

2020 年度 修士論文

論文題目

道具操作における遅延の操作感覚への影響と実際の支援  
との関係に関する調査

An investigation of effect of delay in tool manipulation on  
sense of operation and its relationship to actual support

指導教員

舟橋 健司 准教授

名古屋工業大学大学院 工学研究科 情報工学専攻

2019 年度入学 31414123 番

名前 宮路 大勇

# 目次

第1章	はじめに	1
第2章	先行実験	5
2.1	実験システム	5
2.2	実験手続き	6
2.3	実験結果	9
第3章	遅延とユーザエクスペリエンス	13
3.1	実験システム	13
3.2	実験手続き	13
3.3	実験結果と考察	14
第4章	操作難易度とユーザエクスペリエンス	18
4.1	実験システム	18
4.2	実験手続き	18
4.3	実験結果と考察	19
第5章	支援とユーザエクスペリエンス	26
5.1	実験システム	26
5.1.1	能動的な操作支援	26
5.1.2	受動的な操作支援	28
5.2	実験手続き	30
5.3	実験結果と考察	31
第6章	むすび	38
	謝辞	39
	参考文献	40
	発表論文リスト	43

## 第1章 はじめに

私たちはサービスや道具を利用することで得られる体験を表現するときに、使い心地やユーザエクスペリエンスという言葉を用いる。これらは使いやすさを表現するときに用いる、使い勝手やユーザビリティという言葉とは区別される [1][2]。今日、市場には多くのサービスや商品があふれ、消費者が利用や購入の決定に関する主導権を握っている。そのため競合他社との差別化は、これまでのような価格や性能といった要素だけでは難しくなっている。このような背景からユーザエクスペリエンスは経営を左右する重要な課題になっている [3]。サービスにおけるユーザエクスペリエンスの有名な例に、スターバックスコーヒーの Our Mission and Values というものがある。同社は顧客にスターバックス「体験」を提供するため、行動規範を定めているのである [4]。では、道具におけるユーザエクスペリエンスはどのようにして得られるのだろうか。マツダロードスター（自動車）を試乗した評論家はその体験を「車両の挙動に少し緩さを設け、後輪の動きを操りながらボディを内側に向ける楽しさがある」と表現している [5]。あるいは別の例として、テニスラケットの振り下ろしにおいて、初心者は振り下ろすわずかな間にボールタッチの感覚をなかなか得られないが、練習を積むことで、ボールタッチの感覚を強く得られるようになることが挙げられる [6]。自動車やラケットコントロールでは、最終制御目標である車両軌跡やボール軌跡を得るまでの操作過程がユーザエクスペリエンスにつながっていると考えられる。また、何らかの道具操作の熟練者は、道具を自身の手足のように扱うという表現をする。テニスラケットのように見た目や操作方法が自身の身体の形状や動作に似ている場合はもちろん、自動車のように身体の形状や動作を模倣していない場合でも、手足のように、という表現をする [7][8]。道具の操作に長けていない人が熟練者のようなユーザエクスペリエンスを得るには、適切に道具を認識しつつ、かつ振り回されないことが必要であると考えられる。

ところで、認知科学の分野では自己の認識についての研究が行われており、Gallagher は自己主体感 (sense of agency: 行為の自己帰属感) と身体所有感 (sense of ownership: 身体の自己帰属感) という心理学的概念を提唱した [9]。Gallagher は基本的な自己意識を、まず自身の記憶や他者に語られることにより形成される自己 (narrative self) と自己知識を失ったとしても行為によって気づかされる一時的な自己 (minimal self) の2つに分け考察し、後者をさらに自己主体感と身体所有感に分けた。これら2つの感覚は通常意識されず、何らかの不具合が生じたときにその感覚の異常として意識される [10]。自己主体感とは対象物に影響を与えたのは自身であるという感覚である。統合失調症の第一級症状である作為体験 [11] などの自己主体感に異常があるとされる病理を通じて、存在が確認されている。一方、身体所有感は動いている身体が自身の身体であるという感覚である。体性感覚情報や視覚情報そして遠心性コピーの時空間的な整合性が阻害されると喪失する [12]。有名な錯覚現象として、ラバーハンドイリュージョン (RHI) [13] が挙げられる他、身近な例として長時間にわたり正座をした時、足がしびれてその足を自身の足でないと感じるなどが挙げられる。また2つの感覚には、前者は意図的な運動に起因し、後者は自身の意図によらず生起するという違いがある。本人に起因しない何らかの原因で自身の身体が動かされた時、身体を動かしたのは自身であるという感覚は生じないが (自己主体感は生起しない)、動かされたのは自身の身体であるという感覚は生じる (身体所有感は生起する)。これまでに、インタフェースやインタラクションの研究分野において自己主体感は操作者と対象物との間の遅延やノイズが小さいほど強く好意的に感じられること [14]、VR 環境下において動作と動作結果の表示との間に遅延をもうけると自己主体感や身体所有感が低下すること [15]、AR 環境下において操作者の手の動きと動作結果の表示との間の遅延が長いほど身体所有感が単調減少すること [16] などが明らかにされている。しかしながら、操作者による操作開始から実際の対象物の移動開始までの遅延に着目した自己主体感、身体所有感に関する研究はない。当研究室では上記研究と同様に遅延が長いほど自己主体感、身体所有感、道具操作性が単調減少するという結果が得られると予想し、VR 環境下において操作者による操作開始から実際の対象物の移動開始までの遅延に着目した実験を行った。その結果、自己主体感と身体所有感は上記研究と似たように遅延が長いほど単調減少する傾向を示していたが、

わずかな遅延が意外にも道具操作性を向上させることが示唆された [17].

わずかな遅延の有効性はこれまでも指摘されている。経験豊富なドライバーはアクセルを踏むと、頭が後ろに引き寄せられることを体得しており、その経験からアクセルを踏むときに無意識に首筋を緊張させ、頭部を支えようと構える。自動車メーカーであるマツダはアクセルを動かし始めて、構えまでの時間は0.2から0.3秒で一定であり、この「構えのタイミング」に合わせて加速度を発生させることが、理にかなった自然な反応を実現する第一の必要条件としている [18]。また、ある自動車関連雑誌には「車を運転するとき、ステアリングを切って即座に車が動くと、体がついていかない。切って0.2秒から0.3秒後にクルマが動き始めると人間は追従できる」との記述がある [19]。わずかな遅延が必要なのは自動車だけではない。2019年の全豪オープンで住友ゴム工業の「ダンロップ」ブランドのボールが、「ラケットとの接触時間が長く、打球を制御しやすいことが評価され」公式球に採用された [20]。Farrer はボタンを押してから、応答を画面に表示するまでの間に遅延をもうける実験を行った。そして、わずかに遅延をもうけると部分的に自身の制御であり、また部分的には自身の制御ではないとの認識が生じることを明らかにした [21]。これらの知見から、わずかな遅延は道具や対象物、そして他者の適切な把握において有効であることが期待される。

当研究室で行った実験 [17] では、操作系に遅延をもうけたときに、操作者がどの程度他者 (道具) を把握するかということについても言及しているが、他者を好意的あるいは否定的に感じるかについては調査しなかった。そこで本研究では第一に、操作系に遅延をもうけたときに、操作者が他者をどのように感じるかを調査する。このとき、自己主体感、身体所有感、道具操作性についても再調査する。また例えば、普通乗用自動車とバスは車高感覚や前方距離感覚が異なり、それぞれの車両特性に合わせた運転が必要であること [22] などから、道具操作において道具の操作難易度や特性は操作者のユーザエクスペリエンスを変化させる重要な要素であると考えられる。そこで、第二に操作難易度が操作者の感覚と道具操作性に対して与える影響について調査する。

ところで、当研究室で先に述べた操作者による操作開始から実際の対象物の移動開始までの遅延に着目した実験を行った際に、実際には操作支援を行っていないにも

関わらず、「操作を手伝ってもらったように感じた」というコメントが一部の被験者から寄せられた。それでは、実際に支援を行った場合に得られるであろう支援感と操作系における遅延による支援感はどのような関係にあるのだろうか。本研究では、第三に支援が操作者の感覚と道具操作性に対して与える影響について調査する。ひとくちに支援といっても近年は自動車業界や介護業界を中心に様々な操作(動作)支援システムが導入されている。本研究では、操作支援システムをその性質から、以下のように分類する。

- 能動的操作支援: 操作者の操作よりも先行して、誘導するように支援する
- 受動的操作支援: 操作者の操作よりも遅れて、力を増強するように支援する

能動的操作支援の例として、車線逸脱時にシステムがステアリングに対して適切なトルクを発生させる車線維持支援システムや、移乗介助を支援し腰への負担を軽減する装着型支援装置 HAL (Hybrid Assistive Limb) [23] があげられる。一方、受動的操作支援の例として、ステアリング操作時にドライバーの力を増強して伝えるパワーステアリングや、ペダルをこいだ時にモーターが適正な駆動補助を行う電動アシスト付き自転車などがあげられる。能動的操作支援と受動的操作支援は時間的な観点で見ると操作の前もしくは後に力が加わるという点から、操作の時点を境に対であると捉えることができる。支援には、操作成績を向上させる効果がある。一方で支援のタイミングによっては操作の感覚を損なう場合や、操作成績自体を低減させる場合もある。ところで、第一、第二の調査では操作系にわずかに遅延をもうけると支援感が最も強くなった。そこで、能動的操作支援では操作よりもわずかに先行して、受動的操作支援では操作よりもわずかに遅れて支援すると、より効果的な支援を実現できるとの予想を立てて、その真偽や支援のタイミングについて調査する。

以下、第2章では先行実験を紹介する。第3章では操作系における遅延に着目した実験について、第4章では操作難易度に着目した実験について、第5章では能動的操作支援と受動的操作支援に着目した実験について述べる。そして第6章では本研究のまとめと今後の課題について述べる。

## 第2章 先行実験

本章では、本研究室において筆者が行った遅延が操作者の感覚と道具操作性に与える影響に関する先行実験 [17] を紹介する。先行実験では、VR 環境下において操作者による操作開始から実際の対象物の移動開始までの遅延が自己主体感、身体所有感、道具操作性に与える影響を調査する実験を行った。これまでに行われてきた自己主体感や身体所有感に関する実験と同様に遅延が長いほど自己主体感、身体所有感、道具操作性が単調減少するという結果が得られると予想し、その予想を確かめるために実験を行った。

### 2.1 実験システム

VR 環境下で被験者が道具を用いて対象物を操作する実験を考える。道具はマジックハンドとし、操作は対象物である球のある台から別の台への移動とする (図 2.1)。具体的には、画面内に2つの台と球、そしてマジックハンドを描画する。マジックハンドの動きは3次元力覚入出力デバイス (Geomagic Phantom Omni, 以降 PHANTOM) の動きと連動している。なお PHANTOM は、ペンを持つように操作することで、スタイラスペンの先端の3次元座標やペンの3自由度の角度を得ることができる。また、力覚フィードバック装置であり、スタイラスペンの位置をシステム側から操作したり固定したりできる。被験者が PHANTOM を動かしてからマジックハンドの移動結果が画面に出力されるまでに遅延をもうける (PHANTOM の処理および通信の遅延と描画遅延以外の遅延をもうけない場合も含む) ことで被験者による操作開始から実際の対象物の移動開始までの遅延を実現する。

ところで、道具や対象物の運動は等速直線運動、等加速度回転運動および停止状態などの定常状態と過渡状態に分けられる。定常状態での遅延は被験者に認識されにくいことが考えられる。そこで実験では運動開始が明確な短時間で完了する運動を

タスクとすることで過渡状態での遅延の認識を確実にする。

また、遅延の大きさの変化に対する操作成績の遷移を把握するために被験者による対象物の移動時間を計測する。移動開始前は画面内の対象物を固定する。このとき、固定されていることを視覚的にも表現するために対象物の上に「ふた」を描画する(図2.2)。また同じく PHANTOM を開始位置に固定し、画面内のマジックハンドの移動も制限する。移動操作開始を予告するために3秒間のカウントダウンを数字で画面中央に表示する。カウントダウン終了後に前述の固定を解除することで、被験者は移動操作が可能となる。合わせて、スタートを知らせるビープ音を鳴らすことで各実験を開始する。各実験開始前の準備段階において、複数の遅延に対して実験を行うために、遅延の大きさを設定可能とする。また台と台の位置関係が常に同じであると被験者が操作に慣れてしまうことが危惧される。そこで、台の位置を設定可能とする。ただし、台同士の距離が変化するとタスクの公平性が保てず、移動時間の評価に影響がでるため、これらの距離は常に一定とする。

