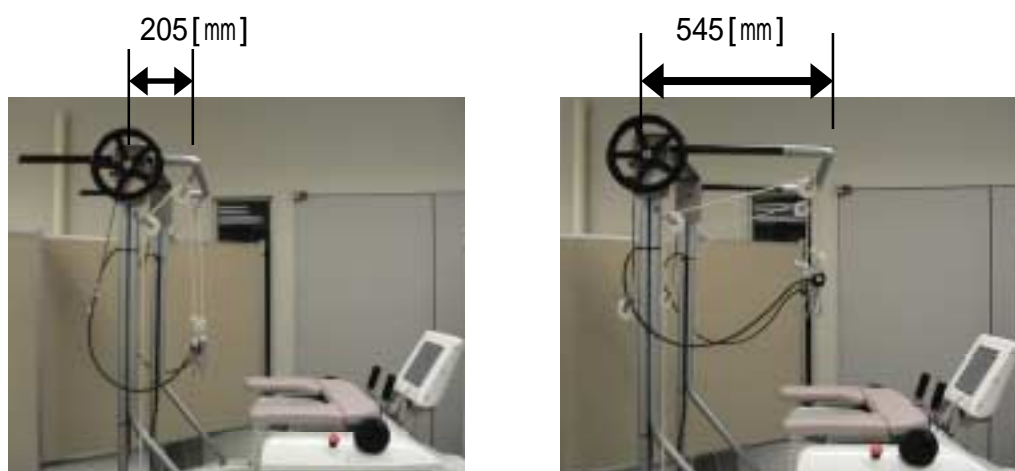


図 3.6 吊り上げ位置の可動範囲

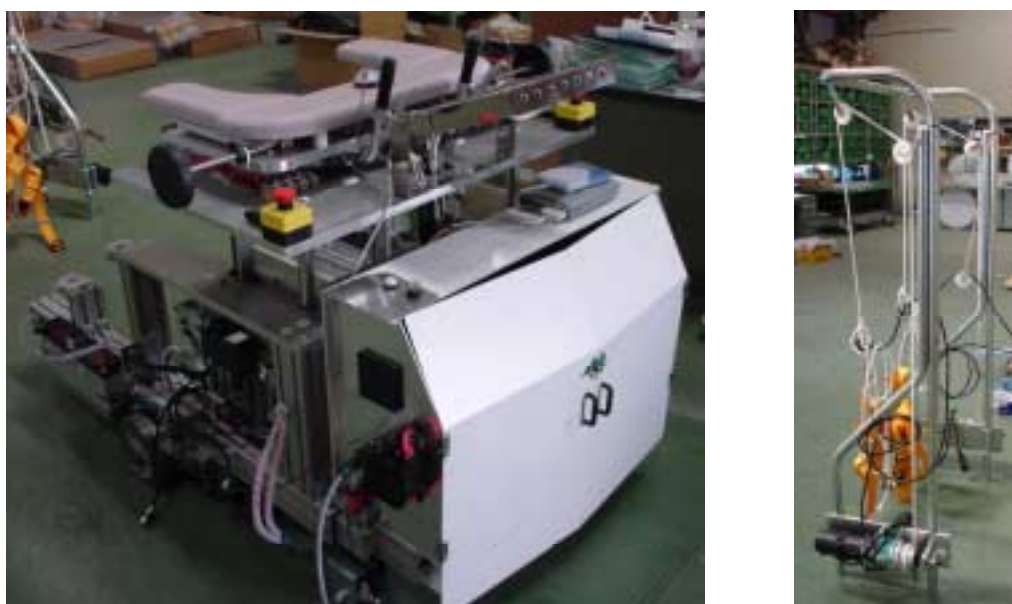


図 3.7 吊り上げ装置の取り外し

4章 吊り上げ装置の制御

本装置の吊り上げ装置のモータを駆動させずに歩行リハをおこなった場合、患者はロープの長さに拘束されてしまう。また、ロープを緩めた状態で膝折れをおこした場合は、落下している上体をロープが伸びきったところで急に止めることになる。これは、大きな速度を急激に止めることであり、患者は衝撃を受け好ましくない。したがって、吊り上げ装置の制御としては、

通常歩行時には患者をできるだけ拘束せず、患者の動きにあわせてロープ部が伸縮する。

転倒が起こったときには、転倒が進まないように早期に検知し、姿勢が沈んだり、患者に大きい衝撃が加わるなどの不都合がなく、優しく転倒を防止する。

という2点が要求される。また、単に転倒を防止するだけでなく、防止した後、患者を元の姿勢まで復帰させ、患者が立ち上がったことを検知してから再度歩行リハを再開できるほうが望ましい。

をおこなうためには、吊り上げ部にショックアブソーバーのようないわゆる“柔らかさ”を持つ要素が必要となる。そして、その柔らかさは各患者の好みや症状に応じて設定変更が可能な方が良いと考えられる。そこで、仮想コンプライアンス制御⁽³⁹⁾を用いて吊り上げ装置のモータを制御することにより、“柔らかさ”を実現することを考えた。

次に、をおこなうためには、転倒が発生したと見なすしきい値を設定し、その値を超えた時点で吊り上げ装置のモータを停止することにした。

さらに、元の姿勢に復帰できるようにロープを巻き上げるようにした。

4.1 吊り上げ装置の仮想コンプライアンス制御

本研究では、前述の「通常の歩行時には患者をできるだけ拘束せず、患者の動きにあわせてロープ部が伸縮する」という柔らかさを実現するための制御として、仮想コンプライアンス制御を用いた。機械的に柔らかさを実現するには力制御、なかでも様々な運動に対応できるインピーダンス制御⁽⁴⁰⁾が有効であり、多くの研究で使用されている。本研究ではインピーダンス制御の一種で速度を目標値に持つ仮想コンプライアンス制御を基本の制御法として用いる。

これは、図 4.1 に示すように、患者のロープ取り付け部に仮想的に質量・バネ・減衰を付加したモデルを構成し、吊り上げ装置のモータ速度を制御する方法である。

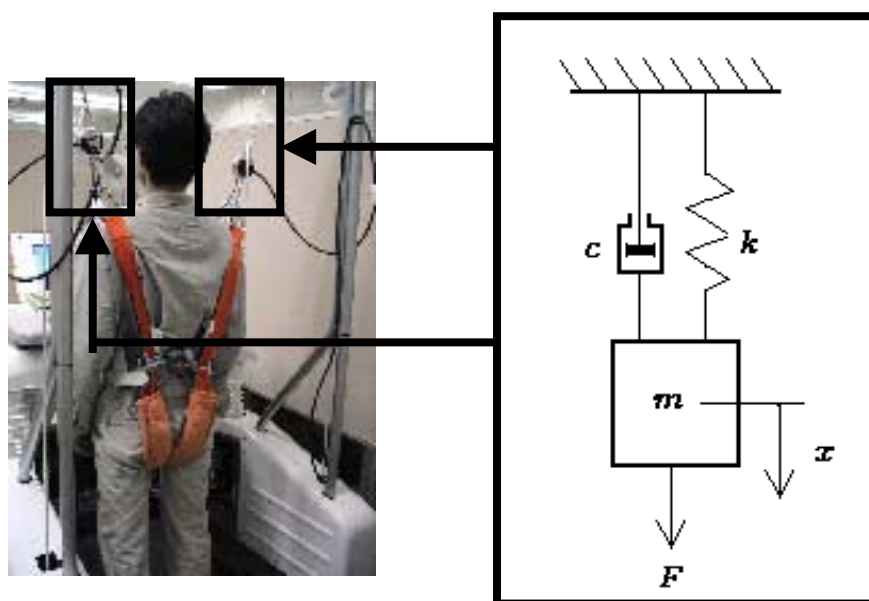


図 4.1 仮想コンプライアンス制御のモデル図

モデル図より、式を導出すると

$$F = m \frac{d^2 x}{dt^2} + c \frac{dx}{dt} + kx \quad (4.1)$$

となる。

ここで、 m は仮想質量、 k は仮想バネの定数、 c は仮想減衰定数、 x はロープ部の現在位置、 F はロープに生じる張力である。

具体的には、(4.1)式を変形して得られる(4.6)式のを、目標指令値として与え、左右の吊り上げ用モータを駆動することになる。

式の変形を以下に示す。(x_0 はロープ部の初期位置、 v は速度である)

$$m \frac{dv}{dt} = F - k(x - x_0) - cv \quad (4.2)$$

次に微分項を線形近似し、離散値系になおす。

加速度は、ある時間あたりの速度変化であるから、今を $n-1$ の時点とすると、

$$\frac{dv}{dt} = \frac{v_n - v_{n-1}}{\Delta t} \quad (4.3)$$

となる。

よって

$$m \frac{v_n - v_{n-1}}{\Delta t} = F_{n-1} - k(x_{n-1} - x_0) - cv_{n-1} \quad (4.4)$$

$$v_n - v_{n-1} = \frac{\Delta t}{m} \{ F_{n-1} - k(x_{n-1} - x_0) - cv_{n-1} \} \quad (4.5)$$

$$v_n = \frac{\Delta t}{m} \{ F_{n-1} - cv_{n-1} - k(x_{n-1} - x_0) \} + v_{n-1} \quad (4.6)$$

したがって、吊り上げ装置の左右のモータは(4.6)式の目標速度で左右独立して駆動することができる。

ここで、 Δt はサンプリングタイム、 v_n は目標指令速度、 v_{n-1} は現在の指令速度である。

この仮想コンプライアンス制御の利点は2つある。一つ目は、目標指令速度が前もって計算されるため、実際に動作する前に制御の動作を決定することができることである。これは、系の中に人間が入っている制御の場合に安全性において有効である。二つ目は、バネ定数や減衰定数をソフト上で自由に変更できるため、患者の好みや症状に応じて設定ができることである。

4.2 転倒防止制御

次に 「転倒が起こったときには，転倒が進まないように早期に検知し，姿勢が沈んだり，患者に大きい衝撃が加わるなどの不都合がなく，優しく転倒を防止する」 の場合では，ある値がしきい値を超えた時点を転倒の発生と考え，モータを停止するようにした．さらに，転倒したときに患者を元の姿勢まで復帰させる制御の流れは以下のようにになっている．

(詳しい転倒防止制御のフローチャートを付録Hに示す .)

- (1) ある値がしきい値 d を超えた場合に，歩行支援機の前後方向の駆動モータと吊り上げ装置のモータを停止させる (d は設定値) .
- (2) 前後方向の駆動モータは，患者が元の姿勢に復帰するまで停止させておく .
- (3) さらに，吊り上げ装置のモータを T 秒間停止させた後，基準位置まで一定速度で巻き上げる (T は設定値) .
- (4) 基準位置まで巻き上げられた後，患者が足で立つことにより，左右の吊り上げ部に掛かる力の合力が減少するので，その合力 F_G がある力 F_Q 以下になった後，再度仮想コンプライアンス制御でモータは駆動する (F_Q は設定値) .

なお，モータを T 秒間停止させる理由は，崩れ落ちを検知したとき，患者はモータの巻き上げ方向とは逆の方向の速度をもっており，急激に巻き上げを開始すると衝撃力が生じるからである．

次章では，ここで述べた制御の確認実験をおこなう．

5章 吊り上げ装置の制御実験

本章では、3種類の吊り上げ装置の制御実験について述べる。

仮想コンプライアンス制御実現性に関する確認実験

歩行実験（歩行実験1と歩行実験2）

転倒防止実験（変位による検知と加速度による検知）

以下に概要を述べる。

仮想コンプライアンス制御実現性に関する確認実験

仮想コンプライアンス制御を適用した患者吊り上げ装置の動作が(4.1)式により得られる理論値（シミュレーション）とどの程度合致しているかを比較し、その動作の確認をおこなった。

歩行実験

「通常の歩行時には患者をできるだけ拘束せず、患者の動きにあわせてロープ部が伸縮する」という吊り上げ装置の動作確認をするために、2種類の歩行実験をおこない、そのときのモータ速度、ロードセル荷重、変位（ロープの伸び）、モータ目標加速度を計測した。

- ・歩行実験1：歩き方に指示を与えない場合。
- ・歩行実験2：歩き方に「上体を意識的に大きく動かす」という指示を与えた場合。

そして、この2種類の歩行実験の結果を比較し、転倒の発生を検知する基準のひとつとして、まず変位をもとにしきい値を選定した。

転倒防止実験

変位をもとに選定したしきい値を用いて転倒防止実験をおこない、その問題点を明らかにした。そして、問題点を改良した方法として、モータ目標加速度で検知した場合の実験をおこない、転倒防止を比較した。

5.1 仮想コンプライアンス制御実現性に関する確認実験

5.1.1 目的

本実験では，仮想コンプライアンス制御を適用した患者吊り上げ装置の動作が(4.1)式により得られる理論値（シミュレーション）とどの程度合致しているかを比較し，その動作の確認をおこなう．

5.1.2 方法

- (1) 実機の患者吊り上げ装置の片側の吊り上げ部に，力 F [kgf] のステップ入力を与える．
- (2) ステップ入力には $F = 10.4$ [kgf] の重りを使用し，取り付けられた状態から仮想コンプライアンス制御を開始する（図 5.1）．



図 5.1 仮想コンプライアンス制御の確認実験

- (3) そのときの力のステップ入力に対する吊り上げ部の速度および変位の変化を，モータに取り付けられているエンコーダとポテンシオメータにより計測する．
- (4) さらに，上述のステップ入力を与えた場合の変位および速度の理論値を(4.1)式を用いて計算し，実機での計測結果と比較する．

(5) 実験に用いた9種類のパラメータを表5.1.1.1に示す。

表5.1.1.1 実験に用いたパラメータ

	m [kg]	k [N/m]	c [N s/m]
1	100	500	500
2	100	500	750
3	100	500	1000
4	100	750	500
5	100	750	750
6	100	750	1000
7	100	1000	500
8	100	1000	750
9	100	1000	1000

5.1.3 結果

図5.1.1～図5.1.9([グラフA]A-1～A-9参照)に吊り上げ装置の仮想コンプライアンス制御実現性に関する確認実験の結果を示す。各図において、(a)は、速度の実測値と理論値を示している。また、各図の(b)は吊り上げ装置の基準位置からの変位の実測値と理論値を示している。

5.1.4 考察

各図において、速度(各図(a))の理論値と実測値を比較すると、両者はほぼ一致していることがわかる。また、変位(各図(b))の理論値と実測値もほぼ一致していることがわかる。したがって、本装置における仮想コンプライアンス制御は、ほぼ理論通りに実現されていると考えられる。

5.1.5 まとめ

吊り上げ装置において、仮想コンプライアンス制御の実現性確認実験をおこなった。その結果、9種類のパラメータにおいて、ほぼ理論値通りの制御がおこなわれていることが確認できた。

そこで、次節では仮想コンプライアンス制御を用いて歩行実験をおこなう。

5.2 歩行実験

前節において、吊り上げ装置の仮想コンプライアンス制御の実現性が確認できた。そこで本実験では、4.1で述べた「通常の歩行時には患者をできるだけ拘束せず、患者の動きにあわせてロープ部が伸縮する」という動作を吊り上げ装置で確認するために2種類の歩行実験をおこない、それらの実験の比較から転倒検知の判断基準を選定した。

5.2.1 歩行実験1

5.2.1.1 目的

特別な指示を何も与えない自然な姿勢で歩行をおこない、そのときのモータ速度、ロードセル荷重、変位（ロープの伸び）、モータ目標加速度を計測することで、吊り上げ装置の追従状態を把握する。

5.2.1.2 方法

- (1) ハンドルを持ち、肘が直角になるように立った状態を基準位置とする。
(肘掛けの高さを調節して各人に合わせる)
- (2) 基準位置に立った状態で、ロードセルの値が5[kgf]以上になるまで吊り上げ装置のロープを巻き上げた後、1.5[kgf]まで降ろす。
こうすることで、ロープは常に1.5[kgf]の張力を保つことになり、着用した吊り上げ固定ベストは緩むことなく、体に沿わせることができる。
- (3) ハンドルを持ち歩行する(図5.2)。
歩行支援機の駆動速度は約0.47[km/h](130[mm/s])とした。
これは高齢者の平均的な歩行速度の $\frac{1}{10}$ である⁽⁴¹⁾。



図5.2 歩行実験1

(4) 吊り上げ装置の制御には、仮想コンプライアンス制御のパラメータのうち、 m (仮想質量) と k (仮想バネ) を取り去り、 c (仮想減衰) だけでおこなった。つまり、患者吊り上げ部をロープの張力による動きで追従させるように、減衰だけの制御にした (図 5.3)。

(仮想コンプライアンス制御をおこなうには、 c (減衰) が必要である。)

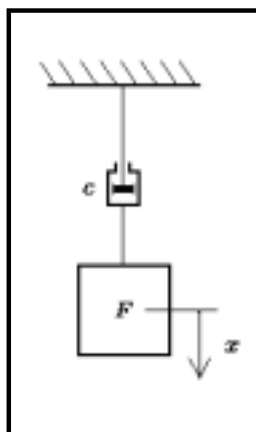


図 5.3 モデル図

減衰だけにした理由は、以下の3点である。

- ・ m (仮想質量) があると、動き始めが遅くなる。
- ・ k (仮想バネ) があると、大きな動作の場合に復元力が発生する。
- ・ ロープ部は動きに追従させ、なおかつ、そのときの荷重はできるだけ少なくするために、ロープの張力だけでモータの速度を制御する。

(5) 減衰 c は、 $250[\text{Ns/m}]$ 、 $350[\text{Ns/m}]$ 、 $450[\text{Ns/m}]$ の3種類とした。

(6) 吊り上げ装置のモータの目標指令速度は、

$$F = cv \tag{5.1}$$

より

$$v = \frac{F}{c} \tag{5.2}$$

である。

なお、(5.2)式の F は

$$\text{現在のロードセル荷重} - 1.5[\text{kgf}]$$

の値である。

- (7) そのときの吊り上げ装置のモータ速度，ロードセル荷重，変位，モータ目標加速度を計測する。

なお、ここでいうモータ目標加速度とは

$$\frac{\text{(5.2)式によって求まる目標 指令速度} - \text{現在の指令 速度}}{\text{サンプリングタイム}}$$

によって計算した値である。

- (8) v の上限値を 160[mm/s]とする。
(9) 被験者は健常男性3名(表5.2.1.1)である。

表 5.2.1.1 各被験者のデータ

	身長	体重	年齢
被験者A	1 6 3	4 5	2 4
被験者B	1 6 7	5 5	2 2
被験者C	1 6 3	6 3	2 1

5.2.1.3 結果

モータ速度と荷重

図 5.2.1.1～図 5.2.1.9([グラフ B]B-1～B-9 参照) に吊り上げ装置のモータ速度と荷重を示す。各図において左の縦軸がモータ速度，右の縦軸が荷重，(a) が右側モータ，(b) が左側モータである。

表 5.2.1.2 に 3 種類の減衰 c に対するモータ速度の最高値とその平均を示す。

表 5.2.1.2 モータ速度[mm/s]の最高値

被験者	c の値[N s/m]			平均
	$c=250$	$c=350$	$c=450$	
A	41.1	28.8	23.0	31.0
B	49.1	37.3	30.1	38.8
C	37.6	29.1	28.8	31.8
平均	42.6	31.7	27.3	33.9

モータ速度は減衰 c が増加するにしたがって小さくなり，被験者の平均は上限値 (160[mm/s]) の約 21%であった。

表 5.2.1.3 に 3 種類の減衰 c に対するロードセル荷重の最高値とその平均を示す。

表 5.2.1.3 荷重[kgf]の最高値

被験者	c の値[N s/m]			平均
	$c=250$	$c=350$	$c=450$	
A	1.05	1.05	1.07	1.1
B	1.25	1.32	1.37	1.3
C	0.95	1.02	1.35	1.1
平均	1.1	1.1	1.3	1.2

荷重は減衰 c が増加するにしたがってわずかに増加しており，荷重の振幅はほぼ 1 [kgf]であった。

変位

図 5.2.1.10～図 5.2.1.18([グラフ B] B-10～B-18 参照) にロープ部の変位を示す。各図において(a)が右側，(b)が左側である。

表 5.2.1.4 に 3 種類の減衰 c に対する変位の最高値とその平均を示す。

表 5.2.1.4 変位[mm]の最高値

被験者	c の値[N s/m]			平均
	$c=250$	$c=350$	$c=450$	
A	39	36.9	40	38.6
B	52.5	48.8	39.5	46.9
C	59.2	37.4	30.1	42.2
平均	50.2	41.0	36.5	42.6

変位は減衰 c が増加するにしたがって小さくなり，被験者の平均は 42.6[mm]であった。

モータ目標加速度

図 5.2.1.19～図 5.2.1.27([グラフ B] B-19～B-27 参照) に吊り上げ装置のモータ目標加速度を示す。各図において(a)が右側，(b)が左側である。

表 5.2.1.5 に 3 種類の減衰 c に対するモータ目標加速度の最高値とその平均を示す。

表 5.2.1.5 モータ目標加速度[mm/s²]の最高値

被験者	c の値[N s/m]			平均
	$c=250$	$c=350$	$c=450$	
A	294	280	190	254.7
B	392	245	163	266.7
C	343	245	190	259.3
平均	343.0	256.7	181.0	260.2

モータ目標加速度は減衰 c が増加するにしたがって小さくなり，被験者の平均は約 260[mm/s²]であった。

5.2.1.4 考察

グラフより吊り上げ装置の速度は荷重の変化とほぼ一致しており，吊り上げ装置のモータ部のコンプライアンス制御は実現できていると考えられる．

このときの被験者の感想は「不快な拘束感はなく，歩行の邪魔にはならない」というものであったことから，吊り上げ装置は少ない張力とゆっくりとした速度で上体の動きに合わせて追従しているといえる．

5.2.1.5 まとめ

「通常の歩行時には患者をできるだけ拘束せず，患者の動きにあわせてロープ部が伸縮する」という制御を目的に，仮想的に減衰 c のみを付加した状態で歩行実験をおこない，そのときのモータ速度，ロードセル荷重，変位，モータ目標加速度を計測した．その結果，歩行には少ない張力で動きに追従するという制御が実現できていることが確認できた．

ただし，この歩行実験 1 では被験者の上体の動きは比較的少なく，大きな変位はでていない．実際に歩行訓練をする場合には，患者によっては上体を動かしながら歩行することも考えられる．そこで次節では，意識的に上体を動かして歩行することで，大きな動きでの動作状態を把握することとした．そしてこれらから，転倒検知の基準を判断することにした．

5.2.2 歩行実験2

5.2.2.1 目的

上体を意識的に大きく動かしながら歩行をおこない、5.2.1の歩行実験1の計測データと比較することにより、吊り上げ装置の追従確認と転倒検知の判断基準を選定した。

5.2.2.2 方法

- (1) 歩行実験1と同様に、ハンドルを持ち、肘が直角になるように立った状態を基準位置とする。(肘掛けの高さを調節して各人に合わせる)
- (2) 歩行実験1と同様に、基準位置に立った状態で、ロードセルの値が5[kgf]以上になるまで吊り上げ装置のロープを巻き上げた後、1.5[kgf]まで降ろす。
- (3) ハンドルを持ち、意識的に上体を大きく動かしながら歩行をする(図5.4)。歩行支援機の駆動速度は歩行実験1と同じ値とした。



図 5.4 歩行実験 2

- (4) 歩行実験1と同様に、減衰 c は250[Ns/m]、350[Ns/m]、450[Ns/m]の3種類とした。
- (5) 歩行実験1と同様に、被験者も3名である。

5.2.2.3 結果

モータ速度と荷重

図 5.2.2.1～図 5.2.2.9 ([グラフ C] C-1～C-9 参照) に吊り上げ装置のモータ速度と荷重を示す。各図において左の縦軸がモータ速度，右の縦軸が荷重，(a) が右側モータ，(b) が左側モータである。

表 5.2.2.1 に 3 種類の減衰 c に対するモータ速度の最高値とその平均を示す。

表 5.2.2.1 モータ速度[mm/s]の最高値

被験者	c の値[N s/m]			平均
	$c=250$	$c=350$	$c=450$	
A	103.3	74.8	75.6	84.6
B	102.7	76.1	68.9	82.6
C	101.1	61.9	53.1	72.0
平均	102.4	70.9	65.9	79.7

モータ速度は減衰 c が増加するにしたがって小さくなり，被験者の平均は上限値 (160[mm/s]) の約 50%であった。

表 5.2.2.2 に 3 種類の減衰 c に対するロードセル荷重の最高値とその平均を示す。

表 5.2.2.2 荷重[kgf]の最高値

被験者	c の値[N s/m]			平均
	$c=250$	$c=350$	$c=450$	
A	2.6	2.7	3.5	2.9
B	2.6	2.7	3.2	2.8
C	2.6	2.2	2.4	2.4
平均	2.6	2.5	3.0	2.7

荷重は減衰 c が増加するにしたがってわずかに増加しており，荷重の振幅は約 2 [kgf]であった。

変位

図 5.2.2.10～図 5.2.2.18 ([グラフ C] C-10～C-18 参照) にロープ部の変位を示す。各図において(a)が右側，(b)が左側である。

表 5.2.2.3 に 3 種類の減衰 c に対する変位の最高値とその平均を示す。

表 5.2.2.3 変位[mm]の最高値

被験者	c の値[N s/m]			平均
	$c=250$	$c=350$	$c=450$	
A	136.2	151.8	134.1	140.7
B	84.7	79.0	77.4	80.4
C	96.7	108.6	110.7	105.3
平均	105.9	113.1	107.4	108.8

変位は被験者によってばらつきがあり，減衰 c との相関はみられない。被験者の平均は 108.8[mm]であった。

モータ目標加速度

図 5.2.2.19～図 5.2.2.27 ([グラフ C] C-19～C-27 参照) に吊り上げ装置のモータ目標加速度を示す。各図において(a)が右側，(b)が左側である。

表 5.2.2.4 に 3 種類の減衰 c に対するモータ目標加速度の最高値とその平均を示す。

表 5.2.2.4 モータ目標加速度[mm/s²]の最高値

被験者	c の値[N s/m]			平均
	$c=250$	$c=350$	$c=450$	
A	392	280	217	296.3
B	392	315	191	299.3
C	392	210	218	273.3
平均	392.0	268.3	208.7	289.7

モータ目標加速度は減衰 c が増加するにしたがって小さくなり，被験者の平均は約 290[mm/s²]であった。

5.2.2.4 考察

グラフより吊り上げ装置の速度は荷重の変化とほぼ一致しており，大きな動きのある歩行の場合でも，吊り上げ装置のモータ部のコンプライアンス制御は実現できていると考えられる．

このときの吊り上げ装置のモータ部の最高速度，ロードセル荷重，変位は歩行実験 1 の 2 倍以上になっていることが確認できた．また，モータ目標加速度には歩き方の違いでは急激な変化はみられず，わずかの増加であった．

これらのことから，転倒を判断する条件のひとつとして，まず直感的にわかるロープの伸び，つまり変位を用いることとした．そして，そのしきい値には，歩行実験 1 の平均値 42.6[mm]と歩行実験 2 の平均値 108.8[mm]から，150[mm]を選定した．

なお，変位以外の計測データを比較して得られる転倒判断のしきい値の選定と，それを用いた転倒防止実験は，変位を用いた転倒防止実験の後でおこなう．

5.2.2.5 まとめ

上体を意識的に大きく動かしながら歩行をおこない，5.2.1でおこなった歩行実験 1 の計測データと比較することにより，転倒検知の判断基準を選定した．この結果，転倒を判断する条件のひとつとして，まず変位のしきい値に 150[mm]を選定した．

次節では，まず変位を転倒検知に用いて転倒防止実験をおこなう．

5.3 転倒防止実験

5.3.1 変位を用いた場合

5.3.1.1 目的

本実験では、5.2の歩行実験から得られた変位による判断基準を用いて、転倒検知 転倒防止 姿勢復帰 歩行再開という一連の制御の動作確認をする。

5.3.1.2 方法

(1) 歩行実験と同様に、ハンドルを持ち、肘が直角になるように立った状態を基準位置とする。(肘掛けの高さを調節して各人に合わせる)

(2) 歩行実験と同様に、基準位置に立った状態で、ロードセルの値が5[kgf]以上になるまで吊り上げ装置のロープを巻き上げた後、1.5[kgf]まで降ろす。

(3) その場で膝折れの転倒(図5.5)をおこす。

(4) 転倒後、基準位置からの変位が150[mm]を越えた時点でモータを停止し、2秒間静止した後に、速度30[mm/s]で巻き上げる。

(5) 減衰 c は歩行実験と同じ値とし、被験者も5.2の歩行実験と同じ健常男性3名である。



図 5.5 転倒防止実験

5.3.1.3 結果

転倒防止および姿勢復帰

図 5.3.1.1～図 5.3.1.3 ([グラフ D]D-1～D-9 参照) に、変位と合計荷重の時間的経過を示す。各図において左の縦軸が変位、右の縦軸が合計荷重、(a)は $c = 250$ [N s/m]、(b)は $c = 350$ [N s/m]、(c)は $c = 450$ [N s/m]である。

モータ速度

図 5.3.1.4～5.3.1.6 ([グラフ D]D-4～D-6 参照) に吊り上げ装置のモータ速度を示す。各図において、(a)は $c = 250$ [N s/m]、(b)は $c = 350$ [N s/m]、(c)は $c = 450$ [N s/m]である。

表 5.3.1.1 に 3 種類の減衰 c に対する転倒発生時のモータ速度を示す。

表 5.3.1.1 転倒発生時のモータ速度[mm/s]

被験者	c の値[N s/m]			平均
	$c=250$	$c=350$	$c=450$	
A	160	160	160	160
B				
C				
平均	160	160	160	160

どの被験者も上限値の 160[mm/s]に達した後、速度 0 で急停止していた。

荷重

図 5.3.1.7～図 5.3.1.9 ([グラフ D]D-7～D-9 参照) に転倒時の荷重を示す .
各図において , (a)は $c = 250$ [N s/m] , (b)は $c = 350$ [N s/m] , (c)は $c = 350$ [N s/m]
である .

表 5.3.1.2 に 3 種類の減衰 c に対する転倒発生時の荷重を示す .

表 5.3.1.2 転倒発生時の荷重[kgf] (体重比%)

被験者	c の値 [N s/m]			平均
	$c=250$	$c=350$	$c=450$	
A	34.0(76%)	36.9(82%)	31.4(70%)	34.1(76%)
B	32.9(60%)	28.4(52%)	29.9(54%)	30.4(55%)
C	34.3(54%)	41.1(65%)	33.7(54%)	36.4(58%)
平均	33.7(63%)	35.5(66%)	31.7(59%)	33.6(63%)

荷重の変化はどの被験者も同じ傾向を示しており , 減衰 c には関係していない .
転倒発生時の荷重は 30[kgf] をこえており , 被験者の体重比の平均は 60% 以上
であった .

変位

図 5.3.1.10～図 5.3.1.12 ([グラフ D] D-10～D-12 参照) に転倒時の変位を示す。各図において、(a)は $c = 250$ [N s/m] , (b)は $c = 350$ [N s/m] , (c)は $c = 450$ [N s/m] である。

これらより設定値の 150 [mm] を越えた時点を検知できていることがわかる。

モータ目標加速度

図 5.3.1.13～図 5.3.1.15 ([グラフ D] D-13～D-15 参照) にはモータ目標加速度を示す。各図において、(a)は $c = 250$ [N s/m] , (b)は $c = 350$ [N s/m] , (c)は $c = 450$ [N s/m] である。

表 5.3.1.3 に 3 種類の減衰 c に対する転倒発生時のモータ目標加速度を示す。

表 5.3.1.3 転倒発生時のモータ目標加速度 [mm/s²]

被験者	c の値 [N s/m]			平均
	$c=250$	$c=350$	$c=450$	
A	1,568	1,680	1,415	1,554
B	1,470	1,190	1,034	1,231
C	1,666	1,750	1,361	1,592
平均	1,568	1,540	1,270	1,459

モータ目標加速度はどの被験者も転倒発生時には 1000 [mm/s²] を越えていた。

5.3.1.4 考察

変位と合計荷重の時間的経過を表すグラフより，左右の吊り上げ部は転倒時にかかる力に応じて変位し，左右どちらかの吊り上げ部の変位が設定値 150[mm]を越えた後，左右の吊り上げ部は停止していることがわかる（転倒検知および転倒防止 = 図の A 部）。

さらに，転倒を防止した後，2 秒間吊り上げ部は停止しており，その後一定速度で巻き上げが開始され，吊り上げ部の変位が 130[mm]まで巻き上げられていることがわかる（姿勢復帰 = 図の B 部）。

そして，被験者が立ち上がることにより，左右の吊り上げ部にかかっている力の合力が減少し，設定値である 35[kgf]以下になった後，再び吊り上げ装置は駆動していることがわかる（歩行再開 = 図の C 部）。

これらの結果から，変位を 150[mm]に設定することで，患者は床に膝を打ちつける前に吊り上げ装置により転倒が防止されている。その後，元の姿勢まで復帰し，患者が自分の足で立つことにより，歩行リハが再開できると考えられる。なお，本実験では，転倒の防止位置を 150[mm]としたが，患者の身長や症状などに合わせて任意に設定することが可能である。

一方、モータ速度はどの被験者も上限値の 160[mm/s]に達した後，速度 0 で急停止している。これは，大きな速度が出ている状態で急に止めることになり，患者には衝撃力が生じると予想される。

5.3.1.5 まとめ

変位を用いることで転倒の発生を検出し、転倒防止の動作確認をおこなった。その結果、転倒検知 モータ停止（転倒防止） 姿勢復帰 歩行再開という一連の制御が可能であることが確認できた。

しかし、この変位による転倒の検知はモータ速度が出過ぎる点で、改良の余地がある。その理由は、ほとんど拘束していない力で転倒が始まり変位が設定値を越えた時点で停止するため、速度が出ている落下中に急に止めることになる。表 5.3.1.1 より、止まる直前のモータ速度は上限値の 160[mm/s]である。これは、患者にとっては衝撃があると予想される。健常者にとっては痛みを感じる衝撃ではないが、歩行リハを必要とする患者にとって衝撃は少なければ少ないほどよいはずである。それには、早くモータを停止すればよく、そのためには変位を少なく設定するか、速度の上限値を小さくする方法が考えられる。しかしそのようにした場合には、歩行実験 2 の結果からみると歩行中の動きで転倒と判断してモータが停止してしまう可能性がある。

よって、速度が出ないうちに止めることができ、かつ歩行時には検知しない方法が必要である。

また、表 5.3.1.4 より、どの被験者も転倒が始まり停止するまでに 1 秒以上かかっていることもわかった。

表 5.3.1.4 転倒開始から停止するまでの時間[sec]

被験者	cの値[N s/m]			平均
	c=250	c=350	c=450	
A	1.21	1.19	1.2	1.2
B	1.2	1.28	1.29	1.3
C	1.31	1.23	1.32	1.3
平均	1.24	1.23	1.27	1.25

5.3.2 モータ目標加速度を用いた場合

前述の 5.3.1 の変位を転倒検知に用いる方法では，速度が出過ぎるため衝撃が予想され，早期という点でも不十分であった．問題解決には，速度が出ないうちに止めることができ，かつ歩行時には検知しない判断基準が必要である．

そこで，転倒時にもっとも早く時間的变化が起こるものに着目し，3人の被験者の減衰 c ごとに4種類の値（モータ速度，変位，荷重，モータ目標加速度）を比較した．一例として，被験者A ($c=250$ [N s/m])のグラフにラインを引いたものを図 5.6～図 5.8 に示す．転倒検知の判断基準を仮に，速度を 90[mm/s]，変位を 60[mm]，荷重を 10[kgf]として，青丸で示した．そして赤丸は，各時点におけるモータ目標加速度である．

これらの結果，どの場合でも吊り上げ装置のモータ目標加速度（図中の赤丸）がもっとも早く時間的变化が起こることがわかった．

図 5.3.2.1～図 5.3.2.18（[グラフ E]E-1～E-18 参照）に，モータ目標加速度とそれ以外を1つのグラフ中で比較したものを示す．

各図において，(a)はモータ速度とモータ目標加速度の比較，(b)は変位とモータ目標加速度の比較，(c)は荷重とモータ目標加速度の比較である．

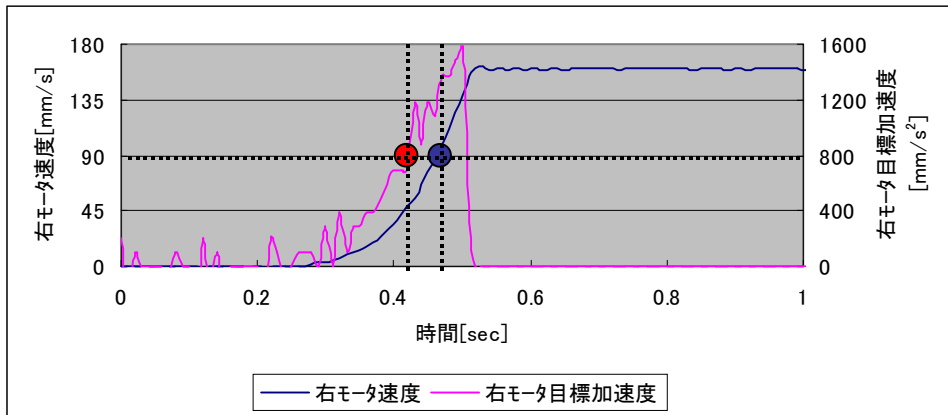


図 5.6 モータ速度とモータ目標加速度

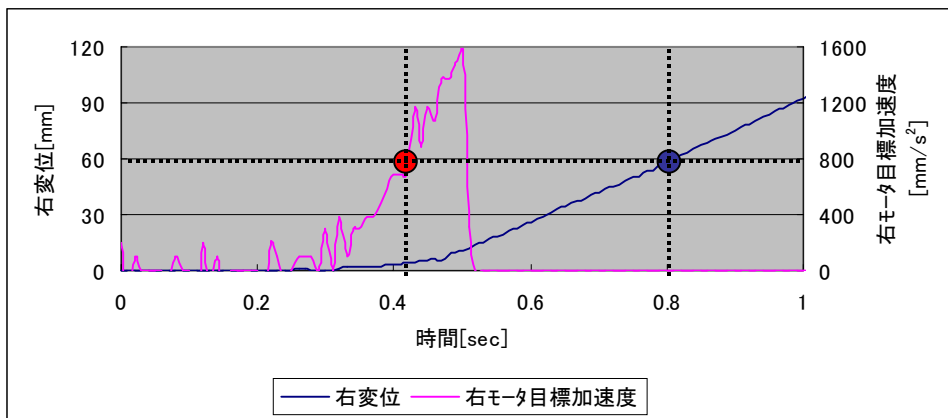


図 5.7 変位とモータ目標加速度

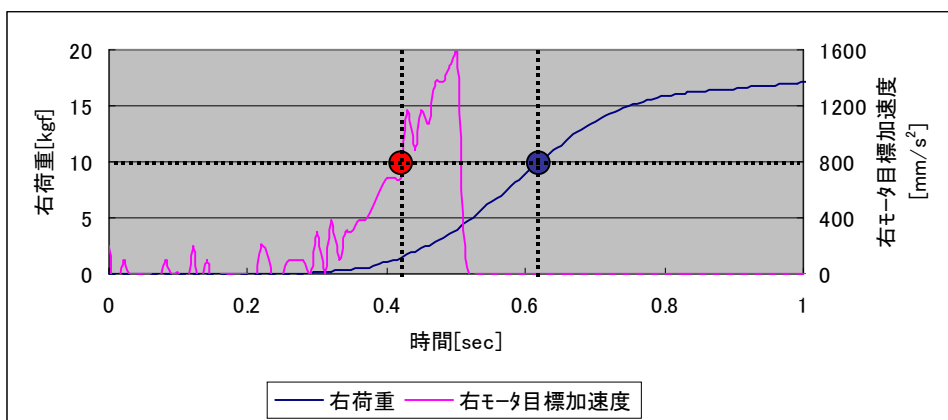


図 5.8 荷重とモータ目標加速度

表 5.3.2.1～表 5.3.2.3 に，減衰 c ごとにモータ目標加速度を歩行時と転倒時で比較したものを示す．

表 5.3.2.1 モータ目標加速度[mm/s²]の比較 ($c=250$ [N s/m]の場合)

被験者	歩行時		転倒時
	歩行実験 1	歩行実験 2	
A	294	392	1,568
B	392	392	1,470
C	343	392	1,666
平均	343	392	1,568

表 5.3.2.2 モータ目標加速度[mm/s²]の比較 ($c=350$ [N s/m]の場合)

被験者	歩行時		転倒時
	歩行実験 1	歩行実験 2	
A	280	280	1,680
B	245	315	1,190
C	245	210	1,750
平均	257	268	1,540

表 5.3.2.3 モータ目標加速度[mm/s²]の比較 ($c=450$ [N s/m]の場合)

被験者	歩行時		転倒時
	歩行実験 1	歩行実験 2	
A	190	217	1,415
B	163	191	1,034
C	190	218	1,361
平均	181	209	1,270

この結果，各被験者とも転倒発生時にはモータ目標加速度は 1000 [mm/s²]をこえており，歩行時は 500 [mm/s²]以下であった．これらから，歩行時と転倒時をはっきり区別でき，短時間に検知する方法としてモータ目標加速度を判断基準にすることを考えた．そうすることで，速度が出ないうちに早く止めることができ，衝撃力も少ないと考えたからである．そこで，次にモータ目標加速度を用いた転倒防止実験をおこなった．

5.3.2.1 目的

転倒の発生を判断する基準にモータ目標加速度を用い，転倒防止および早期検知の有効性を確認する．

5.3.2.2 方法

- (1) 歩行実験と同様に，ハンドルを持ち，肘が直角になるように立った状態を基準位置とする．(肘掛けの高さを調節して各人に合わせる)
- (2) 歩行実験と同様に，基準位置に立った状態で，ロードセルの値が 5[kgf] 以上になるまで吊り上げ装置のロープを巻き上げた後，1.5[kgf]まで降ろす．
- (3) その場で膝折れの転倒(図 5.9)をおこす．
- (4) モータ目標加速度が設定値を超えた時点でモータを停止する．
- (5) その他の条件は前述の 5.2 の変位を用いた転倒実験と同じとする．
- (6) モータ目標加速度の設定値は，前述の比較より 1000[mm/s²]と 500[mm/s²]の 2 種類とする．



図 5.9 転倒防止実験

5.3.2.3 結果

モータ速度

図 5.3.2.19～図 5.3.2.21 ([グラフ F] F-1～F-3 参照) にモータ目標加速度を 1000[mm/s²] に設定した場合のモータ速度を，図 5.3.2.22～図 5.3.2.24 ([グラフ F] F-4～F-6 参照) にモータ目標加速度を 500[mm/s²] に設定した場合のモータ速度を示す．各図において，(a) は $c = 250$ [N s/m]，(b) は $c = 350$ [N s/m]，(c) は $c = 450$ [N s/m] である．

表 5.3.2.1 にモータ目標加速度を 1000[mm/s²] に設定した場合の転倒発生時のモータ速度を，表 5.3.2.2 にモータ目標加速度を 500[mm/s²] に設定した場合の転倒発生時のモータ速度を示す．

表 5.3.2.1 転倒発生時のモータ速度[mm/s]

(モータ目標加速度 1000[mm/s²])

被験者	c の値[N s/m]			平均
	c=250	c=350	c=450	
A	57.5	73.9	79.6	70.3
B	107.4	55.3	90.3	84.3
C	78.61	73.0	97.5	83.0
平均	81.2	67.4	89.1	79.2

表 5.3.2.2 転倒発生時のモータ速度[mm/s]

(モータ目標加速度 500[mm/s²])

被験者	c の値[N s/m]			平均
	c=250	c=350	c=450	
A	23.5	35.1	32.4	30.3
B	34.6	28.3	41.1	34.7
C	35.6	30.3	35.9	34.0
平均	31.3	31.3	38.5	32.6

モータ目標加速度を 1000[mm/s²] に設定すると平均して上限値の約 49[%]，500[mm/s²] に設定すると平均して上限値の約 20[%] の速度であった．

荷重

図 5.3.2.25～図 5.3.2.27 ([グラフ F] F-7～F-9 参照) にモータ目標加速度を $1000[\text{mm}/\text{s}^2]$ に設定した場合の荷重を , 図 5.3.2.28～図 5.3.2.30 ([グラフ F] F-10～F-12 参照) にモータ目標加速度を $500[\text{mm}/\text{s}^2]$ に設定した場合の荷重を示す . 各図において , (a) は $c = 250[\text{N s}/\text{m}]$, (b) は $c = 350[\text{N s}/\text{m}]$, (c) は $c = 450[\text{N s}/\text{m}]$ である .

表 5.3.2.5 にモータ目標加速度を $1000[\text{mm}/\text{s}^2]$ に設定した場合の転倒発生時の荷重を , 表 5.3.2.6 にモータ目標加速度を $500[\text{mm}/\text{s}^2]$ に設定した場合の転倒発生時の荷重を示す .

表 5.3.2.5 転倒発生時の荷重[kgf] (体重比%)

(モータ目標加速度 $1000[\text{mm}/\text{s}^2]$)

被験者	c の値[N s/m]			平均
	c=250	c=350	c=450	
A	7.3(16%)	12.3(27%)	16.5(37%)	12.0(27%)
B	10.9(20%)	9.7(18%)	17.4(32%)	12.7(23%)
C	9.8(16%)	12.4(20%)	18.7(30%)	13.6(22%)
平均	9.3(17%)	11.5(22%)	17.5(33%)	12.8(24%)

表 5.3.2.6 転倒発生時の荷重[kgf] (体重比%)

(モータ目標加速度 $500[\text{mm}/\text{s}^2]$)

被験者	c の値[N s/m]			平均
	c=250	c=350	c=450	
A	2.7(6%)	4.9(11%)	7.1(16%)	4.9(11%)
B	3.8(7%)	3.6(7%)	7.7(14%)	5.0(9%)
C	4.9(8%)	5.6(9%)	7.5(12%)	6.0(10%)
平均	3.8(7%)	4.7(9%)	7.4(14%)	5.3(10%)

転倒発生時における被験者の荷重は , モータ目標加速度を $1000[\text{mm}/\text{s}^2]$ に設定した場合は平均して体重比 24[%] , モータ目標加速度を $500[\text{mm}/\text{s}^2]$ に設定した場合は平均して体重比 10[%] であった .

変位

図 5.3.2.31 ~ 図 5.3.2.33 ([グラフ F] F-13 ~ F-15 参照) にモータ目標加速度を $1000[\text{mm}/\text{s}^2]$ に設定した場合の変位を , 図 5.3.2.34 ~ 図 5.3.2.36 ([グラフ F] F-16 ~ F-18 参照) にモータ目標加速度を $500[\text{mm}/\text{s}^2]$ に設定した場合の変位を示す . 各図において , (a) は $c = 250[\text{N s}/\text{m}]$, (b) は $c = 350[\text{N s}/\text{m}]$, (c) は $c = 450[\text{N s}/\text{m}]$ である .

表 5.3.2.3 にモータ目標加速度を $1000[\text{mm}/\text{s}^2]$ に設定した場合の転倒発生時の変位を , 表 5.3.2.4 にモータ目標加速度を $500[\text{mm}/\text{s}^2]$ に設定した場合の転倒発生時の変位を示す .

表 5.3.2.3 転倒発生時の変位[mm]

(モータ目標加速度 $1000[\text{mm}/\text{s}^2]$)

被験者	cの値[N s/m]			平均
	c=250	c=350	c=450	
A	4.2	5.2	4.7	4.7
B	9.9	4.2	5.2	6.4
C	6.5	5.2	7.3	6.2
平均	6.8	4.9	5.7	5.8

表 5.3.2.4 転倒発生時の変位[mm]

(モータ目標加速度 $500[\text{mm}/\text{s}^2]$)

被験者	cの値[N s/m]			平均
	c=250	c=350	c=450	
A	1.6	2.1	1.6	1.7
B	3.1	2.1	3.6	2.9
C	2.6	1.1	2.6	2.1
平均	2.4	1.7	2.6	2.3

転倒発生時における被験者の変位は , モータ目標加速度を $1000[\text{mm}/\text{s}^2]$ に設定した場合は平均 $5.8[\text{mm}]$, モータ目標加速度を $500[\text{mm}/\text{s}^2]$ に設定した場合は平均 $2.3[\text{mm}]$ であった .

モータ目標加速度

図 5.3.2.37～図 5.3.2.39 ([グラフ F]F-19～F-21 参照) にモータ目標加速度を 1000[mm/s²] に設定した場合のモータ目標加速度を、図 5.3.2.40～図 5.3.2.42 ([グラフ F]F-22～F-24 参照) にモータ目標加速度を 500[mm/s²] に設定した場合のモータ目標加速度を示す。各図において、(a)は $c = 250$ [N s/m]、(b)は $c = 350$ [N s/m]、(c)は $c = 450$ [N s/m] である。

表 5.3.2.7 にモータ目標加速度を 1000[mm/s²] に設定した場合の転倒発生時のモータ目標加速度を、表 5.3.2.8 にモータ目標加速度を 500[mm/s²] に設定した場合の転倒発生時のモータ目標加速度を示す。

表 5.3.2.7 転倒発生時のモータ目標加速度[mm/s²]

(モータ目標加速度 1000[mm/s²])

被験者	cの値[N s/m]			平均
	c=250	c=350	c=450	
A	784	910	980	891.3
B	980	700	926	868.7
C	980	910	980	956.7
平均	915	840	962	905.6

表 5.3.2.8 転倒発生時のモータ目標加速度[mm/s²]

(モータ目標加速度 500[mm/s²])

被験者	cの値[N s/m]			平均
	c=250	c=350	c=450	
A	490	490	490	490.0
B	490	350	490	443.3
C	490	490	490	490.0
平均	490	443	490	474.4

転倒発生時における被験者のモータ目標加速度は、モータ目標加速度を 1000[mm/s²] に設定した場合は平均 905.6[mm/s²]、モータ目標加速度を 500[mm/s²] に設定した場合は平均 474.4[mm/s²]であった。

5.3.2.4 考察

転倒検知を変位でおこなう場合とモータ目標加速度でおこなう場合とを，モータ速度，変位，荷重，停止するまでの時間で比較したものを表に示す．

表 5.3.2.5 はモータ速度の比較，表 5.3.2.6 は変位の比較，表 5.3.2.7 は荷重の比較，表 5.3.2.8 は転倒を検知して停止するまでの時間の比較である．

表 5.3.2.5 転倒検知方法別のモータ速度[mm/s]の比較

被験者	転倒検知方法		
	変位 150[mm]	加速度 1000[mm/s ²]	加速度 500[mm/s ²]
A	160	70.3	30.3
B	160	84.3	34.7
C	160	83	34
平均	160	79.2	33

表 5.3.2.6 転倒検知方法別の変位[mm]の比較

被験者	転倒検知方法		
	変位 150[mm]	加速度 1000[mm/s ²]	加速度 500[mm/s ²]
A	150	4.7	1.7
B	150	6.4	2.9
C	150	6.2	2.1
平均	150	5.8	2.3

表 5.3.2.7 転倒検知方法別の荷重[kgf]（体重比％）の比較

被験者	転倒検知方法		
	変位 150[mm]	加速度 1000[mm/s ²]	加速度 500[mm/s ²]
A	34.1(76%)	12.0(27%)	4.9(11%)
B	30.4(55%)	12.7(23%)	5.0(9%)
C	36.4(58%)	13.6(22%)	6.0(10%)
平均	33.6(63%)	12.8(24%)	5.3(10%)

表 5.3.2.8 転倒を検知して停止するまでの時間[sec]

被験者	転倒検知方法		
	変位 150[mm]	加速度 1000[mm/s ²]	加速度 500[mm/s ²]
A	1.2	0.3	0.2
B	1.3	0.3	0.2
C	1.3	0.4	0.3
平均	1.27	0.33	0.23

この結果，モータ目標加速度を 500[mm/s²]に設定した場合には，被験者のモータ速度の平均は上限値の約 20[%]に抑えられ，歩行時とほぼ同じであるにもかかわらず，転倒を検知して吊り上げ装置のモータは停止することができた．

変位は被験者の平均が 3[mm]以下というわずかの落下であり，そのときの荷重は被験者の体重の約 10[%]であることから，瞬時にモータを止めても衝撃力は小さいと予想される．さらに，停止までの時間は 80[%]以上短縮できた．

また，モータ目標加速度はその設定値を超えていない．その理由は，モータの目標速度が前もってわかることから，次のサイクルでモータ目標加速度が設定値を超えることが計算できるからである．これは，実際にその加速度がでる前にモータを停止できることを意味している．

一例として，モータを停止する方法に目標加速度と実測加速度を用いて比較をした結果を図 5.3.2.43～図 5.3.2.45（[グラフ G]G-1～G-3 参照）に示す．

減衰には $c = 250$ [N s/m]，力の入力には 5[kgf]の重りを用い，重りを吊り下げた状態から仮想コンプライアンス制御を実行する方法でおこなった．

目標加速度で停止するようにした場合は，仮想コンプライアンス制御を開始した時点ですでに設定加速度を超えることがわかっているため，モータは動くことはない．

それに対して、実測加速度で停止するようにした場合は、モータが実際に動いてから加速度の計算をすることになるため、速度は上限値まで達した後停止している。さらに、モータが動いているためわずかではあるが落下し変位も出ている。

このことから、目標加速度を用いることは、ある現象が起こる前に対処できることになる。そのほかの制御では、実際に速度や加速度がでてから止めることになり、安全性の面から好ましくない。このような点から前もって目標値を計算することができる仮想コンプライアンス制御は非常に有効と考えられる。

5.3.2.5 まとめ

転倒の発生を判断する基準に、時間的変化がもっとも早いモータ目標加速度を用いて転倒防止実験をおこなった。その結果、モータ速度は歩行時とほぼ同じであるにもかかわらず、転倒を検知して吊り上げ装置のモータを停止することができた。また、ロープのばね定数が小さく、そのときの変位もわずかで速度が出る前に停止していることから、瞬時に止めても衝撃力は小さいと予想される。さらに、姿勢が沈まないうちに転倒を防止できることで、膝への負担も少なくできる。

以上のことから、速度が出る前に転倒を早期に検知し衝撃力も抑える方法として、モータ目標加速度を判断基準に用いることは非常に有効と考えられる。

6章 結言

本研究では，下肢支持性欠如に起因する転倒が発生した場合の吊り上げ装置の制御方法を検討した．その結果，以下のような結論を得た．

(1) 歩行時の制御

通常の歩行では患者の自由な動きをできるだけ拘束せず，動きに追従させることを目的に，仮想コンプライアンス制御を用いて吊り上げ装置の制御をおこなった．

この結果，減衰だけを仮想的に付加した制御を用いて，上体の動きによる張力でモータを駆動し，追従させることができた．また，そのときの荷重の振幅はほぼ1 [kgf]であり，被験者の感想も“拘束されているという感じはほとんどなく，歩行の邪魔にはならない”というものであった．

この制御方法は，パラメータを変えることによって，ソフト上で減衰係数を任意に増減することができるため，患者の症状や好みによって自由に設定できる利点がある．

(2) 変位を用いた転倒の防止制御

歩行時の計測データをもとに，転倒の発生を検知する基準にまず変位のしきい値を決め，転倒防止制御のアルゴリズムを提案し，確認実験をおこなった．

変位による転倒防止アルゴリズムは以下のようなものである．

変位がしきい値を超えた時点で転倒が発生したとみなす

転倒の検知後，モータを停止

一定時間停止後，元の姿勢まで巻き上げ

患者が自分の足で立ち上がったことを検知して，歩行が再開

この結果，転倒検知 転倒防止 姿勢復帰 歩行再開という一連の制御ができていることが確認できた．これにより，患者がある程度自立した歩行訓練が可能になり，介助者等の負担も少なくすることができると思われる．

しかし，転倒の発生を変位量で検知する方法は，速度や衝撃が予想される等の点において充分とはいえなかった．そこで，さらに計測データをもとに転倒を検知する基準を検討し，次の実験をおこなった．

(3) モータ目標加速度を用いた転倒の防止制御

(2)を受けて，問題解決のためにモータ目標加速度を転倒判断に用いた検知方法を提案した．それは，モータ目標加速度がしきい値を越えた時点を転倒の発生とみなし，モータを停止する方法である．

この結果，モータ速度は歩行時とほぼ同じであるにもかかわらず，転倒を検知して吊り上げ装置のモータを停止することができた．

また，ロープのばね定数が小さく，そのときの変位もわずかで速度が出る前に停止していることから，瞬時に止めても衝撃力は小さいと予想される．

さらに、姿勢が沈まないうちに転倒を防止できることで、膝への負担も少なくできると考えられる．

実験後の被験者の感想として、「落ち始めたらすぐに停止する感触が，まるで人の手で掴んでいるようだ」というものがあった．単なるロープの停止ではなく，人が掴む感触に近いものがあるということも速度が出ないうちに停止できていることのあらわれであり，人に優しいという面でも実現できたと考えられる．

以上より，通常の歩行時に患者を拘束しない制御としてコンプライアンス制御が，また転倒の防止にはモータ目標加速度による検知が有効であると考えられる．さらに，変位による転倒検知と併用することで，加速度が小さいゆっくりした崩れ落ちや，変位が大きい前のめりで転倒する場合にも適用可能と考えられる．

今回の実験は，健常者でおこなったものである．今後の課題としては，実際に高齢者による実験をおこない，より安心して歩行リハビリができるように，実用的な部分での検討を行う必要がある．

謝辞

本研究を進めるにあたり，終始丁寧かつ適切なご指示，ご指導を賜りました指導教員の
高知工科大学 井上喜雄教授に，深く感謝の意を表します．また，副指導教員 王碩玉教
授には，暖かい励ましと研究に対する貴重なご意見を賜りました．さらに，高知工科大学
甲斐義弘助手には，ロボット工学や機械力学の基礎知識を論議のなかでご教示くださると
ともに実験について有益なご意見を賜りました．両先生に深く感謝の意を表します．

高知医科大学 山本博司先生，石田健司先生にはリハビリテーションの専門家という医
学的見地から貴重な助言を賜りました．両先生にはここに厚く感謝の意を表します．

大学院生の森井康友氏には，実験や研究を進める上で多大なご協力と数々の貴重なアド
バイスを賜りました．この場を借りて厚くお礼申し上げます．

実験にご協力いただいた，大学院生の大田大氏，川澤延弘氏，松田拓也氏，松谷融氏，
学部生の山内勉氏，土居輝氏，居川優一氏をはじめ，研究のサポートをしていただいた中
浜昌文氏，知能機械力学研究室の研究生のみなさんに厚くお礼申し上げます．

高知工業高等学校 野町幸一前校長先生には，高知工科大学大学院に留学する機会を与
えていただきました．ここに深く感謝の意を表します．また，高知工業高等学校 山崎功
子教諭，福井博史教諭には高知工科大学大学院の出願に際して貴重なアドバイスを賜りま
した．両先生に厚くお礼申し上げます．

最後に，今日までご支援を賜りましたたくさんの皆様に厚くお礼申し上げます．

参考文献

- (1)河田耕一他，歩行リハビリテーション支援装置，第4回知能メカトロニクスワークショップ，1999，pp.32-35
- (2)根本泰弘他，高齢者の歩行支援機器技術，BME，13-2，1999，pp.42-46
- (3)石神重信，高齢障害者と福祉機器 自立を損なわない機器のあり方，日本機械学会誌，96，898，1993，pp.809
- (4)山科忠彦他，底屈力および背屈力の加齢変化，体力科学，Vol.43 Num.6，(1994.12)，pp.672
- (5)米田隆志他，車椅子・歩行介助装置の現状と課題，日本ロボット学会誌，Vol.11，No.5，1993，pp.644-648
- (6)石山郁朗他，中高年齢者の転倒と筋力および姿勢保持能との関連，体力科学，Vol.49，Num.6，2000.12，pp.810
- (7)谷知之他，歩行訓練システム制御方式の開発，日本機械学会論文集 C 編，Vol.62，597，1996.05，pp.1928-1934
- (8)井手隆俊他，歩行治療用ロボット(AID-1)の開発と臨床効果，人工臓器 17 巻 2号，1988，pp.769-772
- (9)平山登志夫他，老人保健施設における歩行訓練用ロボット(AID-1)の使用経験，看護技術 34，1988，pp.72-75
- (10)林誠二他，歩行訓練ロボット - 重複障害例に対する有用性の検討 - ，理学療法学，Vol.18，Num.Supplement，1991.03，230
- (11)井手隆俊，医療・福祉ロボットへの期待，日本ロボット学会誌，Vol.8，No.5，1990.10，pp.73-78
- (12)谷知之他，能動インピーダンス制御を用いた訓練用歩行路面の検討，日本機械学会論文集 C 編，Vol.63，613，1997-9，pp.3168-3173
- (13)藤江正克，高齢者の自立した日常生活に関する支援技術，日本機械学会論文集 C 編，Vol.63，607，1997.3，pp.636-641

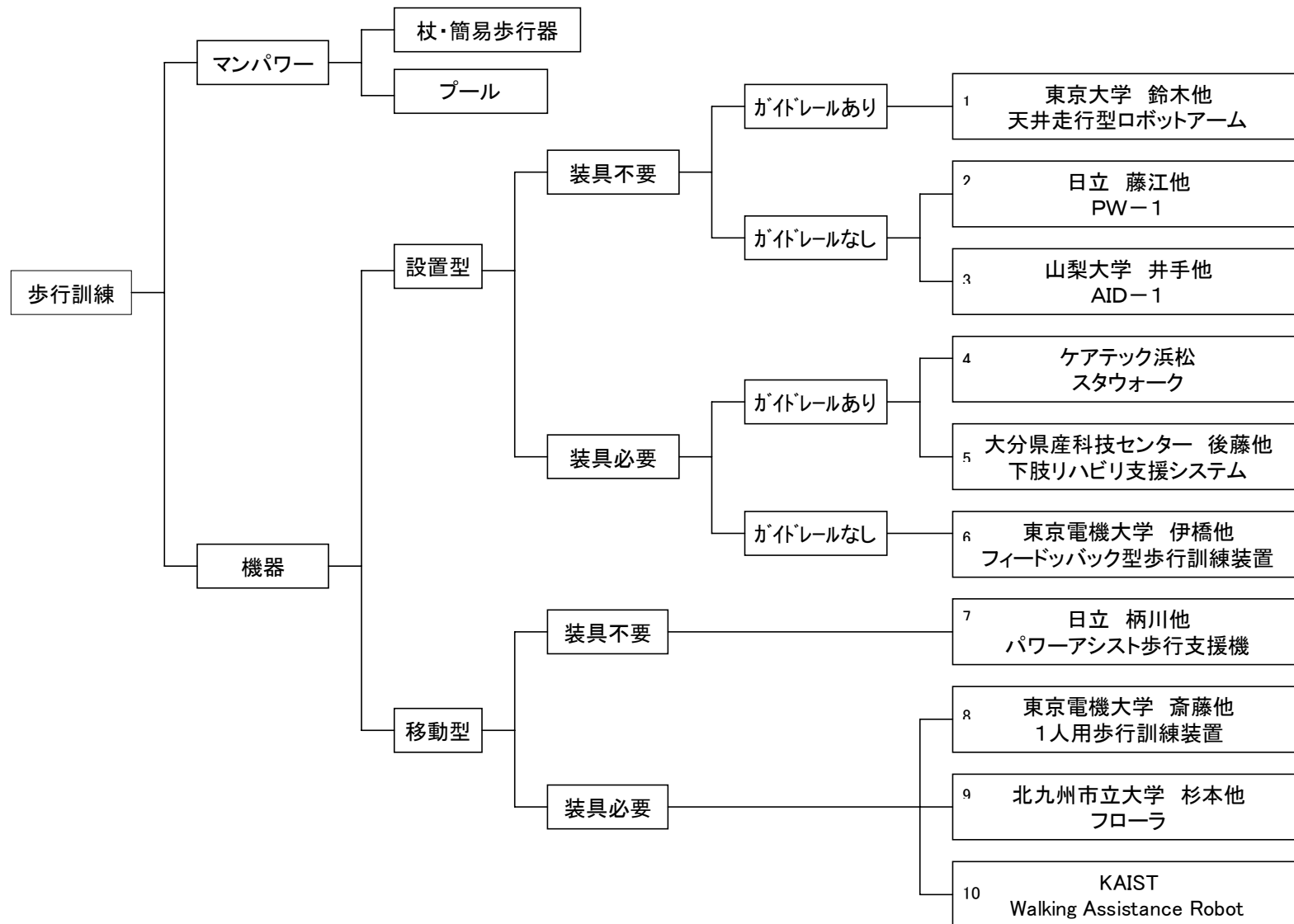
- (14) 藤江正克, 歩行支援ロボット, 日本ロボット学誌, Vol.14, 5, 1996, pp.628-631
- (15) 土肥健純他, バーチャルリアリティを活用した歩行訓練器, BME, Vol.12, No.8, 1998, pp.29-37
- (16) 谷知之他, 歩行訓練システム: 片麻痺患者の立位安定機能向上, 第18回バイオメカニズム学術講演会, 1997.11, pp.43-45
- (17) 長谷和徳他, 高齢者転倒予防を目指した歩行訓練システムの開発(設計指針の立案と基礎的評価実験), 日本機械学会論文集C編, Vol.68, 668, 2002.4, pp.1245-1250
- (18) 片麻痺患者における「AI歩行訓練システム」の効果, 理学療法学, 第24巻, 学会特別号(第32回埼玉), 1997, 261
- (19) Tani, T., Control Methods of the Walk Training System, JSME Int.J.Ser.C, Vol.40, No.2, 1997, pp.285-290
- (20) 藤江正克他, 高齢者の自立支援のためのコンプライアンス制御型歩行訓練機の開発(日立製作所), 日本ロボット学会誌, Vol.18, 1, 2000, pp.53-54
- (21) 藤江正克, 自立歩行システム, 計測と制御, Vol40, 5, 2000.5, pp.384-387
- (22) 柄川索他, パワーアシスト歩行支援機の慣性制御, 2001年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, 582
- (23) Yasuhiro NEMTO, POWER-ASSISTED WALKING SUPPORT SYSTEM FOR ELDERLY, Proceedings of the 205th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology society, Vol.20, No.5, 1998, pp.2693-2695
- (24) 井手隆俊他, 歩行訓練用ロボット(AID-1)の開発, 別冊整形外科 11, 1987, pp.234-237
- (25) 坪内敬典他, 歩行訓練用自動牽垂ロボットの開発, 理学療法学, Vol.13, Num.Supplement, 1986.04, pp.8

