

2 0 2 3 年度 卒業論文/制作

HMD を使用した手の固有受容感覚に関する実験

提出日：2 0 2 4 年 2 月 9 日

指導教員：郡司 幸夫 教授

早稲田大学 基幹理工学部 表現工学科

学籍番号：1w203019－8

大泉 舜

目次	頁
1. 序論	4
1.1 研究の背景	4
1.1.1 固有受容感覚	4
1.1.2 VR と固有受容感覚	5
1.2 本研究の目的	5
2. 実験	5
2.1 被験者	5
2.1.1 実験前アンケート	5
2.2 実験	5
2.2.1 「スタート画面」のシーンについて	6
2.2.2 「はじめに」のシーンについて	6
2.2.3 「実験 1」のシーンについて	7
2.2.4 「実験 2」のシーンについて	8
2.2.5 「計測」のシーンについて	8
2.3 実験手順	9
2.4 チュートリアル	10
2.5 実験 1	10
2.6 実験 2	10
2.7 分析方法	10
2.7.1 実験の計測結果	11
2.7.2 実験中のデータ	11
2.7.3 実験後アンケート	11
3. 実験結果	12
3.1 各実験の計測結果について	12
3.1.1 各実験の計測結果	12
3.1.2 計測結果の分析	15
3.2 各被験者の実験中のデータについて	20
3.2.1 各被験者の実験中のデータ	20
3.2.2 実験中のデータの分析	29
3.3 実験後アンケートの結果	35
4. 議論	36
4.1 計測結果	36
4.2 衝突回数と固有受容感覚	36

5. 結論	36
6. 参考文献	38

1. 序論

1.1 研究の背景

1.1.1 固有受容感覚

20 世紀初頭にイギリスの生理学者である Sherrington は、感覚を生じさせる機能的な分類として感覚器を外受容感覚(exteroception)、内受容感覚(interoception)、固有受容感覚(proprioception)の3つに分けた[1]。外受容感覚とは、身体外部の情報の知覚に關与する視覚、聴覚、触覚、味覚、嗅覚といったヒトの五感にあたる。また、内受容感覚とは、心拍や血圧、呼吸などの主に身体内部の生理的な情報の知覚に關与している[4]。心臓の鼓動が聞こえる、血圧の上昇や低下による眩暈やふらつき、息苦しく感じる、胃が締め付けられるなどが内受容感覚の例として挙げられる。そして固有受容感覚は、自身の身体の位置や動き、力加減などの視覚や嗅覚といった外部情報ではなく身体内部の物理的な情報を知覚する[3]。物音を立てないように歩くとといった関節をゆっくり曲げ伸ばしする時や目を閉じた状態で特定の位置に触れることができる時に、運動をコントロールする働きや身体がどの位置にあるかを把握する働きが現れる。これらが固有受容感覚の例として挙げられる。ただし、固有受容感覚はどの年代でも同様の精度を示すのではなく、8 歳までは固有受容感覚の誤差が大きく、それ以上の年長や大人においては精度が向上している[6]。また、固有受容感覚は内受容感覚の要素も含むため、固有受容感覚は内受容感覚の一部であると Vaitl(1996)は述べた[2]。内受容感覚の一部であるが、固有受容感覚は、現実で視覚情報が提供されない条件において精度が低下するため、視覚情報に依存していることが示唆された[6]。

1.1.2 VR と固有受容感覚

VR とは、主にコンピュータ技術を使用して仮想の環境を生成し、ユーザーを仮想の環境に没入させる技術や体験を指す。また通常、ヘッドセットやコントローラー、ディスプレイ、センサーなどのハードウェアを使用して行う。

章 1.1.1 で説明した固有受容感覚とヘッドマウントディスプレイなどを用いた VR との相互作用に関する研究でいくつかのことが示唆されている。Fossataro らは、没入型仮想現実(IVR)と visual enhancement of touch(VET)を組み合わせ、視覚と固有受容感覚の情報が身体近傍空間(peripersonal space, PPS)でどのような影響が出るか研究し、視覚と固有受容感覚の情報が不整合の場合、手の位置のコーディングが不正確になり、手中心の PPS が拡大するという結果になった[5]。また、視覚と固有受容感覚だけでなく触覚フィードバックを提供することで視野角が広がる[8]。

ヘッドマウントディスプレイ(HMD)を使用した IVR では、IVR 環境で視覚情報がある場合、被験者の身体の感覚が現実の状況と異なり、より正確でない動きを認識する傾向にあるため、固有受容感覚の精度が落ちる[6]。しかし、回転が固有受容感覚に与える影響についての研究において、Bayramova らは回転

角度が大きくなった際、視覚情報を取得できない場合に回転角度の把握が困難になるため、多感覚統合(視覚+固有受容感覚)が自己の位置情報をより正確に符号化することに役立つことを示唆した[7]。

1.2 研究の目的

章 1.1.2 で説明した Valori らの研究[6]と Bayramova らの研究[7]の結果は矛盾している。矛盾した原因として、被験者数の違いやオプティックフローの違いが挙げられている[7]。これらを明らかにすると同時に実験システムをコンパクトにし、ヘッドマウントディスプレイを使用した際の固有受容感覚の精度を簡単に調べることを目的とする。私は、VR 環境と現実の状況は異なるため、視覚が固有受容感覚を混乱させる要因になり、[6]に類似した結果を示すと推測した。

ヘッドマウントディスプレイを使用することで視覚や固有受容感覚など、個々の感覚系から得られる情報を広範囲に操作できる。

2. 実験

2.1 被験者

本実験は 2023 年 12 月 19 日~25 日にかけて実施した。被験者は MyWaseda の学生参画・Student Job ページ及び口頭での募集により集められた早稲田大学の学生 16 名。また、被験者は実験開始前にアンケートに回答し、実験全体の目的・流れ、プライバシーの扱い及び保護についての説明を受け、同意を得たうえで実験に参加した。実験前アンケートに関しては、章 2.1.1 で説明する。実験終了後、行った 2 つの実験に関するアンケートに回答した。その後、受領書を記入の上、図書カード 1500 円分を報酬として贈与した。

2.1.1 実験前アンケート

実験開始前に年齢や性別、ヘッドマウントディスプレイの体験の有無に関するアンケートを行った。被験者 16 名は、年齢 18~36 歳、平均年齢 21.9 歳だった。その内、男性 11 名、女性 5 名。ヘッドマウントディスプレイの体験の有無に関しては、体験したことない 3 名、1 回ある 5 名、2~3 回ある 5 名、それ以上が 3 名という結果になった。

2.2 実験システム

本研究のアプローチとして、実験ではヘッドマウントディスプレイである Meta Quest 3 を用いた。そして、Meta Quest Touch Plus コントローラーで UI の操作や実験で用いる棒を掴む動作などを実現した。こ

これらの操作や動作の実現に Meta 社が公開している XR 開発に特化した Unity 向けの SDK である Meta XR Core SDK を用いた。Meta Quest 3 とは meta 社が開発し、2023 年 10 月 10 日に販売したヘッドマウントディスプレイである。本実験システムは 2019 年モデルの MacBook Pro(CPU: Core i5, メモリ: 8GB) 上で Unity 2022.3.4 を用いて開発を行った。開発した Unity プロジェクトは 5 つのシーンで構成されている。各シーンについては、章 2.2.1 – 2.2.5 に示す。また、Meta Quest Touch Plus コントローラー間の距離と実験システムを開いてからの経過時間を取得し、Google スプレッドシートにリアルタイムで出力するために Google AppSheet を使用した。

実験中は、Meta Quest 3 のミラーリング機能を使用した。MacBook Pro に Meta Quest 3 を装着した被験者が見ている視覚を共有し、画面録画を行った。

2.2.1 「スタート画面」のシーンについて

スタート画面は図 2.2.1.1 に示す。実験システムを立ち上げると UI が VR 空間上に表示される。Meta Quest Touch Plus コントローラーの前面にあるトリガーボタンを押すことで任意の UI のボタンを押し、シーンを移動することができる。左右どちらのコントローラーでも操作可能である。Meta Quest Touch Plus コントローラーのボタンについては図 2.2.1.2 に示す。

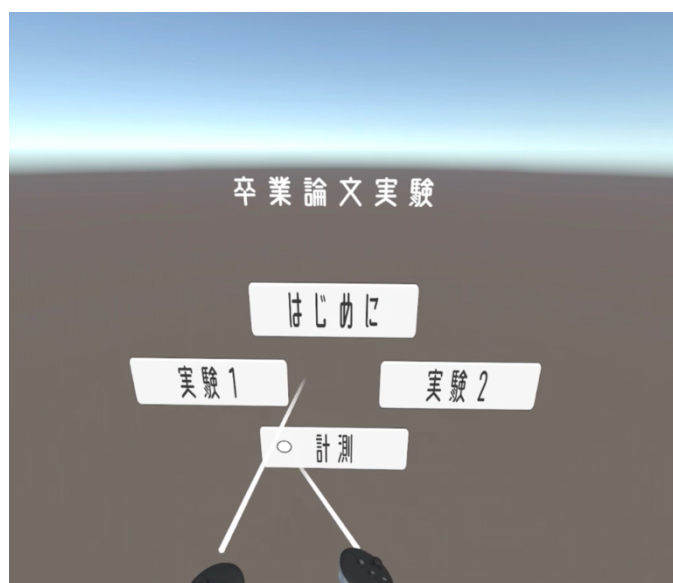


図 2.2.1.1 スタート画面

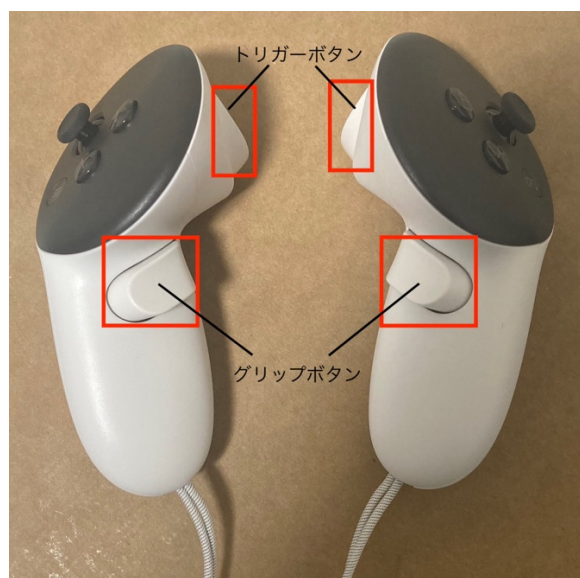


図 2.2.1.2 コントローラーのボタン

2.2.2 「はじめに」のシーンについて

「はじめに」のシーンの様子については図 2.2.2.1 に示す。「はじめに」のシーンに移動すると目の前に仮想の棒(直径: 2.5cm, 高さ: 40cm の円柱)が表示される。棒の色は青色(R: 66, G: 221, B: 221, A: 244)である。仮想の青い棒は左右の Meta Quest Touch Plus コントローラーのグリップボタンを同時に押すことで持つことができる。グリップボタンを離した場合、棒は Meta Quest Touch Plus コントローラーから離れ、その場で棒は静止する。また、横一列に並んだ 3 つの柱(底辺: 10cm × 10cm, 高さ: 200cm の直方体)が 3 列あり、「はじめに」のシーンに移動して 30 秒経過すると被験者に向かって、一定のスピードで

柱全体が動く。柱と柱の間隔は 50cm, 柱の列は 100cm 間隔で並んでいる。

棒が柱に触れた場合, 衝突回数を表示している UI が更新され, 触れている間は柱が赤色(R: 255, G: 0, B: 0, A: 255)に変化し, Meta Quest Touch Plus コントローラーが振動する。この時, 衝突判定は Meta Quest Touch Plus コントローラーには付与せず, 棒のみに付与した。棒の衝突範囲は, Meta Quest Touch Plus コントローラーで棒の端を持った時を想定し, 設定した。また, 柱の衝突回数が 10 回になった場合, 強制的に「スタート画面」のシーンに戻るようになっている。

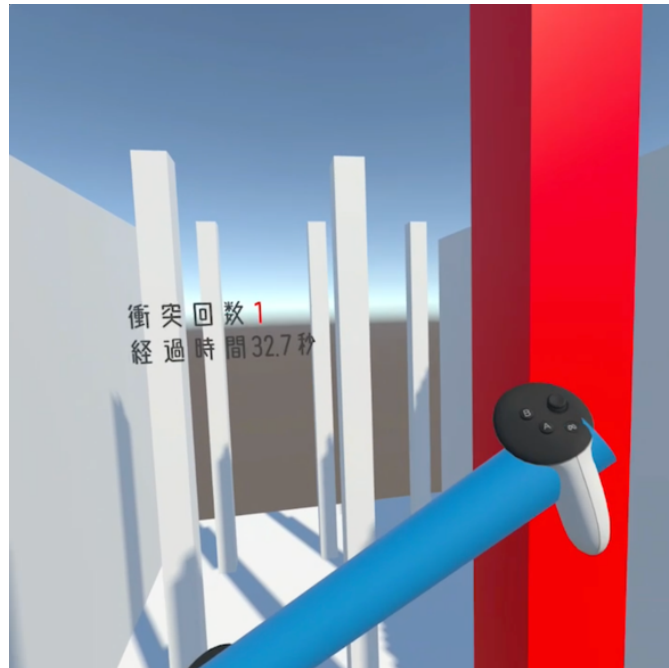


図 2.2.2.1 「はじめに」のシーン

2.2.3 「実験 1」のシーンについて

「実験 1」のシーンの様子については図 2.2.3.1 に示す。「実験 1」のシーンに移動すると目の前に仮想の棒(直径: 2.5cm, 高さ: 20cm の円柱)が表示される。棒を持つ方法, 棒の色, 柱の大きさ, 柱全体が移動する速さ, そして柱に衝突した際の色の変化に関しては, 章 2.2.2 と同じである。「はじめに」のシーンでは, 横一列に並んだ柱の数は 3 つであったが「実験 1」のシーンでは 5 つになり, その列は 10 列ある。柱と柱の間隔は 30cm, 柱の列は 100cm 間隔で並んでいる。また, 柱は横に動かなかったが「実験 1」のシーンでは横に動くように制御した。具体的には, 柱が移動する最大値と最小値を決め, ある範囲の中でランダムな速さで移動するようにした。さらに, 被験者に向かって柱全体が移動を始める時間は 15 秒とした。衝突回数の制限はなく, GameManager というオブジェクトの Z 軸の位置が -10 よりも大きい場合, 強制的に「スタート画面」のシーンに戻るようになっている。

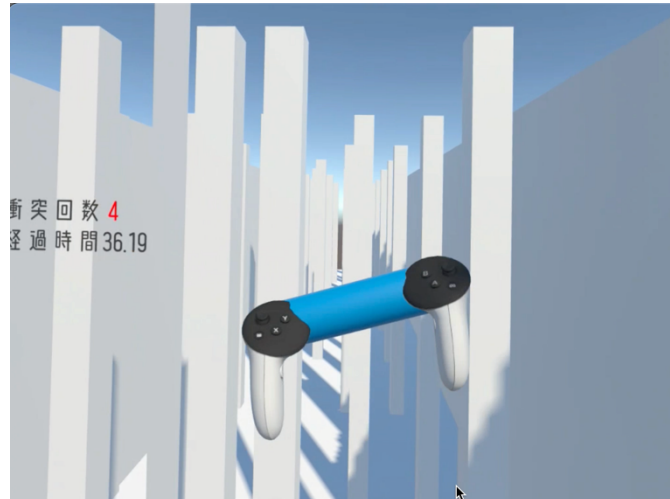


図 2.2.3.1 「実験 1」のシーン

2.2.4 「実験 2」のシーンについて

「実験 2」のシーンの様子については図 2.2.4.1 に示す。「実験 2」のシーンは「実験 1」のシーンの構成と基本的には、変わらないが 1 点だけ異なる点が存在する。被験者に向かって柱全体が移動を始めると同時に棒が透明になり、視覚的に見えない状態になる。ただし、衝突判定は残っているため、柱に衝突すると柱の色が変化し、Meta Quest Touch Plus コントローラーが振動する。



図 2.2.4.1 「実験 2」のシーン

2.2.5 「計測」のシーンについて

「計測」のシーンの様子については図 2.2.5.1 に示す。START と書かれたボタンを押すことでカウントダウンが 5 秒から始まり、終わると強制的に「スタート画面」のシーンに戻るようになっている。ボタンを押す方法は、章 2.2.1 と同じである。