なお、本章で示した実験システムの表示例は、実際には次章以降で用いた実験システムの表示である。両者は描画において若干の違いがあるが、本質的に同様の内容を表示している。

## 2.2 実験手続き

被験者は大学生および大学院生(20代)の20名である。全員、PHANTOM を右手で操作する。また全ての被験者から実験参加について同意が得られている。実験に先立ち、被験者にマジックハンドにより対象物を移動するというタスクを理解してもらうために、以下の基準動作1から4を体験させるとともに、PHANTOM を用いた実験システムに慣れてもらうために数分間の練習時間を与える。

動作1: 手で対象物(スポンジ)を直接操作する(図2.3)。

動作2: 実物のマジックハンドで対象物(スポンジ)を直接操作する(図2.4)。

動作3: 遅延を最小としたシステムで対象物を操作する(図2.5)。

動作4: 実験における最大の遅延をもうけたシステムにおいて対象物を操作する。



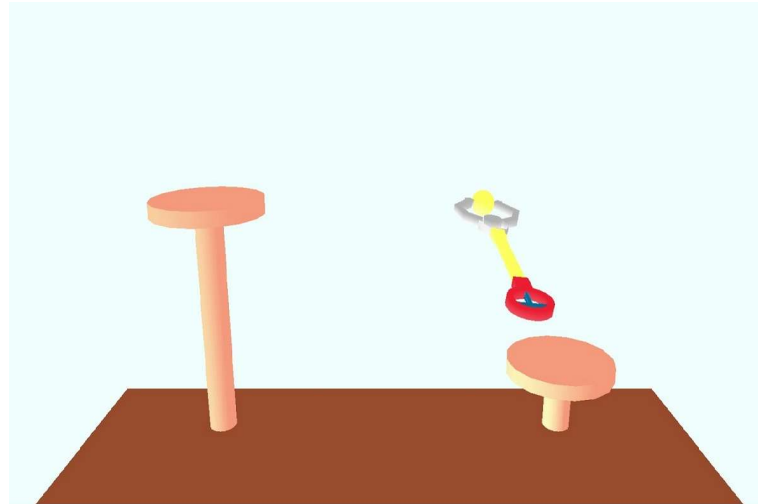


図 2.1: 実験システムで対象物を移動する様子

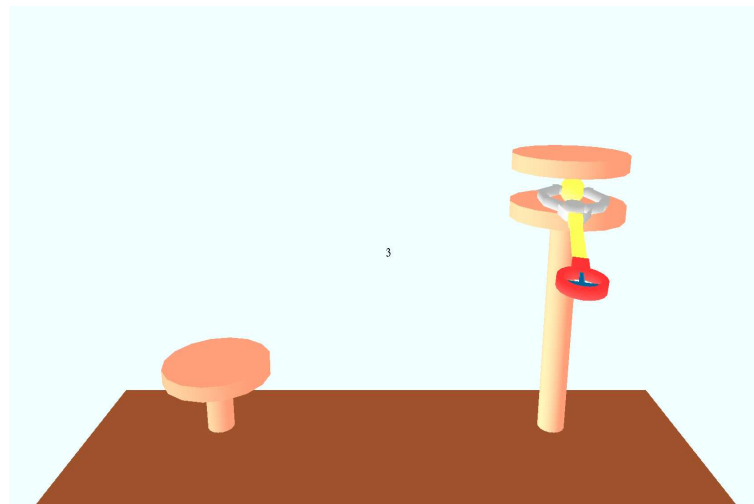


図 2.2: カウントダウン中の様子

この動作1により道具を利用しない移動操作を理解してもらい、動作2により道具による対象物の移動操作を行う状況を体感してもらう。動作3は動作2と同等の位置づけであるとの説明を与える。動作4により実験において遅延を付加することがあることを理解してもらう。またこれらの動作は、実験後のアンケートに対する回答の指標としていることも説明する。

実験における遅延は0[ms] (PHANTOMの処理および通信の遅延と描画遅延を含めると最小でも5[ms]であるが、ここでは5[ms]の遅延を遅延なし0[ms]と扱う) から450[ms]までの、50[ms]刻みの10種類とする。被験者には1回の試行において10回の移動タスク(5往復)を連続して行ってもらい、20名の被験者に対して1人あたり5試行(50タスク)、5通りの遅延をランダムに割り当てる。基準動作体験ののち、以下の手順で実験を行う。評価は被験者による操作感覚についてのアンケート回答と、対象物の台から台への移動時間により行う。

手順1: 遅延の大きさと台の位置を設定する。

手順2: 被験者に自身でPHANTOMを操作してもらい、画面内のマジックハンドを動かして台の上の対象物をつかんでもらう。

手順3: 各試行において、タスクを10回(5往復)行う。

3-1: カウントダウンの3秒の間、待機してもらう。

3-2: 開始の合図と同時に、台の上の対象物を他方の台にできるだけ早く放物線を描くように移動してもらう。

手順4: 各試行ごとに操作時の感覚について、以下のアンケートに回答してもらう。

質問1: 自身の意図でマジックハンドを動かせたかどうか(自己主体感)

質問2: マジックハンドを自身の手のように感じたかどうか(身体所有感)

質問3: 他者がマジックハンドの操作に介入しているように感じたかどうか(他者の存在感)

なお、質問1と質問2は、0から9の10段階で評価してもらう。このとき前述の基準動作1から4において、自身の手による動作1を評価値10、実際のマジックハンド

による動作2と実験システムによる動作3を同等であると位置づけて評価値5, 実験システムによる遅延最大の動作4を評価値0とし, 指標として各試行を評価してもらう。例えば, ある遅延における操作が, 遅延なしのマジックハンドの状況と遅延最大の状況の間と感じたのであれば, 評価は1から4となる。また, もしも遅延なしのマジックハンドの状況よりも実際の手による直接的な操作に近いと感じれば, 評価は5より大きくなる。質問3は, 他者の協調, 妨害を感じたか (最大9), あるいは他者を感じなかったか (最小0) 10段階で評価してもらう。

### 2.3 実験結果

先行実験の遅延の大きさと平均タスク達成時間の関係についての結果を紹介する。全体では遅延が大きくなるほど平均タスク達成時間が長くなることがわかった (図2.6)。ところが, わずかに遅延をもうけると, 有意に平均タスク達成時間が短くなった。このことから, 操作系におけるわずかな遅延が操作成績を向上させることが分かった。また, 遅延の大きさ以外の条件がタスク達成時間に影響を及ぼしていないか検定を行った結果, タスクに対しての慣れや疲労はタスク達成時間に影響を及ぼさないことが分かった。

次に先行実験の遅延の大きさと自己主体感, 身体所有感の関係についての結果を紹介する。どちらも遅延が大きくなるほど官能評価の評価値が小さくなった。ところが, わずかに遅延をもうけると, 自己主体感に関する官能評価は遅延が大きくなるほど官能評価が小さくなるのに対し, 身体所有感に関する官能評価はほぼ一定の値をとった。しかし, 両者とも全体では官能評価値の遷移が似ていた。これは, 被験者がアンケートに回答するとき自己主体感と身体所有感をうまく区別できなかったためと考えられた。また, 被験者の中には遅延をもうけない場合よりも操作感覚がよくなることはないという先入観をもった人がいることも懸念された。

最後に, 先行実験の遅延の大きさと他者の存在感の関係についての結果を紹介する。遅延が大きくなるほど他者の存在をより強く意識するようになることが分かった (図2.7)。また, わずかに遅延をもうけた場合においても他者の存在を意識していることが示唆された。質問の内容が他者による妨害として捉えられてしまったこと



図 2.3: 手で対象物を操作する様子

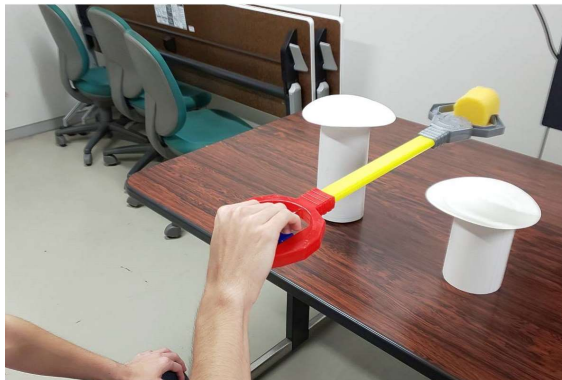


図 2.4: 実際のマジックハンドで対象物を操作する様子

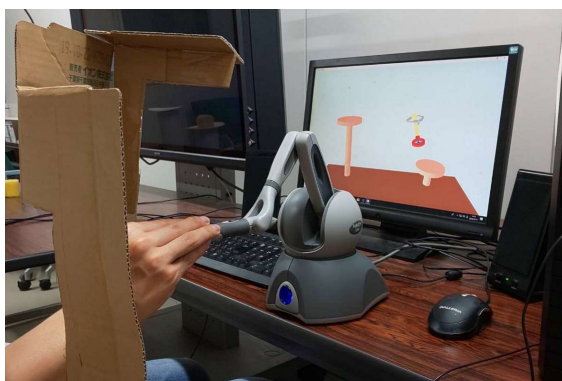


図 2.5: 実験システムにおいて対象物を操作する様子

が懸念され、わずかに遅延をもうけた場合は協調として感じていた可能性が示唆された。

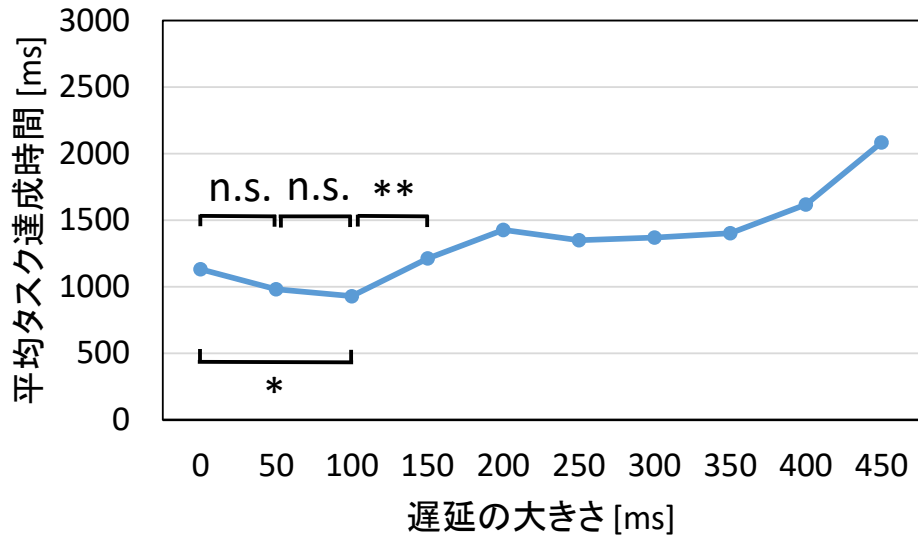


図 2.6: 遅延の大きさの変化と平均タスク達成時間の遷移

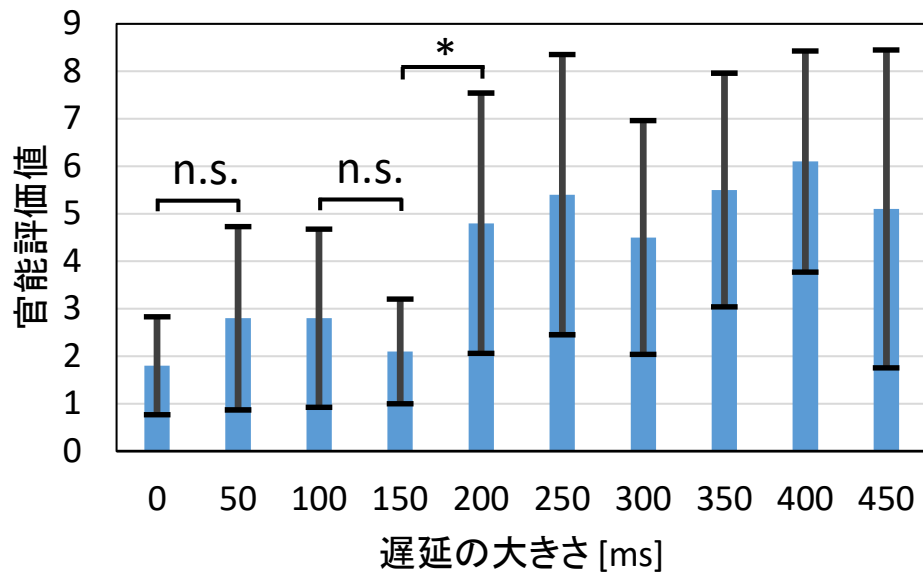


図 2.7: 遅延の大きさの変化と他者の存在感に関する平均官能評価値の遷移とばらつき

## 第3章 遅延とユーザエクスペリエンス

本章では、操作系における遅延が操作者の感覚と道具操作性に与える影響に関する実験について述べる。先行実験 [17] では、VR 環境下において操作者による操作開始から実際の対象物の移動開始までの遅延が自己主体感、身体所有感、道具操作性に与える影響を調査する実験を行った。その結果、わずかな遅延が意外にも道具操作性を向上させることが示唆された。そこで、本実験では操作系における遅延が道具操作性に与える影響を再調査する。また先行実験では被験者が自己主体感と身体所有感を明確に区別できていなかった可能性があった。そのため手続きの改善を行い、操作系における遅延が自己主体感、身体所有感に与える影響を再調査する。さらに本実験では先行実験では調査しなかった「操作者が他者をどのように感じるか」について調査する。なお以降、本実験を実験 1 と表記する。

