

2025 年度 修士論文

論文題目

わずかな遅延が道具操作成績に与える好影響の
複数条件を横断した個人別分析

(Cross-Condition Individual Analysis of Positive Effect of
Slight Delay on Operation Performance)

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 工学専攻
メディア情報プログラム 2024 年度入学 36414094 番

高寺 昭至

目次

第1章	はじめに	1
第2章	先行研究	5
2.1	概略	5
2.2	実験システム	5
2.3	実験手順	6
2.4	実験システムの要素	10
2.5	実験結果	13
第3章	再分析	17
3.1	Johnson SU 分布に基づいた再分析	17
3.2	特定の条件における個人別の再分析	21
第4章	複数条件を横断した実験および分析	23
4.1	追加実験	23
4.2	分析	23
4.2.1	4条件を横断したグループ分け	23
4.2.2	3条件を横断したグループ分け	27
4.2.3	条件 RL におけるグループ分け	29
第5章	むすび	32
	謝辞	34
	参考文献	35
	発表論文リスト	37

第1章 はじめに

私たちの身の周りのデジタル機器には、キーボードやマウス、タッチスクリーンなどが備わっていることが多い。これらは人間がシステムと情報をやり取りするためのヒューマンインタフェースである。人間にとってのより直感的な使いやすさや快適な操作性を追求する様々な研究が行われている。例えば Bau らは、指先と電極の間に生じる静電引力（クーロン力）を制御することで、物理的な可動パーツを用いることなく、タッチパネルの画面をなぞる際の摩擦の感覚を変化させる手法を提案した [1]。滑らかなガラス面上において多様な質感を疑似的に再現することが可能であると示唆された。Lécuyer らは、等尺性入力デバイスを用いた操作において、画面上のカーソルの移動速度を動的に変化させることで、力覚フィードバック装置を用いずに疑似触覚（Pseudo-haptic feedback）を生成する手法を提唱した [2]。具体的には、仮想的なバネを押し込む操作において、バネの剛性（硬さ）に応じてカーソルの移動速度を減速させる制御を行った。ユーザーは視覚的な移動量の低下を「操作に対する抵抗感」として知覚し、力覚フィードバックがない状態でもバネの硬さや表面の摩擦特性を識別できることが示された。視覚と触覚の相互作用を利用することで、安価なデバイスでも直感的かつリアリティのあるインタラクションが可能であることが示唆された。これらのような新たな発想のヒューマンインタフェースは、ユーザが経験する体験のリアリティを向上させる役割を果たすだろう。日本バーチャルリアリティ学会は、バーチャルリアリティ（VR）を「それがそこにはない（現前していない）にもかかわらず、観察する者にそこにあると感じさせる（同一の表象を生じさせる）ものである。」と説明している [3]。前述のような手法の導入はVRシステムのリアリティを向上させるだろう。Stephanidis らは、VRはデバイス面では大きな進歩を遂げているものの没入感と存在感を高めたリアルな体験を生み出すことが今後の課題であると述べている [4]。VRシステムやメディアアートなどのイ

インタラクティブコンテンツを体験する際には、コンテンツそのもの、例えば仮想世界や提示作品自体の内容に加えて、インタフェースの機能、性能の影響も大きいだろう。

一般的にユーザインタフェースにおいてレイテンシは対象の操作性の観点から悪影響を与えると捉えられている [5][6]。しかし、マツダ株式会社は「ドライバはアクセルを踏む行為に無意識のうちに身構える。その身構えとは、頭部を支えるための首筋の緊張でありマツダでは“構え”と呼称している。アクセルを動かし始めて、首筋の緊張が始まるまでの時間は0.2~0.3秒で一定であり、その“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である。」と遅延を肯定的に捉えている [7]。Farrer らはボタン押下から画面応答までに微小な時間的遅延を介在させる実験を行った [8]。遅延をもうけたときに部分的には自己の行為が結果を引き起こしたとを感じるが、部分的には自己の行為ではないという認識が生じていることを明らかにした。他者による妨害とは明示されておらず、操作者はこの外部からの介在を自身の操作を補完してくれる支援としてポジティブに解釈していた可能性もある。遅延は操作成績の低下要因ではなく、操作主体に対して「外部からの支援」を付与し操作成績の向上に寄与する因子であることを期待させるものであるかもしれない。ディズニー・スタジオでアニメーション監督を務めてきた Williams は、アニメーション制作分野では動画が音声よりも数フレーム先行（音声は動画よりも遅延）すると視聴者は動画と音声の同期がとれているように感じられることが経験則的にわかっていると指摘している [9]。

当研究室ではこれらの知見から、わずかな遅延は道具の操作成績の向上に寄与するという仮説を立て検証を行った [10]。VR システムにおいて実験参加者を募り、VR 環境下で道具操作をしてもらった。このとき、視覚フィードバックにおける道具の挙動をわずかに遅延させた。道具操作タスクの達成時間を成績として記録した。様々な遅延の長さに対する全参加者、全試行の成績の平均値の推移を調査した。その結果、特定の条件下での実験において有意な成績向上が見られた。しかし、外観やいくつかのパラメータを変更した条件下での実験では好影響、すなわち成績向上は確認できなかった。そこで、どのような要素、すなわちパラメータの値などの条件が遅延による操作成績の向上に寄与するのか調査してきた [11][12]。有意な成績向上の確

認できる実験条件と、有意差の確認できない実験条件があることが示唆された。なお、有意差の確認できない条件群には、そもそも成績向上の見られない条件と、平均的には成績が向上していた条件が含まれる。

先行研究では、各参加者、各試行の成績データは正規分布に従い、不揃いがないと仮定して平均値で比較していた。また実験ごと、すなわち条件ごとに参加者を募っており、条件を横断した分析は考慮していなかった。しかし研究を進めるにあたり成績データの分布を確認したところ正規分布に従っていなかった。そこで、全員の成績データの平均値に向上が見られない場合においても、一部の参加者の成績は向上している場合があるのではないかと考えた。また、平均値に向上が見られる場合においても、一部の参加者の成績は全く向上していない場合があるのではないかと考えた。すなわち、成績の向上するグループと向上しないグループに分けることができ、成績が向上する人はおおよそいつも向上する、との仮説を立てた。本研究では、まず先行研究の評価結果データの再分析を行った。具体的には、分布の歪度（非対称性）と尖度（裾の重さ）に焦点を当て、Johnson SU 分布を仮定して最頻値による比較を行った。先行研究では成績向上が確認できなかった条件においても有意に成績が向上していることが示唆された。また、小さなミスやためらいが生じたとも推測される外れ値を除いた平均値の比較から、先行研究では成績向上が確認できなかった条件においても一部の参加者の成績が向上している可能性も示唆された。さらに、実験単位でデータを見ることに加え、個人単位でデータを見ることでその可能性を確認できるかもしれないと考え、個人別での分析を行った。わずかな遅延により成績向上する人が多く、またそもそも成績向上しない人もいる可能性が示唆された。続いて、新たな評価実験を行い、分析を行った。具体的には、各参加者に、先行研究でも評価された4条件全てに対してVR環境下での道具操作をしてもらった。複数条件の成績データを横断的に分析した結果、成績の向上するグループと向上しないグループに分けることはできそうであったが、同じ人に再び作業してもらったところ、成績が向上する人はおおよそいつも向上する、とは言えなかった。すなわち、いつも常に向上する人がいるという仮説は棄却されたが、偶発的に向上したりしなかったりするらしいこともわかった。一方で有意な成績向上の確認できる一部の条件においては、成績が向上する人はおおよそいつも向上する、と示唆された。

以下，第2章では先行研究について記述する．第3章では再分析および個人別分析について述べる．第4章では個人を同定して行った複数の条件とその分析について述べる．最後に第5章ではむすびを述べる．

第2章 先行研究

2.1 概略

当研究室の先行研究 [10][11][12] では、実験において遅延が道具の操作成績に与える影響を調査した。わずかな遅延は道具の操作成績の向上に寄与するという仮説を立て、検証を行った。実験では、実験参加者による入力デバイスの操作と画面上の操作と連動する対象物の提示との間に遅延をもうけて様々な条件下で調査した。

2.2 実験システム

様々な条件を設定して複数の実験を行った実験システムの詳細を述べる。実験システムを通して、わずかな遅延が道具の操作成績に与える影響を調査するために、実験参加者に道具を使って対象物を操作するタスクを行ってもらう。タスクで使用する入力デバイスは3次元力覚入出力デバイス (Geomagic Phantom Omni) (図 2.1) である。PC と 22 インチ液晶ディスプレイを使用する。参加者は PHANTOM を操作し、そのペン型の把持部分と連動した画面上のマジックハンドを操作する (図 2.2)。そして、対象物のある台から別の台へと移動させる。対象物の運動は、参加者が対象物を台から台へ移動させる過渡状態 (図 2.3) と次の過渡状態に備える準備状態 (図 2.4) に分けられる。準備状態に関して、参加者は PHANTOM の把持部を移動させ、画面上の対象物を片方の台の上に乗せる。対象物が台の上に置かれると、システムは対象物の位置が台の中心に一致するようにペン型把持部を通じて実験参加者の手に対し力覚フィードバックを提示する。この際、システムは台の上に蓋を描画し 3 秒間のカウントダウンを画面中央に表示することで、参加者に準備状態であることを提示する。カウントダウンが終了すると過渡状態に移行する。参加者が対象物を別の台に乗せると過渡状態が終了し、準備状態に移行する。この実験の実施中、PHANTOM と画面上のマジックハンドとの間には遅延をもうける。1 回の過渡状態の時間、す

なわち、1回の移動に要した時間をその遅延の長さ（遅延パターン）における操作成績として測定する。1つの実験条件における1つの遅延パターンの操作成績は1人あたり複数回測定された。複数の遅延パターンに対して実験を実施するために、各実験開始前の準備段階において、遅延パターンを都度設定可能とした。また、台同士的位置関係が固定されている場合、参加者が特定の配置に習熟してしまうことが予測されたため、台の配置を3種類に変更可能な設計とした。図2.5に台同士的位置関係を示す。ただし、台同士の距離が変化するとタスクの公平性が失われ、操作成績の評価に影響が及ぶことが懸念されたため、これらの距離は原則として一定とした（なお、一番初めに行った実験においては完全に等しいわけではなく、1つだけ距離がやや短かった。）

2.3 実験手順

実験では、入力および描画をする際の最小遅延は16ms（一番初めに行った実験においては5ms）であったが、本研究の一連の実験においてはこれらを「遅延なし（0ms）」として扱う。実験参加者が操作をするにあたり、PHANTOMを用いた実験システムに習熟することを目的として、本実験の前に遅延のない状態で最低10回の移動タスクを与えた（準備状態1回と過渡状態1回で1回の移動とする）。練習後、参加者に対して操作の習熟に関する不安の有無を問い、参加者が不安を感じる場合は習熟したと判断するまで練習を継続させた。以下の手順で実験を行った。

手順1 遅延と台の位置を設定する。

手順2 対象物操作の実験の開始を意識してもらうために、被験者に自身でPHANTOMを操作してもらい、画面中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 1試行あたり、以下のタスクを各実験によって定められた回数分行う。