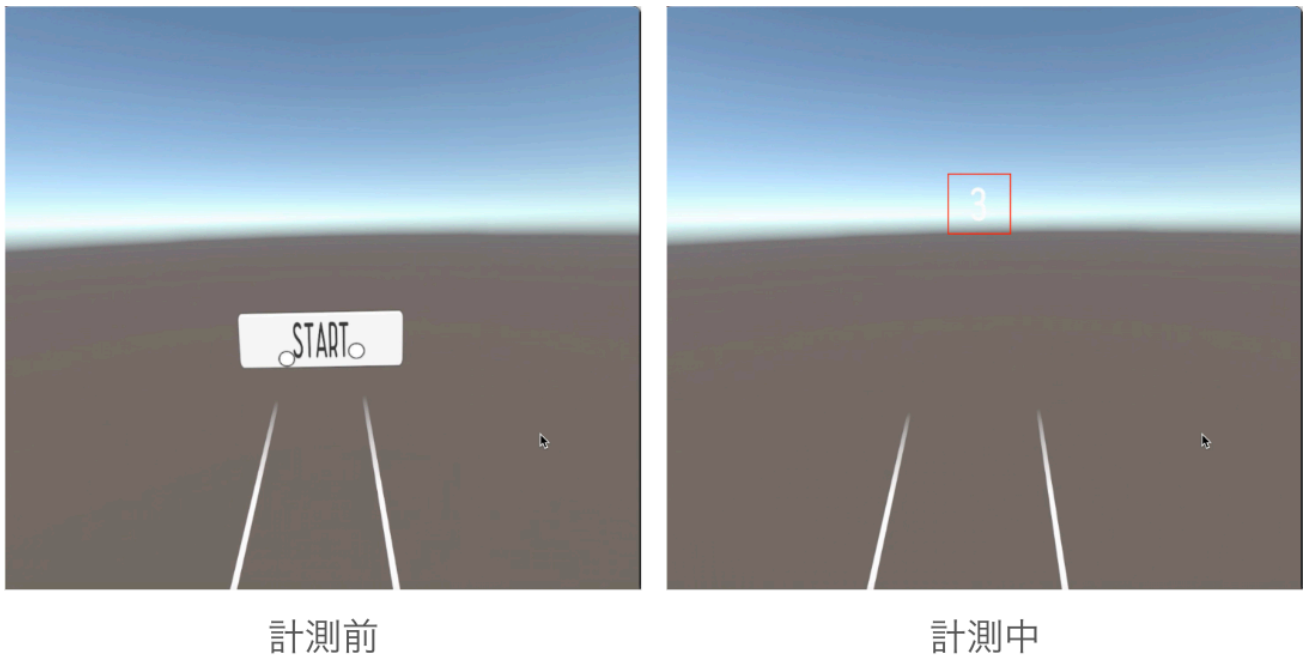


図 2.2.5.1 「計測」のシーン

2.3 実験手順

実験としては、実験 1,2 を行ったが、その前にチュートリアルを行った。チュートリアルについては章 2.4 で説明する。実験を行う順序による実験結果の偏りを無くすため、実験 1→2 の順で行った場合、次の被験者は実験 2→1 の順で実験をした。つまり、被験者は、実験 1→2 の順序で進んだ 8 人と、実験 2→1 の順序で進んだ 8 人に分けられた。実験 1 については章 2.5、実験 2 については章 2.6 で説明する。

実験は以下の手順で行った。(実験 1→2 の場合)

- ① 被験者は立った状態で Meta Quest 3 を装着する。
- ② 「はじめに」を押し、チュートリアルを開始する。
- ③ 「実験 1」を押し、実験 1 を開始する。
- ④ 実験 1 終了後、Meta Quest 3 を外し、腕を 1 分間回すなどして適当に動かす。
- ⑤ 被験者は立った状態で再度 Meta Quest 3 を装着する。「計測」を押し、実験で持った棒の長さを Meta Quest Touch Plus コントローラーで示す。
- ⑥ 被験者は実験 1 で持った棒の長さが何 cm であったかを回答する。
- ⑦ Meta Quest 3 を外し、3 分間休憩。
- ⑧ 被験者は立った状態で Meta Quest 3 を装着する。
- ⑨ 「実験 2」を押し、実験 2 を開始する。
- ⑩ 実験 2 終了後、Meta Quest 3 を外し、腕を 1 分間回すなどして適当に動かす。
- ⑪ 被験者は立った状態で再度 Meta Quest 3 を装着する。「計測」を押し、実験で持った棒の長さを Meta Quest Touch Plus コントローラーで示す。
- ⑫ 被験者は実験 2 で持った棒の長さが何 cm であったかを回答する。

⑬ 実験 1,2 を終えた後、被験者は実験後アンケートに回答する。

実験 2→1 の順序で実験を進める場合は、③～⑥と⑨～⑫の位置を入れ替える。

実験後アンケートでは、実験 1 と実験 2 のどちらの方が棒の大きさを計測する時に提示し易かったかを 3 つの選択肢(実験 1, 実験 2, どちらでもない)で評価し、そのように感じた理由を被験者に回答してもらった。

2.4 チュートリアル

チュートリアルは、章 2.1 に記した実験説明、同意確認と章 2.1.1 に記した実験前アンケートの回答を行った後、Meta Quest Touch Plus コントローラーの操作方法に慣れるために行った。また、棒と柱の衝突判定や衝突範囲を学習するために柱の列が通り過ぎるまでに被験者には、10 回柱に当たるように指示をした。柱の列が通り過ぎるまでに 10 回当てることができなかった被験者は、再度「はじめに」のシーンを起動し、衝突回数が合計 10 回になるように行った。その後、Meta Quest Touch Plus コントローラーの操作に関して不明点の有無を確認し、実験 1 もしくは実験 2 を行った。

2.5 実験 1

実験 1 は、棒を持ち、不規則に動く柱を被験者は前後に歩くことなく、出来るだけ柱に当たらないように避ける。横への移動は可能とした。その後、「計測」のシーンにて、実験 1 で持っていた棒の長さを示す。実験 1 のシステムについては、章 2.2.3 の通りだ。

常に棒が見えている条件では、視覚に頼ってしまい、固有受容感覚が乱れると考えた。そのため、実際の棒の長さとは「計測」のシーンで計測した Meta Quest Touch Plus コントローラー間の距離では大きな誤差が生じると予想した。

2.6 実験 2

実験 2 では、15 秒経過したと同時に棒が透明になり、見えなくなる。実験 2 のシステムについては、章 2.2.4 の通りだ。棒が見えない条件では、視覚に頼ることなく柱に当たらないように動く動作により、固有受容感覚が強調され実験 1 よりも小さな誤差になると予想した。

2.7 分析方法

実験 1,2 のタスク中や計測中の Meta Quest Touch Plus コントローラー間の距離を Google AppSheet を用いて 1 秒に 1 回 Google スプレッドシートにリアルタイムで出力した。しかし、ネットワークの通信速度の影響を受けるため、必ずしも 1 秒に 1 回とはならず、0.01 秒～0.05 秒の誤差が生じる。

2.7.1 実験の計測結果

「計測」のシーンで計測した Meta Quest Touch Plus コントローラー間の距離を求めた。START ボタンを押すと即座にカウントダウンが始まるため、距離の算出方法に関しては、最初の 2 秒間は除外し残りの 3 秒間の平均を取った。そして、その値を実験の計測結果として表にまとめた。また、実際の棒の長さの実験の計測結果、各実験終了後に被験者に質問した「実験で持った棒の長さは何 cm か」の回答結果と比較した。

2.7.2 実験中のデータ

実験 1,2 のタスク中のデータは被験者ごとに分け、グラフを作成した。グラフは縦軸をコントローラー間の距離(cm)、横軸を実験開始の経過時間(s)とした。実験開始の経過時間に関しては、被験者に向かって柱全体が動き出す 15 秒よりも少し前の 12 秒を横軸の原点とした。これらのデータをエントロピーに関して分析する。エントロピーは

$$-\sum p_k \log p_k$$

の式から算出した。また、手動指示精度は下記の式で定義し、

$$\text{手動指示精度(\%)} = 100 - \left| \frac{20(\text{cm}) - \text{実験の計測結果}(\text{cm})}{20(\text{cm})} \right| \times 100$$

言語的指示精度は下記の式で定義し、分析する。

$$\text{言語的指示精度(\%)} = 100 - \left| \frac{\text{実験の計測結果}(\text{cm}) - \text{質問回答結果}(\text{cm})}{\text{実験の計測結果}(\text{cm})} \right| \times 100$$

また、実験中棒が柱に衝突した回数を各被験者の実験中の動画からデータを取得し、1 回目の実験と 2 回目の実験で衝突回数の変化を比較した。

2.7.3 実験後アンケート

実験後アンケートの内容に関しては、章 2.3 に記した通りだ。被験者が 3 つの選択肢から回答した結果を表にまとめ、被験者はどちらの条件に強い刺激を受けているのかを分析した。

3. 実験結果

各被験者の実験中のデータや計測結果などを以下に示す。被験者 a~h は実験 1→2 の流れで行い，被験者 i~p は実験 2→1 の流れで実験を行った。

3.1 各実験の計測結果について

3.1.1 各実験の計測結果

各被験者の各実験の計測結果を図 3.1.1.1 に示す。

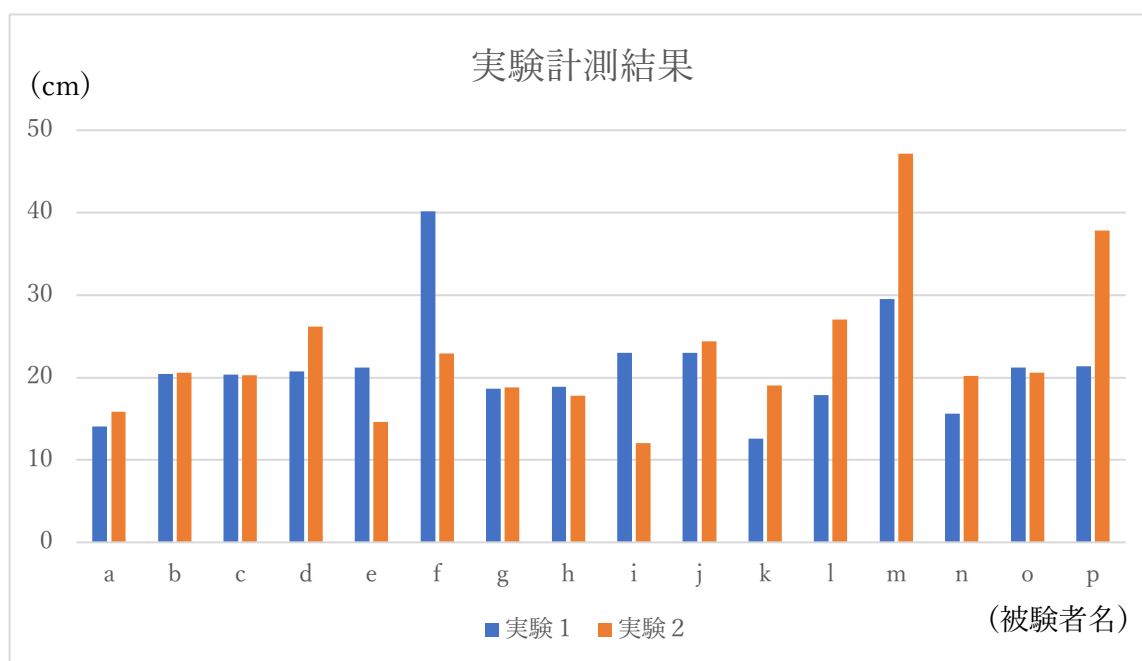


図 3.1.1.1 各被験者の実験 1,2 の計測結果

実験で用いた仮想の棒 20cm と各実験の計測結果を比較した表を表 3.1.1.1 に，図を 3.1.1.2 に示す。実験 1,2 のどちらの精度が高いかを記した。また，各実験終了後の質問「実験で持っていた棒の長さは何 cm だと思うか」の回答と計測結果を比較した表を表 3.1.1.2 に，図を 3.1.1.3 に示す。

被験者名	手動指示精度(%)		精度が高い方
	実験1	実験2	
a	70.4520875	79.4008	実験2
b	97.7221	97.0269625	実験1
c	98.3231125	98.7234	実験2
d	96.09655	69.212325	実験1
e	93.791425	73.0693375	実験1
f	-0.96325	85.4913625	実験2
g	93.143825	94.1062875	実験2
h	94.402775	88.79505	実験1
i	84.9308375	60.2882875	実験1
j	84.9308375	77.88505	実験1
k	63.0481875	95.088325	実験2
l	89.4235125	64.7469375	実験1
m	52.2596625	-35.874325	実験2
n	78.08895	99.0747625	実験2
o	94.074925	97.17105	実験2
p	93.1295625	10.70705	実験1

表 3.1.1.1 仮想の棒と計測結果の比較

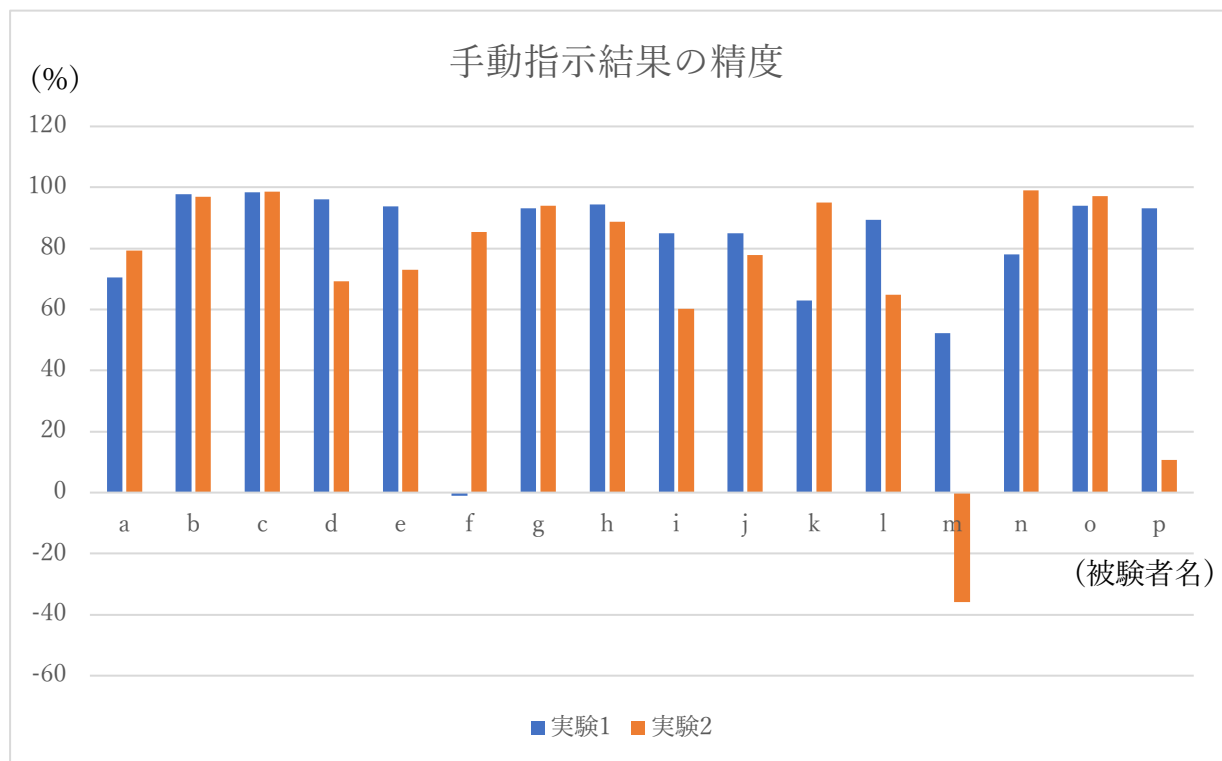


図 3.1.1.2 仮想の棒と計測結果の比較グラフ

被験者名	言語的指示精度(%)		精度が高い方
	実験1	実験2	
a	58.0595642	74.0566846	実験2
b	53.340751	78.609	実験2
c	73.7630762	49.3697458	実験1
d	81.8067158	76.459804	実験1
e	82.3070548	42.615242	実験1
f	54.7363759	90.8379291	実験2
g	12.1185167	-1.8993683	実験1
h	67.5886382	84.4641678	実験2
i	86.9042564	34.1303027	実験1
j	67.78532	52.0001851	実験1
k	-355.13095	68.5432728	実験2
l	60.2157346	66.5419314	実験2
m	-3.0589649	52.9943223	実験2
n	39.9261355	61.9270279	実験2
o	91.4326943	92.386434	実験2
p	70.1784345	22.4519719	実験1

表 3.1.1.2 計測結果と各実験終了後の質問結果の比較

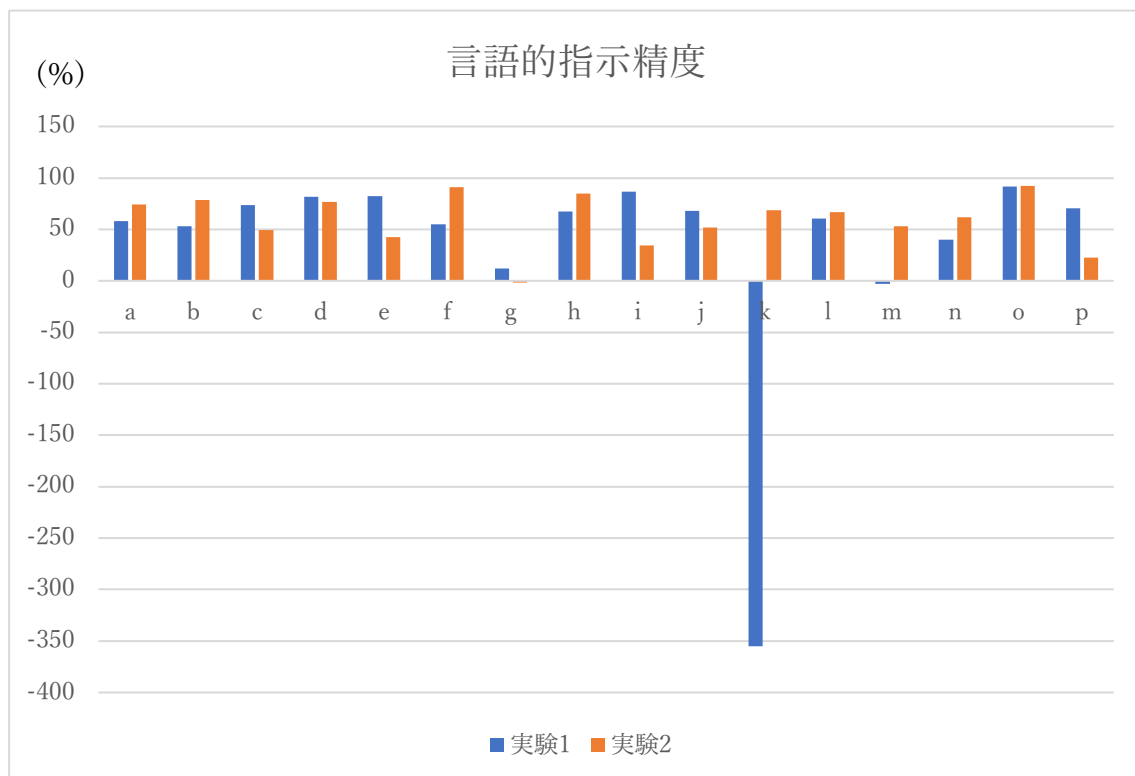


図 3.1.1.3 計測結果と各実験終了後の質問結果の比較グラフ

3.1.2 計測結果データの分析

任意の精度になる確率を各実験で被験者ごとに求める。この時の任意の確率は、実験中のデータを四捨五入した整数である。表 3.1.1.1 と表 3.1.1.2 の値を用いて、実験 1,2 の精度についてエントロピーを求め、結果を表 3.1.2.1 に示す。