### 3.1 実験システム

実験 1 では先行実験で用いたシステムを描画処理の変更を行った上で使用する。処理に若干の変更を行ったため、実質的な最小遅延は 16[ms] である。また先行実験において、PHANTOM が見えるとマジックハンドを操作している意識がうすれるという意見がよせられたため、実験 1 では被験者の視界に PHANTOM が入らないように衝立を設置する。

### 3.2 実験手続き

被験者は大学生および大学院生 (20 代) の 30 名である。全員、PHANTOM を右手で操作する。また全ての被験者から実験参加について同意が得られている。先行実験と同様に実験に先立ち、基準動作 1 から 4 を体験させるとともに、数分間の練習時間を与える。その後、それぞれの動作に関する説明を行う。

実験における遅延は0[ms]から450[ms]までの、50[ms]刻みの10種類とする。被験者には1回の試行において10回の移動タスク(5往復)を連続して行ってもらい、30名の被験者に対して1人あたり8試行(80タスク)、8通りの遅延をランダムに割り当てる。基準動作体験ののち、先行実験と同様の手順で実験を行う。このとき、質問3の内容を変更する。他者の介在を感じない場合を評価値0とし、これを基準値として他者の介在を協調として感じたか(最大5)、あるいは妨害として感じたか(最大-5)を11段階で評価してもらい。また、先行実験の結果から被験者が自己主体感と身体所有感を意図的に区別することが困難であることがわかっている。そこで実験1では自己主体感に関する質問(質問1)と身体所有感に関する質問(質問2)を明確に区別するために、被験者を2つのグループA、Bに分け、一方の質問のみに対して回答してもらい。なお、グループA、B間の男女比は等しい。ところで、実験では単に遅延を与えているだけのため、一般的には遅延なしの場合よりも操作感覚がよくなることはない、と考えられる。しかし、実験1ではわずかな遅延の好影響を仮定している。そこで、先入観をなくすために実際には協調的な操作支援は行っていないにもかかわらず「妨害的な遅延だけでなく協調的な支援もあり得る」と実験前に説明しておく。評価は被験者による操作感覚についてのアンケート回答と、対象物の台から台への移動時間により行う。

### 3.3 実験結果と考察

遅延の大きさと平均タスク達成時間の関係について考察する。全体では遅延が大きくなるほど平均タスク達成時間が長くなっていることがわかる(図3.1)。50と100[ms]、150と200[ms]、それぞれについて有意水準1%で有意差があり、100と150[ms]においては有意差がなかった。このことから、単調増加であった平均タスク達成時間が100から150[ms]の間で一定になったことがわかる。合わせて、作業精度について考える。被験者ごとに各試行の標準誤差を求めて、それを同条件における平均タスク達成時間で割る。そして、そのデータを条件ごとに集めて平均をとったものを作業精度と定義する。値が小さいほど作業精度が高い。50から200[ms]にかけて値が小さく、つまり作業精度が高くなっていった(図3.2)。このことから50から200[ms]の遅延を



もうけると作業精度が向上することが示唆された。以上より、操作系における適切な遅延が操作成績に対し好意的に影響することが改めて示唆された。

次に、遅延の大きさと自己主体感、身体所有感の関係について考察する。50 から 150[ms] に着目すると、自己主体感に関する官能評価は遅延が大きくなるほど評価値が小さくなるのに対し、身体所有感に関する官能評価は一定の値をとっている (図 3.3, 図 3.4)。それぞれ 50 と 150[ms] において検定を行ったところ、自己主体感に関する評価値については 5% で有意差があったのに対し、身体所有感に関する評価値には有意差がなかった。実験 1 では先行実験の結果をうけて被験者に自己主体感と身体所有感を明確に区別してもらえるようグループ分けをしたが、どちらも官能評価値の遷移は似ている。このことから、被験者にとって自己主体感と身体所有感を区別することは困難であることが考えられる。

最後に、遅延の大きさと他者の存在感の関係について考察する。0 から 200[ms] では実際に支援を行っていないにもかかわらず、他者を協調として感じ、250[ms] より長い遅延では他者を妨害として感じるようになった (図 3.5)。以上のことから、操作系における適切な遅延により、操作者は道具を他者として協調的に意識し、その意識が道具操作性に好意的な影響を与えることが改めて示唆された。