3-1 3秒間のカウントダウンの間、待機してもらう。

3-2 開始の合図と同時に、台の上の対象物をもう一方の台へできるだけ早く放物線を描くように移動してもらう。



図 2.1: 使用するデバイス PHANTOM

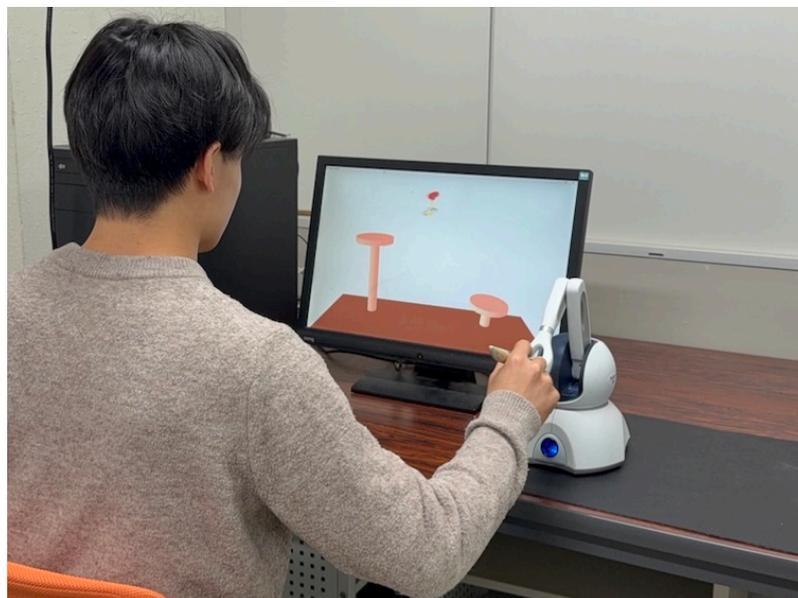


図 2.2: PHANTOM と連動したマジックハンドを操作している様子

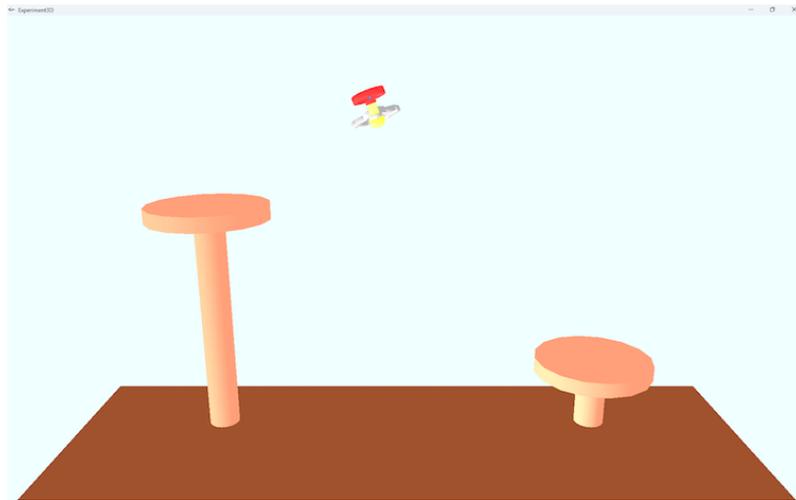


图 2.3: 实验画面, 过渡状态



图 2.4: 实验画面, 准备状态

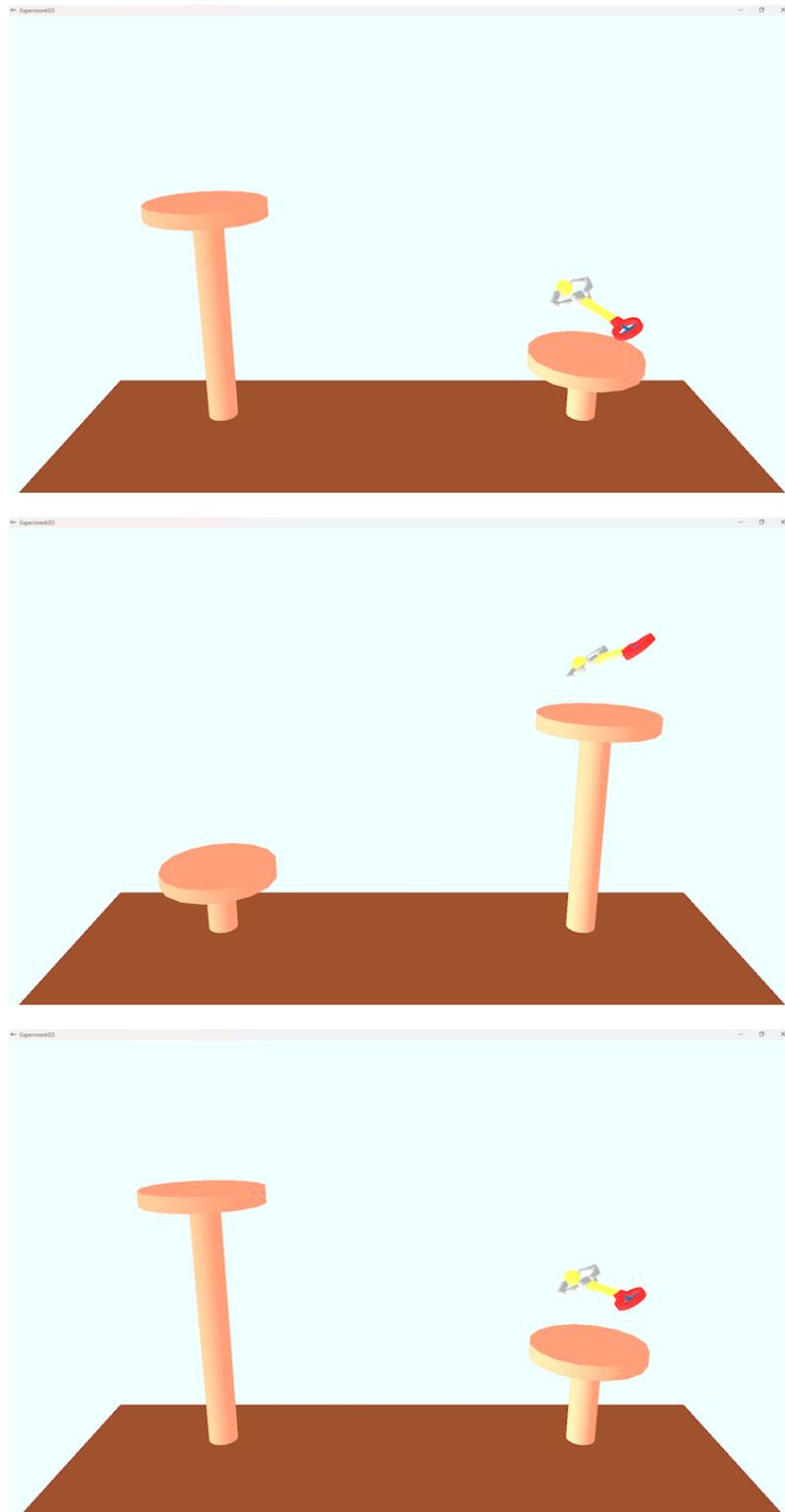


図 2.5: 台同士の位置関係 (3 種類)

遅延条件は、0ms から 450ms まで 50ms 刻みの 10 個の遅延パターンとした。1 試行は 10 回の移動タスクで構成され、各実験参加者に対して複数の遅延条件をランダムな順序で割り当てた。

2.4 実験システムの要素

本節では従来研究の実験において考慮した様々な実験システムの要素、すなわち外観やパラメータのうち、本論文で注目する要素について述べる。その後、各要素の設定の組み合わせとしての実験の具体的な条件について述べ、略称を定義する。

1. 奥行き方向の移動制限の有無

奥行き制限がある場合とない場合のどちらかを想定する。奥行き制限がある場合、ボールを掴んだマジックハンドの移動は上下左右の移動のみが可能な 2 次元鉛直平面内に限られる (図 2.6)。奥行き制限がない場合、それに加え台の奥行き分だけ前後にも移動することが可能である (図 2.7 (下)、水色の帯状の範囲)。台の奥行き分に限定されているため操作の難易度は変わらないように思えるが、変わらないのは台の上面が帯状の前後可動範囲を隙間なく占めている場合だけである。実際には台の形状が円形であり、前後移動が制限されている場合と比べると (図 2.7 (上))、奥行きの座標によりタスク達成のゴール地点の左右座標の範囲に大きな違いが生じる (図 2.7(下))。実験ではステレオ視を行なっておらず、被験者は球やマジックハンドの大きさなどから奥行きを把握する必要があった。

2. 画面上マジックハンドと入力装置の移動量の比率

実際の手の移動量と画面内のマジックハンドの移動量は等しいとは限らない。それぞれを手座標距離、画面座標距離としたとき、比率は画面座標距離/手座標距離で表される。先行研究では比率 0.78, 1.07, 1.48 の 3 つのいずれかに設定に設定した。移動量の比率が大きいと手のわずかな移動によって画面のマジックハンドは大きく動き、移動量の比率が小さければ手を大きく移動させても画面のマジックハンドは小さく動く。

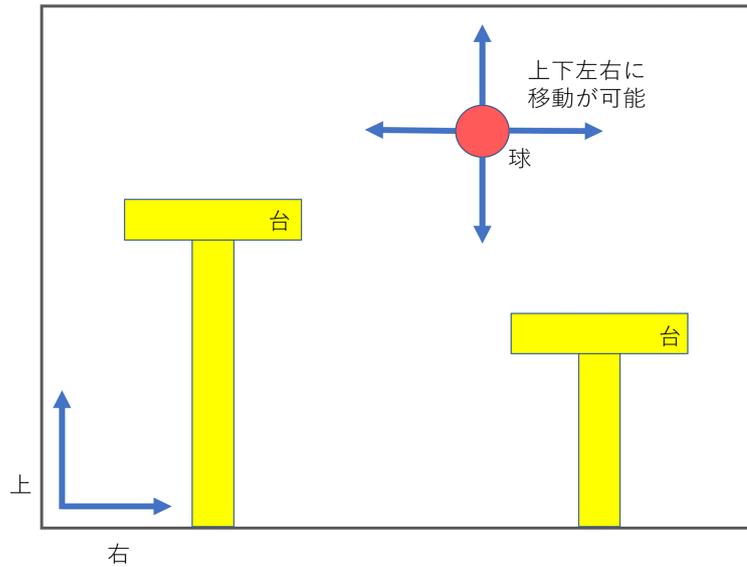


図 2.6: 実験システムの側面図

第4章では先行研究のいくつかの実験，すなわちいくつかの条件に注目する．具体的には以下の2つの要素の組み合わせにより表される4つの条件に特に注目する．

1. 奥行き方向の移動制限：あり (Restrict of depth) / なし (No restrict of depth)
2. 画面上マジックハンドと入力装置の移動量の比率：1.48 (High ratio) / 1.07 (Middle ratio) / 0.78 (Low ratio)

本論文では中間の比率を除く4つの条件をNH, RH, NL, RLと表し，文献[12]に示されるそれぞれの実験をNH-0, RH-0, NL-0, RL-0と記す．例えば，「1. 奥行き制限あり，2. 比率小」の条件である実験はRL-0と記す．それぞれの条件とその要素の設定を表2.1に示す．文献[12]ではさらに「台の大きさ」と「台の位置関係」についても調査しており，上記4条件に対して大きな台や2つの台の間隔が広い条件でも実験していた．第3章ではこれらのうち「奥行き制限なし，比率中 (1.07)，小さな台，台の位置関係が広い」条件についても言及するため，これを便宜的にNM*-0と表記する．また文献[13]では，条件RLよりもさらに小さな比率0.58に設定した実験も実施された．これを便宜的にRL'-0と表記する．