	手動指示精度	言語的指示精度
実験1	1.001773499	1.128862484
実験2	1.128862484	1.204119983

表 3.1.2.1 各実験の精度に関するエントロピー

また、実験 1,2 の計測結果の値を用い、被験者全体、実験の回数順、被験者 a~h、被験者 i~p について有意水準 5% の t 検定を行う。ただし、仮想の棒 20cm の 2 倍(40cm)もしくは 0.5 倍(10cm)未満の計測結果は外れ値として、t 検定に含めない。結果を表 3.1.2.2~表 3.1.2.5 と図 3.1.2.1~図 3.1.2.4 に示す。

表 3.1.2.2 被験者全体の t 検定結果_計測

	実験1	実験2
平均	19.910671	21.2094558
分散	16.5234518	37.8436137
観測数	15	15
ピアソン相関	0.17054005	
仮説平均との差異	0	
自由度	14	
t	-0.4219402	
P(T<=t) 片側	0.3397381	
t 境界値 片側	1.76131014	
P(T<=t) 両側	0.6794762	
t 境界値 両側	2.14478669	

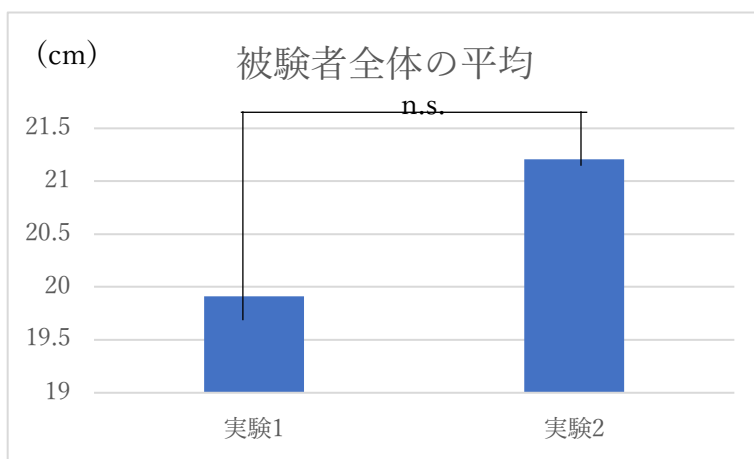


図 3.1.2.1 被験者全体の平均

表 3.1.2.3 実験回数に分けた被験者全体の t 検定結果_計測

	実験1回目	実験2回目
平均	21.1122466	20.0769031
分散	36.600926	19.3316269
観測数	14	16
仮説平均との差異	0	
自由度	23	
t	0.52954911	
P(T<=t) 片側	0.30074962	
t 境界値 片側	1.71387153	
P(T<=t) 両側	0.60149923	
t 境界値 両側	2.06865761	

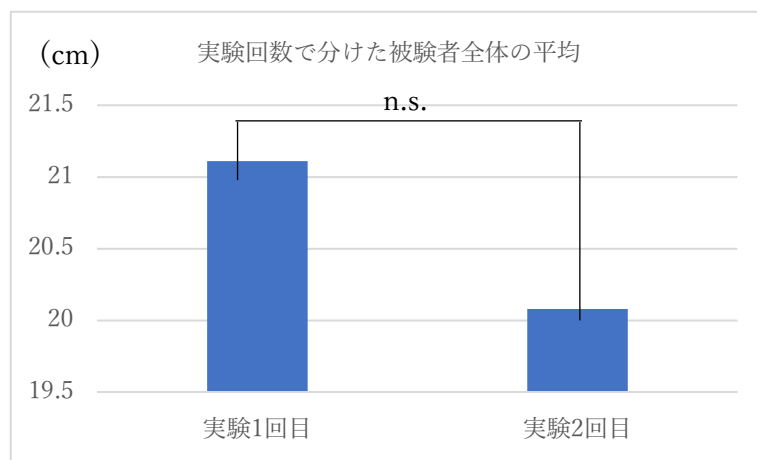


図 3.1.2.2 実験回数で分けた被験者全体の平均

表 3.1.2.4 被験者 a~h の t 検定結果_計測

	実験1	実験2
平均	19.2018714	19.6229356
分散	6.01148459	14.0016515
観測数	7	8
仮説平均との差異	0	
自由度	12	
t	-0.2606826	
P(T<=t) 片側	0.39937843	
t 境界値 片側	1.78228756	
P(T<=t) 両側	0.79875687	
t 境界値 両側	2.17881283	

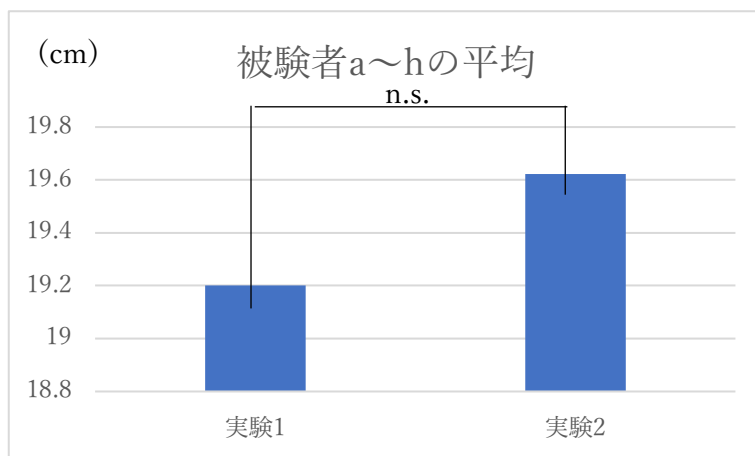


図 3.1.2.3 被験者 a~h の平均

表 3.1.2.5 被験者 i~p の t 検定結果_計測

	実験1	実験2
平均	20.5308706	23.0226218
分散	26.9522085	64.774944
観測数	8	7
仮説平均との差異	0	
自由度	10	
t	-0.701343	
P(T<=t) 片側	0.24954231	
t 境界値 片側	1.81246112	
P(T<=t) 両側	0.49908463	
t 境界値 両側	2.22813885	

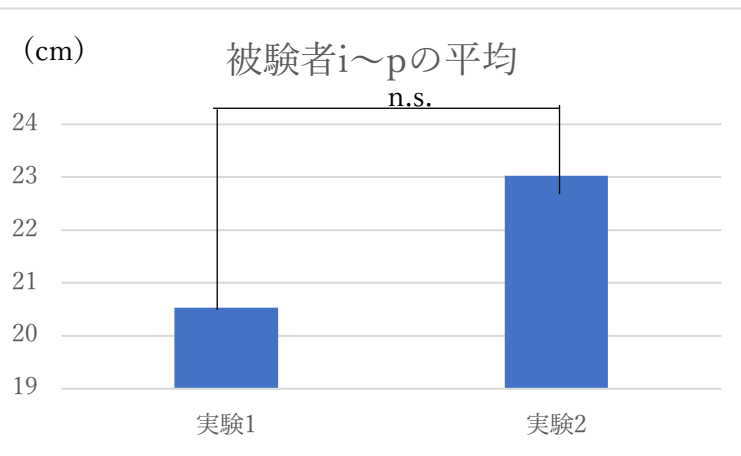


図 3.1.2.4 被験者 i~p の平均

いずれの結果においても $P > 0.05$ となったため、有意差は認められなかった。

実験 1,2 の計測結果と仮想の棒 20cm を比較した表 3.1.1.1 の値を用い, 被験者全体, 実験の回数順, 被験者 a~h, 被験者 i~p について有意水準 5% の t 検定を行う. ただし, 手動指示精度が 50% 未満の結果は外れ値として, t 検定には含めない. 結果を表 3.1.2.6~表 3.1.2.9 と図 3.1.2.5~図 3.1.2.8 に示す.

表 3.1.2.6 被験者全体の t 検定結果_手動指示

	実験1	実験2
平均	85.58789	84.2914241
分散	190.754771	181.995896
観測数	15	14
仮説平均との差異	0	
自由度	27	
t	0.25565456	
P(T<=t) 片側	0.4000776	
t 境界値 片側	1.70328845	
P(T<=t) 両側	0.80015521	
t 境界値 両側	2.05183052	

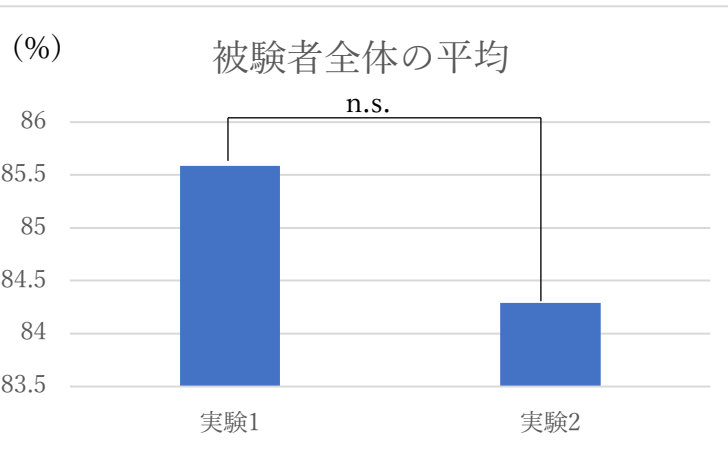


図 3.1.2.5 被験者全体の平均

表 3.1.2.7 実験回数に分けた被験者全体の
t 検定結果_手動指示

	実験1回目	実験2回目
平均	87.5527913	82.857
分散	195.076948	169.973771
観測数	13	16
仮説平均との差異	0	
自由度	25	
t	0.92755696	
P(T<=t) 片側	0.18125329	
t 境界値 片側	1.70814076	
P(T<=t) 両側	0.36250658	
t 境界値 両側	2.05953855	

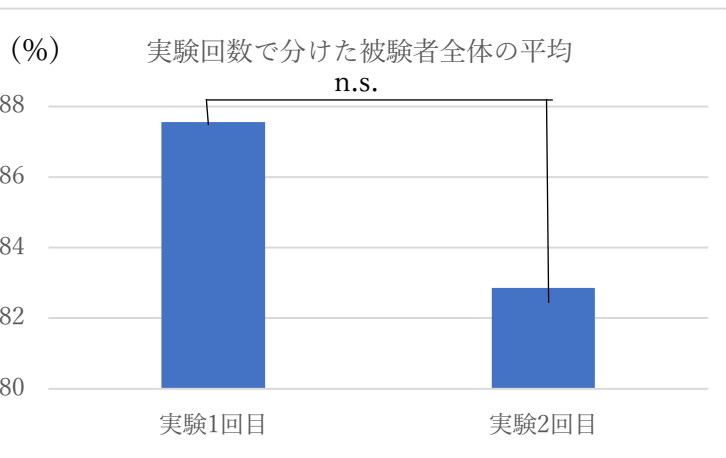


図 3.1.2.6 実験回数で分けた被験者全体の平均

表 3.1.2.8 被験者 a~h の t 検定結果_手動指示

	実験1	実験2
平均	91.9902679	85.7281906
分散	94.0181065	121.321169
観測数	7	8
仮説平均との差異	0	
自由度	13	
t	1.17101772	
P(T<=t) 片側	0.13130465	
t 境界値 片側	1.7709334	
P(T<=t) 両側	0.2626093	
t 境界値 両側	2.16036866	

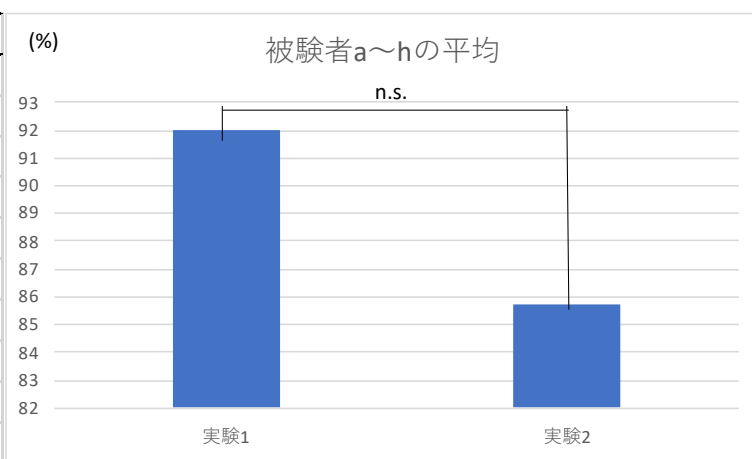


図 3.1.2.7 被験者 a~h の平均

表 3.1.2.9 被験者 i~p の t 検定結果_手動指示

	実験1	実験2
平均	79.9858094	82.3757354
分散	224.065515	295.63298
観測数	8	6
仮説平均との差異	0	
自由度	10	
t	-0.2718629	
P(T<=t) 片側	0.39562887	
t 境界値 片側	1.81246112	
P(T<=t) 両側	0.79125773	
t 境界値 両側	2.22813885	

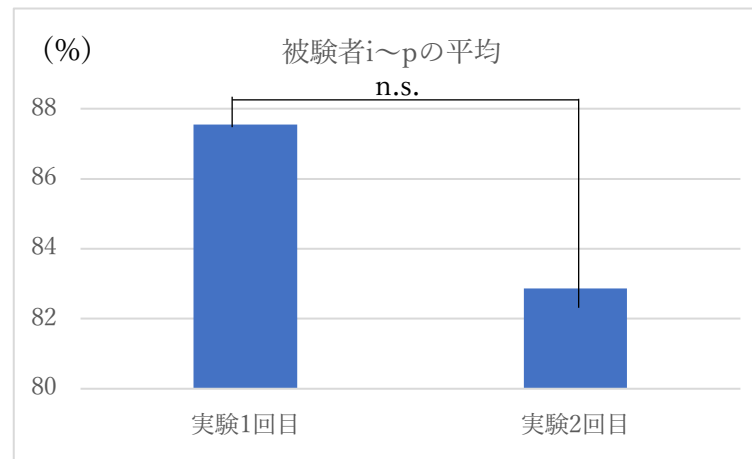


図 3.1.2.8 被験者 i~p の平均

いずれの結果においても $P > 0.05$ となったため、有意差は認められなかった。

また、実験 1,2 の計測結果と各実験終了後に被験者が回答した棒の長さを比較した表 3.1.1.2 の値を用い、被験者全体、実験の回数順、被験者 a~h、被験者 i~p について有意水準 5%の t 検定を行う。言語的指示精度が 50%未満の結果は外れ値として、t 検定には含めない。結果を表 3.1.2.10~表 3.1.2.13 と図 3.1.2.9~図 3.1.2.12 に示す。

表 3.1.2.10 被験者全体の t 検定結果_言語的指示

	実験1	実験2
平均	70.6765513	72.620069
分散	164.019132	189.381171
観測数	12	11
仮説平均との差異	0	
自由度	20	
t	-0.3497169	
P(T<=t) 片側	0.36510342	
t 境界値 片側	1.72471824	
P(T<=t) 両側	0.73020684	
t 境界値 両側	2.08596345	

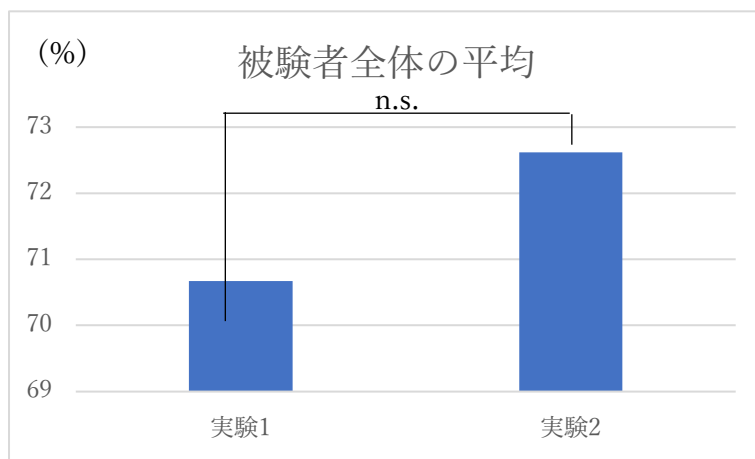


図 3.1.2.9 被験者全体の平均

表 3.1.2.11 実験回数に分けた被験者全体の
t 検定結果_言語的指示

	実験1回目	実験2回目
平均	66.6150269	78.0944025
分散	167.379816	107.369035
観測数	13	10
仮説平均との差異	0	
自由度	21	
t	-2.3623778	
P(T<=t) 片側	0.01394435	
t 境界値 片側	1.7207429	
P(T<=t) 両側	0.0278887	
t 境界値 両側	2.07961384	