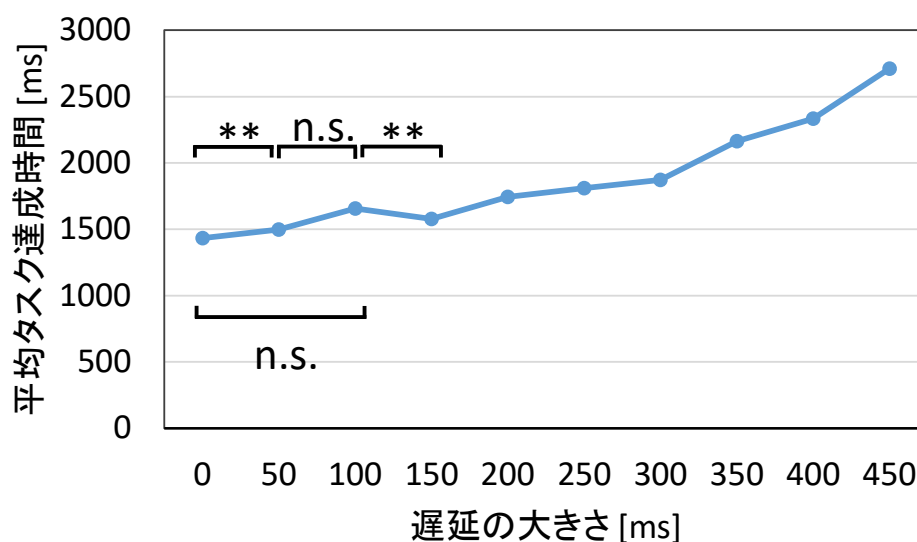


図 3.1: 遅延の大きさの変化と平均タスク達成時間の遷移

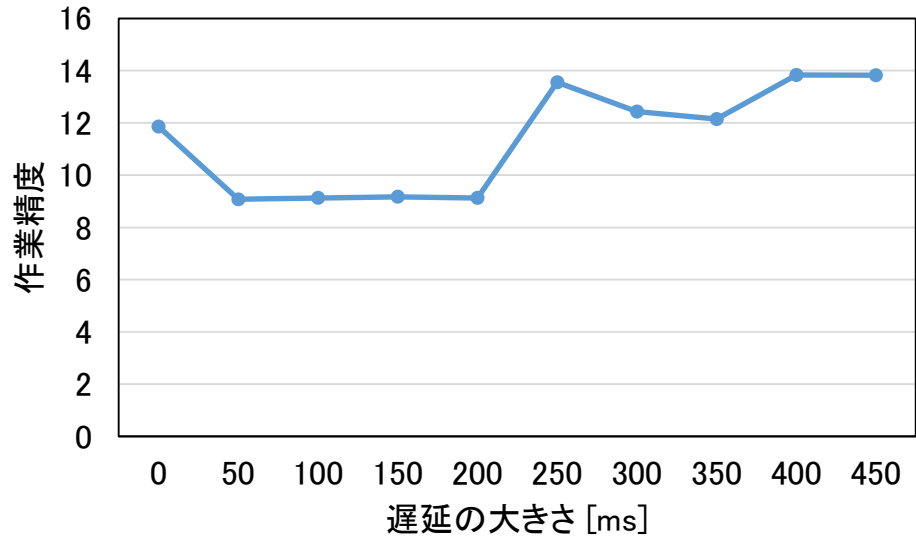


図 3.2: 遅延の大きさの変化と作業精度の遷移

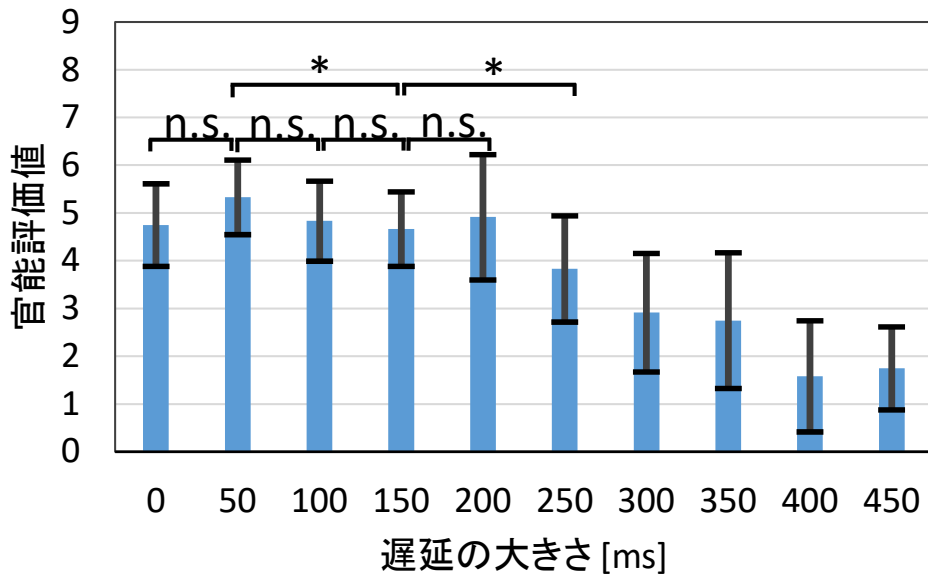


図 3.3: 遅延の大きさの変化と自己主体感に関する平均官能評価値の遷移とばらつき

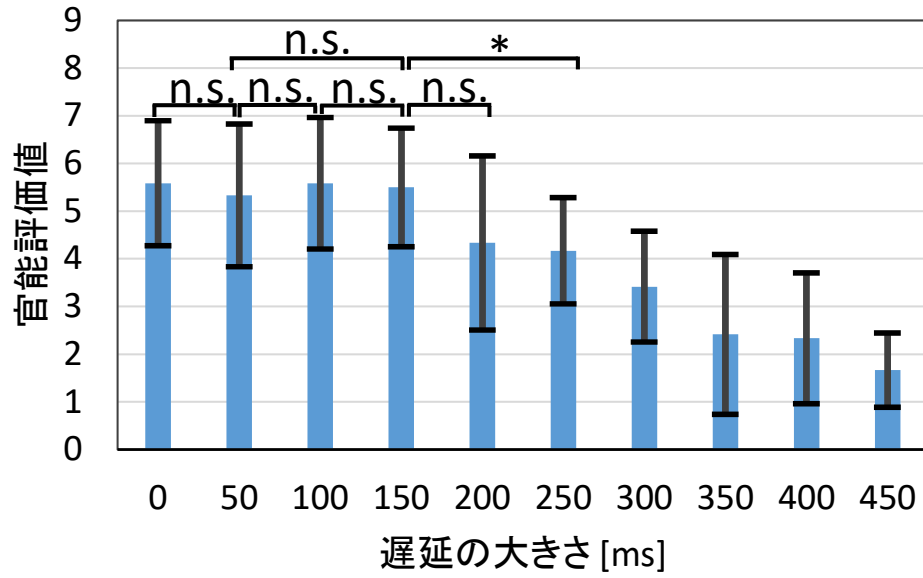


図 3.4: 遅延の大きさの変化と身体所有感に関する平均官能評価値の遷移とばらつき

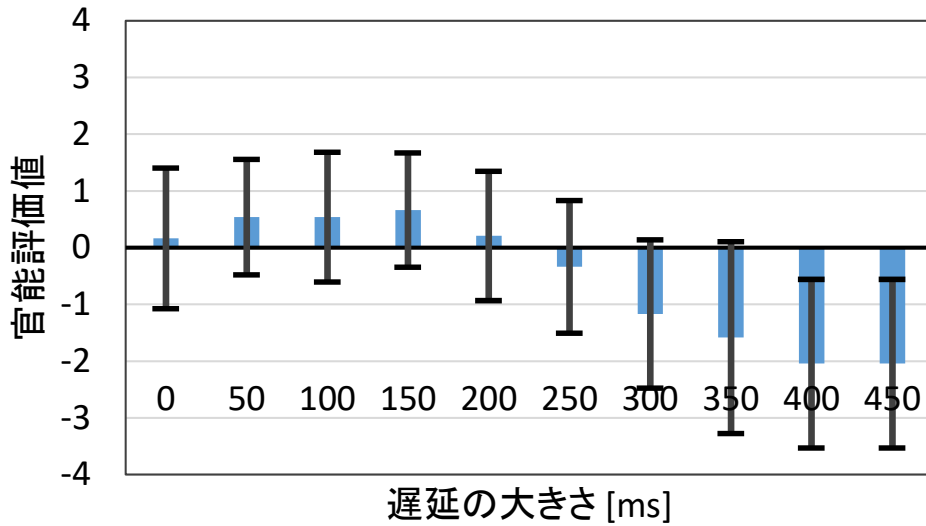


図 3.5: 遅延の大きさの変化と他者の存在感に関する平均官能評価値の遷移とばらつき

## 第4章 操作難易度とユーザエクスペリエンス

本章では操作難易度が操作者の感覚と道具操作性に与える影響に関する実験について述べる。実験1では、操作系における適切な遅延により、操作者は道具を他者として協調的に意識し、その意識が道具操作性に好意的な影響を与えることが示唆された。ところで、道具操作において道具の操作難易度や特性は操作者のユーザエクスペリエンスを変化させる重要な要素である。そこで、本実験では遅延に加え、操作難易度に関するパラメータを増やし、操作難易度が道具操作性、他者の存在感に与える影響について調査する。なお以降、本実験を実験2と表記する。

### 4.1 実験システム

実験2でも実験1で用いたシステムをさらに一部変更して使用する。具体的には、各実験開始前の準備段階において、遅延の大きさに加え、操作難易度を設定可能とする。実験2では画面内のマジックハンドの柄の長さを変更し、操作難易度を変更する。柄の長さは実験1と同じ長さ(1.0倍)、0.5倍、1.5倍の3種類とする(図4.1)。

### 4.2 実験手続き

被験者は大学生および大学院生(20代)の9名である。全員、PHANTOMを右手で操作する。また全ての被験者から実験参加について同意が得られている。実験1と同様に実験に先立ち、基準動作1から4を体験させるとともに、数分間の練習時間を与える。その後、それぞれの動作に関する説明を行う。なお、基準動作で用いるマジックハンドは柄の長さが実験1で用いたものと同じものとする。

実験における遅延は25[ms]から175[ms]までの、25[ms]刻みの7種類とする。被験者には1回の試行において10回の移動タスク(5往復)を連続して行ってもらう。9名の被験者に対して1人あたり14試行を割り当てる。このとき、21通り(遅延7通

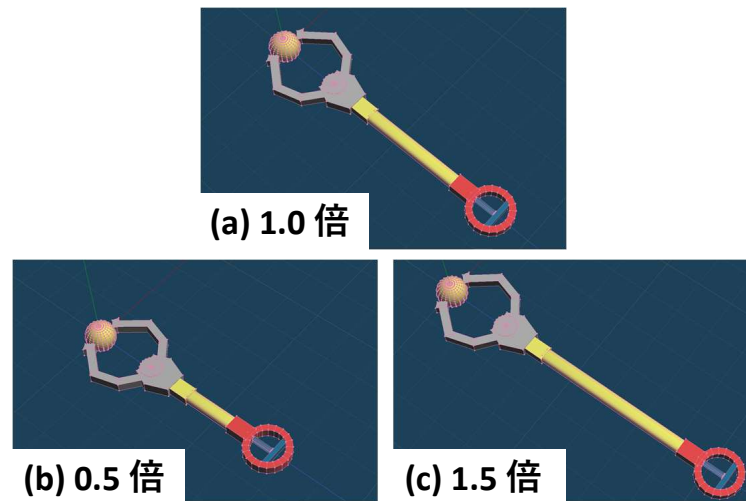


図 4.1: 3種類の道具の長さの違い

り、難易度3通り)の条件からランダムに14通りの条件を割り当てる。ただし、同じ人に同じ条件が割り当てられないようにする。これにより、1つの条件あたり、6試行分のデータが得られる。基準動作体験ののち、実験1と同様の手順で実験を行う。評価は被験者による操作感覚についてのアンケート回答と、対象物の台から台への移動時間により行う。なお、実験2では実験1のようにグループを分けることはせず、全ての被験者に質問3を回答してもらう。

### 4.3 実験結果と考察

遅延の大きさ、操作難易度と平均タスク達成時間の関係について考察する。長さが0.5倍、1.5倍の場合、遅延が大きくなっていても平均タスク達成時間は全体的に一定であることがわかる(図4.2, 図4.4)。しかし、長さが1.0倍の場合、50から75[ms]のとき25[ms]のときよりも平均タスク達成時間は短くなっており、25[ms]と50[ms]、25[ms]と75[ms]、それぞれについて有意水準1%で有意差があった(図4.3)。150[ms]のときの平均タスク達成時間に着目すると長さが0.5倍の場合、75[ms]のときよりも短く、75[ms]と150[ms]において有意水準5%で有意差がある(図4.2)。対して、長さが1.5倍の場合、平均タスク達成時間は一定であった(図4.4)。これらのことから、操作系における適切な遅延は元の長さでの操作性を向上させること、難易度によっては

適切な遅延の大きさが変化する可能性があること、難易度の高い道具では遅延がうまく機能しないことが示唆された。ところで、長さが1.0倍の場合の平均タスク達成時間は25[ms]のとき、長さが0.5倍や1.5倍の場合に比べて長くなっている(図4.5)。難易度が高い(道具の長さが長い)方がタスク達成時間が長いという一般的な考えと反する結果となった。これは、道具が長すぎる、つまり操作難易度が高い場合、被験者がタスク開始前に予め心構えをした可能性が考えられる。

次に、遅延の大きさ、操作難易度と他者の存在感の関係について考察する。3つの長さの場合の全てにおいて被験者は50から125[ms]程度では他者を協調として感じ、175[ms]より長い遅延では他者を妨害として感じるということが分かった(図4.9)。このことから、他者を協調として感じるか、妨害として感じるかは難易度にほとんど依存しないことが示唆された。それぞれの長さの場合における評価値の正の平均値と負の平均値の和を比較すると、1.0倍の場合は0.5倍や1.5倍の場合よりも大きかった(図4.9)。これは、難易度が低い(道具の長さが低い)場合は他者の存在感が小さく、難易度が高い場合は移動操作に気をとられ他者の存在感をうまく感じられなかった可能性が考えられる。このことから他者の存在感を強く感じるかどうかは難易度に依存することが示唆された。

最後に、平均タスク達成時間と他者の存在感の関係について考察する。(1)長さが1.0倍の場合の他者の存在感は、50から75[ms]の範囲で長さ0.5倍や1.5倍の場合に比べて大きかった(図4.9)。また、長さが1.0倍の場合の平均タスク達成時間は、同じく50から75[ms]の範囲で長さ0.5倍や1.5倍の場合に比べて短かく、有意水準5%で有意差があった(図4.5)。(2)被験者は長さ0.5倍の場合、150[ms]のとき他者を協調として感じていたのに対し、長さ1.0倍や1.5倍の場合には他者を妨害として感じていた(図4.9)。これはこれは長さ0.5倍の場合、150[ms]のときに被験者は他者を協調として相対的に強く感じていることを意味している。長さが0.5倍の場合の平均タスク達成時間は、150[ms]のとき1.0倍や1.5倍の場合に比べて短かく、有意水準1%で有意差があった(図4.5)。(3)長さが1.0倍の場合の他者の存在感は、50から75[ms]の範囲で最も大きかった(図4.7)。また、長さが1.0倍の場合の平均タスク達成時間は、同じく50から75[ms]の範囲で最も短かった(図4.3)。以上(1)から(3)のことから、他者を協調として感じているときには操作成績が向上し、操作難易度に応じて