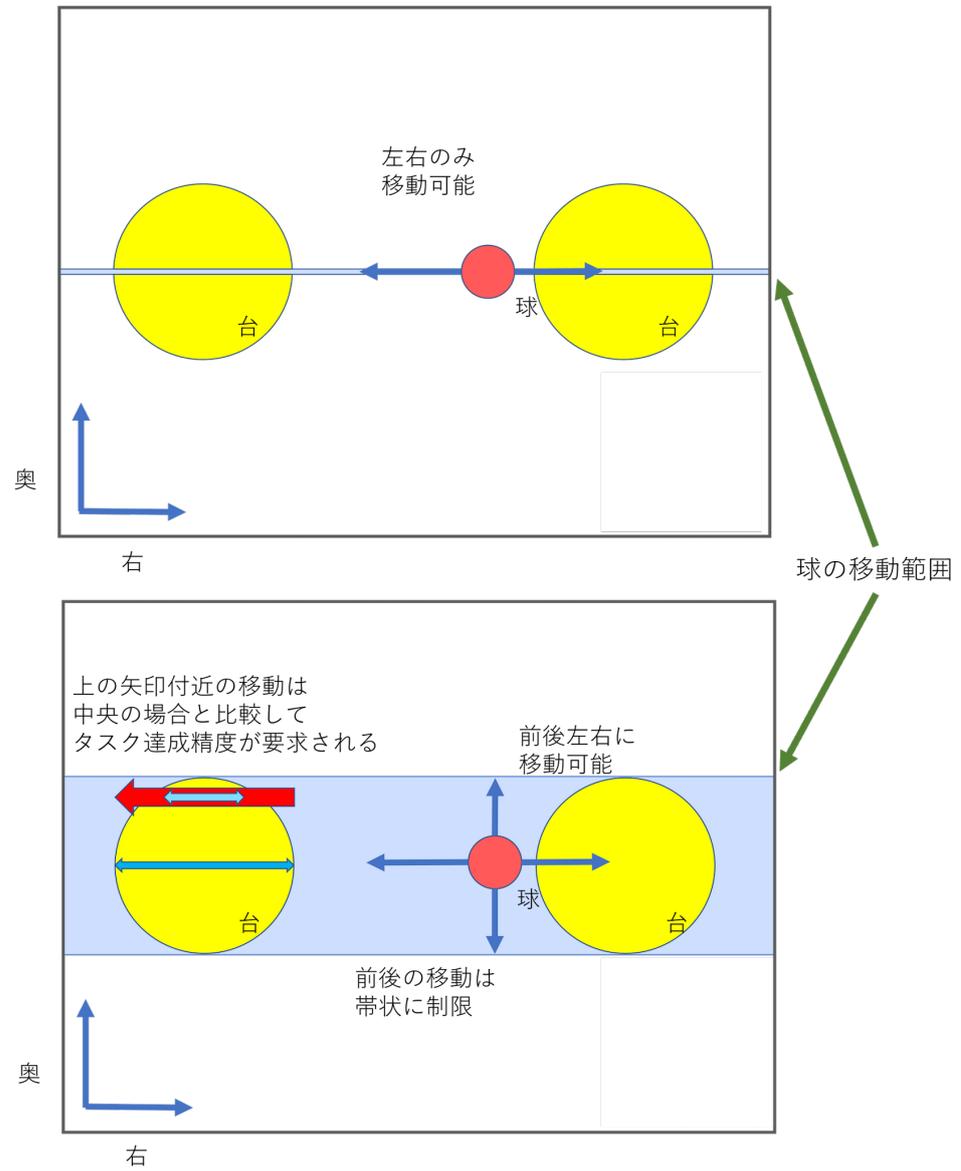


図 2.7: 移動制限のある実験システムの平面図 (上) と移動制限のない実験システムの平面図 (下)

表 2.1: 各要素の設定と条件表記

		移動量の比率	
		低い (0.78)	高い (1.48)
奥行き方向への 移動制限の有無	有り	RL	RH
	無し	NL	NH

2.5 実験結果

実験 NH-0, RH-0, NL-0, RL-0, RL'-0 の結果について記述する。実験 NH-0 では、全体でみると遅延が長くなるほど平均タスク達成時間が長くなることが分かった (図 2.8)。わずかな遅延による操作成績の向上は見られなかった。実験 RH-0 でも、全体でみると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分かった (図 2.9)。しかし、遅延の大きさが 50ms のときに操作成績の向上が見られた。マン・ホイットニーの U 検定を行ったところ、有意差は確認されなかった。実験 NL-0 でも、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分かった (図 2.10)。そして、遅延の大きさが 50ms のとき、有意差はないものの操作成績の向上が見られた。実験 RL-0 でも、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分かった (図 2.11)。しかしながら、遅延の大きさが 50ms のときに操作成績の向上が見られ、5%有意差が確認された。実験 RL'-0 でも、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分かった (図 2.12)。遅延の大きさが 50ms のときに操作成績の向上が見られ、5%有意差が確認された。

これら 5 つの実験を比較して考察する。実験 NH-0 と実験 RH-0 を比較すると、奥行き方向への移動制限がある場合に全体の平均値においてわずかな遅延により操作成績が向上するようである。また実験 NH-0 と実験 NL-0 を比較すると、移動量の比率が小さい場合に全体の平均値においてわずかな遅延により操作成績が向上するようである。奥行き方向への移動制限と移動量の比率はわずかな遅延による操作成績の向上に寄与する要素であることが示唆された。実験 RL-0 と実験 RL'-0 を比較すると、移動量の比率をさらに小さくした場合でも、わずかな遅延が操作成績の向上に寄与することが改めて示唆された。