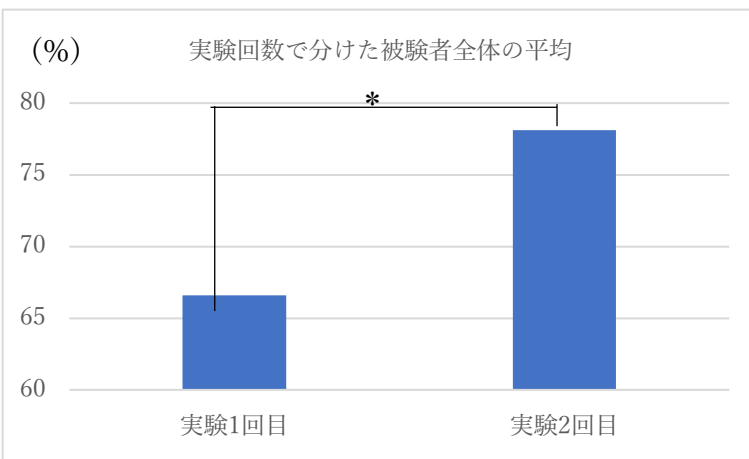


図 3.1.2.10 実験回数で分けた被験者全体の平均

表 3.1.2.12 被験者 a~h の t 検定結果_言語的指示

	実験1	実験2
平均	67.3717394	80.8855171
分散	152.594345	45.8149163
観測数	7	5
仮説平均との差異	0	
自由度	10	
t	-2.4286282	
P(T<=t) 片側	0.01776673	
t 境界値 片側	1.81246112	
P(T<=t) 両側	0.03553346	
t 境界値 両側	2.22813885	

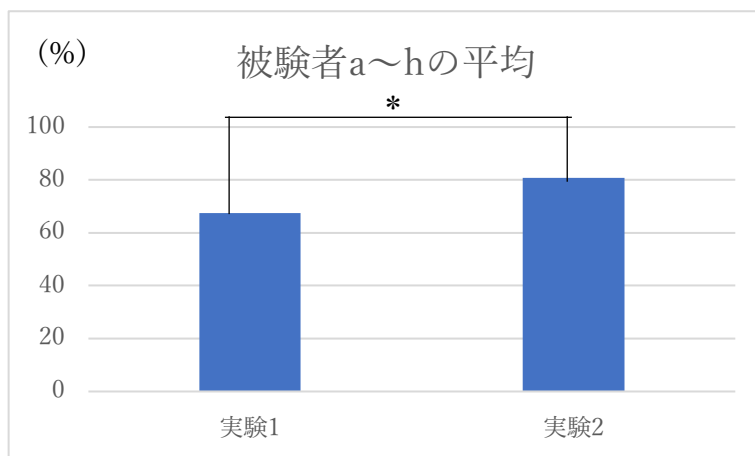


図 3.1.2.11 被験者 a~h の平均

表 3.1.2.13 被験者 i~p の t 検定結果_言語的指示

	実験1	実験2
平均	75.303288	65.7321956
分散	176.289612	216.861416
観測数	5	6
仮説平均との差異	0	
自由度	9	
t	1.13268165	
P(T<=t) 片側	0.14331039	
t 境界値 片側	1.83311293	
P(T<=t) 両側	0.28662078	
t 境界値 両側	2.26215716	