適切さや有効性が異なることが示唆された。

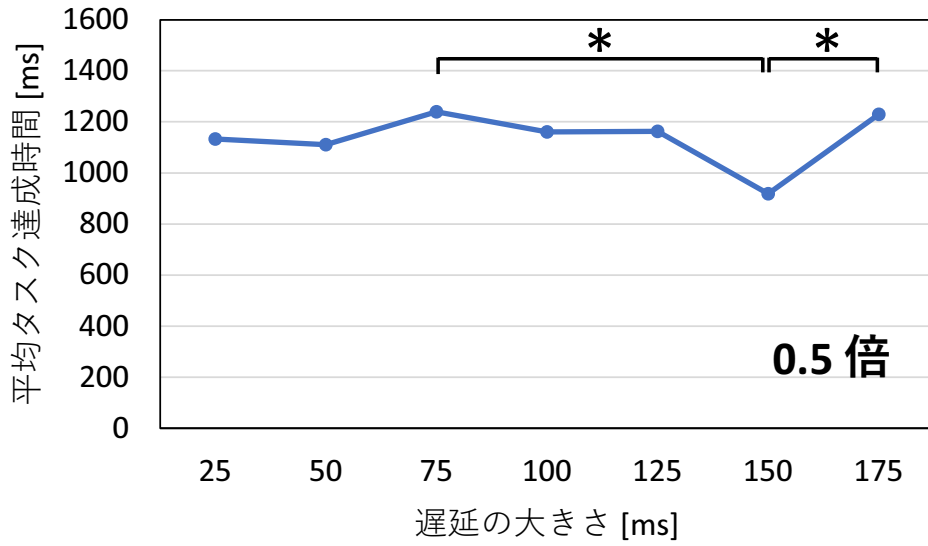


図 4.2: 長さ 0.5 倍の場合の, 遅延の大きさの変化と平均タスク達成時間の遷移

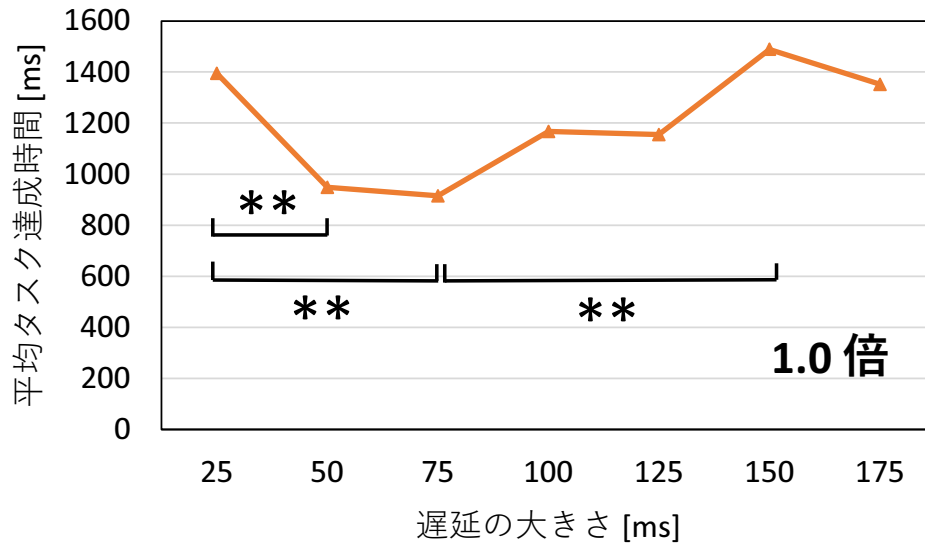


図 4.3: 長さ 1.0 倍の場合の, 遅延の大きさの変化と平均タスク達成時間の遷移



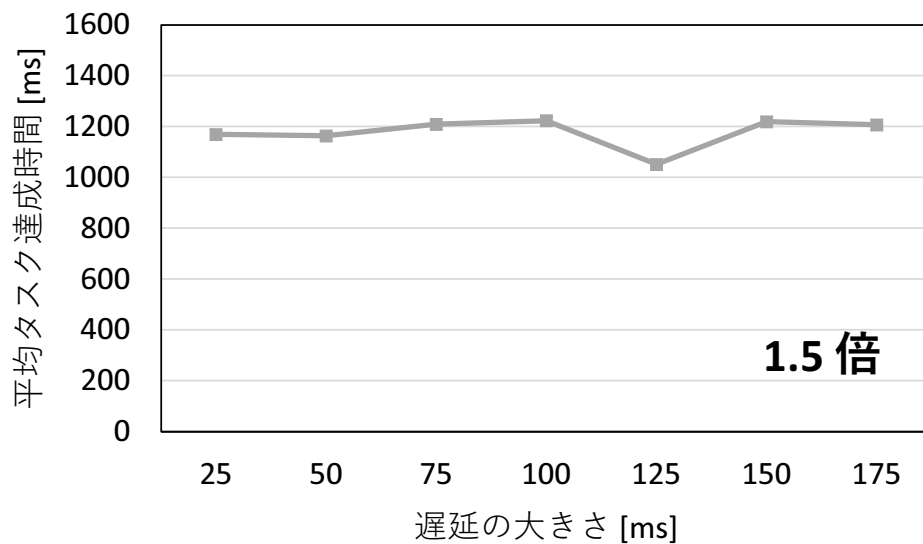


図 4.4: 長さ 1.5 倍の場合の, 遅延の大きさの変化と平均タスク達成時間の遷移

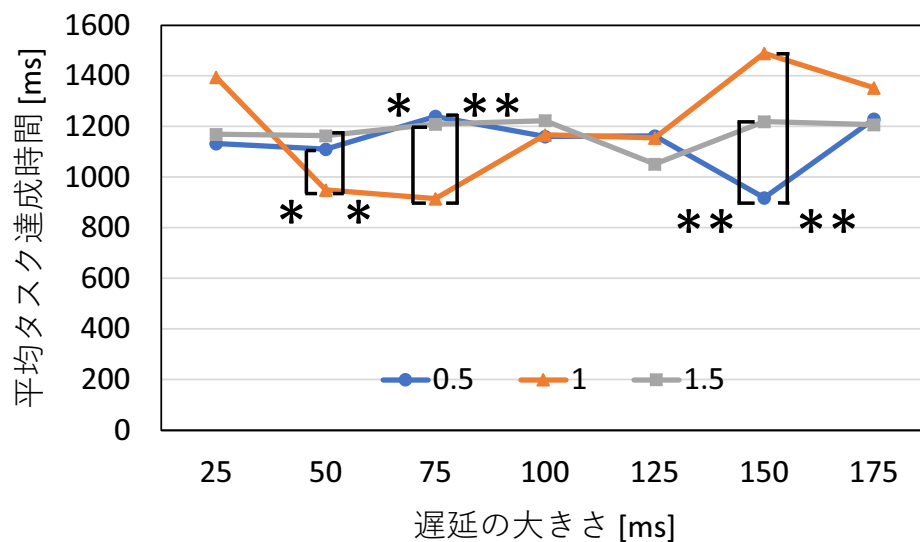


図 4.5: すべての長さの場合の, 遅延の大きさの変化と平均タスク達成時間の遷移

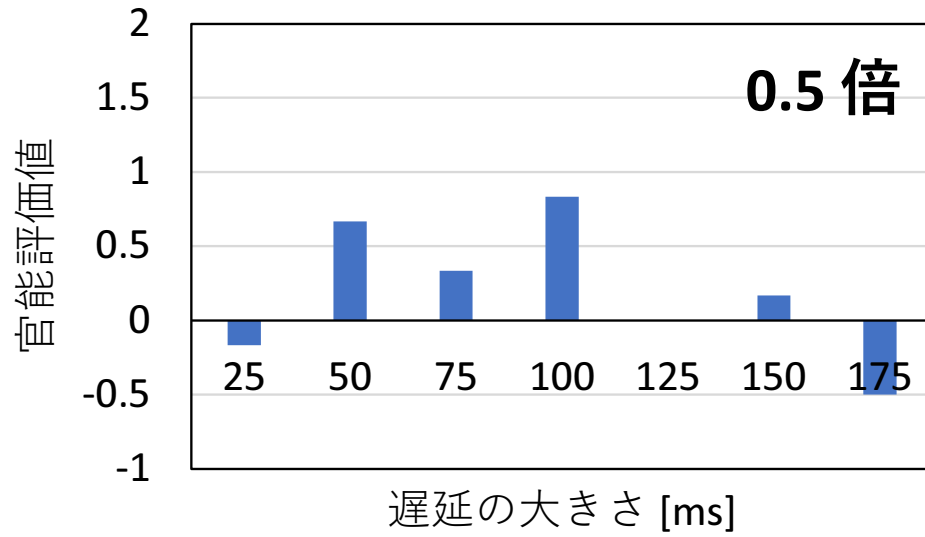


図 4.6: 長さ 0.5 倍の場合の, 遅延の大きさの変化と他者の存在感に関する平均官能評価値の遷移

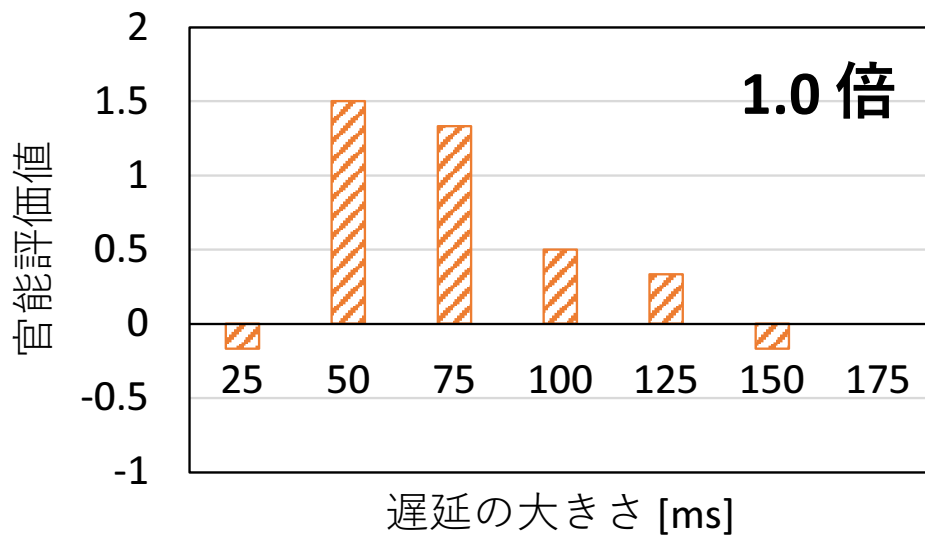


図 4.7: 長さ 1.0 倍の場合の, 遅延の大きさの変化と他者の存在感に関する平均官能評価値の遷移

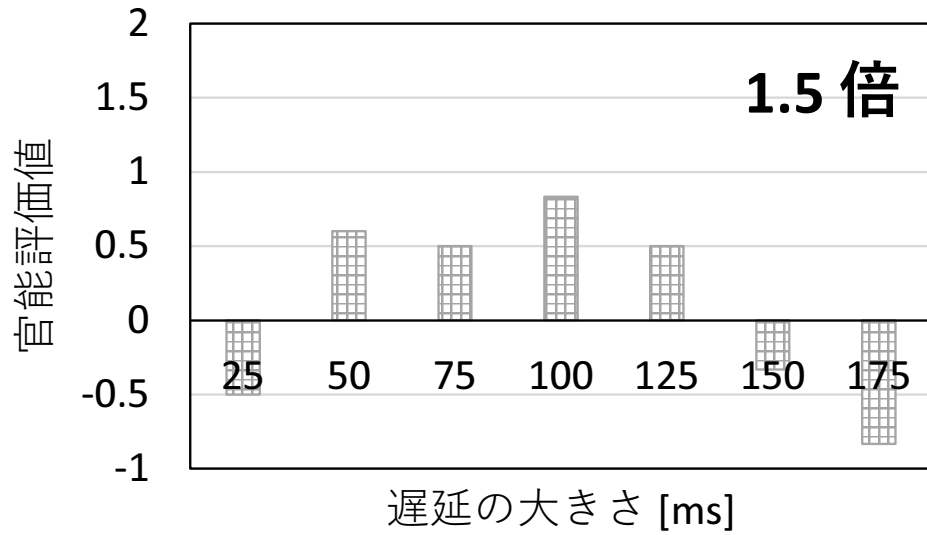


図 4.8: 長さ 1.5 倍の場合の、遅延の大きさの変化と他者の存在感に関する平均官能評価値の遷移

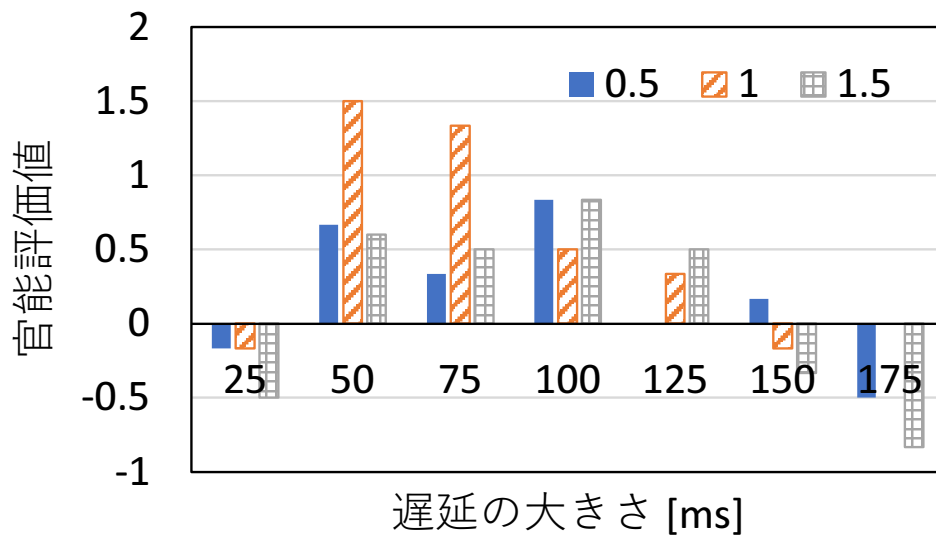


図 4.9: すべての長さの場合の、遅延の大きさの変化と他者の存在感に関する平均官能評価値の遷移

## 第5章 支援とユーザエクスペリエンス

本章では支援が操作者の感覚と道具操作性に与える影響に関する実験について述べる。実験1, 2では実際には操作支援を行っていないにも関わらず、「操作を手伝ってもらったように感じた」というコメントが一部の被験者から寄せられた。そこで、本実験では実際に支援を行った場合に得られるであろう支援感と操作系における遅延による擬似的な支援感の関係を調査する。1章で述べたように、操作支援実験システムをその性質から能動的操作支援と受動的操作支援に分類して実験する。実験1, 実験2では操作系にわずかに遅延をもうけると支援感が最も強くなった。そこで、能動的操作支援では操作よりもわずかに先行して、受動操作支援では操作よりもわずかに遅れて支援すると、より効果的な支援を実現できるとの予想を立てて、その真偽や支援のタイミングを調査する。なお以降、本実験を実験3と表記する。

### 5.1 実験システム

実験3でも同様に実験1のシステムをベースとしているが、力覚提示により実際に支援を行えるように機能追加している。具体的には、各実験開始前の準備段階において、支援の種類、操作と支援の時間差、力量を設定可能とする。支援のアルゴリズムについては以下で詳しく述べる。

#### 5.1.1 能動的操作支援

操作者の移動操作の近い未来を予測し、その予測に基づいて、誘導、あるいは補正するように支援する方法を考えたい。しかし、操作者の移動操作を正しく予測することは、現実的には困難である。そこで本実験では、操作者ごとの標準的な移動操作をあらかじめ把握しておくことで、これをもって擬似的に操作の予測とする。すなわち、ある被験者は、毎回同じ移動操作を行うとは言えないが、しかし毎回ほぼ同じ操作を