- (26)N.A.Siddiqi et al. , A COMPUTER-AIDED WALKING REHABILITATION ROBOT ,
Am.J.Phys.Med.Rehabil73 , 1994 , pp.212-216
- (27)Ide , T et al. , Expectations for medical and healthcare robotics ,
Advanced Robotics , Vol.7 , No.2 , 1993 , pp.189-200
- (28)J.KAWAMURA et al. , Automatic suspension device for gait training ,
Prosthetics and Orthotics International , 1993 , 17 , 120-125
- (29)後藤和弘他 , リハビリ支援システムの開発 , 平成 11 年度大分県産業科学技
センター研究報告 , 1999
- (30)岩本光代他 , 空圧式天井走行歩行訓練器の開発 , 理学療法学 , Vol.24 , 学
会特別号(第 32 回埼玉) , 1997 , pp.462
- (31)杉本旭他 , 天井吊り下げ型歩行支援システムの機能と安全対策 , 日本ロボ
ット学会創立 20 周年記念学術講演会 , 2002.10 , 1L19
- (32)鈴木真他 , 天井走行型ロボットアームによる高齢者の自立移動支援 , 精密
工学会誌 , Vol.65 , 1 , 1999 , pp116-120 ,
- (33)斎藤之男 , 一人用歩行訓練装置 , 2001 年度精密工学会春季大会学術講演会
講演論文集 , pp.585
- (34)伊橋孝明他 , フィードバック型歩行訓練装置に関する研究 , 1998 年度精密
工学会春季大会学術講演会講演論文集 , pp.614
- (35)Ju-Jang Lee and Choon-Young Lee , Development of Walking Assistance
Robot System and Experiment with the Disabled , Proceedings of SICE/ICASE
Workshop , Serial.40 , Nagoya , Japan , 2001.7 , pp.219-224
- (36)甲斐義弘他 , 患者の症状を考慮したインテリジェント歩行支援機の動作制
御モードの実験的検討 (患者転倒時の実験) , 日本機械機学会講演論文集
No.015 , 2001.3 , pp.401-402
- (37)鈴木みずえ他 , 高齢者の転倒ケア , 医学書院 , 2001
- (38)平成 13 年度ウエルフェアテクノシステム研究開発 (高知) 成果報告書 , 新

エネルギー・産業技術総合開発機構・高知工科大学

- (39) 平林久明他, 多自由度ロボットの仮想コンプライアンス制御, 計測自動制御学会論文集, Vol.22, 3, 1986, pp.343-350
- (40) 古田勝久他, マニピュレータの力制御アルゴリズムとその実現, 日本ロボット学会誌, Vol.7, 3, 1989.6, pp.131-136
- (41) 高齢者身体機能データベース, 動作特性実計測データ, 自由歩行時の歩幅, 歩数, 速度, 動作特性 - 平成 10 年度 N E D O 20 人計測 -
http://www.hq1.jp/gpd/jpn/adb/main/h1e/keisoku/dousa/result/h10nedo20/walk/walk_free.html

[付録 A] 歩行訓練装置の系統図

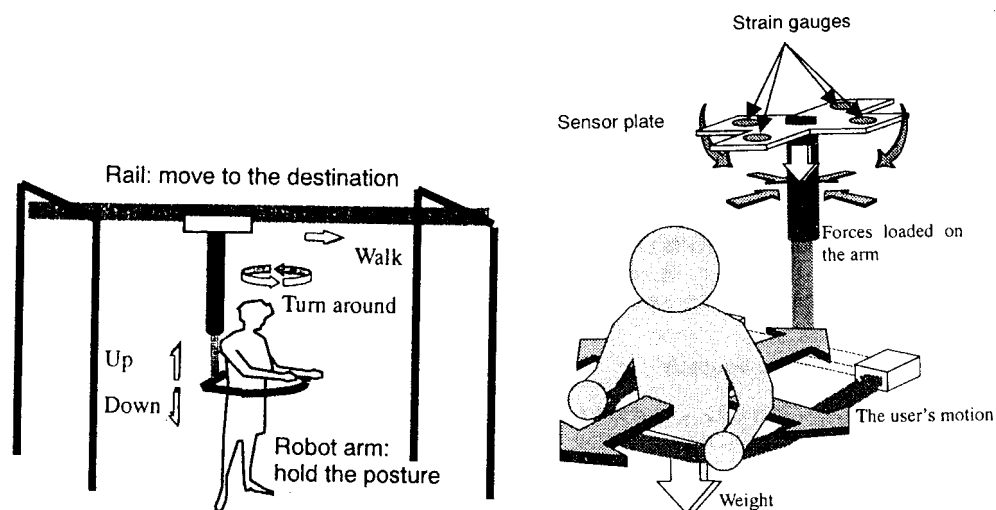


[付録 B] 歩行訓練装置の分類表

	歩行訓練装置名	機構	支持箇所	スリング	免荷機能	装置の走行	天井レール	機構（上下方向）の動力源	吊り上げ機構の自由度	急激な負荷変動時の対応	動きの追従	追従力の調整	機構（上下方向）の制御則
1	東京大学 鈴木他 天井走行型ロボットアーム	吊り上げ	上肢	不要	あり	天井	あり	なし (高さ固定)	1 (左右同時)	なし	なし	固定	なし
2	日立 藤江他 PW - 1	体幹支持	腋胸郭	不要	あり	設置	なし	なし	-	あり	あり	可変	仮想コンプライアンス制御
3	山梨大学 井手他 A I D - 1	吊り上げ	腋胸郭	不要	あり	設置	なし	圧縮空気	1 (左右同時)	あり	あり	可変	なし
4	ケアテック浜松 スタウォーク	吊り上げ	上	要	あり	天井	あり	なし (紐のみ)	1 (左右同時)	なし	なし	固定	なし
5	大分県産科センター 後藤他 下肢リハビリ支援システム	吊り上げ	上	要	あり	天井	あり	モータ	1 (左右同時)	なし	あり	可変	なし
6	東京電気大 伊橋他 フィードバック型歩行訓練装置	吊り上げ	上	要	あり	設置	なし	モータ	1 (左右同時)	なし	なし	固定	なし
7	日立 柄川他 パワーアシスト歩行支援機	なし	なし	不要	なし	床	なし	なし	-	なし	なし	固定	なし
8	東京電機大 斎藤他 1人用歩行訓練装置	吊り上げ	上	要	あり	床	なし	モータ	1 (左右同時)	なし	なし	固定	なし
9	北九州市立大 杉本他 フローラ	吊り上げ	上	要	あり	天井	なし	定荷重バネ	1 (左右同時)	なし	あり	可変	なし
10	KAIST Walking Assistance Robot	吊り上げ	上	要	なし	床	なし	モータ	1 (左右同時)	なし	あり	可変	ラグランジュ方程式

東京大学 鈴木真他

「天井走行型ロボットアーム」



患者は上肢でアーム部に体重の一部をかけ免荷することで、低下した下肢能力を活用して自分の足で移動する。

アーム部は荷重のかけ方で天井レールに沿っての走行と、上下動および回転する。

アーム上部に力センサがあり、前後左右および下方の荷重を計測できる。

歩行中アーム部の高さは固定されている

日立製作所 藤江正克他

「PW - 1」



介助要素はコンプライアンス制御で前後上下する．前後方向はある変位を越え
ると硬いバネがあるかのように復元力を出す．

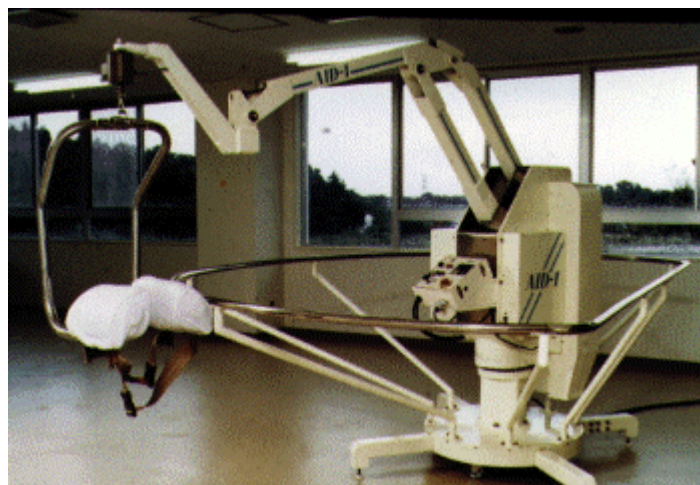
上下方向はアームの速度に関係なく，ある決まった変位まで来ると押し戻す
ように動く．

歩行面は左右二本のベルト上を歩くことで左右の足を別々に訓練できる上，
蹴る力に合わせて速度が変わる能動インピーダンス制御するので個々人の
歩行能力に合わせて訓練できる．

「映像システム」として，歩行ベルト速度に同調した映像を見ながら，あた
かも実際に野外を歩いているような臨場感(簡易バーチャルリアリティ)で，
訓練ができる．

山梨大学 井手隆俊他

「A I D - 1」



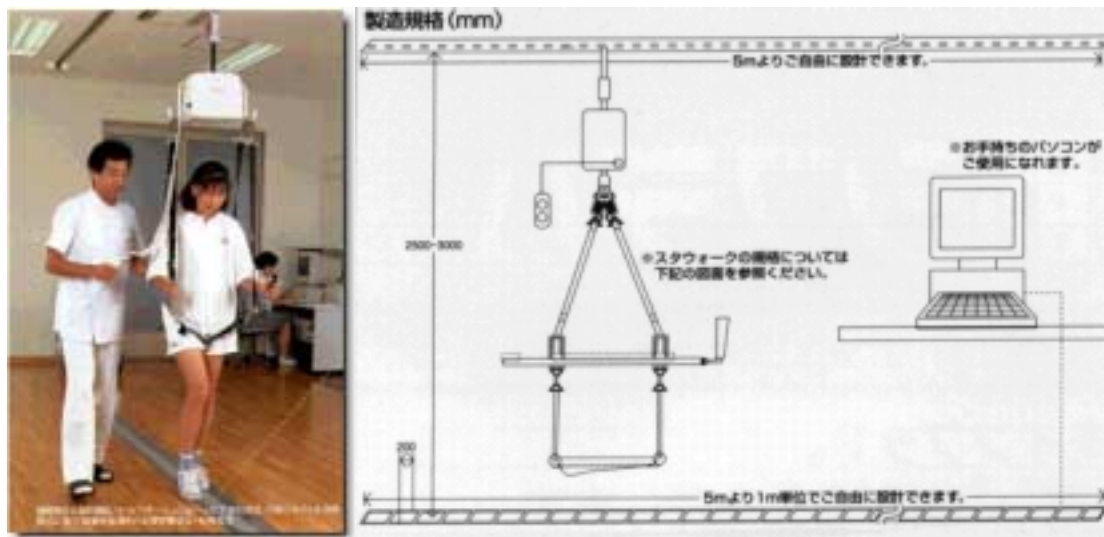
体幹を保持しつつ，患者の体重を軽減し，わずかな筋力で免荷歩行が可能．
動力源は圧縮空気であり，吊り上げ力とカウンターウエイトとのバランスにより患者の体重を軽減し，体幹を保持する．

患者の体重が加わると腋と胸郭部を両側から締め付けて体幹を保持する．
吊り上げ力を設定した後は，負荷の変動があっても自動的にその力を維持し，
急激な負荷の変動にはロック機構がはたらく．

[付録 C] 歩行訓練装置の概要

有限会社 ケアテック浜松

『トータル・ゲイト・フィードバック・システム』



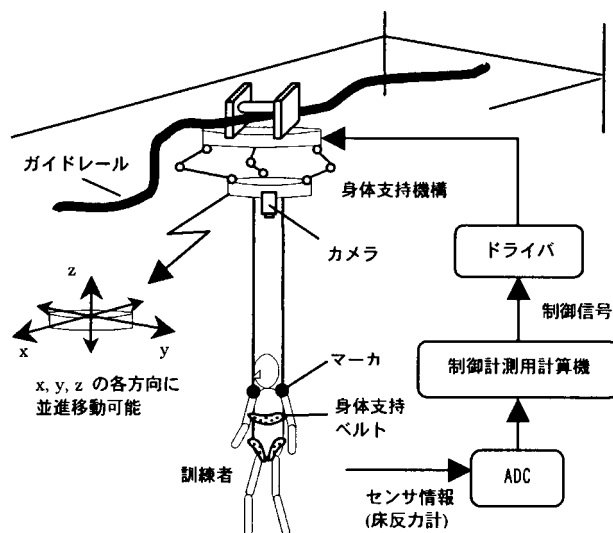
歩行介助器具「スタウォーク」、天井電動リフト、歩行速度計測器からなる。
コンピュータによる歩行リハビリデータの記録と解析が可能
患者の腰部はサドルに密着し、上体は肘掛・取っ手・サドルで安定している。
足の部分が開放されている。



「スタウォーク」

大分県産業科学技術センター 後藤和弘他

「下肢リハビリ支援システム」



身体支持機構から吊り下げたワイヤで訓練者の身体を支持し，カメラでマーカの位置を検出して動きに追従するように支持機構を制御する．

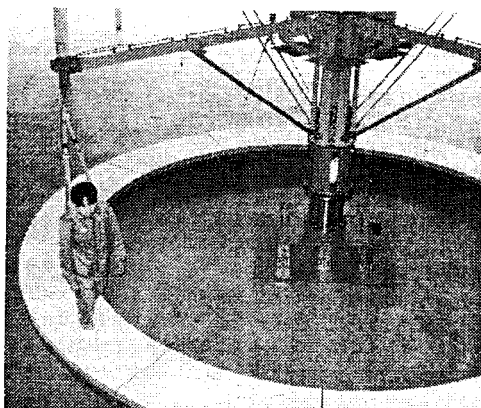
床反力計をもとに下肢へ与える負荷を調節する．

支持機構には3次的に自由に動くパラレルリンクを用いることによって，横へ倒す力を取り除き，患者を常に真上から支持する．

[付録 C] 歩行訓練装置の概要

東京電機大学 伊橋孝明他

「フィードバック型歩行訓練装置」



吊り上げ装置上部には十字にロボットアームが取り付けられており、同時に4人まで個別制御できる。

吊り上げ装置下部には旋回用モータがあり任意の速度を与えられる。

12枚の円弧型のフォースプレートを円環状に配置しており、歩行中の歩容をリアルタイムで計測できる。

歩行訓練をしながら同時に診断結果を定量的に評価する。

日立機械研 柄川索他

「室内用パワーアシスト歩行支援機」



立ち上がり，歩行，移動，着座を一台で支援する．

肘かけ部が電動リフト機能でゆるやかに上下することで立ち上がり，着座の負担を軽減．

肘かけ部が上下しているときは，車輪はロックされる．

肘かけ部の上げ下げと車輪のロックは手元のリモコンで操作する．

リモコンは取り外しが可能で，介護者による操作も可能．

自力歩行を尊重しているため，歩行支援のための電動機能などは設けていない．

床走行リフトのように介護者が押して移動させることもできる．

東京電機大学 齊藤之男他

「フィードバック型歩行訓練用パワーアシスト装置（１人用歩行訓練装置）」



パワーアシストはプログラム化されており，歩行時に訓練シューズにより足底にかかる床反力を測定し，歩行時に蹴り出しを補助するように上部からモータで吊り上げて体重を軽減する．

歩行は室内であれば障害物をよけて走行できる．

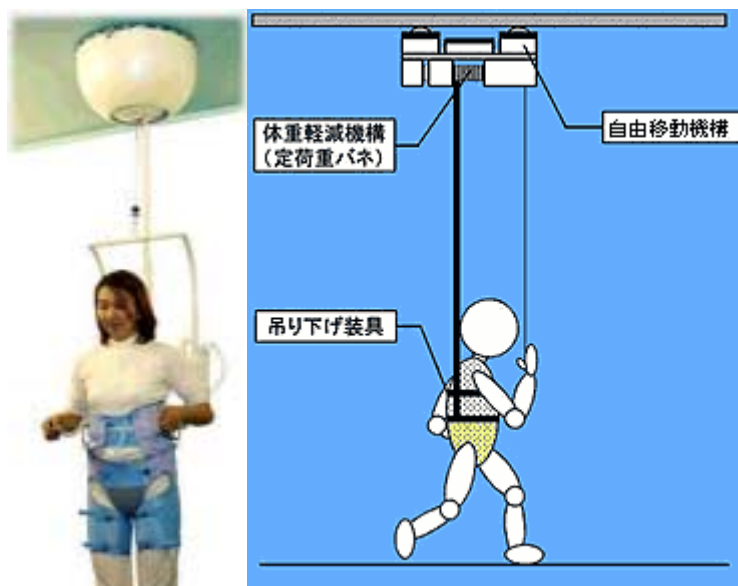
歩行が容易となる広い足元スペースを確保しており，廊下の手すりにつかまると同様に自然に腕をおろした状態でハンドルを握り，身体を支えながら自然に近い状態での歩行訓練が可能である．

データ処理は，マイクロコンピュータ搭載した基盤で処理を行っている．

安全面に関しては，多種センサを用いフェイル・セーフを図っている．

北九州市立大学 国際環境工学部 杉本旭他

「フローラ」



鉄板製の天井に強力な永久磁石で吸着し，ここから人を吊り下げている．

定荷重バネの設定値以上の力は作用しないので，装置は絶対に落ちない．

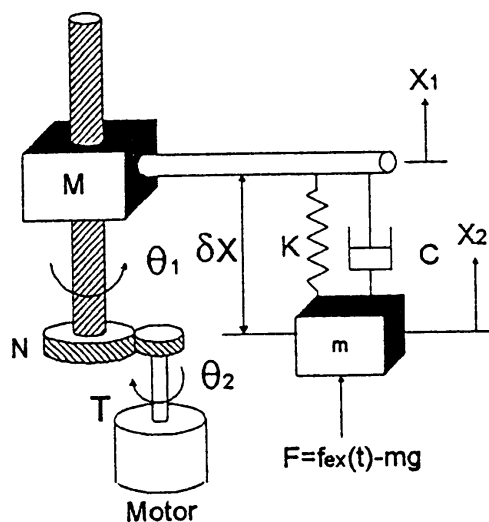
定荷重バネの設定荷重値を可変させることで，個人の体重や状態に合わせた介助力を得ることができる．

移動歩行は ジョイスティックで操作できる．

装着具は，太ももを軽く締めて，ここで吊り上げ荷重の約 30%を負担，おしりの下の帯テープでプランコに腰掛けるような状態で吊り上げ荷重の約 70%を負担する．

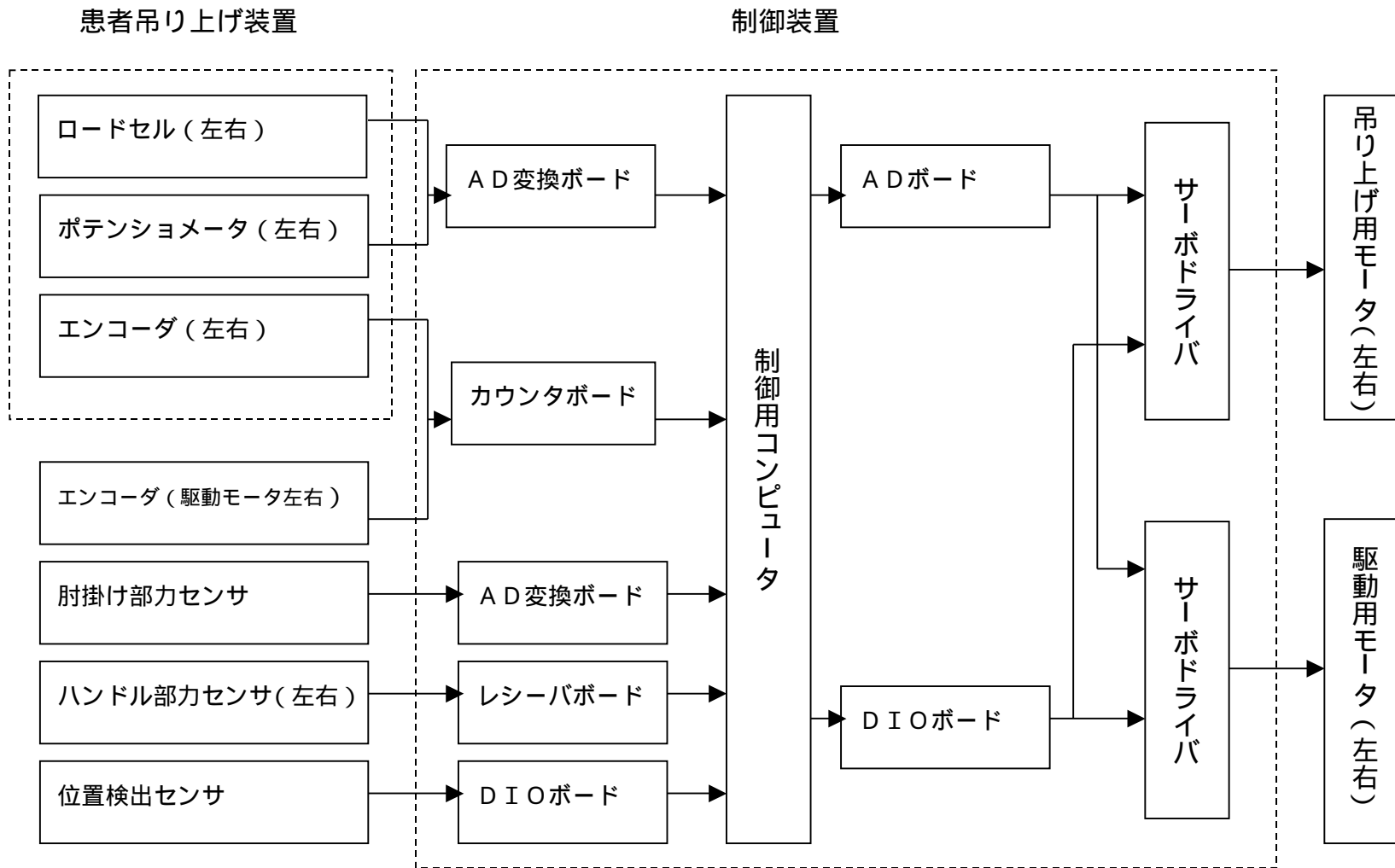
K A I S T Ju-Jang Lee and Choon-Young Lee

Walking Assistance Robot System



- マニピュレータは患者の背後に設置されている .
- ロードセルで検出された荷重でマニピュレータを制御する .
- マニピュレータは1自由度で , ボールスクリュウで上下の直線運動をする .
- 2 個の駆動輪と , 2 個のキャスターで動く .
- コンピュータによる一定速度走行と , 3 軸のジョイスティックでの走行が可能 .
- 24 個の超音波センサで衝突を防ぐ .

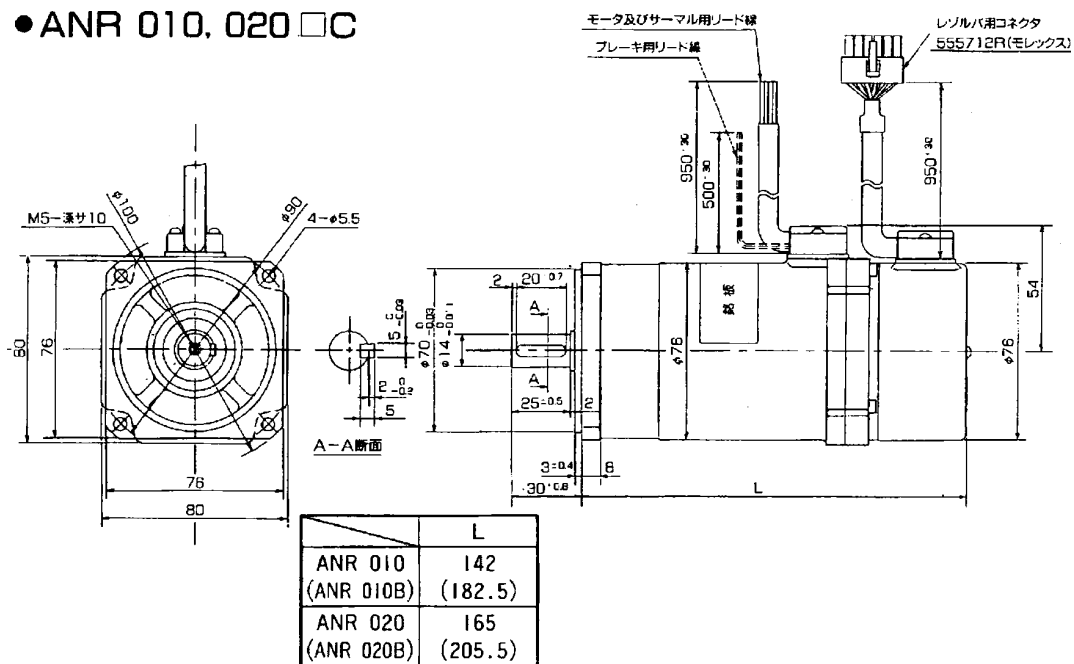
[付録 D] 制御信号の系統図



[付録 E] AC サーボモータ (ワコー技研株式会社製 ANR020B)



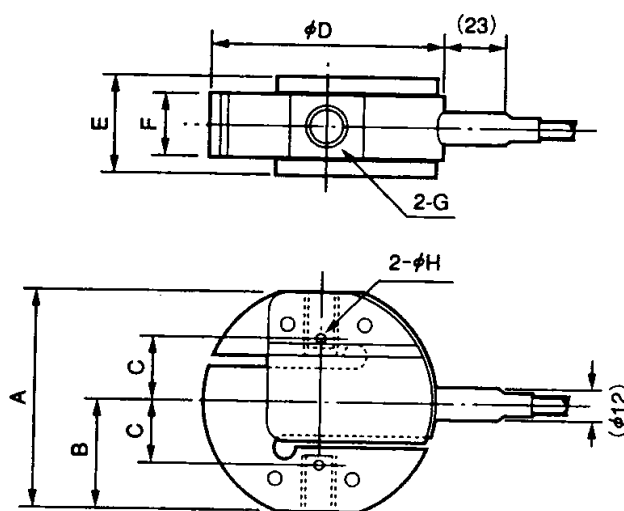
● ANR 010, 020 □ C



AC サーボモータ仕様書

	使用バッテリー電圧	24V
モ ト ー 部	定 格 出 力	200W
	定 格 ト ル ク	9.7kg・cm
	瞬 時 最 大 ト ル ク	20 kg・cm
	定 格 回 転 数	2000rpm
	最 大 回 転 数	2000rpm
	定 格 電 流	14.5A
	定 格 電 圧	16V
	瞬 時 最 大 電 流	29A
	ト ル ク 定 数	0.79kg・cm/A
	ロ ー タ イ ナ ー シ ャ	1.18g・cm・s ²
	パ ワ ー レ ー ト	7.8kW/s
	概 略 重 量	2.7kg
	ブ レ ー キ	定 格 電 圧 、 電 流
静 止 摩 擦 ト ル ク		15kg・cm
ブ レ ー キ イ ナ ー シ ャ		0.1g・cm・s ²
概 略 重 量		0.9kg

[付録 F] ロードセル (株式会社共和電業 LTZ-100KA)



寸法表

A	B	C	D	E	F	G	H	質量 (約)
64	32	19	68	32	22	M6 P=1 深14	1.6	0.3kg

ロードセル仕様書

定 格 容 量	100kgf (980.7N)
許 容 過 負 荷	150%
定 格 出 力	3mV/V \pm 0.2%
非 直 線 性	\pm 0.03%R0
ヒステリシス	\pm 0.03%R0
推 奨 印 加 電 圧	1 ~ 10V AC または DC
許 容 印 加 電 流	20V AC または DC
入 力 抵 抗	350 \pm 0.5%
出 力 抵 抗	350 \pm 0.5%
繰 り 返 し 性	0.03%R0 以下
温 度 補 償 範 囲	-10 ~ 70
許 容 温 度 範 囲	-20 ~ 80
零 点 の 温 度 影 響	\pm 0.005%R0/
出 力 の 温 度 影 響	\pm 0.005%/
固 有 振 動 数	1.75kHz
防 水 性	JIS C 0920 防まつ形
材 質	アルミ合金 (本体部)
ケ ー ブ ル	0.5mm ² 、4心シールドクロロプレン 3m、 外径 8.5mm、先端先開圧着端子 (4mm 用)

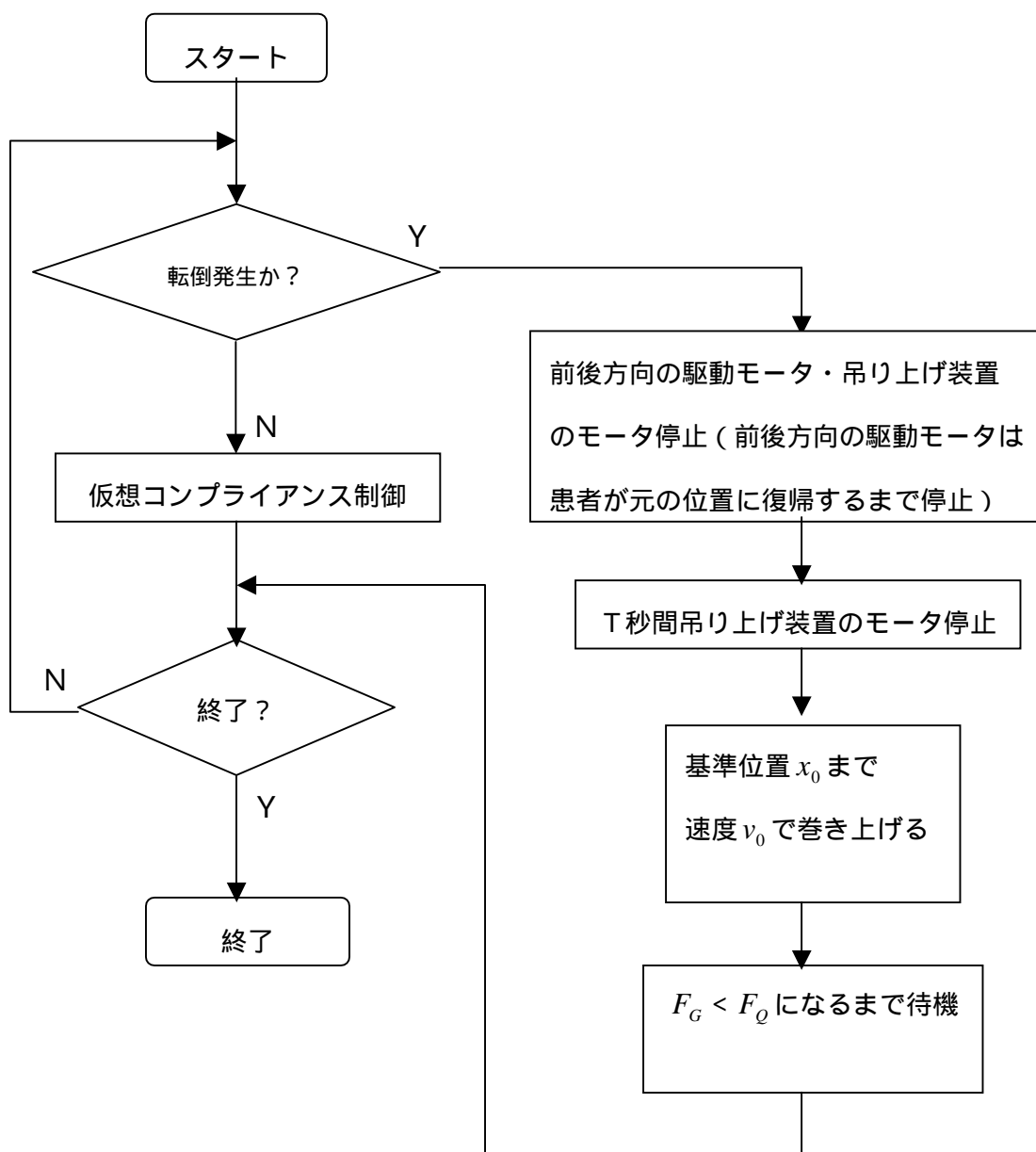
[付録 G] モータドライバ (ワコー技研株式会社製 ABEDUO-460)

表2-1 ABE Duo仕様

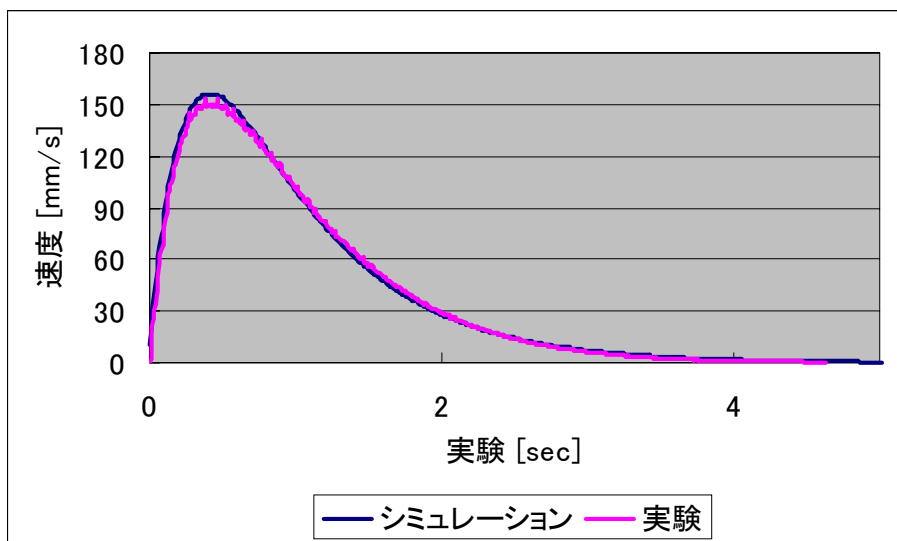
型式		ABE Duo-275	ABE Duo-435	ABE Duo-460	
電源入力	主電源	DC20V~28V (24Vバッテリー対応)	DC20V~56V (DC24V,48Vバッテリー対応)		◎
	制御電源	DC20V~56V			◎
定格相電流		26.5Arms	13.3Arms	22.1Arms	
瞬時最大電流		53.0Arms	26.5Arms	44.2Arms	
制御方式		パワー-MOSFETによる正弦波PWM制御			
対応モータ、センサ		同期型三相 モータ(標準8極、正弦波励磁)、ブラシレスレゾルバ1X			
アナログ 入出力	速度指令入力	DC0~±10V, 入力インピーダンス10Kオーム以上、 速度設定 対応モータ定格回転数/10V±2%			○
	トルク指令入力(スレーブ入力)	DC0~±10V, 入力インピーダンス10Kオーム以上			○
	経路誤差指令入力(ステアリング入力)	DC0~±10V, 入力インピーダンス10Kオーム以上			○
	トルク指令出力(マスタ出力)	スレーブ軸に対するトルク指令が出力されます			○
制御信号 入力	マスタスレーブ切換入力	入力コモン間を閉とすることでスレーブモード(トルクサーボ)となります			○
	正逆転切換入力	入力コモン間を閉とすることで回転方向、トルクの発生方向を反転できます			○
	サーボオン入力	入力コモン間を閉とすることでサーボオン状態となります			◎
	リセット入力	入力コモン間を閉とすることでアラームリセット状態となります			◎
	ブレーキ解除入力	入力コモン間を閉とすることでドライバーの状態に関係無くブレーキ解除となります			◎
	経路誤差オン入力	入力コモン間を閉とすることで経路誤差指令入力が有効となります			◎
	エンコーダ信号出力	A,B,Z信号をオープンコレクタで出力します 出荷設定1024パルス/回転、Z信号はA信号に同期して1回転に1パルス出力			○
制御信号 出力	レディ出力	モータ駆動状態にあるとき出力トランジスタがオンとなります (オープンコレクタ出力)			◎
	エラー出力	保護機能が作動する事で出力トランジスタがオフとなります (オープンコレクタ出力)			◎
	エラーコード出力	保護機能に対応するコードを3ビットで出力します (オープンコレクタ出力)			◎
	電源出力	+5V	外部論理回路用電源 (+5V,200mA max)		
	±15V	外部アナログ回路用電源 (±15V,100mA max)			
モニタLED		power, ready, error, error code(3ビット)			
モニタ点検端子		電流制限値モニタ、過速度判定値モニタ、過負荷判定値モニタ			
ユーザ調整機能	A,B軸別調整	速度調整、ゼロ調整、速度ループゲイン調整			
	A,B軸共通調整	電流調整、経路補正ゲイン調整、過速度判定値調整、過負荷判定値調整			
ユーザ設定機能		エンコーダ信号パルス密度設定、レゾルバモータ極数比、 ケーブル長補正、経路補正極性			
保護機能		ステップアウト/過速度、過負荷(電子サーマル)、過電流、過熱(出力段)、過電圧			
絶縁抵抗、耐圧		50Mオーム以上、1000VAC 1分間(電源-シャーシ間にて)			
使用環境		0~45°C 85%Rh以下 熱対流のある雰囲気で使用します			
付属品		端子台カバー、CN1用コネクタ(MR-34M,MR-34L:本多通信工業製)、 CN4,5用コネクタ(5557-04R×2,5556-PBT2L×8)、取扱説明書			
重量		4.0Kg,	3.3Kg	3.8Kg	

○ : A,B軸別入出力、◎ : A,B軸共通入出力

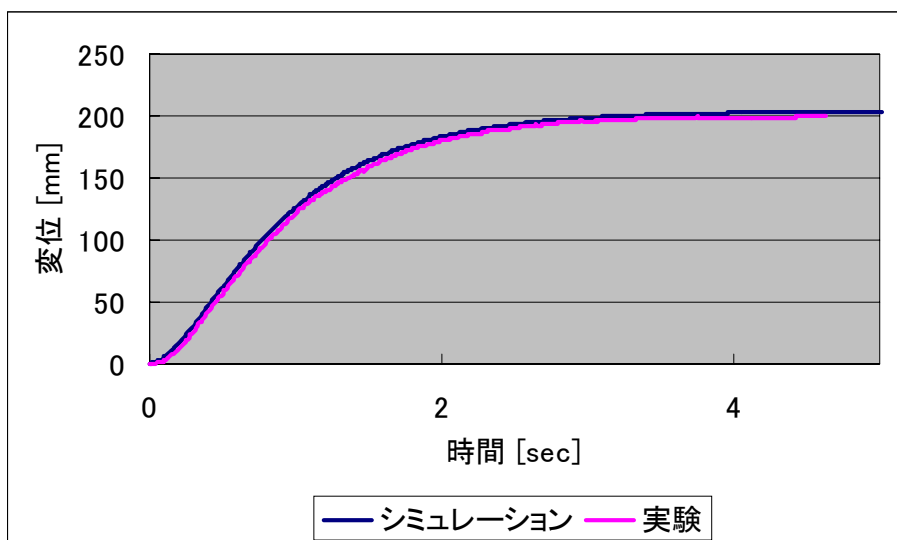
[付録 H] 患者姿勢復帰制御のフローチャート



[グラフ A] 仮想コンプライアンス制御実現性に関する確認実験



(a) 速度

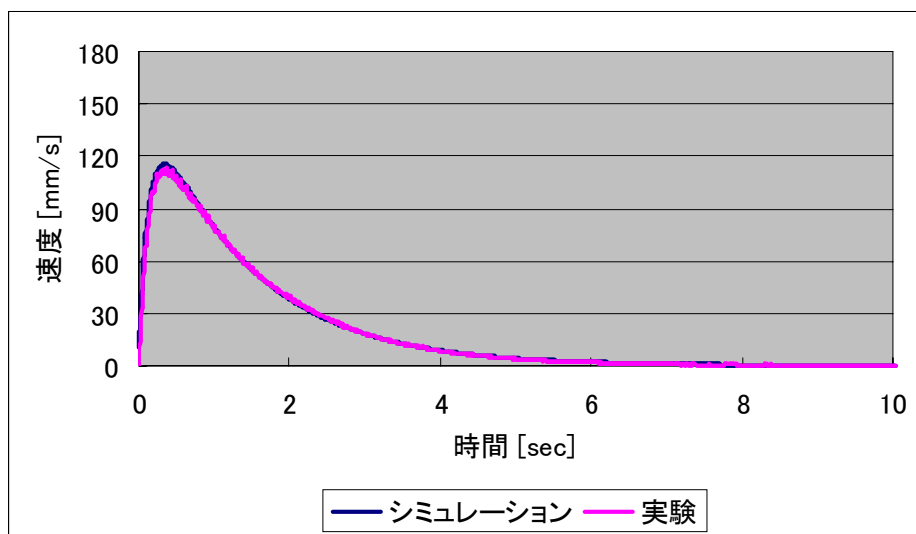


(b) 変位

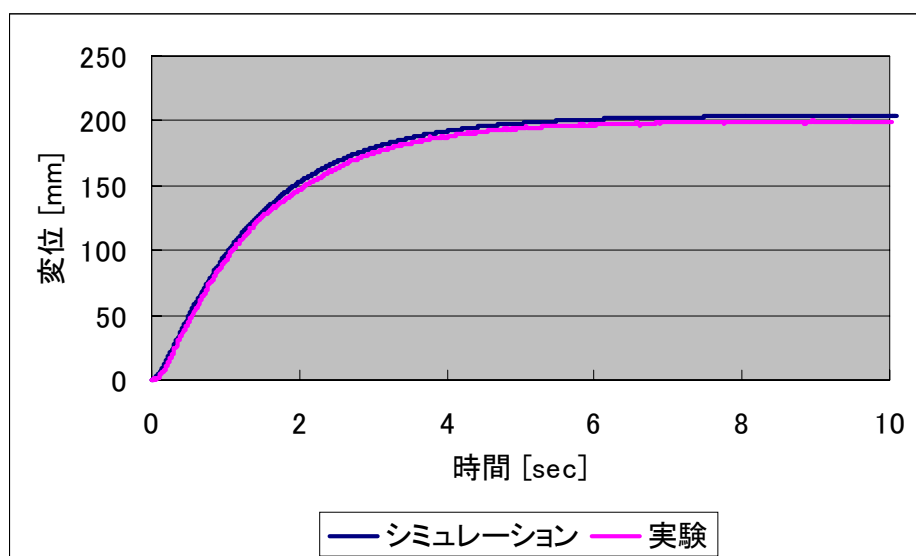
図 5.1.1 仮想コンプライアンス制御確認実験

($m = 100$ [kg] , $k = 500$ [N/m] , $c = 500$ [N s/m])

[グラフ A] 仮想コンプライアンス制御実現性に関する確認実験



(a) 速度

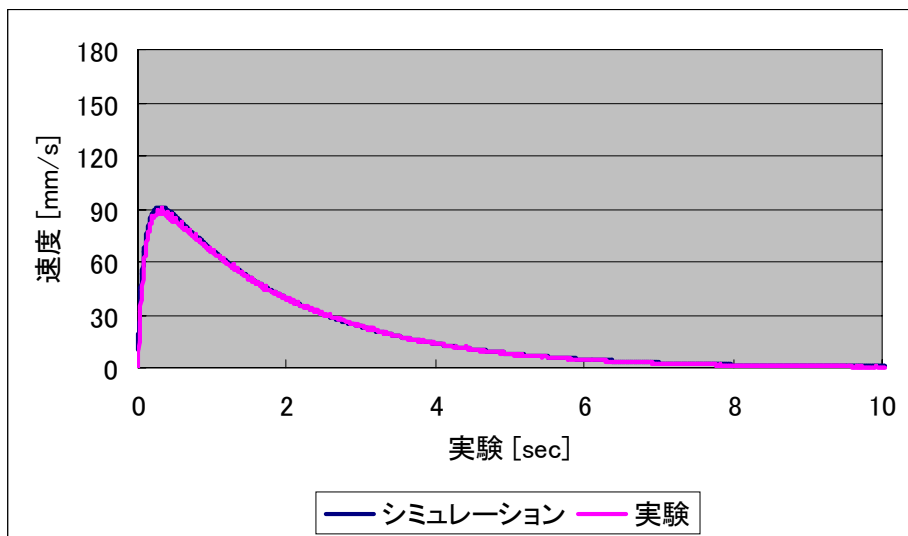


(b) 変位

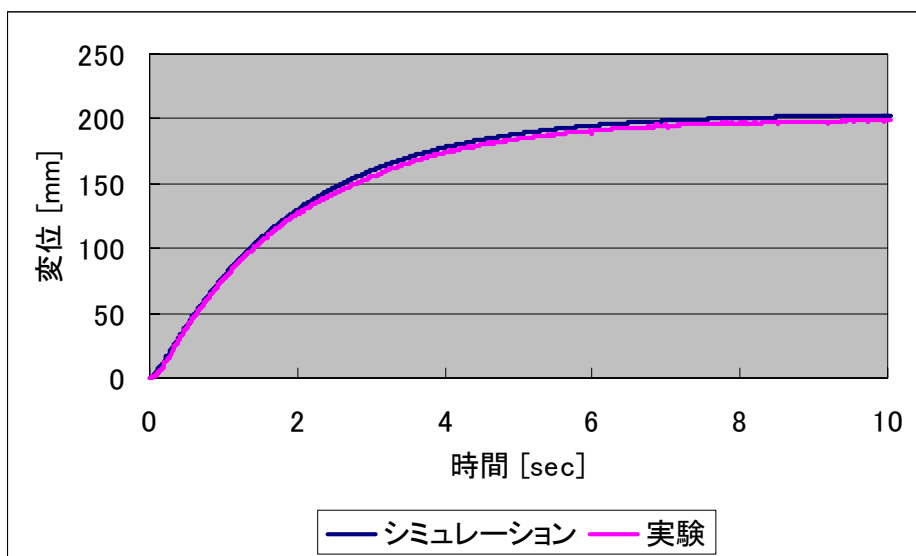
図 5.1.2 仮想コンプライアンス制御確認実験

($m = 100$ [kg] , $k = 500$ [N/m] , $c = 750$ [N s/m])

[グラフ A] 仮想コンプライアンス制御実現性に関する確認実験



(a) 速度

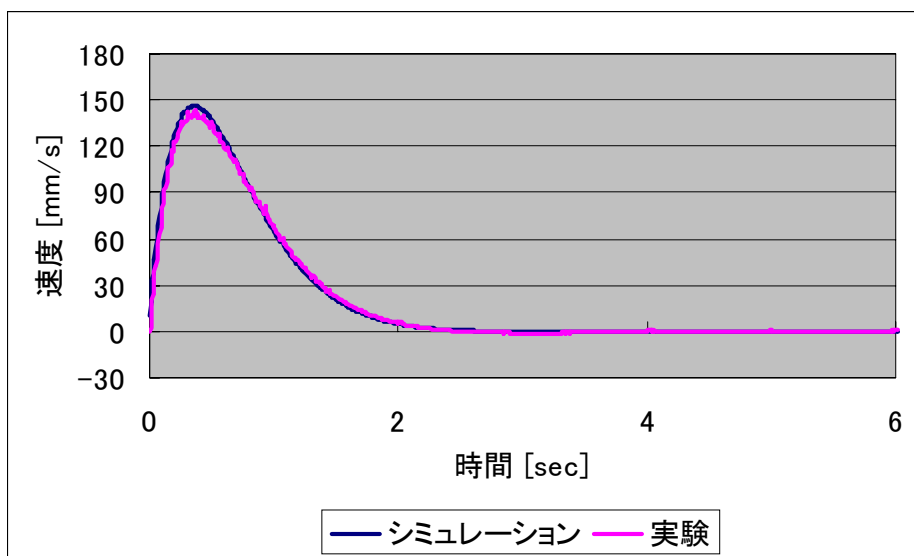


(b) 変位

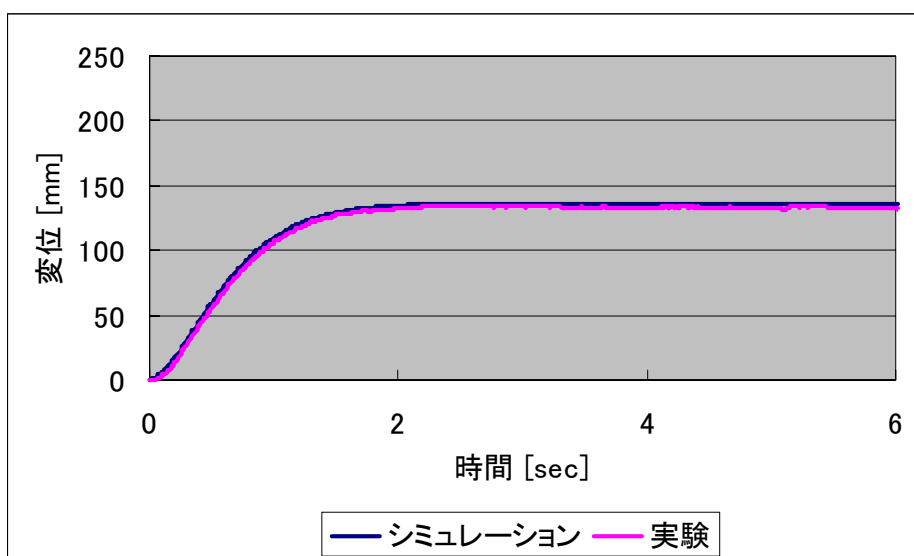
図 5.1.3 仮想コンプライアンス制御確認実験

($m = 100$ [kg] , $k = 500$ [N/m] , $c = 1000$ [N s/m])

[グラフ A] 仮想コンプライアンス制御実現性に関する確認実験



(a) 速度

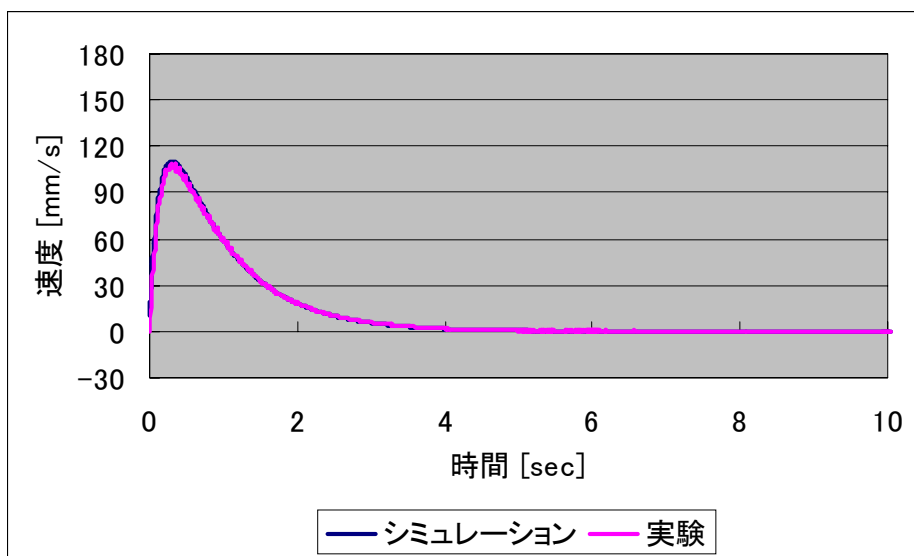


(b) 変位

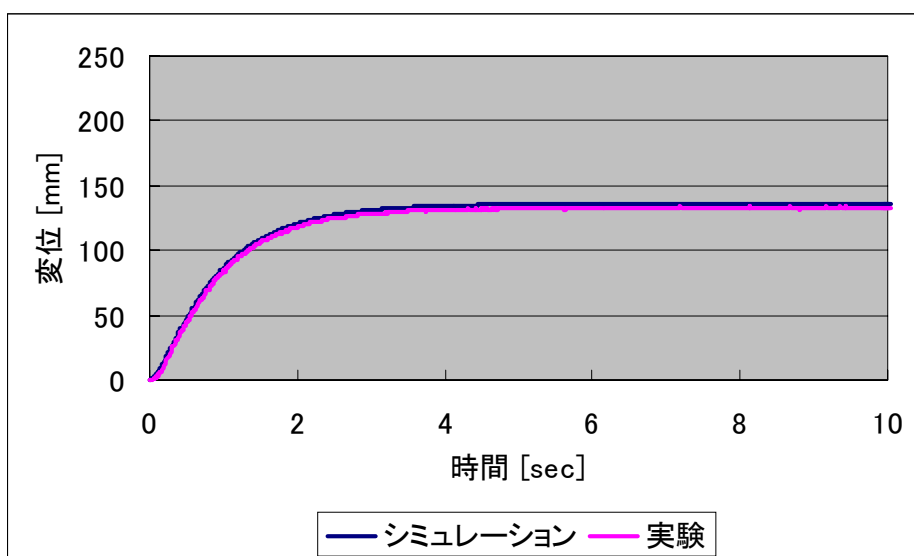
図 5.1.4 仮想コンプライアンス制御確認実験

($m = 100$ [kg] , $k = 750$ [N/m] , $c = 500$ [N s/m])

[グラフ A] 仮想コンプライアンス制御実現性に関する確認実験



(a) 速度

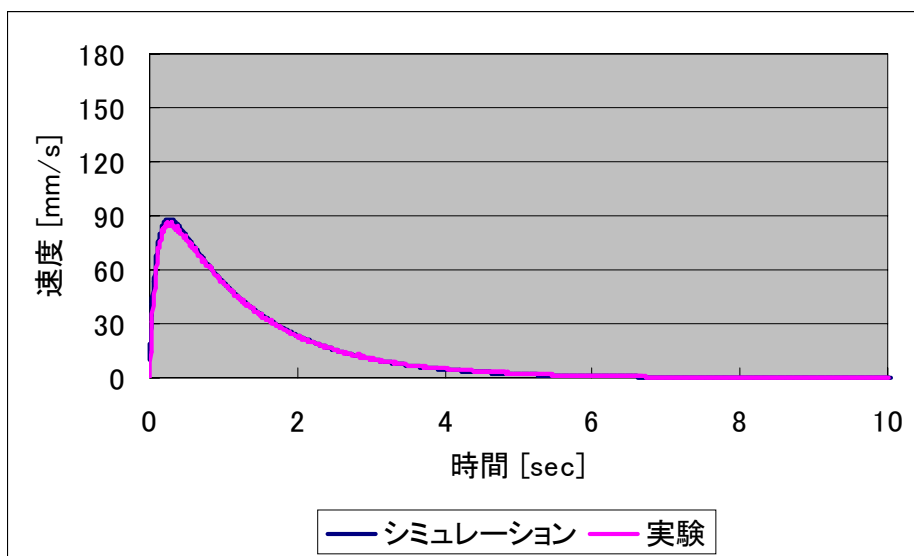


(b) 変位

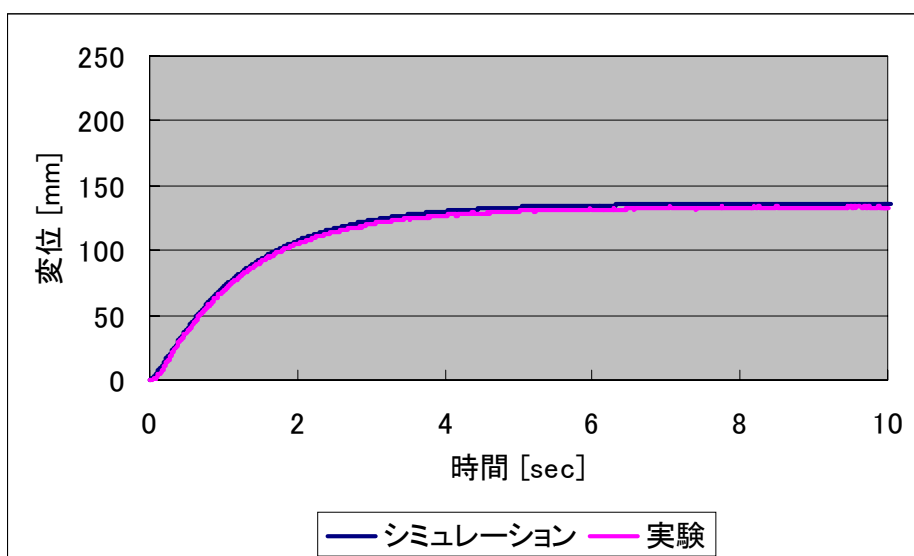
図 5.1.5 仮想コンプライアンス制御確認実験

($m = 100$ [kg] , $k = 750$ [N/m] , $c = 750$ [N s/m])

[グラフ A] 仮想コンプライアンス制御実現性に関する確認実験



(a) 速度

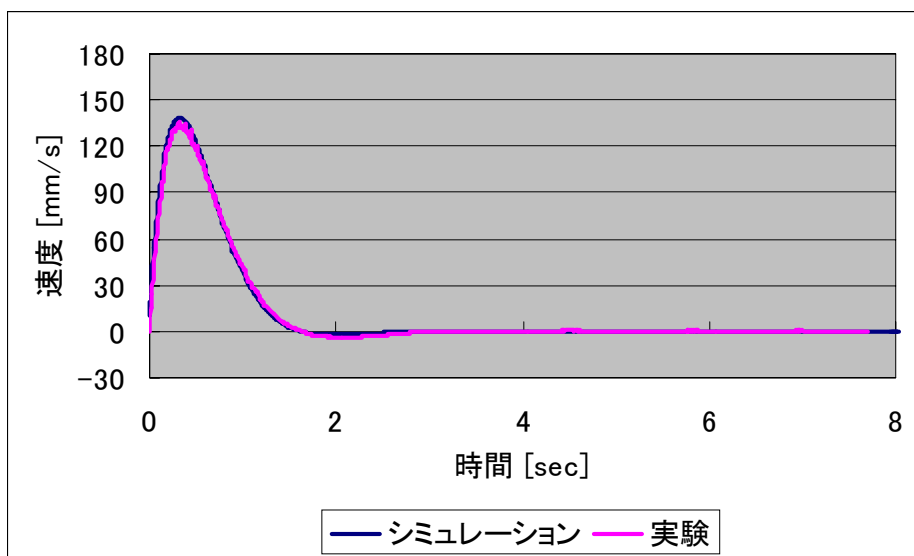


(b) 変位

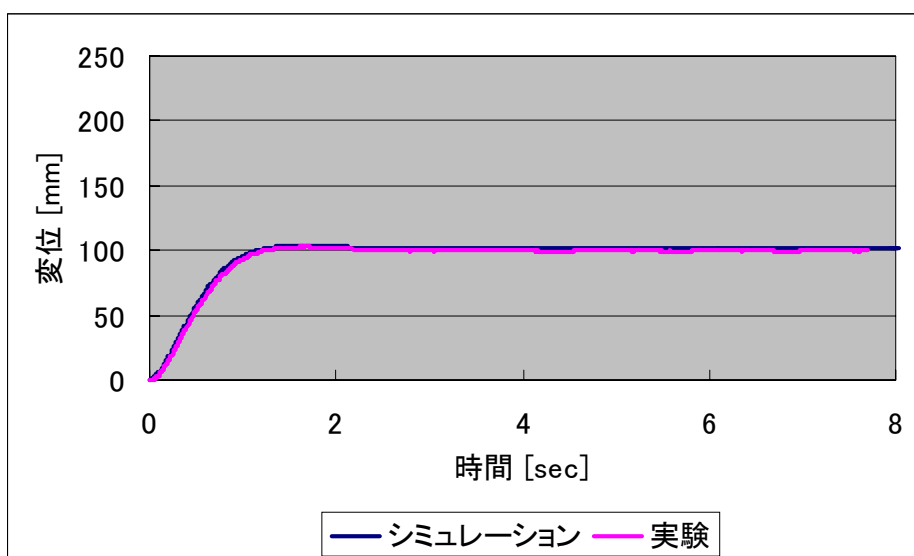
図 5.1.6 仮想コンプライアンス制御確認実験

($m = 100$ [kg] , $k = 750$ [N/m] , $c = 1000$ [N s/m])

[グラフ A] 仮想コンプライアンス制御実現性に関する確認実験



(a) 速度

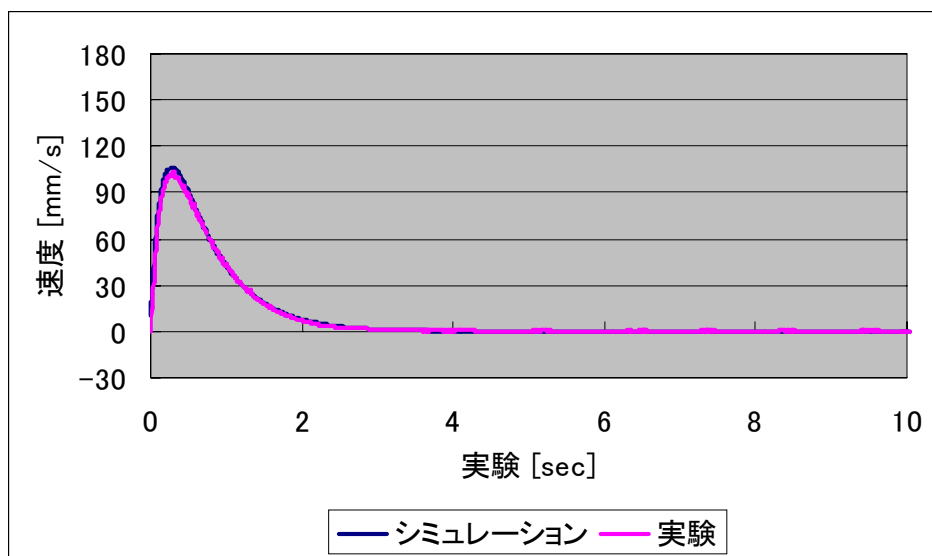


(b) 変位

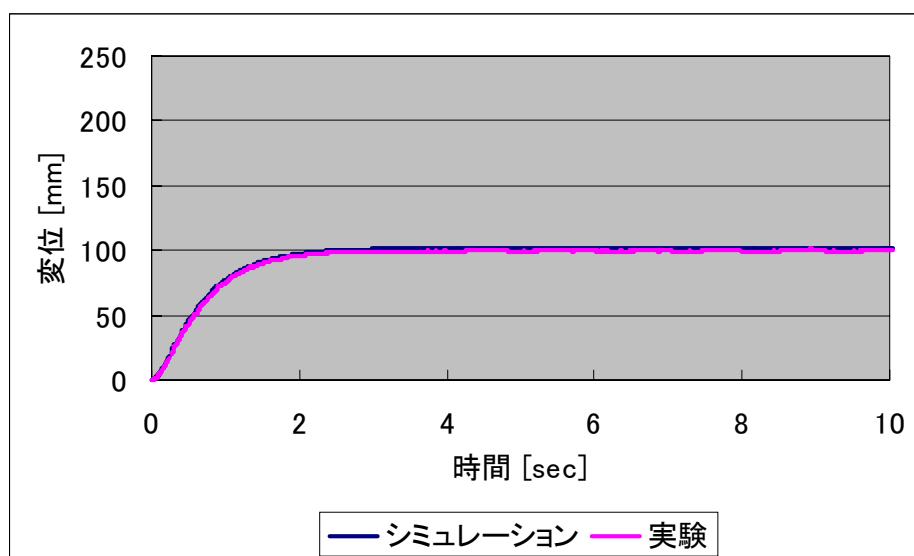
図 5.1.7 仮想コンプライアンス制御確認実験

($m = 100$ [kg] , $k = 1000$ [N/m] , $c = 500$ [N s/m])

