2023 年度 修士論文

論文題目
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
(Relation of moving task condition on operation performance improvement with slight delay)

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 工学専攻創造工学プログラム
2022 年度入学 34416088 番

三輪 陽雲

目 次

第 1 章　はじめに **1**

第 2 章　動画先行の原則と人間の知覚 **4**
2.1　はじめに 4
2.2　意識の中の時間 4
2.3　映像と音の同期 5
2.4　道具操作への適用 7

第 3 章　先行実験 **8**
3.1　はじめに 8
3.2　実験システム 8
3.3　実験の手順 13
3.4　実験結果 16

第 4 章　実験システムの要素 **22**
4.1　はじめに 22
4.2　操作量 23
4.2.1　奥行き方向の移動制限の有無 23
4.2.2　画面上マジックハンドと入力装置の移動量の比率 23
4.3　台 24
4.3.1　台の大きさ 24
4.3.2　台の位置関係 25
4.4　表示サイズ 26
4.4.1　モニタサイズ 26
4.4.2　ウィンドウサイズ 26
4.5　奥行き感 26
4.5.1　視線の俯角 26
4.5.2　床面の見え方 27
4.6　見栄え 27

第 5 章　操作タスクの難度に関わる要素の影響 **28**
5.1　はじめに 28
5.2　操作量に関する実験 28
5.2.1　実験の概要 28
5.2.2　パラメータ設定 28
5.2.3　実験の手順 29

5.2.4 実験結果と考察 29
5.2.5 追加実験 31
5.3 台に関する実験 36
5.3.1 実験の概要 36
5.3.2 パラメータ設定 36
5.3.3 実験の手順 37
5.3.4 実験結果と考察 37
5.4 全体を通した考察 55

第 6 章 むすび **56**

謝辞 **57**

参考文献 **58**

発表論文リスト **60**

第1章　はじめに

私たちは道具を使用した際に得られる経験や使い心地をユーザーエクスペリエンスという言葉で表現する．ユーザーエクスペリエンスは例えば,「ユーザーが触れるモノ・コト・環境などあらゆる外部要因に対する，ユーザーの内側で起きる心情の変化と，その結果としてユーザーの頭の中に残る記憶や印象，または感情」と言い表せる．これは効率や便利さを示す，使い勝手やユーザビリティとは区別されて用いられる [1][2]．ユーザーエクスペリエンスとは文字通りの経験であり，主観的に体験しなければ得ることは出来ない．自ら体験し，そこで得られた記憶や印象，感情こそがユーザーエクスペリエンスなのである．

認知科学の分野では自己の認識について研究が行われており，認知科学者の Gallagher は自己意識 (self consciousness) を narrative self と minimal self の二つに分けて考えた [3]．narrative self とは「永続的に存在する自己」の事を指し，これは自分の存在，アイデンティティを指し示している．一方，minimal self とは「一時的な，その場その限りの自己」の事を指し，これを更に自己主体感 (sense of self-agency) と身体所有感 (sense of self-ownership) に分けた．自己主体感は「自分自身で行為を行っている」という感覚であり，身体所有感は「ある行為は自分の身体によって行われている」という感覚である．ユーザーエクスペリエンスは主観的に得られた体験であり，道具の操作において，特に自己主体感無しにユーザーエクスペリエンスは得られないだろう．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は，自己主体感や身体所有感を評価軸として遅延の影響が調査されている．例えば，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 [4], 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 [5], 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 [6] などが明らかにされており，ここから遅延はユーザーエクスペリエンスに悪影響を与えることが分かる．

しかしながら，全てのユーザーエクスペリエンスにおいて遅延が悪影響を及ぼすという訳ではない．日本の自動車メーカーであるマツダ株式会社は「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」[7] と述べ, 遅延を肯定的にとらえている．Farrer はボタン押下後，応答を画面に表示するまでに遅延をもうけた実験を行った．わずかに遅延をもうけると部分的には自身の制御であると感じるが，部分的には自身の制御ではないとの認識が生じることが明らかになった [8]．すなわち，部分的には他者が制御に介在していると感じていた．他者による妨害とは明示されておらず，状況により支援と捉えていた可能性もある．これらの知見からわずかな遅延は道具の操作において有効になることが期待される．