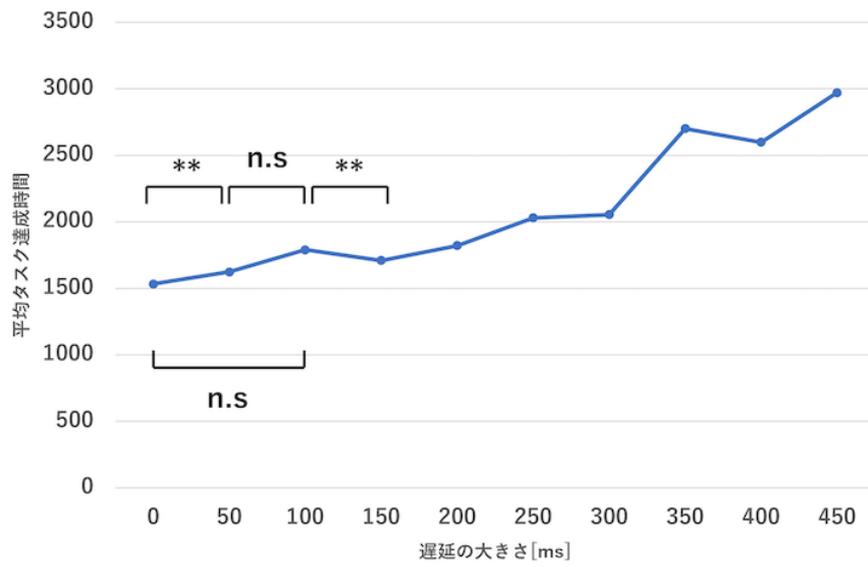


図 2.8: 実験 NH-0 の遅延の大きさの変化に対する平均タスク達成時間の遷移

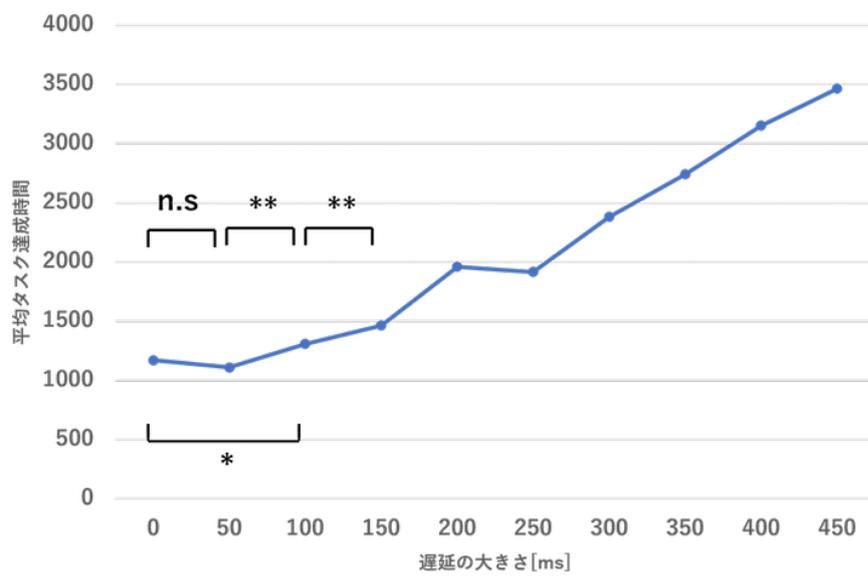


図 2.9: 実験 RH-0 の遅延の大きさの変化に対する平均タスク達成時間の遷移

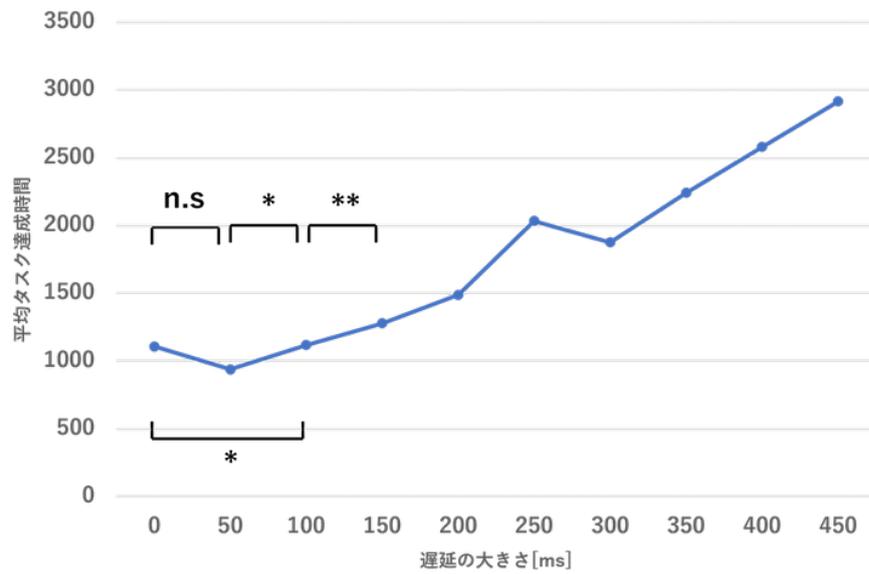


図 2.10: 実験 NL-0 の遅延の大きさの変化に対する平均タスク達成時間の遷移

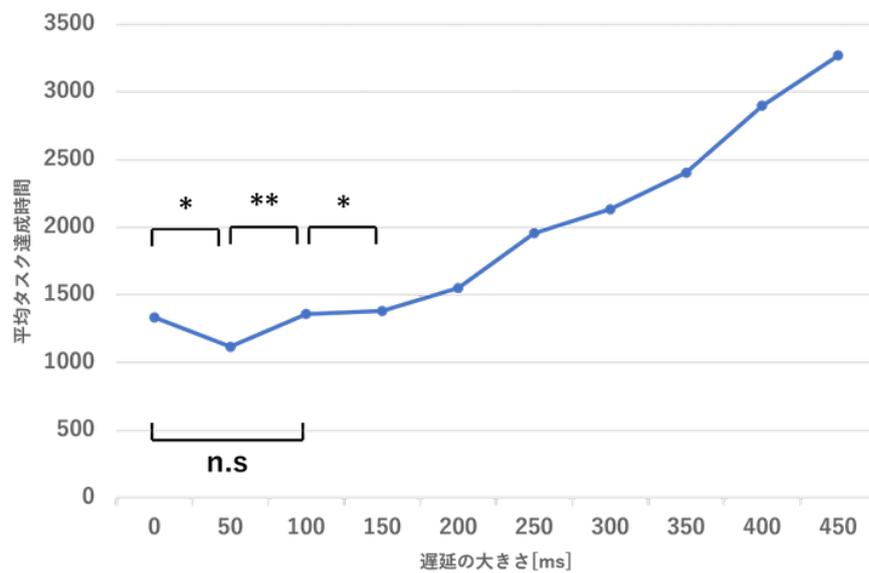


図 2.11: 実験 RL-0 の遅延の大きさの変化に対する平均タスク達成時間の遷移

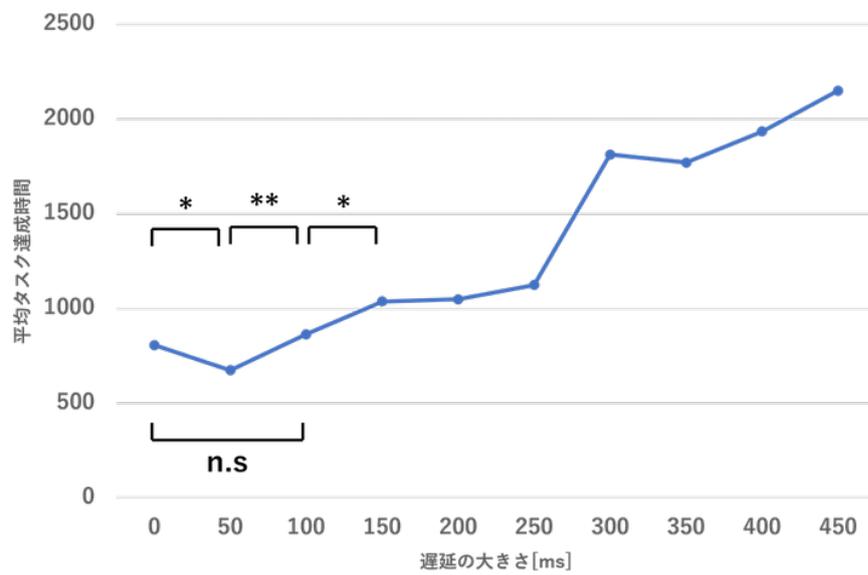


図 2.12: 実験 RL'-0 の遅延の大きさの変化に対する平均タスク達成時間の遷移

第3章 再分析

3.1 Johnson SU 分布に基づいた再分析

先行研究では，参加者 n ，遅延パターン d での，移動 i での作業時間 $t(d, n, i)$ に対して，参加者 n の遅延 d での作業時間の代表値を平均値

$$t_m(d, n) = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I t(d, n, i) = \text{mean}^{(i)}[t(d, n, i)](d, n) \quad (3.1)$$

としていた．定数 I は変数 i の数である [12]．そして，操作成績をその実験条件全体の平均値で分析していた．すなわち，全参加者の，遅延 d での作業時間の代表値を平均値

$$t_a(d) = \frac{1}{N \cdot I} \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^I t(d, n, i) = \text{mean}^{(n,i)}[t(d, n, i)](d) \quad (3.2)$$

とした．ただし， I は全ての n に対して同じであり， N は変数 n の数である．実験 RL'-0（参加者 5 人に対し，1 人あたり 10 通り全ての遅延パターンに対して各 10 回の移動，すなわち 1 試行，全遅延に対して計 10 試行割り当て）を例に，操作成績の平均値の推移を図 3.1 の青色点線で示す．先行研究では，各実験参加者，各試行の成績データは正規分布に従い，不揃いがないと仮定して平均値で比較していた．ところが，各試行の操作成績の分布を確認したところ，非対称であった（図 3.1，ヒストグラム）．これは小さなミスやためらいにより生じた可能性がある．全員の成績データの平均値に向上が見られない場合においても，一部の参加者の成績は向上している場合があるのではないかと考えた．

そこで，先行研究のデータを再分析した．具体的には，分布の歪度（非対称性）と尖度（裾の重さ）に焦点を当て，Johnson SU 分布を仮定した（図 3.1，緑色実線）．全参加者の代表値をその最頻値

$$t_a(d) = \text{modeSU}^{(n,i)}[t(d, n, i)](d) \quad (3.3)$$

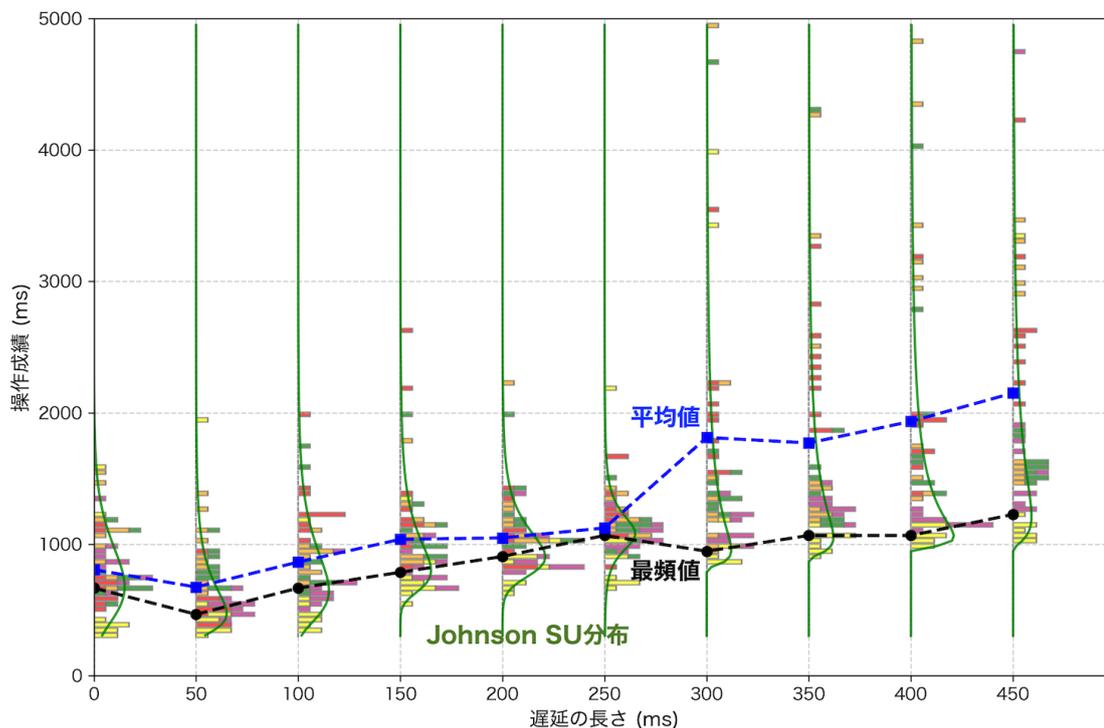


図 3.1: 実験 RL'-0 における操作成績の分布と平均値, 最頻値

とすれば, 図 3.1 の黒色点線のような操作成績の最頻値の推移が得られる. 全体の平均値において成績向上が見られない条件でも, 一部の条件では最頻値において成績向上が確認された. 具体的には実験 NH-0 (参加者 30 人のうち 1 人あたり 8 通りの遅延パターンを各 1 試行, 計 8 試行割り当て, 各遅延パターンあたりのデータ数は 240) (図 3.2 (上)), 実験 NM*-0 (参加者 17 人のうち 10 人に対し 1 人あたり 5 通りの遅延パターンを各 1 試行, 計 5 試行割り当て, 残りの 7 人に対し 1 人あたり 10 通り全ての遅延パターンを各 1 試行, 計 10 試行割り当て, 各遅延パターンあたりのデータ数は 120) (図 3.3 (上)) では最頻値において成績向上が確認された. 先行研究での分析では奥行き移動制限ありの特定の条件 RL, RL' で全体の平均値において成績向上が示唆されたが, 条件 NH, NM* はいずれも奥行き移動制限なしである. 最頻値での比較により外れ値の影響を抑えれば, 他の条件でも成績向上が確認できるかもしれない. 言い換えればミスやためらいなどによる外れ値を多く含む参加者と外れ値の少ない参加者を区別するように個人別で分析することでも成績向