行くと仮定する。またこの標準的な操作は被験者ごとに異なるだろう。平均的な操作は、基準動作3に対する複数回の移動操作から平均として算出する。実際には、まず1試行すなわちタスク10回（右から左へのタスク5回、左から右へのタスク5回）のデータを得る。各操作作業において、時間 $\Delta t$ 間隔で、位置座標と速度ベクトルを記録する。その上で、右から左へのタスクに対して、移動操作開始時を時刻の起点として各時刻において位置と速度の平均値を求める。すなわちこの平均値列により、この操作者は、ある時刻において標準的にこの平均位置でこの平均速度となるような操作をするものとして、予測に代える。得られた平均値列を擬似予測データと呼ぶこととする。同様に左から右へのタスクにおいても、擬似予測データを得る。なお、被験者により右と左、上と下への操作に比較的大きな違いがあることを想定している。また擬似予測データを作成する際に台と台とを結ぶ放物線を表示することで、擬似予測データに大きな個人差が生じないようにする(図5.1)。

時刻 $t$ における、時間 $n$ 後の移動操作の予測に基づいた能動的操作支援について考える。なお、 $n$ は $\Delta t$ の整数倍とする。運動方程式 $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$ より、力の大きさと向きは加速度の質量倍に等しい。そこで、ある時刻 $t$ で与える能動的操作支援の力の大きさと向きは、時刻 $t+n$ における加速度 $\mathbf{a}_{t+n}$ の定数倍とすることを検討した。しかしながら、方向転換時は加速度が進行方向と大きく異なる向きになる。予備実験において進行方向と大きく異なる向きに支援としての力を加えると被験者は強い違和感を覚えた。そのため、この加速度のうち、時刻 $t+n$ での進行方向成分の定数倍の力を加えることとする(図5.2)。まず、加速度を得るために時刻 $t+n-\Delta t$ と時刻 $t+n$ における速度ベクトルを得る必要がある。時刻 $t$ における操作対象の位置 $\mathbf{x}_t$ に対して、擬似予測データ列のうち最も近い位置が、時刻 $t'$ における値であるとき、それを $\mathbf{x}'_{t'}$ とする。理想的には $t = t'$ であり、 $\mathbf{x}_t = \mathbf{x}'_{t'}$ であるが、実際の実験時に、標準的な操作に対して早く操作したり、あるいは外側の位置を通ったりすることを想定している。擬似予測データから、位置 $\mathbf{x}'_{t'}$ に対する時間 $n$ 後の位置 $\mathbf{x}'_{t'+n}$ と速度ベクトル $\mathbf{v}'_{t'+n}$ 、および時間 $n-\Delta t$ 後の位置 $\mathbf{x}'_{t'+n-\Delta t}$ と速度ベクトル $\mathbf{v}'_{t'+n-\Delta t}$ を得る。なお、以下の

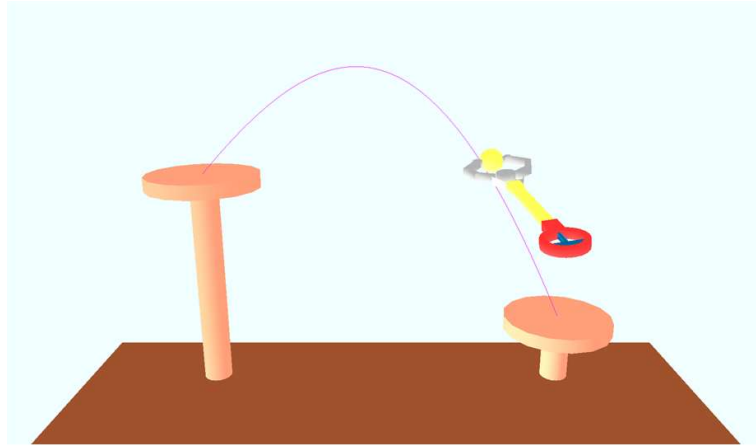


図 5.1: 擬似予測データを作成しているときの様子

関係が成り立つ.

$$\mathbf{v}'_{t'+n} = (\mathbf{x}'_{t'+n} - \mathbf{x}'_{t'+n-\Delta t}) / \Delta t \quad (5.1)$$

$$\mathbf{v}'_{t'+n+\Delta t} = (\mathbf{x}'_{t'+n+\Delta t} - \mathbf{x}'_{t'+n}) / \Delta t \quad (5.2)$$

次に,  $\mathbf{v}'_{t'+n}$ ,  $\mathbf{v}'_{t'+n-\Delta t}$  から  $\mathbf{a}'_{t'+n}$  を算出する.

$$\mathbf{a}'_{t'+n} = (\mathbf{v}'_{t'+n} - \mathbf{v}'_{t'+n-\Delta t}) / \Delta t \quad (5.3)$$

その後,  $\mathbf{a}'_{t'+n}$  と  $\mathbf{v}'_{t'+n}$  のなす角  $\theta$  を求める.

$$\cos \theta = \frac{\mathbf{a}'_{t'+n} \cdot \mathbf{v}'_{t'+n}}{|\mathbf{a}'_{t'+n}| |\mathbf{v}'_{t'+n}|} \quad (5.4)$$

その上で, 時刻  $t$  において,  $\mathbf{v}'_{t'+n}$  と同じ向き,  $\mathbf{a}'_{t'+n} \cos \theta$  の定数倍の力を加えることにより, 能動的な操作支援を行う (図 5.3).

### 5.1.2 受動的な操作支援

近い過去の移動操作に基づいて, 力を増強するように支援する方法を考える. 時刻  $t$  において, 時間  $n$  後の移動操作に基づいた受動的な操作支援を行うとする. 運動方程式  $\mathbf{F} = m\mathbf{a}$  より, 力の大きさと向きは加速度の質量倍に等しい. そこで, ある時刻  $t$  で与える受動的な操作支援の大きさと向きは, 時刻  $t-n$  の加速度  $\mathbf{a}_{t-n}$  の定数倍とした. しかしながら, カーブや減速時は加速度が進行方向と大きく異なる向きになる.

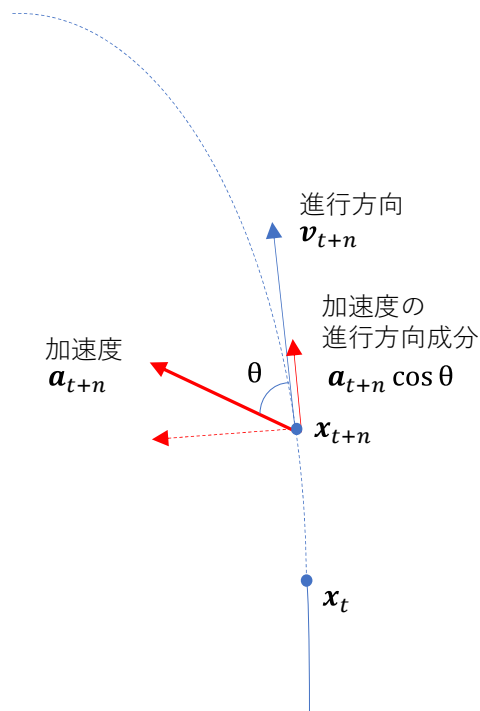


図 5.2: 時刻  $t$  における理想的な位置関係

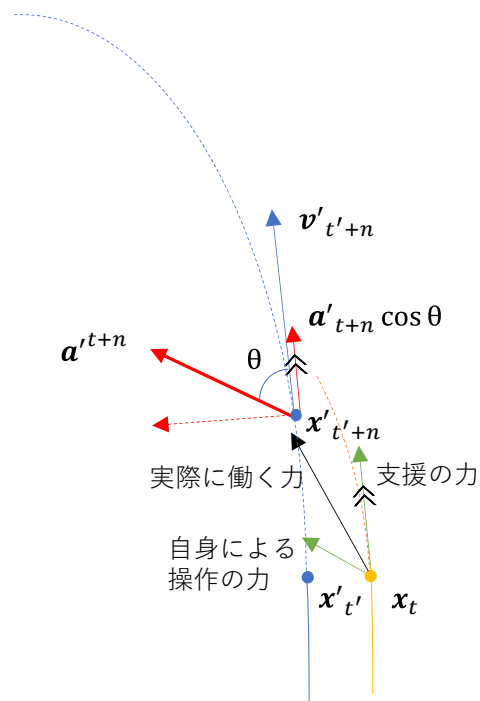


図 5.3: 時刻  $t$  における実際の位置関係

予備実験において進行方向と大きく異なる向きに、受動的操作支援としての力を加えると被験者は能動的操作支援と同様に違和感を覚えた。そのためここでも同様に、この加速度のうち時刻  $t-n$  での進行方向成分の定数倍の力を加えることとする。まず、時刻  $t-n$  と時刻  $t-n-\Delta t$  の速度ベクトル  $\mathbf{v}_{t-n}$ ,  $\mathbf{v}_{t-n-\Delta t}$  から加速度  $\mathbf{a}_{t-n}$  を導出する。次に、 $\mathbf{a}_{t-n}$  と  $\mathbf{v}_{t-n}$  のなす角  $\theta$  を求める。その上で、時刻  $t$  において、 $\mathbf{v}_{t-n}$  と同じ向きの、 $\mathbf{a}_{t-n} \cos \theta$  の定数倍の力を加えることにより、受動的操作支援を行う。

## 5.2 実験手続き

被験者は大学生および大学院生 (20代) の 30 名である。全員、PHANTOM を右手で操作する。また全ての被験者から実験参加について同意が得られている。実験 1, 2 と同様に実験に先立ち、基準動作 1 から 4 を体験させるとともに、数分間の練習時間を与える。動作 3 を体験させているときに、能動的操作支援で用いる擬似予測データを作成する。次に、それぞれの動作に関する説明を行う。その後、実験 3 では遅延ではなく力を与える旨を伝え、能動的操作支援と受動的操作支援をそれぞれ体験してもらう。

実験における時間差は 0[ms] から 450[ms] までの、50[ms] 刻みの 10 種類とする。被験者には 1 回の試行において 10 回の移動タスク (5 往復) を連続して行ってもらう。30 名の被験者に対して 1 人あたり 20 試行 (能動的操作支援 10 試行, 受動的操作支援 10 試行) を割り当てる。このとき、30 通り (時間差 10 通り, 力量 3 通り) の条件からランダムに 10 通りの条件を割り当てる。ただし、同じ人に同じ条件が割り当てられないようにする。また、能動的操作支援を与える実験と受動的操作支援を与える実験の条件は同じとする。これにより、それぞれの実験で 1 つの条件あたり、10 試行分のデータが得られる。基準動作体験ののち、実験 1, 2 と同様の手順で能動的操作支援を与える実験と受動的操作支援を与える実験を行う。このとき、実験を行う順序による評価への影響をなくすため、被験者のうち 15 名に対しては能動的操作支援を与える実験を先に行い、残りの 15 名に対しては受動的操作支援を与える実験を先に行う。評価は被験者による操作感覚についてのアンケート回答と、対象物の台から台への移動時間により行う。なお、実験 3 では全ての被験者に質問 3 を回答してもらう。



### 5.3 実験結果と考察

支援における時間差, 力量と平均タスク達成時間の関係について考察する。まず, 能動的操作支援について考察する。力量が最小のとき, 時間差が大きくなるほど平均タスク達成時間は長くなっていた。特に 200[ms] と 300[ms] において有意水準 1% で有意差が見られた (図 5.4)。力量が中程度のとき, 時間差が大きくなっても平均タスク達成時間はおおよそ一定であった (図 5.6)。力量が最大のとき, 400[ms] から 450[ms] にかけて有意水準 1% で平均タスク達成時間の有意な減少が見られた (図 5.8)。次に受動的操作支援について考察する。力量が最小のとき, 50[ms] から 100[ms] にかけて有意水準 1% で平均タスク達成時間の有意な減少, 250[ms] から 350[ms] にかけて有意水準 1% で平均タスク達成時間の有意な増加が見られた (図 5.5)。力量が中程度のとき, 全体としては平均タスク達成時間はおおよそ一定であるが, 200[ms] から 300[ms] にかけて有意水準 1% で有意な減少が見られた (図 5.7)。力量が最大のとき, 平均タスク達成時間は増加と減少を繰り返した (図 5.9)。以上のように各条件で違いは見られたものの, 全体を通した明確な傾向はつかめなかった。一方で, 作業精度は力量が最大のとき, 能動的操作支援では 50[ms] から 100[ms] にかけて, 受動的操作支援では 250[ms] から 300[ms] にかけて値が小さく, つまり作業精度が高くなっている (図 5.10, 図 5.11)。このことから能動的操作支援, 受動的操作支援のどちらにおいても適切な時間差をもうけると作業精度が向上することが示唆された。平均タスク達成時間は減少していないが, 増加することなく作業精度が向上することは好ましいことである。