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ことがある．当研究室では，このような人が道具を自身と一体であると認識して手足のように扱う感覚を拡大的身体所有感とよんでいる [9][10]．また人間は道具を扱うときに道具を身体の延長として認識し，身体への接触の感知に関与する脳領域は，道具を持った場合でも同様の働きをすることが知られている [11]．拡大的身体所有感はどれほど道具を身体の延長として認識されているかの指標として扱えるだろう．道具の操作に長けていない人物が拡大的身体所有感を感じ，道具をうまく利用するためには，道具利用時の視覚的な情報と触覚から伝わる情報を同時に知覚し，道具が身体の延長として認識しやすくすることが重要であると考えられる．意図的に一方をわずかに遅延させて視覚と触覚の近くタイミングを一致させることで，拡大的身体所有感を増大させ，道具の適切な認識に役立つことが期待できる．

前述のような遅延によって好影響が見られるという見解から当研究室は，適切な遅延は道具の特性把握の助けとなり，拡大的身体所有感に結び付く，という仮説をたて, 遅延が道具操作に及ぼす影響を調査している [9][10]．自己主体感や拡大的身体所有感に遅延による向上は見られなかった．しかし，50ms∼100ms 程度のわずかな遅延において操作成績が向上した．また，遅延を加えた際に実験システムから力覚

提示を行ってないにもかかわらず他者の存在を協調と感じていた被験者もいた．ただし異なる道具操作タスクでもわずかな遅延が操作成績を向上させるとは確認できていない．本研究ではどのような要素，条件が適切な遅延による操作成績の向上に寄与するのか調査する．具体的には，タスク実行時に道具を 3 次元的に移動できる実験とその比較対象としての鉛直 2 次元平面内での移動に制限した実験や，実際の手の移動量と画面内の手 (道具の持ち手部分) の画面上での移動量の比率を変更した実験，道具により移動した対象物をのせる台の大きさや移動する台までの距離を変更した実験を行い結果を比較する．

ところで，これまで本研究ではわずかな遅延が効果的な影響を与える原因については考えずに，効果的な影響の期待できる条件について調査してきた．研究を進めつつ並行してさらなる調査を続けたところ，桑原の「動画先行の原則」にたどり着いた [12]．桑原の論文では，アニメーション業界における，音声よりも動画をわずかに先行させた方が「それぞれがちょうど一致している」と感じられる経験則について述べている．感覚器官により，刺激を受けてから実際に知覚するまでの時間的なずれの量が異なることに注目して，この経験則の原理について考察している．動画が先行している，言い換えれば音声が遅延している方が具合が良い，すなわち，遅延が好影響を生み出している．この論理展開を参考に，道具操作における成績向上のメカニズムについて考察する．

本論文ではまず，第 2 章で桑原の研究について紹介し，その理論を援用して，わずかな遅延による道具操作への好影響が期待できる理由を考察する．次に第 3 章で先行実験について述べる．先行実験での実験システムと本研究での実験システムの構成や実験手順は同じである．第 4 章では結果に影響を与える可能性の考えられる実験システムの要素を列挙する．第 5 章ではこれらの要素の一部を変更した比較実験を行い，考察する．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　動画先行の原則と人間の知覚

2.1　はじめに

アニメーション制作分野では，動画を音声よりもあえて数フレーム先行させることで，視聴者に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，経験則的に分かっていた [13]．言い換えれば，音声を動画よりも遅延させているわけである．関西学院大学の桑原はこの経験則を「動画先行の原則」と呼び [12]，エルンスト・ペッペルの時間論に関する研究 [14] を援用して，知覚心理学の視点から論じた．

2.2　意識の中の時間

感覚受容器が刺激され，その信号が脳に伝わり知覚されるまでの時間を「潜時」と呼ぶ．ペッペルは潜時の間におこる知覚の過程において「同時性の窓」「順序閾」「単純反応」「選択反応」の 4 つを重要な点と考えた．

(1): 「同時性の窓」とは，客観的に同時ではない事象が，一つの事象として認知される現象のことである．例えば聴覚においてある短い音 (クリック音) が感覚器官である耳に届いてから少し遅れてもう 1 つの音が別の耳に届いた場合，これらを 2 つの音として感知するには 4〜5ms の間隔が必要である．すなわち，1〜2ms の間隔では 1 つの音として感知してしまう．聴覚における同時性の窓は 4~5ms であると報告している．同様に触覚の同時性の窓は 10ms，視覚の同時性の窓は 20〜30ms であったと報告している．