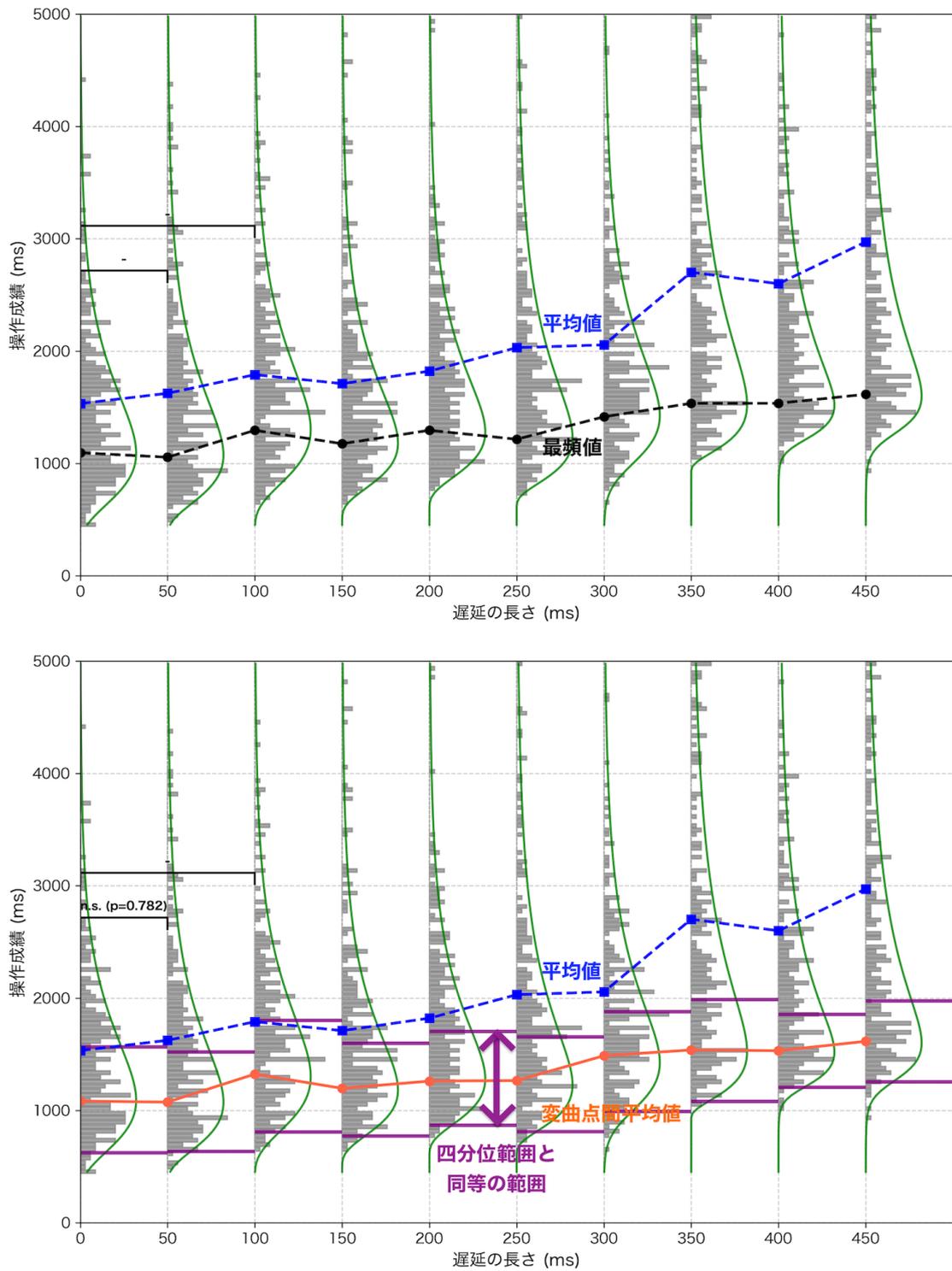


図 3.2: 実験 NH-0 の最頻値 (上), 変曲点 (紫色のバー) と変曲点間平均値 (下)

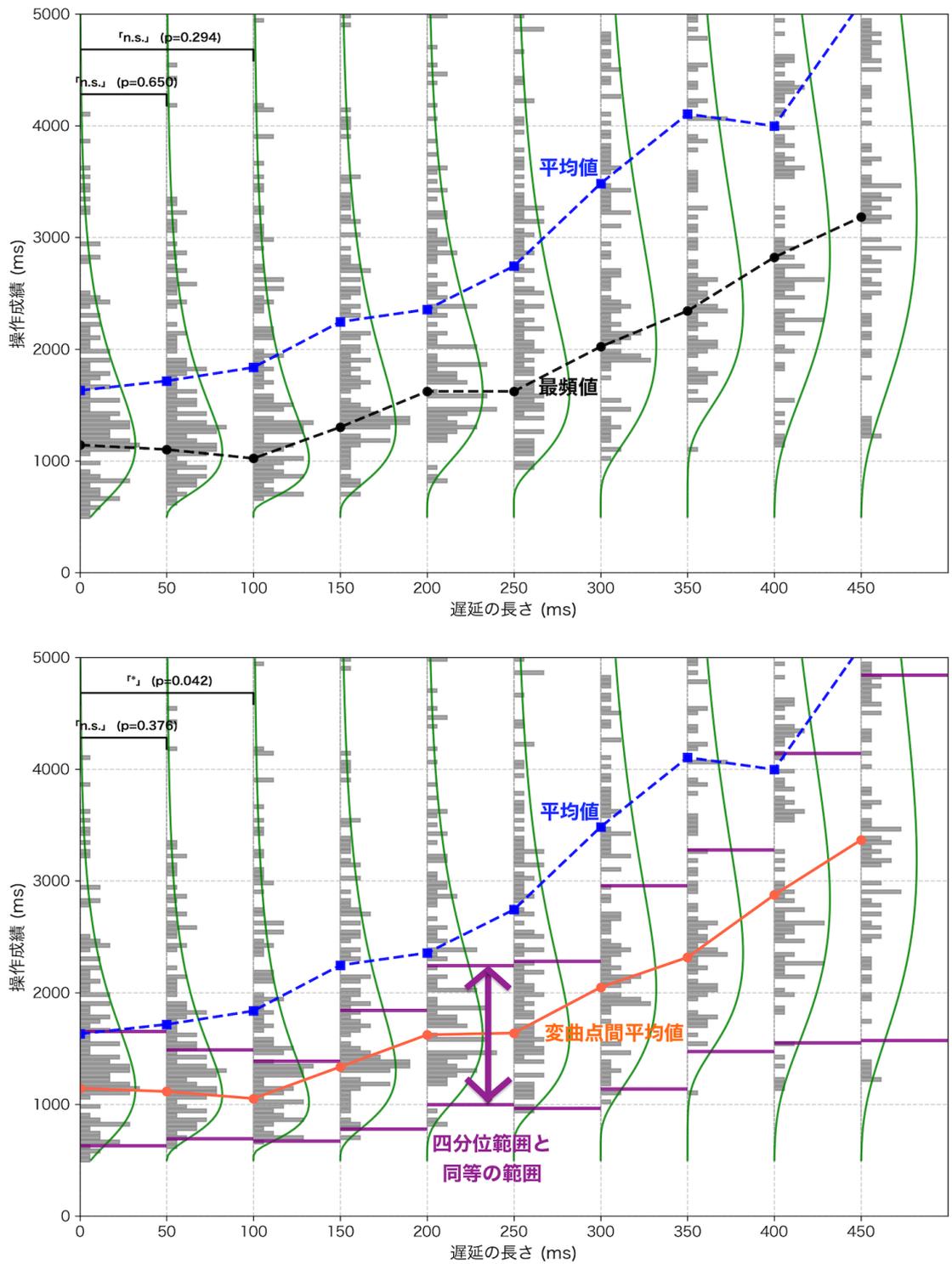


図 3.3: 実験 NM*-0 の最頻値 (上), 変曲点 (紫色のバー) と変曲点間平均値 (下)

上が確認できるかもしれない。

より積極的に外れ値を除いたデータについて分析する。具体的には、正規分布に従うデータであれば四分位範囲内のデータのみを比較対象としたい。四分位数は平均 (μ) \pm 標準偏差 (σ) であり、変曲点でもある。そこで、Johnson SU 分布の曲線の2つの変曲点の間のデータを対象とし、平均値を調査した。NH-0 においては、全体の平均値で成績向上が見られなかったが (図 3.2 (上))、変曲点間の平均値において成績向上が確認された (図 3.2 (下), 0ms vs 50ms)。さらに、NM*-0 においては、全体の平均値で成績向上が見られなかったが (図 3.3 (上))、変曲点間の平均値において $p = 0.0421$ の有意な成績向上が確認された (図 3.3 (下), 0ms vs 100ms)。先行研究では成績向上が確認できなかつたいくつかの条件においても成績向上が見られ、一部の条件においては有意な成績向上が確認された。参加者別で分析する必要があるようだ。

3.2 特定の条件における個人別の再分析

先行研究では、作業時間の代表値を平均値としていた。参加者ごとにヒストグラムを色分けして確認したところ、人により分布が良い操作成績や悪い操作成績に偏っていた (図 3.1, 実験 RL'-0 の例)。平均値に向上が見られる場合においても、わずかな遅延により成績向上する人とまたそもそも成績向上しない人が存在するのではないかと考えた。そこで、個人ごとのデータにも着目して成績向上を確認するために個人別に分析する。なお先行研究では個人別での分析を考慮しておらず、多くの条件の実験では遅延パターンを横断した個人の特定を想定してデータを記録していなかった。また、条件を横断した分析も想定しておらず、そもそも実験ごとに参加者を募っていた。遅延パターン d , 参加者 n ごとに標準化して参加者ごとのデータに対して検定したところ、全ての参加者で正規性は棄却された ($p < 0.001$)。そこで各参加者の代表値を中央値

$$t_m(d, n) = \text{median}^{(i)}[t(d, n, i)](d, n) \quad (3.4)$$

とする。その上で、各参加者の絶対的な成績をもとに全参加者の傾向を見るのではなく、遅延のない条件を基準に各参加者がどのように遅延の影響を受けたのか調べる。

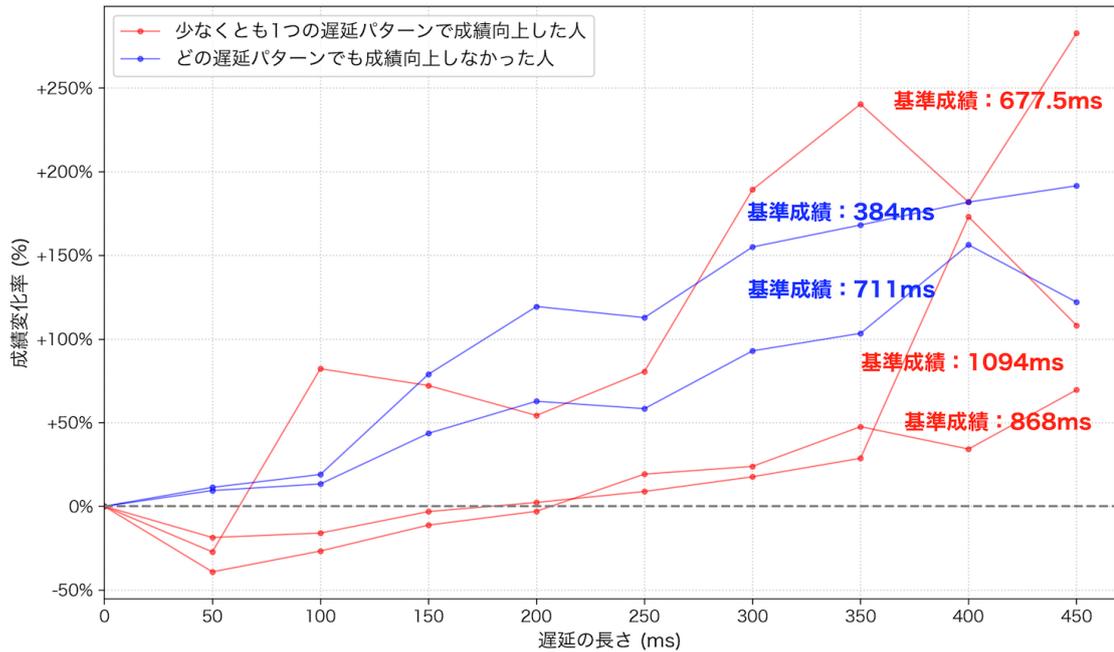


図 3.4: 実験 RL'-0 における基準成績に対する操作成績の比の推移

具体的には、各遅延パターン d 、参加者 n に対する代表値 $t_m(d, n)$ の基準 $t_m(0, n)$ からの変化率

$$r(d, n) = \frac{t_m(d, n) - t_m(0, n)}{t_m(0, n)} \quad (3.5)$$

に注目した。なお、成績の変化率は符号付きで扱い、負の値が作業時間の減少、すなわち成績向上を表し、正の値は作業時間の増加を表す。図 3.1 における各参加者の比の推移を基準 $t_m(0, n)$ とともに図 3.4 に示す。参加者をわずかな遅延により、少なくとも 1 つの遅延パターンで成績向上した人（赤い実線）と、どの遅延パターンでも成績向上しなかった人（青い実線）の 2 つのグループに分けた。各参加者の基準成績からの変化率を遅延パターン d ごとに標準化して、全参加者のデータに対してシャピロウィルク検定を行ったところ、正規性は棄却された ($p = 0.0405$)。マン・ホイットニーの U 検定を適用したところ、両群の傾向には有意な差が見られた ($p = 0.0426$)。基準成績が 667.5ms の参加者は外れ値の可能性もあるが、わずかな遅延により成績向上する人とまたそもそも成績向上しない人がいる可能性が示唆された。