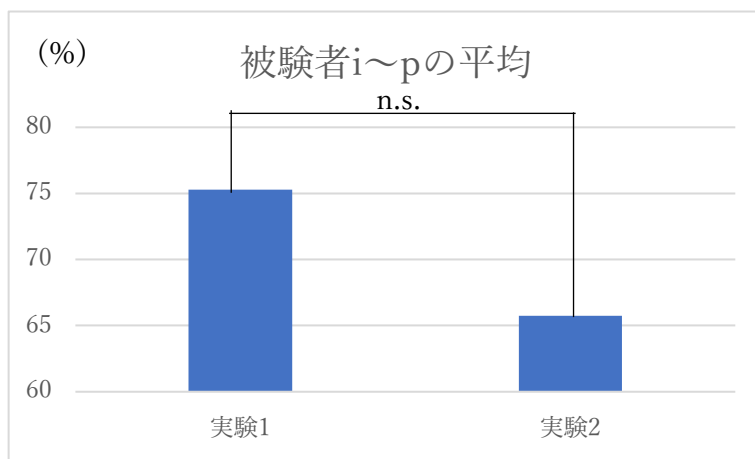


図 3.1.2.12 被験者 i~p の平均

表 3.1.2.11 及び表 3.1.2.12 は $p < 0.05$ より有意差があると考えられる。

3.2 各被験者の実験中のデータについて

3.2.1 各被験者の実験中データ

各実験中のコントローラー間の距離の推移を被験者ごとに図 3.2.1.1~図 3.2.1.16 に示す。

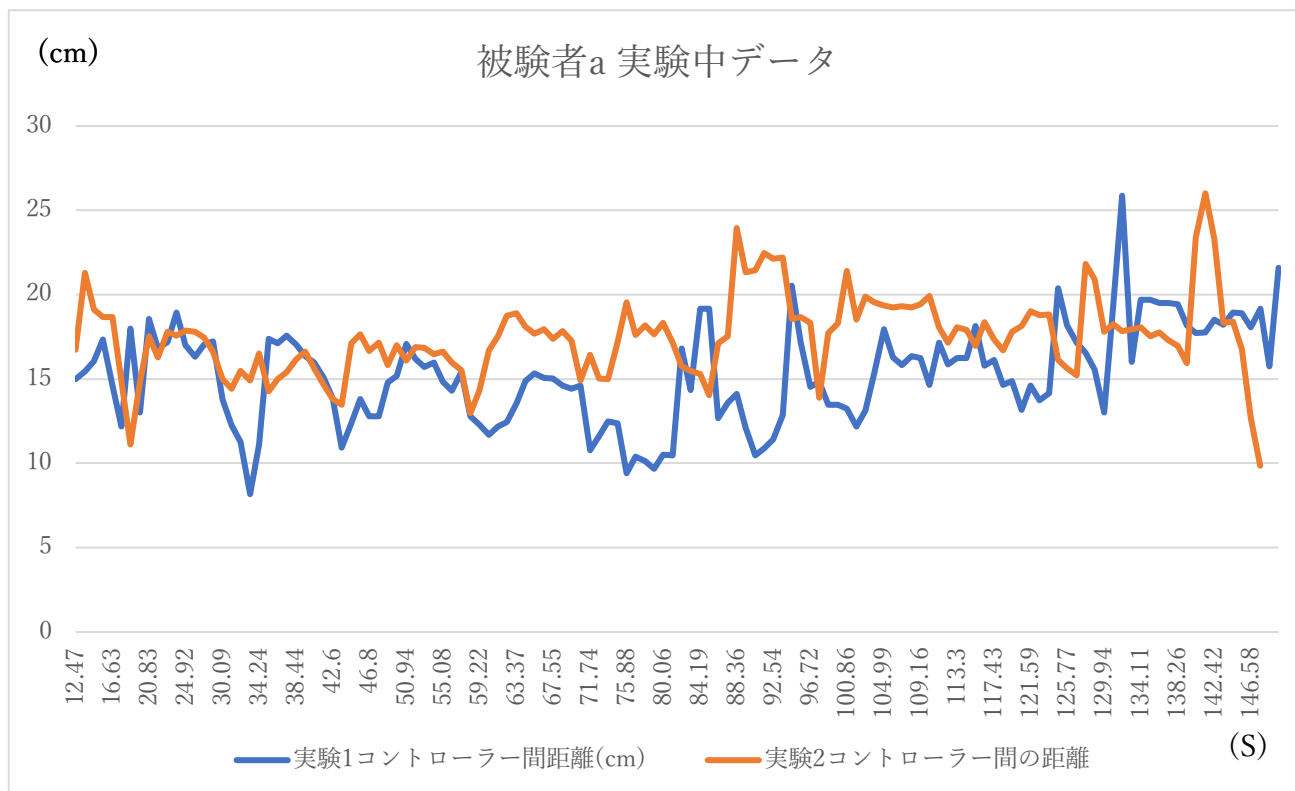


図 3.2.1.1 被験者 a 各実験の実験中データ

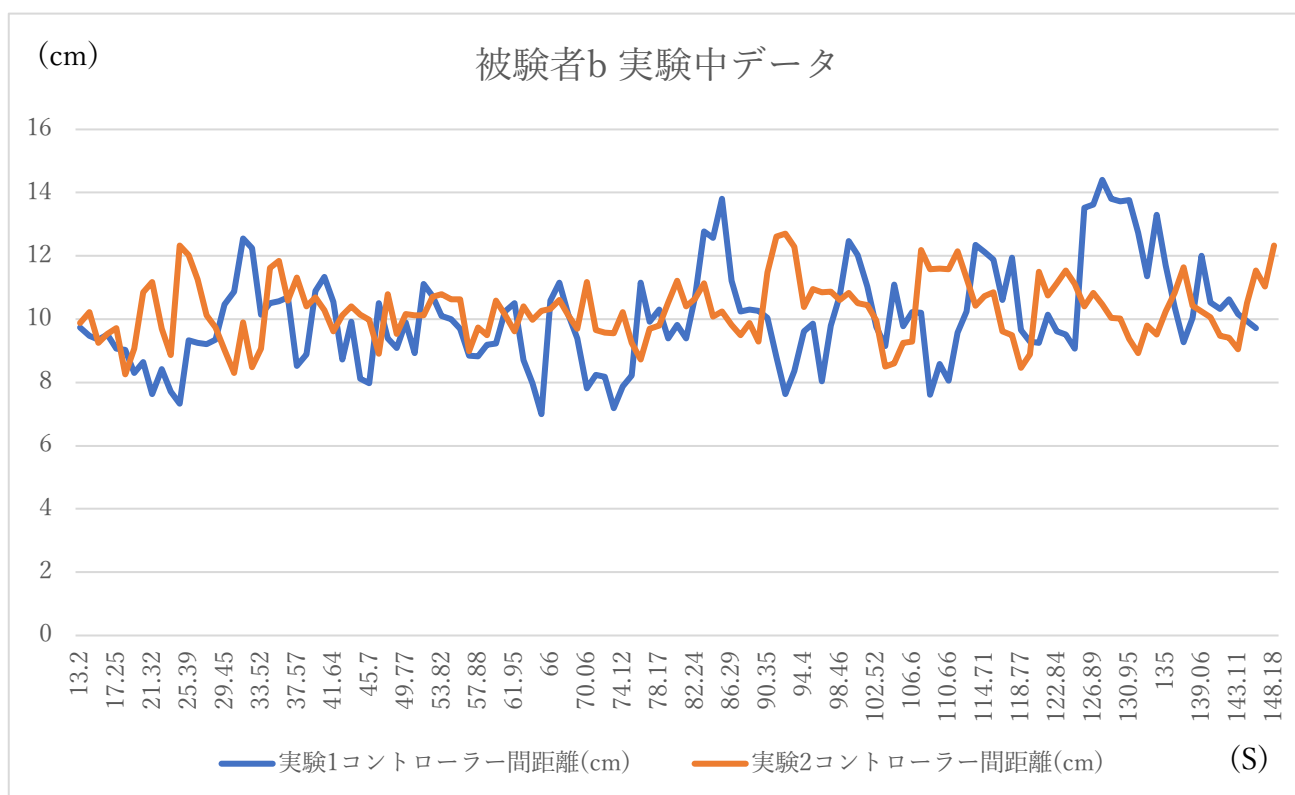


図 3.2.1.2 被験者 b 各実験の実験中データ

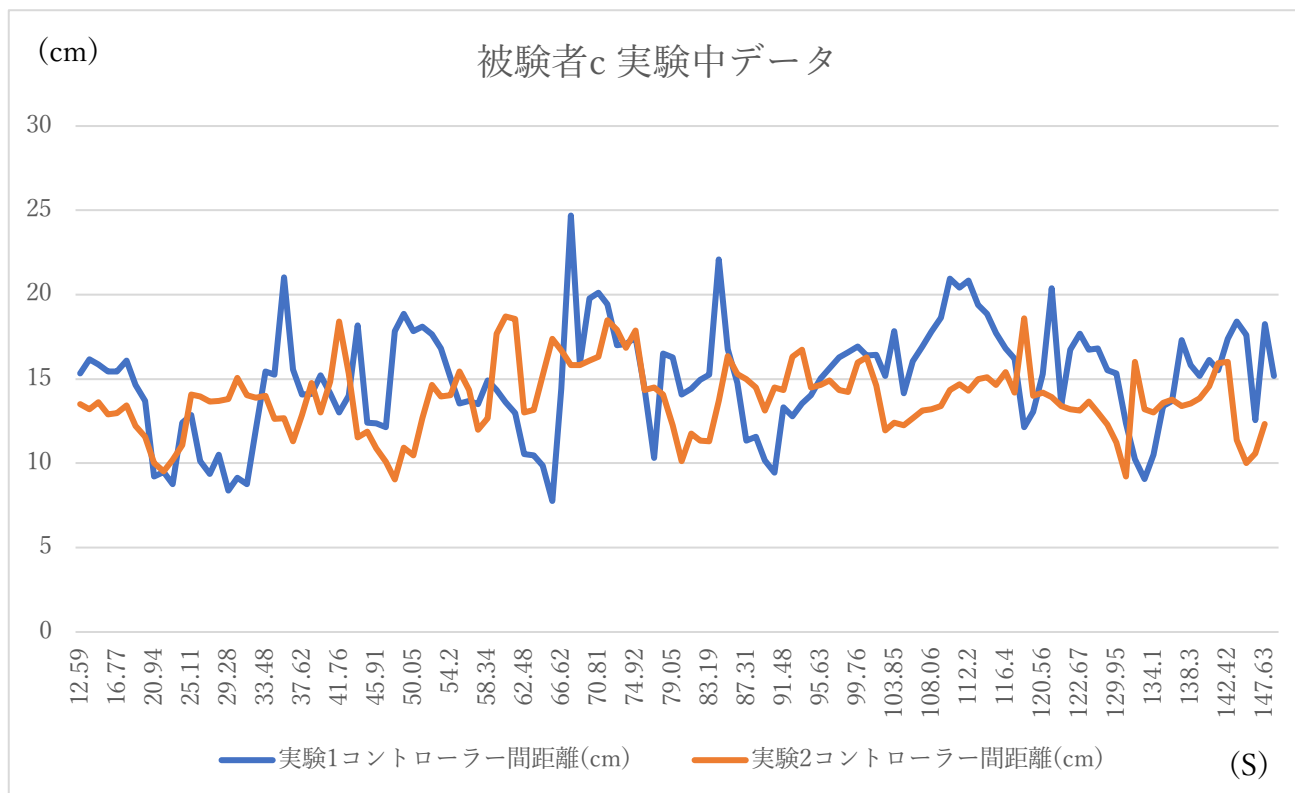


図 3.2.1.3 被験者 c 各実験の実験中データ

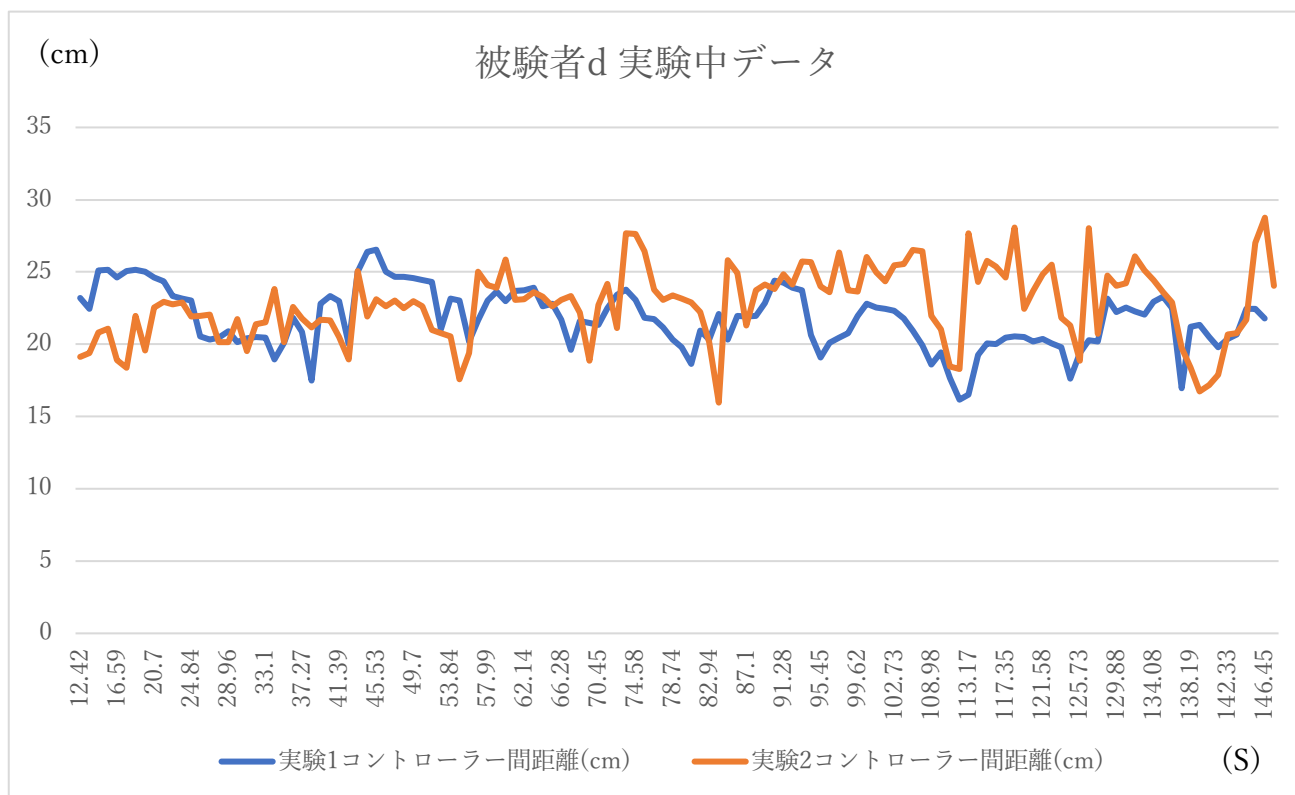


図 3.2.1.4 被験者 d 各実験の実験中データ

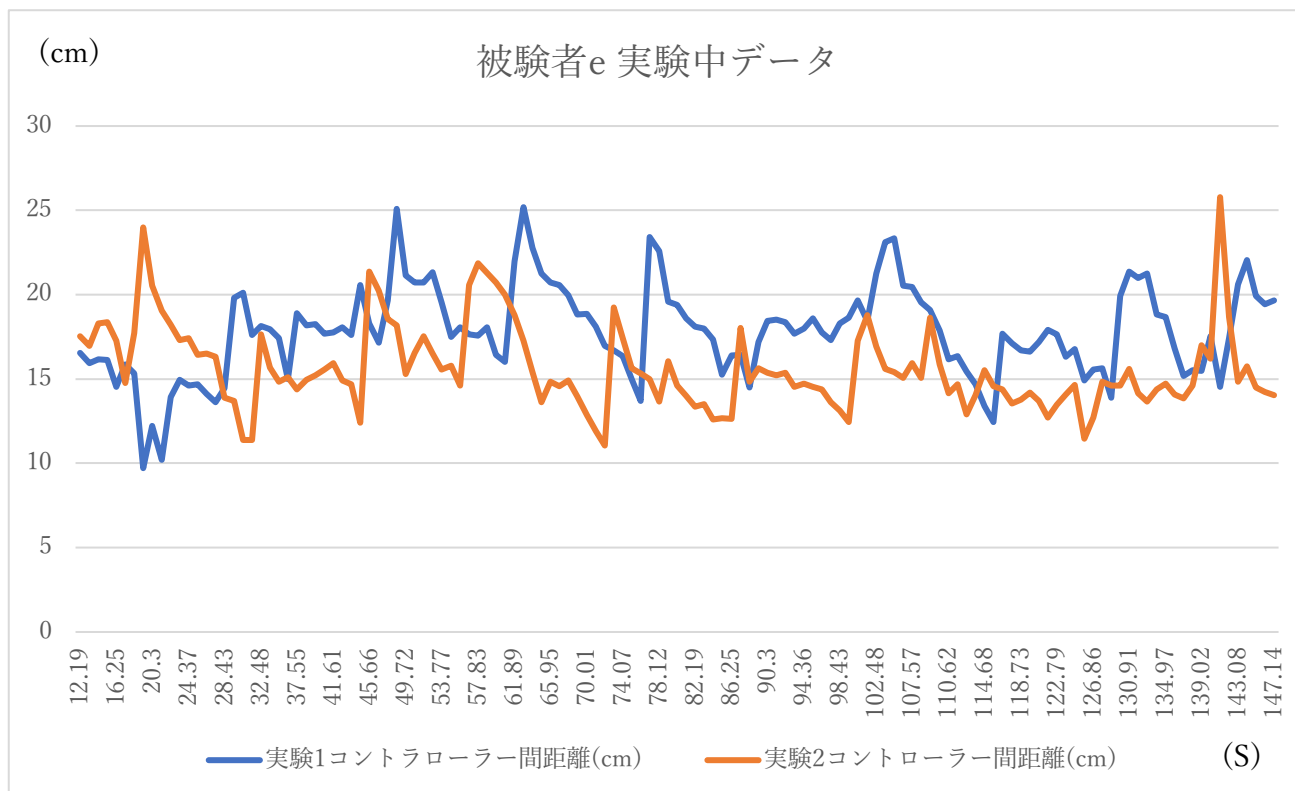


図 3.2.1.5 被験者 e 各実験の実験中データ

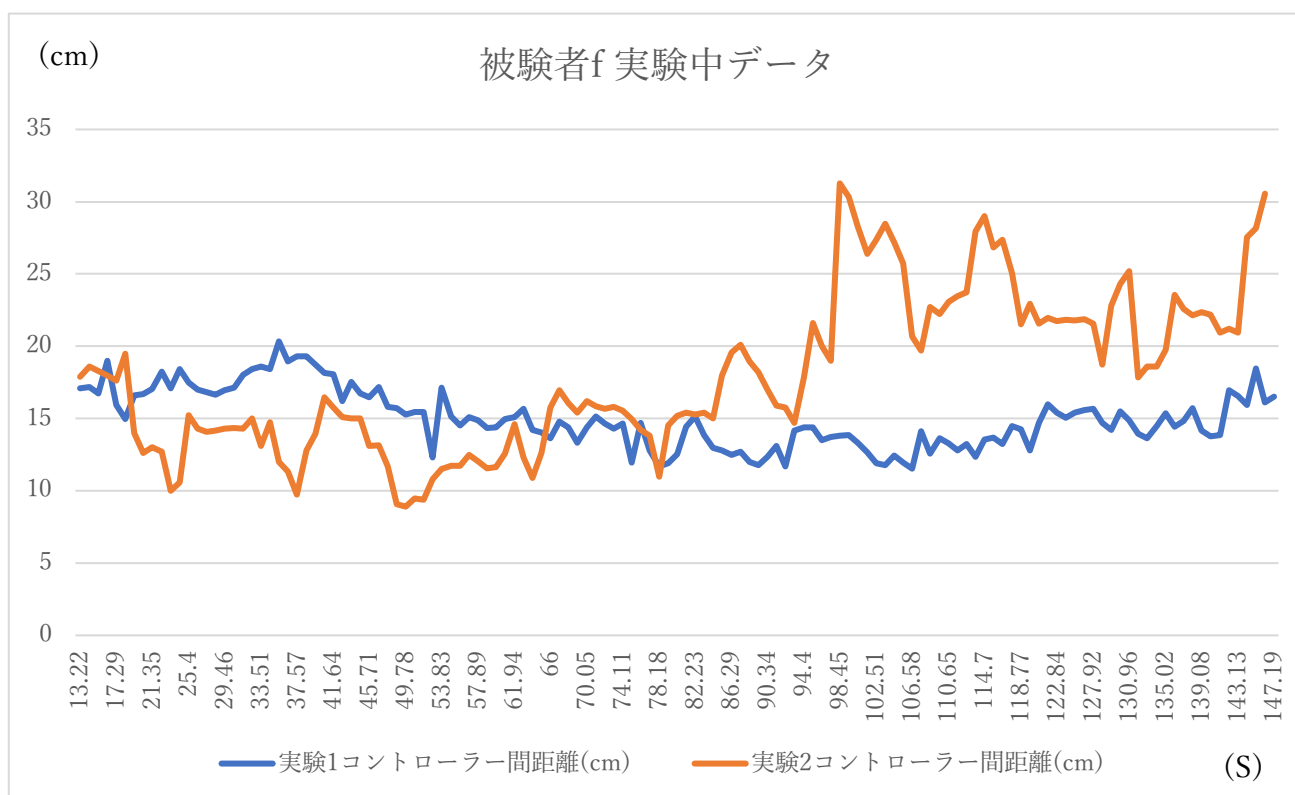


図 3.2.1.6 被験者 f 各実験の実験中データ

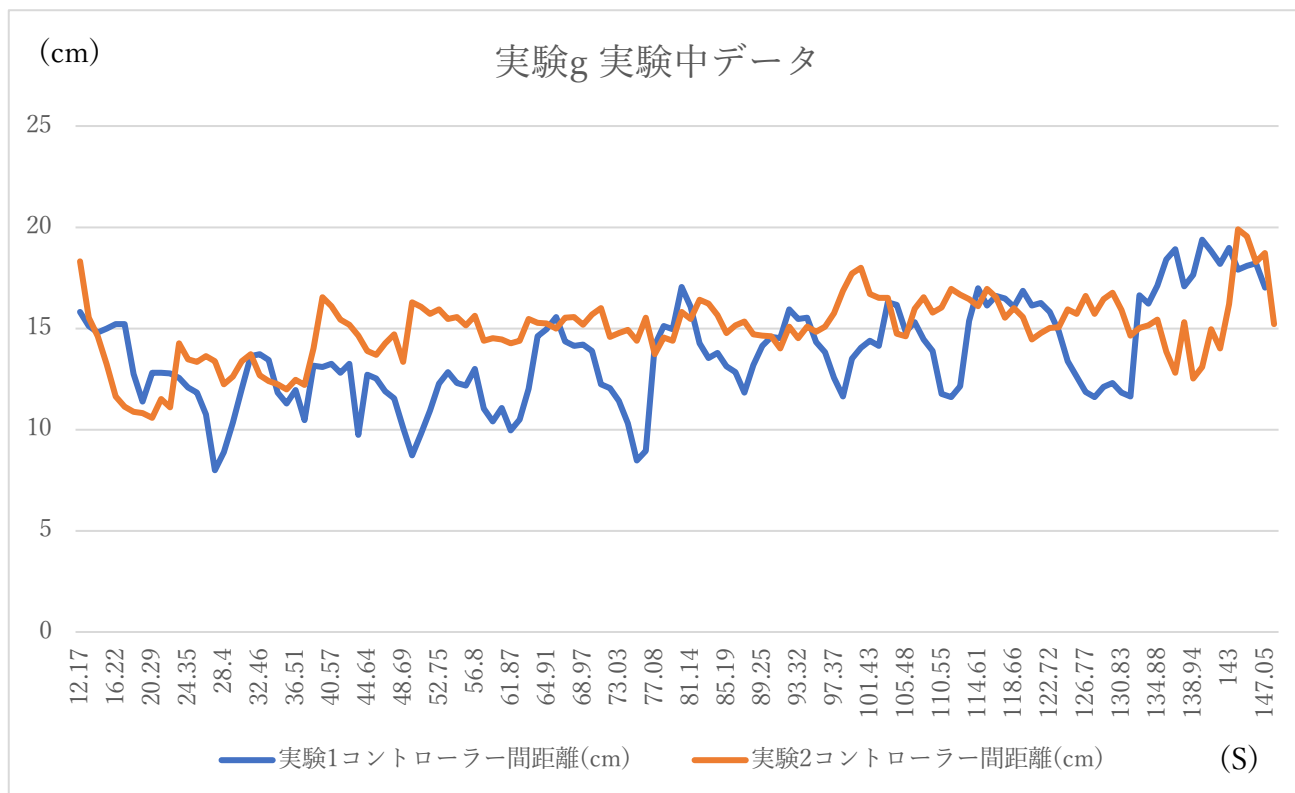


図 3.2.1.7 被験者 g 各実験の実験中データ

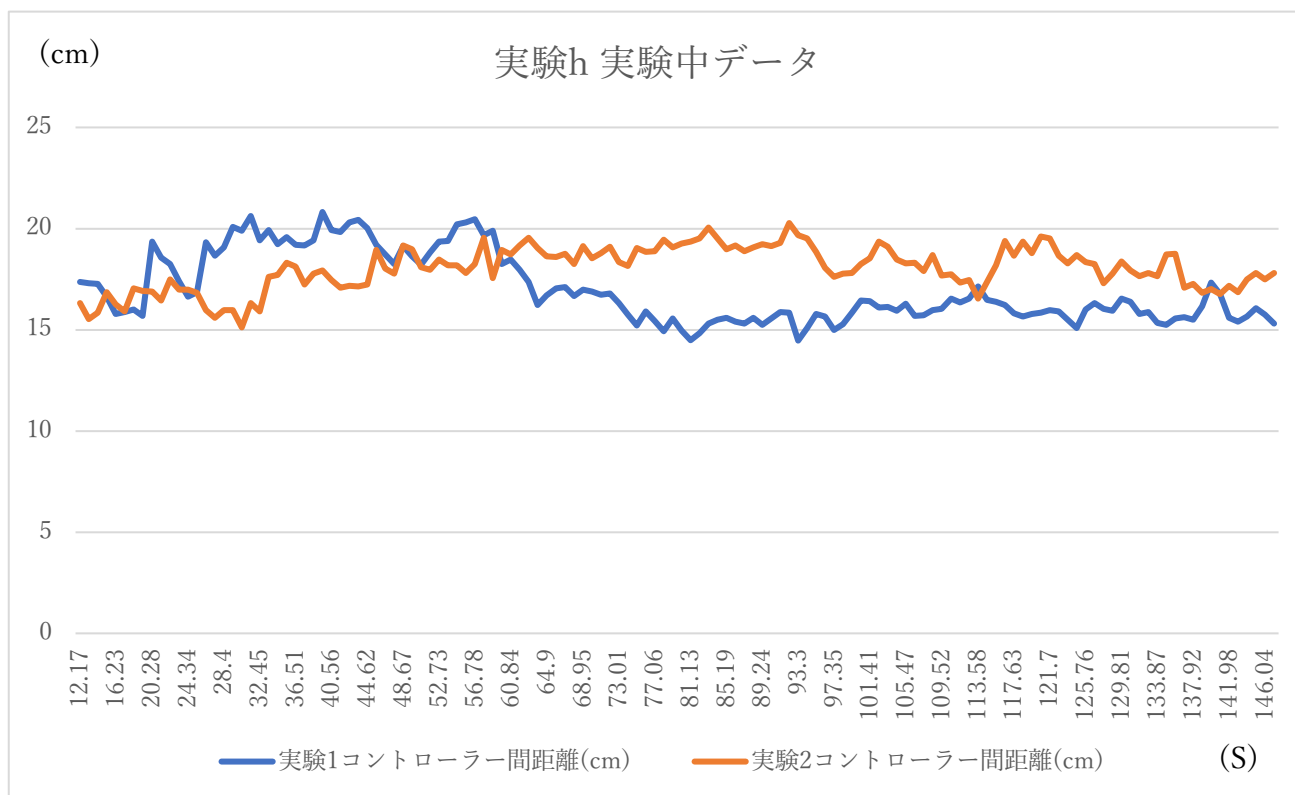


図 3.2.1.8 被験者 h 各実験の実験中データ

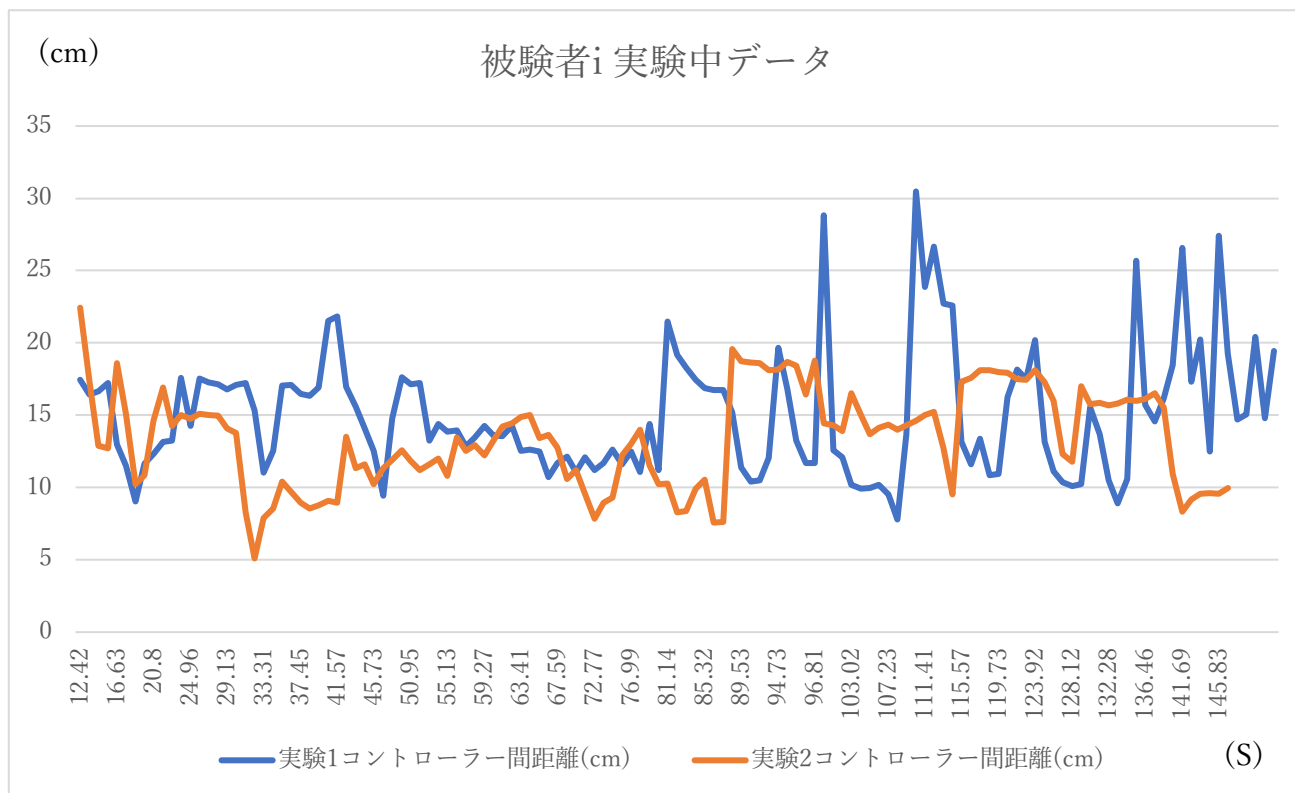


図 3.2.1.9 被験者 i 各実験の実験中データ

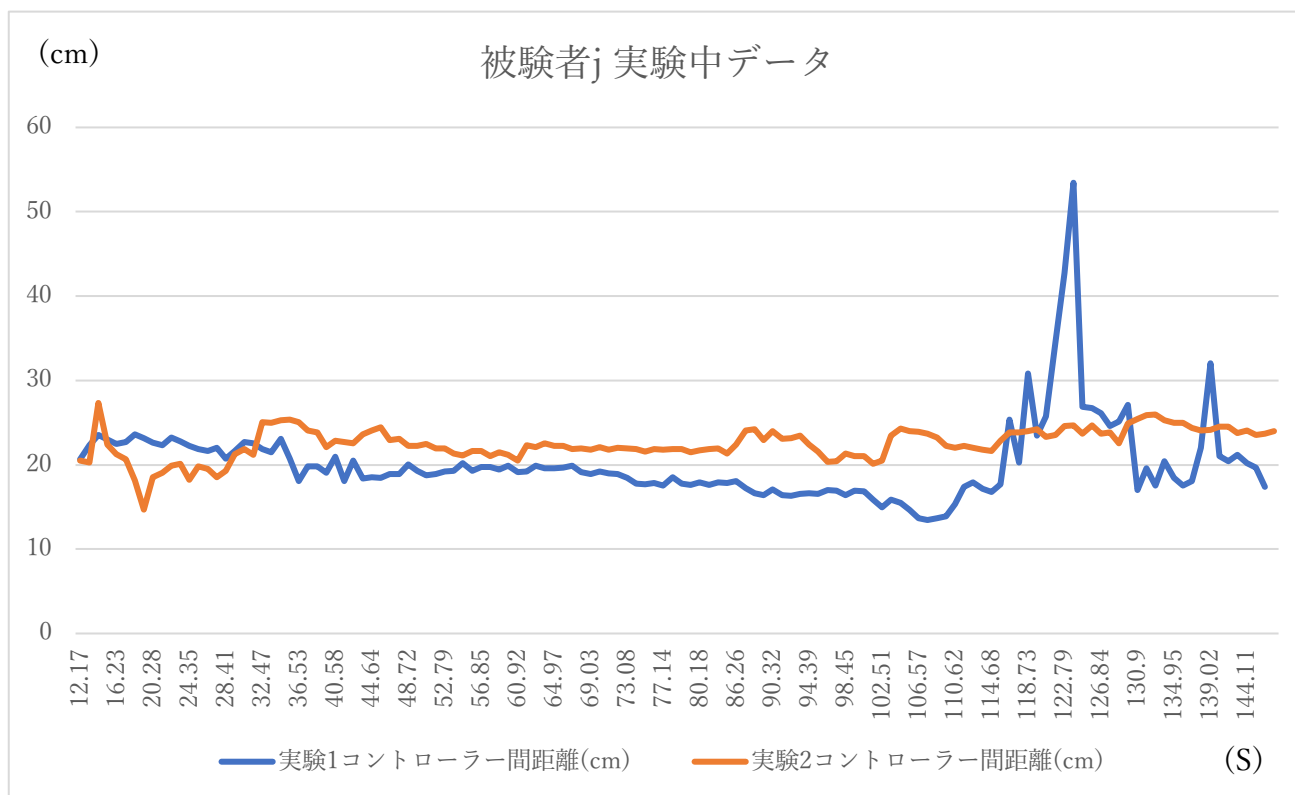


図 3.2.1.10 被験者 j 各実験の実験中データ