支援における時間差, 力量と他者の存在感の関係について考察する。まず, 能動的操作支援について考察する。力量が最大のとき, 0 から 50[ms] において時間差が大きくなるほど官能評価値は大きくなっていき, 50[ms] をピークに評価値は減少に転じていた (図 5.12)。このとき 50[ms] と 450[ms], 100[ms] と 450[ms] において有意水準 5% で有意差が見られた。このことから, 時間差の大きさによって他者の存在感が異なること, わずかに時間差をもうけると他者を協調的に感じることを示唆された。また, 50[ms] と 450[ms] のとき, 力量が最小の場合の評価値と力量が最大の場合の評価値との間でそれぞれ有意水準 5% で有意差がみられた。このことから力量によって他

者の存在感が異なることが示唆された。次に、受動的操作支援について考察する。ほとんどの条件において被験者は他者を協調として感じていた(図 5.13)。力量が最大するとき、0 から 150[ms] において時間差が大きくなるほど官能評価値は大きくなっていき、150[ms] をピークに評価値は減少に転じていた。このとき、残念ながら有意差は見られなかった。このことから、能動的操作支援と同様に、わずかに時間差をもうけると他者を協調的に感じる可能性があることが示唆された。受動的操作支援の評価値は全体を通して能動的操作支援の評価値に比べて絶対値が小さい。これは受動的操作支援が能動的操作支援に比べて予想以上に支援を感じにくかったためと考えられる。力量を増加させれば、より明確な結果が得られるかもしれない。

操作系における遅延による擬似的な支援と実際の支援の効果を比較する。操作系に遅延をもうけた実験において、道具操作性が最も向上したとき、平均タスク達成時間はおよそ 1000[ms] であった。一方で実際に支援としての力を加えた本章の実験において、平均タスク達成時間はおよそ 1000[ms] であった。受動的操作支援では平均タスク達成時間が一定ではないため一概には言えないが、遅延による擬似的な支援は実際の支援と同程度に道具操作性を向上させる効果をもつ可能性があることが示唆された。

以上のことから、能動的操作支援では操作よりもわずかに先行して、受動的操作支援では操作よりもわずかに遅れて支援すると、被験者は他者を協調的に意識し、作業精度が向上することが示唆された。