[グラフ A] 仮想コンプライアンス制御実現性に関する確認実験



(a) 速度

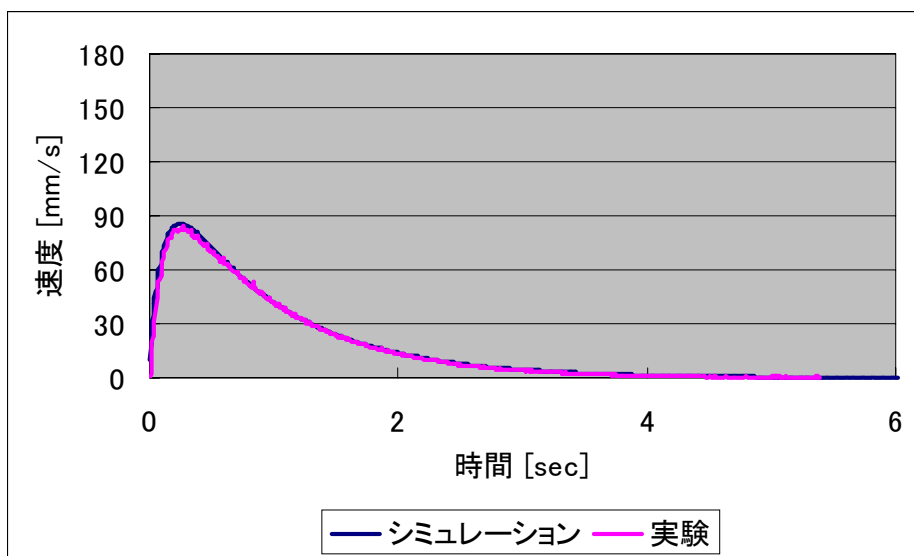


(b) 変位

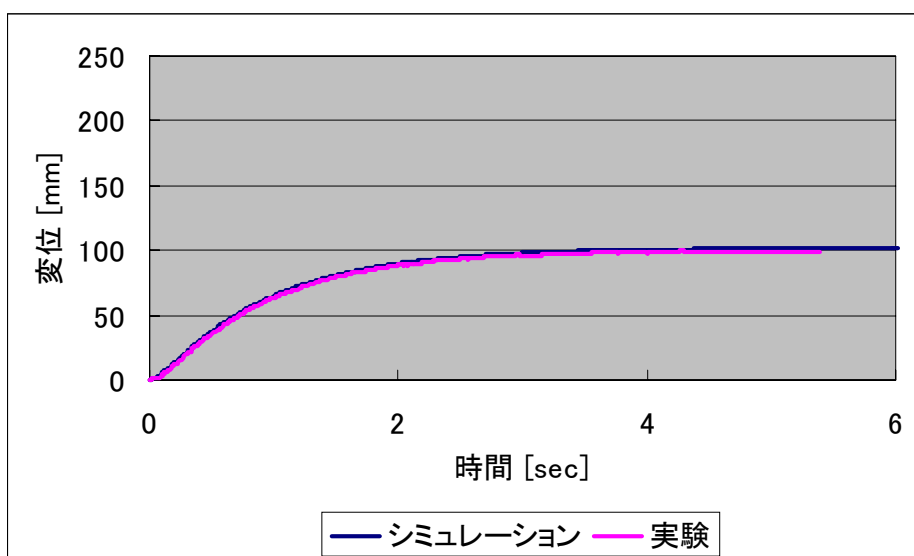
図 5.1.8 仮想コンプライアンス制御確認実験

($m = 100$ [kg] , $k = 1000$ [N/m] , $c = 750$ [N s/m])

[グラフ A] 仮想コンプライアンス制御実現性に関する確認実験



(a) 速度

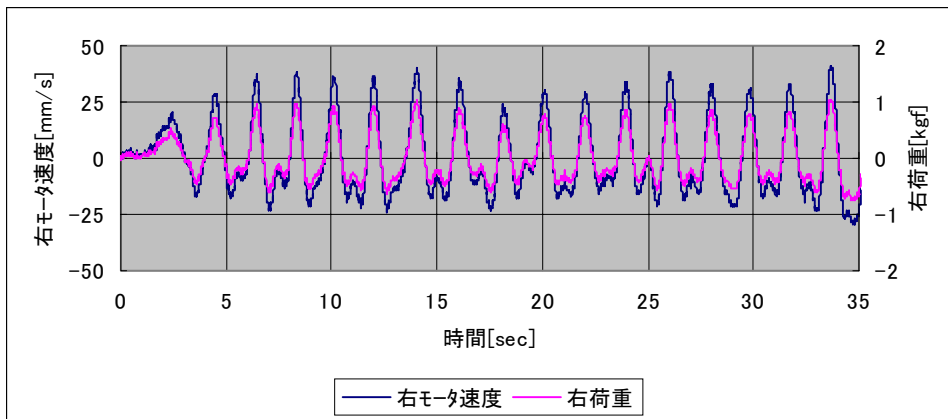


(b) 変位

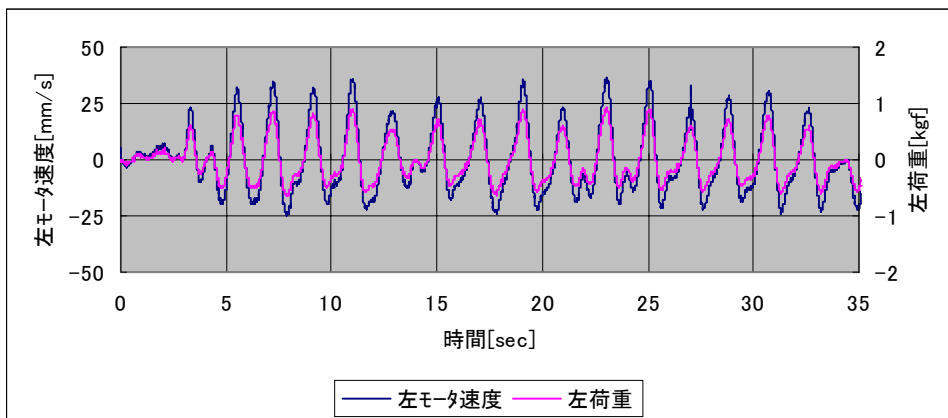
図 5.1.9 仮想コンプライアンス制御確認実験

($m = 100$ [kg] , $k = 1000$ [N/m] , $c = 1000$ [N s/m])

[グラフ B] 歩行実験 1



(a) 右

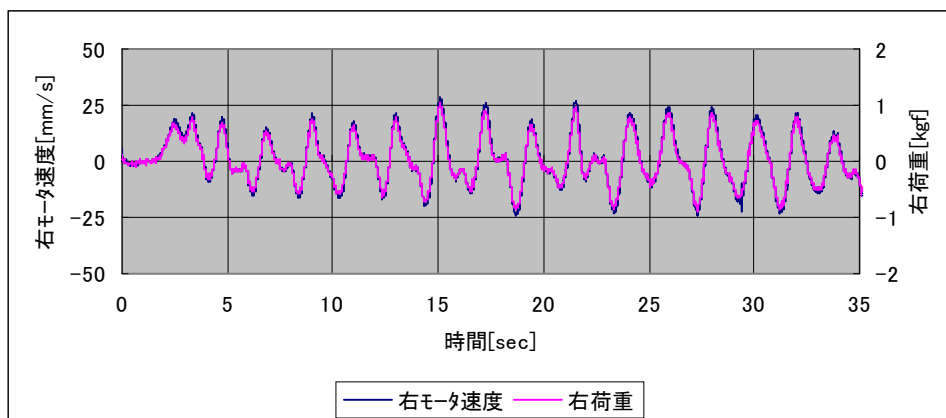


(b) 左

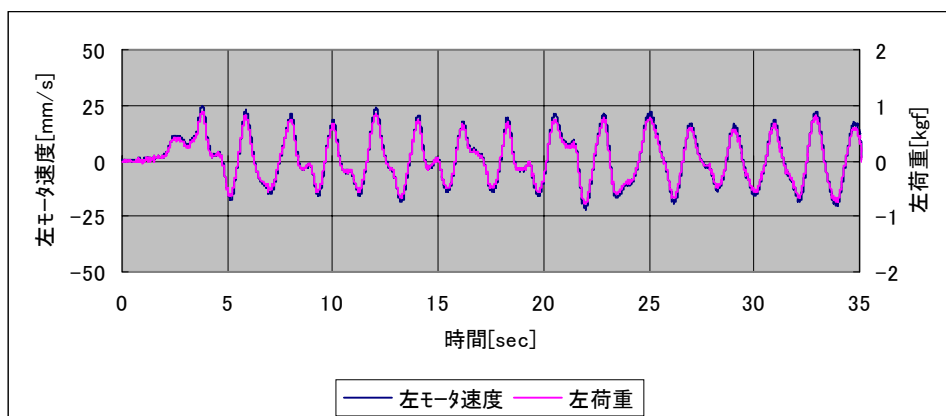
図 5.2.1.1 歩行実験 1 : モータ速度と荷重

($c = 250$ [N s/m] , 被験者 A)

[グラフ B] 歩行実験 1



(a) 右

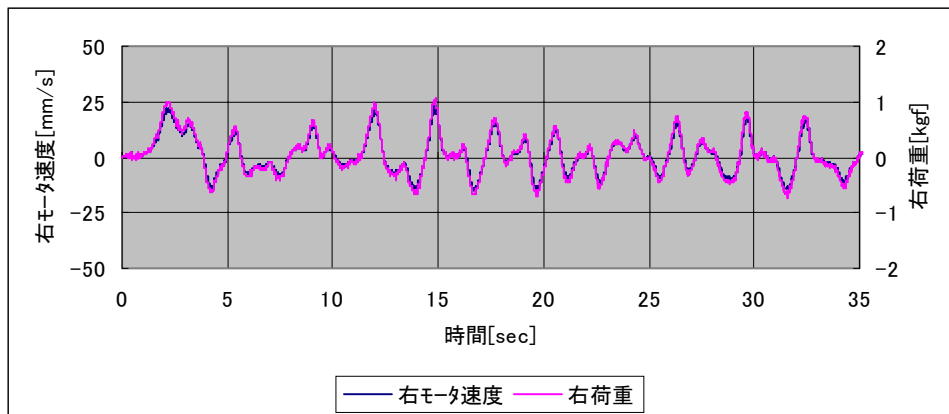


(b) 左

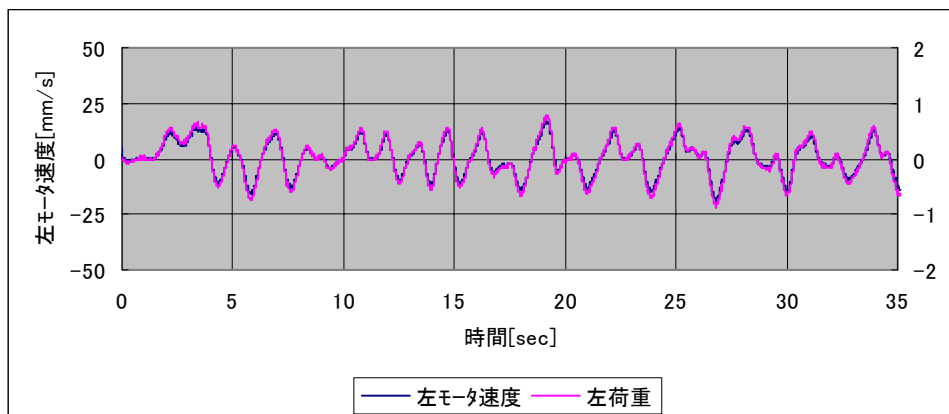
図 5.2.1.2 歩行実験 1 : モータ速度と荷重

($c = 350$ [N s/m] , 被験者 A)

[グラフ B] 歩行実験 1



(a) 右

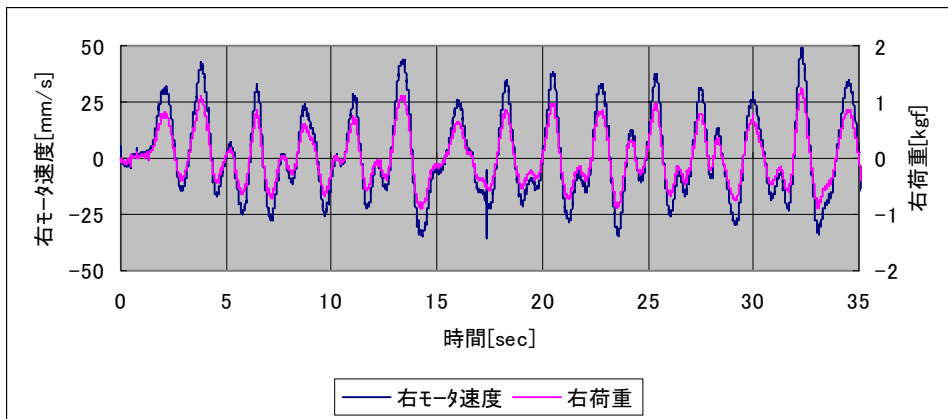


(b) 左

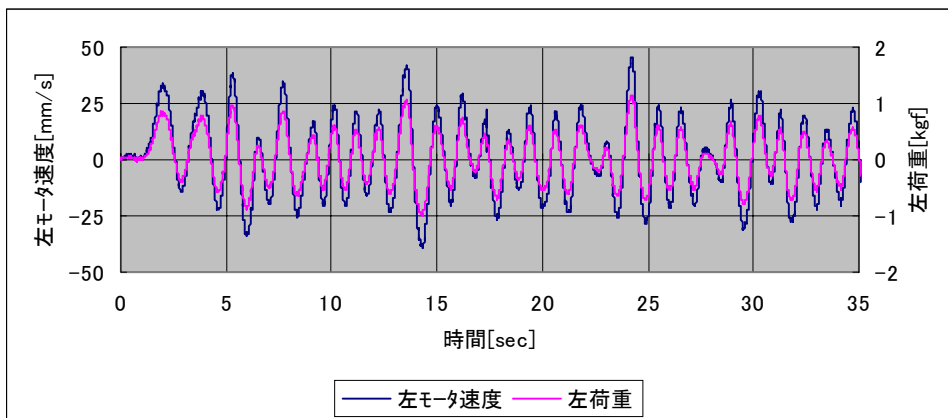
図 5.2.1.3 歩行実験 1 : モータ速度と荷重

($c = 450$ [N s/m], 被験者 A)

[グラフ B] 歩行実験 1



(a) 右

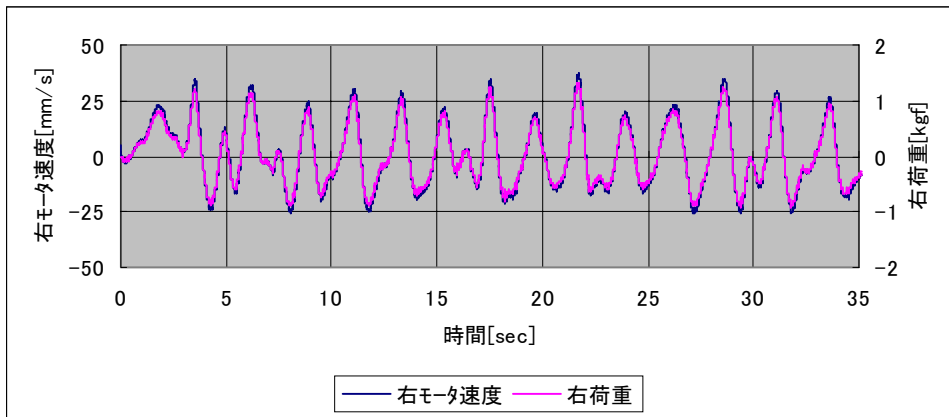


(b) 左

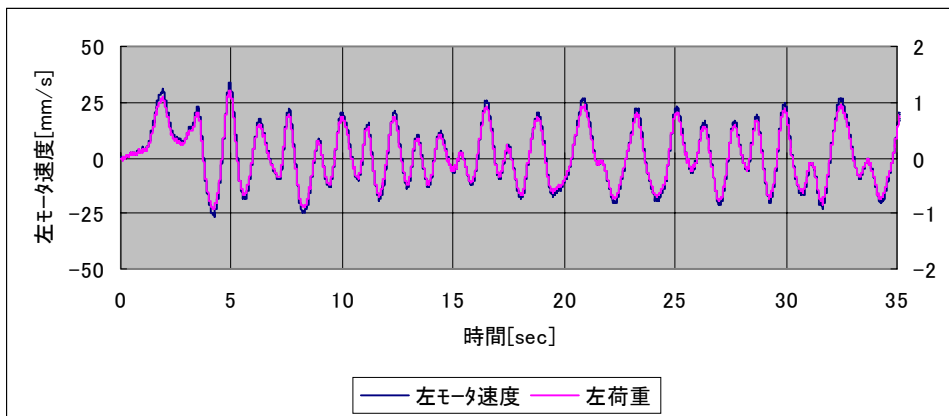
図 5.2.1.4 歩行実験 1 : モータ速度と荷重

($c = 250$ [N s/m], 被験者 B)

[グラフ B] 歩行実験 1



(a) 右

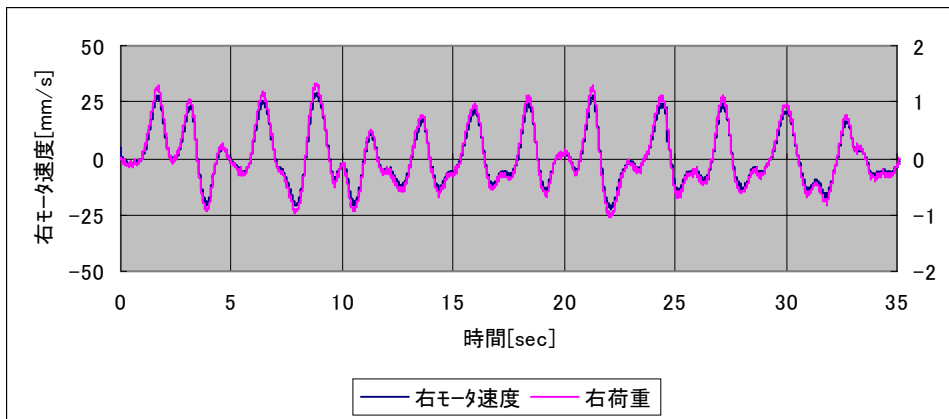


(b) 左

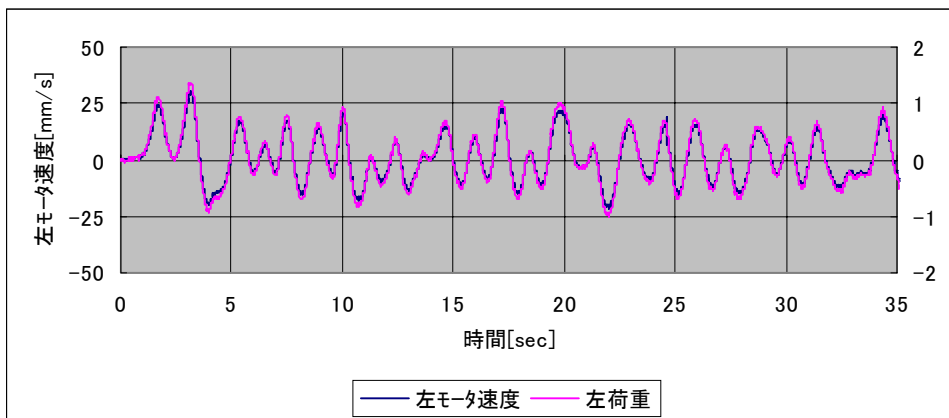
図 5.2.1.5 歩行実験 1 : モータ速度と荷重

($c = 350$ [N s/m], 被験者 B)

[グラフ B] 歩行実験 1



(a) 右

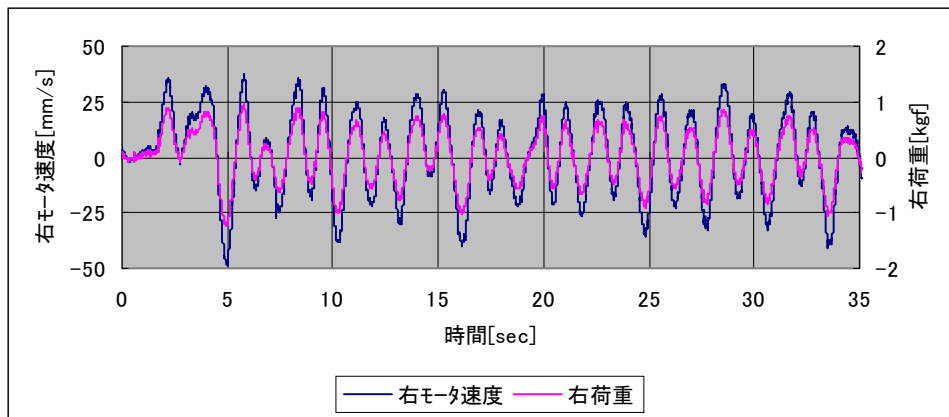


(b) 左

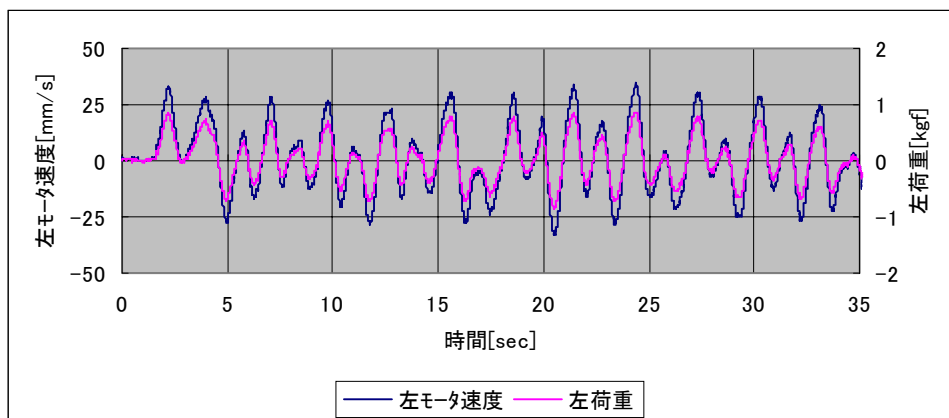
図 5.2.1.6 歩行実験 1 : モータ速度と荷重

($c = 450$ [N s/m], 被験者 B)

[グラフ B] 歩行実験 1



(a) 右

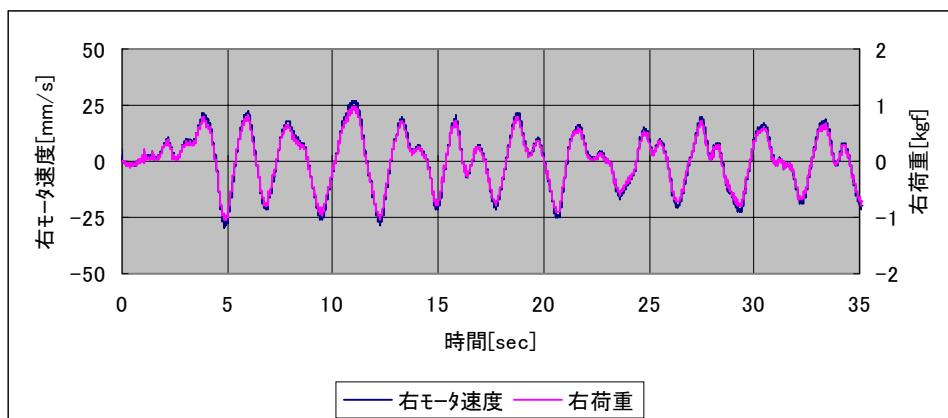


(b) 左

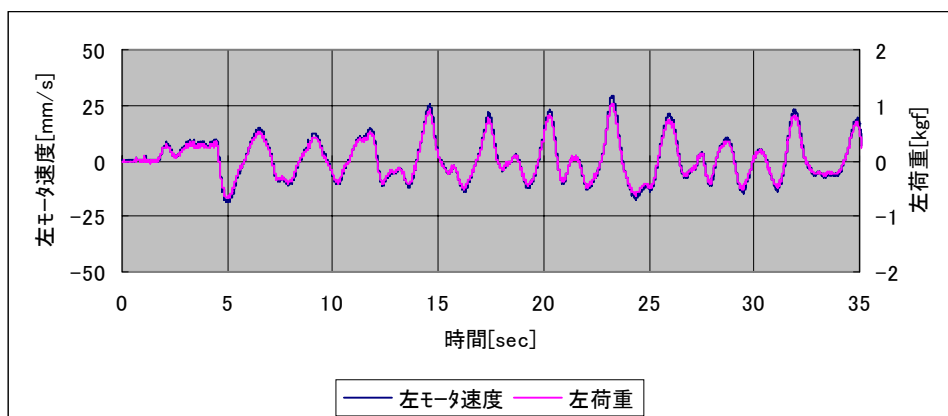
図 5.2.1.7 歩行実験 1 : モータ速度と荷重

($c = 250$ [N s/m], 被験者 C)

[グラフ B] 歩行実験 1



(a) 右

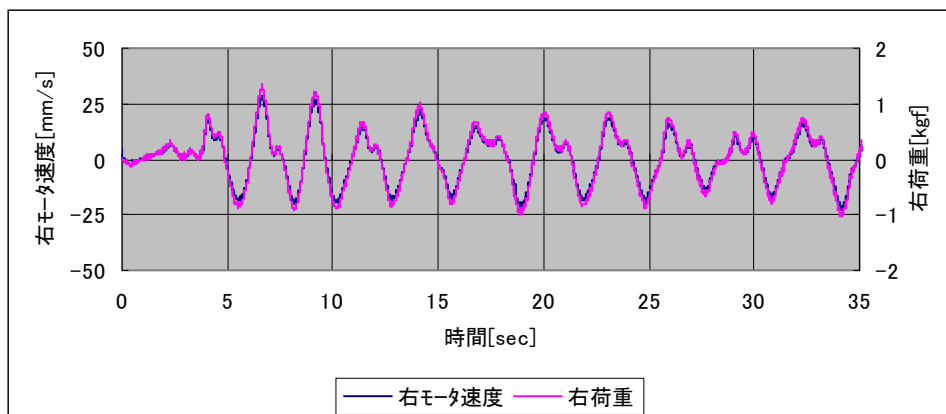


(b) 左

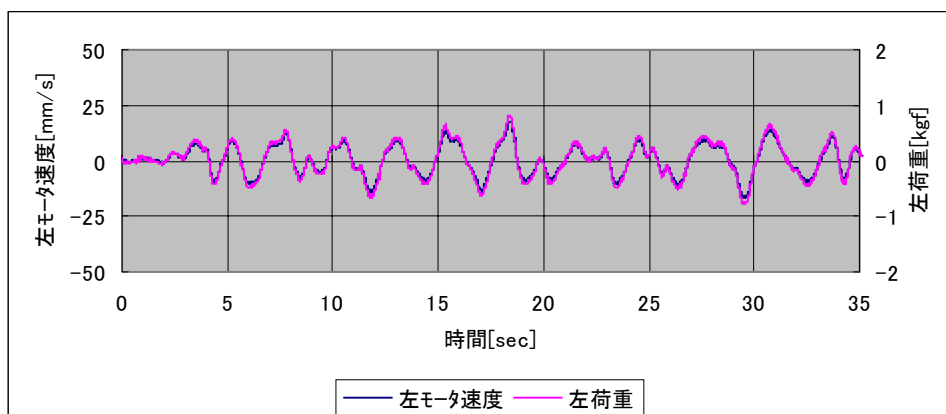
図 5.2.1.8 歩行実験 1 : モータ速度と荷重

($c = 350$ [N s/m], 被験者 C)

[グラフ B] 歩行実験 1



(a) 右

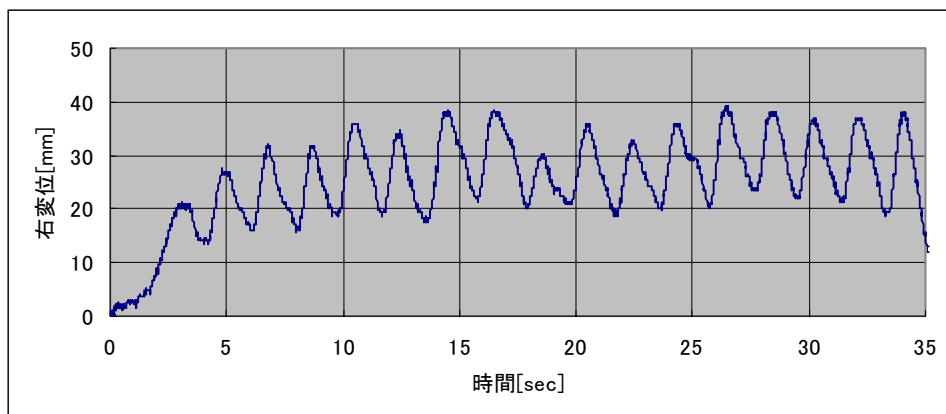


(b) 左

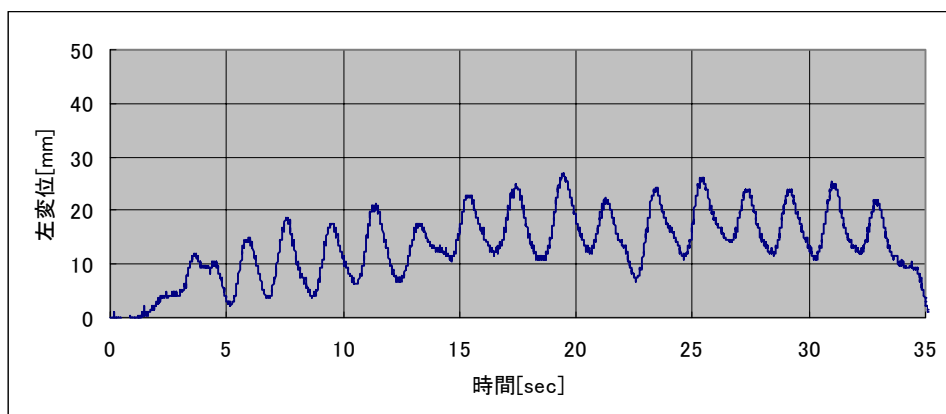
図 5.2.1.9 歩行実験 1 : モータ速度と荷重

($c = 450$ [N s/m], 被験者 C)

[グラフ B] 歩行実験 1



(a) 右

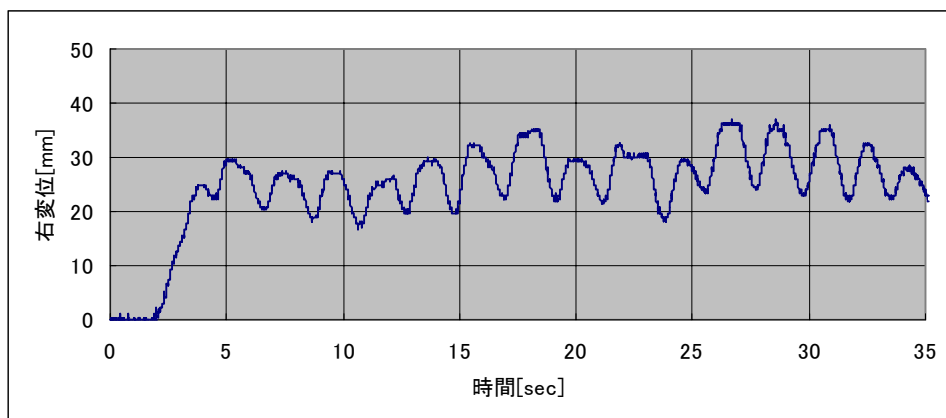


(b) 左

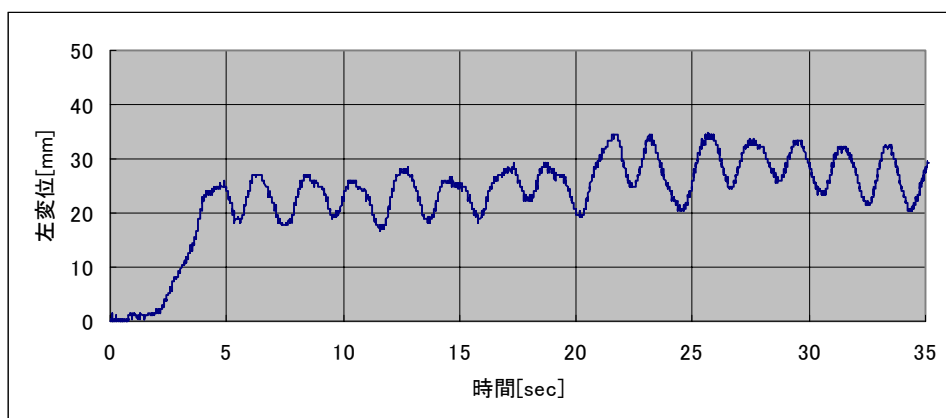
図 5.2.1.10 歩行実験 1 : 変位

($c = 250$ [N s/m], 被験者 A)

[グラフ B] 歩行実験 1



(a) 右

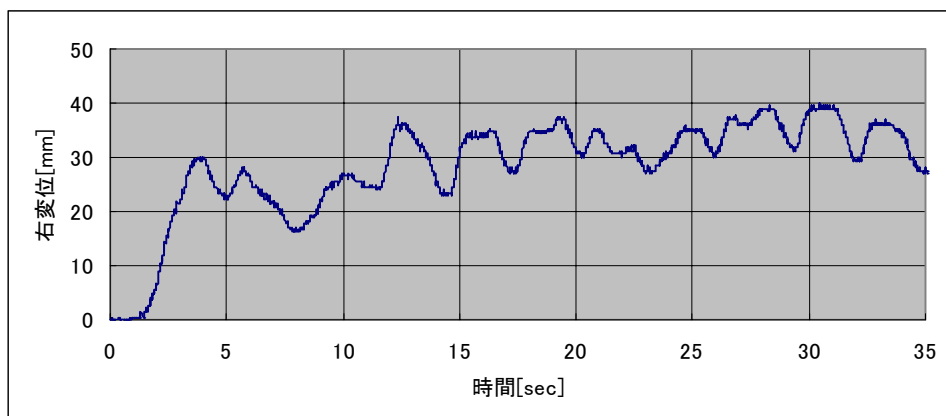


(b) 左

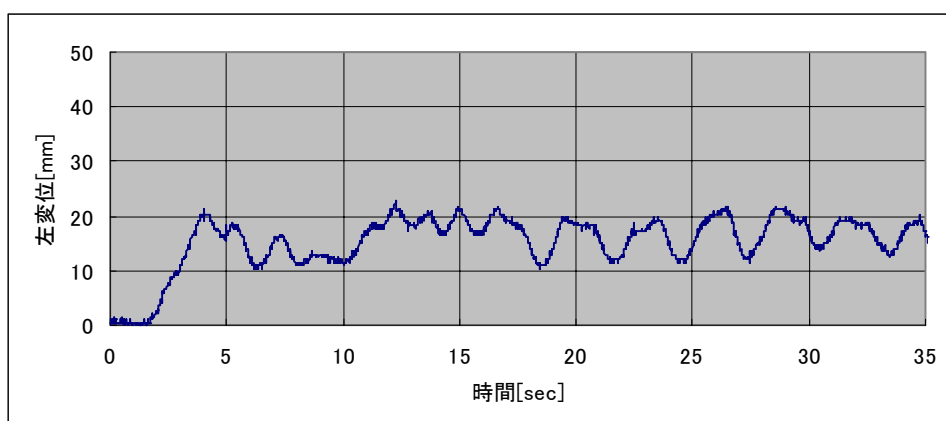
図 5.2.1.11 歩行実験 1 : 変位

($c = 350$ [N s/m] , 被験者 A)

[グラフ B] 歩行実験 1



(a) 右

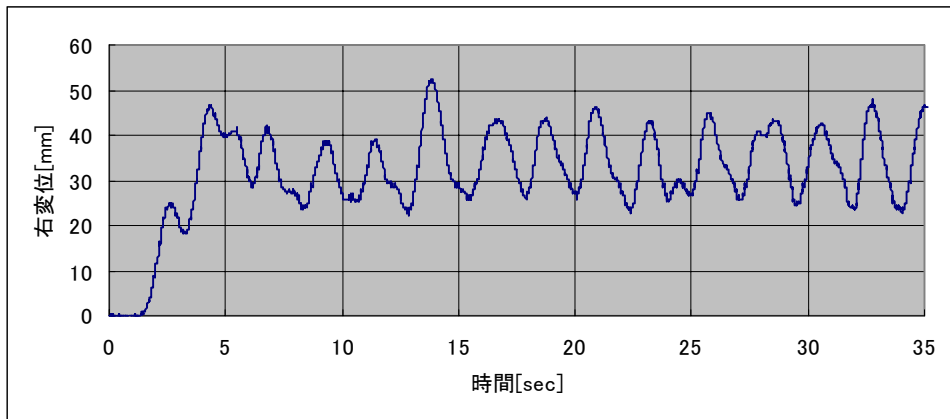


(b) 左

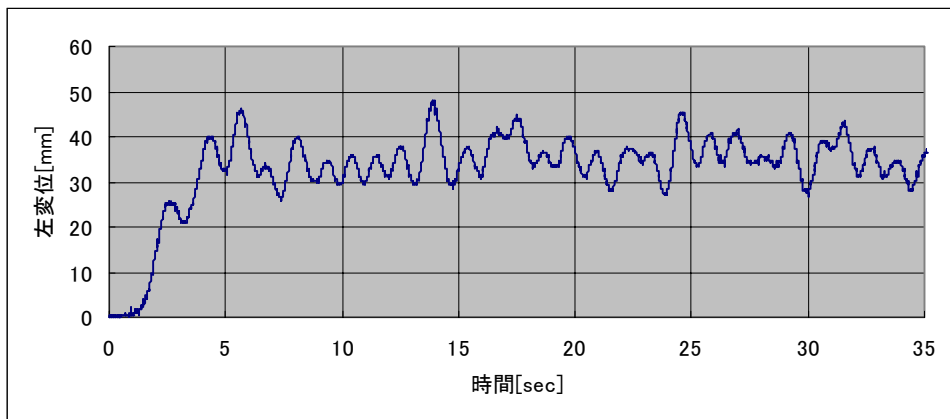
図 5.2.1.12 歩行実験 1 : 変位

($c = 450$ [N s/m] , 被験者 A)

[グラフ B] 歩行実験 1



(a) 右

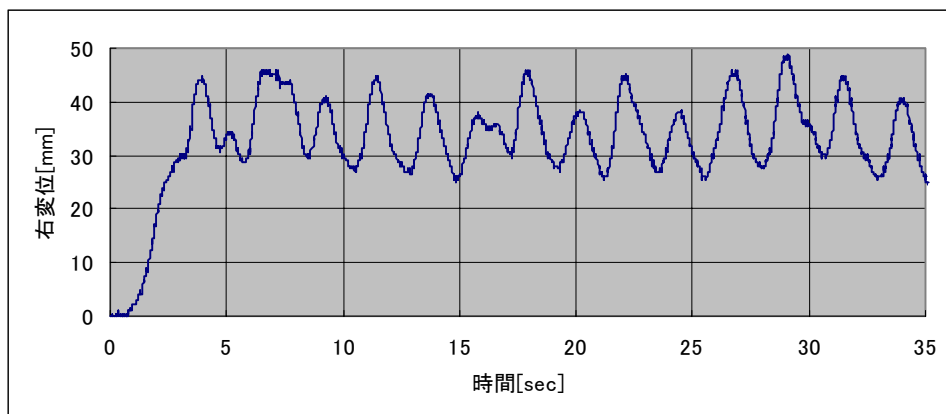


(b) 左

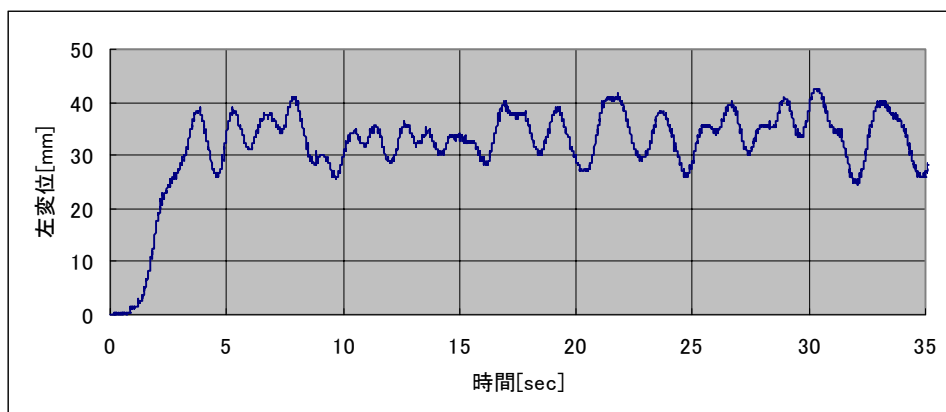
図 5.2.1.13 歩行実験 1 : 変位

($c = 250$ [N s/m] , 被験者 B)

[グラフ B] 歩行実験 1



(a) 右

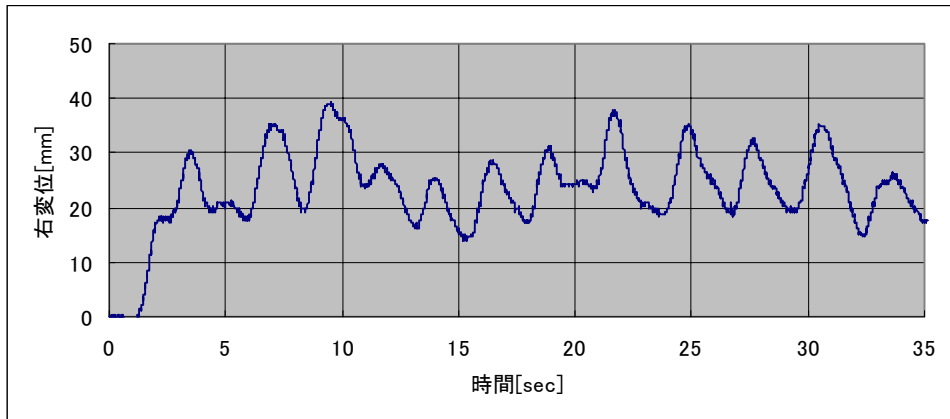


(b) 左

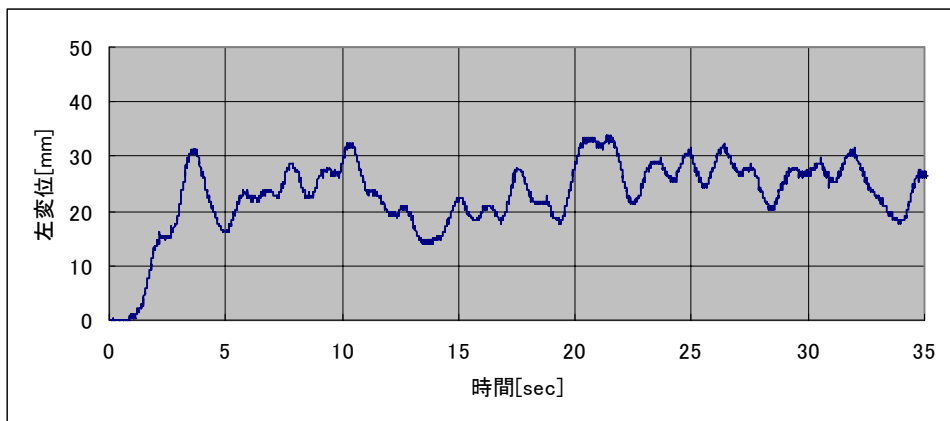
図 5.2.1.14 歩行実験 1 : 変位

($c = 350$ [N s/m] , 被験者 B)

[グラフ B] 歩行実験 1



(a) 右

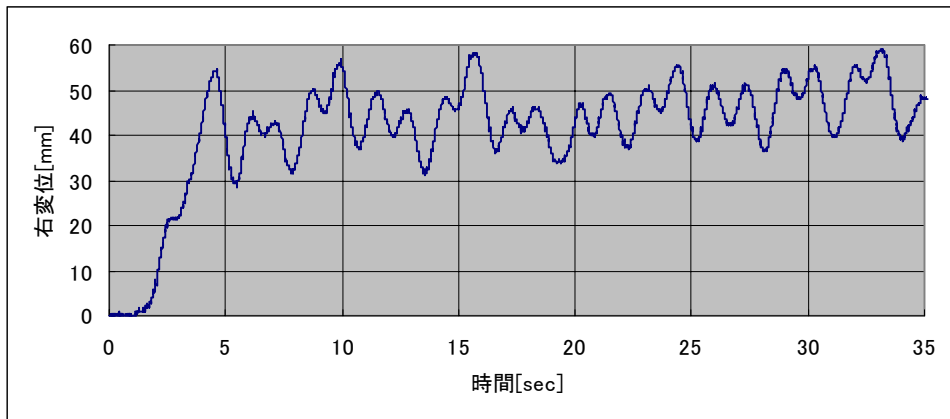


(b) 左

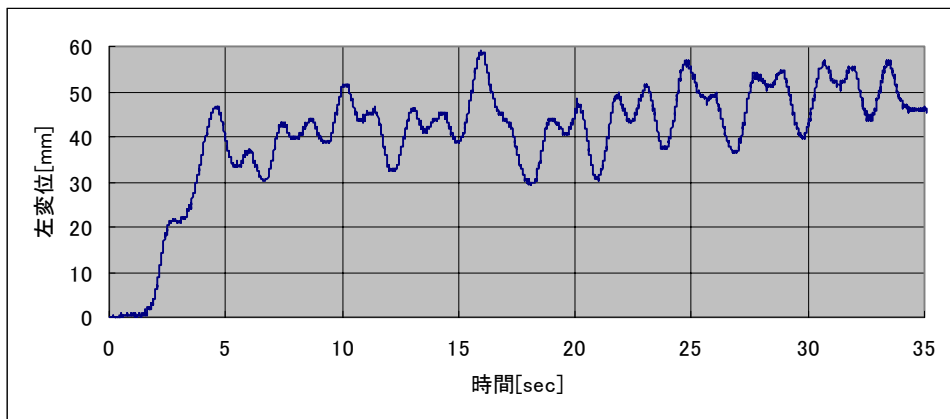
図 5.2.1.15 歩行実験 1 : 変位

($c = 450$ [N s/m], 被験者 B)

[グラフ B] 歩行実験 1



(a) 右

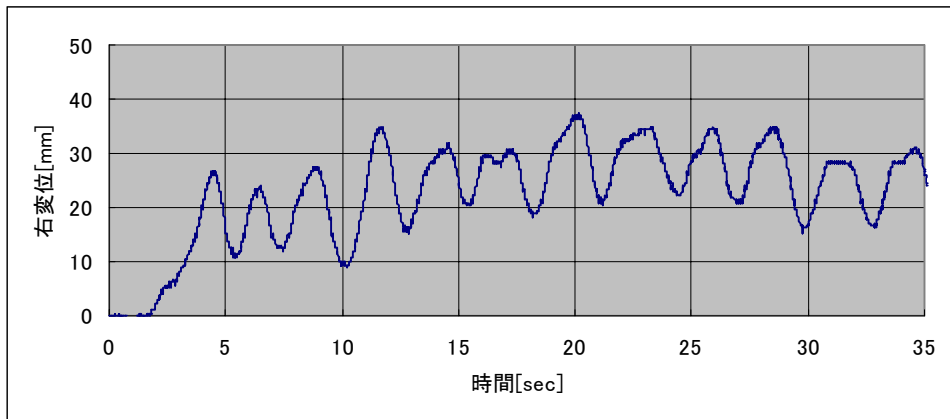


(b) 左

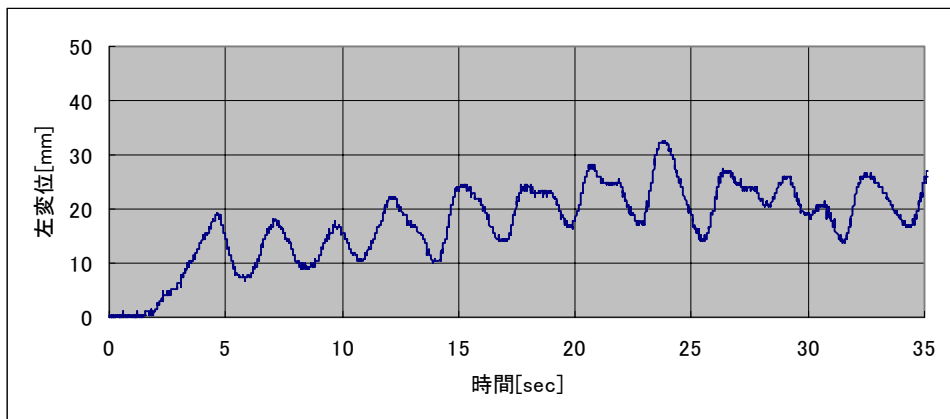
図 5.2.1.16 歩行実験 1 : 変位

($c = 250$ [N s/m] , 被験者 C)

[グラフ B] 歩行実験 1



(a) 右

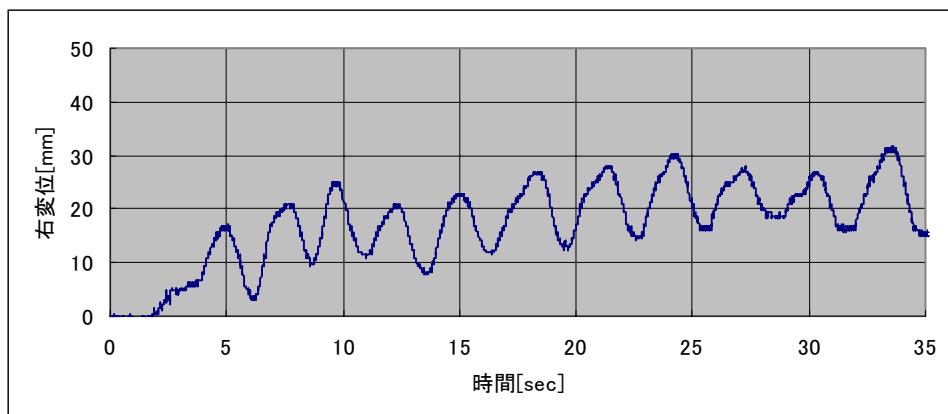


(b) 左

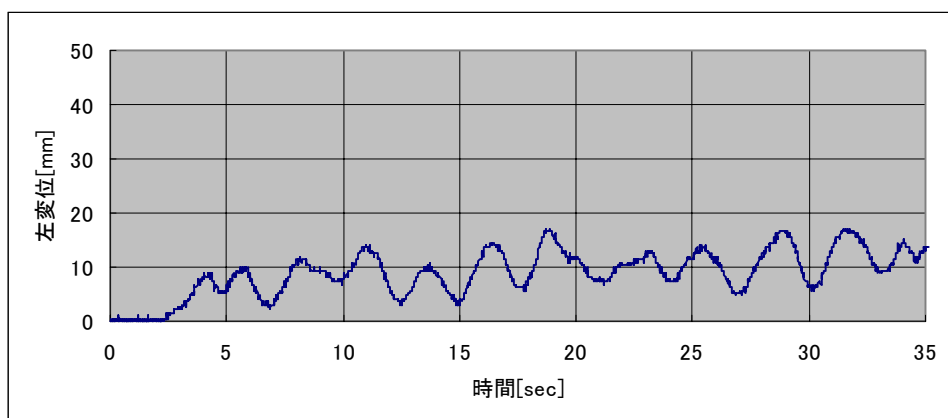
図 5.2.1.17 歩行実験 1 : 変位

($c = 350$ [N s/m], 被験者 C)

[グラフ B] 歩行実験 1



(a) 右

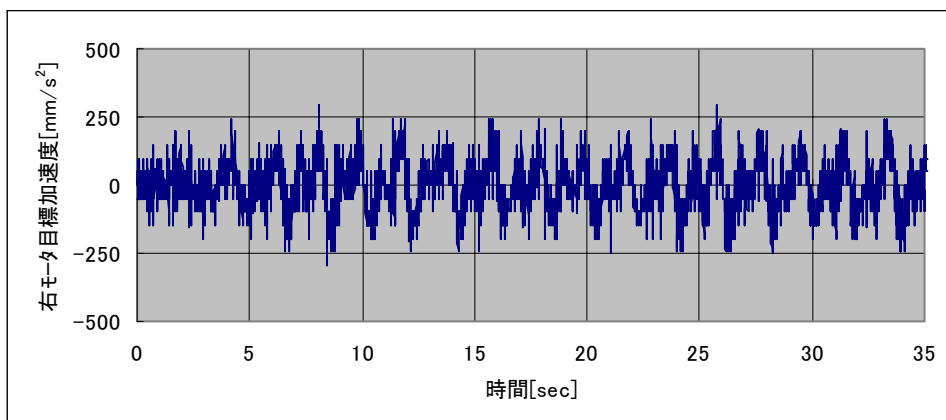


(b) 左

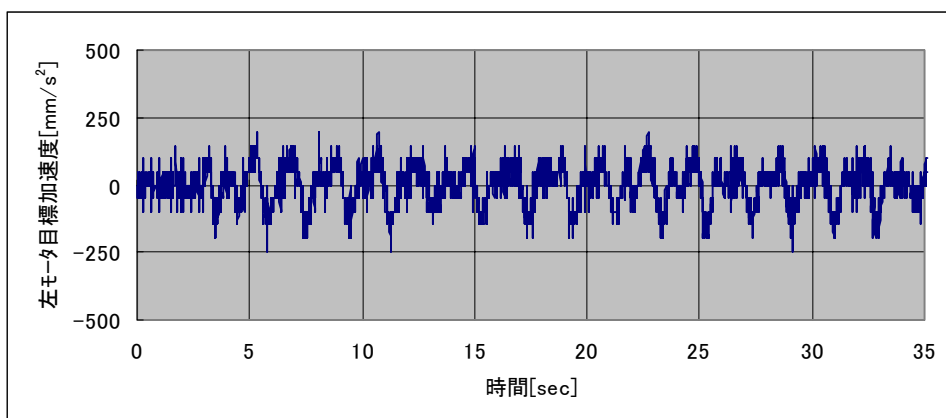
図 5.2.1.18 歩行実験 1 : 変位

($c = 450$ [N s/m] , 被験者 C)

[グラフ B] 歩行実験 1



(a)右

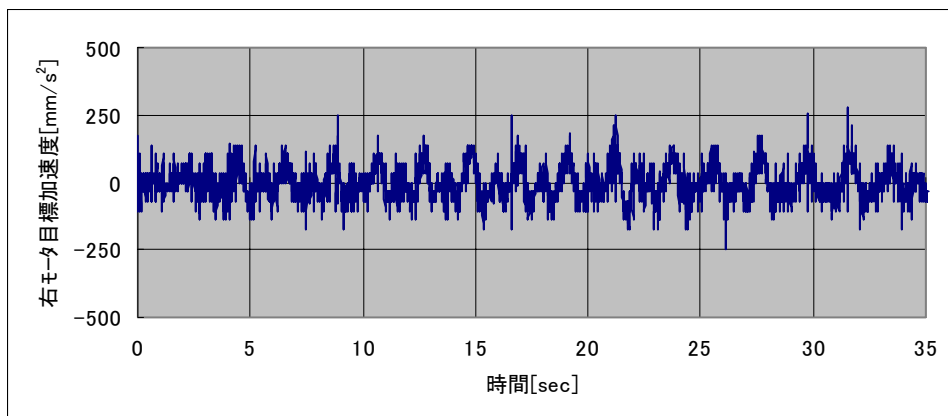


(b)左

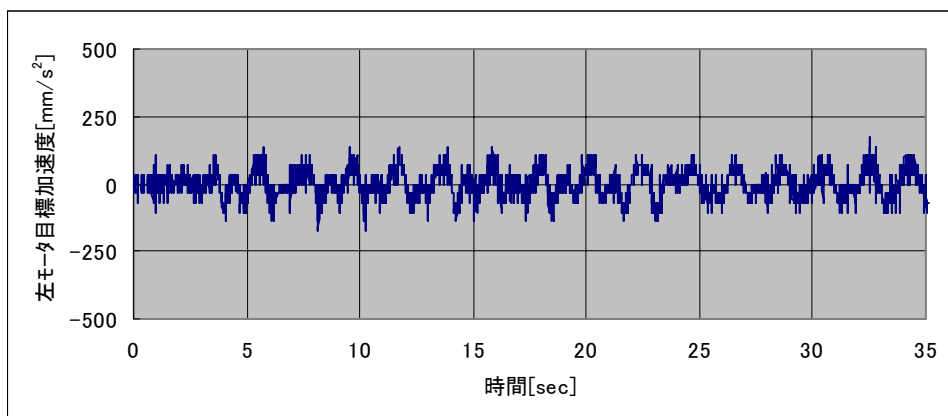
図 5.2.1.19 歩行実験 1 : モータ目標加速度

($c = 250 \text{ [N s/m]}$, 被験者 A)

[グラフ B] 歩行実験 1



(a)右

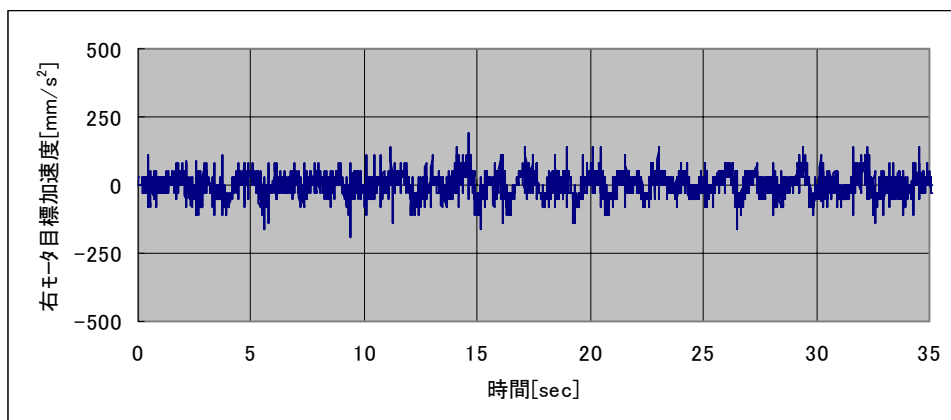


(b)左

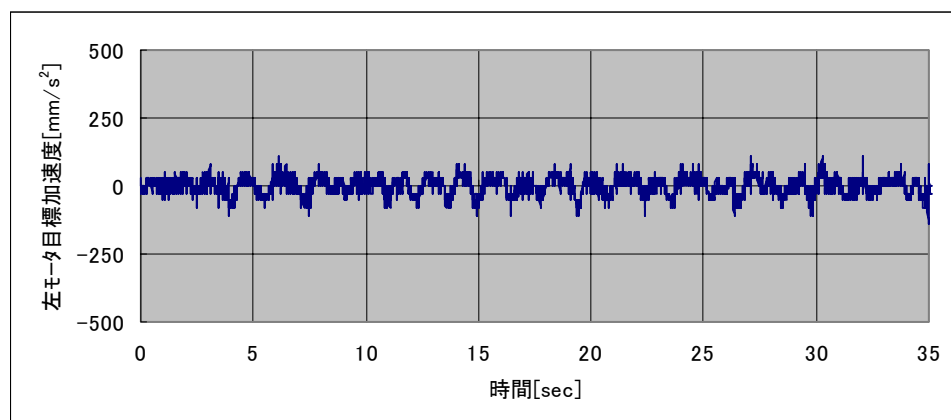
図 5.2.1.20 歩行実験 1 : モータ目標加速度

($c = 350 \text{ [N s/m]}$, 被験者 A)

[グラフ B] 歩行実験 1



(a)右

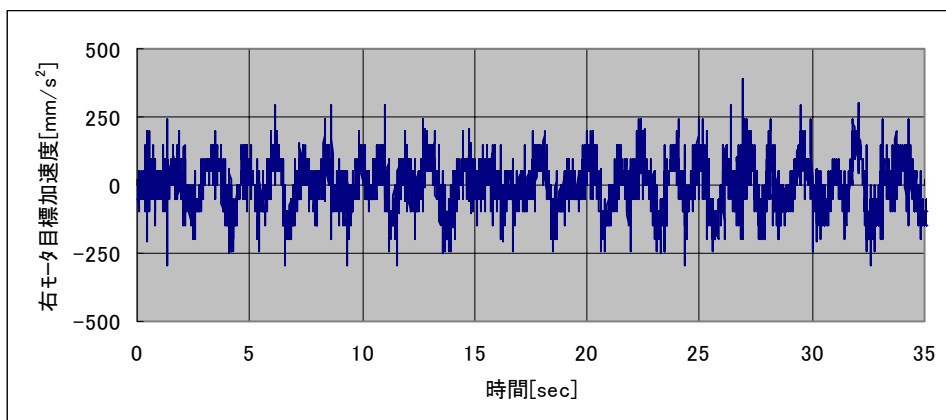


(b)左

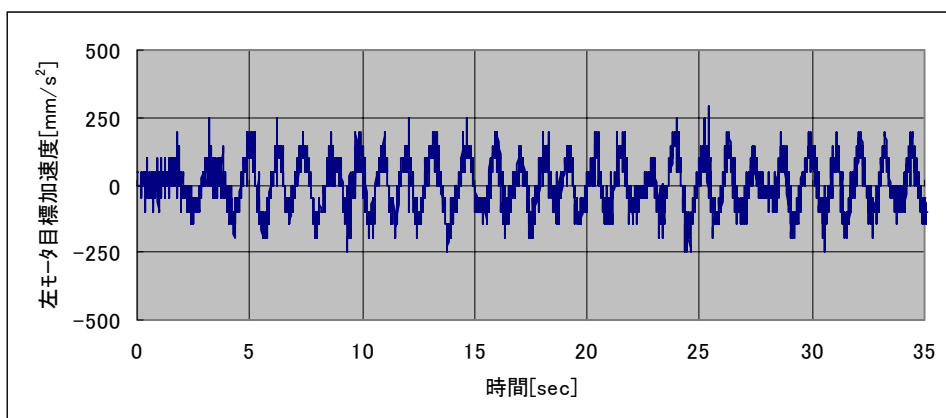
図 5.2.1.21 歩行実験 1 : モータ目標加速度

($c = 450$ [N s/m] , 被験者 A)

[グラフ B] 歩行実験 1



(a)右

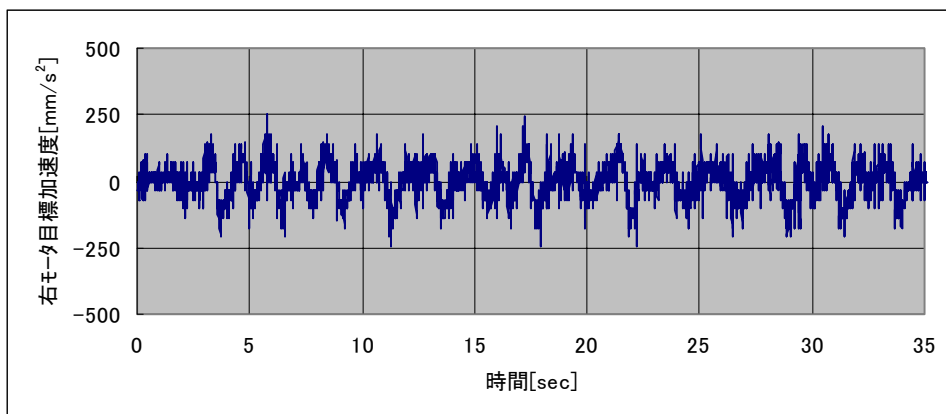


(b)左

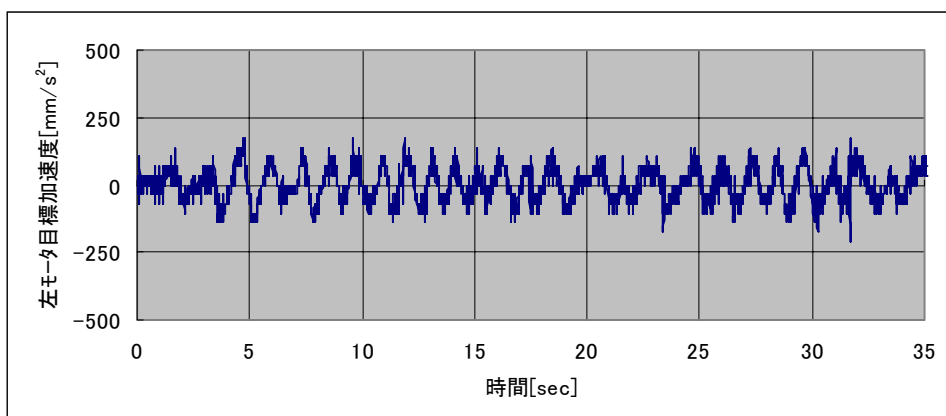
図 5.2.1.22 歩行実験 1 : モータ目標加速度

($c = 250 \text{ [N s/m]}$, 被験者 B)

[グラフ B] 歩行実験 1



(a)右

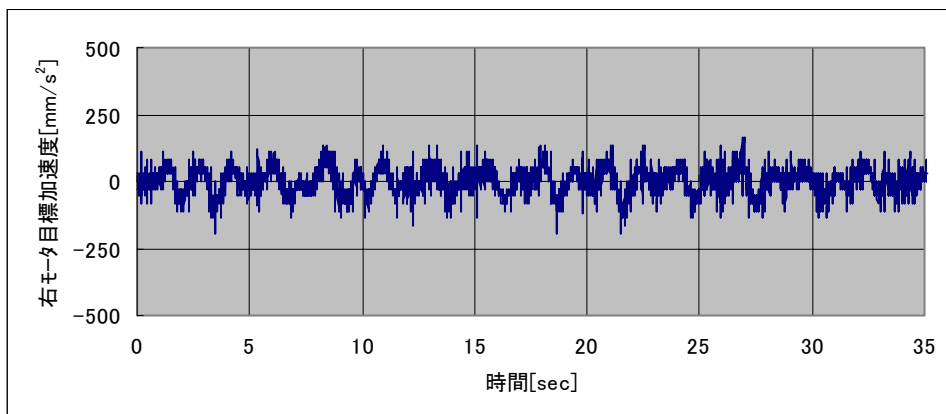


(b)左

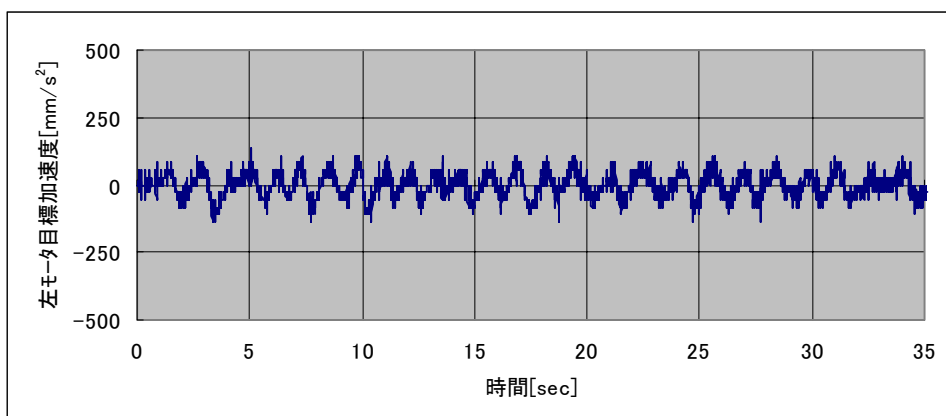
図 5.2.1.23 歩行実験 1 : モータ目標加速度

($c = 350 \text{ [N s/m]}$, 被験者 B)