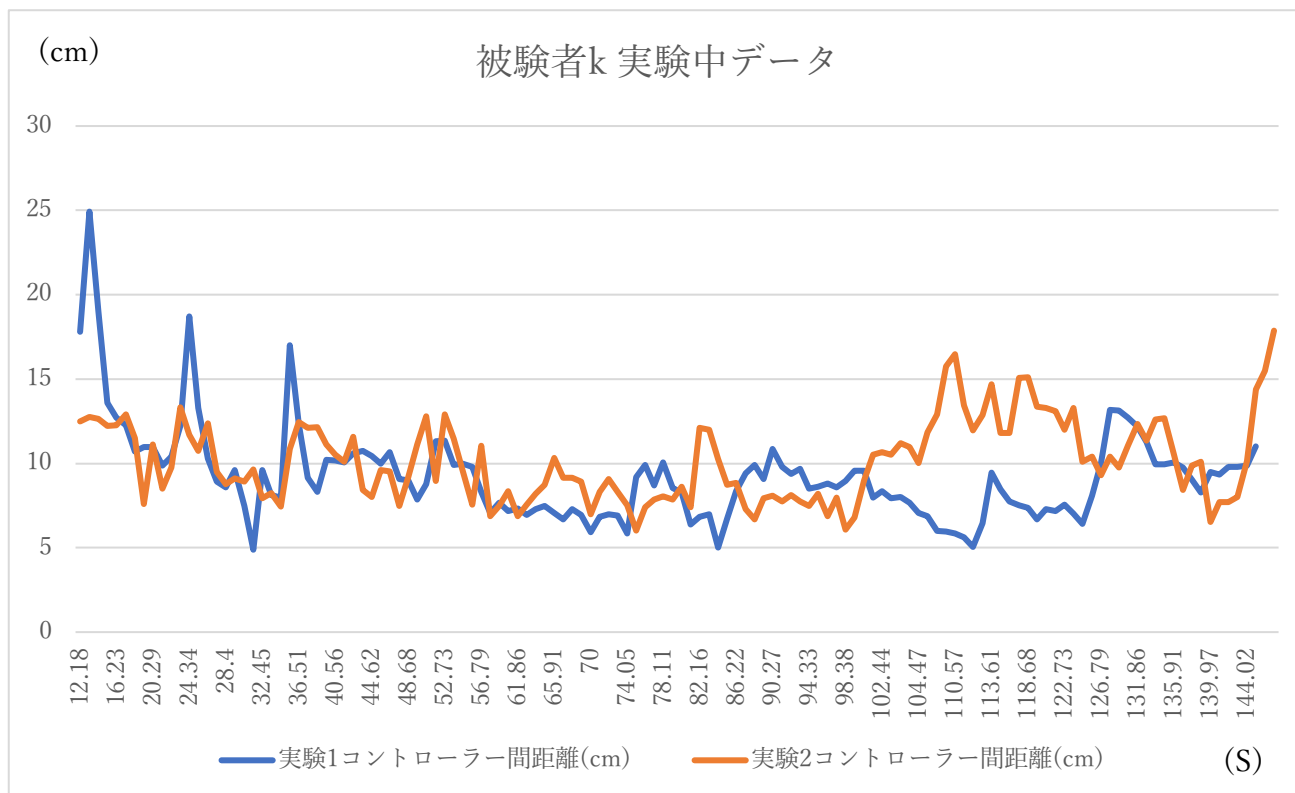


図 3.2.1.11 被験者 k 各実験の実験中データ

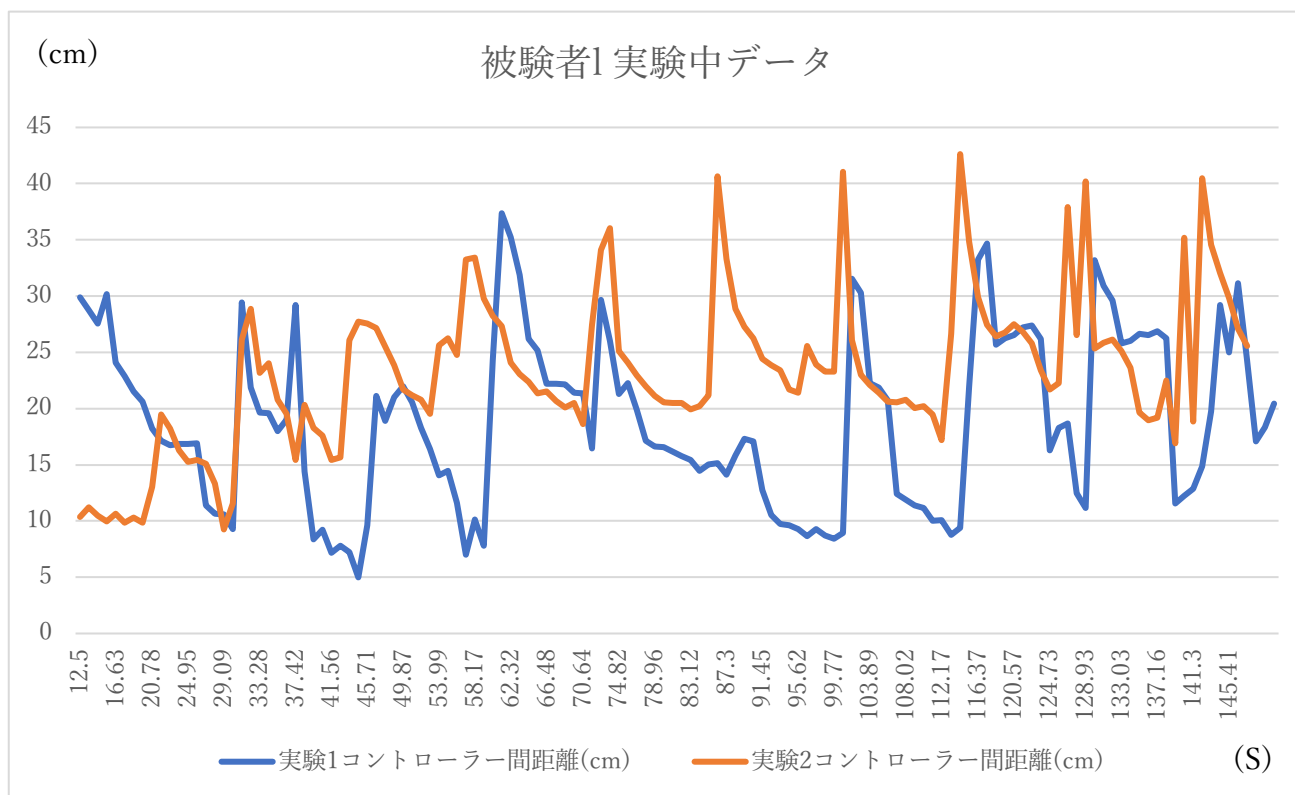


図 3.2.1.12 被験者 1 各実験の実験中データ

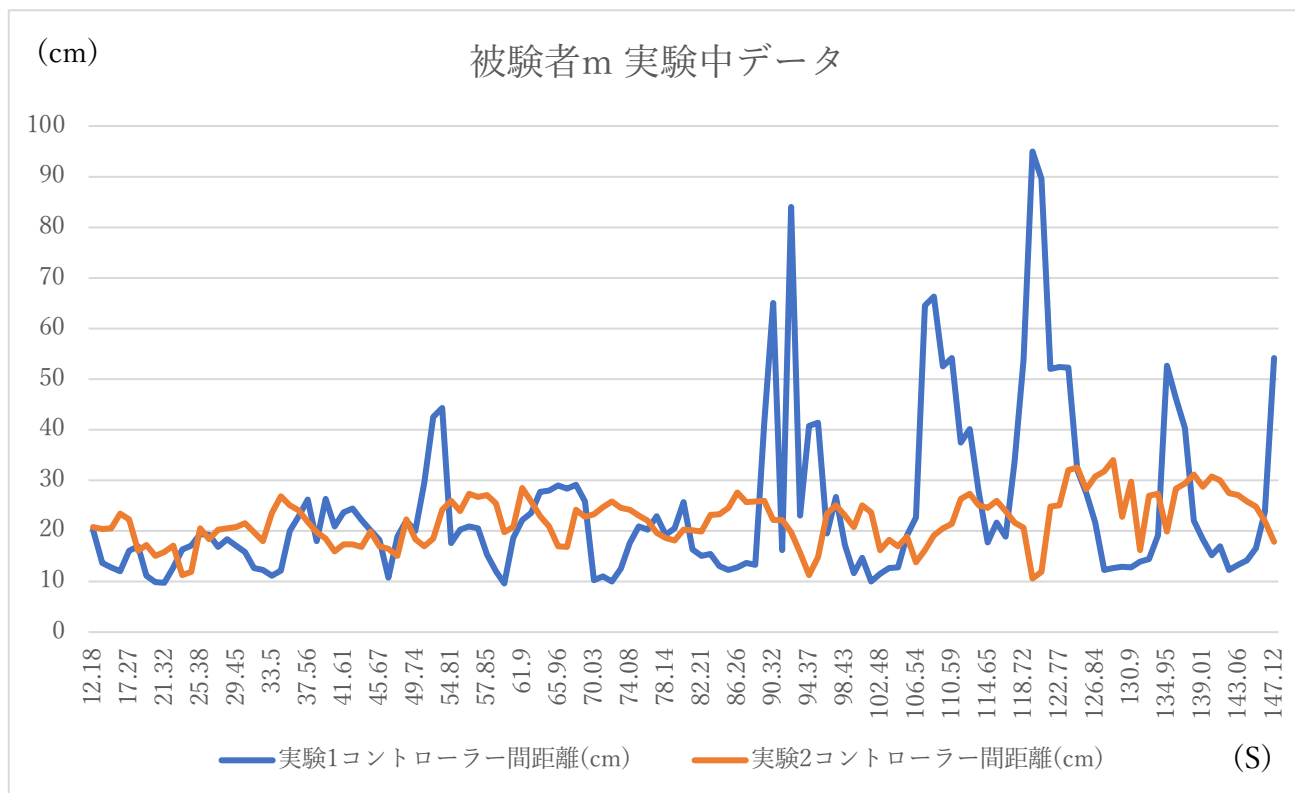


図 3.2.1.13 被験者 m 各実験の実験中データ

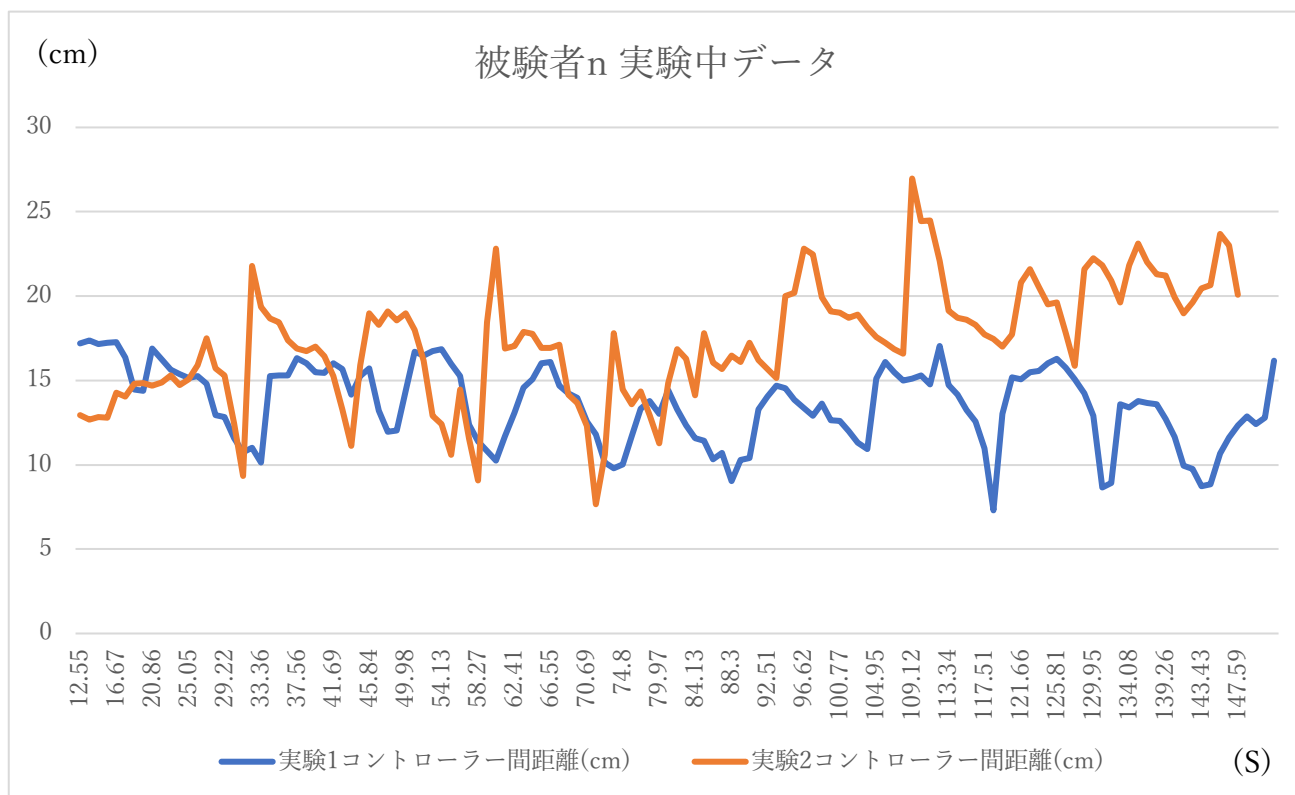


図 3.2.1.14 被験者 n 各実験の実験中データ

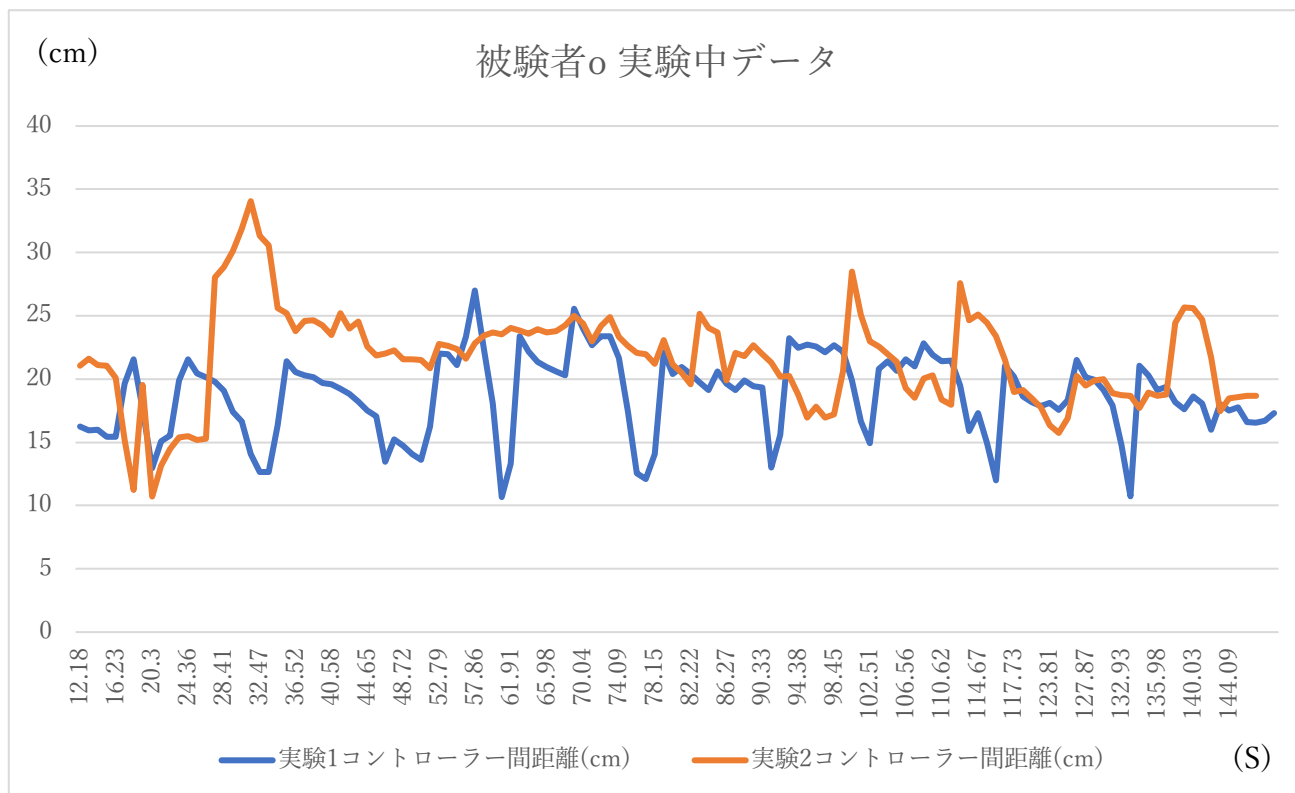


図 3.2.1.15 被験者 o 各実験の実験中データ

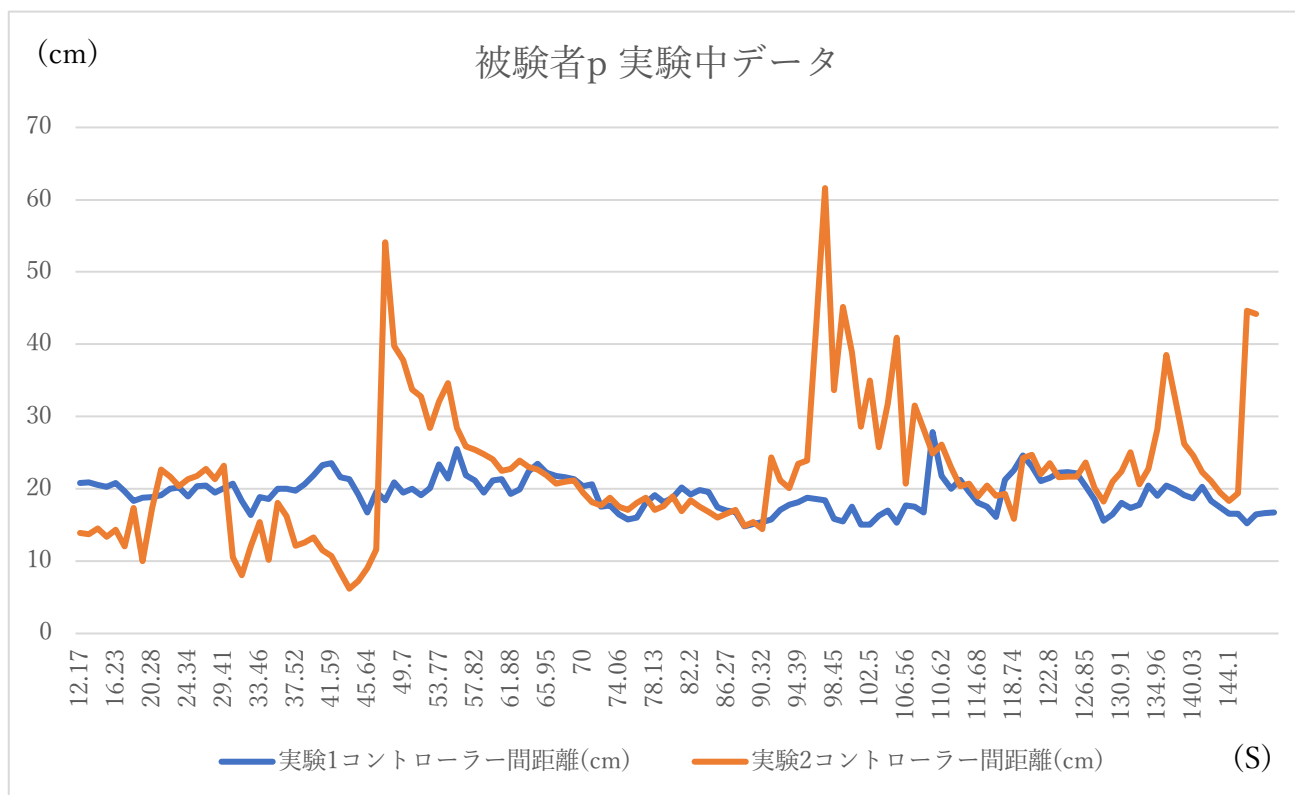


図 3.2.1.16 被験者 p 各実験の実験中データ

実験中,仮想の棒が柱に衝突した回数を各被験者ごとに集計し,その結果を表 3.2.1.1 に示す.

被験者名	実験1	実験2
a	8	5
b	9	17
c	2	1
d	2	1
e	4	6
f	6	16
g	11	13
h	0	0
i	5	6
j	0	3
k	1	23
l	2	3
m	0	11
n	7	14
o	4	8
p	0	25

表 3.2.1.1 実験中の柱衝突回数

3.2.2 実験中のデータの分析

コントローラー間距離が任意の値になる確率を各実験で被験者ごとに求める. この時の任意の値は,実験中のデータを四捨五入した整数である. 実験 1 のエントロピーを l_x , 実験 2 のエントロピーを l_y とした. この結果を表 3.2.2.1 に示す. そして x 軸を l_x , y 軸を l_y としたエントロピー(平均情報量)の対の散布図を作成する. 被験者全体, 被験者 a~h, 被験者 i~p に関して散布図を作成し, 図 3.2.2.1~図 3.2.2.3 に示す. エントロピーの算出は, 章 2.7.2 に記した式を利用した.

被験者名	lx	ly
a	1.0602304	0.9478082