(2): 「順序閾」とは，客観的に同時でない事象の順番を判別するのに必要な刺激間隔の最小値のことである．まず別の刺激であることを感知しなければならないため前述の同時性の窓よりも長い間隔であろう，その上でどちらの刺激が先でどちらが後か弁別する時間が必要だろう．ペッペルのペッペルの実験では聴覚，視覚，触覚ともに共通して 2 つの刺激の順番を判別するには 30~40ms が必要であった．なお，

後のために本稿ではこの時間を α_2 とする．順序閾は感覚器官に依存するのではなく，脳内の共通の部位で行われているようである．

(3): 「単純反応」とは，一つの信号に 1 つの決まった反応を返すことである．すなわち音や光の刺激があったと感知したらボタンを押す．ペッペルの実験では聴覚における単純反応までの時間は 130ms であり，視覚においては 170ms であった．聴覚と視覚の単純反応までの時間差を α_3 とする．これは，音の速度が無視できる程度の近くから音と光の両方の刺激が同時にあった場合，先に反応するのは音であることを示している．

(4): 「選択反応」とは，複数の刺激に対してそれぞれに割り振られた複数の反応を選択することである．例えば，音が聞こえた時には右のボタンを押し，光が見えたら左のボタンを押す．すなわち，反応に先立って選択決定しなければならない．ペッペルの選択反応の実験では同じ被験者でも複数の試行において一定の値に集中することはなく，反応までの時間の分散を調べたところ，240ms，280ms，310ms，340ms のような一定の周期を示した (図 2.1)．この一定の間隔を α_4 とする．このピークの間隔は (2) の順序閾の値 α_2 と同じ 30〜40ms である．ペッペルはここから，刺激の認知および同定と選択は脳の神経細胞の特定の回路にもとづいている「電気的」な振動 (インパルス) によって行われており，それにかかる時間も同じになると仮説を立てた．この 1 つにかかるプロセスに必要な定時が 30〜40ms=α_4 であり，人間の脳が刺激を同定，弁別する作業は α_4 間隔で繰り返される脳の知覚プロセスに依存しており，1 秒間におよそ 30 回の同定の機会と決定の時点しか持ち合わせていないと主張している．

2.3　映像と音の同期

桑原は，前節の知覚における様々な時間をもとに，映像と音の同期について考察している．音が映像のあるスクリーンの位置から発せられていると仮定する．まず，(3) 単純反応における視覚と聴覚の時間には差 α_3 があり，聴覚の方が速い．スクリーンから視聴者までの距離が音の速度を無視できる程度の近くであれば α_3 だけ，すなわちおよそ 1 フレームだけ動画を先に提示すれば，映像と音の知覚が一致すると考

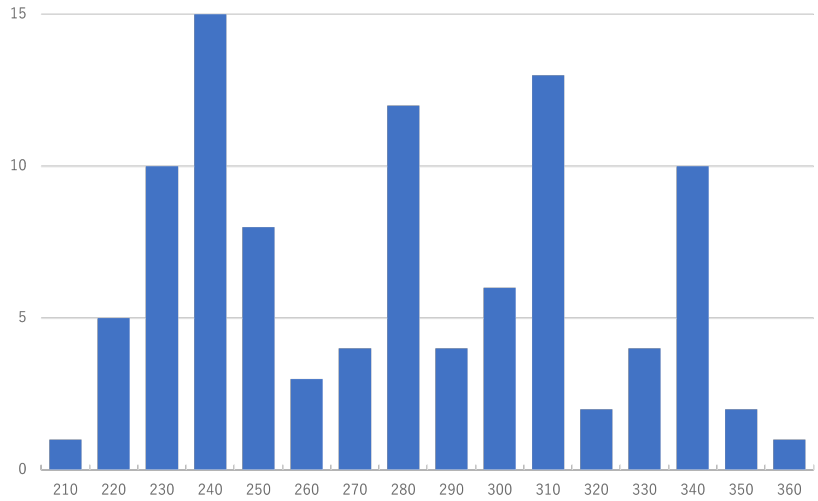

図 2.1: ペッペルの選択反応の実験における聴覚反応時間 (文献 [14] より)