[グラフ B] 歩行実験 1



(a)右

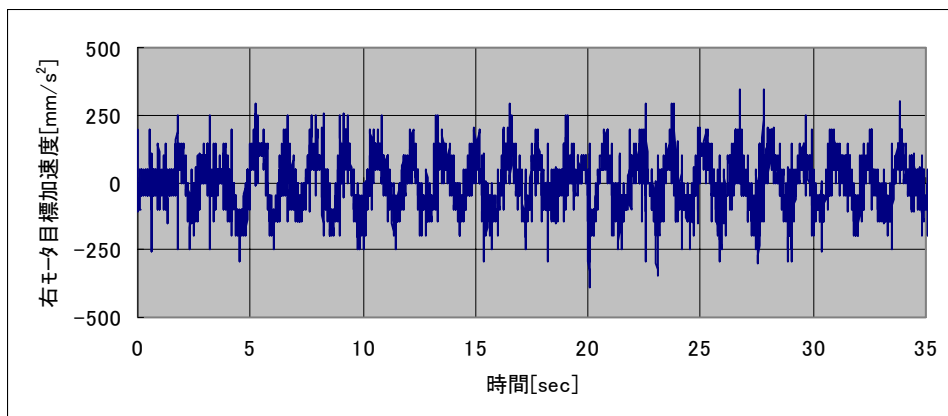


(b)左

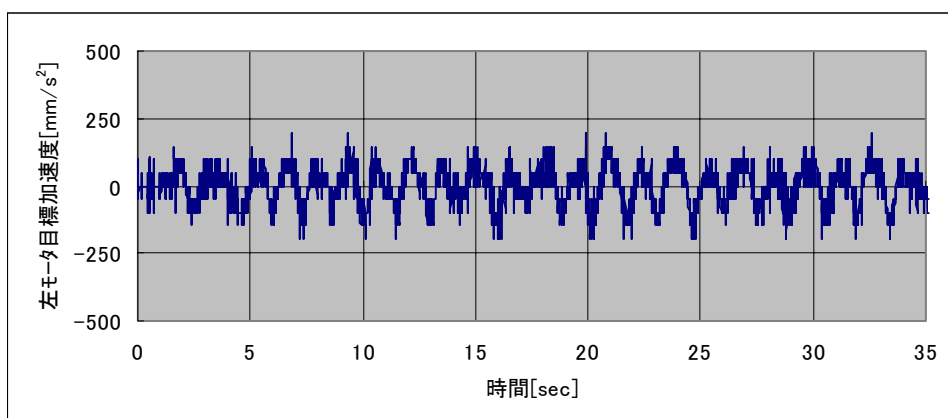
図 5.2.1.24 歩行実験 1 : モータ目標加速度

($c = 450$ [N s/m] , 被験者 B)

[グラフ B] 歩行実験 1



(a)右

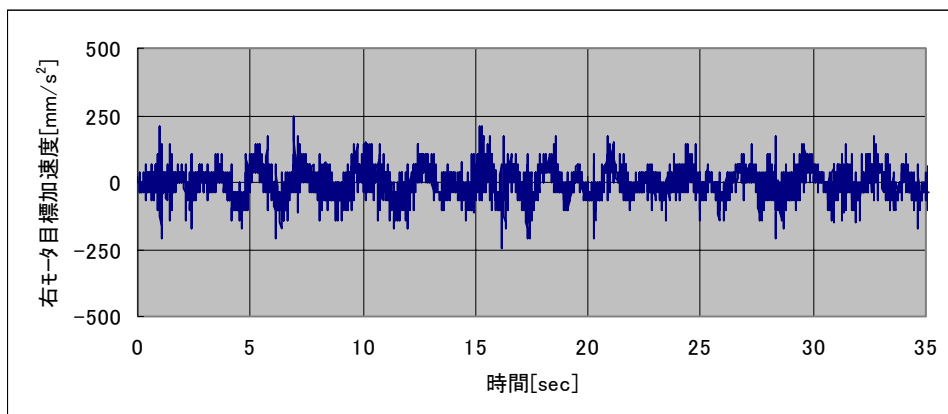


(b)左

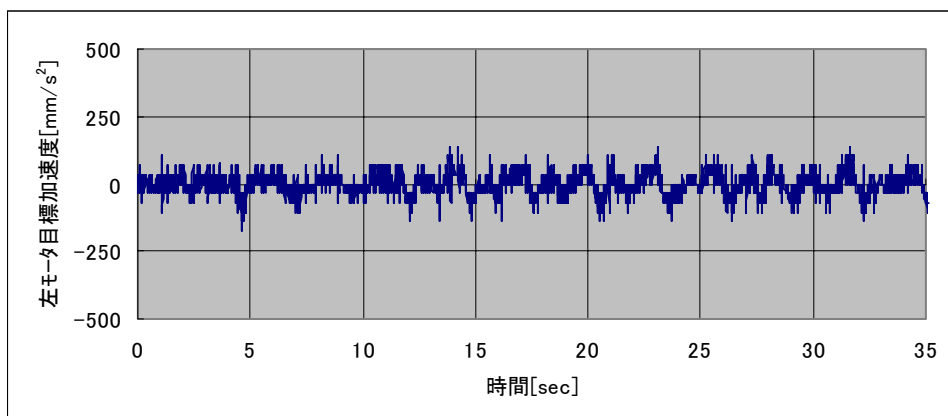
図 5.2.1.25 歩行実験 1 : モータ目標加速度

($c = 250$ [N s/m] , 被験者 C)

[グラフ B] 歩行実験 1



(a)右

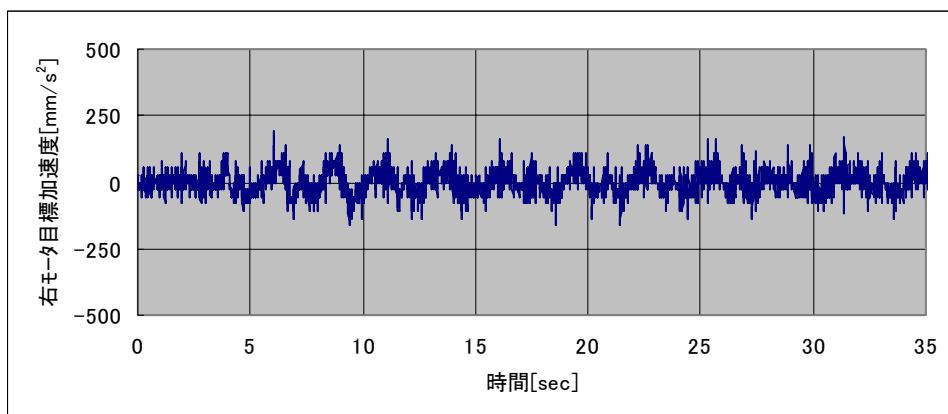


(b)左

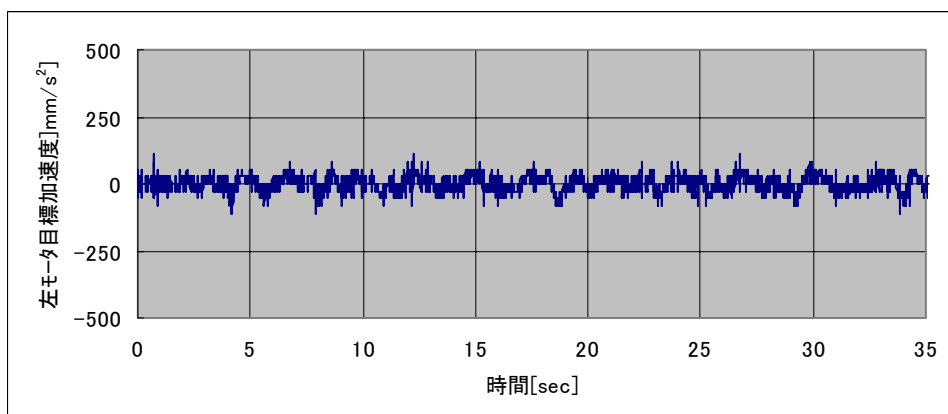
図 5.2.1.26 歩行実験 1 : モータ目標加速度

($c = 350 \text{ [N s/m]}$, 被験者 C)

[グラフ B] 歩行実験 1



(a)右

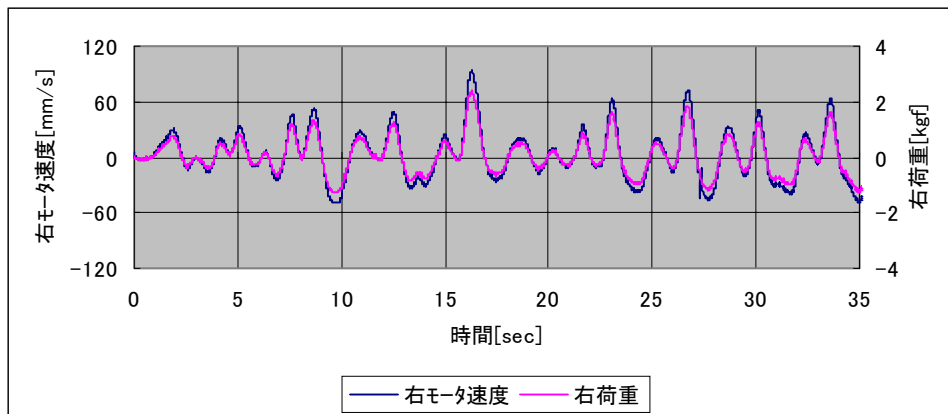


(b)左

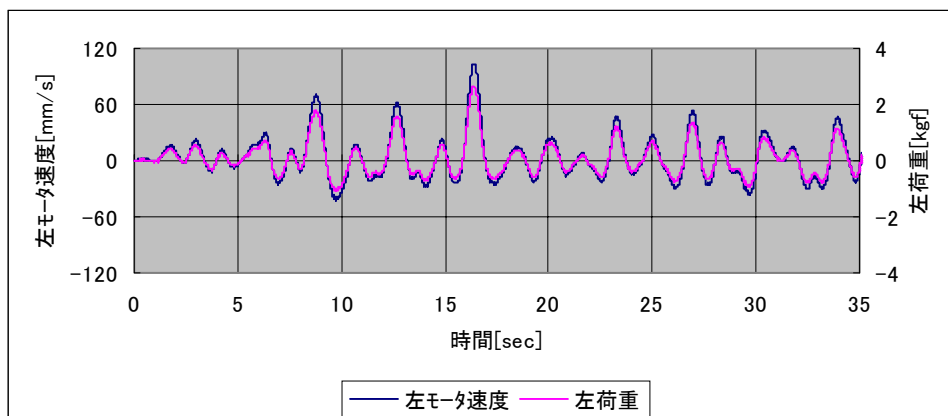
図 5.2.1.27 歩行実験 1 : モータ目標加速度

($c = 450$ [N s/m] , 被験者 C)

[グラフ C] 歩行実験 2



(a) 右

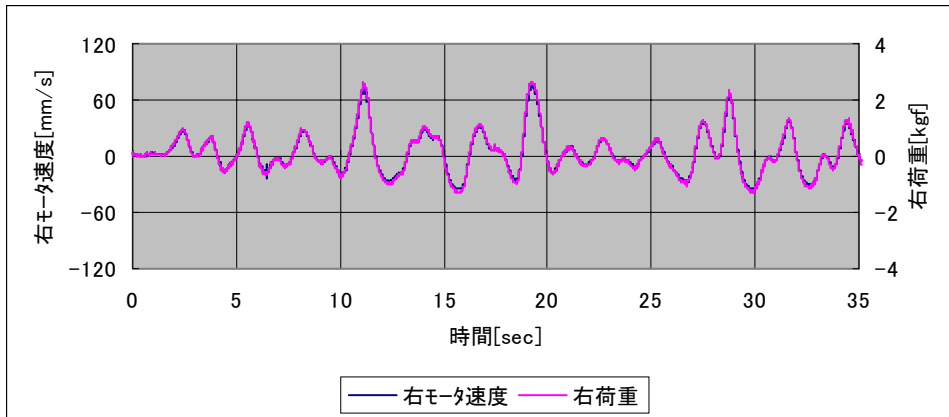


(b) 左

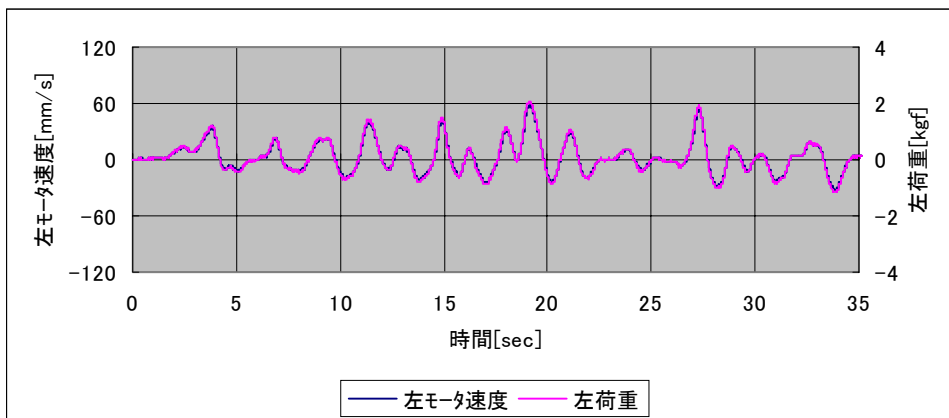
図 5.2.2.1 歩行実験 2 : モータ速度と荷重

($c = 250$ [N s/m] , 被験者 A)

[グラフ C] 歩行実験 2



(a) 右

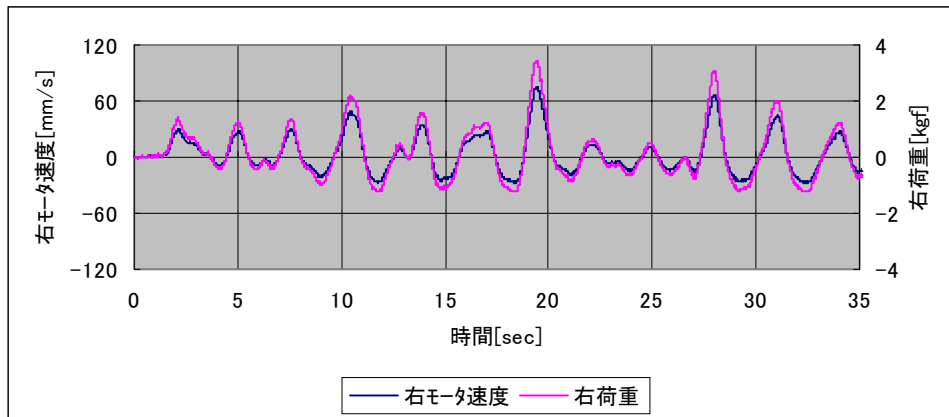


(b) 左

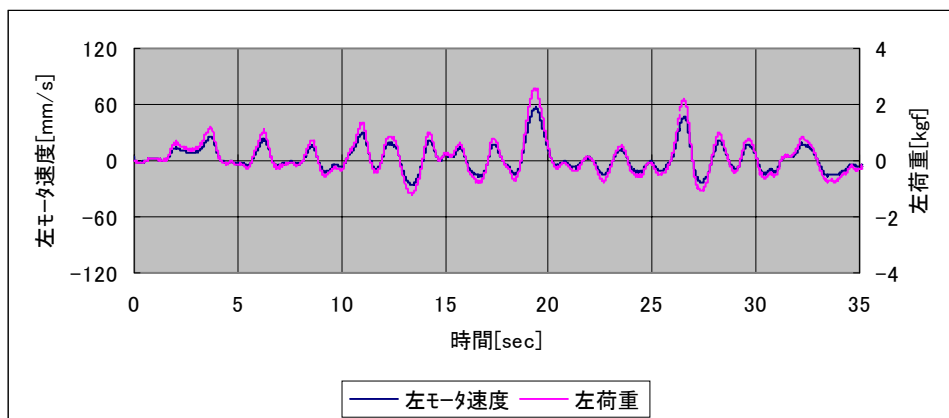
図 5.2.2.2 歩行実験 2 : モータ速度と荷重

($c = 350$ [N s/m] , 被験者 A)

[グラフ C] 歩行実験 2



(a) 右

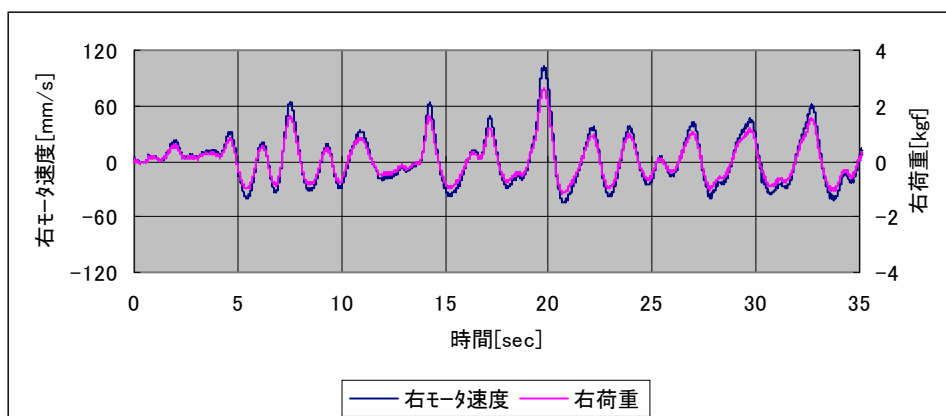


(b) 左

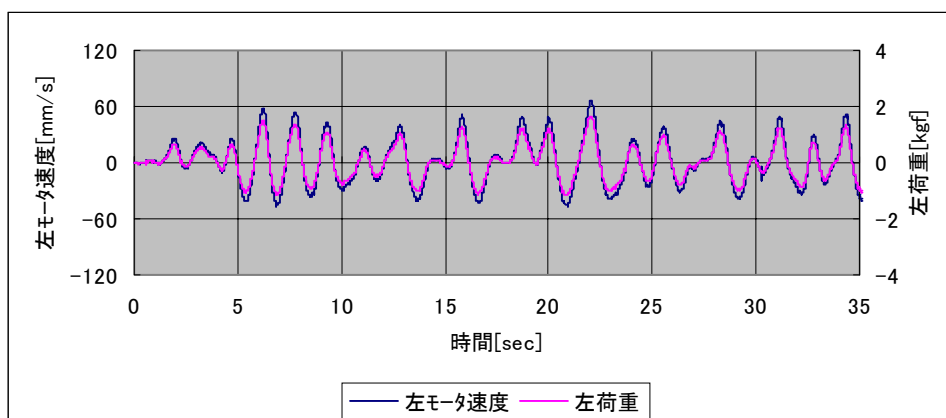
図 5.2.2.3 歩行実験 2 : モータ速度と荷重

($c = 450$ [N s/m] , 被験者 A)

[グラフ C] 歩行実験 2



(a) 右

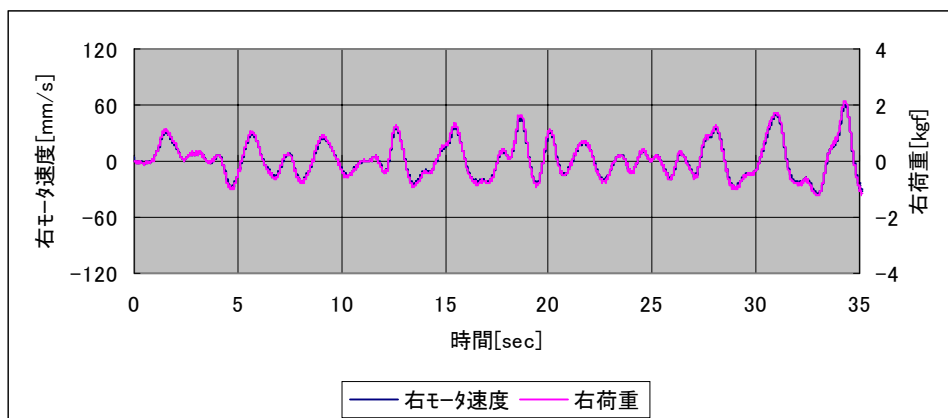


(b) 左

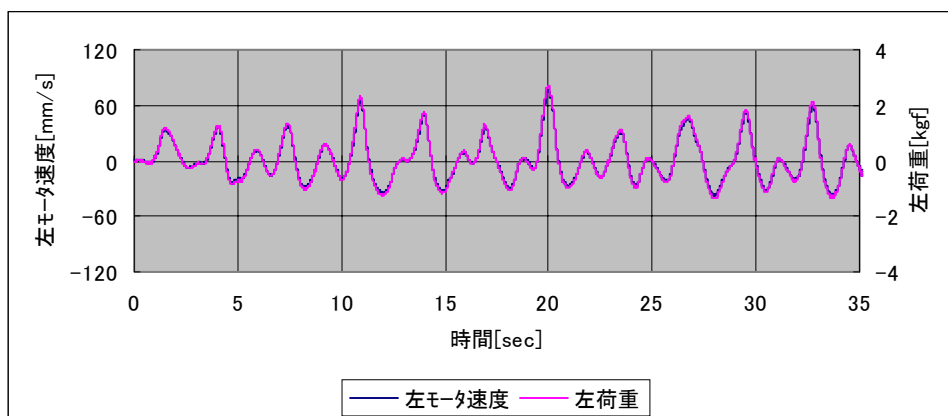
図 5.2.2.4 歩行実験 2 : モータ速度と荷重

($c = 250$ [N s/m] , 被験者 B)

[グラフ C] 歩行実験 2



(a) 右

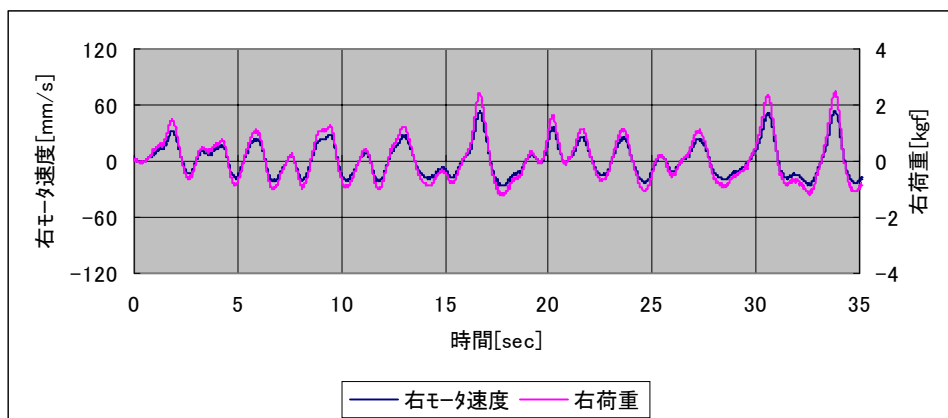


(b) 左

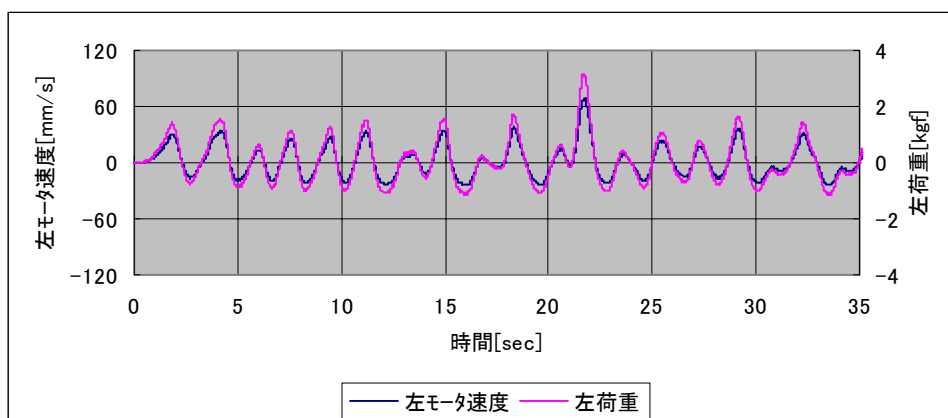
図 5.2.2.5 歩行実験 2 : モータ速度と荷重

($c = 350$ [N s/m] , 被験者 B)

[グラフ C] 歩行実験 2



(a) 右

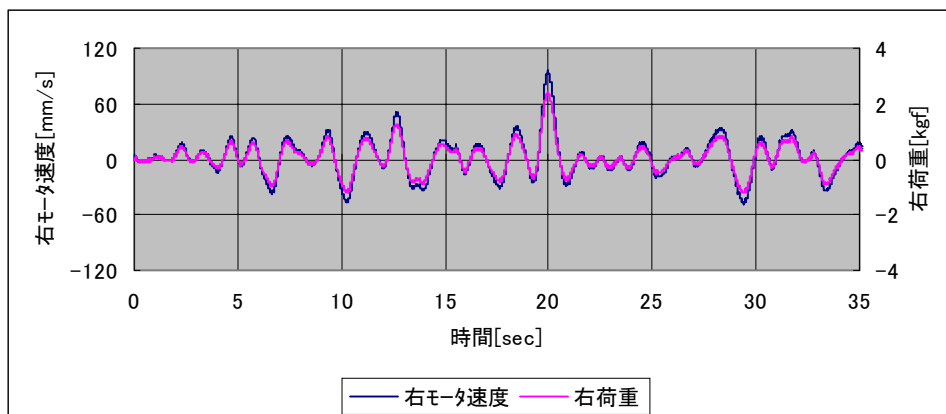


(b) 左

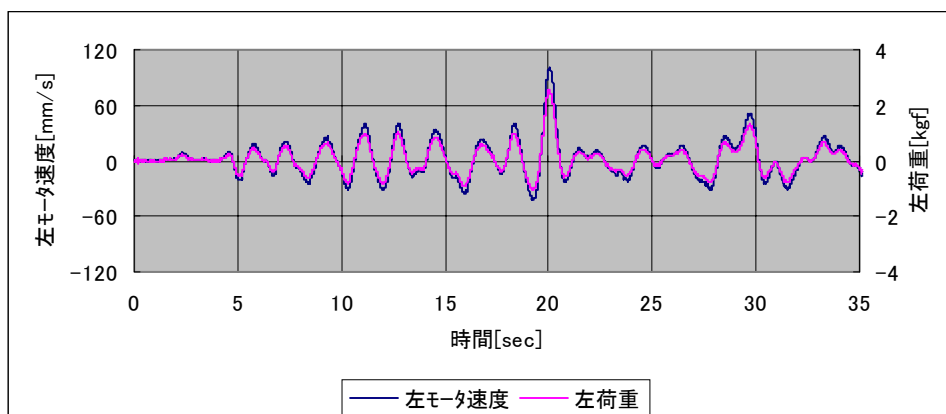
図 5.2.2.6 歩行実験 2 : モータ速度と荷重

($c = 450$ [N s/m] , 被験者 B)

[グラフ C] 歩行実験 2



(a) 右

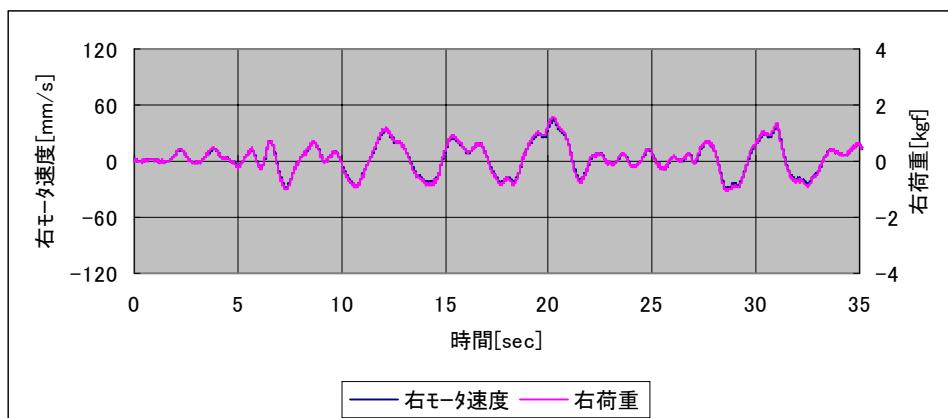


(b) 左

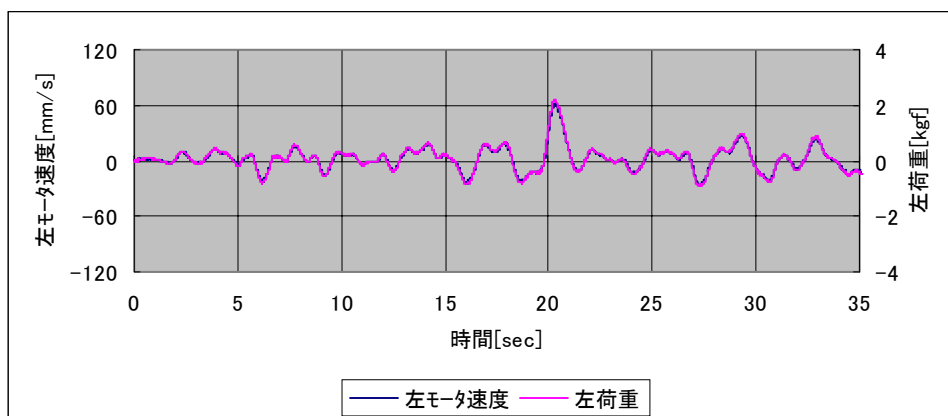
図 5.2.2.7 歩行実験 2 : モータ速度と荷重

($c = 250$ [N s/m] , 被験者 C)

[グラフ C] 歩行実験 2



(a) 右

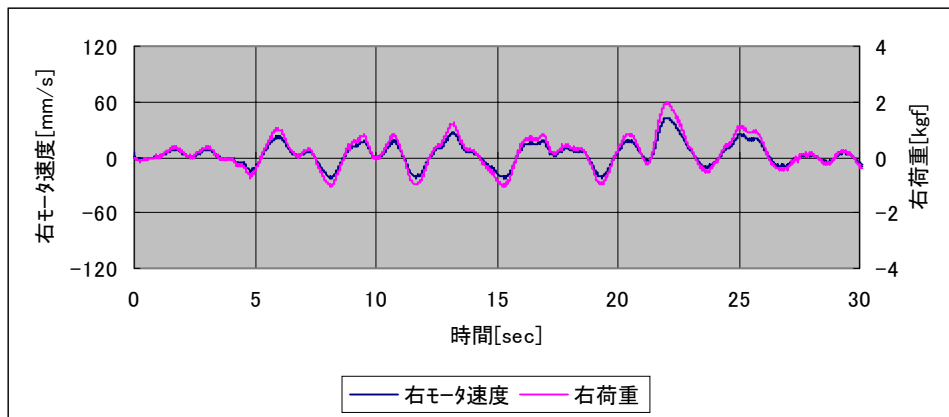


(b) 左

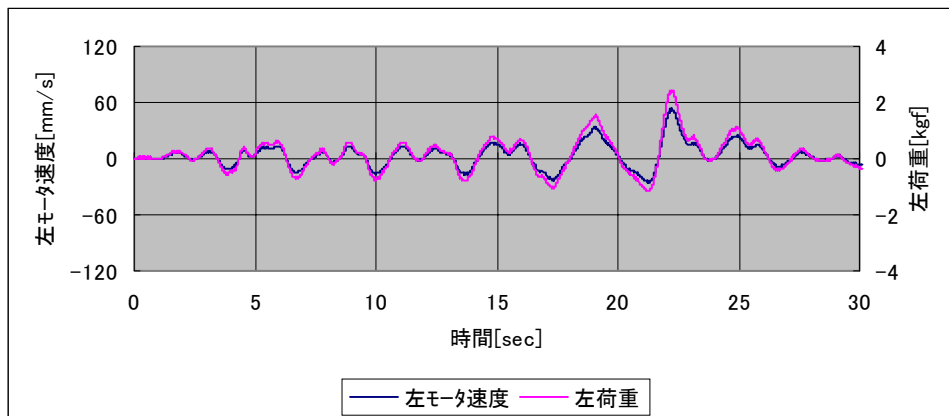
図 5.2.2.8 歩行実験 2 : モータ速度と荷重

($c = 350$ [N s/m] , 被験者 C)

[グラフ C] 歩行実験 2



(a) 右

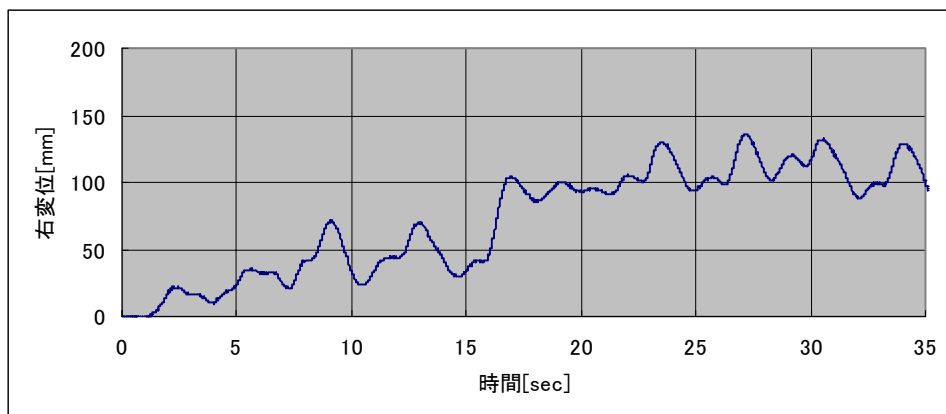


(b) 左

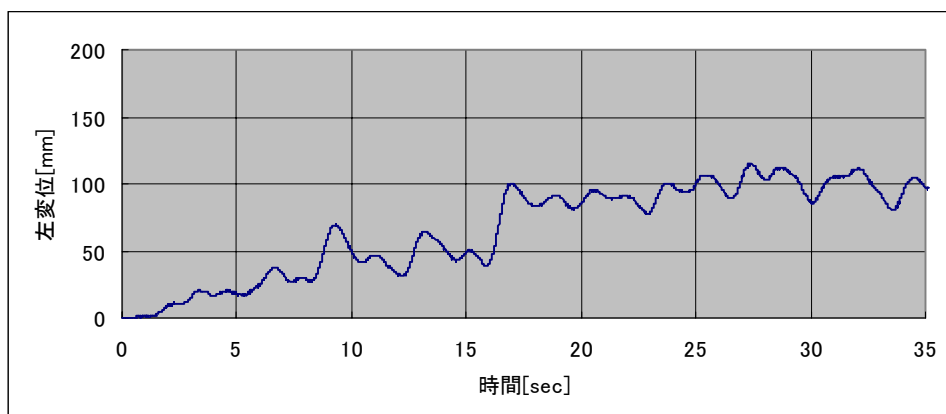
図 5.2.2.9 歩行実験 2 : モータ速度と荷重

($c = 450$ [N s/m], 被験者 C)

[グラフ C] 歩行実験 2



(a) 右

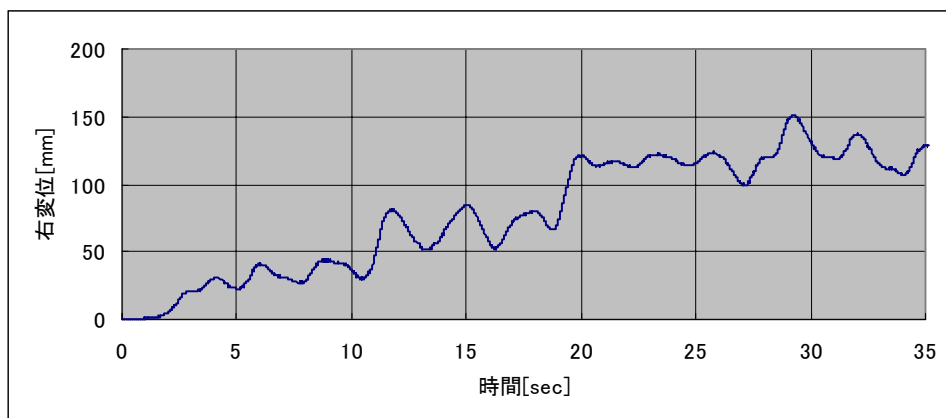


(b) 左

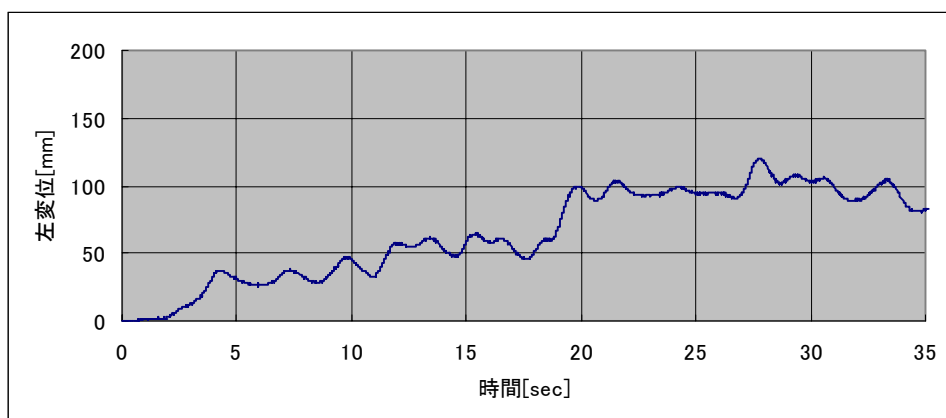
図 5.2.2.10 歩行実験 2 : 変位

($c = 250$ [N s/m] , 被験者 A)

[グラフ C] 歩行実験 2



(a) 右

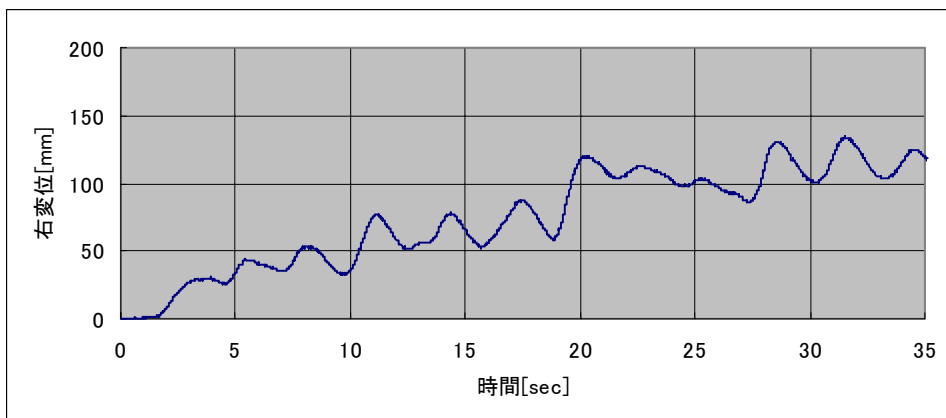


(b) 左

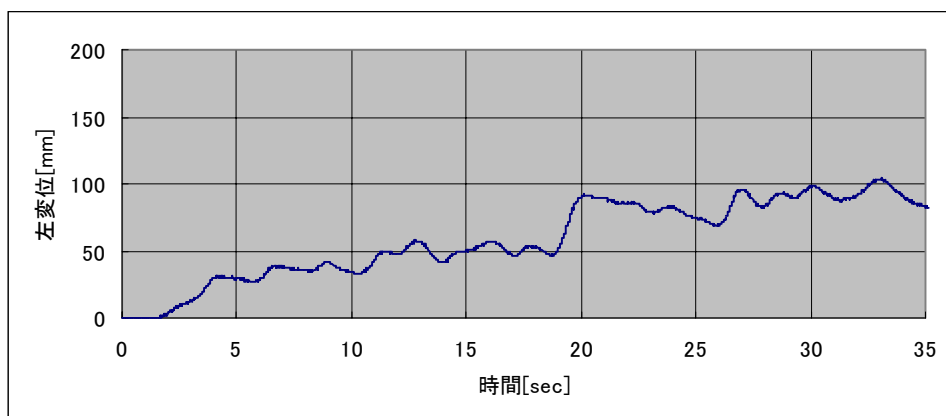
図 5.2.2.11 歩行実験 2 : 変位

($c = 350$ [N s/m] , 被験者 A)

[グラフ C] 歩行実験 2



(a) 右

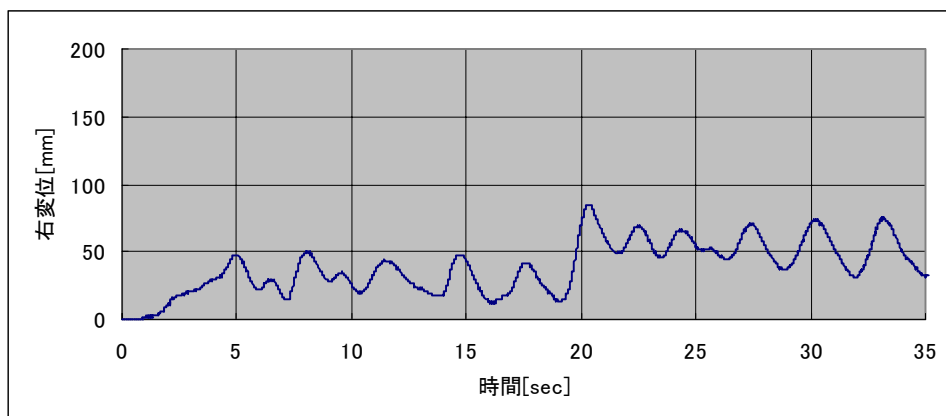


(b) 左

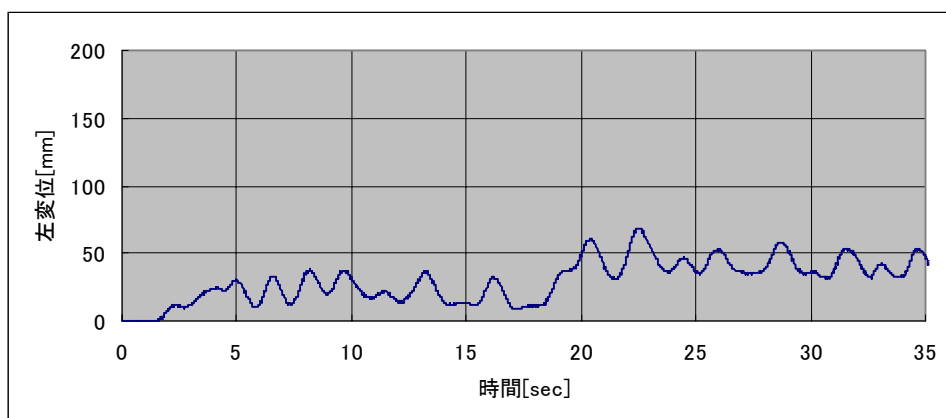
図 5.2.2.12 歩行実験 2 : 変位

($c = 450$ [N s/m] , 被験者 A)

[グラフ C] 歩行実験 2



(a) 右

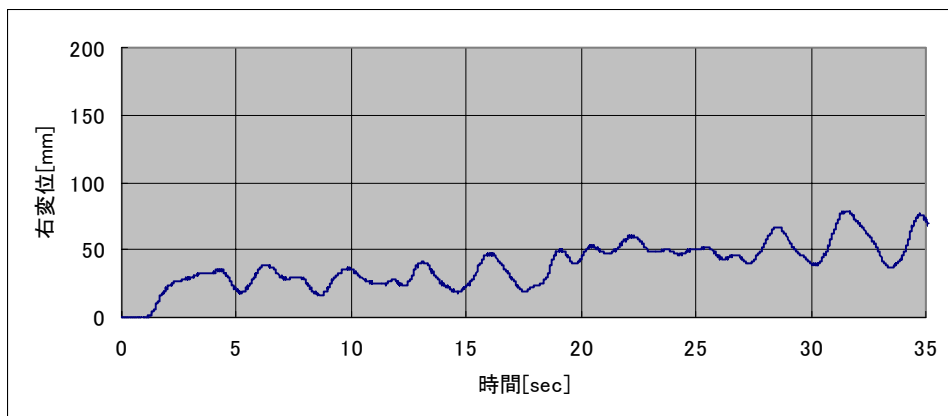


(b) 左

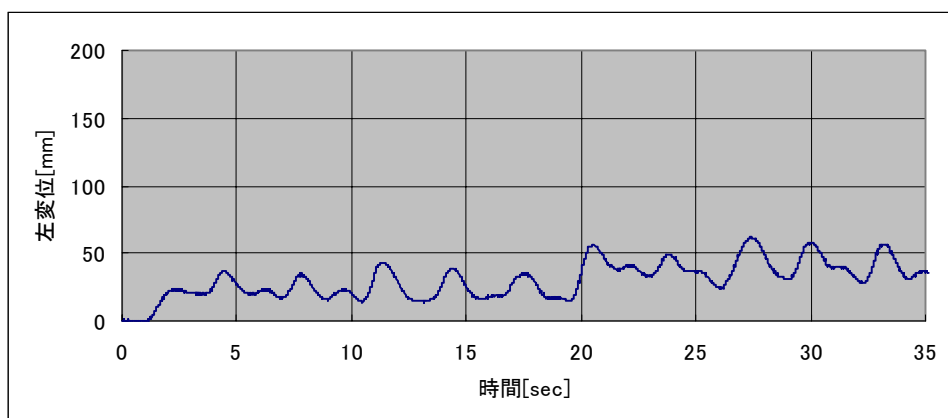
5.2.2.13 歩行実験 2 : 変位

($c = 250$ [N s/m], 被験者 B)

[グラフ C] 歩行実験 2



(a) 右

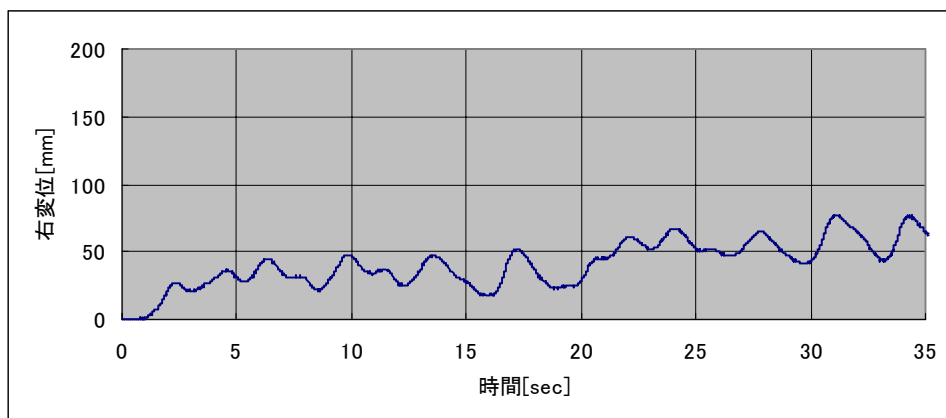


(b) 左

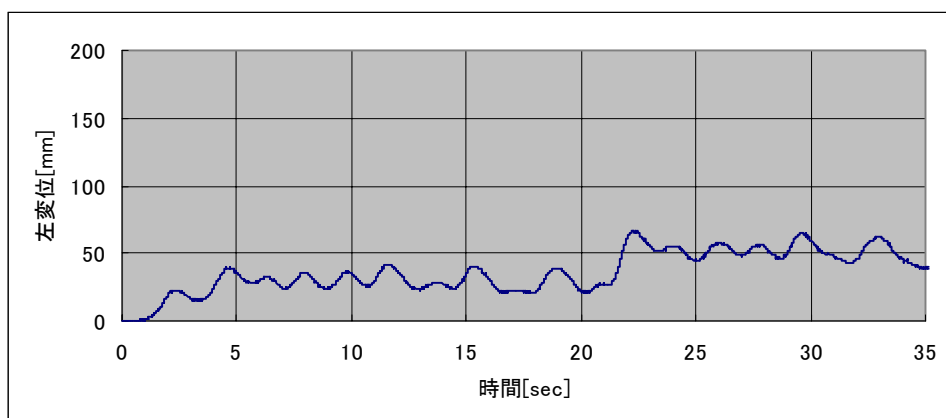
図 5.2.2.14 歩行実験 2 : 変位

($c = 350$ [N s/m], 被験者 B)

[グラフ C] 歩行実験 2



(a) 右

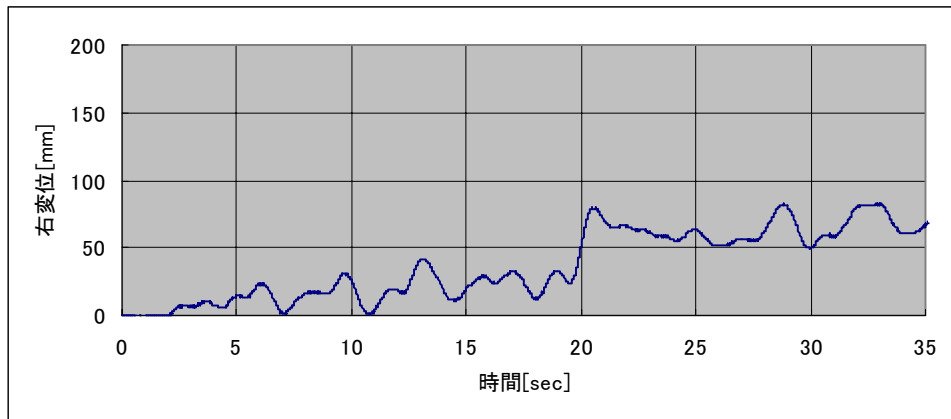


(b) 左

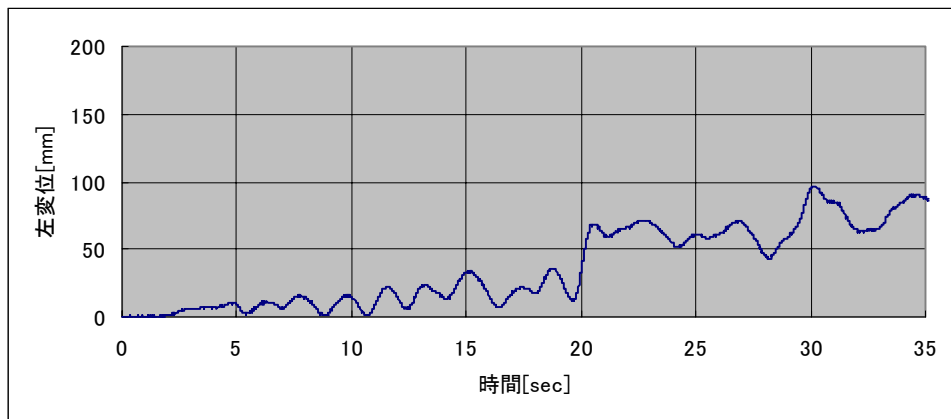
図 5.2.2.15 歩行実験 2 : 変位

($c = 450$ [N s/m] , 被験者 B)

[グラフ C] 歩行実験 2



(a) 右

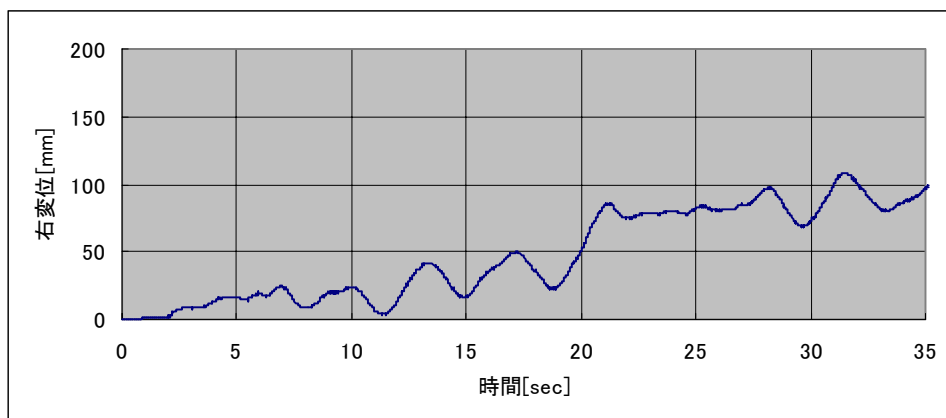


(b) 左

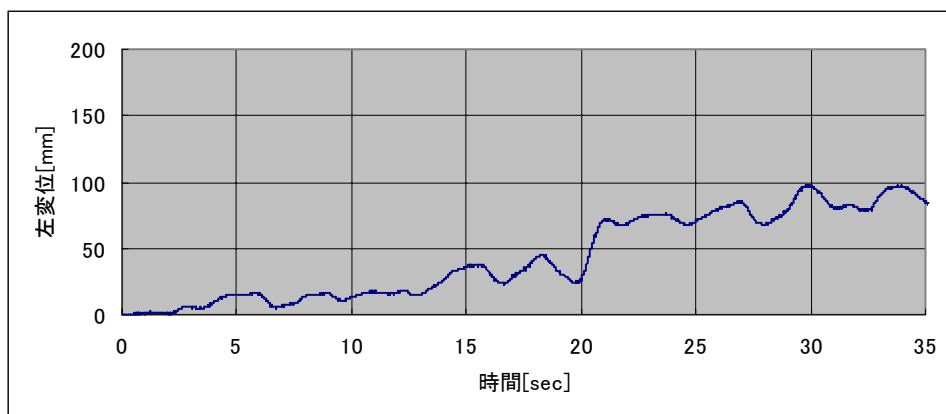
図 5.2.2.16 歩行実験 2 : 変位

($c = 250$ [N s/m], 被験者 C)

[グラフ C] 歩行実験 2



(a) 右

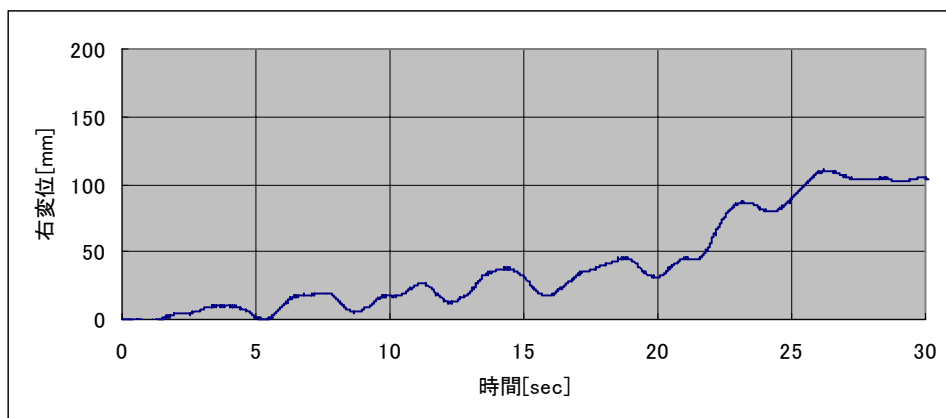


(b) 左

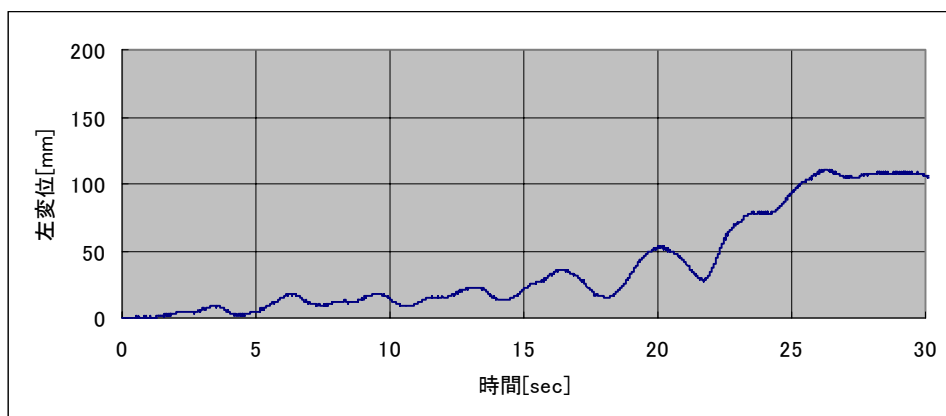
図 5.2.2.17 歩行実験 2 : 変位

($c = 350$ [N s/m] , 被験者 C)

[グラフ C] 歩行実験 2



(a) 右

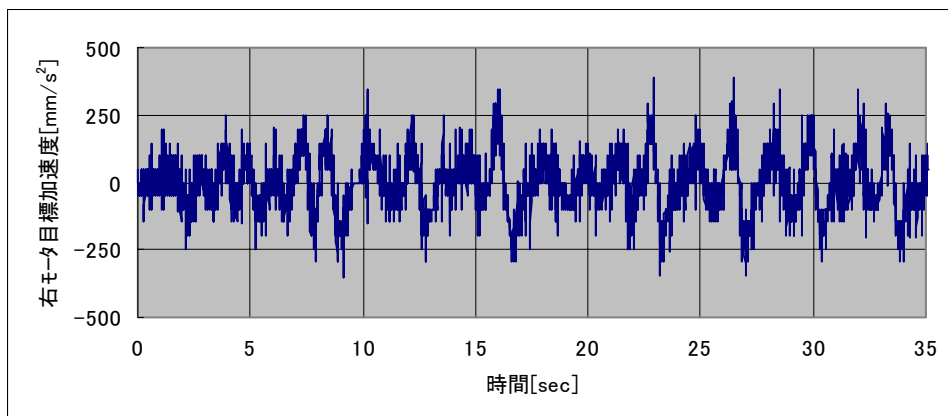


(b) 左

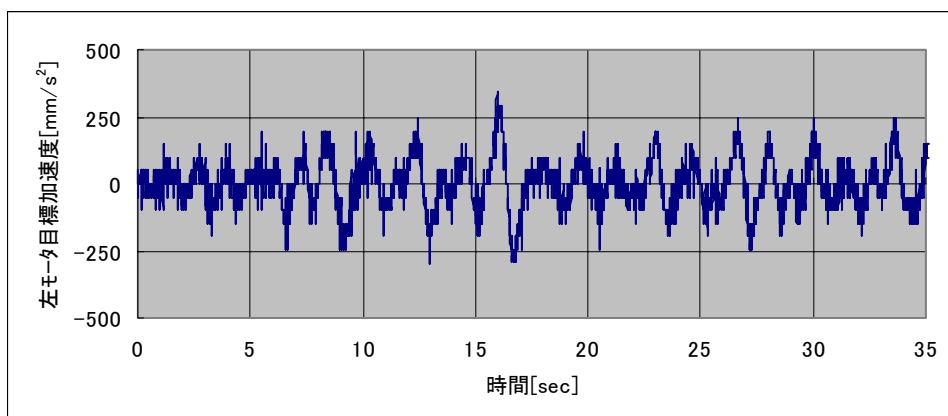
図 5.2.2.18 歩行実験 2 : 変位

($c = 450$ [N s/m] , 被験者 C)

[グラフ C] 歩行実験 2



(a) 右

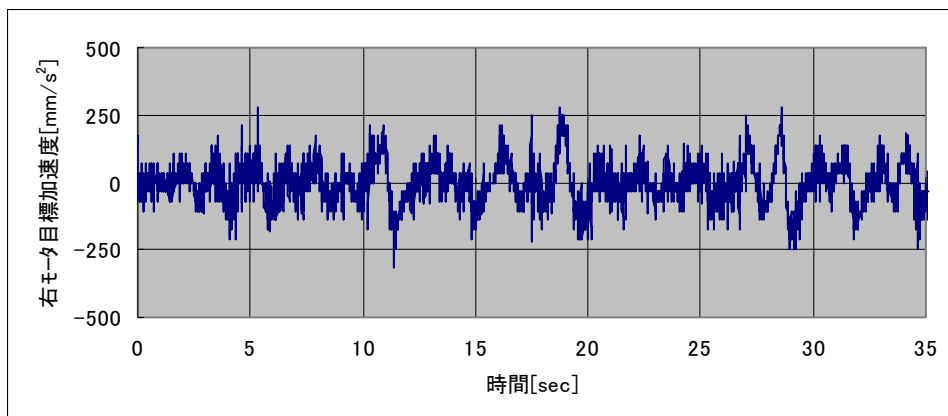


(b) 左

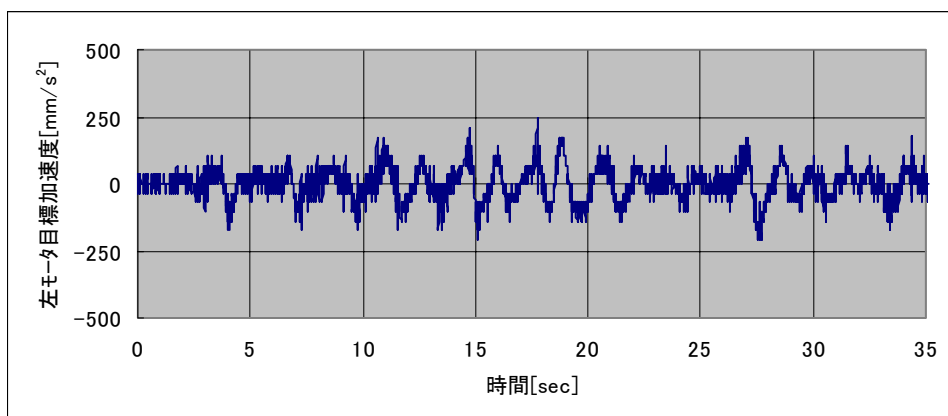
図 5.2.2.19 歩行実験 2 : モータ目標加速度

($c = 250$ [N s/m] , 被験者 A)

[グラフ C] 歩行実験 2



(a) 右

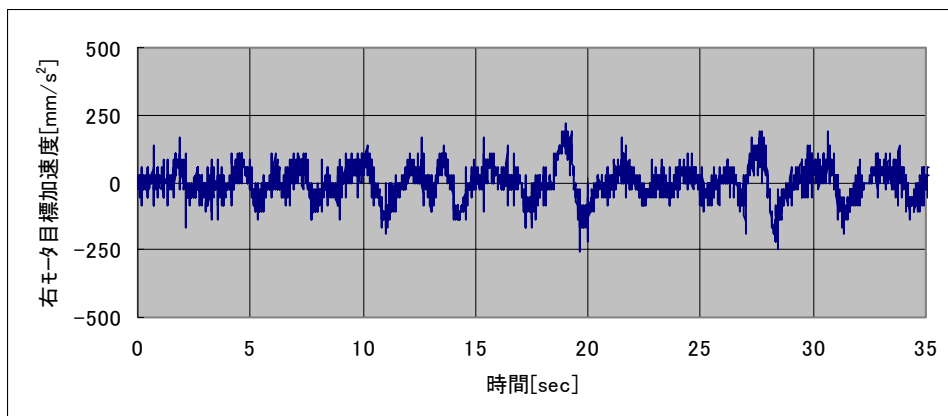


(b) 左

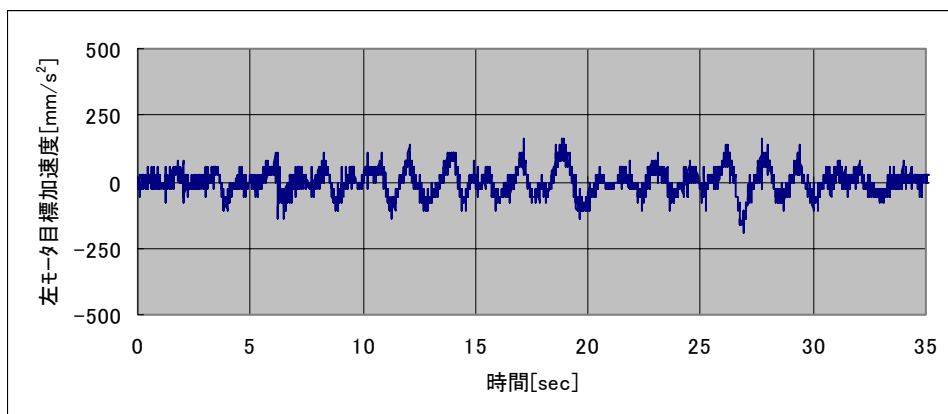
図 5.2.2.20 歩行実験 2 : モータ目標加速度

($c = 350$ [N s/m] , 被験者 A)