第4章 複数条件を横断した実験および分析

4.1 追加実験

前章の再分析では条件 RL' において、遅延により道具操作の成績が向上する人とそもそも成績が向上しない人に分かれる、すなわち「成績向上グループ」と「成績非向上グループ」に分かれる可能性が示唆された。先行研究での平均値による分析では、条件 RL と RL' において有意な成績向上が確認され、2.5 節で述べた通り、奥行き方向への移動制限と移動量の比率はわずかな遅延による操作成績の向上に寄与する要素であることが示唆された。そこで条件 RL を中心に比較条件 NH, RH, NL を加えた 4 条件に対して追加実験 NH-1, RH-1, NL-1, RL-1 を行った。このとき、遅延パターンを横断して個人を特定できるように成績データを参加者識別子とともに記録した。また、条件を横断した分析も想定して、参加者には 4 実験全てに参加してもらった。参加者の身体的負担および時間的制約を考慮し、遅延パターンを成績向上が見られる可能性の高い 200ms 以下の 5 つ (0, 50, 100, 150, 200 ms) に限定した。実験参加者は 21 人であり、各参加者に各条件あたり 5 通りの遅延パターンを各 10 回の移動、すなわち 1 試行、全遅延に対して 5 試行、よって 4 条件全体で 20 試行割り当てた。

4.2 分析

4.2.1 4 条件を横断したグループ分け

各参加者が 4 つの実験に対して成績向上した実験数を数える。各実験において 1 つ以上の遅延パターンで成績向上が見られた場合にその参加者はその実験において成績向上したとみなす。参加者 n に対して、成績向上した実験数を C_n と表す。図 4.1 に成績向上した実験数 (C_n) の分布を示す。過半数 ($C_n > 2$) を成績向上グループ、半数未満 ($C_n < 2$) を成績非向上グループと考えると $C_n = 2$ がいずれにも含まれ

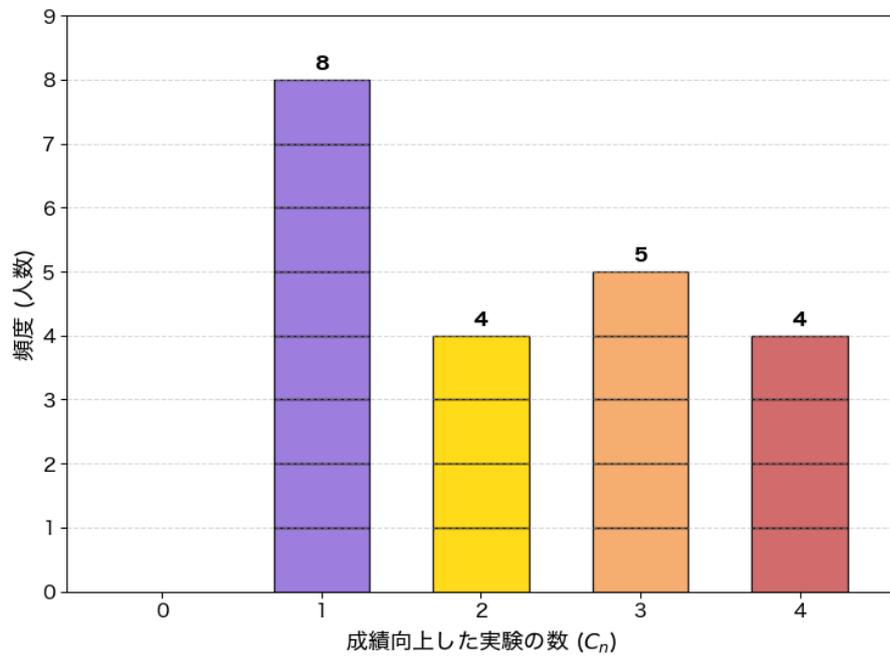


図 4.1: 成績向上数の分布

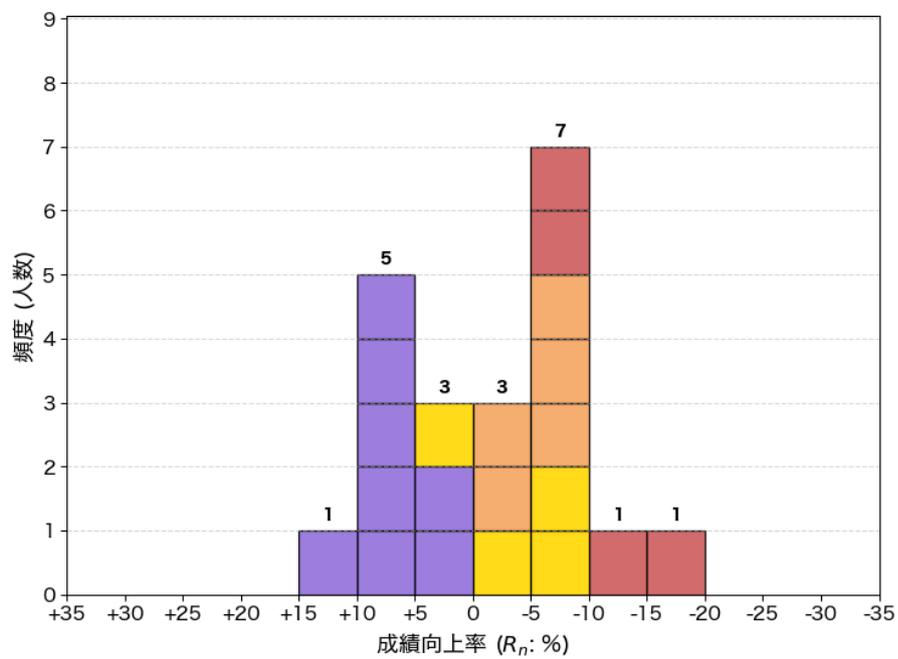


図 4.2: 成績向上率の分布

ない。また、ある遅延パターンにおいてわずかに向上した場合と、大きく向上した場合のどちらとも同じ成績向上と扱っている。

そこで各参加者の4つの実験全てに対する成績の向上率に注目する。まず各参加者の各実験での成績向上率を、全ての遅延パターンに対して最も成績が向上した遅延での向上率とする。すなわち実験 e において、参加者 n に対する基準成績（遅延パターン 0ms での成績）からの変化率 $r(d, n, e)$ の最小値とする。成績の変化率は符号付きで扱い、負の値のうちより小さな値が成績の大きな向上を表し、正の値は作業時間の増加を表す。

$$r_m(n, e) = \min^{(d)}[r(d, n, e)](n, e) \quad (4.1)$$

その上で参加者 n の全ての実験に対する成績向上率 R_n を算出する。

$$R_n = \frac{1}{\text{num}(E)} \sum_{e \in E} r_m(n, e) \quad (4.2)$$

ここで、 E は前述の4つの実験である。表 4.1 に実験 1 の参加者の各実験基準成績と平均値を示す。4つの実験の平均値の昇順でソートされている。どの実験参加者も4つの実験それぞれにおいて基準成績の大小がおおよそ同じ傾向であることが確認できる。

図 4.2 に成績向上率 (R_n) の分布を示す。グラフの色分けは図 4.1 での向上数別の参加者が図 4.2 の向上率別でどの階級に属するか示している。平均的に成績が向上した $R_n < 0$ の参加者を成績向上グループ、向上しなかった $R_n \geq 0$ の参加者を成績非向上グループとする。成績向上グループには向上数 2 以上の参加者が含まれ、非向上グループには 2 以下の参加者が含まれる。すなわち向上グループに分類されていても、いくつかの実験では向上していない。

そこでこのグループ分けの妥当性を調べる。図 4.3 にグループ分けの正答率を示す。成績向上グループに属し当該実験において成績が向上した人の割合を赤色の棒グラフで、成績非向上グループに属し当該実験において成績が非向上であった人の割合を青色の棒グラフで示している。全体の平均正答率は 75% であった。実験 RL-1 は他と比べて低い正答率（平均 57.1%）だった。条件 RL と他の条件は同等に扱うべきではないのかもしれない。

表 4.1: 実験参加者の各実験基準成績と各平均値 (ms)

参加者番号	NH-1	RH-1	NL-1	RL-1	平均値
15	452.5	394.0	344.5	561.5	438.1
7	544.0	486.0	420.0	352.5	450.6
17	761.0	561.5	611.0	686.5	655.0
5	661.5	661.0	703.0	736.0	690.4
2	611.0	711.0	762.0	702.5	696.6
1	719.5	719.5	703.0	645.0	696.8
18	735.5	686.0	860.5	701.5	745.9
8	720.5	878.0	819.5	719.0	784.3
11	770.0	994.0	812.0	737.0	828.3
9	844.5	812.0	752.5	920.5	832.4
13	919.5	978.0	927.5	661.5	871.6
12	986.5	978.0	936.5	794.5	923.9
10	1112.0	919.5	803.5	870.0	926.3
19	953.0	1077.5	828.0	861.0	929.9
14	945.0	969.5	928.5	1020.0	965.8
3	837.5	952.5	1178.5	1045.5	1003.5
20	919.5	1153.0	961.5	1004.5	1009.6
6	1020.0	970.0	969.0	1095.0	1013.5
4	1378.0	1145.0	1102.5	1087.0	1178.1
21	1328.5	1420.0	1412.0	1186.5	1336.8
16	1945.0	1912.5	1303.5	1703.5	1716.1

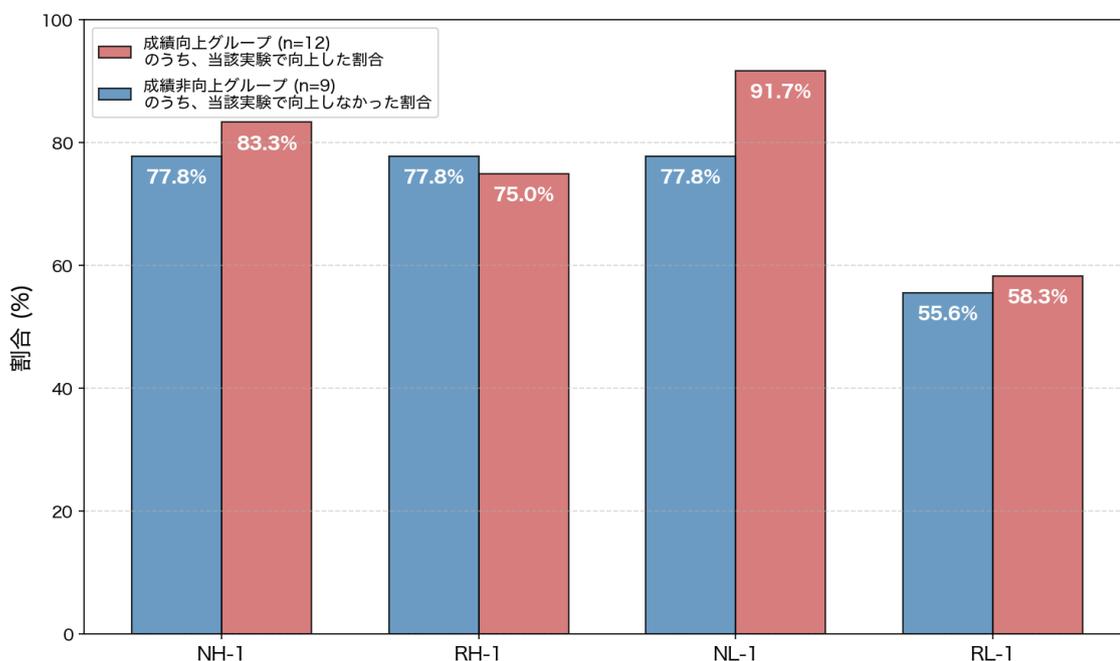


図 4.3: 各実験における成績向上/非向上のグループ別正答率

表 4.2: 実験 1,2 参加者 11 人の各実験基準成績と各平均値 (ms)