えられる．あるいはスクリーンから視聴者までの距離が約 12.5m であれば音が到達するまでに α_3 秒程度遅れるため，結果的に映像と音の知覚が一致すると考えられる．次に，(2) 順序閾と (4) 選択反応の実験によれば，脳内で刺激を識別するサイクルは α_4=α_2 間隔である．また (4) 選択反応の実験から最初のサイクルで識別できる保証はなく，意味のあるアニメーション映像を認識できるのは，あるいは音と関連しそうな意味のある動きとして認識できるのは，２回目以降のサイクルになることが多いのではないだろうか．前述の (3) 単純反応の実験では聴覚と視覚の反応時間の差は α_3 だけであったが，(4) 選択反応の実験では聴覚の反応時間が長くなっているように，より複雑な視覚の反応時間はさらに長くなるのだろう．一般的なアニメーションのシーンでは，これらの差が 60~80ms であることが多く，経験的に 2~3 フレームだけ映像を先行させると，映像と音が一致して知覚できるのだろう．緩やかで静かな動きの場合は 1~2 フレームの動画先行が適しており，静かな状況からの突然の変化や強勢の大きい変化の場合には 3 コマ以上の比較的大きな動画先行が適していることがわかると述べている．

2.4　道具操作への適用

桑原の考察は，アニメーションだけでなく様々な場面にも当てはめることができるのではないだろうか．一般的な道具の操作では，目で見て，時には耳で音を聞き，手に返ってくる感触をも頼りに状況を判断している．本研究で扱っているバーチャル環境での道具操作においては，聴覚フィードバックは考慮していない．また，後述の通り触覚フィードバック装置を利用してはいるが，主に移動範囲拘束のためにその機能を利用しているだけで，いわゆる「手応え」を提示してはいない．しかし，データグローブやカメラ画像ベースでのハンドトラッキングでは基本的に手応えがないのに対し，本研究での実験環境のように物理的なスタイラスを握って操作を行う場合には，意図的な触力覚フィードバックは行なっていなくても，装置のスタイラス自体に対するそれなりの手応えを感じている．例えばバーチャルな物体を移動した時に，前者であればスクリーンに提示された視覚情報と，自身の手が自身の手であるが故の体性感覚情報だけであるのに対して，後者の場合にはスタイラスに触れている触覚的な情報や素早くスタイラスを動かした時の反作用としての力覚的な情報もある．視覚と聴覚や，さらに触覚など,「複数の感覚が組み合わさると，その感覚の基になった出来事に対する反応が強くなる [15]」と脳科学の分野で説明されている．そして，それらは適切に同期しているほど，組み合わせるべき複数の感覚と知覚され，また反応が強くなれば操作の適切さにもつながるのではないだろうか．視覚と聴覚の単純反応速度に違いがあるように，視覚と触覚にも単純反応速度の違いが存在する．触覚の単純反応の時間は刺激の強度によって変化するが，200ms~300ms である [16]．これは視覚の単純反応 170ms よりも 30ms は遅く，また状況によりさらに遅くなるのだろう．視覚情報と触覚情報が同時に提示されたときには，触覚情報の方が遅れて知覚されている可能性がある．このとき触覚情報を先行して提示できれば，視覚情報と同時に知覚できるかもしれない．実際にはリアルタイムの道具操作において動作を予測することができないため触覚情報を先行して提示することはできない．そこで視覚情報を遅延させて提示することで同期した知覚を促し，高い自己主体感や優れたユーザエクスペリエンスに繋げられるのではないだろうか．

第3章　先行実験

3.1　はじめに

本章では，[9][10][17] で行われた 3 つの先行実験を紹介する．実験では，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，道具の操作成績や自己主体感と拡大的身体所有感に与える影響を調査した．実験 1 では無作為に設定した条件下において操作成績の向上が確認できた．実験 2 では遅延による操作性の向上に寄与する要素を調査するために，実験システムの様々な要素を変更したところ，明確な成績向上はなかった．変更した要素の詳細は第 4 章で述べる．実験 3 は各要素を実験 2 に合わせた上で，実験 1 がそうであったように入力機器の力覚提示機能により，奥行き方向への移動を制限 (2 次元鉛直平面) したところ，改めて成績向上が確認できた．はじめに道具操作における遅延を実現する実験システムについて述べ，次に実験における手順とその目的について述べる．最後に先行実験で得られた結果と考察について述べる．