[グラフ C] 歩行実験 2



(a) 右

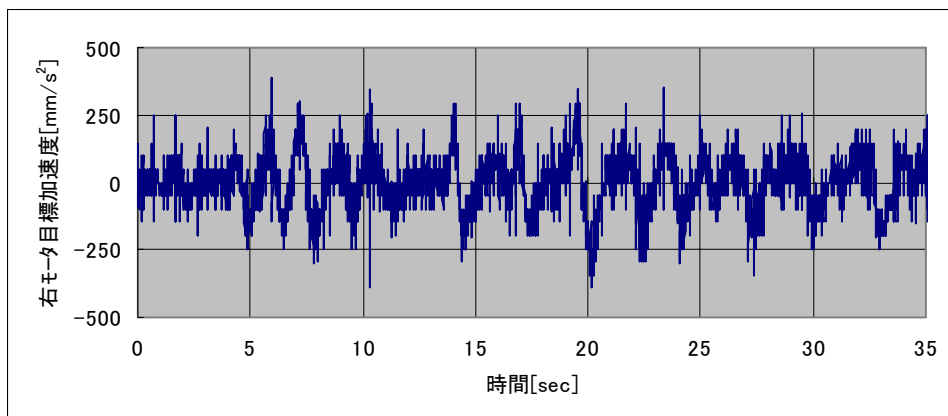


(b) 左

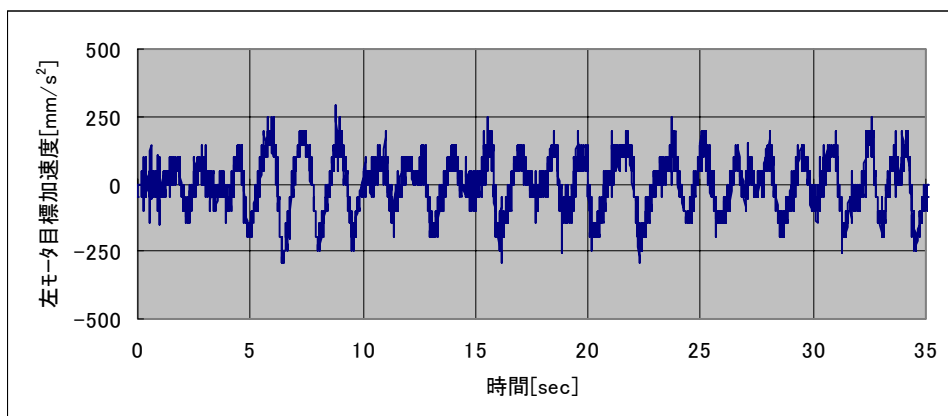
図 5.2.2.21 歩行実験 2 : モータ目標加速度

($c = 450$ [N s/m] , 被験者 A)

[グラフ C] 歩行実験 2



(a) 右

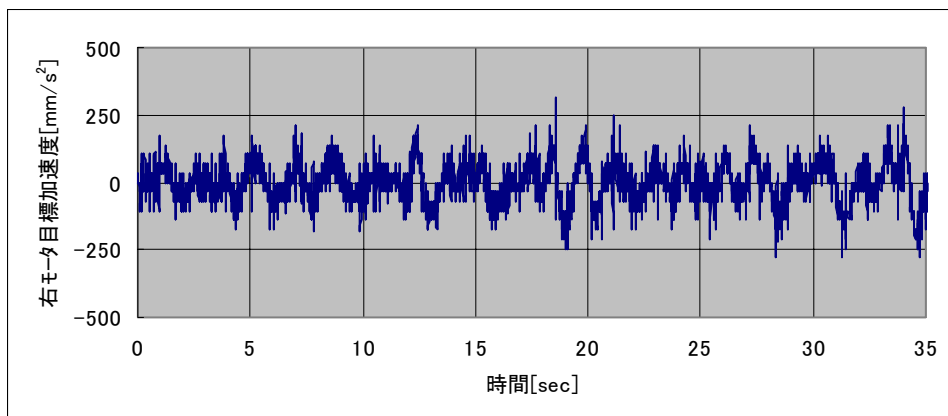


(b) 左

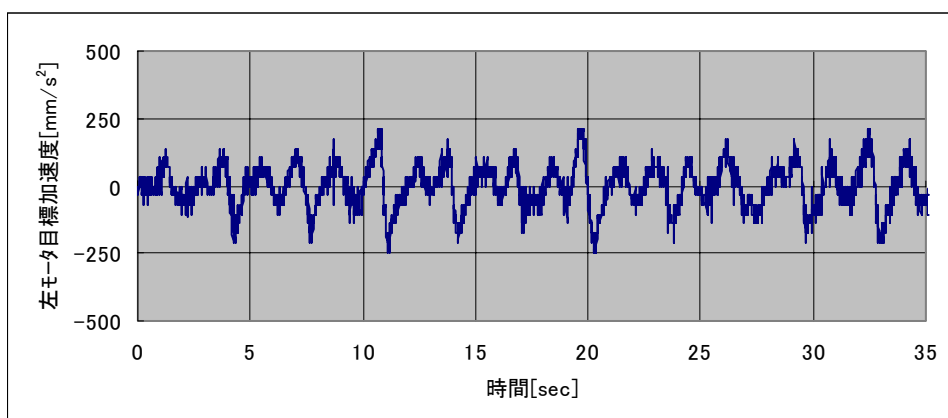
図 5.2.2.22 歩行実験 2 : モータ目標加速度

($c = 250 \text{ [N s/m]}$, 被験者 B)

[グラフ C] 歩行実験 2



(a) 右

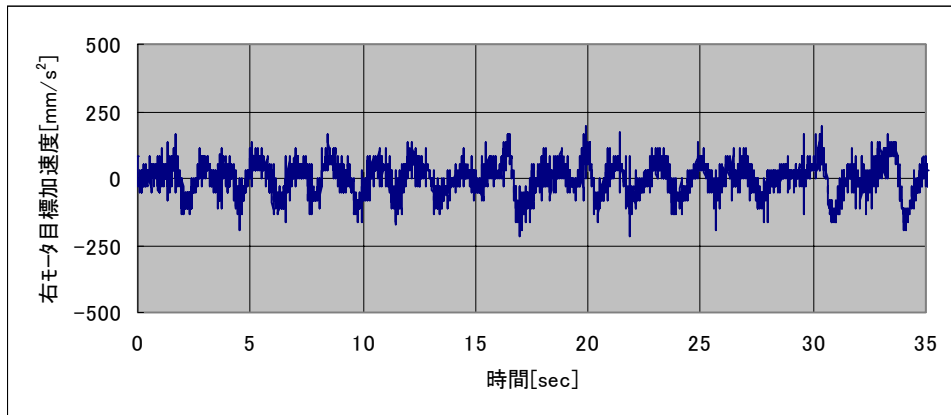


(b) 左

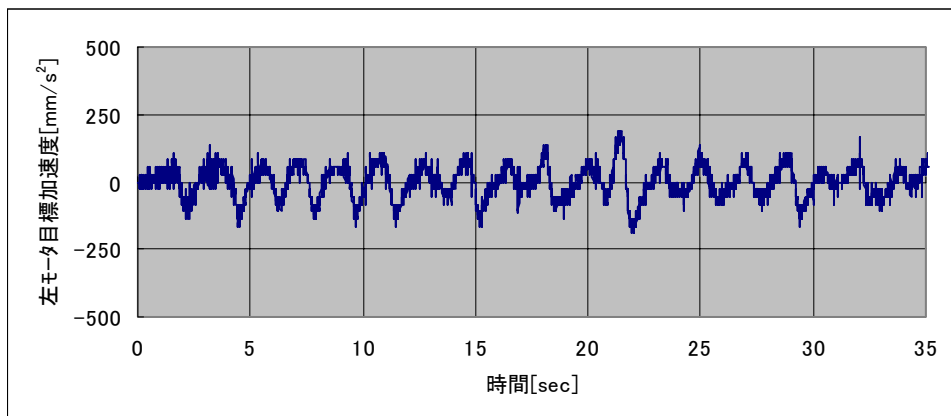
図 5.2.2.23 歩行実験 2 : モータ目標加速度

($c = 350 \text{ [N s/m]}$, 被験者 B)

[グラフ C] 歩行実験 2



(a) 右

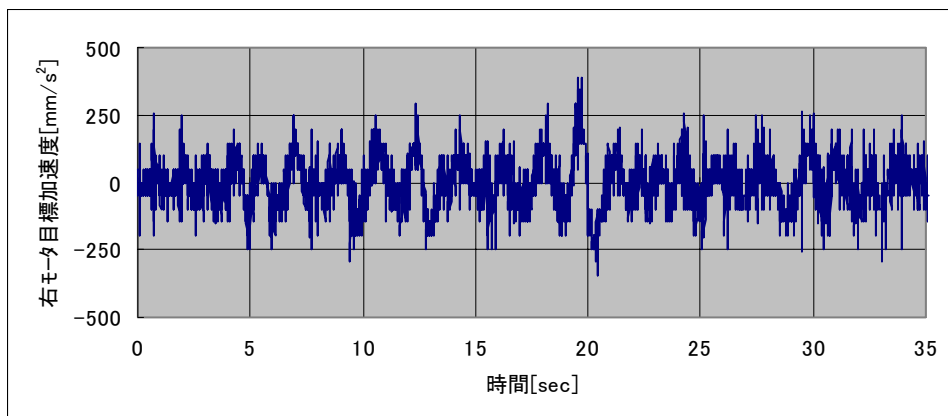


(b) 左

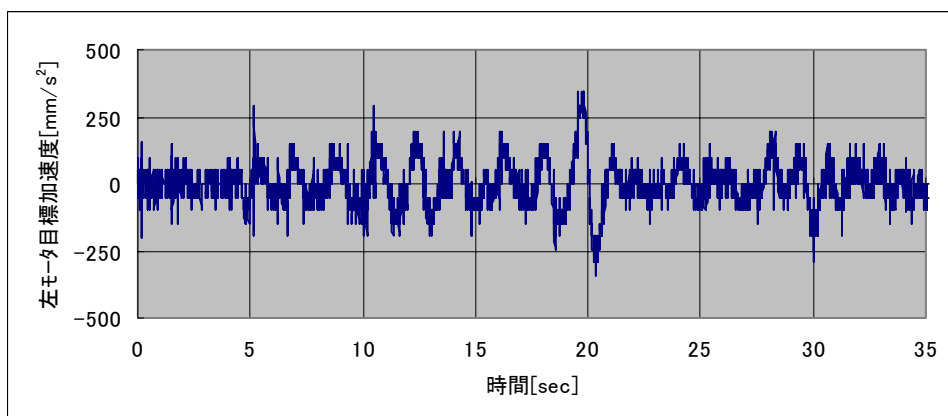
図 5.2.2.24 歩行実験 2 : モータ目標加速度

($c = 450 \text{ [N s/m]}$, 被験者 B)

[グラフ C] 歩行実験 2



(a) 右

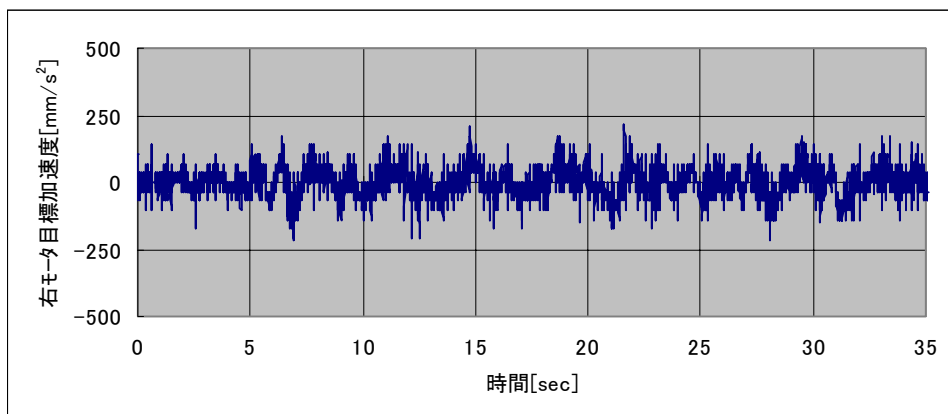


(b) 左

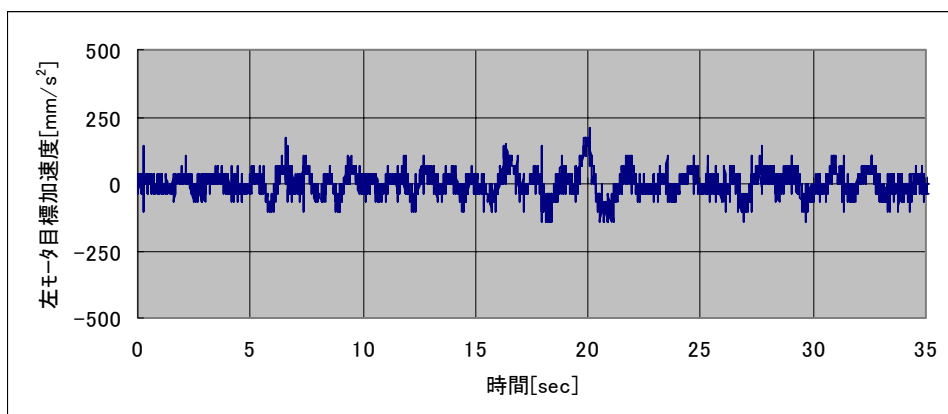
図 5.2.2.25 歩行実験 2 : モータ目標加速度

($c = 250$ [N s/m] , 被験者 C)

[グラフ C] 歩行実験 2



(a) 右

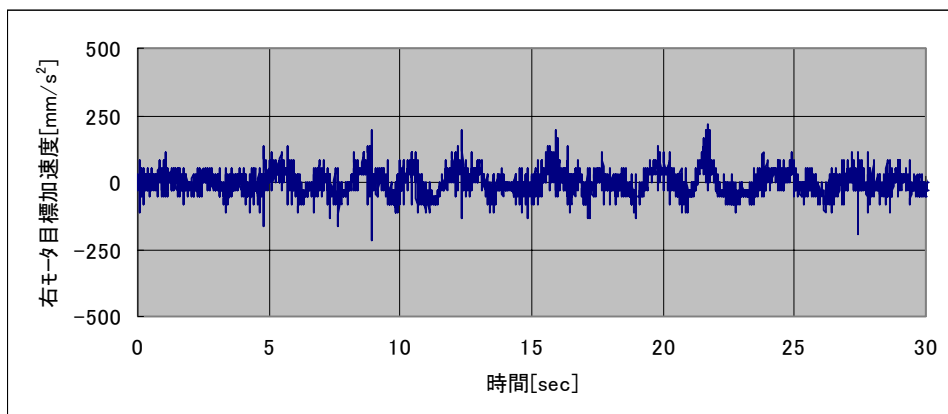


(b) 左

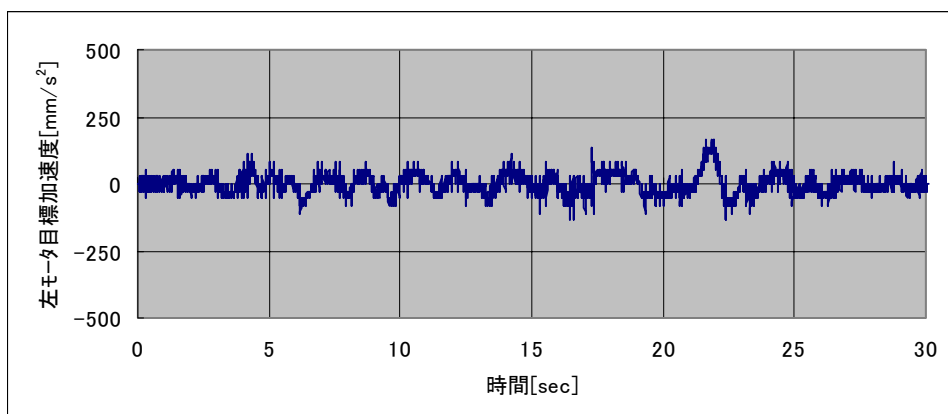
図 5.2.2.26 歩行実験 2 : モータ目標加速度

($c = 350 \text{ [N s/m]}$, 被験者 C)

[グラフ C] 歩行実験 2



(a) 右

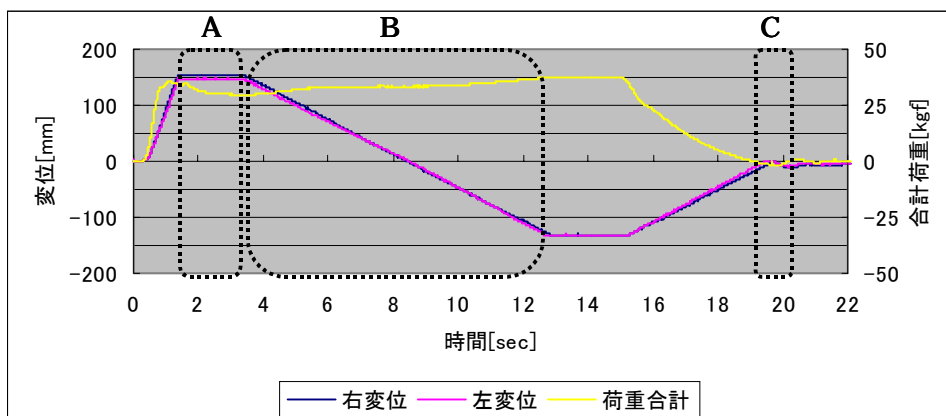


(b) 左

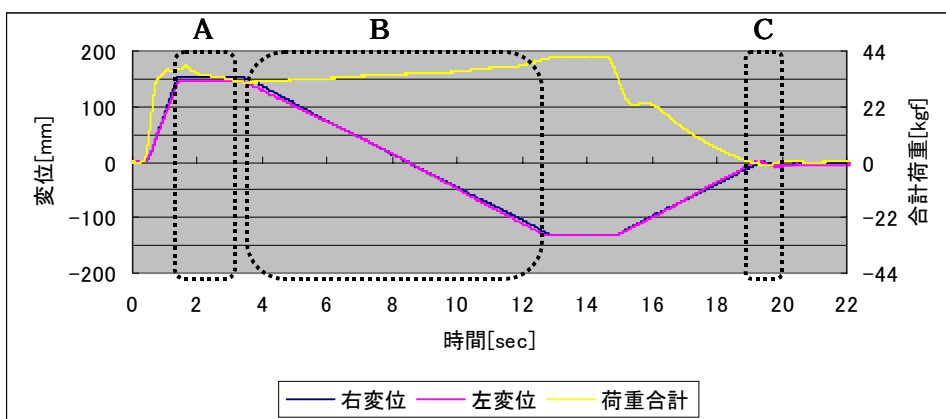
図 5.2.2.27 歩行実験 2 : モータ目標加速度

($c = 450$ [N s/m] , 被験者 C)

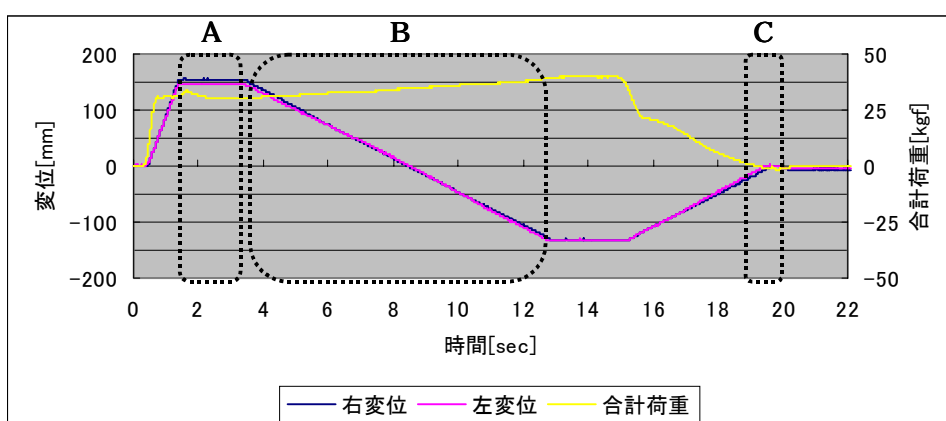
[グラフD] 変位を用いた転倒防止実験



(a) $c = 250$ [N s/m]



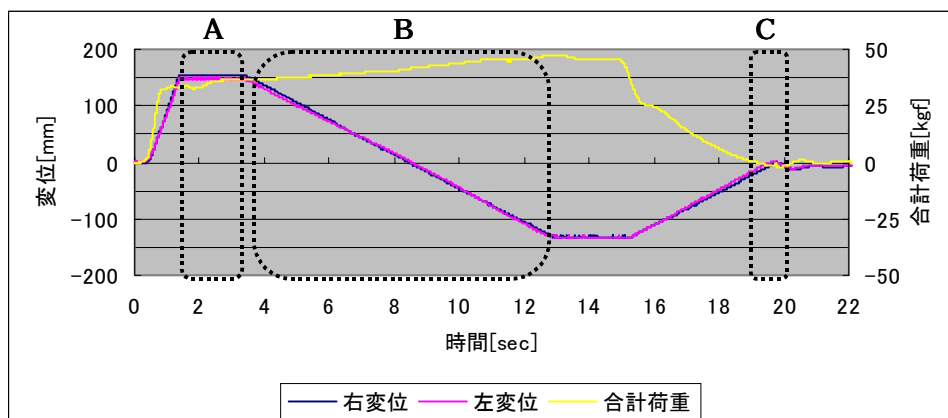
(b) $c = 350$ [N s/m]



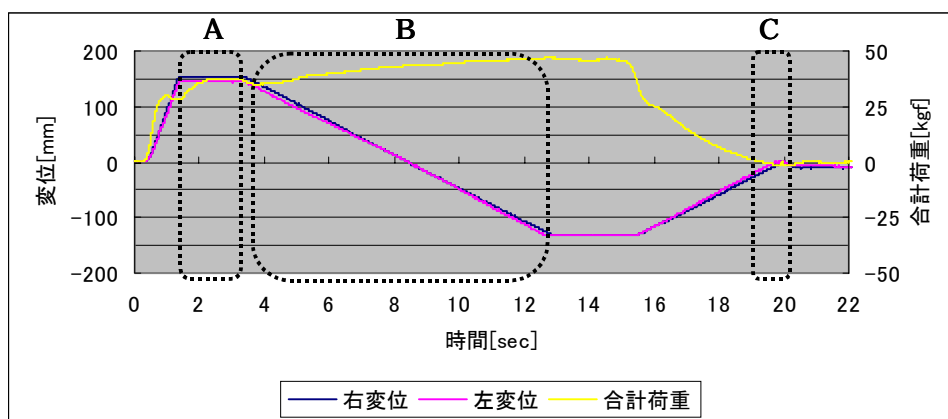
(c) $c = 450$ [N s/m]

図 5.3.1.1 転倒防止実験：変位と荷重（被験者 A）

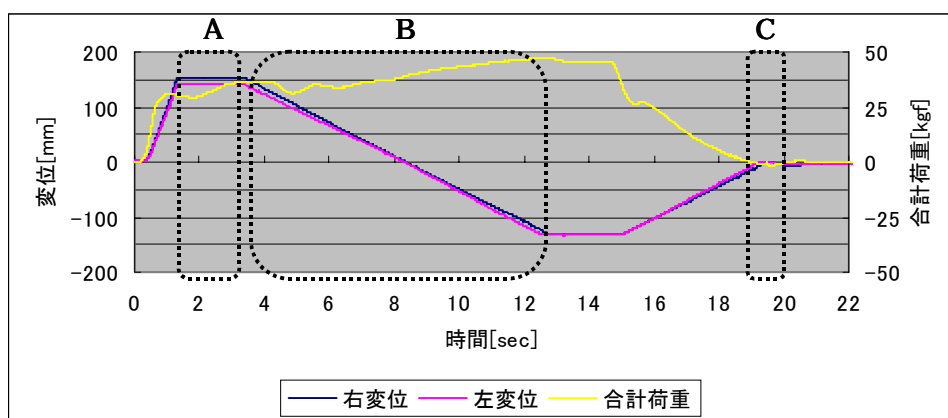
[グラフD] 変位を用いた転倒防止実験



(a) $c = 250$ [N s/m]



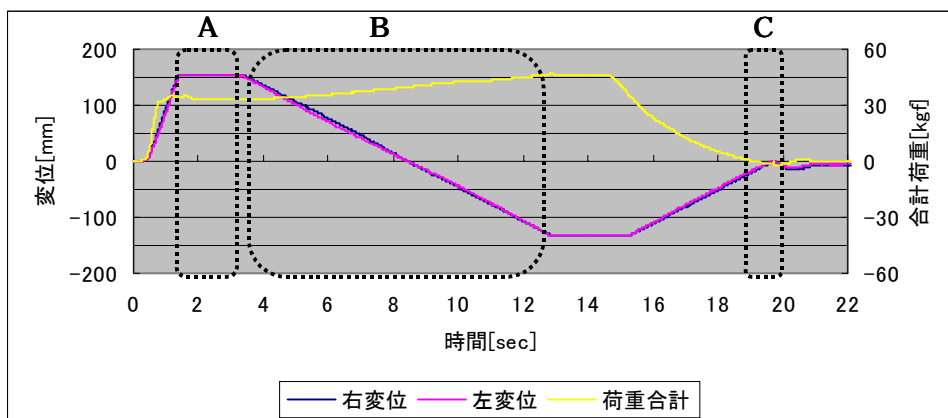
(b) $c = 350$ [N s/m]



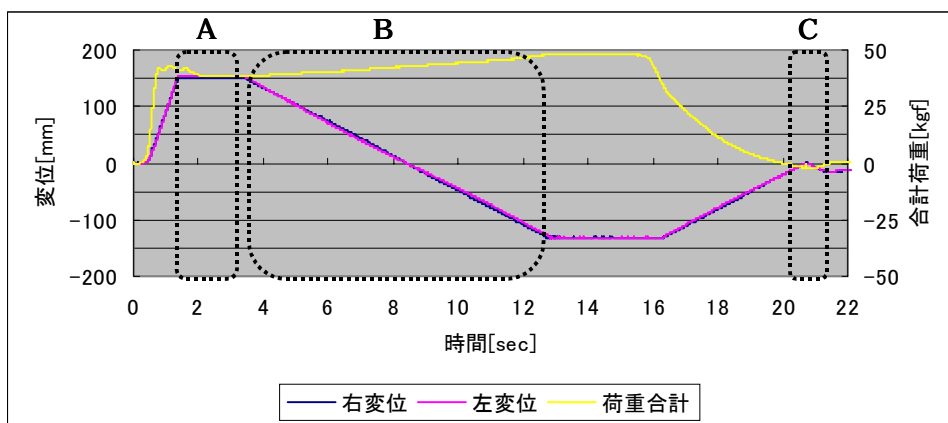
(c) $c = 450$ [N s/m]

図 5.3.1.2 転倒防止実験：変位と荷重（被験者 B）

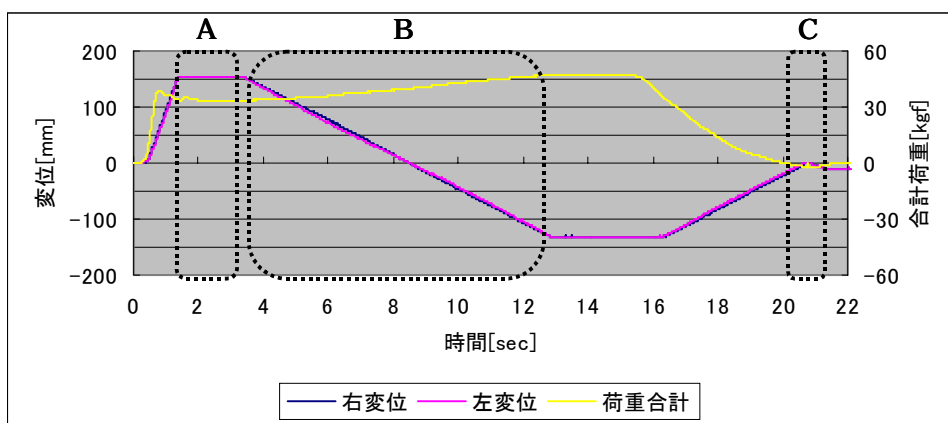
[グラフD] 変位を用いた転倒防止実験



(a) $c = 250$ [N s/m]



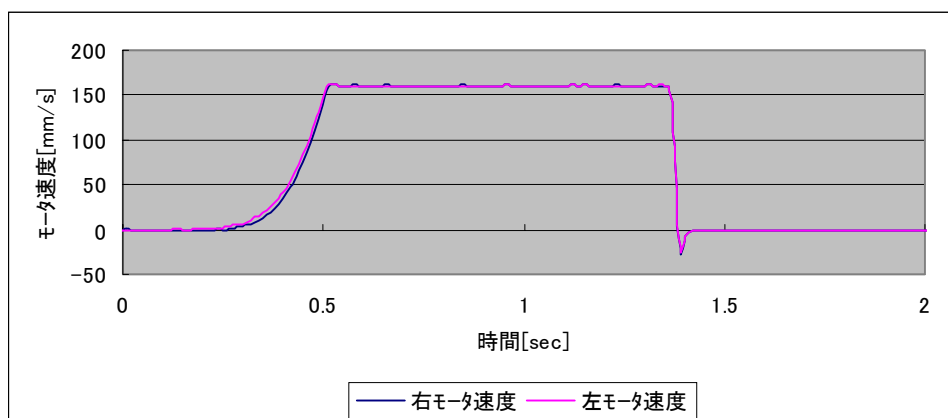
(b) $c = 350$ [N s/m]



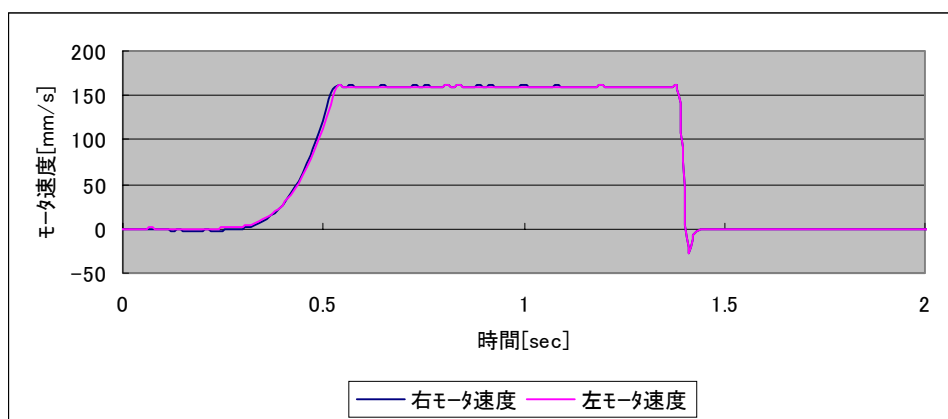
(c) $c = 450$ [N s/m]

図 5.3.1.3 転倒防止実験：変位と荷重（被験者 C）

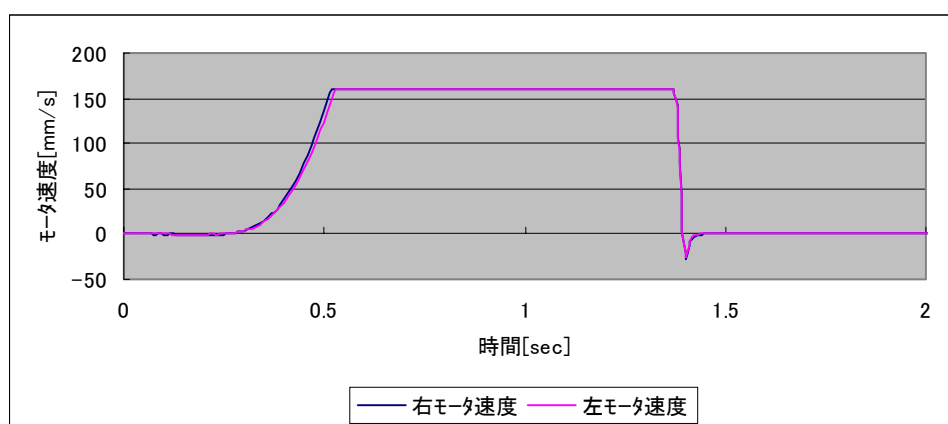
[グラフD] 変位を用いた転倒防止実験



(a) $c = 250$ [N s/m]



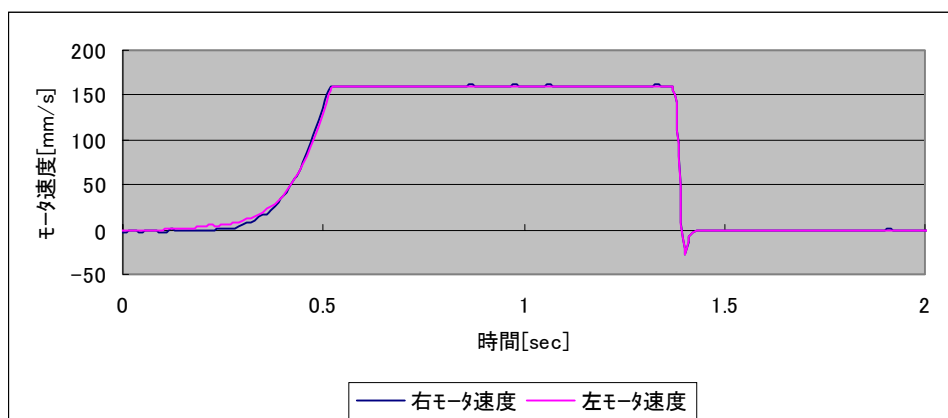
(b) $c = 350$ [N s/m]



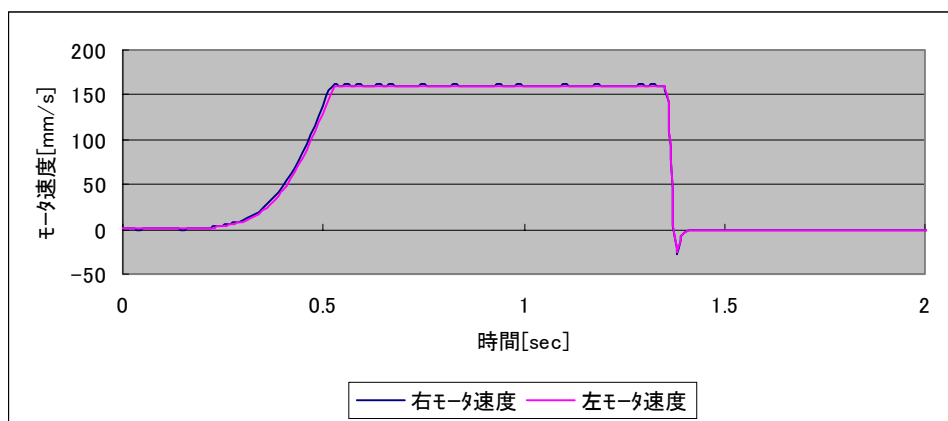
(c) $c = 450$ [N s/m]

図 5.3.1.4 転倒防止実験：モータ速度（被験者 A）

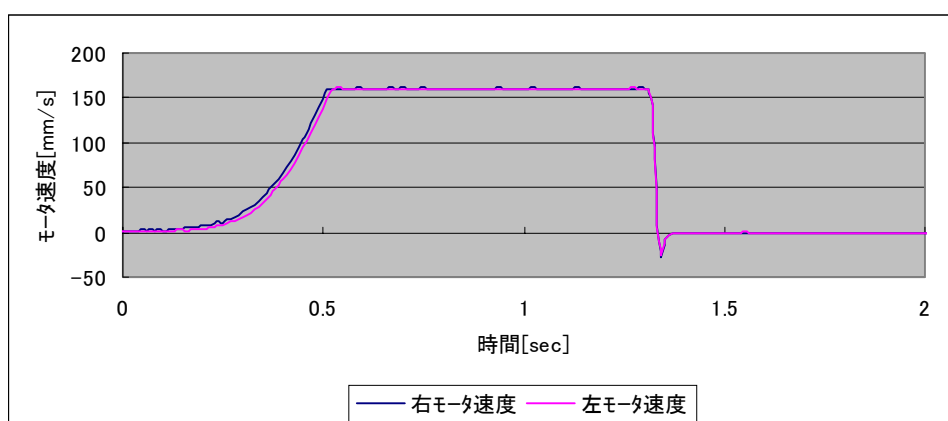
[グラフD] 変位を用いた転倒防止実験



(a) $c = 250$ [N s/m]



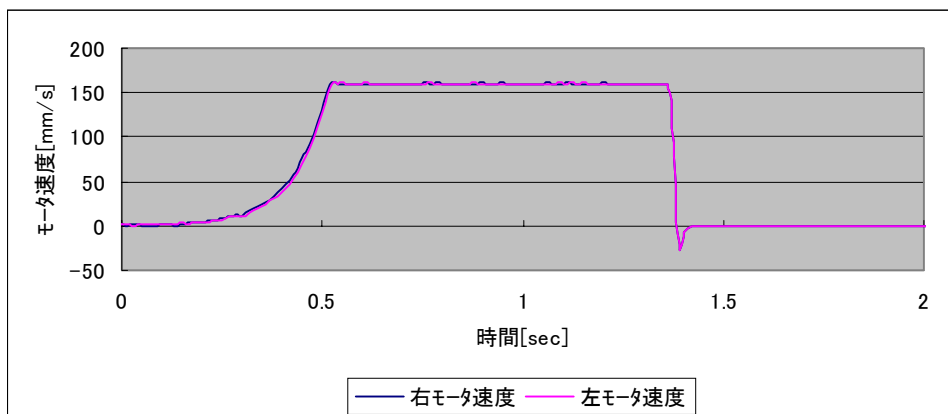
(b) $c = 350$ [N s/m]



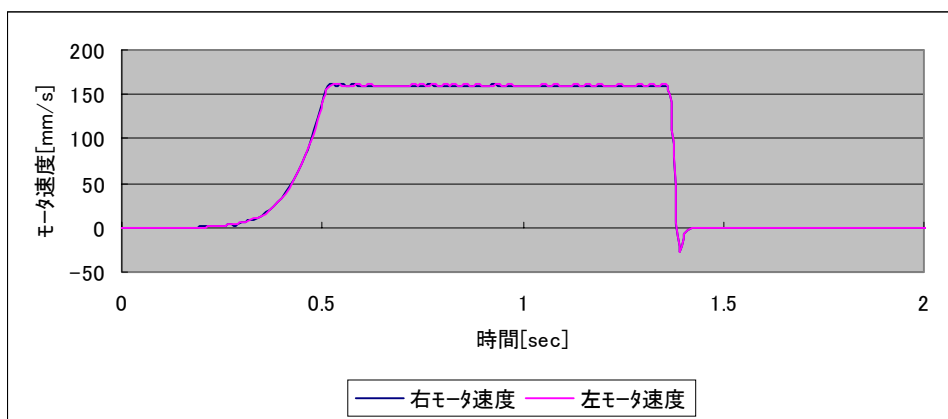
(c) $c = 450$ [N s/m]

図 5.3.1.5 転倒防止実験：モータ速度（被験者 B）

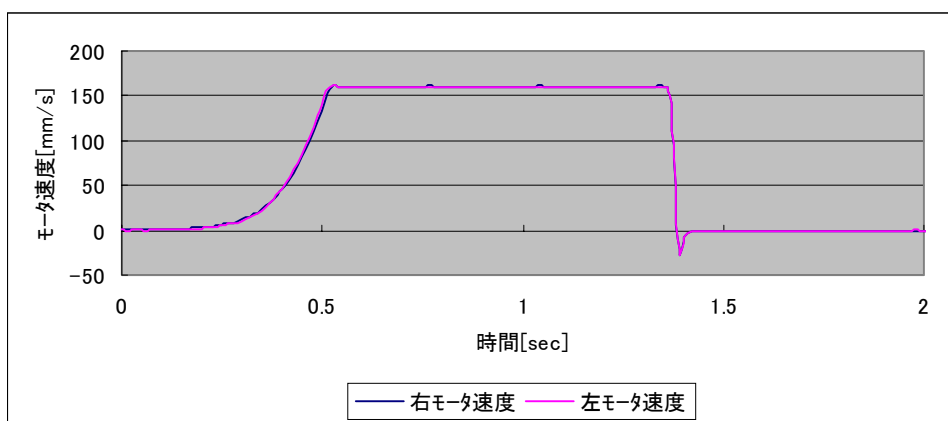
[グラフD] 変位を用いた転倒防止実験



(a) $c = 250$ [N s/m]



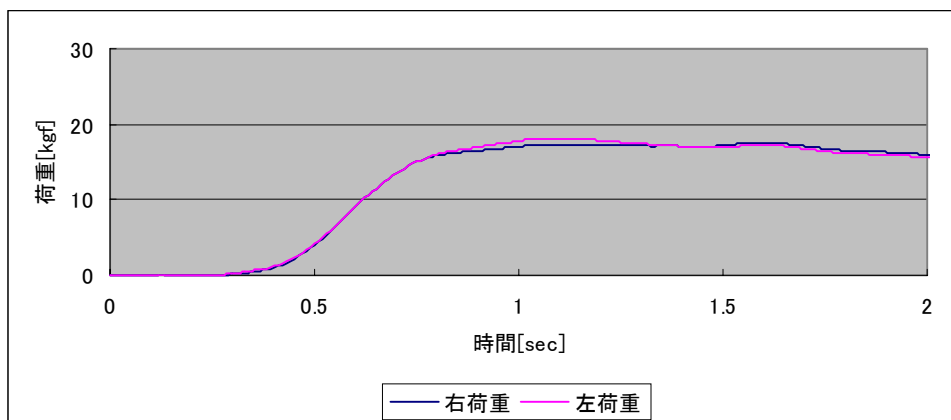
(b) $c = 350$ [N s/m]



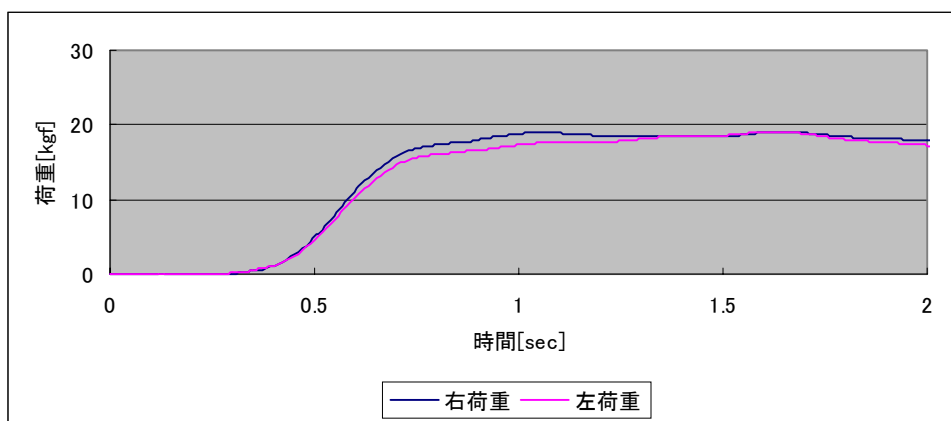
(c) $c = 450$ [N s/m]

図 5.3.1.6 転倒防止実験：モータ速度（被験者 C）

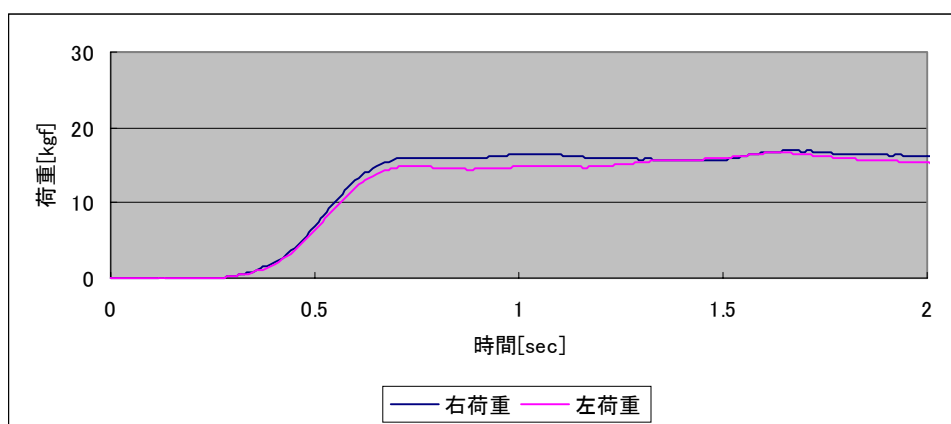
[グラフD] 変位を用いた転倒防止実験



(a) $c = 250 \text{ [N s/m]}$



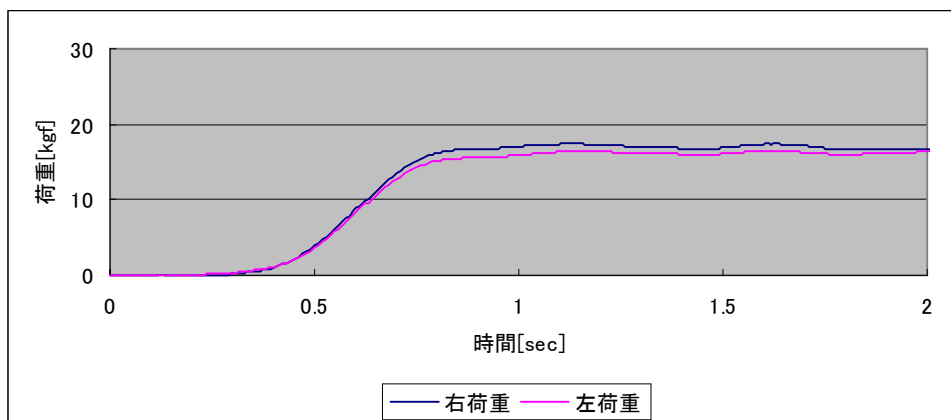
(b) $c = 350 \text{ [N s/m]}$



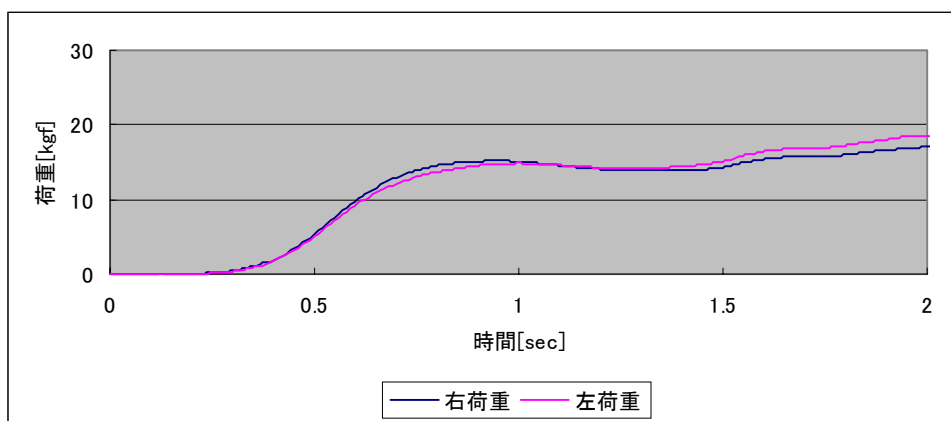
(c) $c = 450 \text{ [N s/m]}$

図 5.3.1.7 転倒防止実験：荷重（被験者 A）

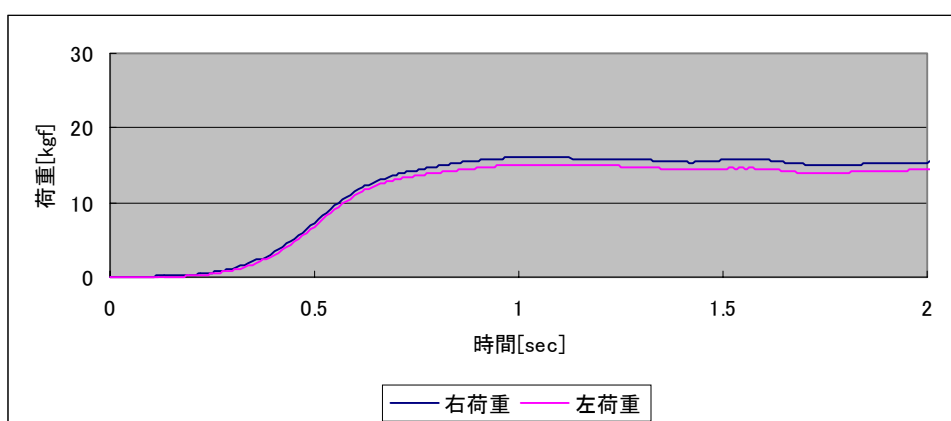
[グラフD] 変位を用いた転倒防止実験



(a) $c = 250 \text{ [N s/m]}$



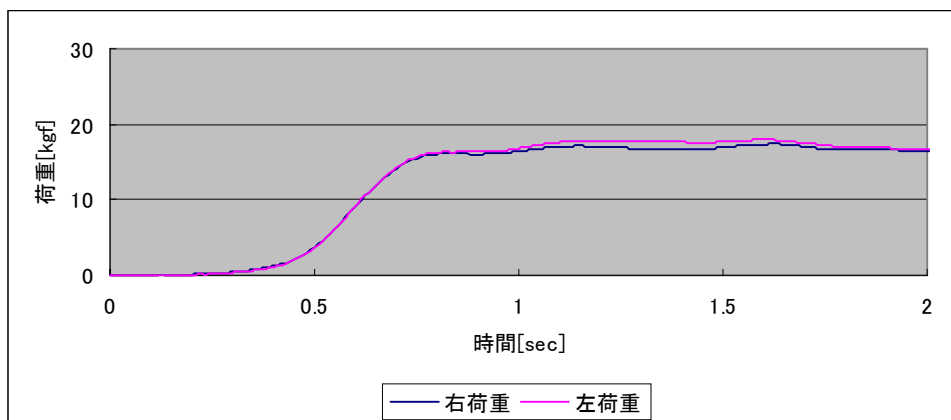
(b) $c = 350 \text{ [N s/m]}$



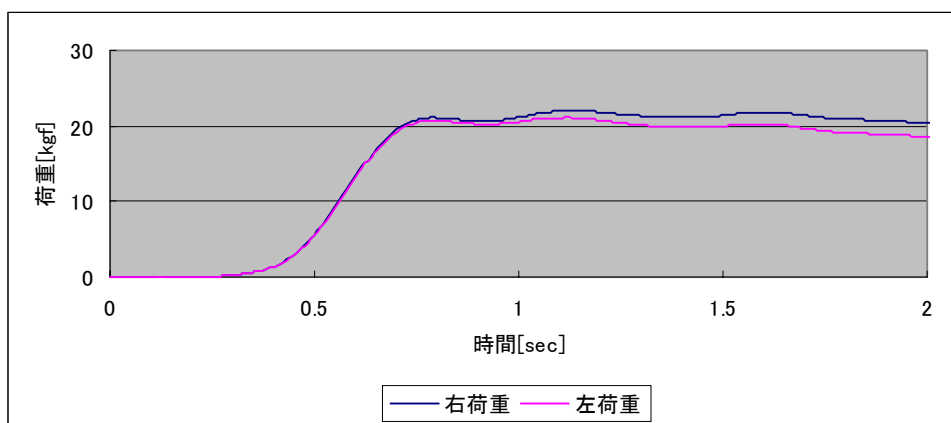
(c) $c = 450 \text{ [N s/m]}$

図 5.3.1.8 転倒防止実験：荷重（被験者B）

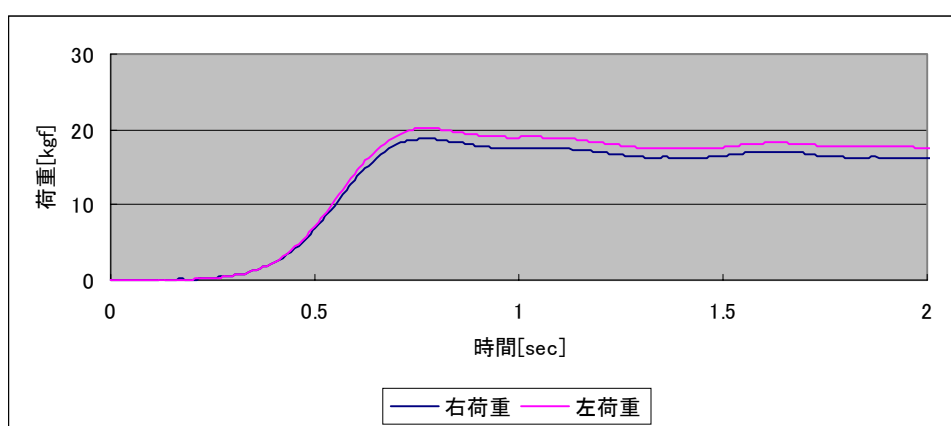
[グラフD] 変位を用いた転倒防止実験



(a) $c = 250 \text{ [N s/m]}$



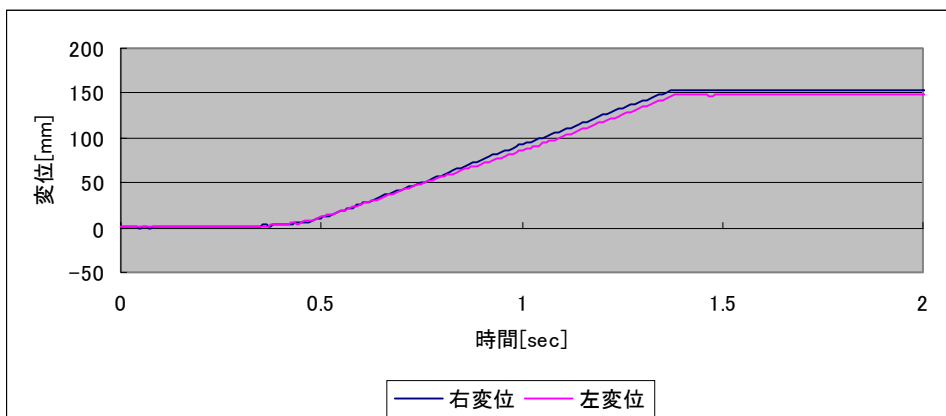
(b) $c = 350 \text{ [N s/m]}$



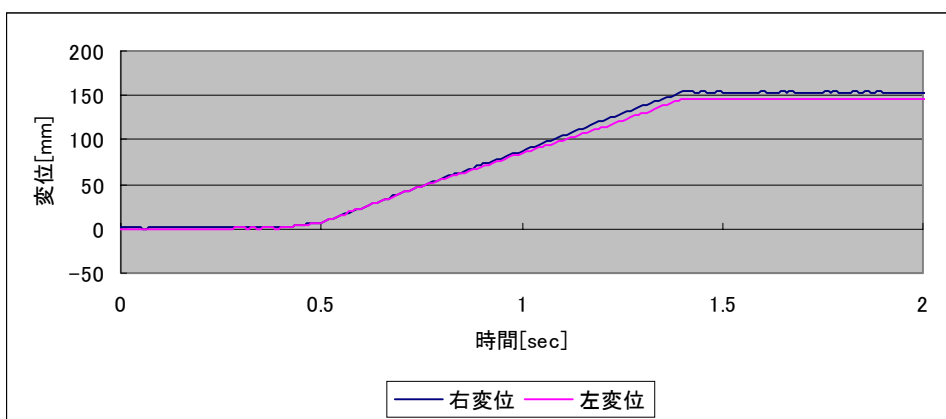
(c) $c = 450 \text{ [N s/m]}$

図 5.3.1.9 転倒防止実験：荷重（被験者 C）

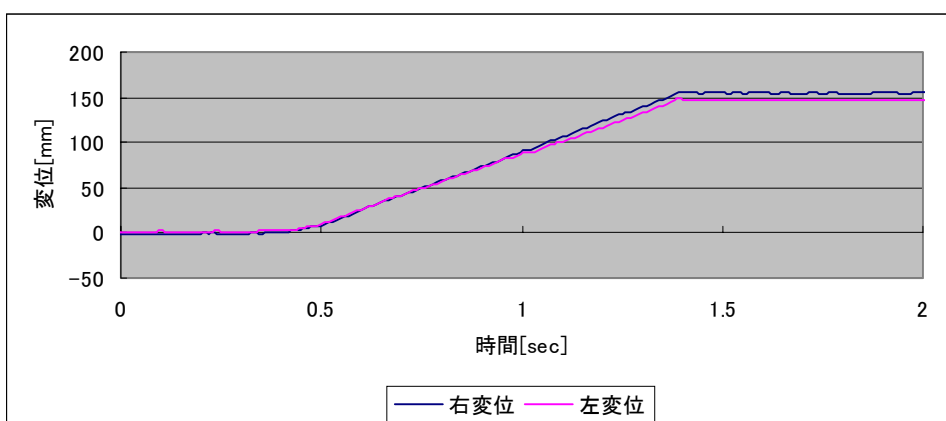
[グラフD] 変位を用いた転倒防止実験



(a) $c = 250$ [N s/m]



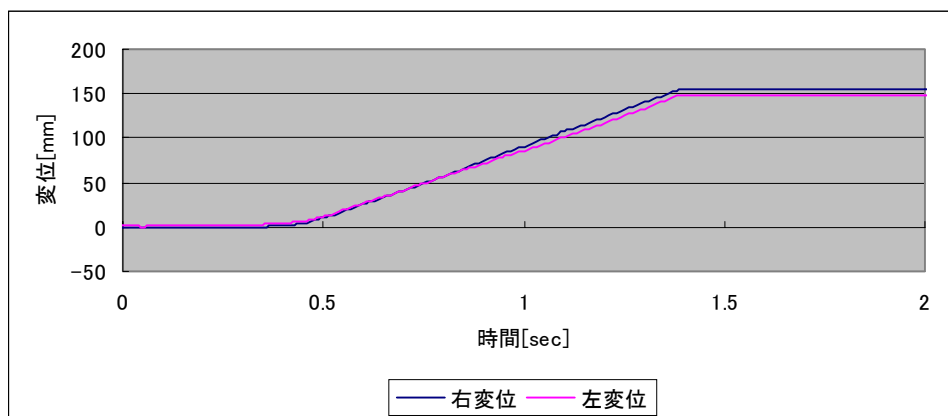
(b) $c = 350$ [N s/m]



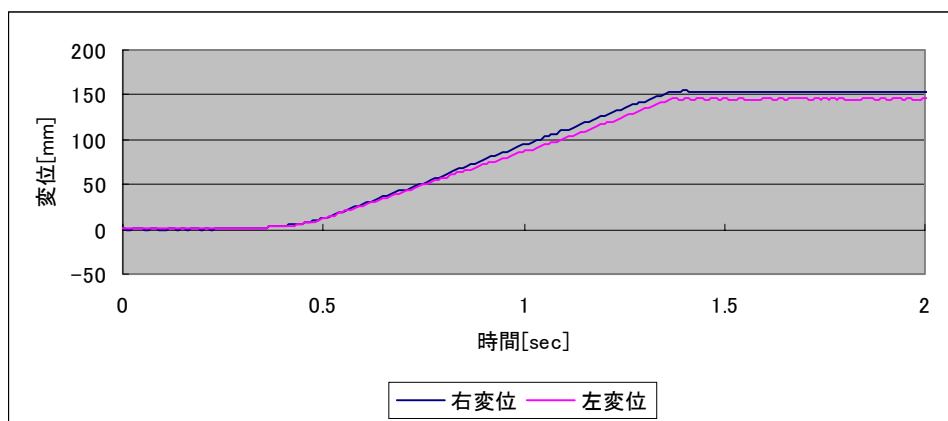
(c) $c = 450$ [N s/m]

図 5.3.1.10 転倒防止実験：変位（被験者 A）

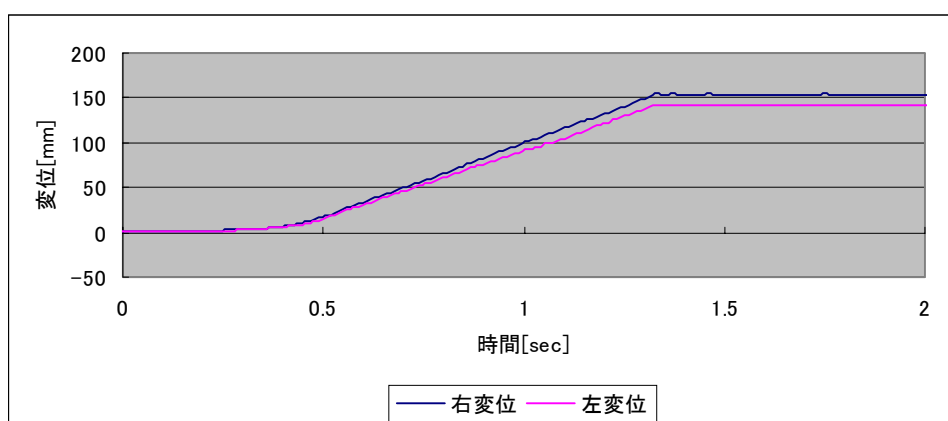
[グラフD] 変位を用いた転倒防止実験



(a) $c = 250$ [N s/m]



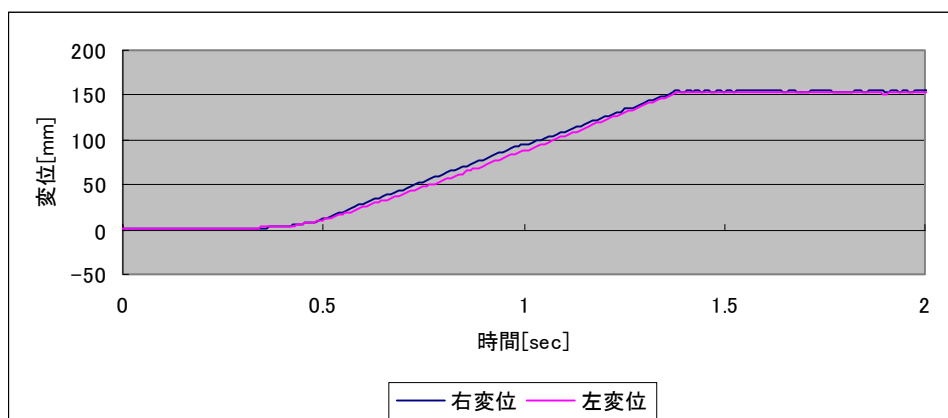
(b) $c = 350$ [N s/m]



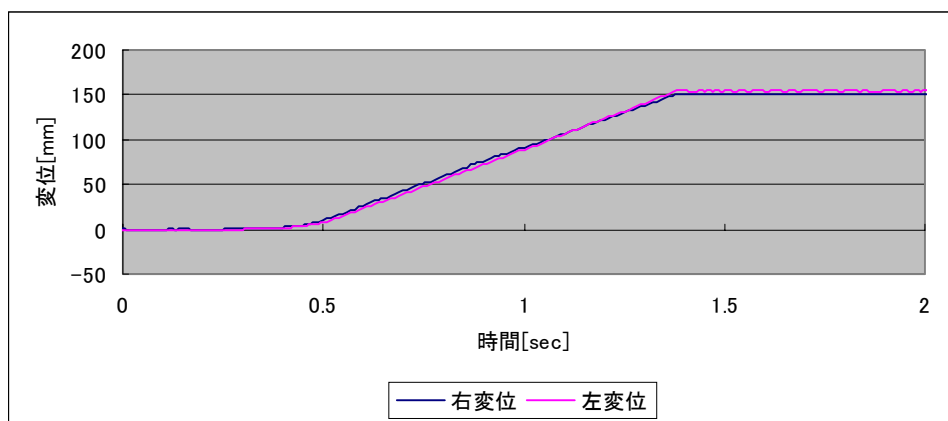
(c) $c = 450$ [N s/m]

図 5.3.1.11 転倒防止実験：変位（被験者 B）

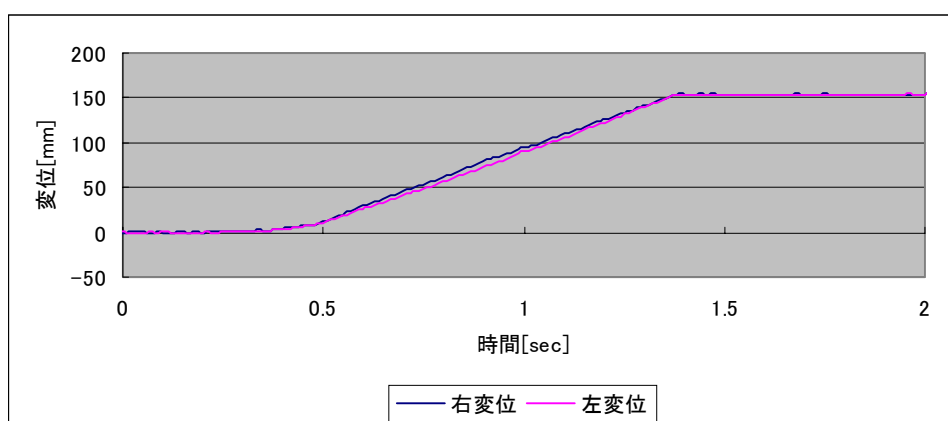
[グラフD] 変位を用いた転倒防止実験



(a) $c = 250$ [N s/m]



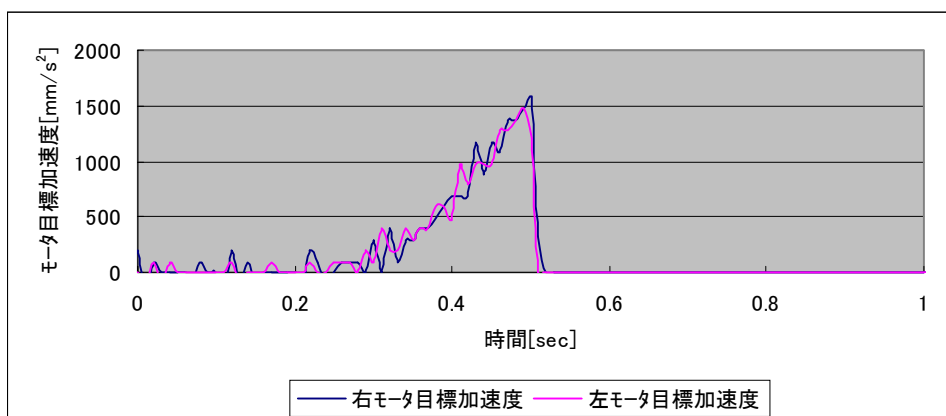
(b) $c = 350$ [N s/m]