参加者 番号	実験 1 平均	NH-1	NH-2	RH-1	RH-2	NL-1	NL-2	RL-1	RL-2	実験 2 平均
7	450.6	544.0	403.0	486.0	385.5	420.0	386.0	352.5	352.0	381.6
18	745.9	735.5	694.5	686.0	752.5	860.5	611.0	701.5	819.5	719.4
8	784.3	720.5	770.0	878.0	628.0	819.5	586.0	719.0	786.5	692.6
11	828.3	770.0	802.0	994.0	719.5	812.0	719.5	737.0	853.0	773.5
9	832.4	844.5	878.0	812.0	619.0	752.5	878.0	920.5	694.5	767.4
12	923.9	986.5	628.0	978.0	753.5	936.5	711.0	794.5	610.0	675.6
19	929.9	953.0	735.0	1077.5	711.5	828.0	669.5	861.0	636.0	688.0
14	965.8	945.0	1094.5	969.5	1037.0	928.5	995.0	1020.0	1028.5	1038.8
3	1003.5	837.5	894.0	952.5	911.5	1178.5	928.0	1045.5	794.5	882.0
4	1178.1	1378.0	1027.5	1145.0	1136.5	1102.5	1111.5	1087.0	1053.0	1082.1
16	1716.1	1945.0	1295.0	1912.5	1402.5	1303.5	1386.5	1703.5	1462.0	1386.5

4.2.2 3条件を横断したグループ分け

前節と同様に、条件 RL を除いた残りの 3 条件 NH, RH, NL の実験を対象に改めてグループ分けする。成績向上数が過半数 ($C_n > 2$) を成績向上グループ、半数未満 ($C_n \leq 1$) を成績非向上グループと考えた場合 (図 4.4) と、成績向上率が $R_n < 0$ を成績向上グループ、 $R_n \geq 0$ を成績非向上グループと考えた場合 (図 4.5) では、1 人だけ $C_n \leq 1$ (非向上) かつ $R_n < 0$ (向上) (図 4.5, $0\% \geq V_n > -5\%$ の階級に該当) と異なっていた。また、4 実験でのグループ分けでは向上率に基づく向上人数は 12 人で、3 実験でのグループ分けでは 11 人であった。前節同様に向上率によるグループ分けの妥当性を調べる。図 4.6 にグループ分けの正答率を示す。全体の平均正答率は 82.5% であり、より高い正答率でのグループ分けができた。

特定の実験におけるグループ分けが、同じ条件での別の実験でも妥当かどうか調べる。前述の 4 つの実験 (実験 1) に参加してもらった 21 人のうち無作為 (ただし、向上グループ、非向上グループの人数の偏りが少なくなるような調整を行った) に選んだ実験参加者 11 人に、改めて同じ 4 つの条件の実験 (実験 2) に参加してもらった。これらの追加実験をそれぞれ実験 NH-2, RH-2, NL-2, RL-2 とする。実験参加者 11 人は 4 実験でのグループ分けと 3 実験でのグループ分けいずれにおいても、成績向上、非向上同じグループに属しており、向上グループは 7 人、非向上グループは 4 人であった。表 4.2 に実験 1, 2 参加者 11 人の各実験基準成績と各平均値を示す。実験 1 平均の昇順でソートされている。どの実験参加者も同じ条件において基準成績の大小がおおよそ同じ傾向であることが確認できる。実験 1 において分類されたグ

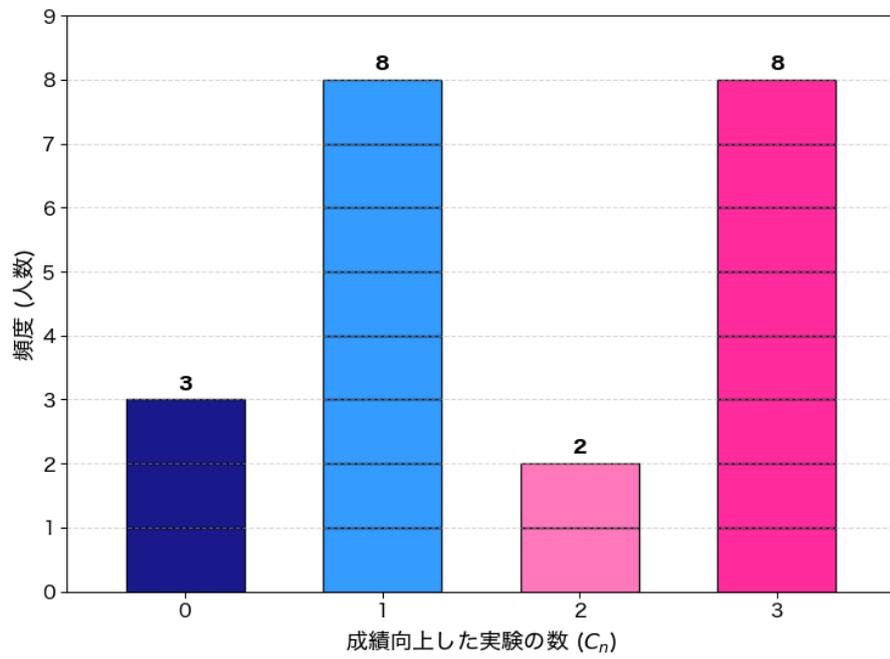


図 4.4: 成績向上数の分布 (3 実験)

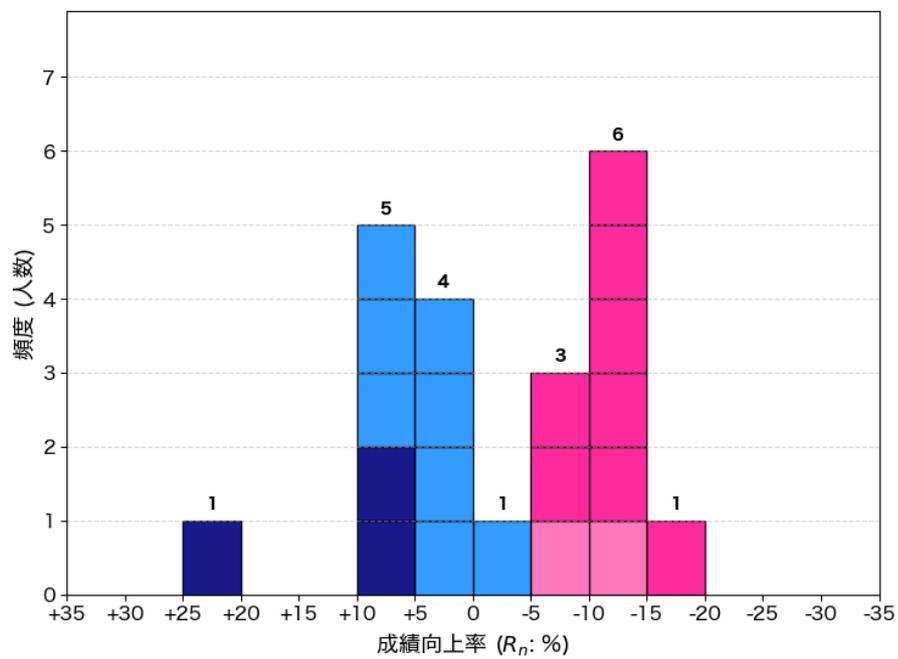


図 4.5: 成績向上率の分布 (3 実験)

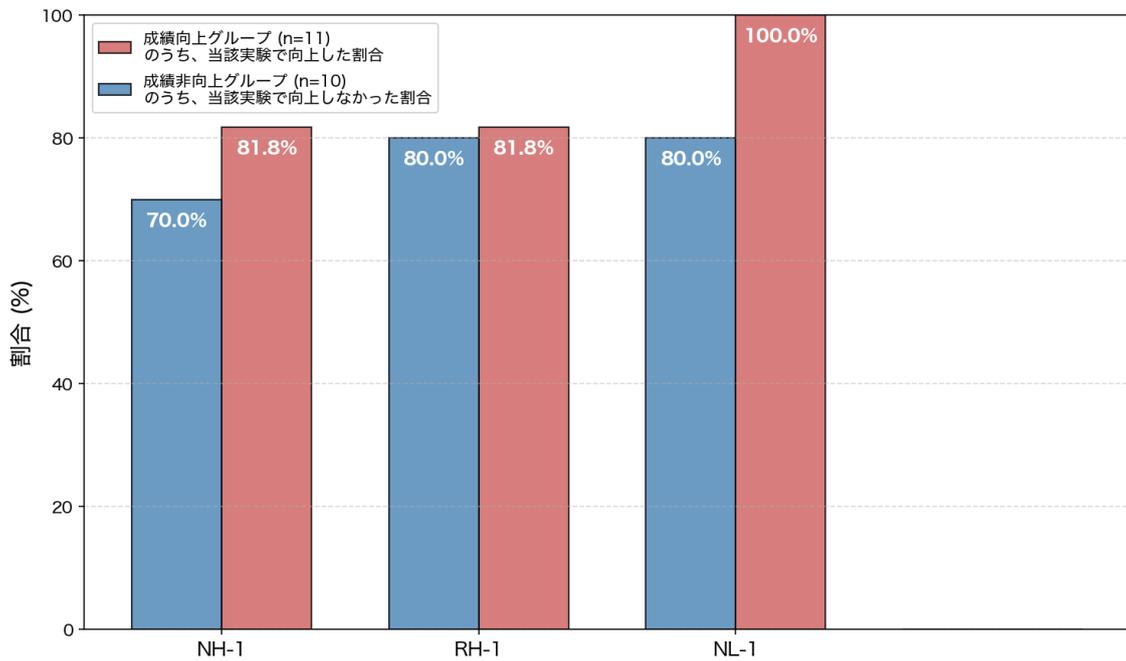


図 4.6: 各実験における成績向上/非向上のグループ別正答率 (3 実験)

グループに基づいた、実験2のそれぞれの実験の成績向上/非向上のグループ別正答率を図4.7に示す。全体の正答率は54.5%と大幅に低下した。実験NH-2, RH-2, NL-2に限定した平均正答率も57.6%と低かった。条件RLと他の条件は同等に扱うべきではないのかもしれないが、条件NH, RH, NLに対するグループ分けは再現性がなかった、すなわち妥当ではなかった。