3.2　実験システム

前述の通り実験 1 と実験 2 および 3 では様々な変更を行っており見栄えも違うが，基本的な構成は同じである．ここでは実験 2 における表示画面などを用いて実験システムについて説明する．操作系におけるわずかな遅延が操作成績と操作感覚へ与える影響を調査するために，被験者に道具を使って対象物を操作するタスクを与える．実験で扱う道具はマジックハンドであり，操作は対象物をある台から別の台への移動とする．PC と 22 インチ液晶ディスプレイを使用する．被験者は 3 次元力覚入出力デバイス (Geomagic Phantom Omni，以降 PHANTOM) を入力装置として使用した (図 3.1)．被験者の手から道具であるマジックハンド，そして最終的な対象物の動きに対して遅延を実現するため，タスクはバーチャル空間での操作とする．画

図 3.1: 使用したデバイス PHANTOM

面上に 2 つの台と対象物である球，そしてマジックハンドを描写する．マジックハンドは PHANTOM のペン型把持部と連動しており，被験者は PHANTOM を操作することで対象物を台から台へ移動させる (図 3.2)．この際に入力装置と画面に描写されるマジックハンドの間に遅延をもうける (入力遅延と描画遅延以外の遅延をもうけない場合も含む)．対象物の運動は台から台へ移動させる過渡状態 (図 3.3) と，次の過渡状態に備える準備状態 (図 3.4) に分けて考える．実験では過渡状態であった時間を操作成績として測定する．準備状態では PHANTOM の力覚提示機能を用いて把持部を移動させることで対象物を台の中心に移動させ，次のタスクに備える．この際に 3 秒間，ふたを描写し，次のタスクまでの準備状態であることを被験者に伝える．また操作開始を予告するため 3 秒間のカウントダウンを数字で画面中央に表示する．各実験開始前の準備段階において，複数の大きさ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にする．台と台の位置関係が常に同じであると被験者が台の配置に慣れてしまうことが予測される．その為，台の位置関係を 3 種類に変更可能とする (図 3.5)．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，操作成績の評価に影響が出るため，これらの距離は常に一定とする (ただし，実験 1 では完全に等しいわけではなく，1 つはやや短い距離であった)．