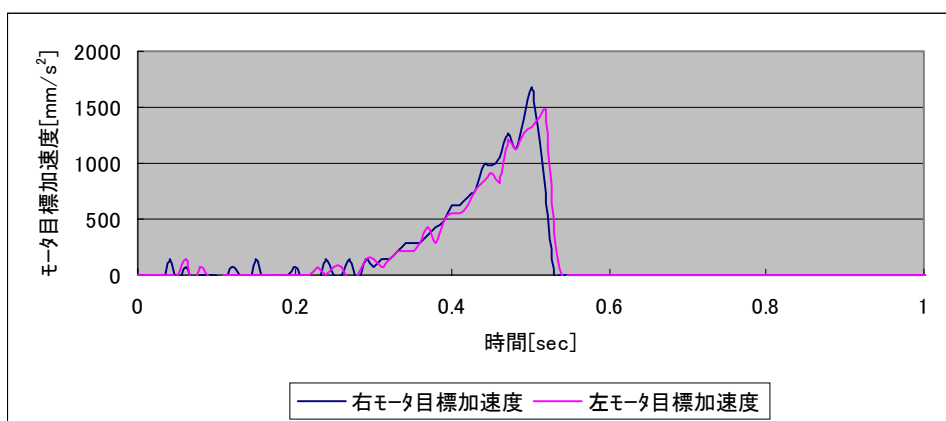
(c) $c = 450$ [N s/m]

図 5.3.1.12 転倒防止実験：変位（被験者 C）

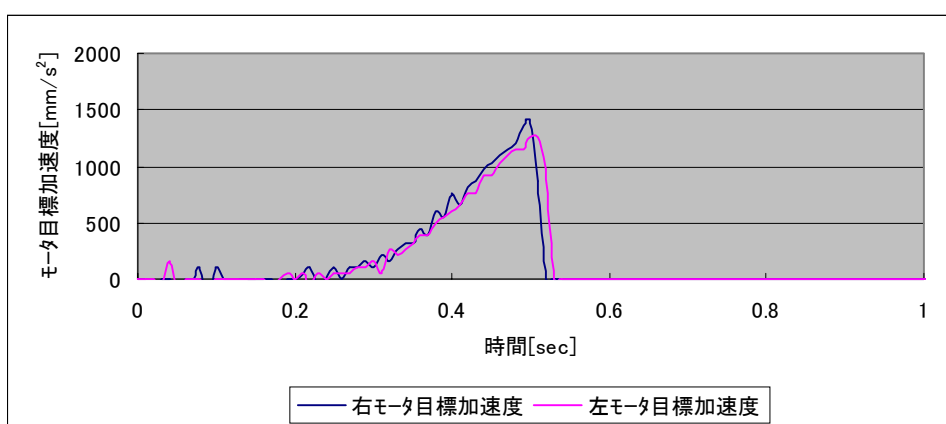
[グラフD] 変位を用いた転倒防止実験



(a) $c = 250$ [N s/m]



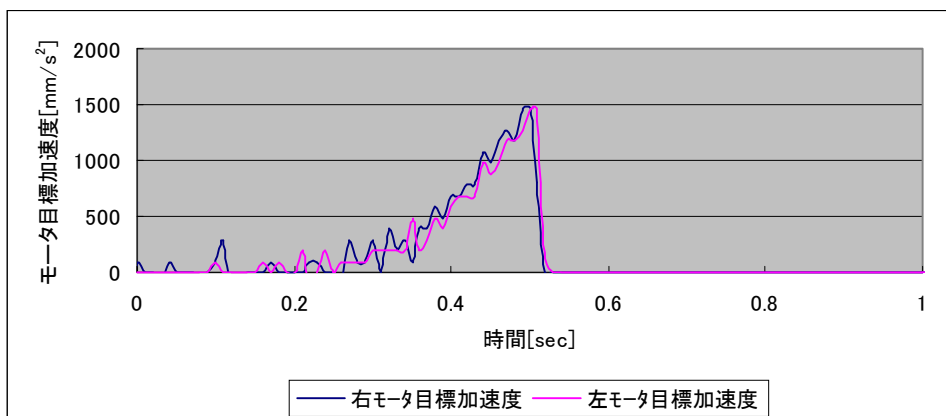
(b) $c = 350$ [N s/m]



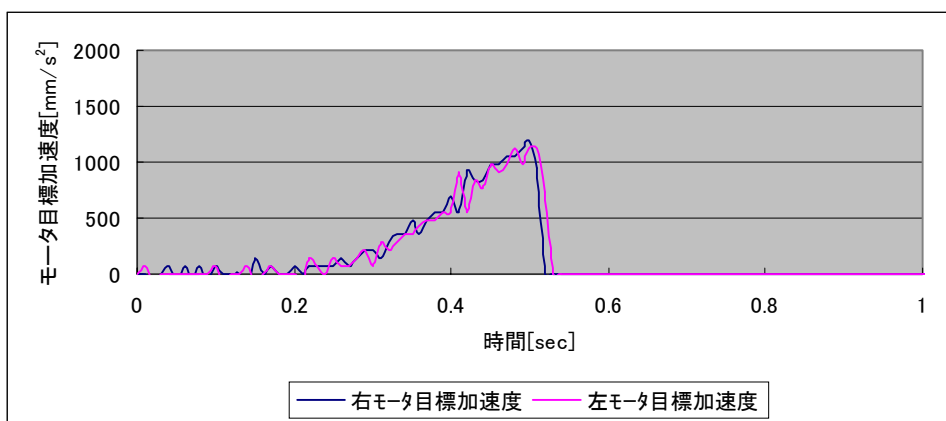
(c) $c = 450$ [N s/m]

図 5.3.1.13 転倒防止実験：モータ目標加速度（被験者 A）

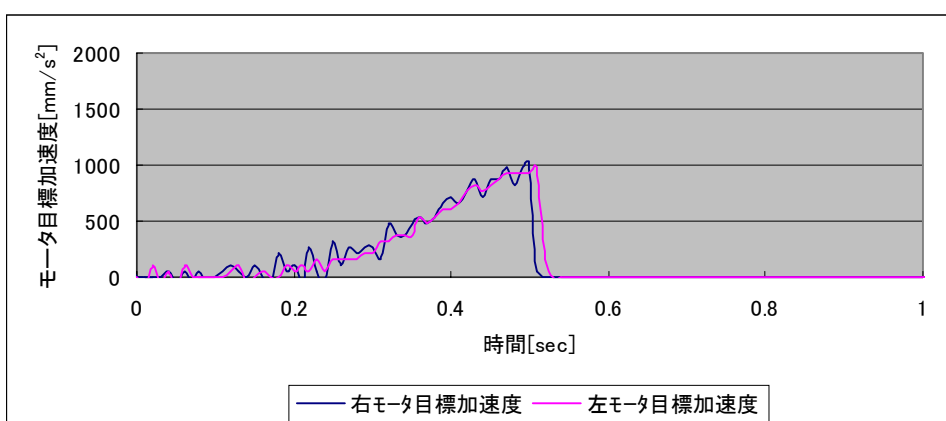
[グラフD] 変位を用いた転倒防止実験



(a) $c = 250$ [N s/m]



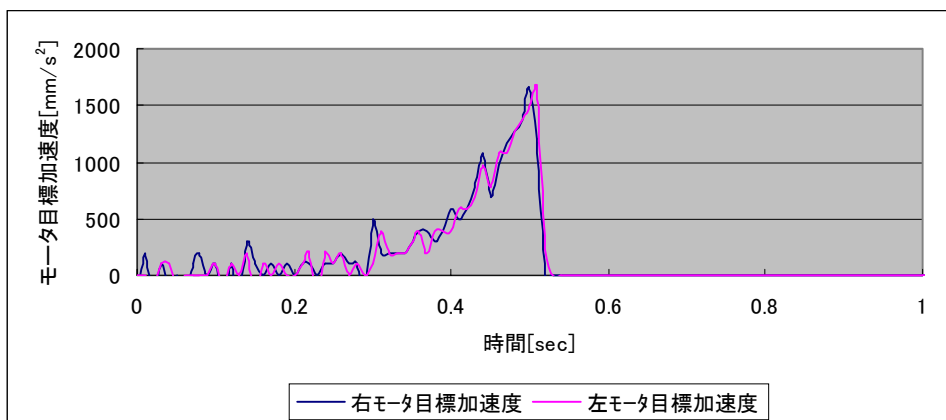
(b) $c = 350$ [N s/m]



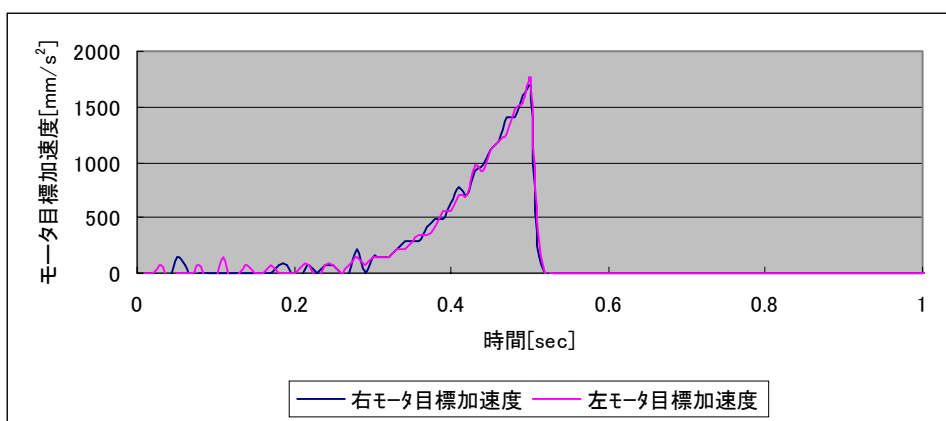
(c) $c = 450$ [N s/m]

図 5.3.1.14 転倒防止実験：モータ目標加速度（被験者 B）

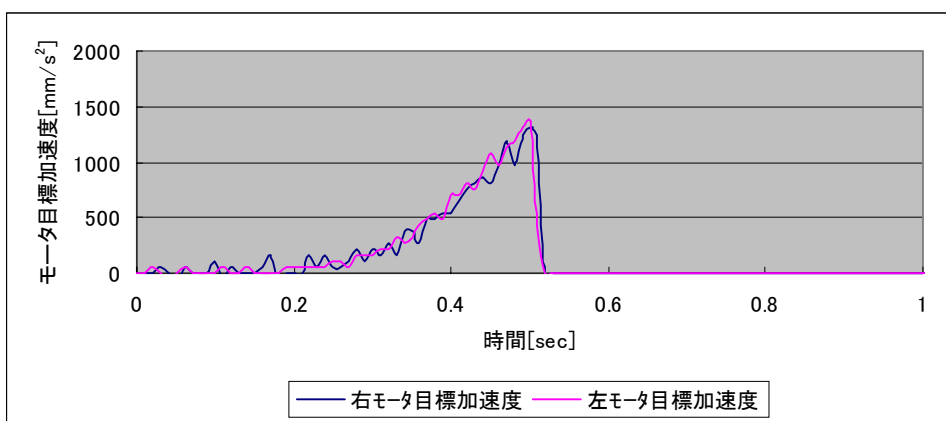
[グラフD] 変位を用いた転倒防止実験



(a) $c = 250$ [N s/m]



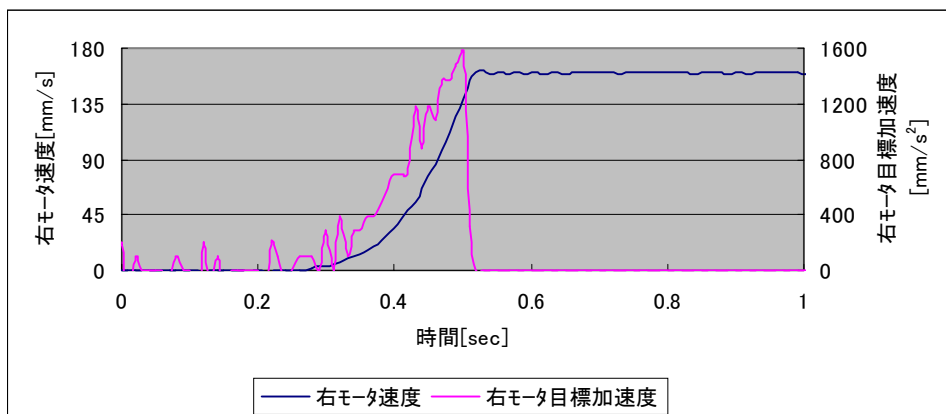
(b) $c = 350$ [N s/m]



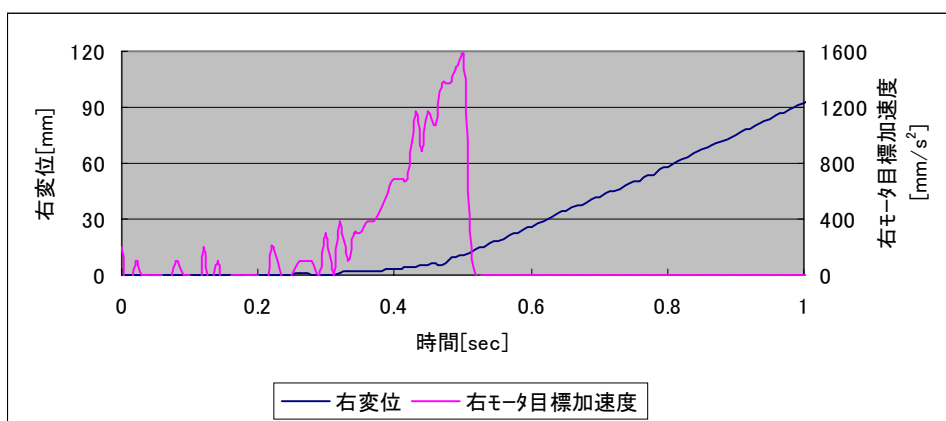
(c) $c = 450$ [N s/m]

図 5.3.1.15 転倒防止実験：モータ目標加速度（被験者 C）

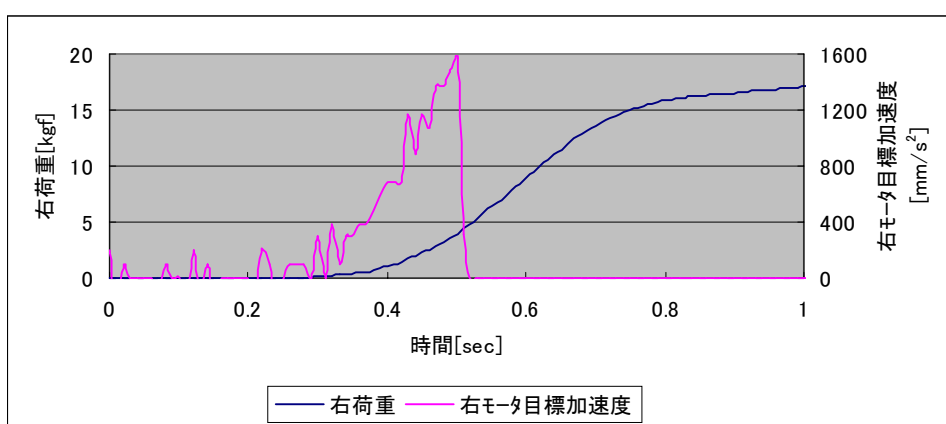
[グラフ E] 転倒時のモータ目標加速度との比較



(a)速度とモータ目標加速度



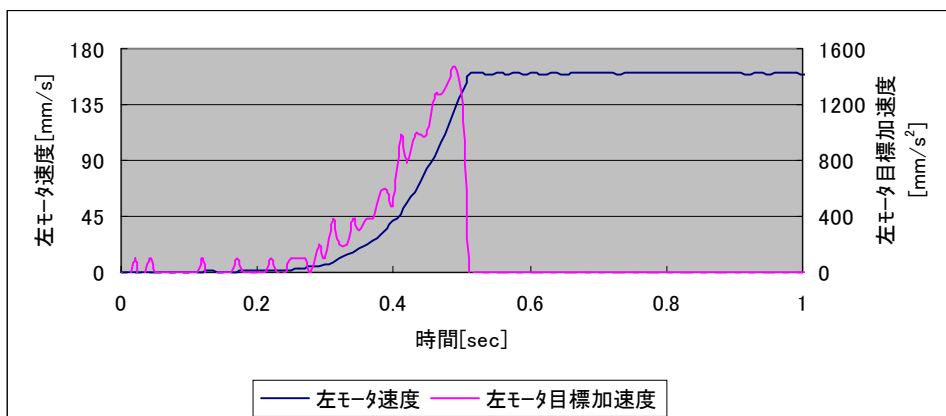
(b)変位とモータ目標加速度



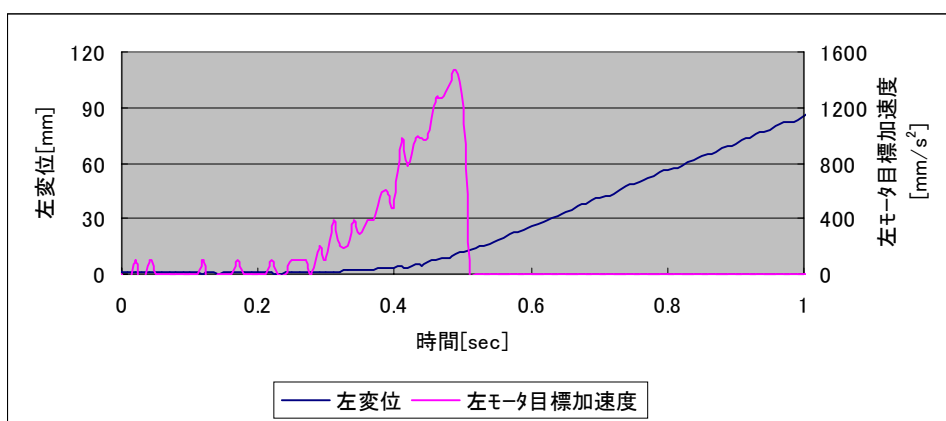
(c)荷重とモータ目標加速度

図 5.3.2.1 転倒時のモータ目標加速度との比較：右 ($c = 250$ [N s/m], 被験者 A)

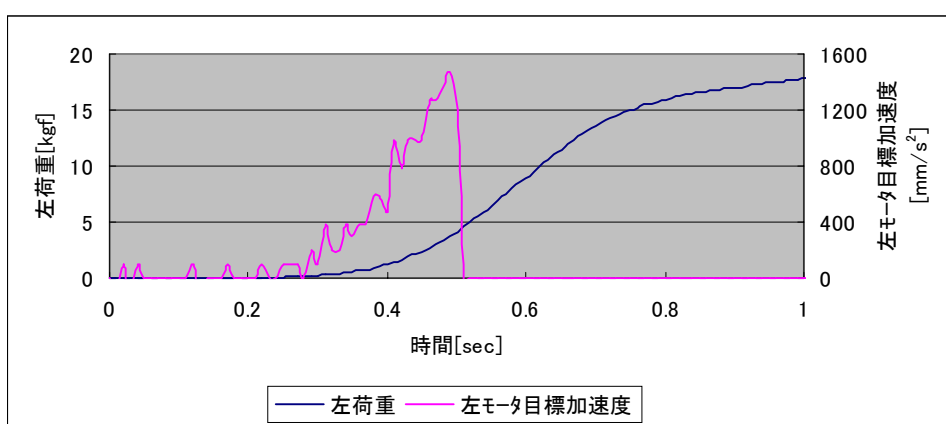
[グラフ E] 転倒時のモータ目標加速度との比較



(a)速度とモータ目標加速度



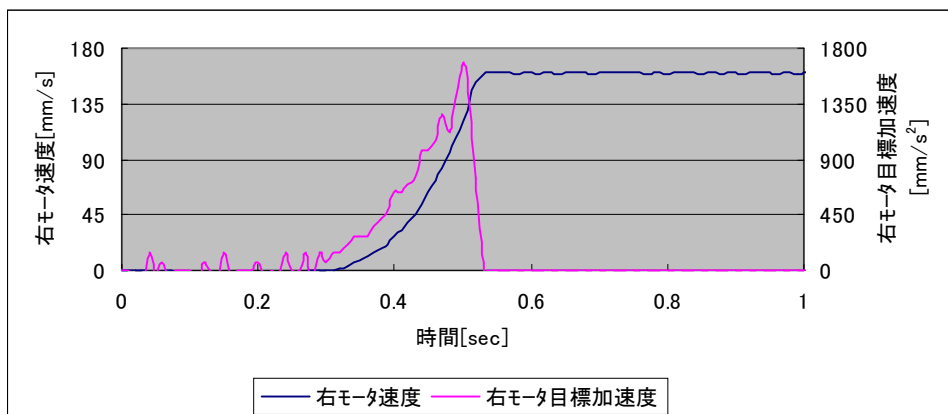
(b)変位とモータ目標加速度



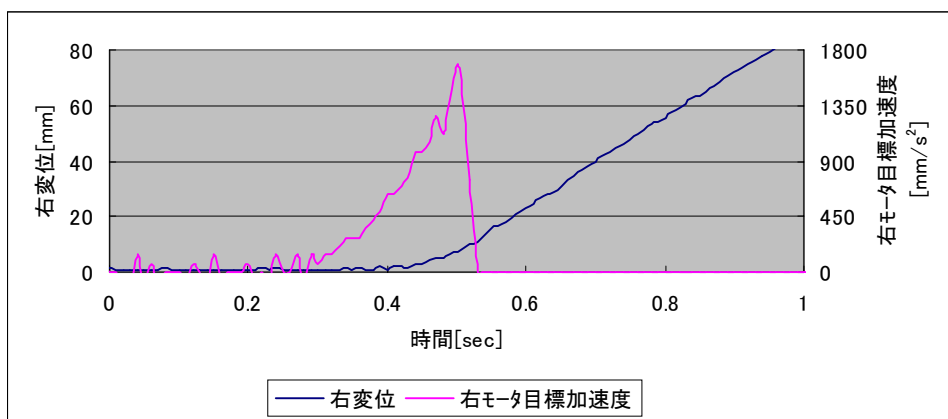
(c)荷重とモータ目標加速度

図 5.3.2.2 転倒時のモータ目標加速度との比較：左 ($c = 250$ [N s/m], 被験者 A)

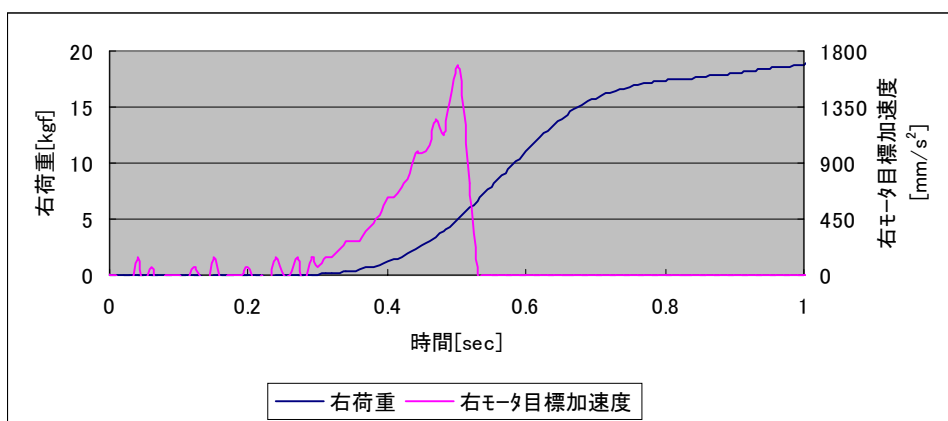
[グラフ E] 転倒時のモータ目標加速度との比較



(a)速度とモータ目標加速度



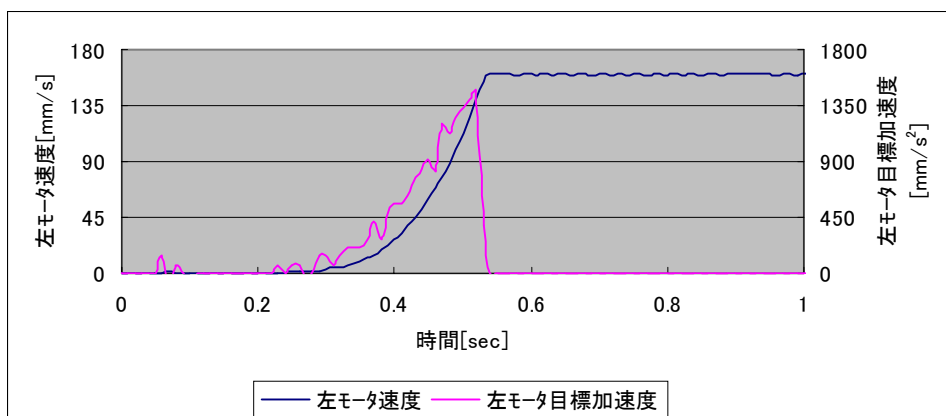
(b)変位とモータ目標加速度



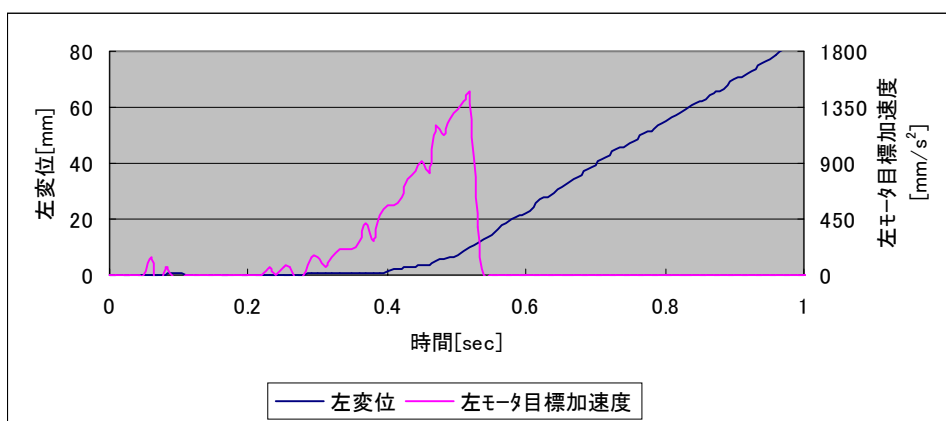
(c)荷重とモータ目標加速度

図 5.3.2.3 転倒時のモータ目標加速度との比較：右 ($c = 350$ [N s/m], 被験者 A)

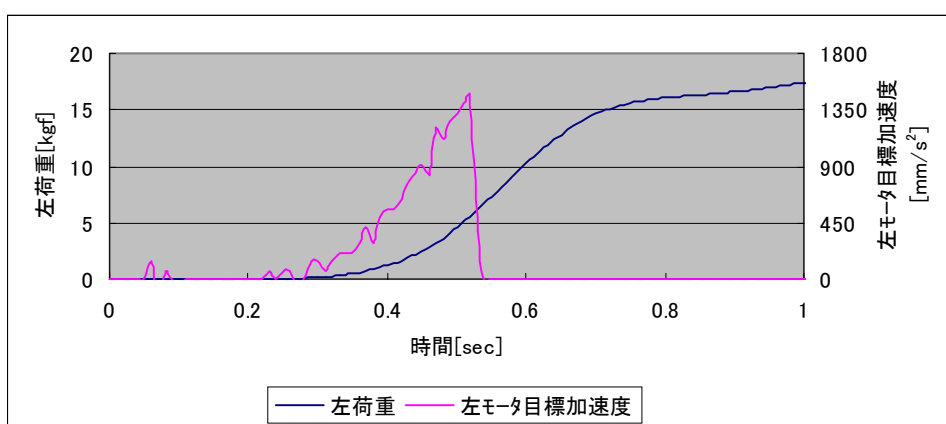
[グラフ E] 転倒時のモータ目標加速度との比較



(a)速度とモータ目標加速度



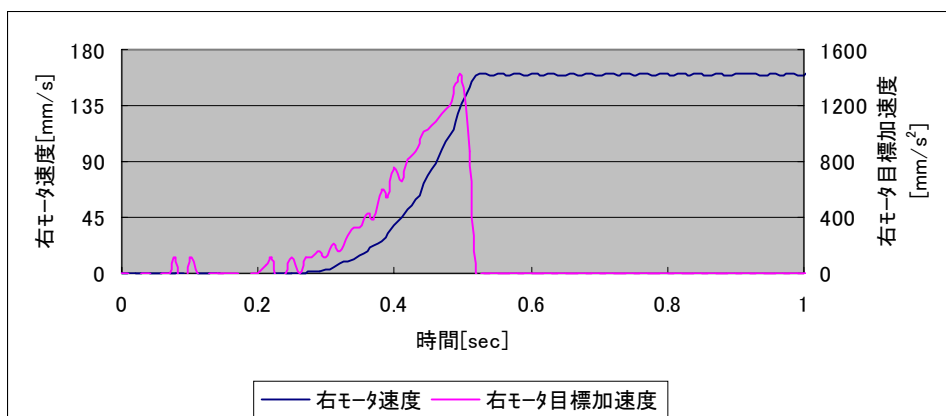
(b)変位とモータ目標加速度



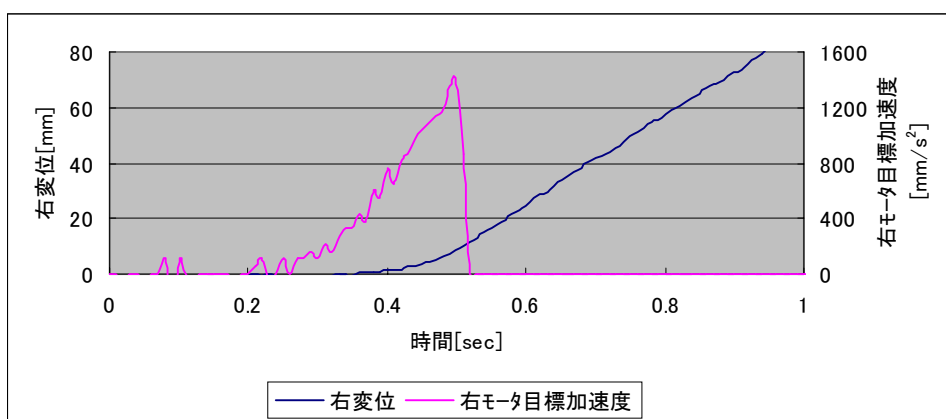
(c)荷重とモータ目標加速度

図 5.3.2.4 転倒時のモータ目標加速度との比較：左 ($c = 350$ [N s/m], 被験者 A)

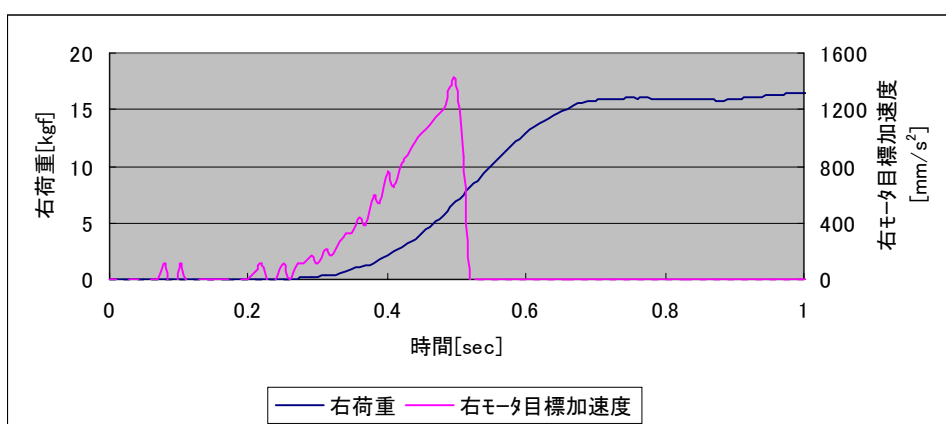
[グラフ E] 転倒時のモータ目標加速度との比較



(a)速度とモータ目標加速度



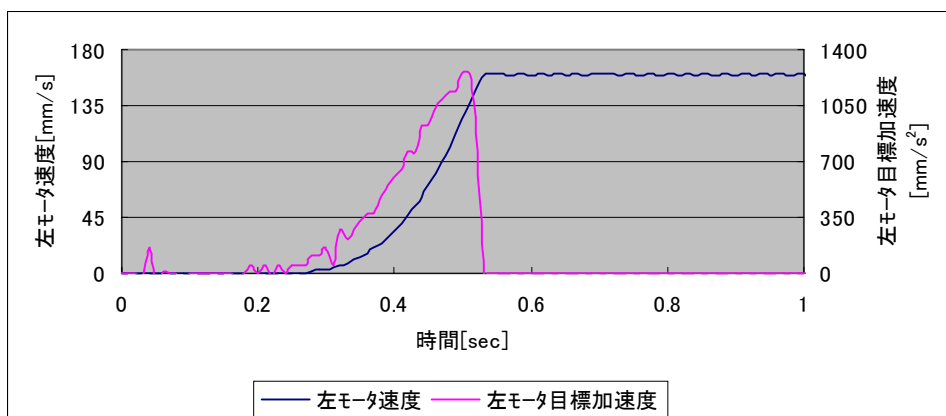
(b)変位とモータ目標加速度



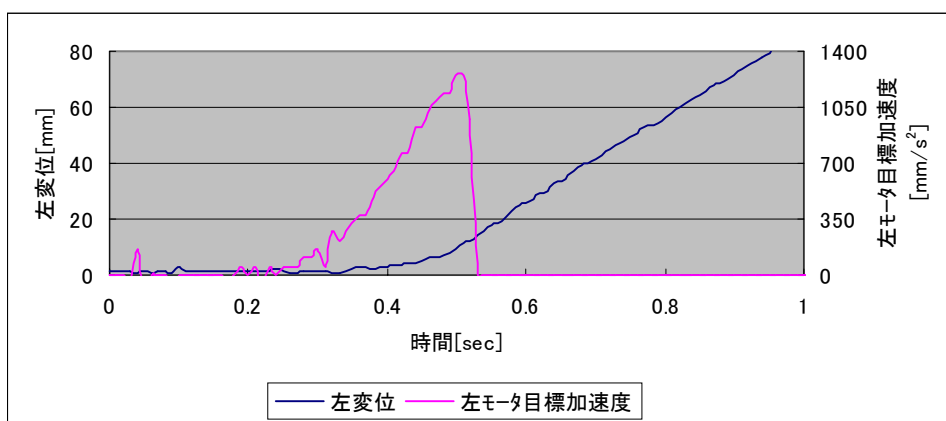
(c)荷重とモータ目標加速度

図 5.3.2.5 転倒時のモータ目標加速度との比較：右 ($c = 450$ [N s/m], 被験者 A)

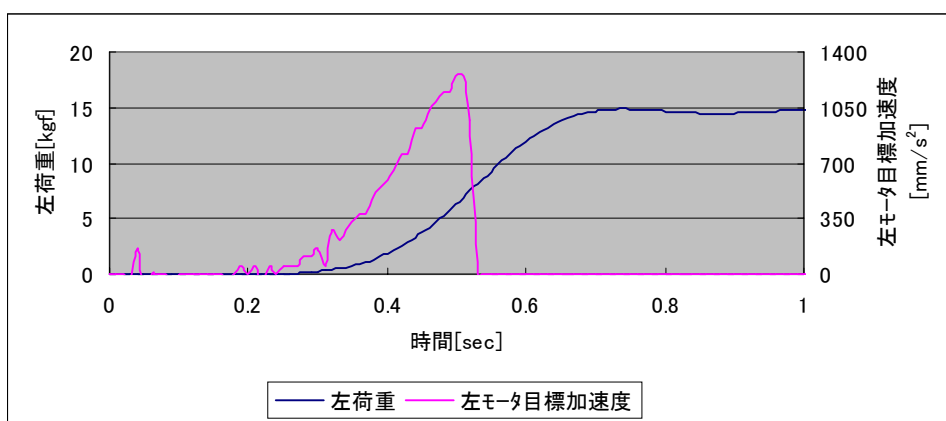
[グラフ E] 転倒時のモータ目標加速度との比較



(a)速度とモータ目標加速度



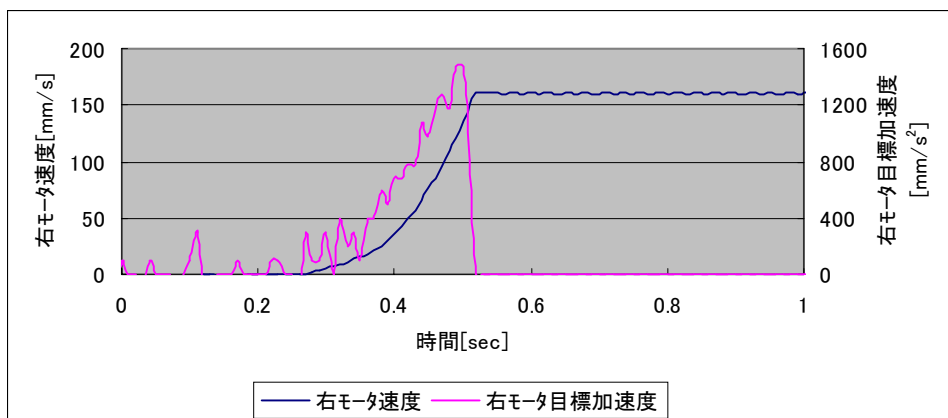
(b)変位とモータ目標加速度



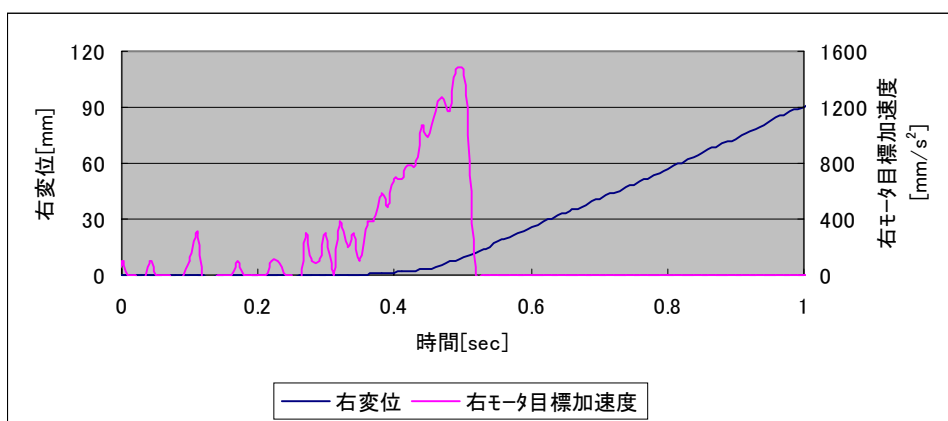
(c)荷重とモータ目標加速度

図 5.3.2.6 転倒時のモータ目標加速度との比較：左 ($c = 450$ [N s/m] , 被験者 A)

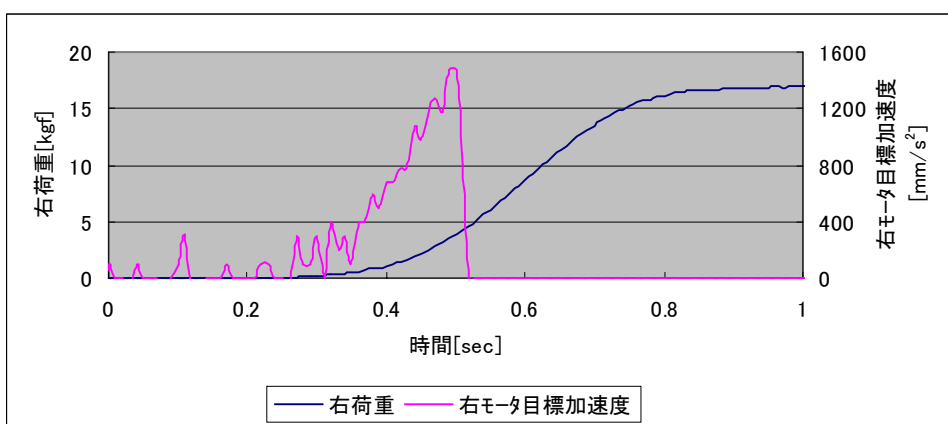
[グラフ E] 転倒時のモータ目標加速度との比較



(a)速度とモータ目標加速度



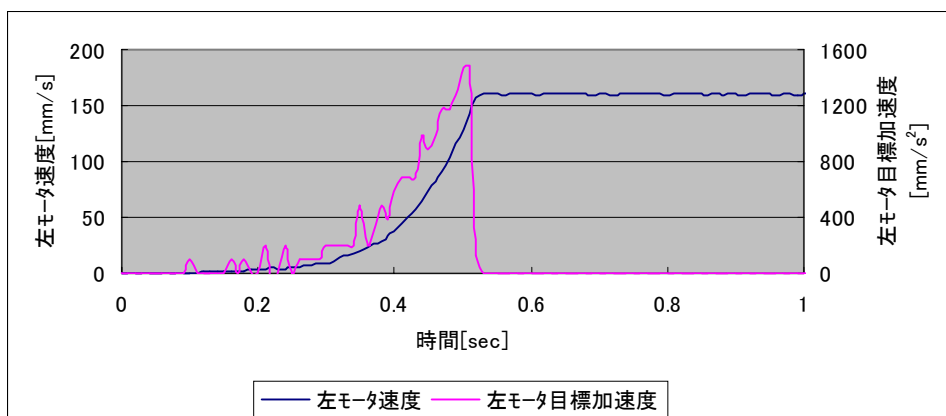
(b)変位とモータ目標加速度



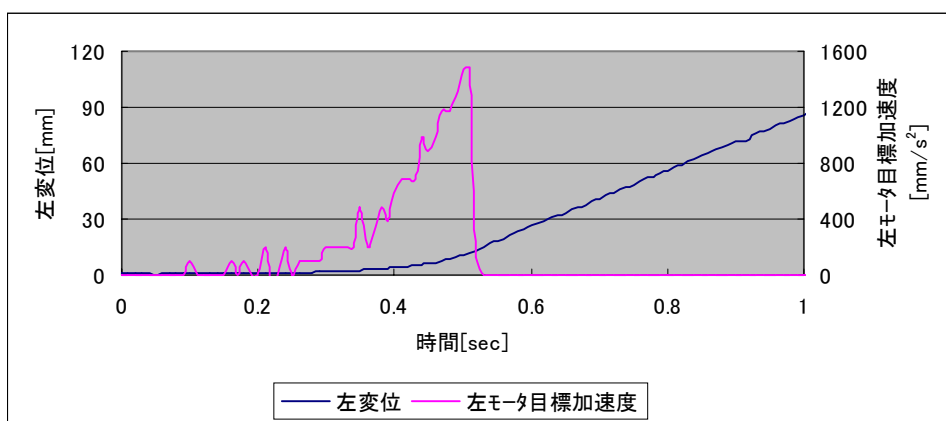
(c)荷重とモータ目標加速度

図 5.3.2.7 転倒時のモータ目標加速度との比較：右 ($c = 250$ [N s/m] , 被験者 B)

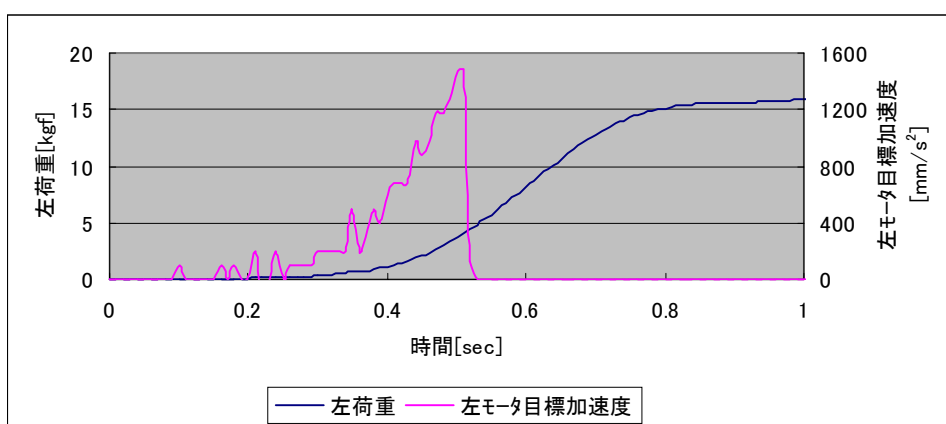
[グラフ E] 転倒時のモータ目標加速度との比較



(a)速度とモータ目標加速度



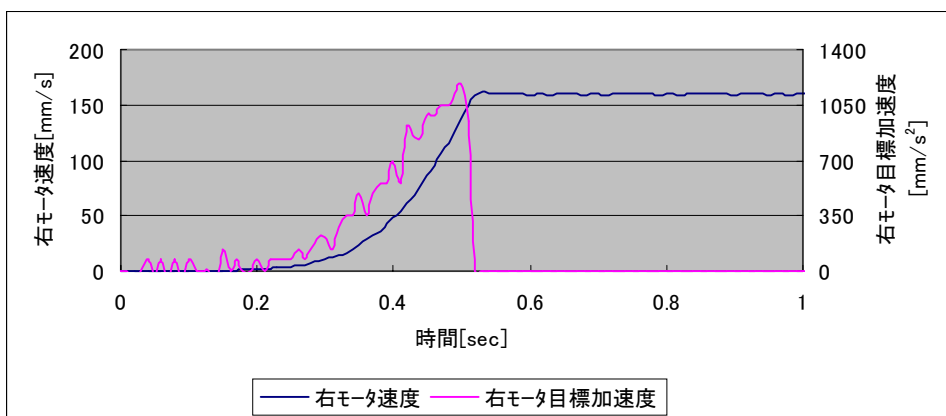
(b)変位とモータ目標加速度



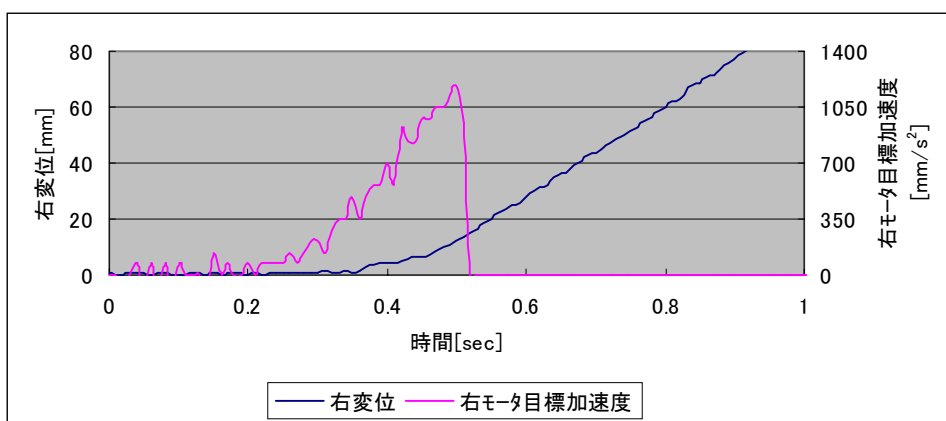
(c)荷重とモータ目標加速度

図 5.3.2.8 転倒時のモータ目標加速度との比較：左 ($c = 250$ [N s/m], 被験者 B)

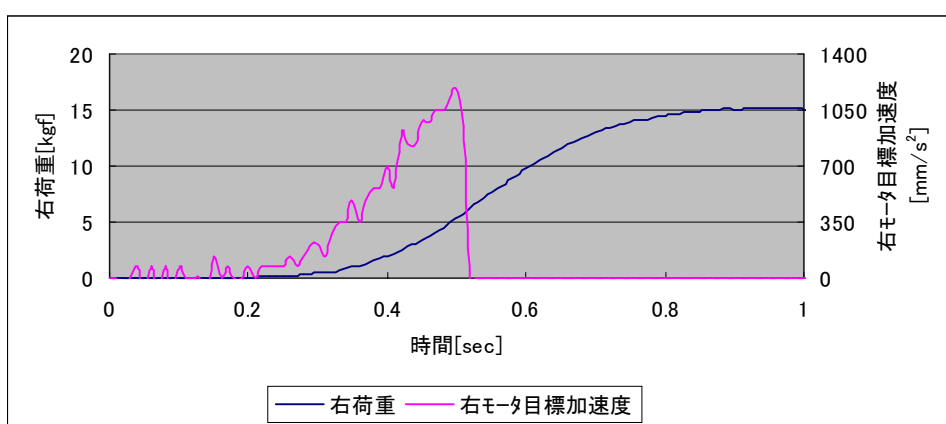
[グラフ E] 転倒時のモータ目標加速度との比較



(a)速度とモータ目標加速度



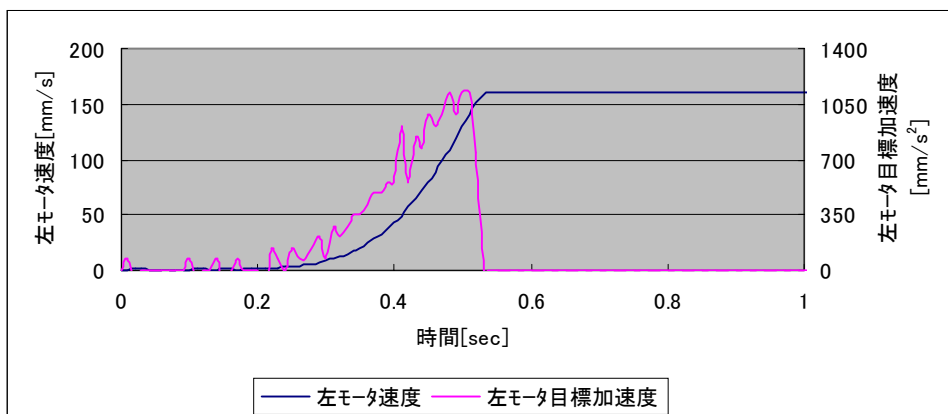
(b)変位とモータ目標加速度



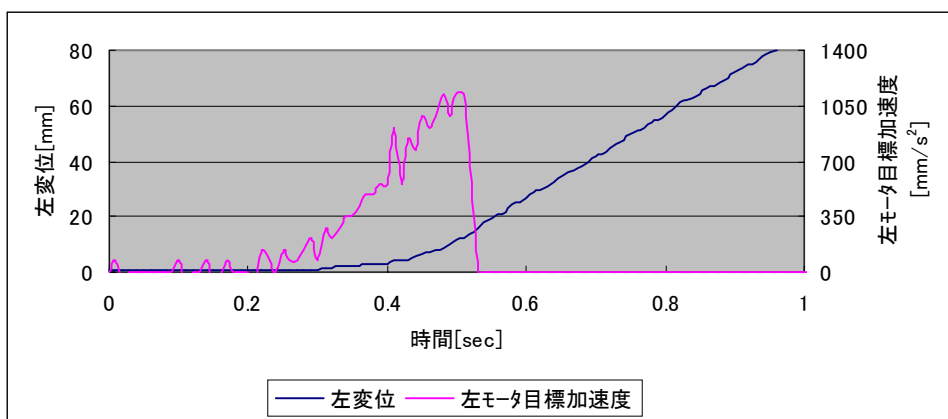
(c)荷重とモータ目標加速度

図 5.3.2.9 転倒時のモータ目標加速度との比較：右 ($c = 350$ [N s/m], 被験者 B)

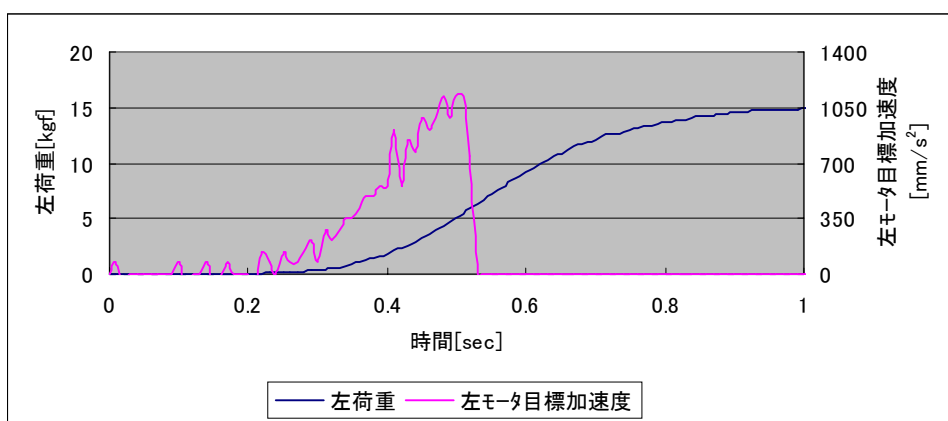
[グラフ E] 転倒時のモータ目標加速度との比較



(a)速度とモータ目標加速度



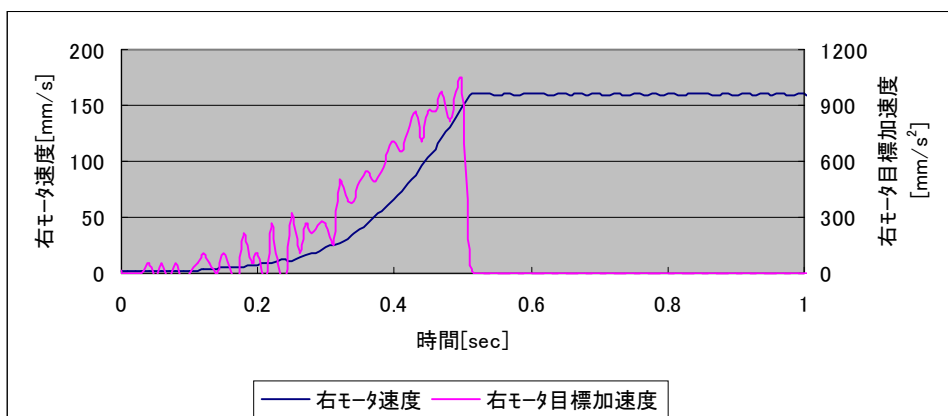
(b)変位とモータ目標加速度



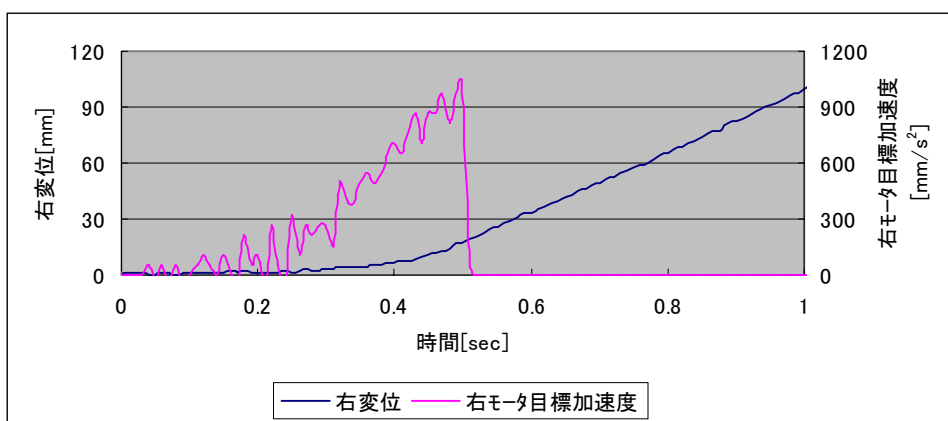
(c)荷重とモータ目標加速度

図 5.3.2.10 転倒時のモータ目標加速度との比較：左 ($c = 350$ [N s/m] , 被験者 B)

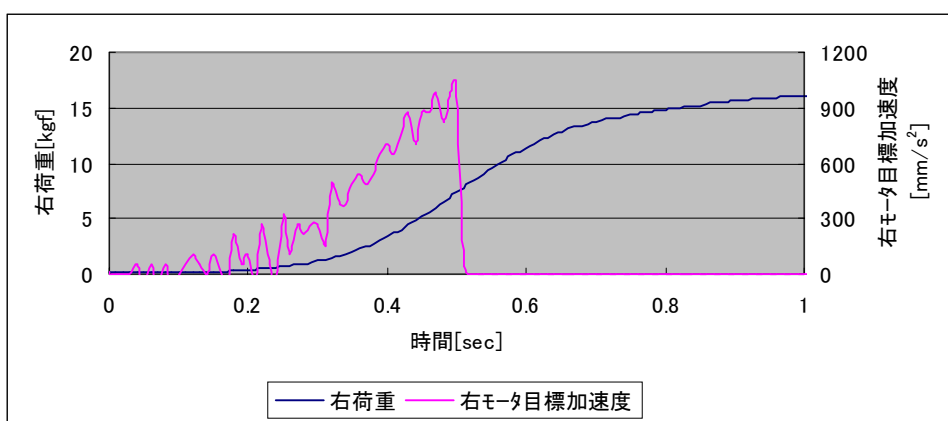
[グラフ E] 転倒時のモータ目標加速度との比較



(a)速度とモータ目標加速度



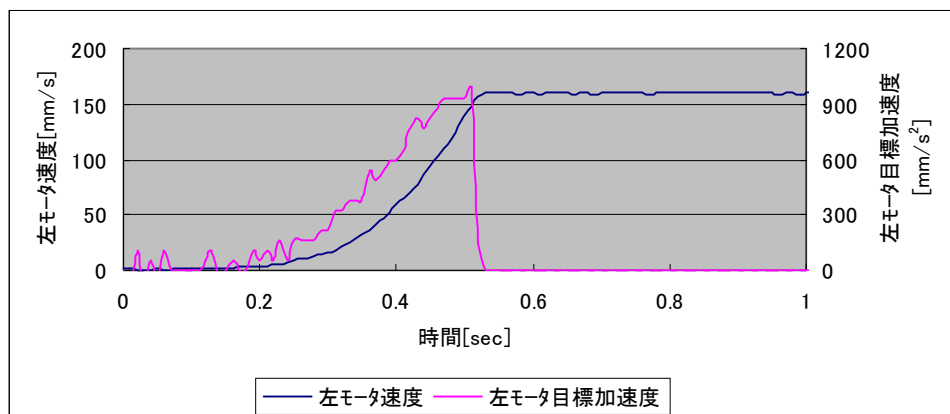
(b)変位とモータ目標加速度



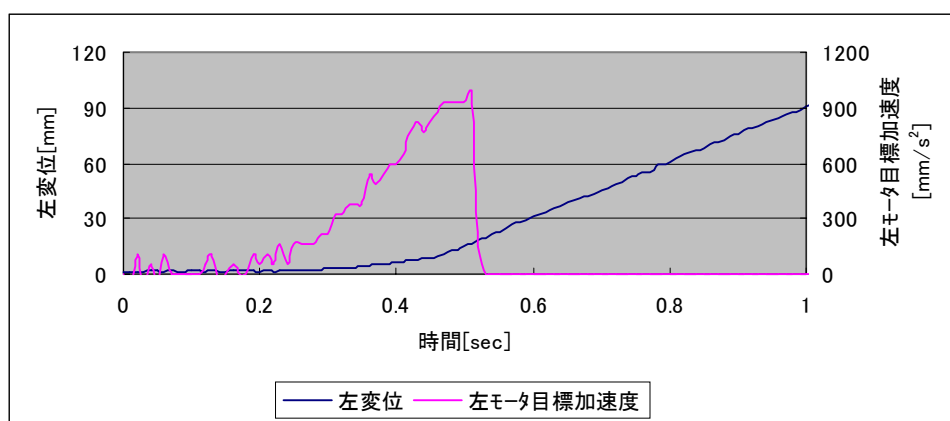
(c)荷重とモータ目標加速度

図 5.3.2.11 転倒時のモータ目標加速度との比較：右 ($c = 450$ [N s/m] , 被験者 B)

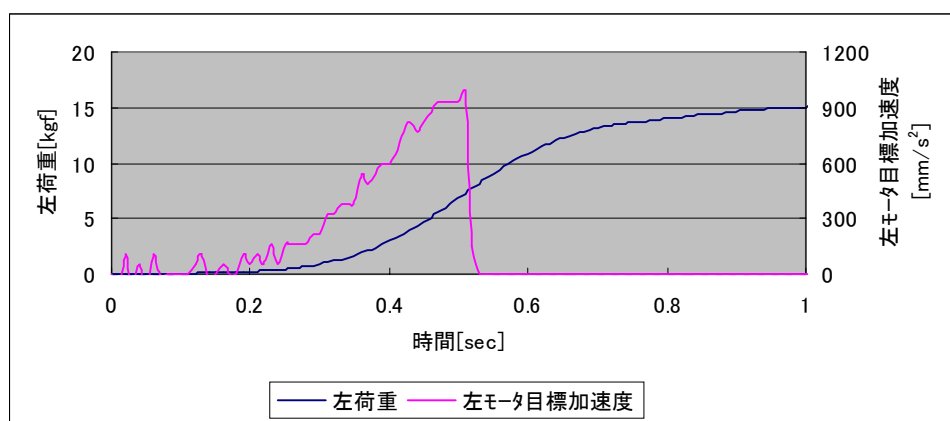
[グラフ E] 転倒時のモータ目標加速度との比較



(a)速度とモータ目標加速度



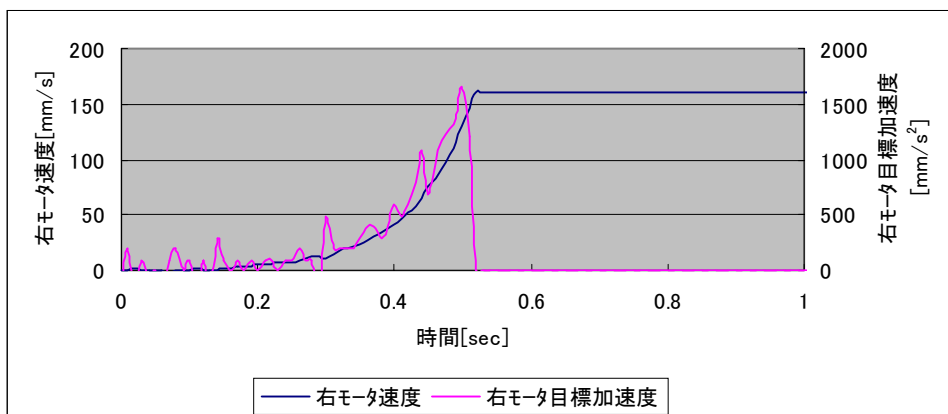
(b)変位とモータ目標加速度



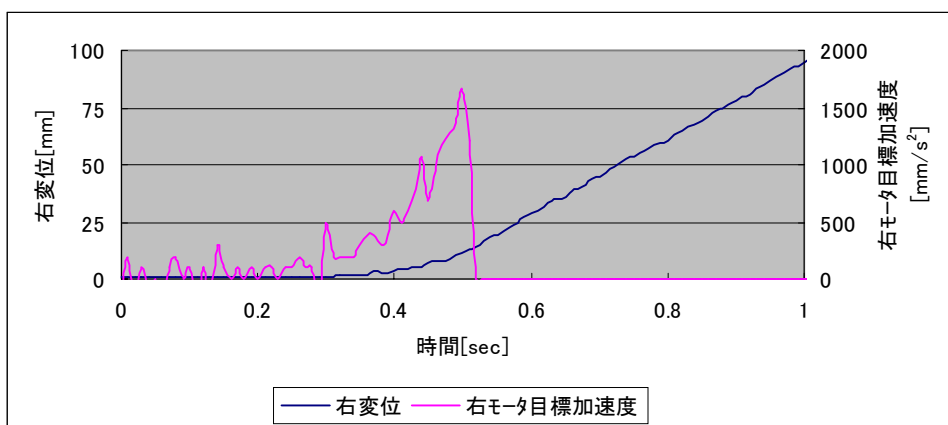
(c)荷重とモータ目標加速度

図 5.3.2.12 転倒時のモータ目標加速度との比較：左 ($c = 450$ [N s/m], 被験者 B)