4.2.3 条件RLにおけるグループ分け

条件を横断してのグループ分けを試みた結果から、条件RLは他の3条件と同等に扱うべきではないと考えた。先行研究においても、条件RLだけ他と異なり有意な成績向上が確認できた。そこで3.2節の実験RL'-0の分析と同様に実験RL-1単独に対して、少なくとも1つの遅延パターンで成績向上した人(成績向上グループ)と、どの遅延パターンでも成績向上しなかった人(成績非向上グループ)の2つのグループに分けた。実験RL-1のみでのグループ分けに基づいた、実験RL-2のグループ別正答率を図4.8に示す。向上/非向上の両グループの平均正答率は72.7%と再現性が高かった。条件RLに限定したグループ分けの方が妥当であると示唆された。すな

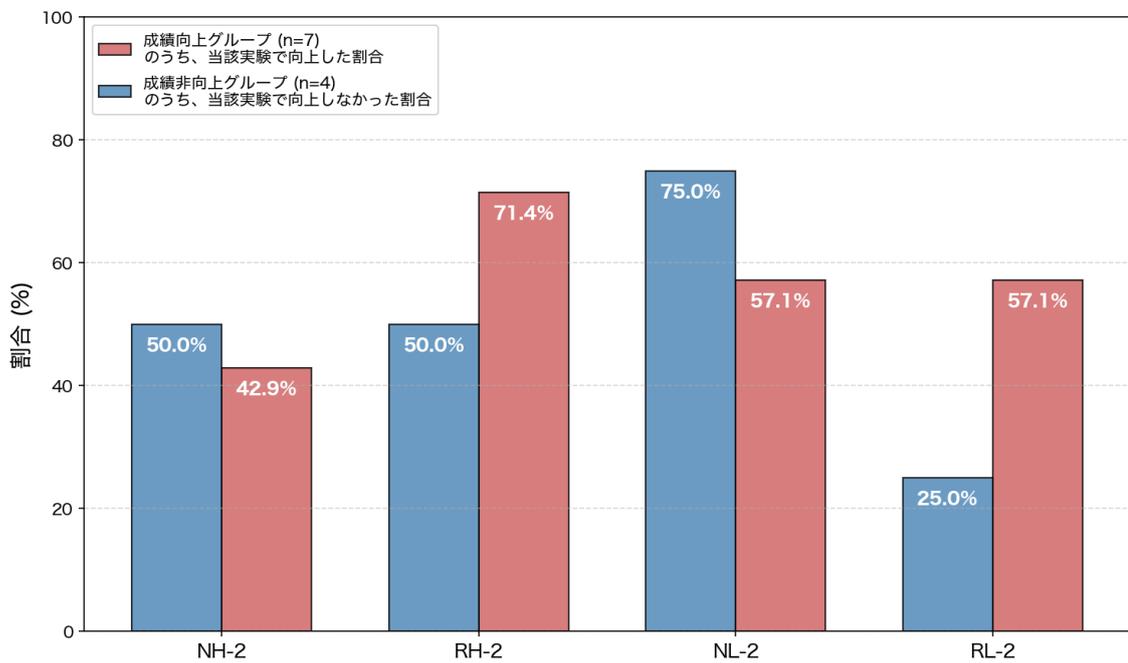


図 4.7: 実験 1 での成績向上/非向上のグループ分けに対する実験 2 の正答率

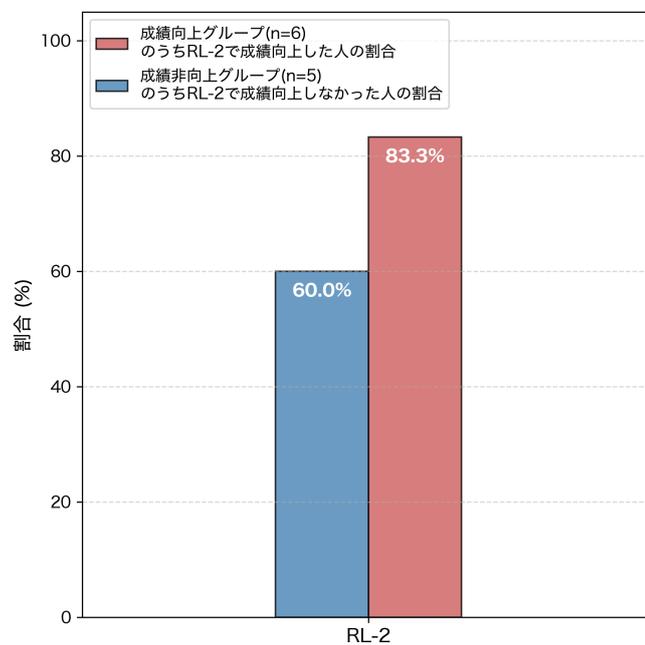


図 4.8: 実験 1 での成績向上/非向上のグループ分けに対する実験 2 の正答率 (条件 RL)

わち条件 RL においては，成績の向上するグループと向上しないグループに分けることができ，成績が向上する人はおおよそいつも向上する，と示唆された。

奥行き移動の制限あり，かつ，画面上と実際の手の移動量の比率が小さい条件を満たす条件においては，向上する人と向上しない人にグループ分けできるだろう．有意な成績向上が見られた実験の条件は向上する人と向上しない人に再現性のあるグループ分けができそうだが，有意な成績向上の見られていない実験の条件は再現性のあるグループ分けができなさそうである．すなわち，全条件で常に向上する人がいるという仮説は棄却されたが，偶発的に向上する人はいそうだとということが示唆された．一方で有意な成績向上の見られた一部の条件においては，成績が向上する人はおおよそいつも向上する，と示唆された。

第5章 むすび

当研究室では、わずかな遅延が道具の操作成績に与える影響について調査するために、VRシステムを用いた実験を行い、分析している。先行研究では、わずかな遅延は道具の操作成績の向上に寄与するという仮説を立て検証を行った。特定の条件下での実験において有意な成績向上が見られたが、一方で成績向上の確認できない条件も見られた。具体的には、奥行き移動を制限し、かつ画面上と実際の手の移動量の比率が小さい条件で、わずかな遅延による有意な成績向上が確認できた。本研究では、成績の向上するグループと向上しないグループに分けることができ、成績が向上する人はおおよそいつも向上する、との仮説を立てた。まず成績データの再分析を行った。Johnson SU分布を仮定した最頻値による比較、および外れ値を除去した平均値の比較を行った。その結果、平均値による分析では成績向上が確認されなかった条件においても有意な成績向上が確認された。さらに、個人別での分析により、わずかな遅延により成績向上しやすい人とそもそも成績向上しない人に分けられる可能性が示唆された。続いて新たに実験を実施して条件横断的に分析を行った。その結果、成績の向上するグループと向上しないグループに分けることはできそうであったが、同じ人に再び作業してもらったところ、成績が向上する人はおおよそいつも向上する、とは言えなかった。すなわち、いつも常に向上する人がいるという仮説は棄却されたが、偶発的に向上したりしなかったりするらしいこともわかった。一方で有意な成績向上の確認できる一部の条件に限定すれば、成績が向上する人はおおよそいつも向上する、と示唆された。

本研究では、50ms間隔で設定した遅延が操作成績に与える影響を調査した。今後は、遅延間隔をより細かく設定することで、本研究では捉えきれなかった遅延の長さについても調査を進めたい。具体的には、これまでの実験データの平均値において成績向上が見られない条件においても、操作成績の向上率が最大となる鋭いピー

クが特定の遅延の長さに存在する可能性を調査していきたい。本研究の知見やさらなる研究の結果に基づいて、システムのパラメータと遅延を適切に設計・制御すれば、ユーザの操作性を向上させるインタフェースを実現することができるだろう。

謝辞

本研究を進めるにあたって、日頃から多大なご尽力を頂き、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、本研究は近畿大学との共同研究の一部であり、研究の機会を与えてくださった近畿大学の谷田公二様に深く感謝致します。最後に、本研究に多大なご協力頂きました舟橋研究室諸氏に心から感謝致します。

参考文献

- [1] O. Bau, I. Poupyrev, A. Israr and C. Harrison, “TeslaTouch: electrovibration for touch surfaces,” In Proceedings of the 23rd annual ACM symposium on User interface software and technology, pp.283–292, 2010.
- [2] A. Lécuyer, S. Coquillart, A. Kheddar, P. Richard and P. Coiffet, “TeslaTouch: electrovibration for touch Pseudo-haptic feedback: can isometric input devices simulate force feedback?,” In Proceedings IEEE Virtual Reality 2000, pp.83–90, 2000.
- [3] 日本バーチャルリアリティ学会 編, 館暲, 佐藤誠, 廣瀬通孝 監修, “バーチャルリアリティ学”, コロナ社, 2011.
- [4] C. Stephanidis, G. Salvendy, M. Antona, J. Chen, J. Dong, et al., “Seven HCI Grand Challenges,” International Journal of Human–Computer Interaction, Vol.35, No.14, pp.1229–1269, 2019.
- [5] T. Waltemate, I. Senna, F. Hülsmann, M. Rohde, S. Kopp, M. Ernst and M. Botsch, “The Impact of Latency on Perceptual Judgments and Motor Performance in Closed-Loop Interaction in Virtual Reality,” The 22nd ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology, pp.27–35, 2016.
- [6] H. Tochioka, H. Ikeda, T. Hayakawa and M. Ishikawa, “Effects of latency in visual feedback on human performance of path-steering tasks,” Proceedings of the 25th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology, Article No.65, 2019.
- [7] 渡辺洋史, 田中健治, 藤岡陽一, 國分弥則, 山口俊, “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.

- [8] C. Farrer, G. Valentin and J. M. Hupe, “The time windows of the sense of agency,” *Consciousness and Cognition*, Vol.22, No.4, pp.1431–1441, 2013.
- [9] リチャード・ウィリアムズ (著), 郷司揚子 (訳), アニメーターズサバイバルキット, グラフィック社, p.310, 2004.
- [10] R. Akimoto, M. Miyaji, K. Funahashi, K. Tanida and S. Mizuno, “Positive effect of slight delay for operational performance,” 2021 IEEE 10th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE 2021), pp.162–166, 2021.
- [11] Y. Miwa, K. Funahashi, K. Tanida and S. Mizuno, “Positive effect of slight delay and task conditions for operational performance,” 2023 IEEE 12th Global Conference on Consumer Electronics, pp.460–464, 2023.
- [12] Y. Miwa, K. Funahashi, K. Tanida and S. Mizuno, “Effects of moving task condition on improving operational performance with slight delay,” *Proceedings of the 2024 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces Abstracts and Workshops*, pp.903–904, 2024.
- [13] 三輪陽雲, “わずかな遅延が道具操作の成績向上に与える影響と操作タスクの違いの関係”, 名古屋工業大学大学院修士論文, 2023.

発表論文リスト

1. 高寺昭至, 舟橋健司, 谷田公二, 水野慎士, “自動運転車開発に向けた右折運転行動における心理的側面の解析”, 第29回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 2D2-05, 2024.
2. S. Takatera, K. Funahashi, K. Tanida and S. Mizuno, “Psychological Analysis of Right-Turn Driving Behavior for Development of Autonomous Vehicles,” 2024 Joint 13th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems and 25th International Symposium on Advanced Intelligent Systems (SCIS&ISIS2024), pp.M-3-H-5, 2024.
3. 高寺昭至, 舟橋健司, 谷田公二, 水野慎士, “わずかな遅延が単純な道具操作の成績に与える好影響の個人別の分析”, NICOGRAPH2025 講演論文集, pp.P09:1-P09:2, 2025.