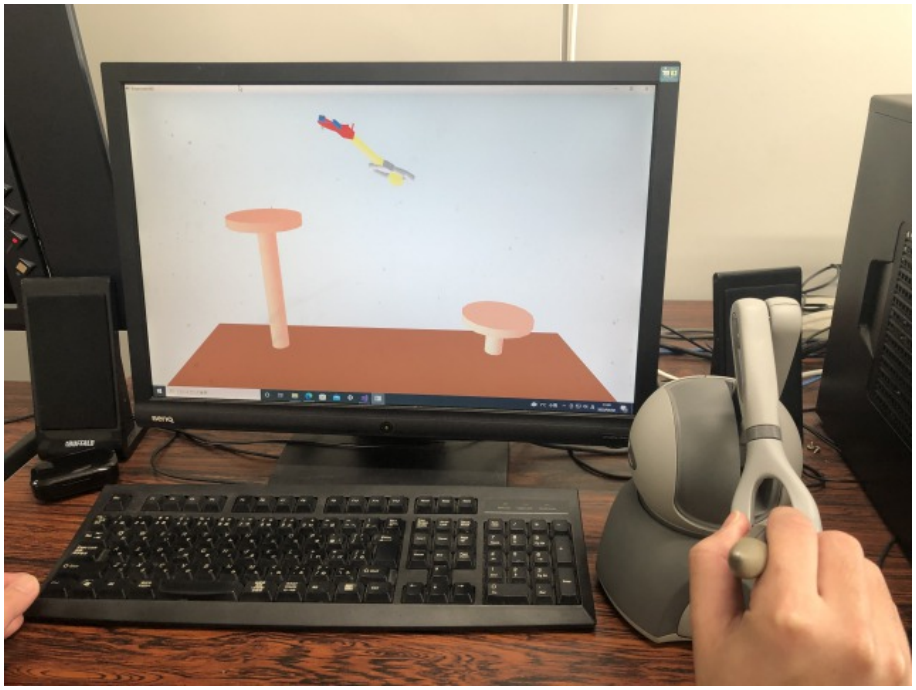

図 3.2: ペン型入力装置を操作して画面上のマジックハンドを動かす様子

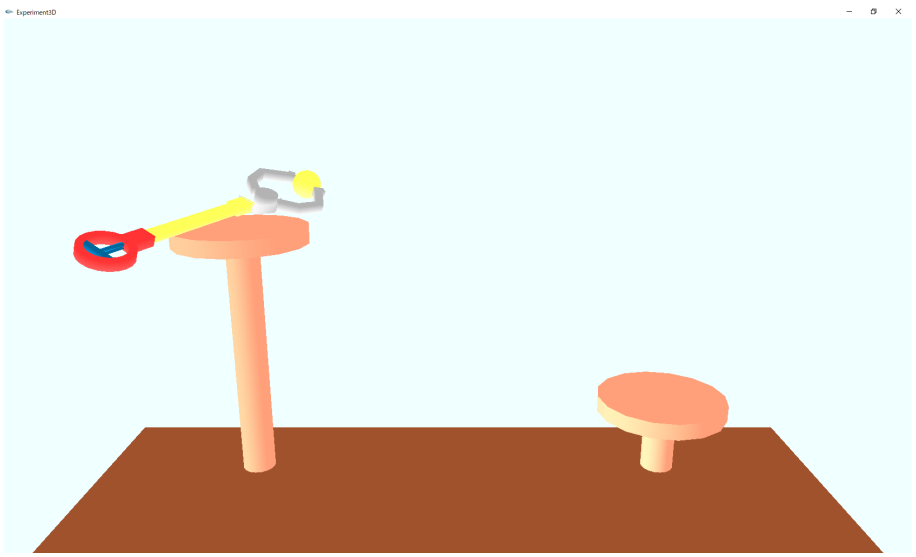

図 3.3: 実験の操作画面, 過渡状態

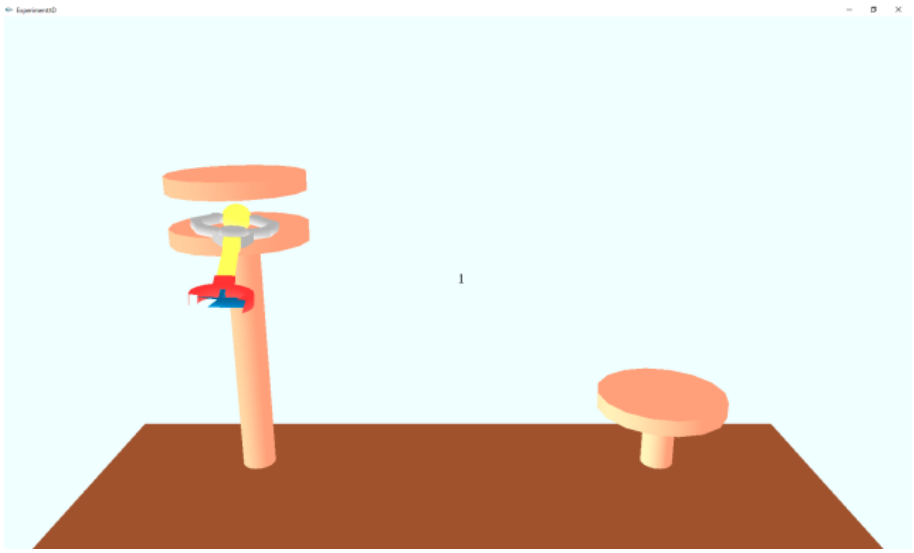

図 3.4: 実験の操作画面, 準備状態

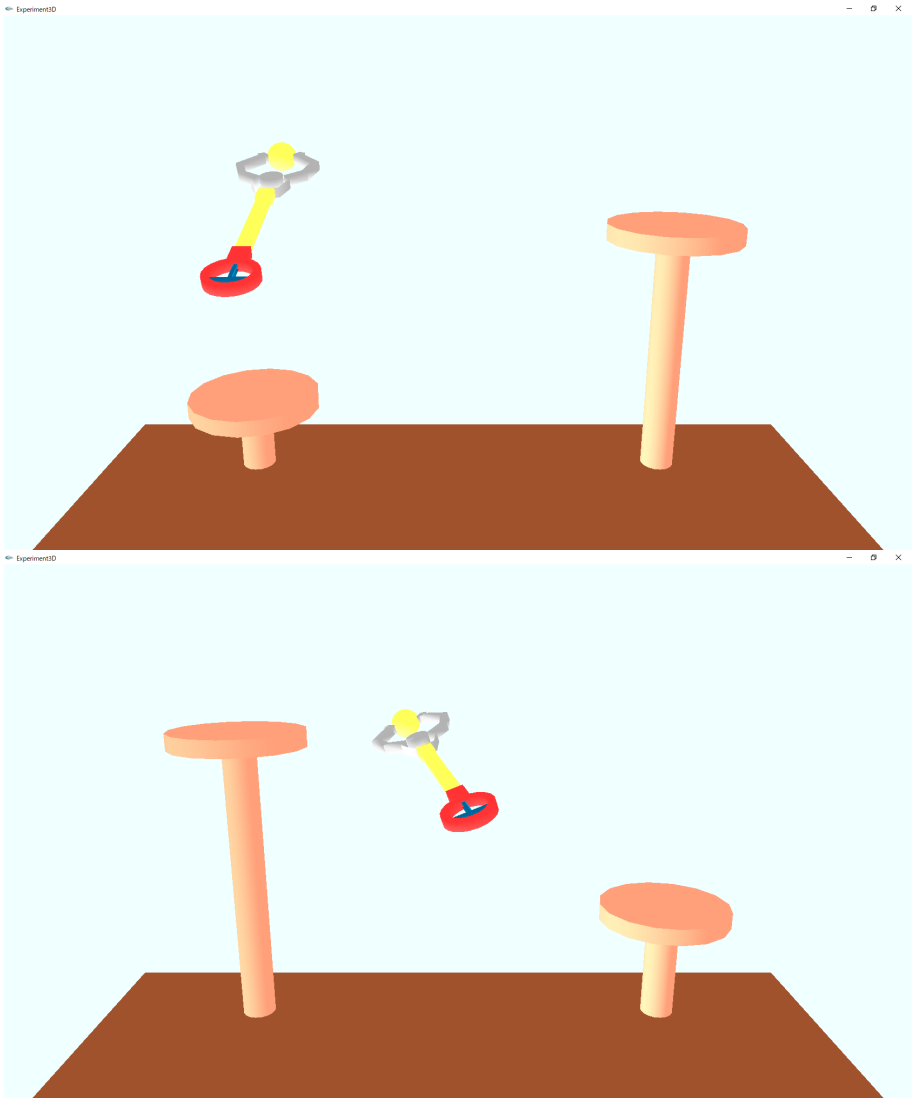

図 3.5: 台同士の位置関係の例

図 3.6: 手で対象物を操作する様子

3.3　実験の手順

実験に先立ち, 被験者にマジックハンドを用いて対象物を移動させ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 1–4 を体験してもらう.

動作 1 素手で対象物 (スポンジ) を直接操作する (図 3.6).

動作 2 現実のマジックハンドで対象物 (スポンジ) を直接操作する (図 3.7).

動作 3 遅延を最小に設定した実験システムで対象物を操作する (図 3.8).

動作 4 遅延を最大に設定した実験システムで対象物を操作する.

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うとともに，動作 2 で実際にマジックハンドを手にして道具により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 と同等と位置づけであるとの説明をし，実験システムに慣れてもらう．動作 4 により実験においてこのような遅延を付加することがあることを理解してもらう．またこれらは，実験後のアンケートにおいて回答の指標としてい