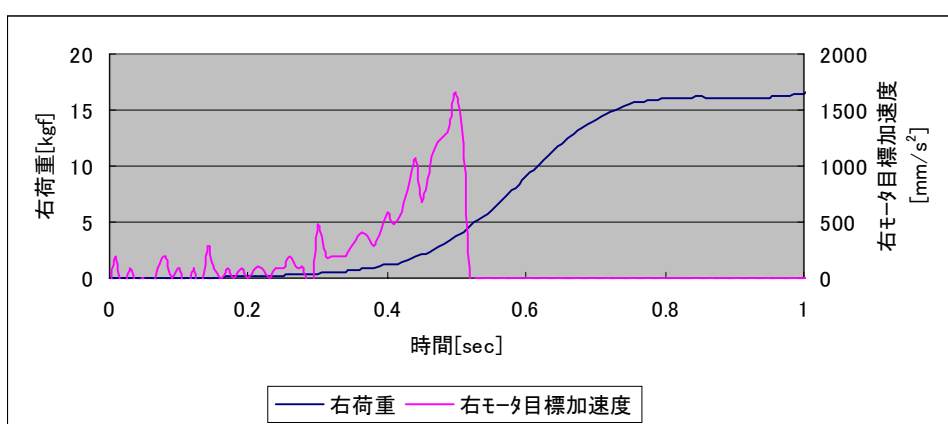
[グラフ E] 転倒時のモータ目標加速度との比較



(a)速度とモータ目標加速度



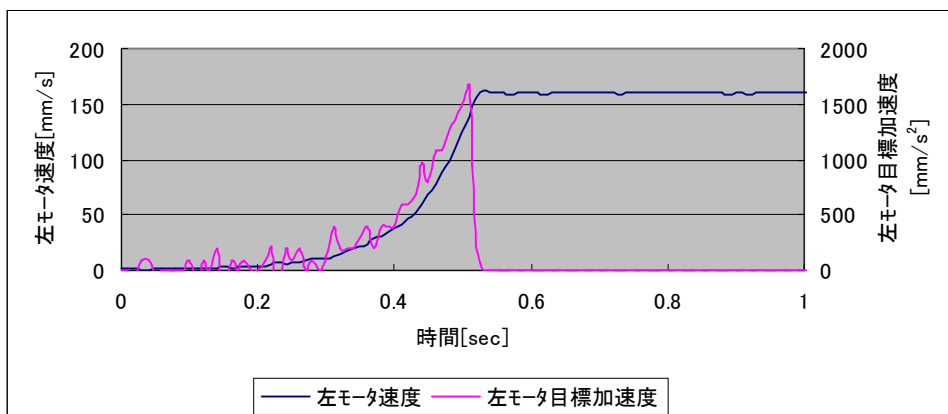
(b)変位とモータ目標加速度



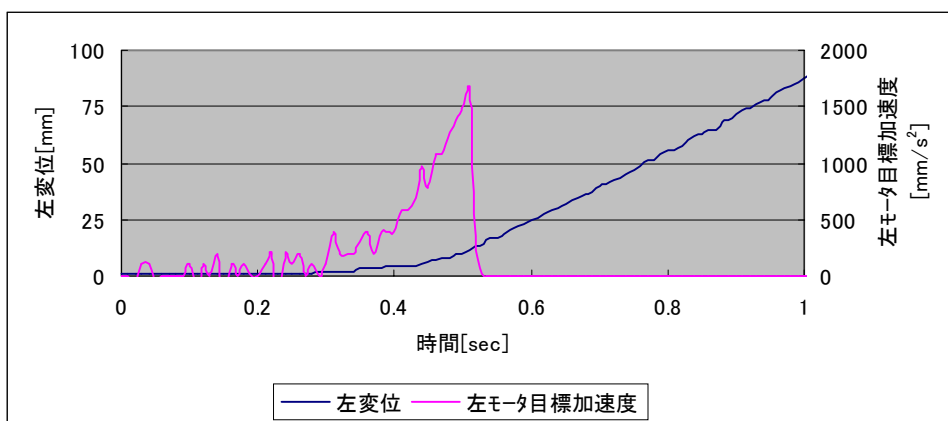
(c)荷重とモータ目標加速度

図 5.3.2.13 転倒時のモータ目標加速度との比較：右 ($c = 250$ [N s/m], 被験者 C)

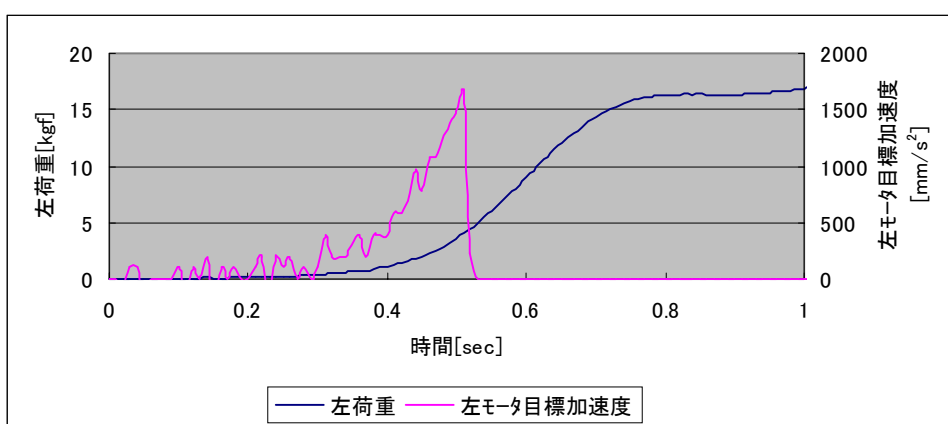
[グラフ E] 転倒時のモータ目標加速度との比較



(a)速度とモータ目標加速度



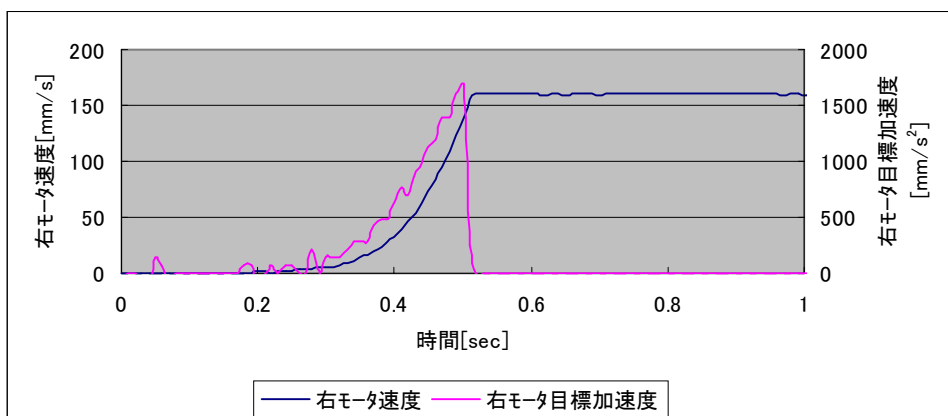
(b)変位とモータ目標加速度



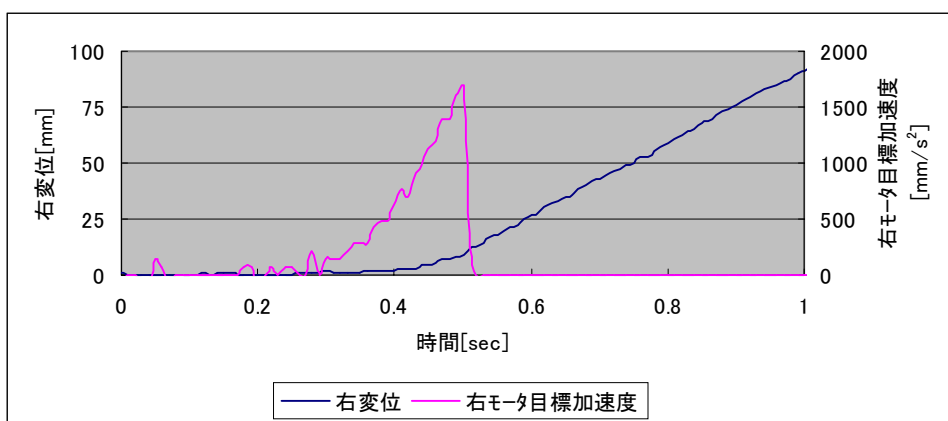
(c)荷重とモータ目標加速度

図 5.3.2.14 転倒時のモータ目標加速度との比較：左 ($c = 250$ [N s/m], 被験者 C)

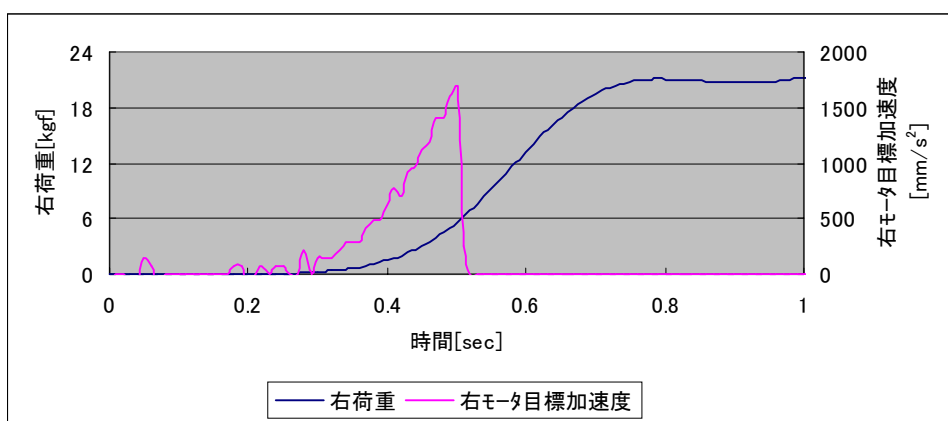
[グラフ E] 転倒時のモータ目標加速度との比較



(a)速度とモータ目標加速度



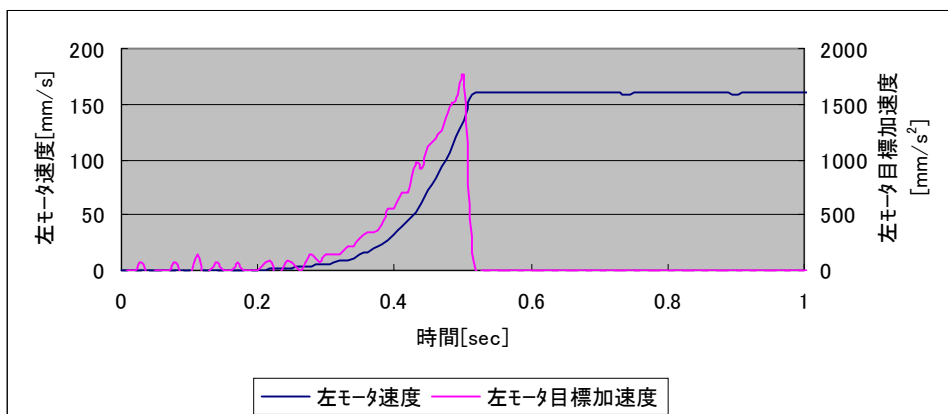
(b)変位とモータ目標加速度



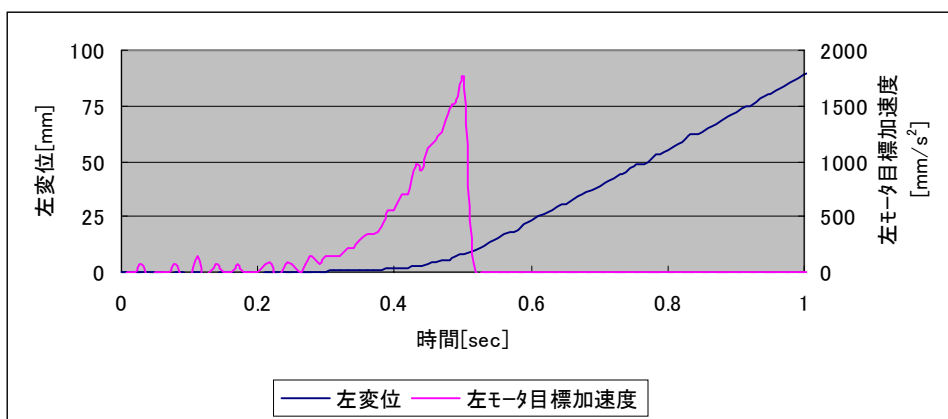
(c)荷重とモータ目標加速度

図 5.3.2.15 転倒時のモータ目標加速度との比較：右 ($c = 350$ [N s/m] , 被験者 C)

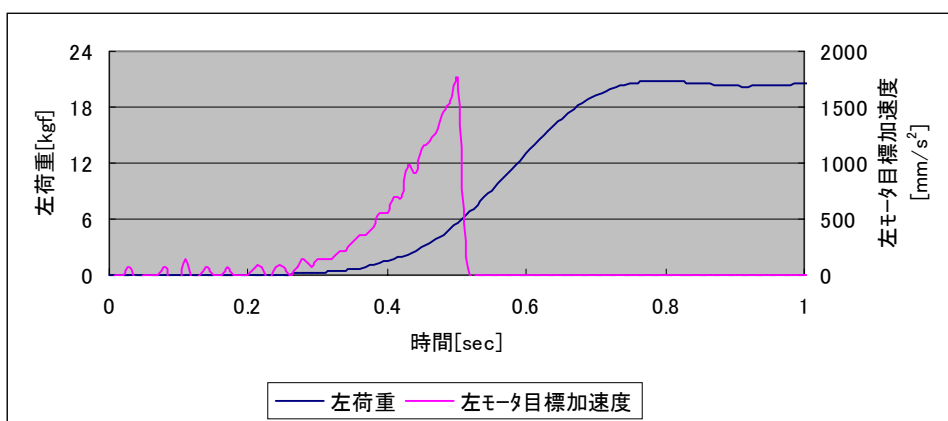
[グラフ E] 転倒時のモータ目標加速度との比較



(a)速度とモータ目標加速度



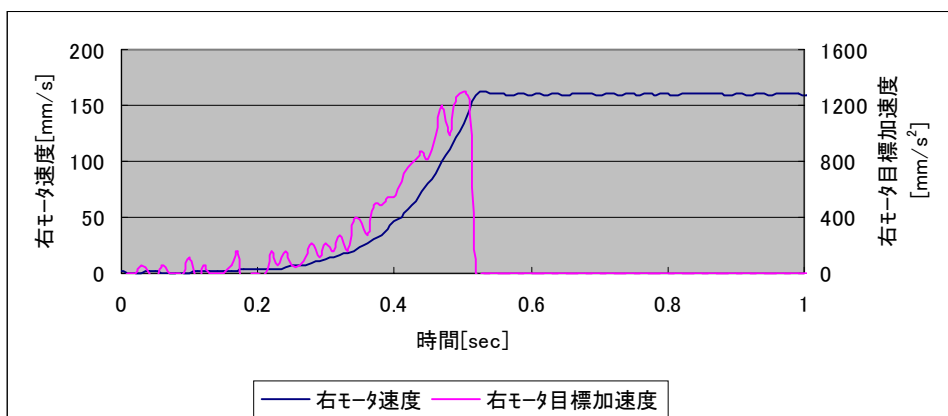
(b)変位とモータ目標加速度



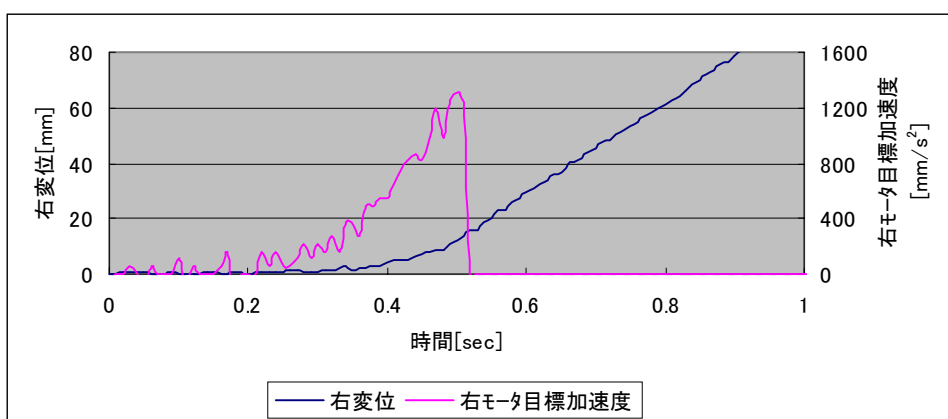
(c)荷重とモータ目標加速度

図 5.3.2.16 転倒時のモータ目標加速度との比較 : 左 ($c = 350$ [N s/m] , 被験者 C)

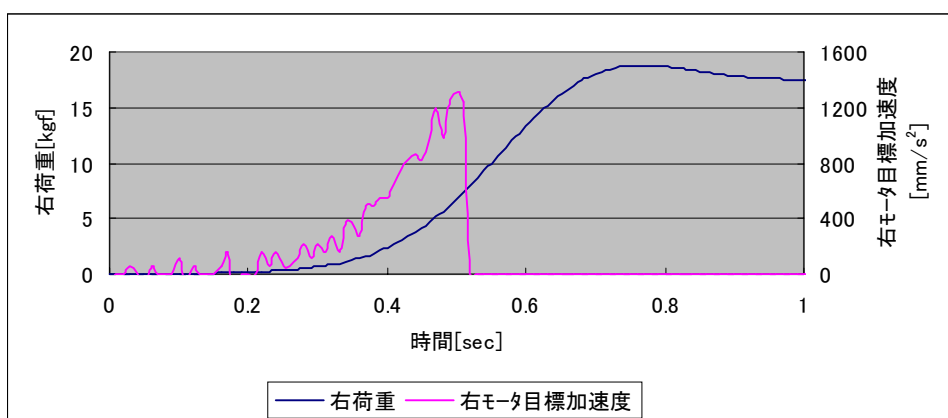
[グラフ E] 転倒時のモータ目標加速度との比較



(a)速度とモータ目標加速度



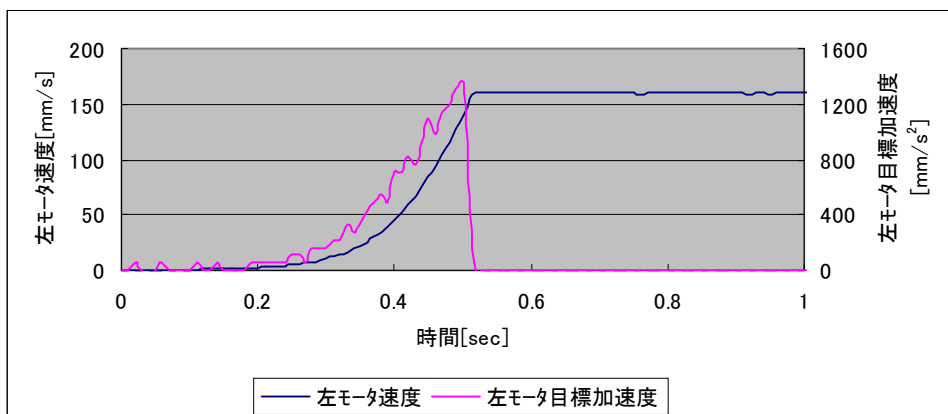
(b)変位とモータ目標加速度



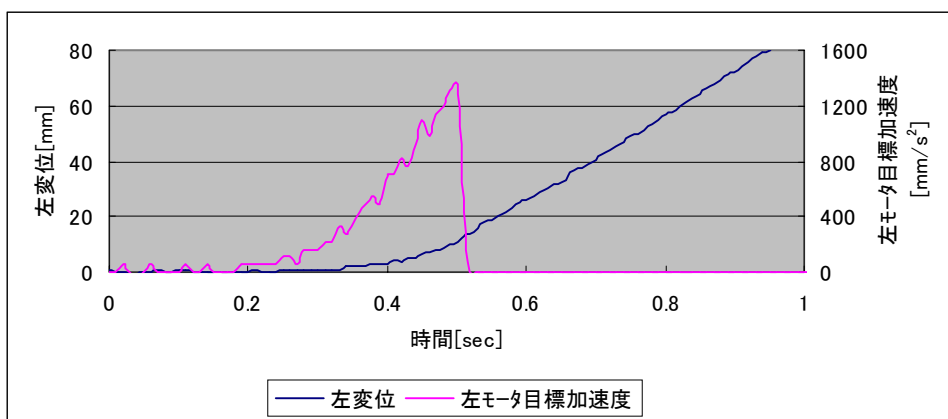
(c)荷重とモータ目標加速度

図 5.3.2.17 転倒時のモータ目標加速度との比較：右 ($c = 450$ [N s/m] , 被験者 C)

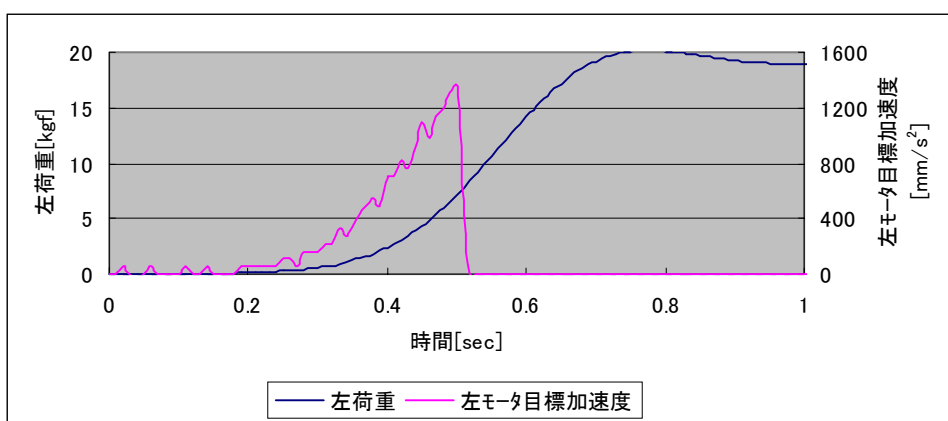
[グラフ E] 転倒時のモータ目標加速度との比較



(a)速度とモータ目標加速度



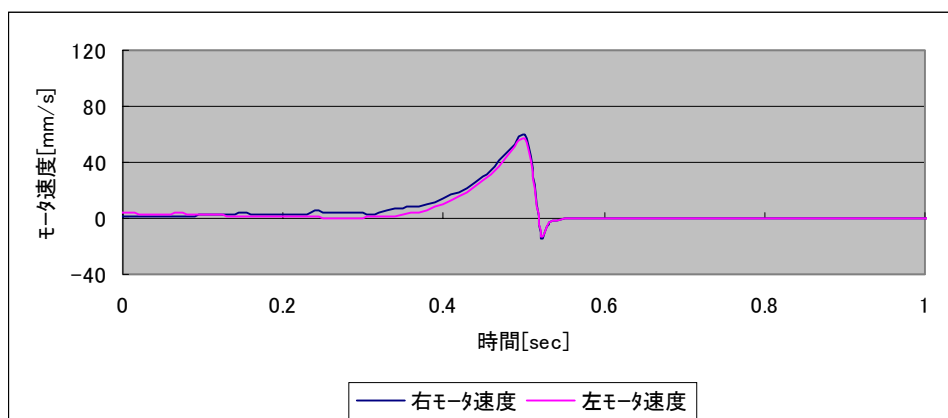
(b)変位とモータ目標加速度



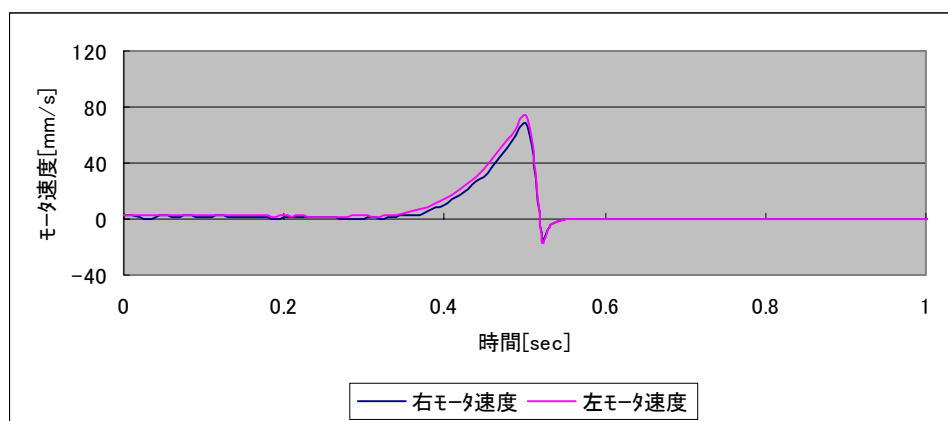
(c)荷重とモータ目標加速度

図 5.3.2.18 転倒時のモータ目標加速度との比較：左 ($c = 450$ [N s/m], 被験者 C)

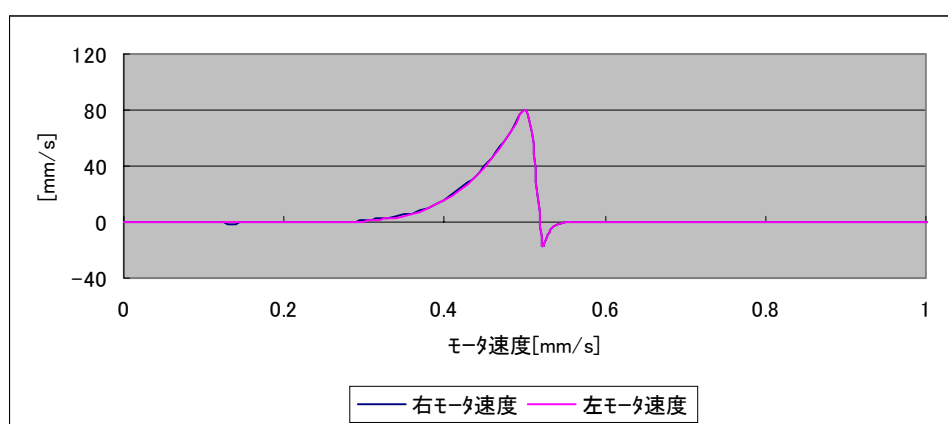
[グラフ F] モータ目標加速度を用いた転倒防止実験



(a) $c = 250$ [N s/m]



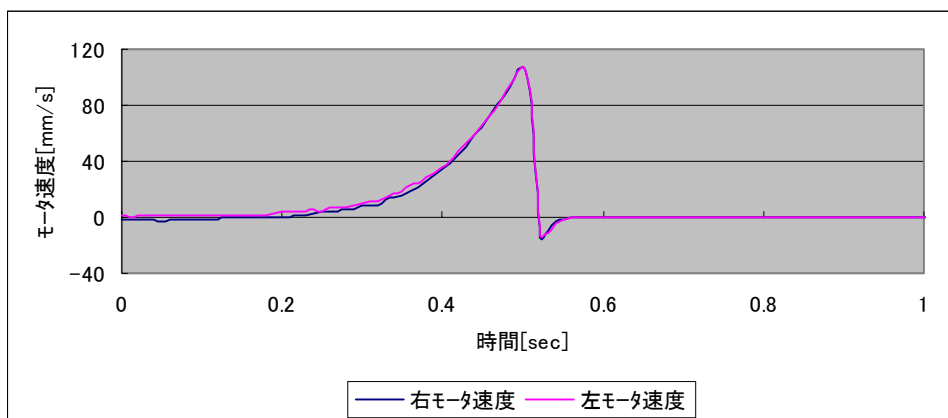
(b) $c = 350$ [N s/m]



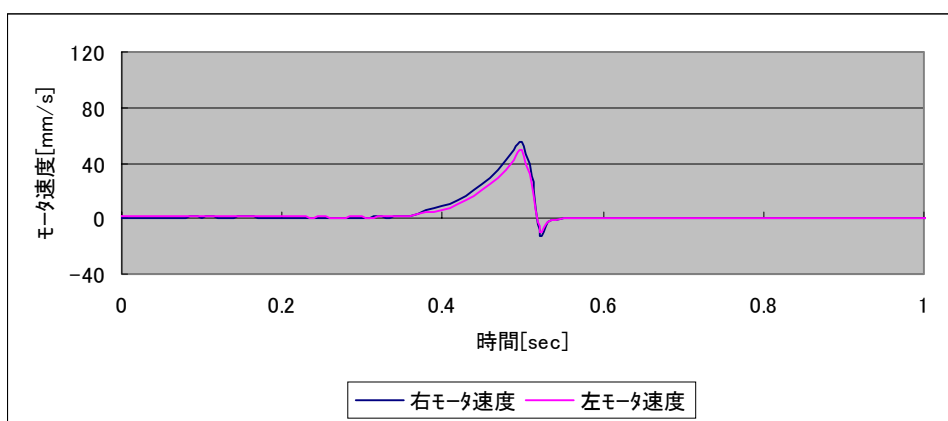
(c) $c = 450$ [N s/m]

図 5.3.2.19 転倒防止実験：モータ速度（モータ目標加速度 1000 [mm/s²], 被験者 A）

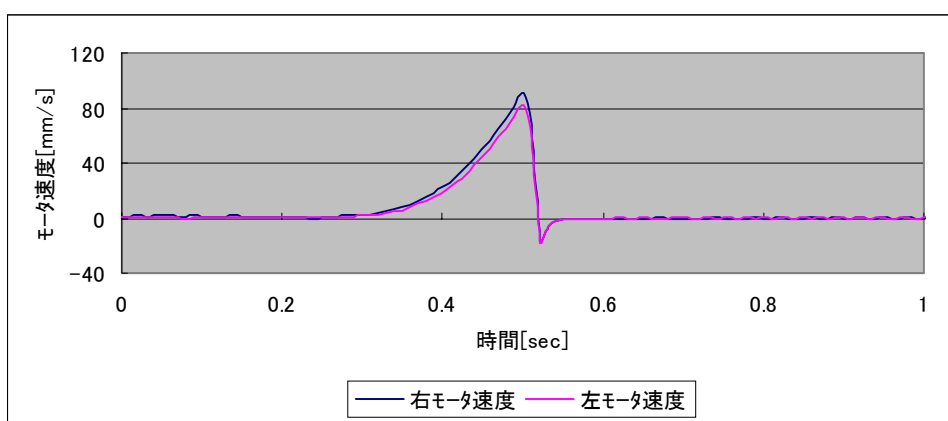
[グラフ F] モータ目標加速度を用いた転倒防止実験



(a) $c = 250$ [N s/m]



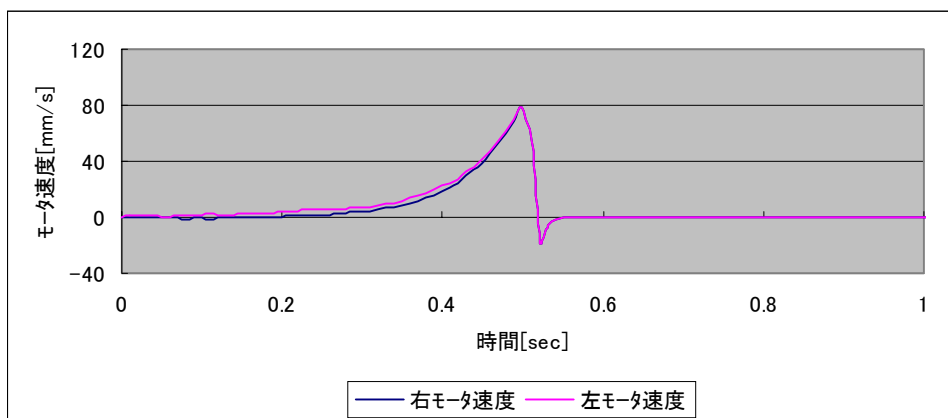
(b) $c = 350$ [N s/m]



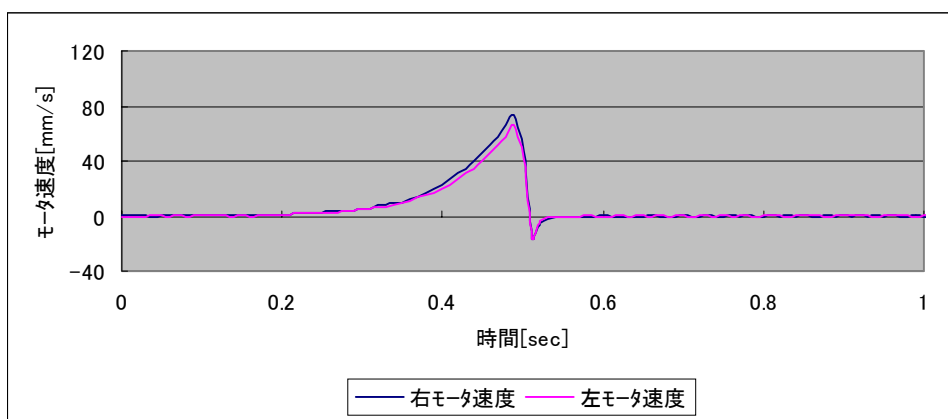
(c) $c = 450$ [N s/m]

図 5.3.2.20 転倒防止実験：モータ速度（モータ目標加速度 1000 [mm/s²], 被験者 B）

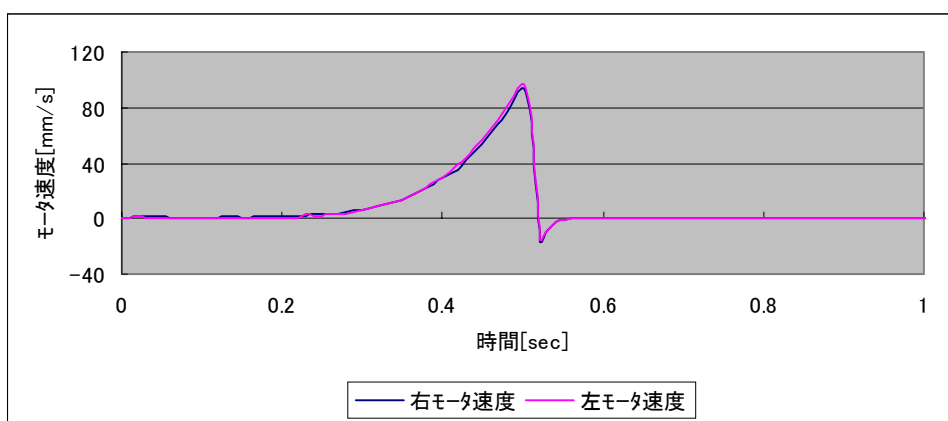
[グラフ F] モータ目標加速度を用いた転倒防止実験



(a) $c = 250$ [N s/m]



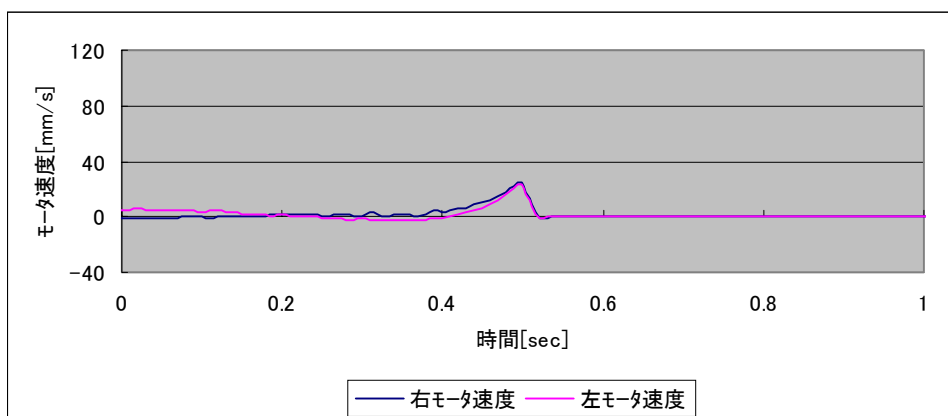
(b) $c = 350$ [N s/m]



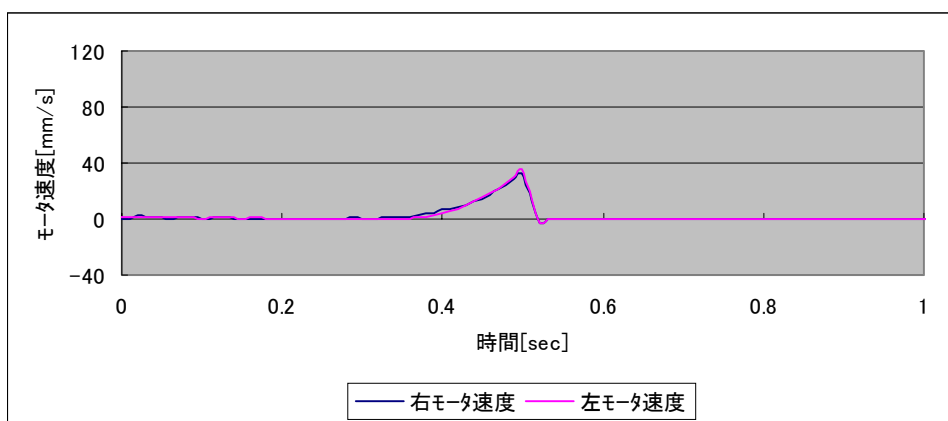
(c) $c = 450$ [N s/m]

図 5.3.2.21 転倒防止実験：モータ速度（モータ目標加速度 1000 [mm/s²], 被験者 C）

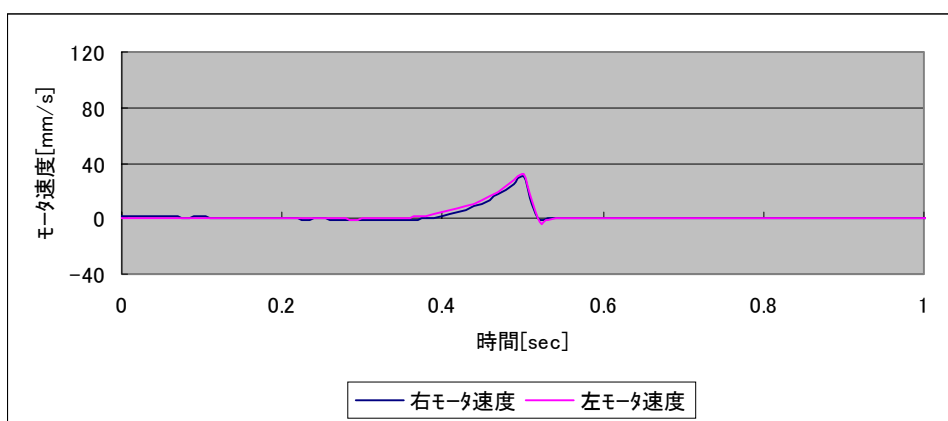
[グラフ F] モータ目標加速度を用いた転倒防止実験



(a) $c = 250$ [N s/m]



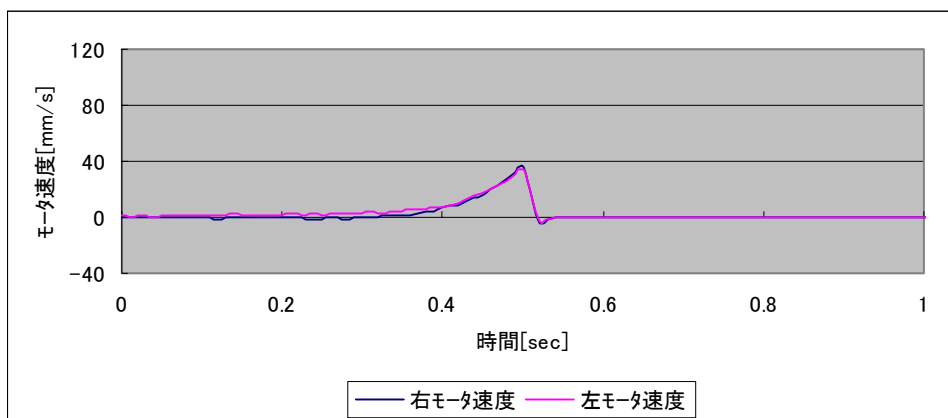
(b) $c = 350$ [N s/m]



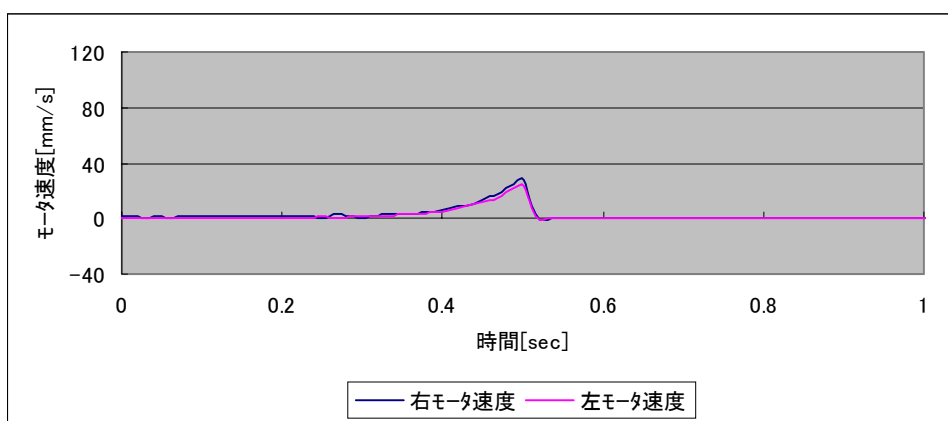
(c) $c = 450$ [N s/m]

図 5.3.2.22 転倒防止実験：モータ速度（モータ目標加速度 500 [mm/s²], 被験者 A）

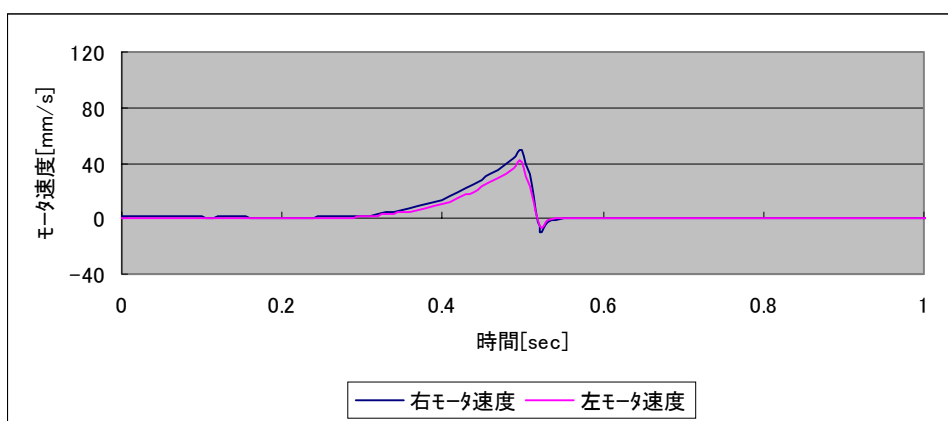
[グラフ F] モータ目標加速度を用いた転倒防止実験



(a) $c = 250$ [N s/m]



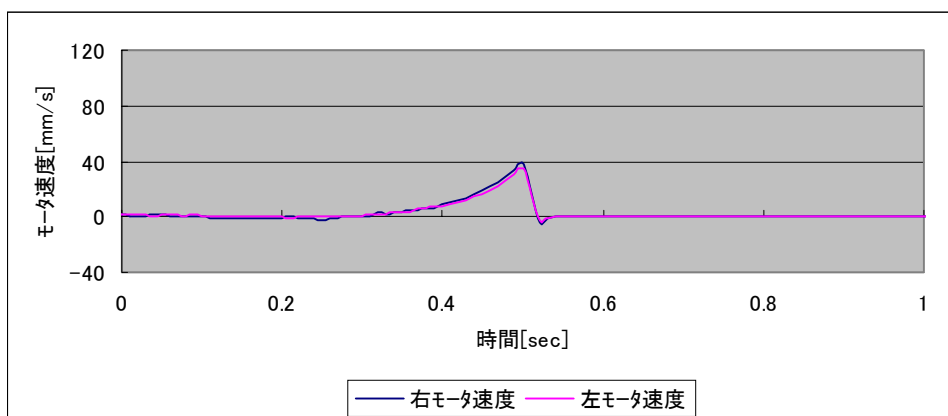
(b) $c = 350$ [N s/m]



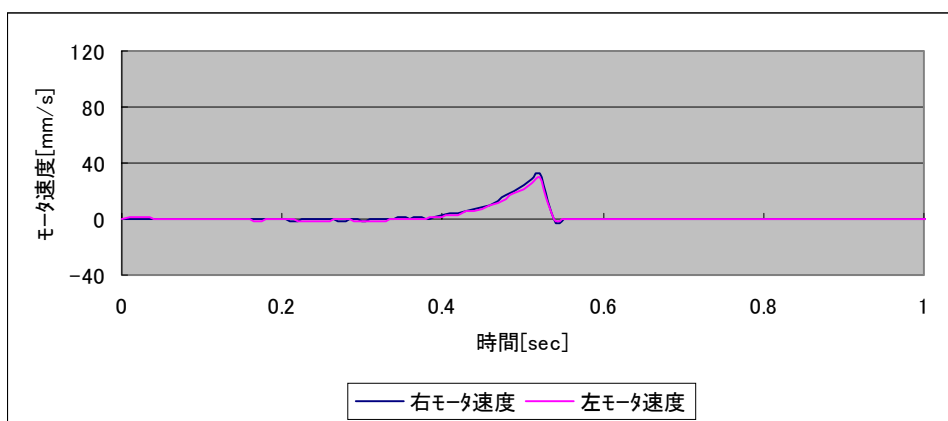
(c) $c = 450$ [N s/m]

図 5.3.2.23 転倒防止実験：モータ速度（モータ目標加速度 500 [mm/s²], 被験者 B）

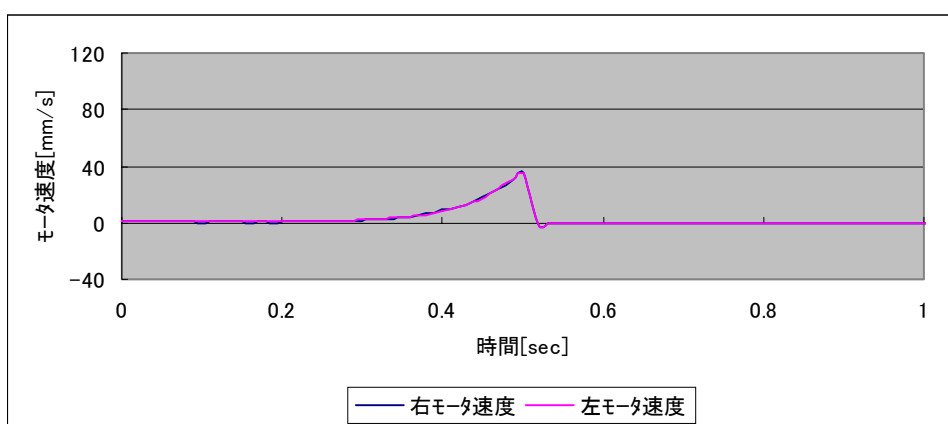
[グラフ F] モータ目標加速度を用いた転倒防止実験



(a) $c = 250$ [N s/m]



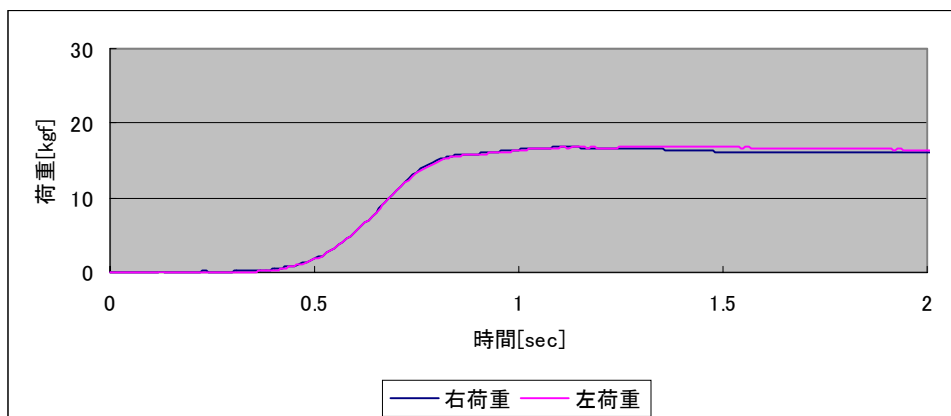
(b) $c = 350$ [N s/m]



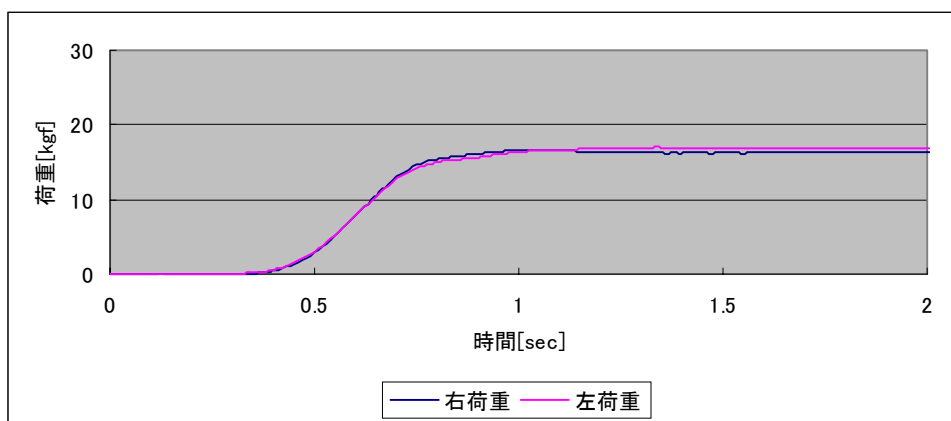
(c) $c = 450$ [N s/m]

図 5.3.2.24 転倒防止実験：モータ速度（モータ目標加速度 500 [mm/s²], 被験者 C）

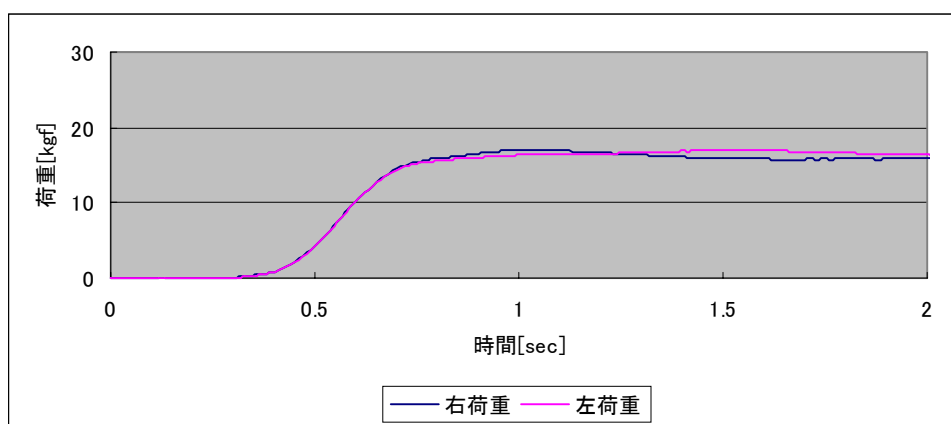
[グラフ F] モータ目標加速度を用いた転倒防止実験



(a) $c = 250$ [N s/m]



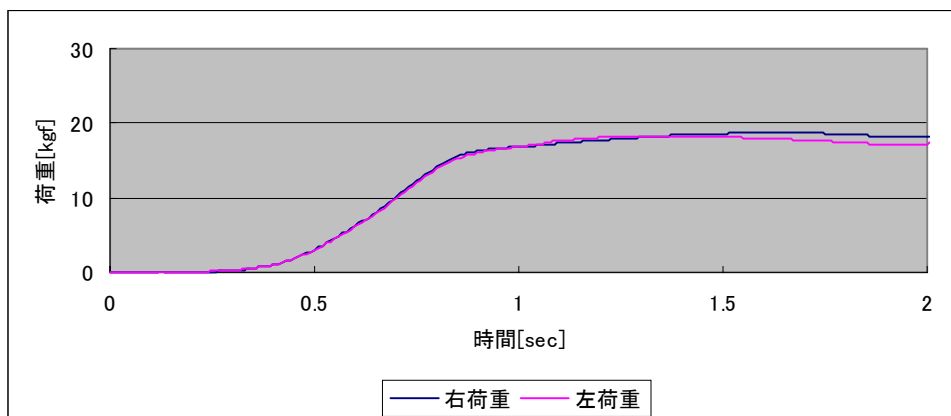
(b) $c = 350$ [N s/m]



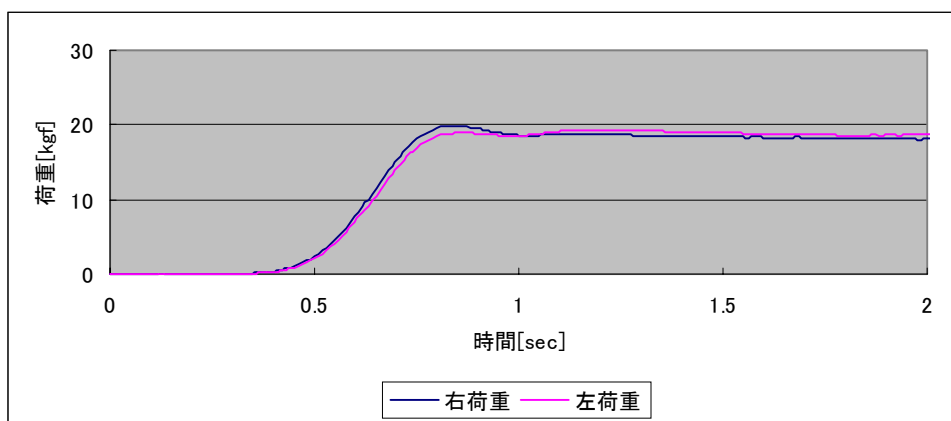
(c) $c = 450$ [N s/m]

図 5.3.2.25 転倒防止実験：荷重（モータ目標加速度 1000 [mm/s²]，被験者 A）

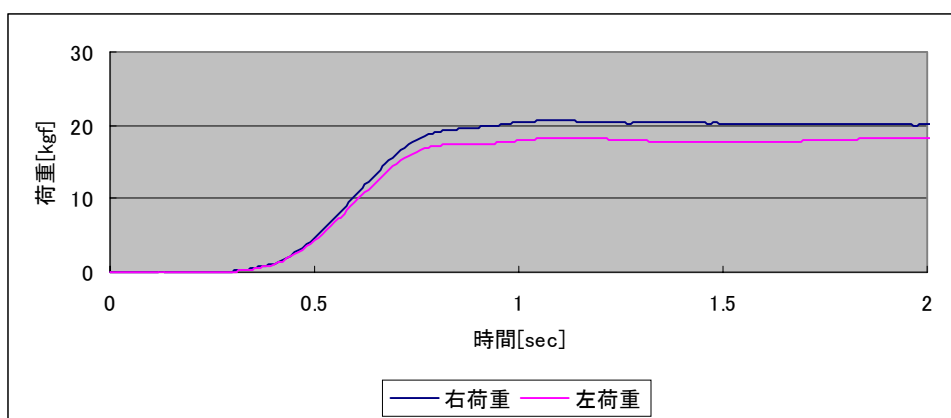
[グラフ F] モータ目標加速度を用いた転倒防止実験



(a) $c = 250 \text{ [N s/m]}$



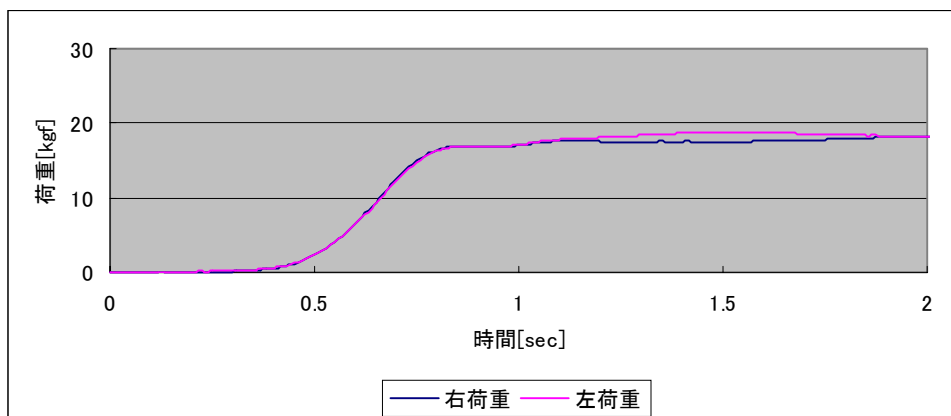
(b) $c = 350 \text{ [N s/m]}$



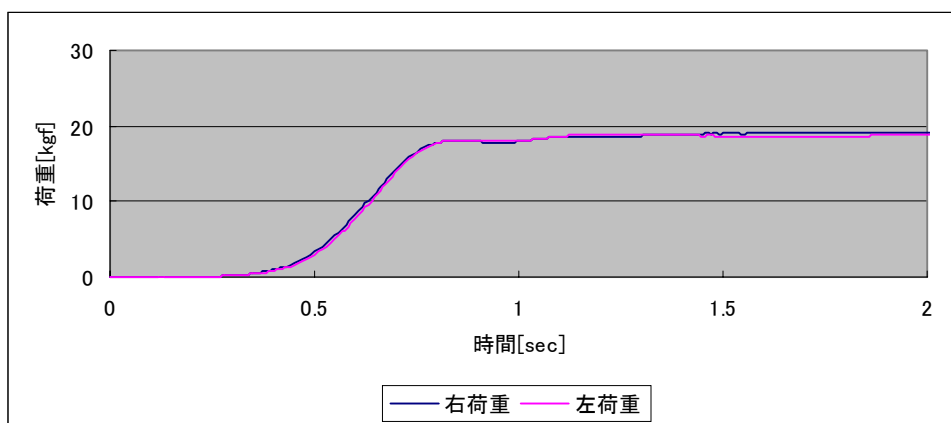
(c) $c = 450 \text{ [N s/m]}$

図 5.3.2.26 転倒防止実験：荷重（モータ目標加速度 $1000 \text{ [mm/s}^2]$ ，被験者 B）

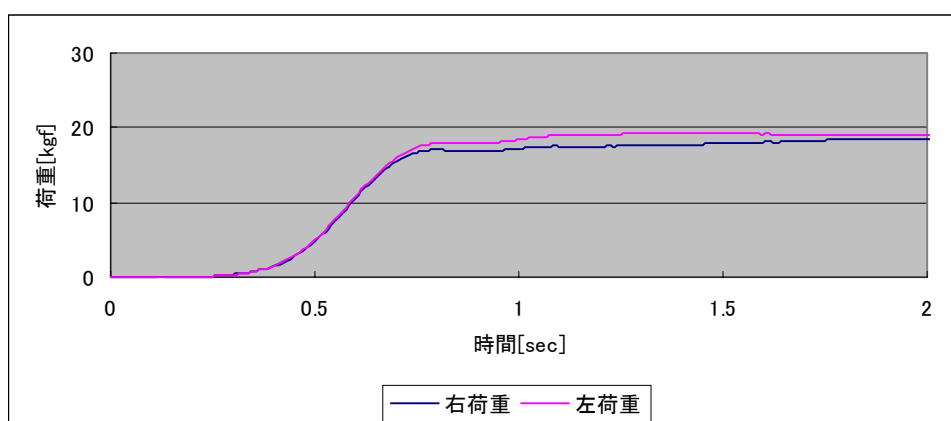
[グラフ F] モータ目標加速度を用いた転倒防止実験



(a) $c = 250$ [N s/m]



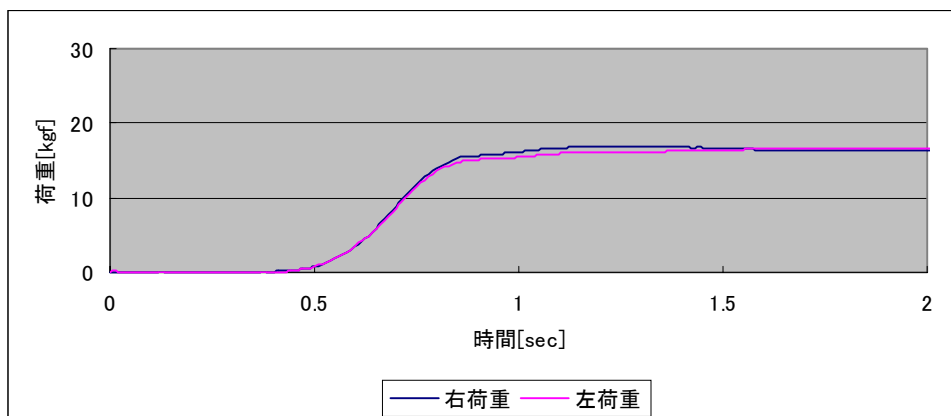
(b) $c = 350$ [N s/m]



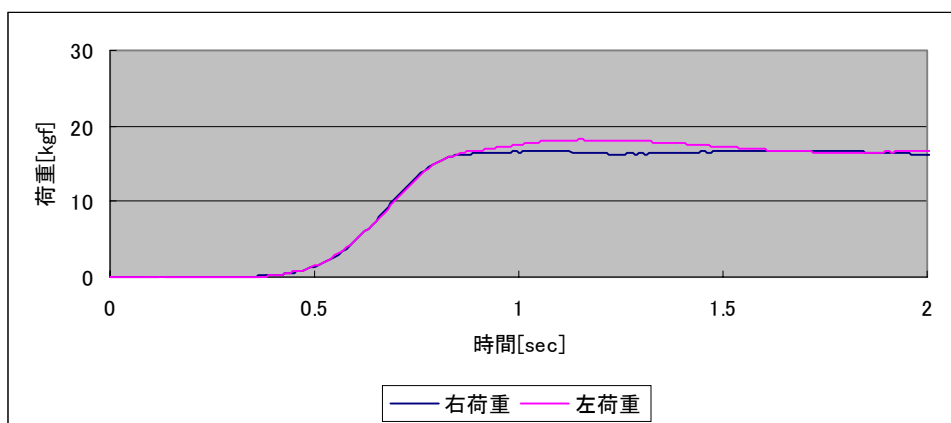
(c) $c = 450$ [N s/m]