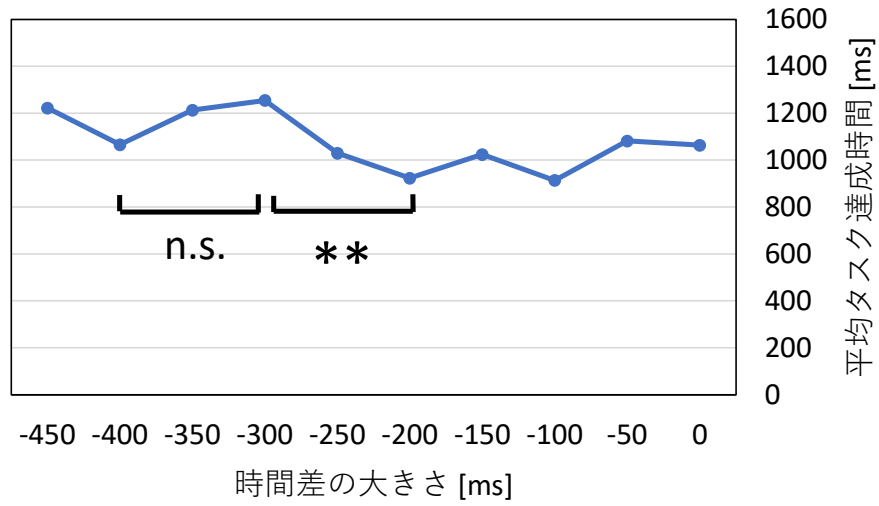


図 5.4: 力量最小の能動的操作支援における, 時間差の大きさの変化と平均タスク達成時間の遷移

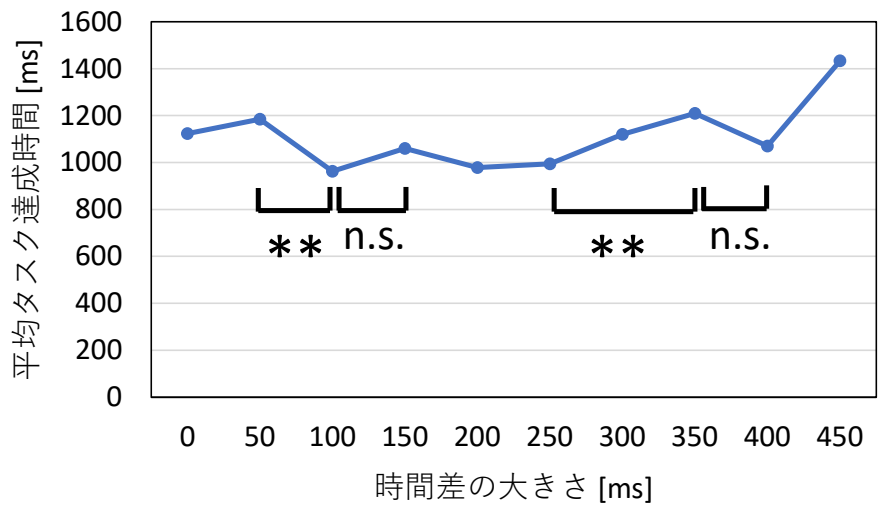


図 5.5: 力量最小の受動的操作支援における, 時間差の大きさの変化と平均タスク達成時間の遷移

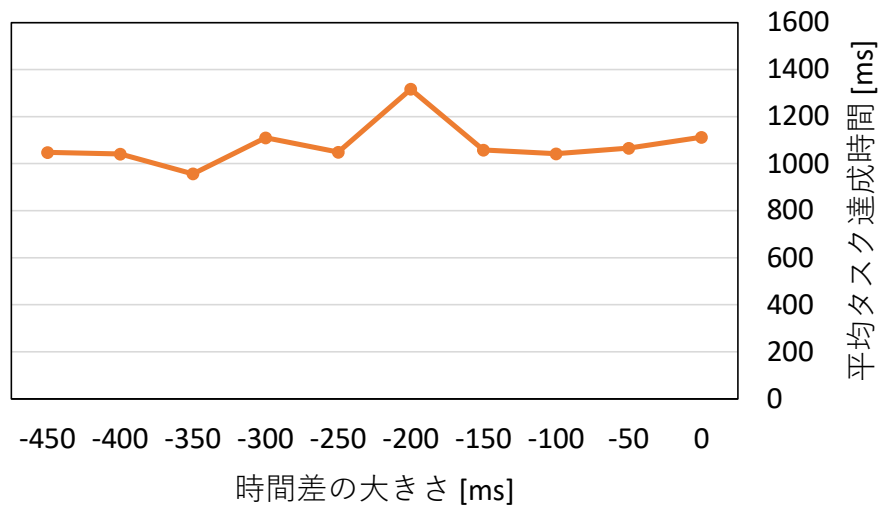


図 5.6: 力量中程度の能動的操作支援における, 時間差の大きさの変化と平均タスク達成時間の遷移

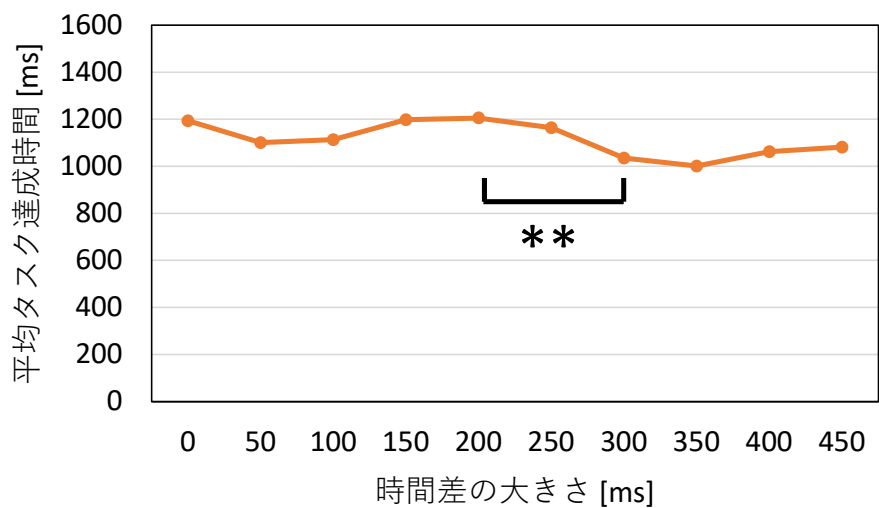


図 5.7: 力量中程度の受動的操作支援における, 時間差の大きさの変化と平均タスク達成時間の遷移

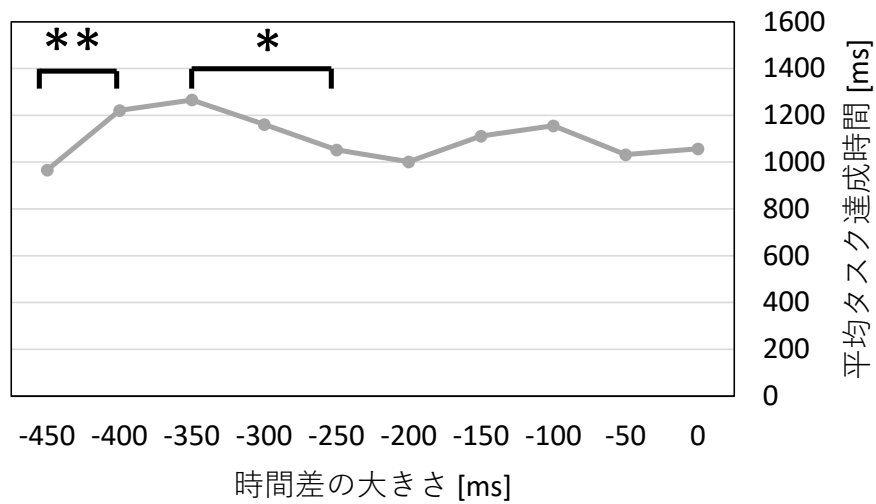


図 5.8: 力量最大の能動的操作支援における, 時間差の大きさの変化と平均タスク達成時間の遷移

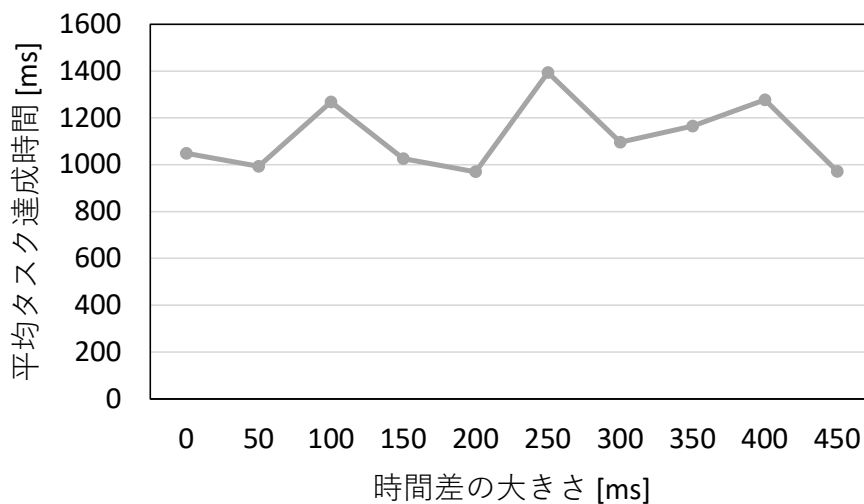


図 5.9: 力量最大の受動的操作支援における, 時間差の大きさの変化と平均タスク達成時間の遷移

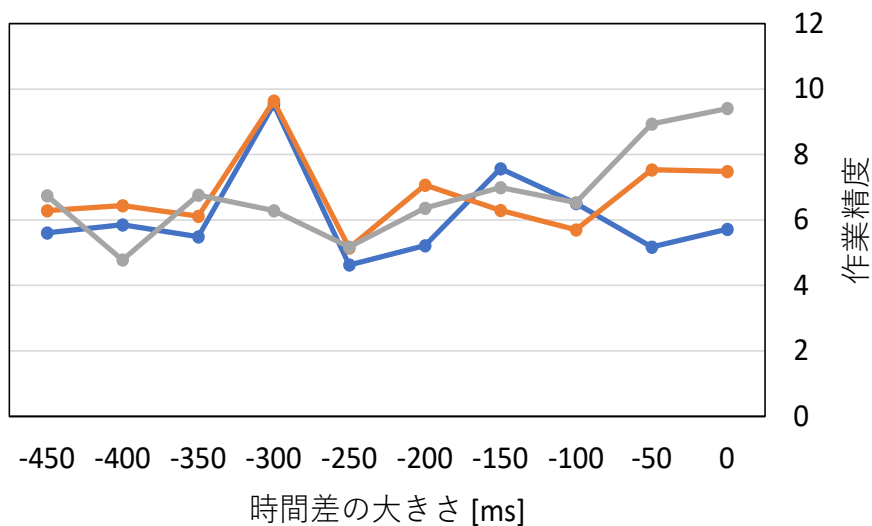


図 5.10: 能動的操作支援における, 時間差の大きさの変化と作業精度の遷移

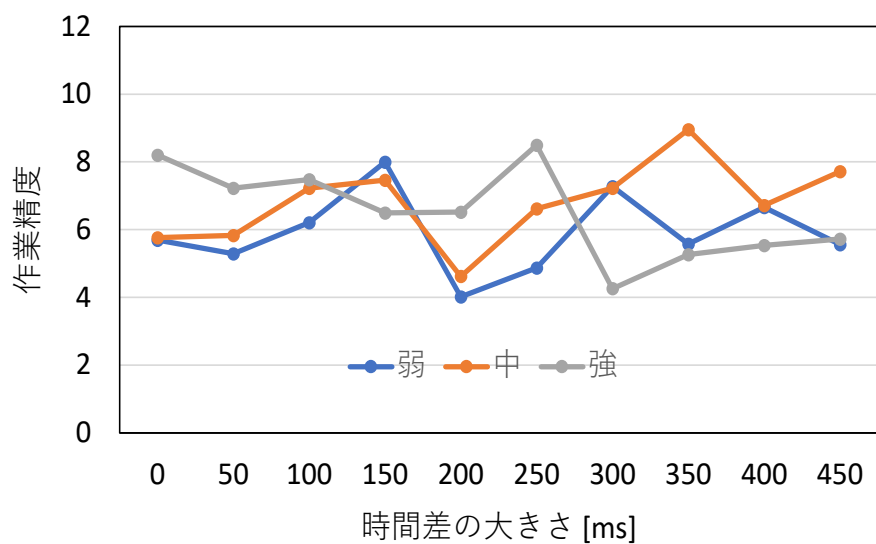


図 5.11: 受動的操作支援における, 時間差の大きさの変化と作業精度の遷移

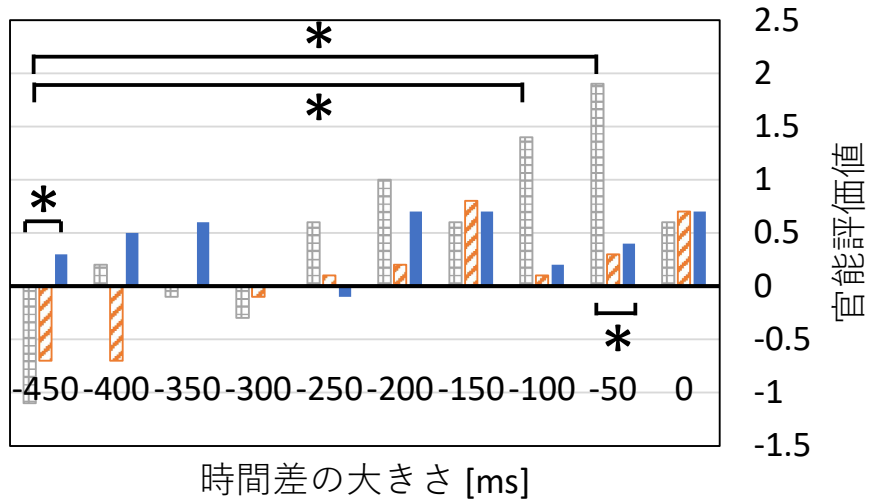


図 5.12: 能動的操作支援における, 時間差の大きさの変化と他者の存在感に関する官能評価値の遷移

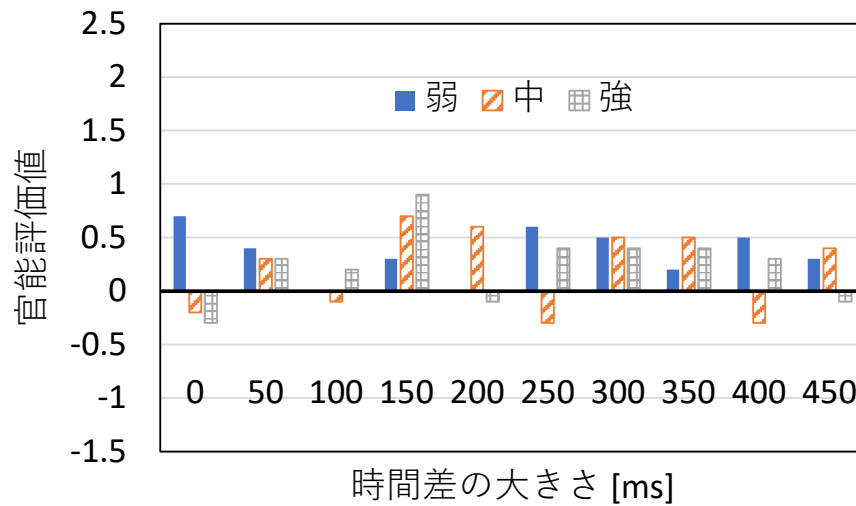


図 5.13: 受動的操作支援における, 時間差の大きさの変化と他者の存在感に関する官能評価値の遷移

## 第6章 むすび

本研究では、操作系における遅延、操作難易度、支援が操作者の感覚や道具操作性に対して与える影響について調査した。その結果、操作系におけるわずかな遅延により、操作者は道具を他者として協調的に意識し、その意識が道具操作性を向上させることが示唆された。また遅延の適切な大きさや有効性は操作難易度によって異なることが示唆された。さらに、能動的な操作支援では操作よりもわずかに先行して、受動的な操作支援ではわずかに遅れて支援すると、被験者は道具を他者として協調的に意識し、作業精度が向上することが示唆された。一概には言えないが、わずかな遅延による擬似的な支援は実際に支援したときと同程度に道具操作性を向上させる可能性があることが示唆された。本研究は道具操作に長けていない人でも熟練者のようなユーザエクスペリエンスを効果的に得られるVRインターフェース開発の手助けとなると期待される。

支援が操作者の感覚と道具操作性に与える影響に関する実験では被験者が予想以上に支援の力を感じ取れなかった。そのため支援の力量を増加させることで、より明確な結果を得たい。また被験者数を増やした上で、パラメータの幅を増加もしくは小刻みにすることで新たな知見を見出したい。



## 謝辞

本研究を進めるにあたって、日頃から多大な御尽力をいただき、ご指導を賜りました名古屋工業大学、舟橋健司 准教授、伊藤宏隆 助教 に心から感謝致します。また、本研究の共同研究者である近畿大学の谷田公二様に研究の機会を与えてくださったことを深く感謝致します。

本研究に多大な御協力いただきました舟橋研究室諸氏ならびに被験者の方々に心から感謝致します。本研究の一部は JSPS 科研費 JP20K11918 の助成を受けたものです。

## 参考文献

- [1] ISO9241-11, Ergonomic requirements for office work with visual display terminals. Guidance on Usability, 1998.
- [2] 小南 祐貴, 伊藤 恵, “ユーザーエクスペリエンスを考慮したソフトウェア開発支援”, 日本ソフトウェア科学会第 30 大会講演論文集, Sep. 2013.
- [3] 泉 浩人, “競争戦略としてのユーザーエクスペリエンスデザイン”, 情報管理, Vol.59, No.8, pp.535-543, 2016.
- [4] スターバックスコーヒージャパン, “Our Mission and Values”,  
<https://www.starbucks.co.jp/company/mission.html>,  
(参照 2021.1.7)
- [5] 渡辺陽一郎, “マツダ「ロードスター」の新型と旧型を比較してみた”,  
<https://autoc-one.jp/mazda/roadster/special-2164960/0003.html>,  
(参照 2021.1.7)
- [6] 矢野 徳郎, “身体運動の主観的構成: テニスの分析”, 北海道大学教育学部紀要, Vol.64, pp.1-8, 1994.
- [7] A.Iriki, M.Tanaka, Y.Iwamura, “Coding of modified body schema during tool use by macaque postcentral neurons”, Neuroreport, Vol.7, pp.2325-2330, Oct. 1996.
- [8] 渡辺 貴文, 片山 智文, 上杉 繁, 三輪 敬之, “仮想道具による身体像拡張の評価手法に関する研究”, 信学技報, Vol.105, No.74, pp.47-50, May 2005.

- [9] S. Gallagher, “Philosophical Conceptions of the Self, Implications for Cognitive Science”, *Trends in Cognitive Science*, Vol.4, No.1, pp.14-21, Feb. 2000.
- [10] 和坂 俊昭, “運動遂行時の運動情報と感覚情報の脳内統合過程”, *システム/制御/情報*, Vol.61, No.11, pp.453-458, 2017.
- [11] K. Schneider, “Clinical Psychopathology”, New York: Grune and Stratton, 1959.
- [12] 齋藤 寛人, 福地 健太郎, “能動的回転操作における自己帰属感の生起過程の分析”, *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol.22, No.1, pp.81-90, 2017.
- [13] M. Botvinick, J. Cohen, “Rubber Hands ‘Feel’ Touch that Eyes See”, *Nature*, Vol.391, pp.756, 1998.
- [14] T. Kataoka, K. Funahashi, K. Tanida, K. Yashiro, “A Study of Sense of Self-Agency Focused on Noise and Delay in Multiple Input Operation”, *IEEE-GCCE*, pp.484–487, 2017.
- [15] T. Waltemate, I. Senna, F. Hulsmann, M. Rohde, S. Kopp, M. Ernst, M. Botsch, “The Impact of Latency on Perceptual Judgments and Motor Performance in Closed-Loop Interaction in Virtual Reality”, *VRST2016*, pp.27–35, Nov. 2016.
- [16] H. Tochioka, H. Ikeda, T. Hayakawa, M. Ishikawa, “Effects of Latency in Visual Feedback on Human Performance of Path-Steering Tasks”, *VRST2019*, No.65, pp.1–2, Nov. 2019.
- [17] 宮路 大勇, 舟橋 健司, 谷田 公二, “遅延が道具における身体所有感に与える影響に関する調査”, *日本バーチャルリアリティ学会第24回大会講演論文集*, B5-01, Sep. 2019.
- [18] 渡辺 洋史, 田中 健治, 藤岡 陽一, 國分 弥則, 山口 俊行, “新型デミオのパフォーマンスフィールド”, *マツダ技報*, No.32, pp.42-47, 2015.
- [19] 八重洲出版, *driver*, 12月号, pp.55, Oct. 2015.

- [20] 神戸新聞NEXT (大島光貴), “テニス全豪OP 公式球は日本メーカー 四大大会初, 神戸で開発”,  
<https://www.kobe-np.co.jp/news/sports/201901/0011976830.shtml>,  
(参照 2021.1.7)
- [21] C. Farrer, G. Valentin, J.M. Hupe, “The time windows of the sense of agency”,  
*Consciousness and Cognition*, Vol.22, No.4, pp.1431–1441, Oct. 2013.
- [22] 国土交通省自動車局 自動車運送事業に係る交通事故対策検討会, 自動車運送事業に係る交通事故対策検討会報告書 (平成 28 年度), Mar, 2017.
- [23] 佐藤 帆紡, 川畑 共良, 田中 文英, 山海 嘉之, “ロボットスーツ HAL による移乗介助動作の支援”, *日本機械学会論文集 (C 編)*, Vol.76, No.762, pp.227-235, Feb. 2010.

## 発表論文リスト

1. 宮路大勇, 舟橋健司, 谷田公二, “遅延が道具における身体所有感に与える影響に関する調査”, 日本バーチャルリアリティ学会第24回大会講演論文集, B5-01, 4pages, 2019.9.
2. 宮路大勇, 舟橋健司, 谷田公二, 水野慎士, “道具におけるわずかな遅延の積極的影響と難易度に関する調査”, 第18回情報学ワークショップ (WiNF) 抄録集, S-4C-9 (1/4page), 2020.11.