b	0.7872986	0.6226776
c	1.0901083	0.9155793
d	0.9017197	1.0121715
e	1.0025919	0.9409772
f	0.8738984	1.2606257
g	0.9858838	0.8017494
h	0.7364236	0.6512003
i	1.1399138	1.1009251
j	1.0933333	0.8491614
k	0.9320919	0.9379403
l	1.3943076	1.3348562
m	1.4365509	1.2585891
n	0.9248546	1.1345528
o	1.0798033	1.1430339
p	0.9632909	1.4236076

表 3.2.2.1 被験者のエントロピー

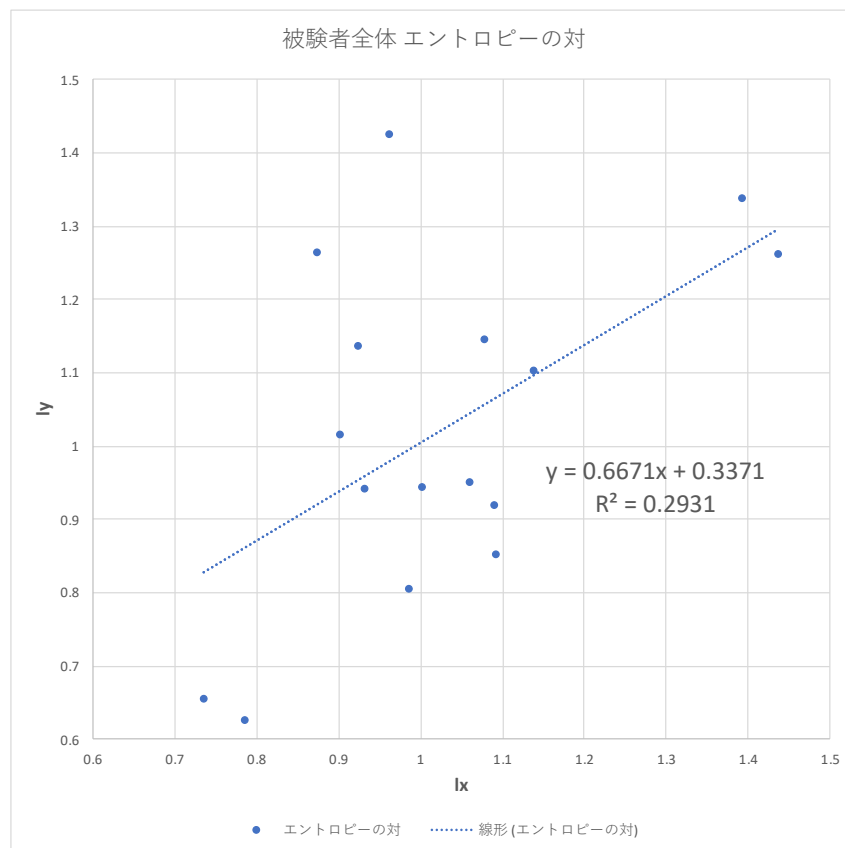


図 3.2.2.1 被験者全体のエントロピーの対の散布図

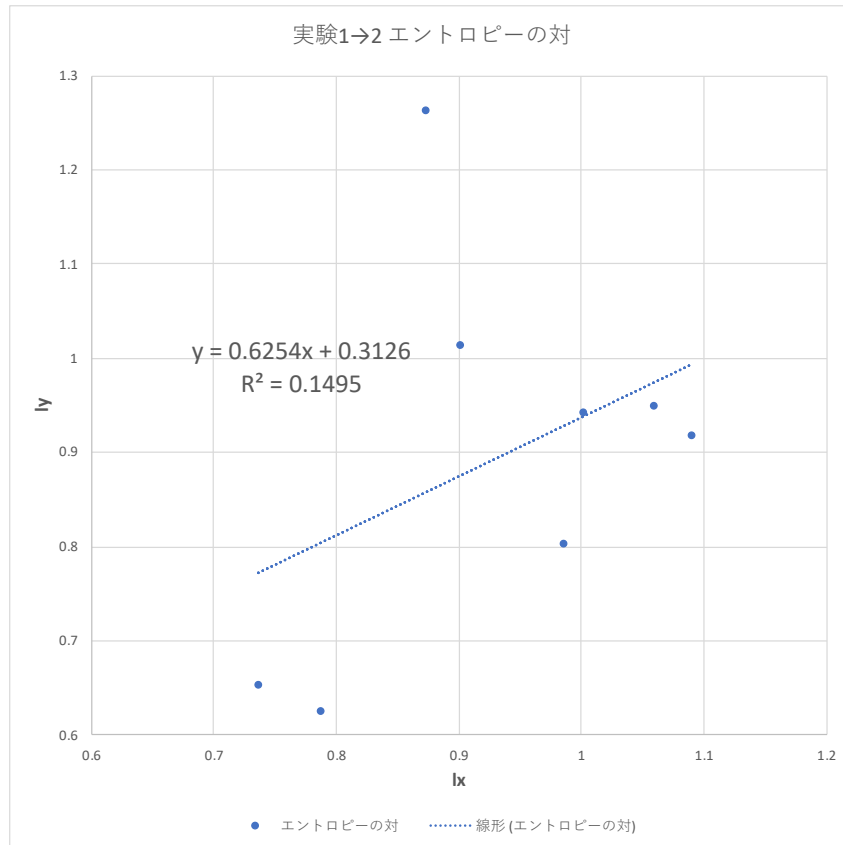


図 3.2.2.2 被験者 a~h のエントロピーの対の散布図

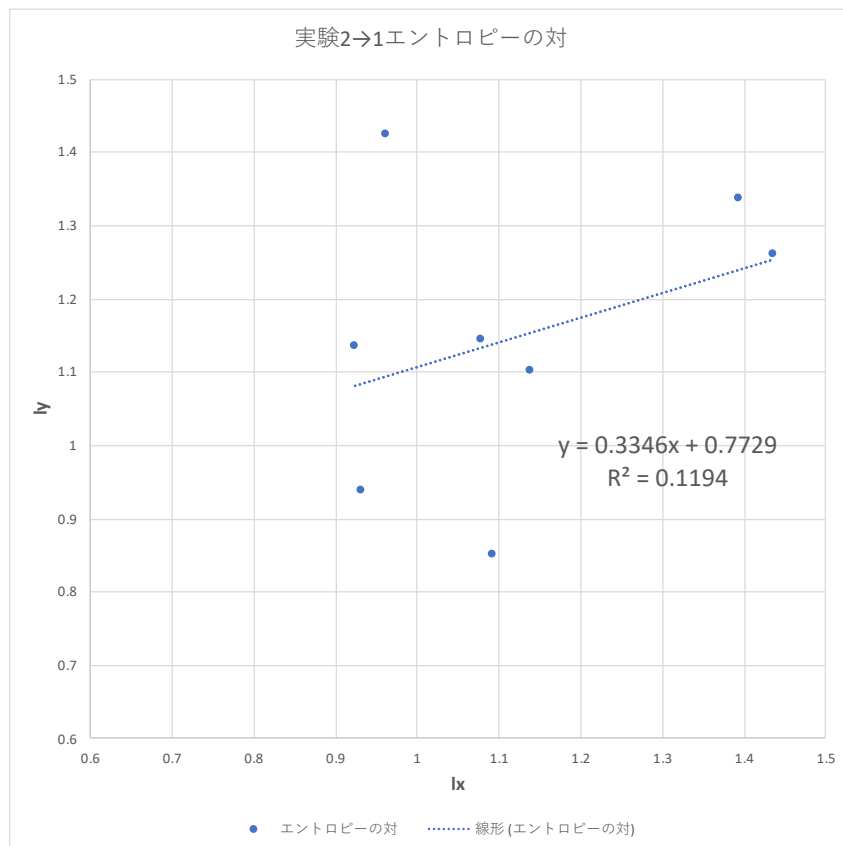


図 3.2.2.3 被験者 i~p のエントロピーの対の散布図

各図の相関関数 R と決定関数 R^2 は、図 3.2.2.1 では $R=0.5414$, $R^2=0.2931$, 図 3.2.2.2 では $R=0.3867$, $R^2=0.1495$, 図 3.2.2.3 では $R=0.3456$, $R^2=0.1194$ となった. 表 3.2.1.1 を元に, x 軸を実験 1 回目のエントロピー, y 軸を実験 2 回目のエントロピーとした時の散布図を図 3.2.2.4 に示す.

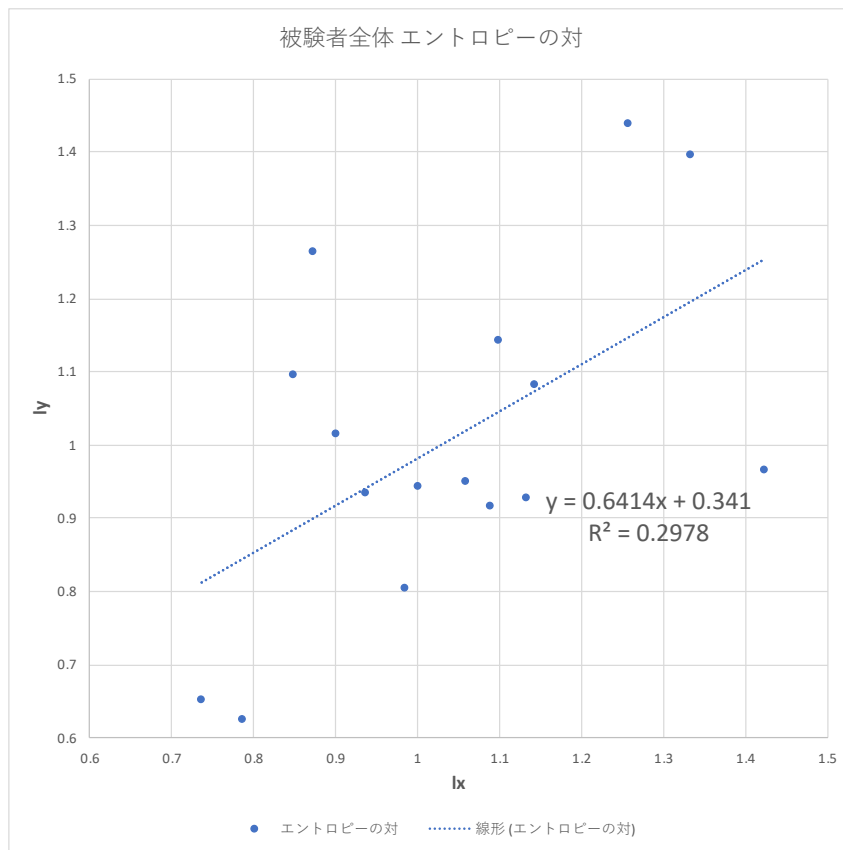


図 3.2.2.4 実験回数で分けた場合のエントロピーの対の散布図

相関関数 R と決定関数 R^2 は, $R=0.5457$, $R^2=0.2978$ となった.