図 5.3.2.27 転倒防止実験：荷重（モータ目標加速度 1000 [mm/s²]，被験者 C）

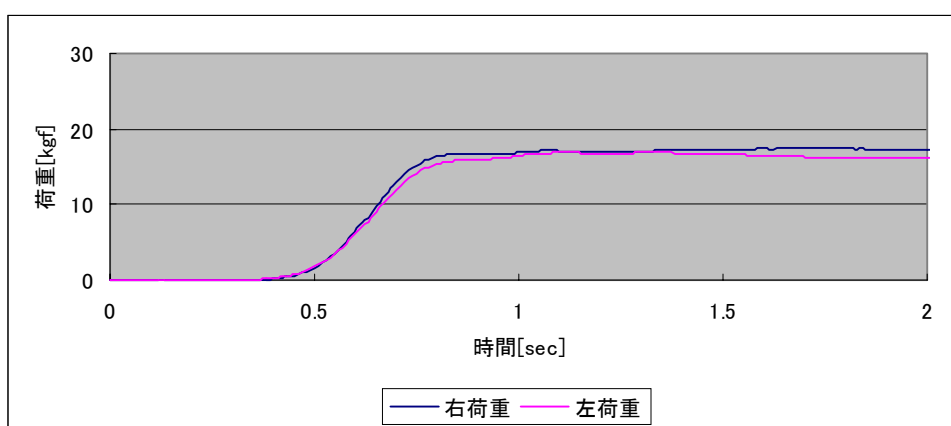
[グラフ F] モータ目標加速度を用いた転倒防止実験



(a) $c = 250 \text{ [N s/m]}$



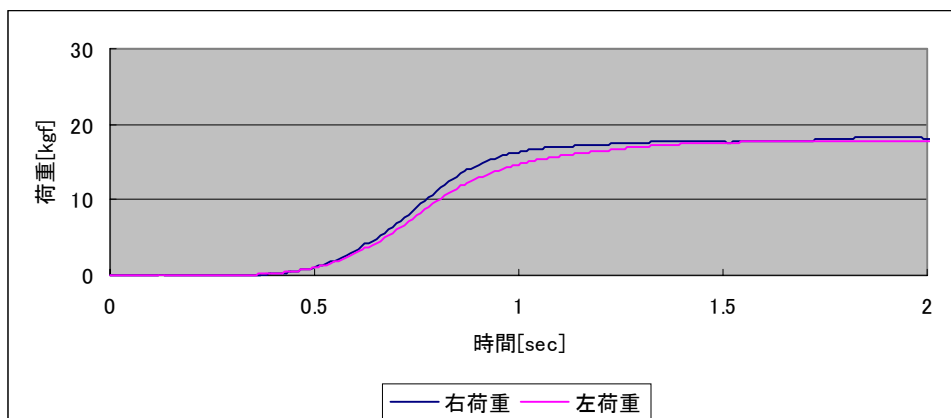
(b) $c = 350 \text{ [N s/m]}$



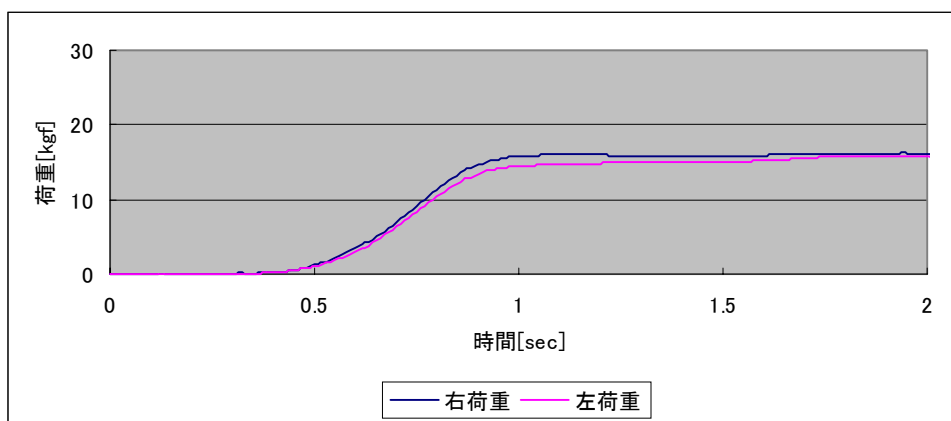
(c) $c = 450 \text{ [N s/m]}$

図 5.3.2.28 転倒防止実験：荷重（モータ目標加速度 $500 \text{ [mm/s}^2]$ ，被験者 A）

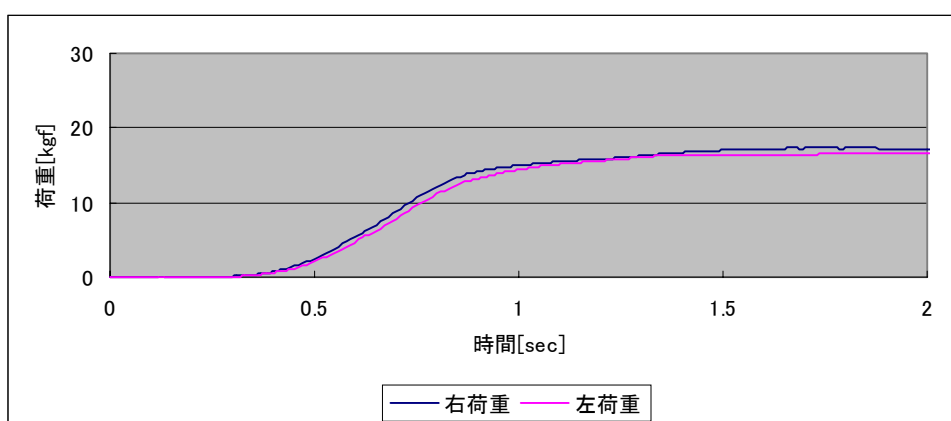
[グラフ F] モータ目標加速度を用いた転倒防止実験



(a) $c = 250 \text{ [N s/m]}$



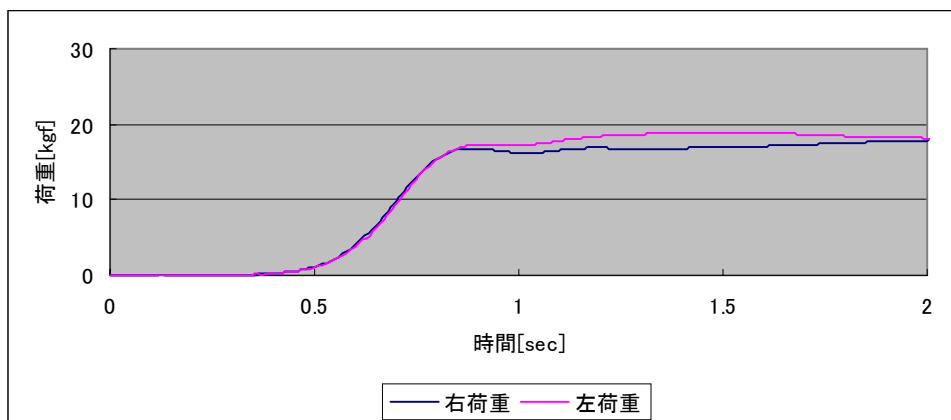
(b) $c = 350 \text{ [N s/m]}$



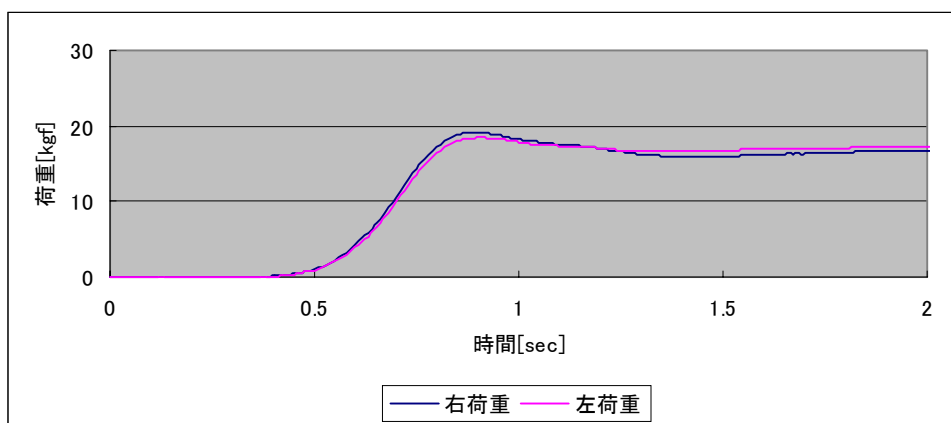
(c) $c = 450 \text{ [N s/m]}$

図 5.3.2.29 転倒防止実験：荷重（モータ目標加速度 $500 \text{ [mm/s}^2]$ ，被験者 B）

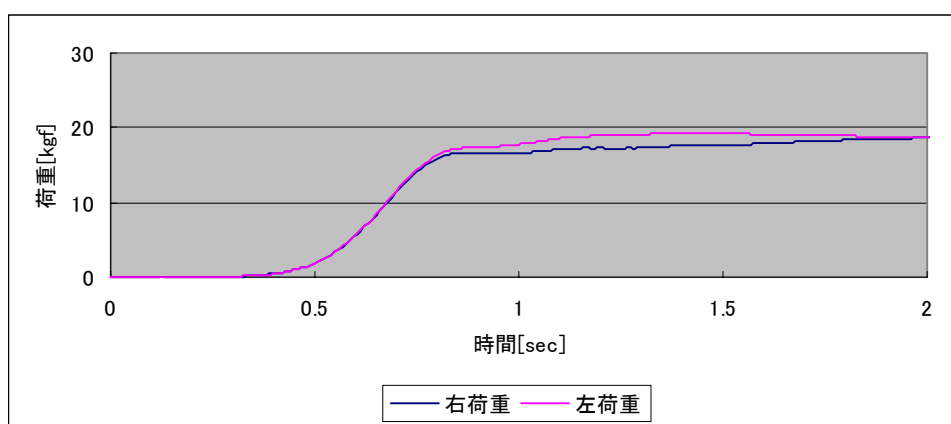
[グラフ F] モータ目標加速度を用いた転倒防止実験



(a) $c = 250 \text{ [N s/m]}$



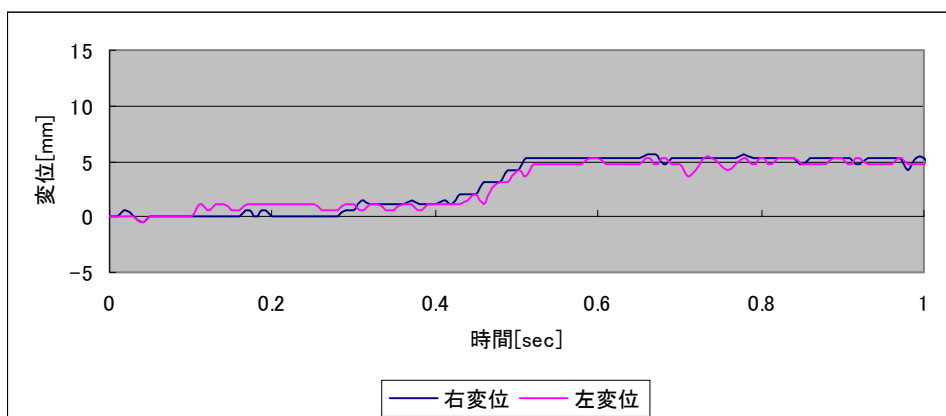
(b) $c = 350 \text{ [N s/m]}$



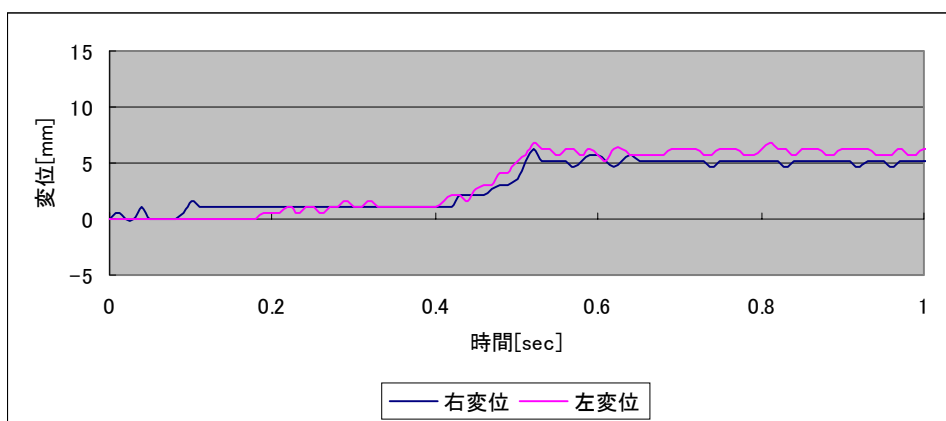
(c) $c = 450 \text{ [N s/m]}$

図 5.3.2.30 転倒防止実験：荷重（モータ目標加速度 $500 \text{ [mm/s}^2]$ ，被験者 C）

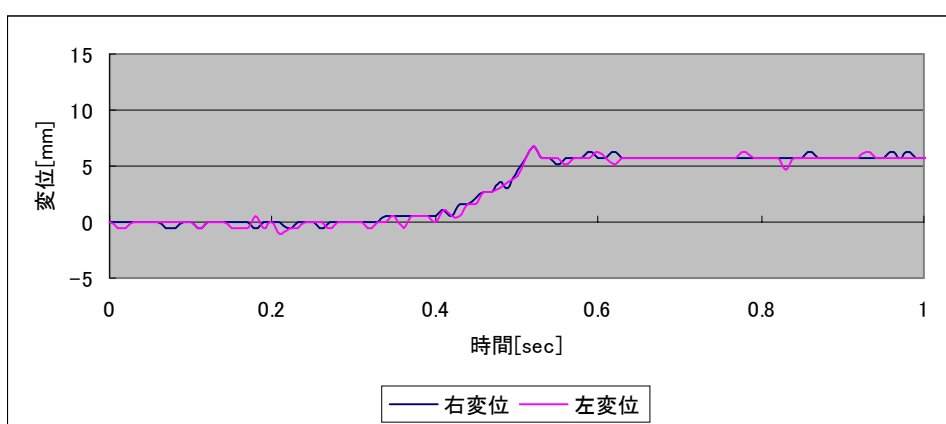
[グラフ F] モータ目標加速度を用いた転倒防止実験



(a) $c = 250$ [N s/m]



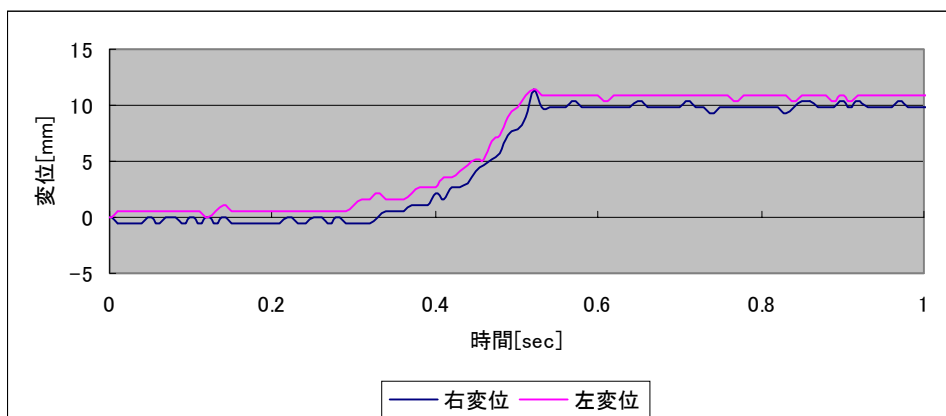
(b) $c = 350$ [N s/m]



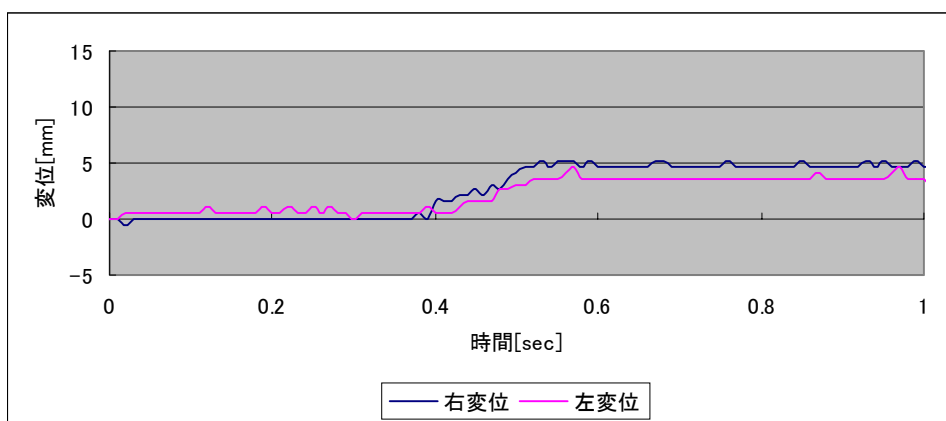
(c) $c = 450$ [N s/m]

図 5.3.2.31 転倒防止実験：変位（モータ目標加速度 1000 [mm/s²]，被験者 A）

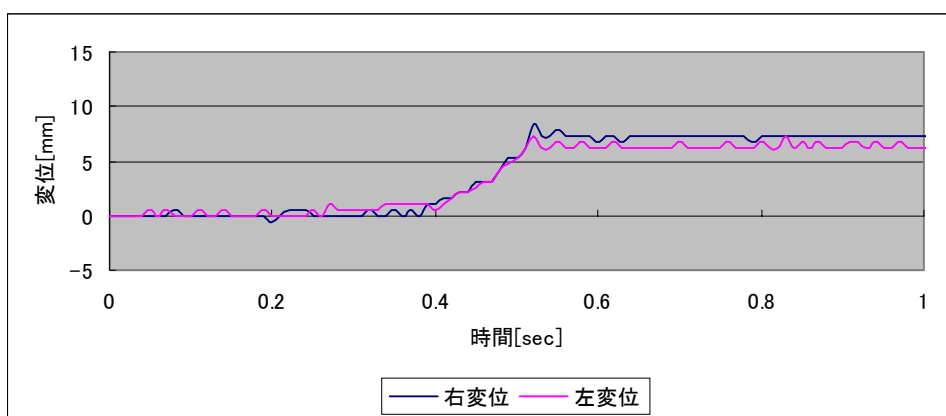
[グラフ F] モータ目標加速度を用いた転倒防止実験



(a) $c = 250$ [N s/m]



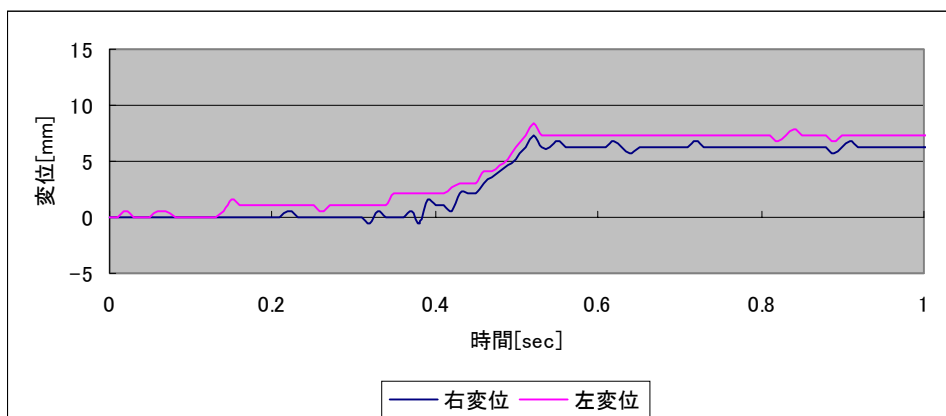
(b) $c = 350$ [N s/m]



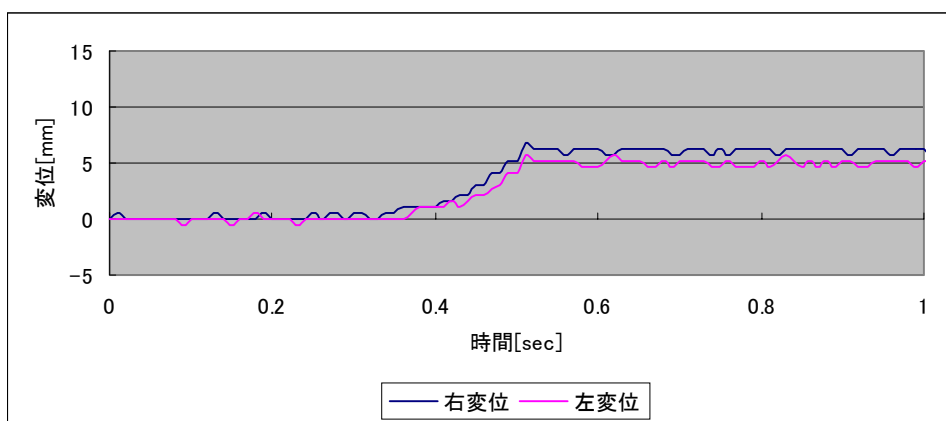
(c) $c = 450$ [N s/m]

図 5.3.2.32 転倒防止実験：変位（モータ目標加速度 1000 [mm/s²]，被験者 B）

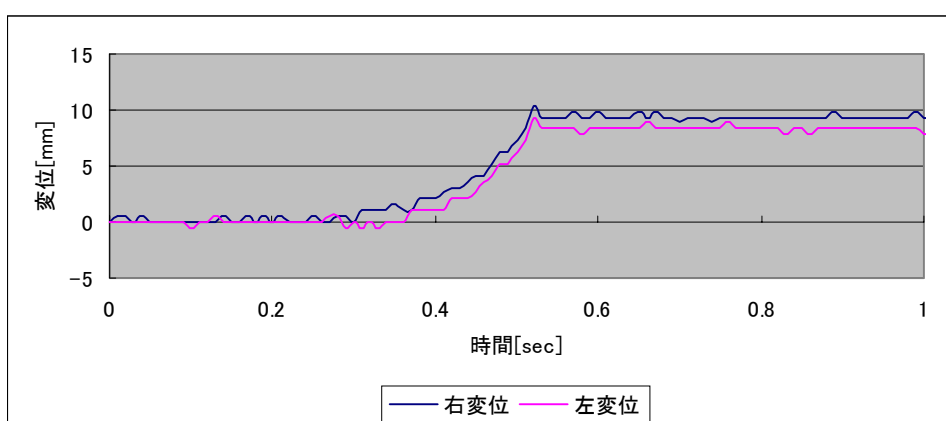
[グラフ F] モータ目標加速度を用いた転倒防止実験



(a) $c = 250$ [N s/m]



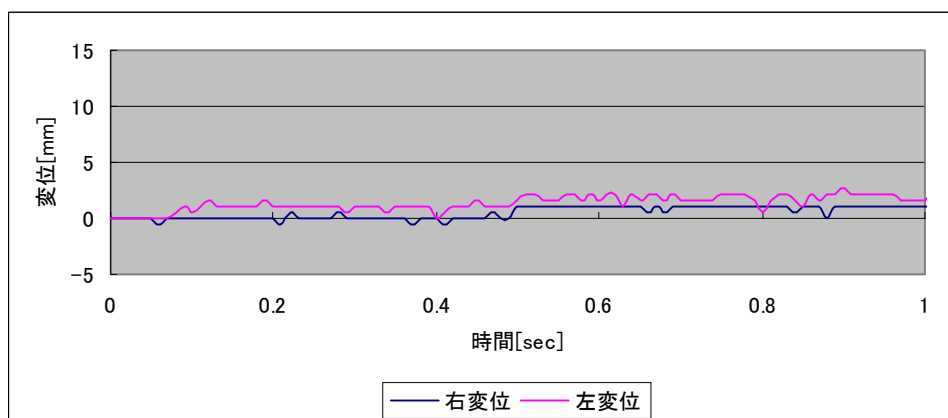
(b) $c = 350$ [N s/m]



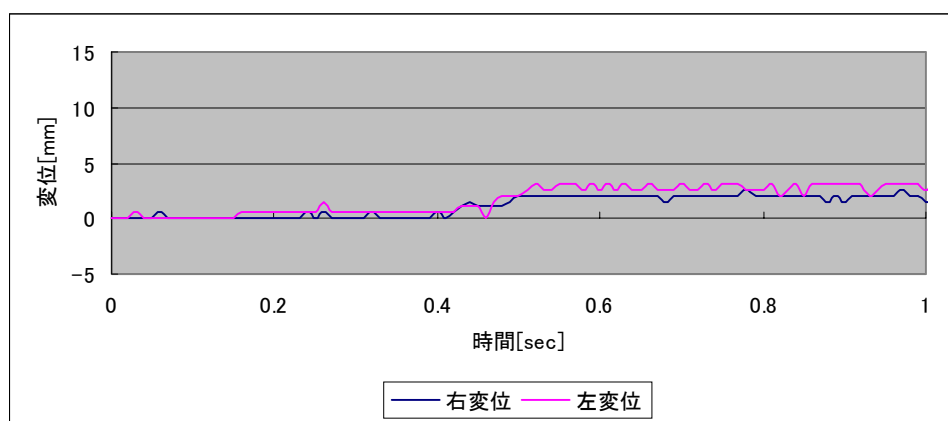
(c) $c = 450$ [N s/m]

図 5.3.2.33 転倒防止実験：変位（モータ目標加速度 1000 [mm/s²]，被験者 C）

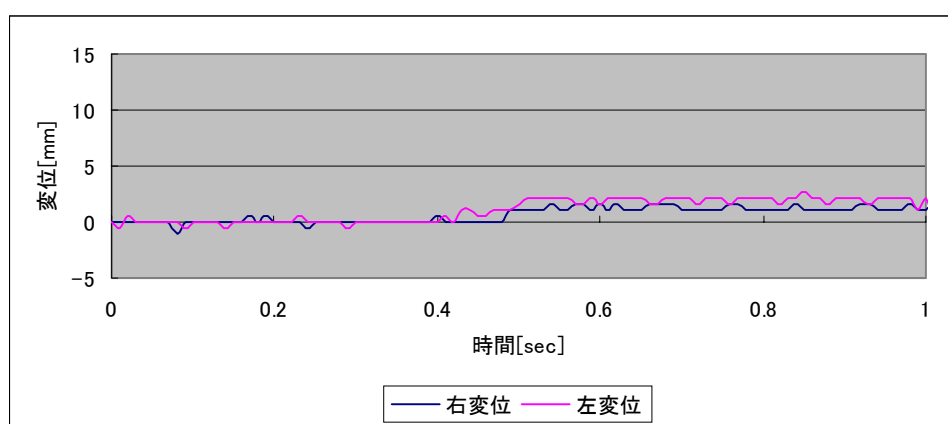
[グラフ F] モータ目標加速度を用いた転倒防止実験



(a) $c = 250$ [N s/m]



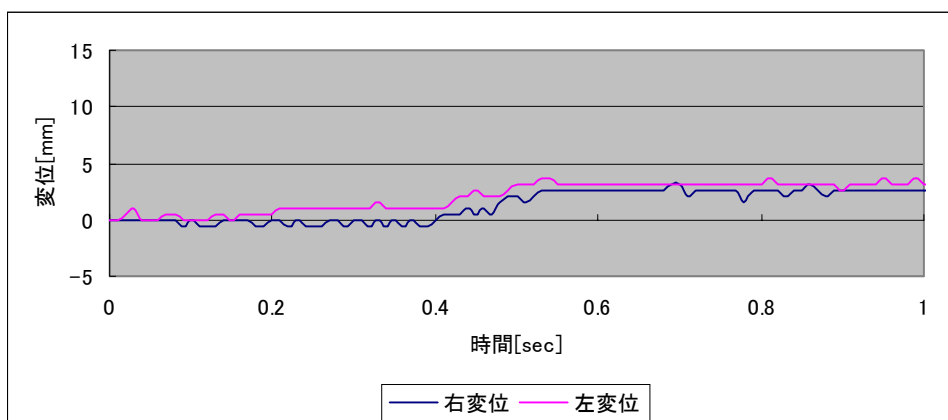
(b) $c = 350$ [N s/m]



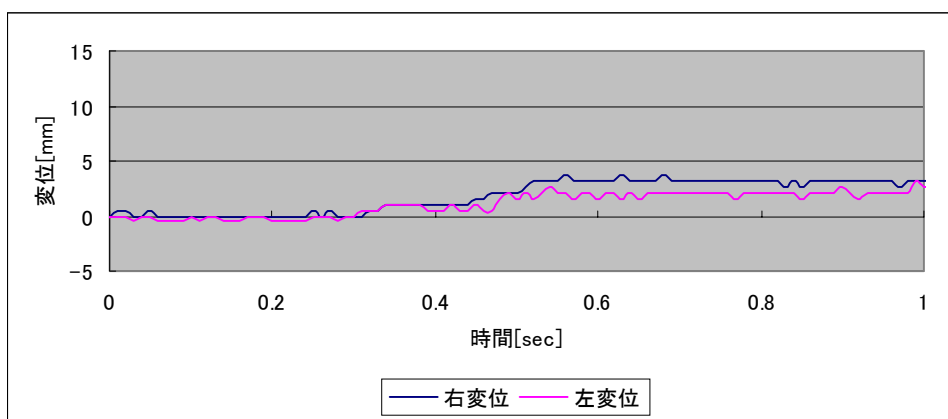
(c) $c = 450$ [N s/m]

図 5.3.2.34 転倒防止実験：変位（モータ目標加速度 500 [mm/s²], 被験者 A）

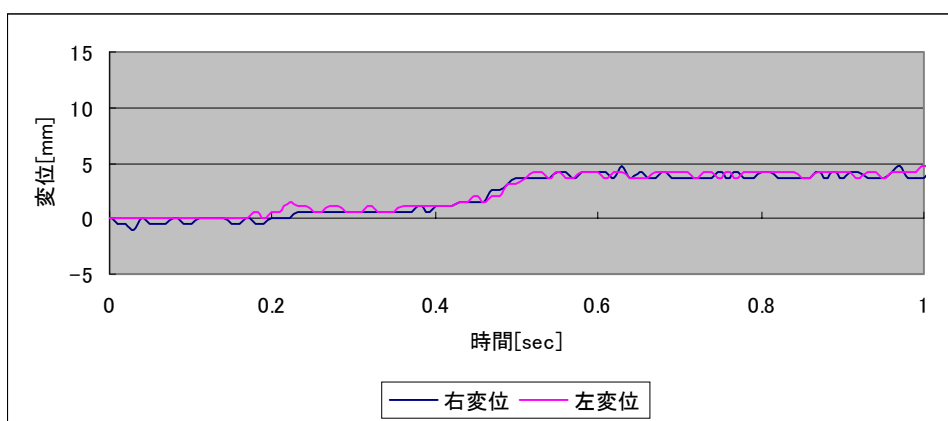
[グラフ F] モータ目標加速度を用いた転倒防止実験



(a) $c = 250$ [N s/m]



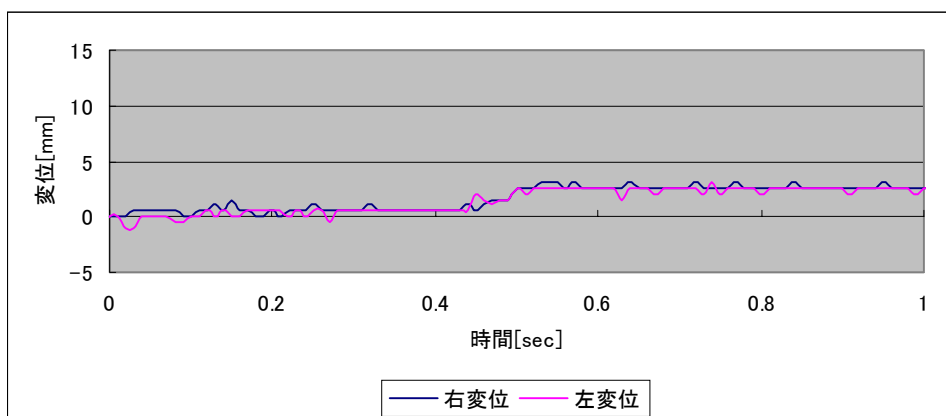
(b) $c = 350$ [N s/m]



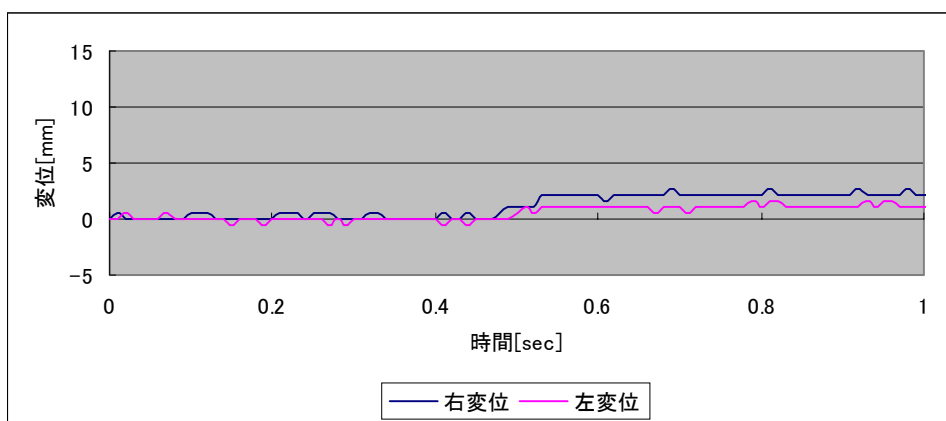
(c) $c = 450$ [N s/m]

図 5.3.2.35 転倒防止実験：変位（モータ目標加速度 500 [mm/s²], 被験者 B）

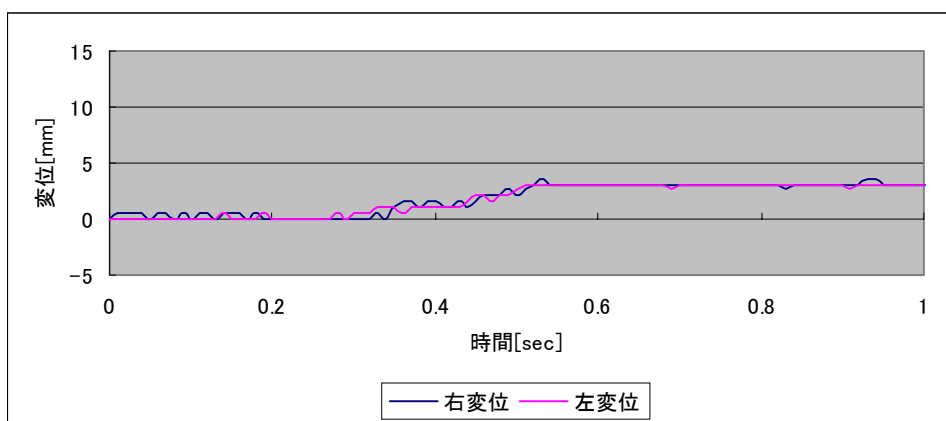
[グラフ F] モータ目標加速度を用いた転倒防止実験



(a) $c = 250$ [N s/m]



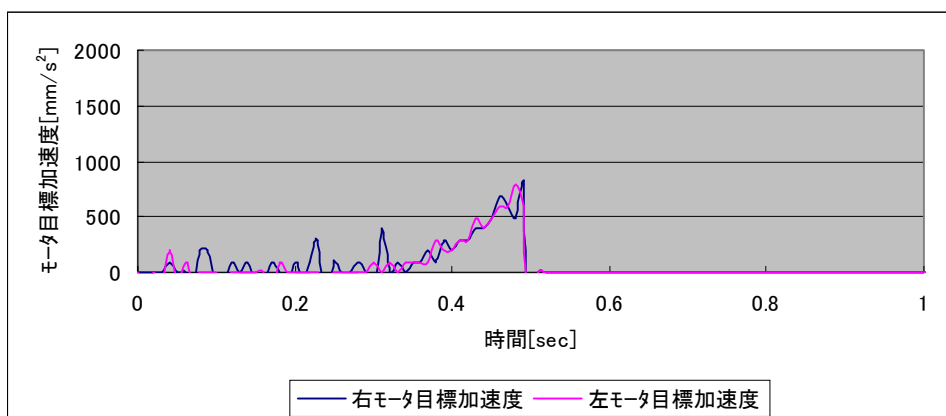
(b) $c = 350$ [N s/m]



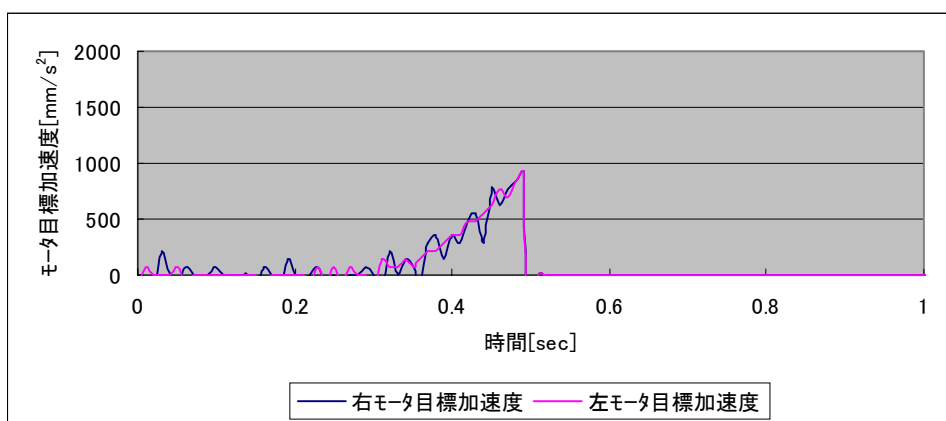
(c) $c = 450$ [N s/m]

図 5.3.2.36 転倒防止実験：変位（モータ目標加速度 500 [mm/s²], 被験者 C）

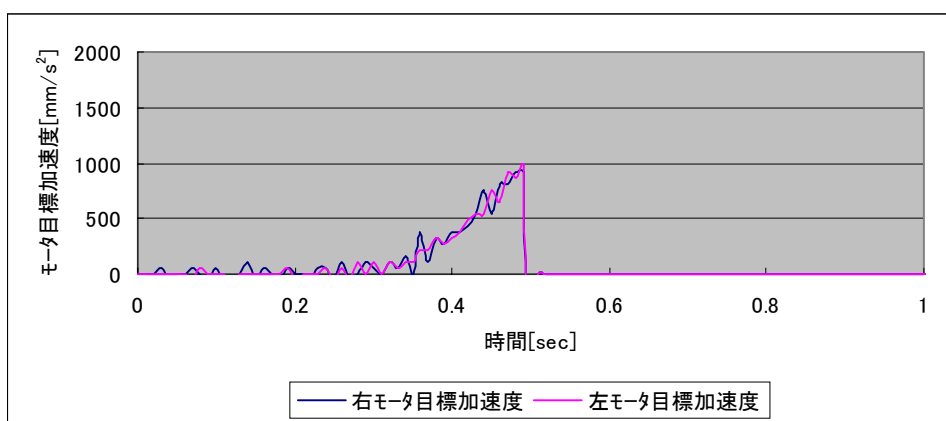
[グラフ F] モータ目標加速度を用いた転倒防止実験



(a) $c = 250$ [N s/m]



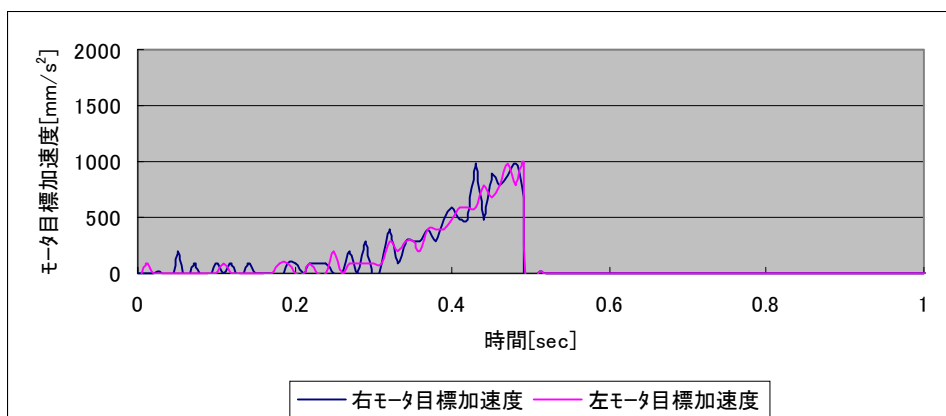
(b) $c = 350$ [N s/m]



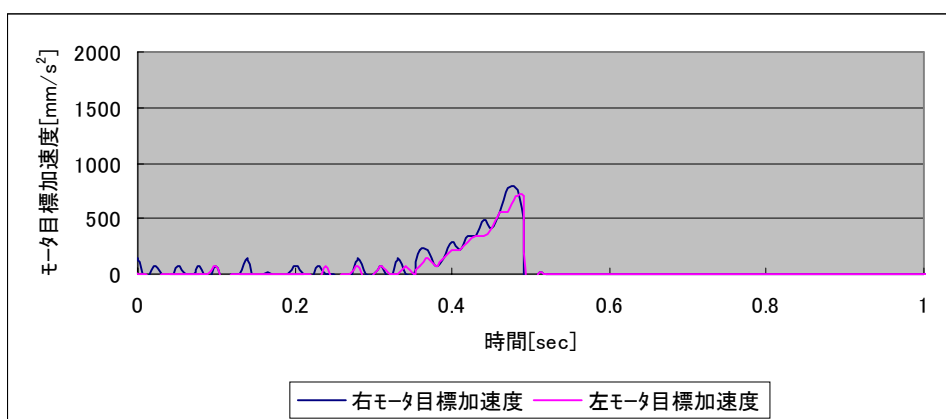
(c) $c = 450$ [N s/m]

図 5.3.2.37 転倒防止実験： ϵ - η 目標加速度（ ϵ - η 目標加速度 1000 [mm/s²]，被験者 A）

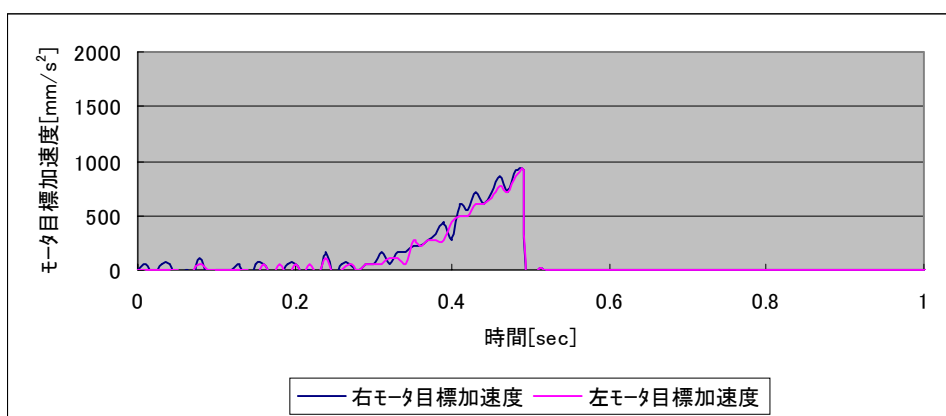
[グラフ F] モータ目標加速度を用いた転倒防止実験



(a) $c = 250$ [N s/m]



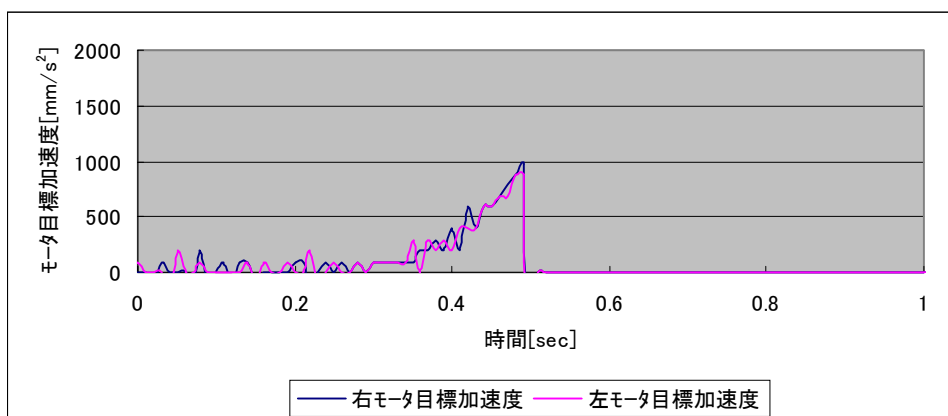
(b) $c = 350$ [N s/m]



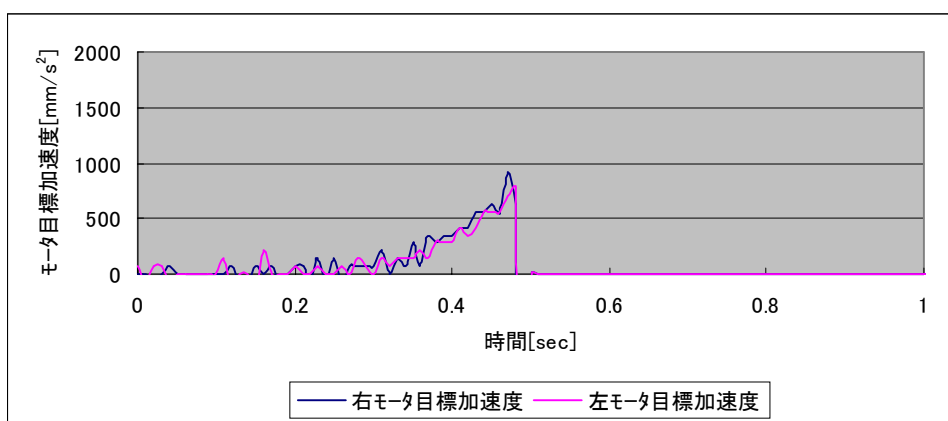
(c) $c = 450$ [N s/m]

図 5.3.2.38 転倒防止実験： ϵ - τ 目標加速度（ ϵ - τ 目標加速度 1000 [mm/s²]，被験者 B）

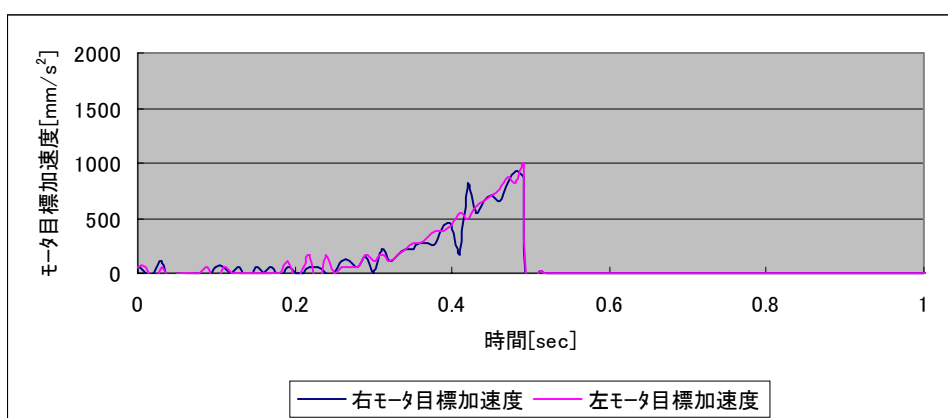
[グラフ F] モータ目標加速度を用いた転倒防止実験



(a) $c = 250$ [N s/m]



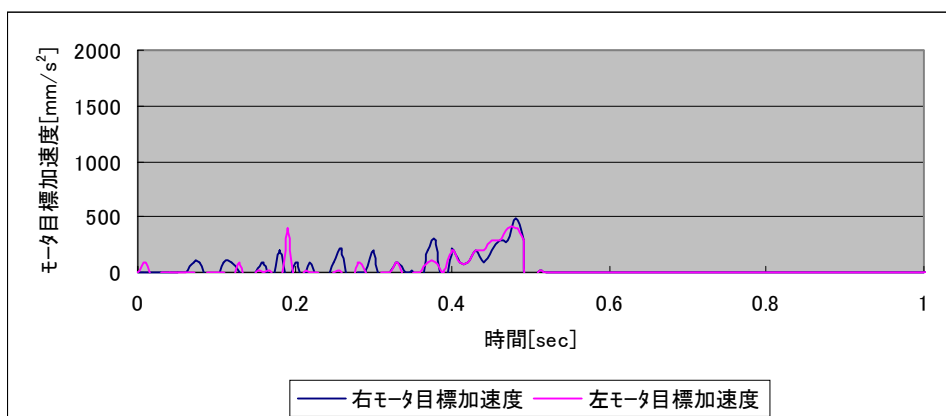
(b) $c = 350$ [N s/m]



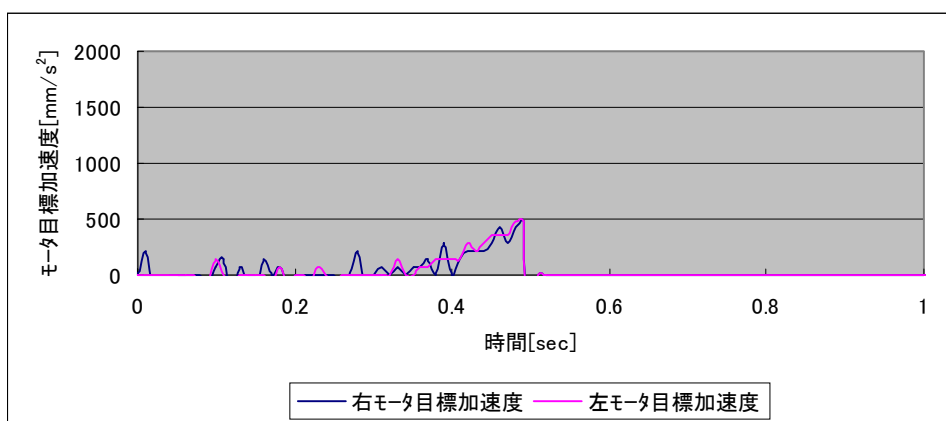
(c) $c = 450$ [N s/m]

図 5.3.2.39 転倒防止実験： τ - τ 目標加速度（ τ - τ 目標加速度 1000 [mm/s²]，被験者 C）

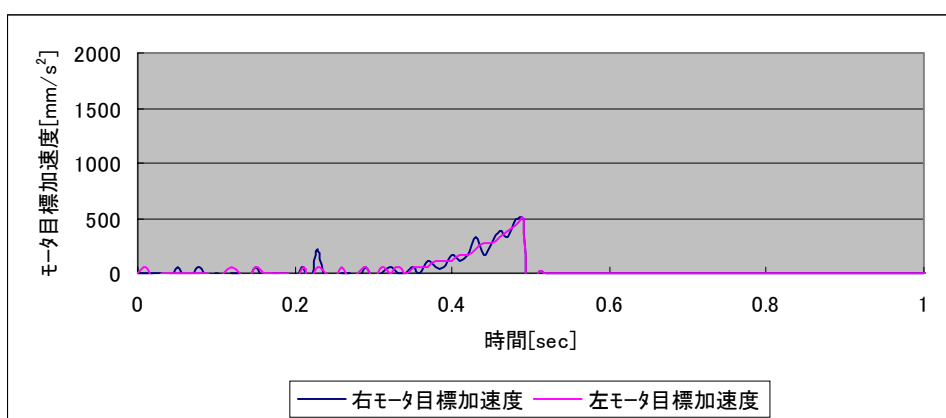
[グラフ F] モータ目標加速度を用いた転倒防止実験



(a) $c = 250$ [N s/m]



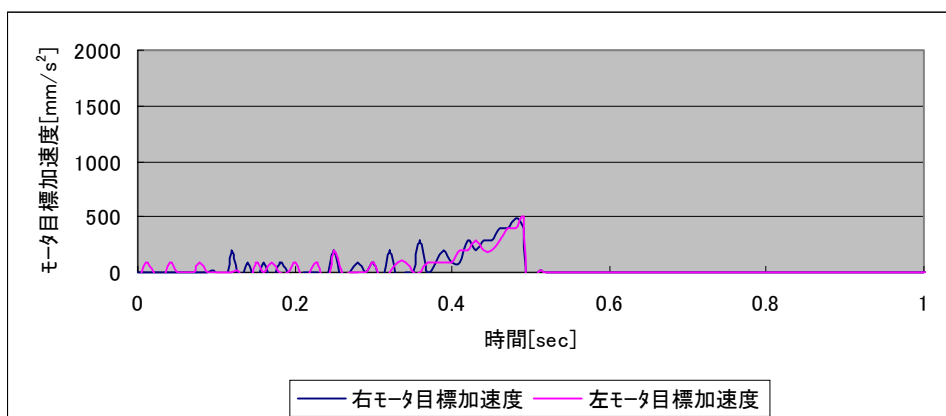
(b) $c = 350$ [N s/m]



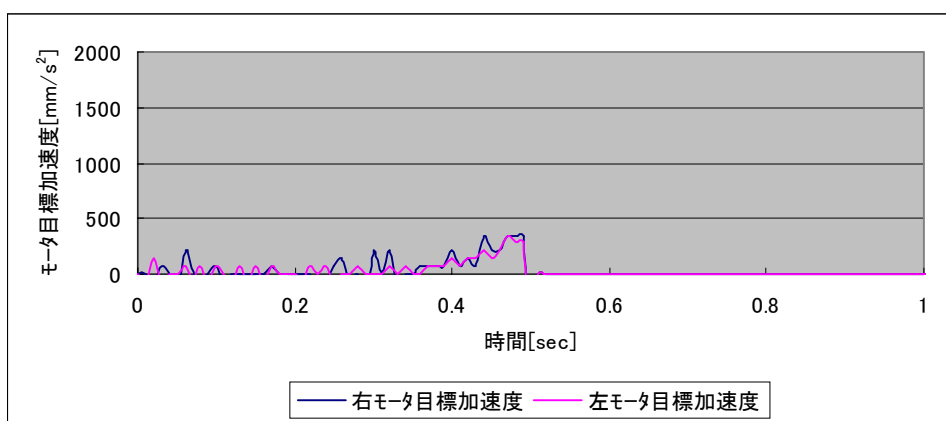
(c) $c = 450$ [N s/m]

図 5.3.2.40 転倒防止実験： θ - $\dot{\theta}$ 目標加速度 (θ - $\dot{\theta}$ 目標加速度 500 [mm/s²]，被験者 A)

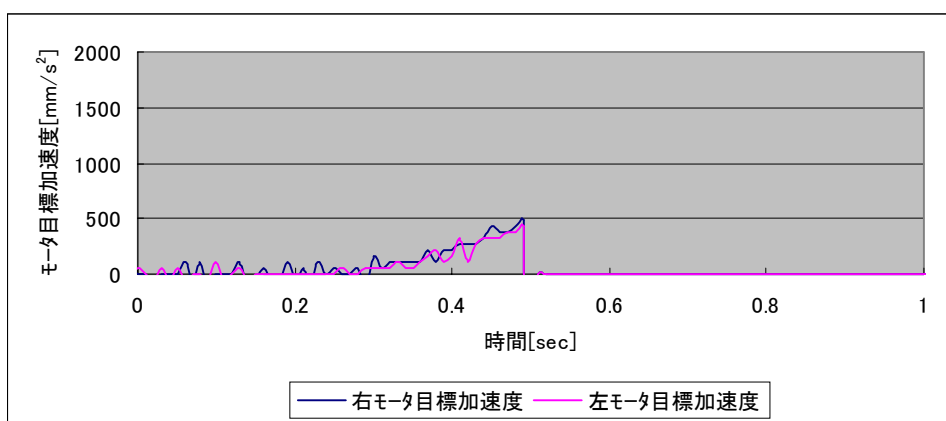
[グラフ F] モータ目標加速度を用いた転倒防止実験



(a) $c = 250$ [N s/m]



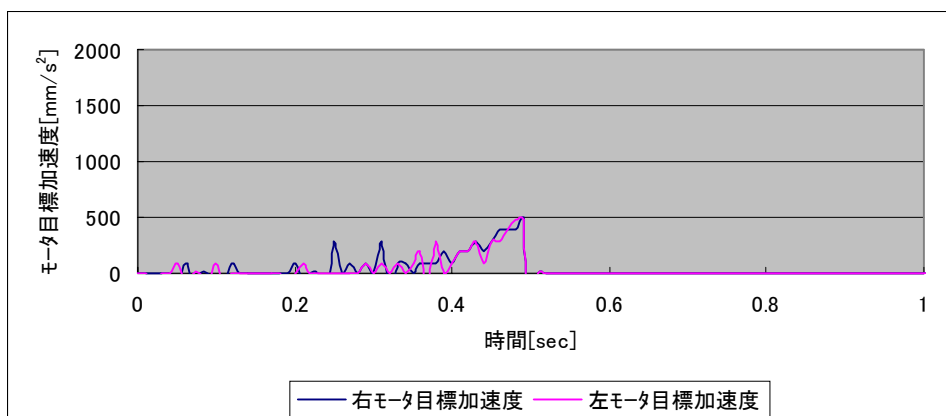
(b) $c = 350$ [N s/m]



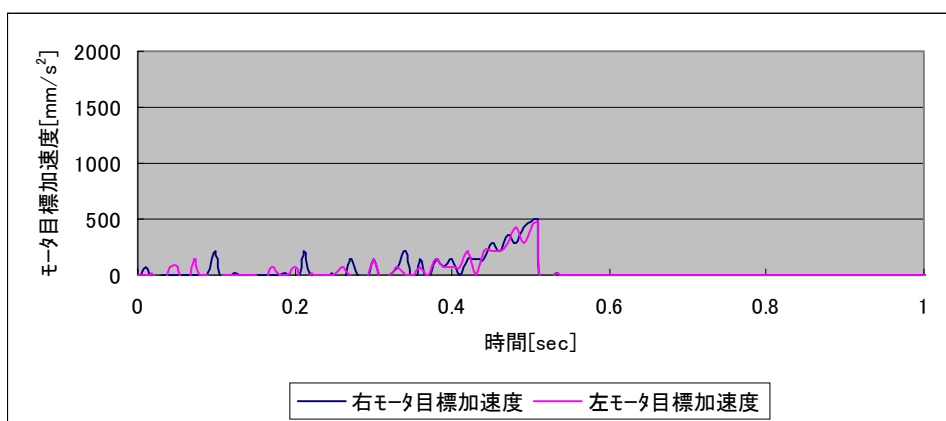
(c) $c = 450$ [N s/m]

図 5.3.2.41 転倒防止実験：モータ目標加速度（モータ目標加速度 500 [mm/s²]，被験者 B）

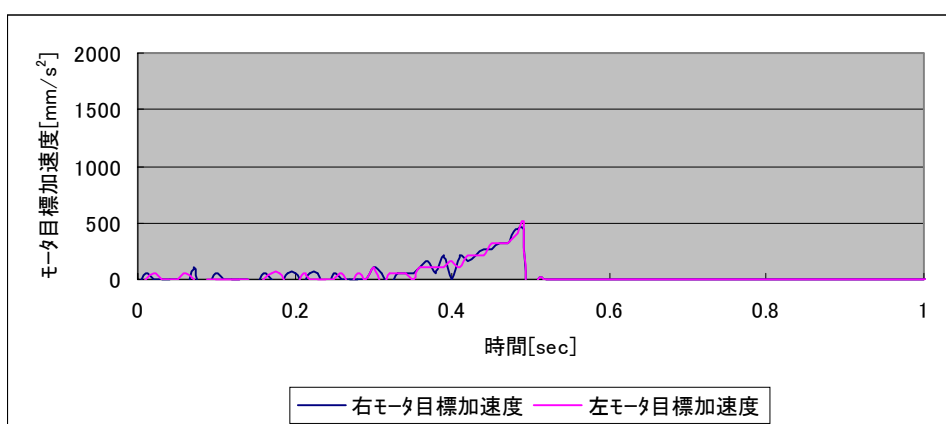
[グラフ F] モータ目標加速度を用いた転倒防止実験



(a) $c = 250$ [N s/m]



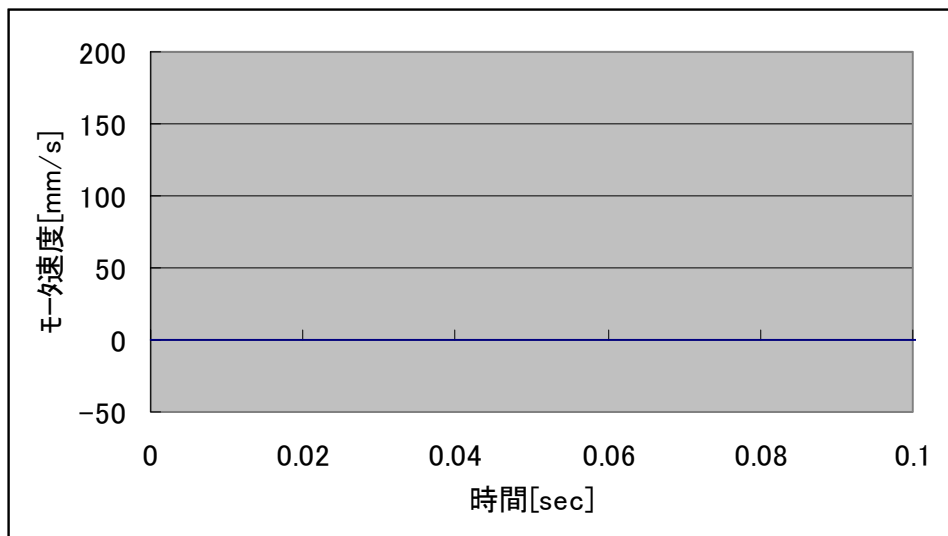
(b) $c = 350$ [N s/m]



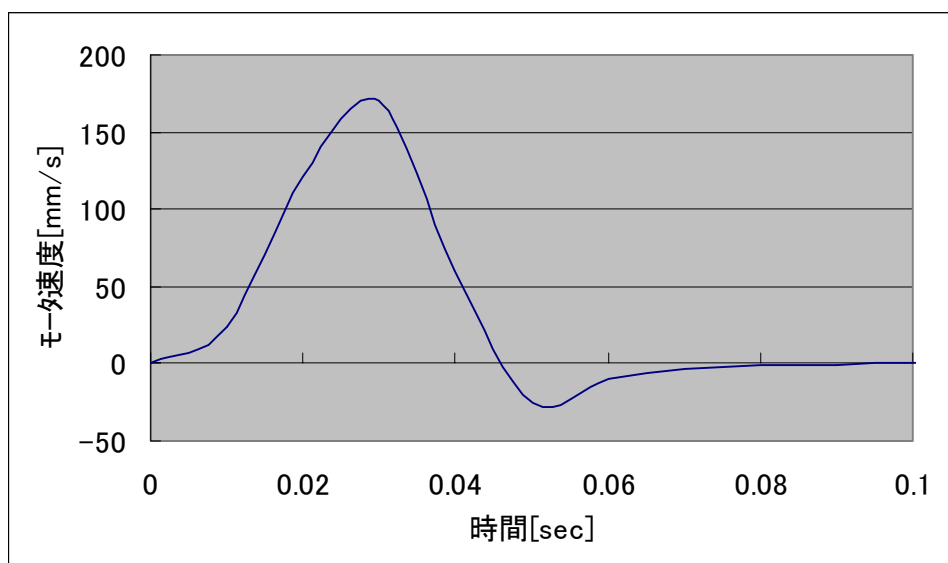
(c) $c = 450$ [N s/m]

図 5.3.2.42 転倒防止実験： ϵ - τ 目標加速度 (ϵ - τ 目標加速度 500 [mm/s²]，被験者 C)

[グラフ G] モータ目標加速度とモータ実測加速度で停止した場合の比較実験



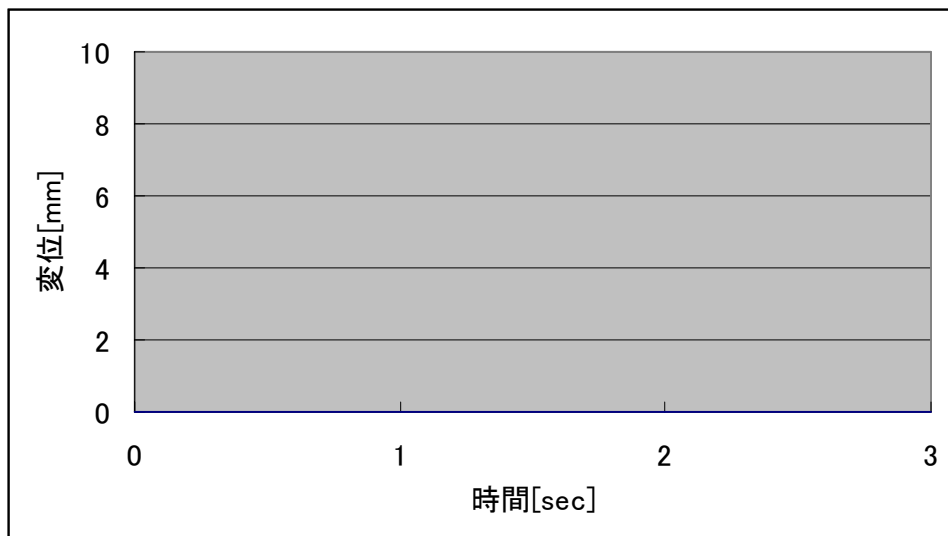
(a)モータ目標加速度を用いた場合



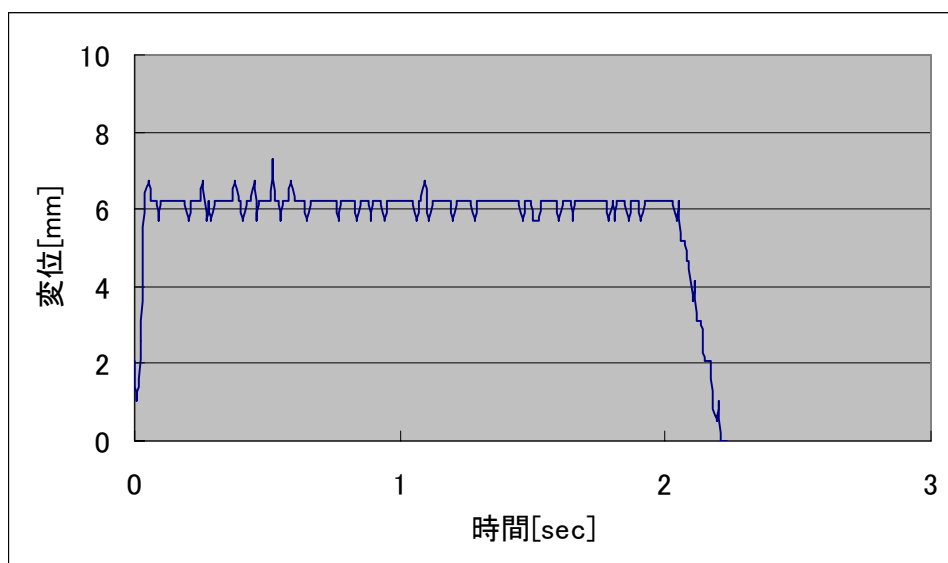
(b)モータ実測加速度を用いた場合

図 5.3.2.43 比較実験：モータ速度

[グラフ G] モータ目標加速度とモータ実測加速度で停止した場合の比較実験



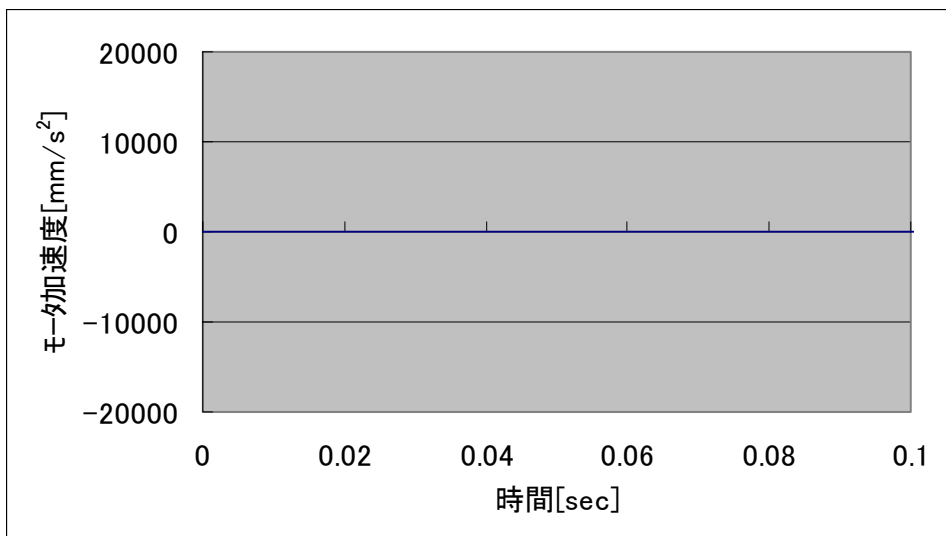
(a)モータ目標加速度を用いた場合



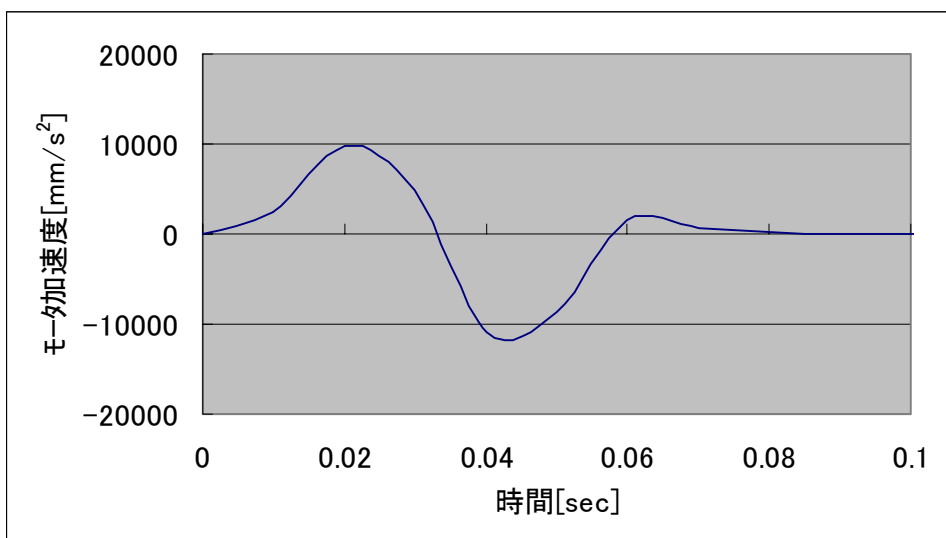
(b)モータ実測加速度を用いた場合

図 5.3.2.44 比較実験：変位

[グラフ G] モータ目標加速度とモータ実測加速度で停止した場合の比較実験



(a) モータ目標加速度を用いた場合



(b) モータ実測加速度を用いた場合

図 5.3.2.45 比較実験：モータ加速度