また, 各精度(言語的指示精度と手動的指示精度)と各実験のエントロピーに関して, x 軸を精度, y 軸をエントロピーとして散布図を作成し, 図 3.2.2.5～図 3.2.2.8 に示す.

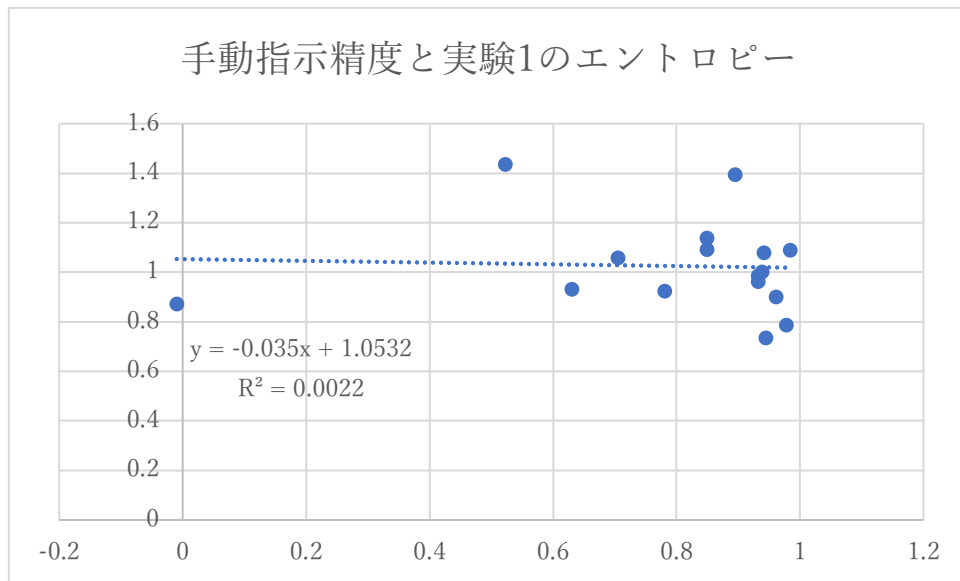


図 3.2.2.5 手動指示精度と実験 1 のエントロピー

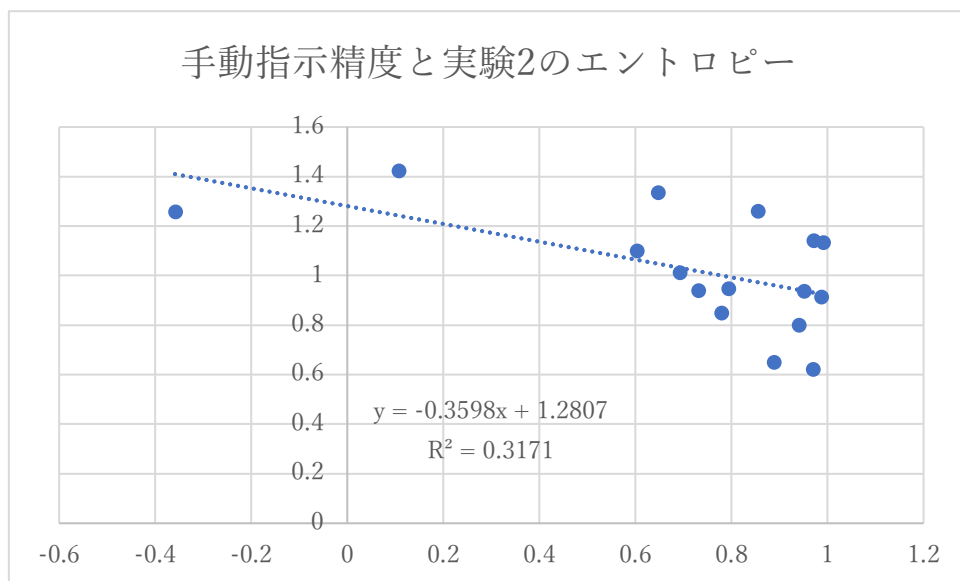


図 3.2.2.6 手動指示精度と実験 2 のエントロピー

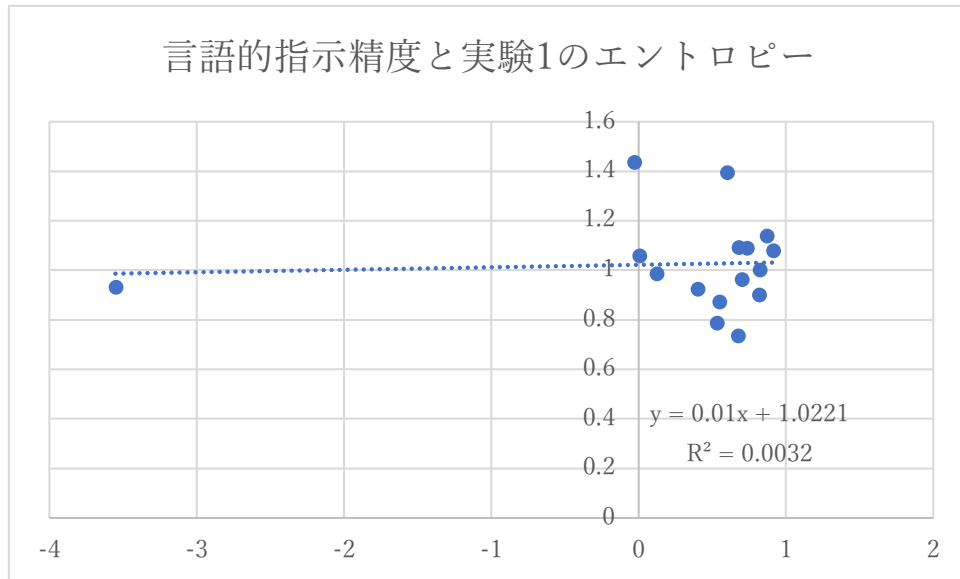


図 3.2.2.7 言語的指示精度と実験 1 のエントロピー

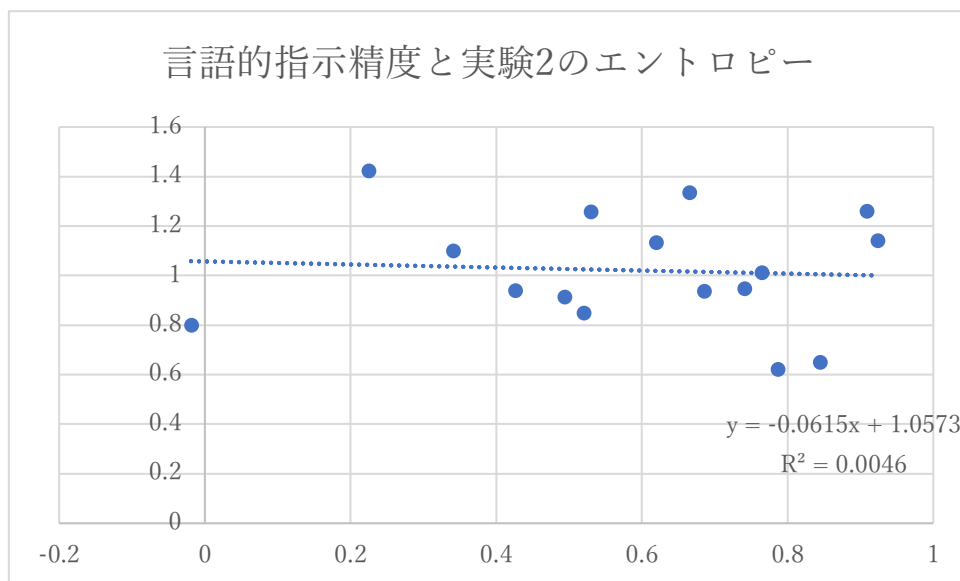


図 3.2.2.8 言語的指示精度と実験 2 のエントロピー

各図の相関関数 R と決定関数 R^2 は、図 3.2.2.5 では $R=-0.047$, $R^2=0.0022$, 図 3.2.2.6 では $R=-0.5631$, $R^2=0.3171$, 図 3.2.2.7 では $R=0.0567$, $R^2=0.0032$, 図 3.2.2.8 では $R=-0.0680$, $R^2=0.0046$ となった。

さらに、実験中に柱に衝突した回数を比較した表 3.2.1 の値を用い、被験者全体を各実験で分けた場合と実験を行った順番で分けた場合について有意水準 5%の t 検定を行い、表 3.2.2.2~表 3.2.2.3 と図 3.2.2.9~図 3.2.2.10 に示す。

表 3.2.2.2 各実験で分けた場合の
柱衝突回数の t 検定結果

	実験1	実験2
平均	3.8125	9.5
分散	12.5625	61.4666667
観測数	16	16
ピアソン相関	0.16673842	
仮説平均との差異	0	
自由度	15	
t	-2.8269596	
P(T<=t) 片側	0.00637332	
t 境界値 片側	1.75305036	
P(T<=t) 両側	0.01274665	
t 境界値 両側	2.13144955	

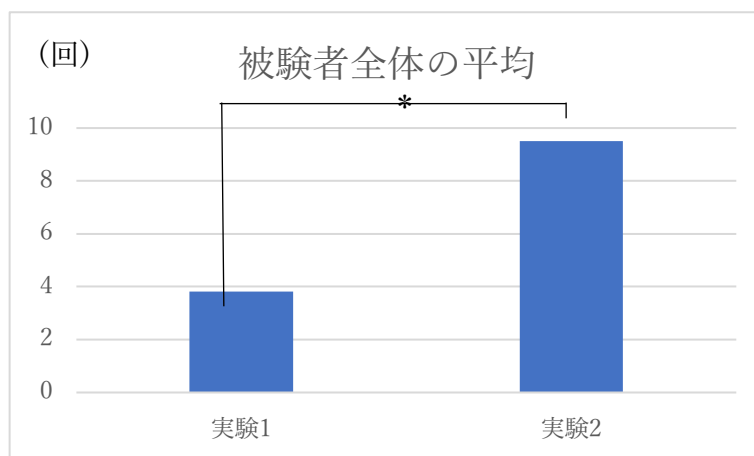


図 3.2.2.9 各実験で分けた被験者全体の平均

表 3.2.2.3 実験回数で分けた場合の
柱衝突回数の t 検定結果

	実験1回目	実験2回目
平均	8.4375	4.875
分散	51.7291667	32.7833333
観測数	16	16
ピアソン相関	-0.0147723	
仮説平均との差異	0	
自由度	15	
t	1.53904232	
P(T<=t) 片側	0.07231013	
t 境界値 片側	1.75305036	
P(T<=t) 両側	0.14462027	
t 境界値 両側	2.13144955	

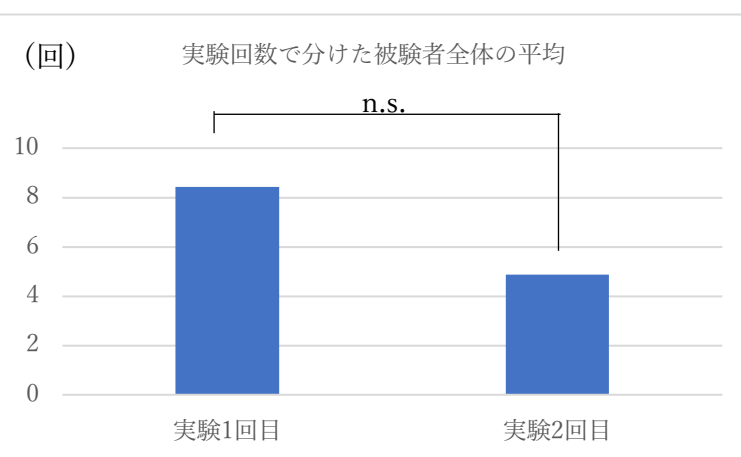


図 3.2.2.10 実験回数で分けた被験者全体の平均

表 3.2.2.2 に関しては $p < 0.05$ であるため、有意差があると考えられる。しかし、表 3.2.2.3 に関しては有意差が見られなかった。

3.3 実験後アンケートの結果

「実験 1」と回答した人数が 11 名、「実験 2」が 4 名、「どちらとも言えない」が 1 名という結果になった。「棒が見えているため」という理由で「実験 1」と回答した被験者が多かった。視覚の存在が物体の形状や大きさの記憶に役立っていると考えられる。

4. 議論

4.1 計測結果

計測に関する t 検定と手動指示精度に関する有意差はなかったが、実験 1 よりも実験 2 の方が計測結果の平均長さが長くなる傾向にあると考えられる。しかし、言語的指示精度に関する t 検定では表 3.1.2.11 と表 3.1.2.12 に有意差が見られた。表 3.1.2.11 では、実験 1→2 の順で実験を行った被験者に関する表のため、実験 1 回目は実験 1 を行い、実験 2 回目は実験 2 を行った。そのため、実験 1 回目と 2 回目の間に有意差があり、実験 1 回目よりも実験 2 回目の方が言語的指示精度が高いことが示唆された。また、実験回数で分けた図 3.2.2.4 は、相関係数 0.54 と比較的強い正の相関を示した。これらのことから、実験の反復に伴って学習や適応を経験している可能性がある。

4.2 衝突回数と固有受容感覚

柱に仮想の棒が衝突する回数に関して、実験 1 と実験 2 の間に有意差が認められた。表 3.1.2.1 各実験の精度に関するエントロピーでは、手動指示精度と言語的指示精度の両方で視覚情報に制約がある実験 2 の方が、エントロピーが高くなった。また、手動指示精度と実験 2 のエントロピーの関係性について記した図 3.2.2.6 では、相関係数-0.5631 と比較的強い負の相関を示した。これらのことから、視覚が制約された状況では、被験者は固有受容感覚を頼りに柱を避けなければならない。しかし、棒が見えないにも関わらず、柱に衝突した際に振動することにある種の混乱やストレスを感じた結果、固有受容感覚の機能が低下し、棒の位置の特定が困難になりエントロピーが実験 1 よりも増大した可能性が示唆される。これにより、棒が見えないという視覚情報に制約がある際に衝突回数が増えたと考えられる。そのため、VR 環境でも視覚と固有受容感覚を統合することで物体や環境を知覚している可能性がある。混乱やストレスに関して本実験では、調べていないため、私の推測となる。

5. 結論

棒が見える条件(実験 1)と見えない条件(実験 2)に分けた。VR 環境の状況と現実の状況は異なるため、棒の視覚情報は物体の大きさを知覚する上で余計な情報となり、棒が見えない条件の計測値の方が棒の長さに近い値を結果として得られると仮説を立てた。しかし、仮説は立証されず、実験 1 と実験 2 の計測結果自体に有意差を見ることはできなかった。

実験中のコントローラー間距離のデータを実験の種類、実験を行う順番、実験の回数ごとに分ける場合についてエントロピーの対の散布図を作成し、相関係数を求めた結果、全て正の相関であった。これらの中では、実験の回数ごとに分けた場合に相関係数 0.54 という一番強い正の相関を示した。本実験では、

章 4.2 より Bayramova らの研究[7]の結果を支持する結論となった.

6. 参考文献

- [1] Sherrington CS. "The integrative action of the nervous system". New Haven: Yale University Press; 1906.
- [2] Dieter Vaitl. "Interoception". Biol Psychol. 1996. pp.1-27.
- [3] 寺澤悠理, 梅田聡. "内受容感覚と感情をつなぐ心理・神経メカニズム". Japanese Psychological Review. 2014. Vol.57. pp.49-66.
- [4] 是木明宏. "精神症状とない受容感覚". Japanese Journal of Neuropsychology 35. 2019. pp.187-196.
- [5] C. Fossataro, A. Rossi Sebastiano, G. Tieri, K. Poles, M. Galigani, M. Pyasik, V. Bruno, T. Bertoni, F. Garbarini. "Immersive virtual reality reveals that visuo-proprioceptive discrepancy enlarges the hand centred peripersonal space". Neuropsychologia. 2020.
- [6] Irene Valori, Phoebe E. McKenna-Plumley, Rena Bayramova, Claudio Zandonella Callegher, Gianmarco Altoe, Teresa Farroni. "Proprioceptive accuracy in Immersive Virtual Reality: A developmental perspective". PLOS ONE. 2020. pp.1-23.
- [7] Rena Bayramova, Irene Valori, Phoebe E. McKenna-Plumley, Claudio Zandonella Callegher, Teresa Farroni. "The role of vision and proprioception in self-motion encoding: An immersive virtual reality study". Attention, Perception, & Psychophysics. 2021.
- [8] Ungyeon Yang, G. Jounghyun Kim. "Increasing the effective egocentric field of view with proprioceptive and tactile feedback". IEEE Virtual Reality 2004. 2004.