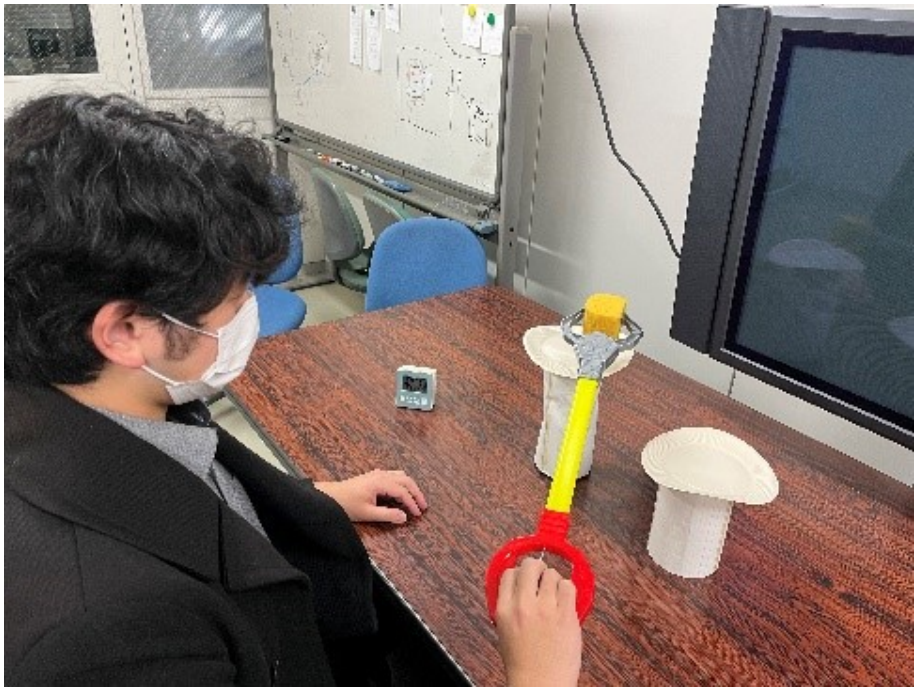

図 3.7: 現実のマジックハンドで対象物を操作する様子

ることも説明する．実験における遅延は 0ms (入力遅延と描画遅延を含めると最小でも実験 1: 5ms，実験 2 と 3： 16ms であるが，一連の研究においてこの遅延を「遅延なし」0ms と扱う) から 450ms までの，50ms 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．被験者に対して 1 人あたり 10 試行，10 通りの遅延をランダムに割り当てる．動作 1~4 の体験ののち，以下の手順で実験を 1 人あたり 10 試行 (10 通りの遅延) 行う．被験者には PHANTOM を用いた実験システムに慣れてもらうために実験前に遅延が無い状態において最低でも 1 試行，10 回の移動タスクを与える．その後,「操作の習熟に関して不安があるかどうか」と質問をし，不安を感じる場合は習熟したと感じるまで 10 回の移動タスクを繰り返し行ってもらう．実験は以下の手順で行った．

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．

図 3.8: 実験システムにおいて対象物を操作している様子

手順 3 1 試行あたり，以下のタスクを 10 回 (5 往復) 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．

手順 4 1 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 (拡大的身体所有感)

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 1–4 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付けて評価値を 5，実験システムによる遅延最大の動作 4 を評価値を 0 とし，指標として 0 から 9 の間で各試行を評価してもらう．例えば，ある遅延における操作感覚が，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 の間となる．

もし，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 5 より大きく評価することを被験者に説明した．被験者は大学生または大学院生 (20 代) であり実験 1 は 20 名，実験 2 は 30 名，実験 3 は 24 名であった．全員から実験参加について同意が得られている．

3.4　実験結果

実験 1 では先に触れたように，2 次元鉛直平面内のみでマジックハンドを操作できるように制限していた．また，操作画面は先に例示した操作画面と異なり，図 3.9 に示す通りであった．実験の結果，実験 1 では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 3.10)．しかし遅延の大きさが 50ms∼100ms のとき，タスク達成時間は遅延の大きさが 0ms のときよりも短くなっていた．すなわち操作成績が向上していた．また，0ms と 100ms の平均タスク達成時間の間には 5%の有意差が存在した．アンケート結果を見ると自己主体感や拡大的身体所有感の官能評価値は，遅延が大きくなるにつれて小さくなった．また手順 4 において質問 3：他者がマジックハンドの操作に介在しているかどうか (他者の存在感)，回答してもらった．他者の存在を感じるときは最大値を 9 として，感じないときは最小値 0 として評価してもらった．その結果，被験者は遅延によって存在しない他者の存在を感じているようだった (図 3.11)．

実験 2 では，実験 1 から遅延による操作性の向上に寄与する要素を調査するために，実験システムの様々な要素を変更した．変更した要素の詳細は次章で述べる．なお，マジックハンドの移動操作に関する 2 次元平面内という制限は行わず，3 次元的な移動が可能であった．実験の結果，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 3.12)．実験 1 での結果と異なり，わずかな遅延による操作成績の向上は見られなかった．アンケート結果を見てもわずかな遅延による自己主体感や拡大的身体所有感の高まりは見られなかった．また事前に，実際には力覚提示を行わないにもかかわらず，力覚提示により支援や妨害を行うこともあるかもしれないと伝えた上で，手順 4 において質問 3 ’：他者がマジックハン

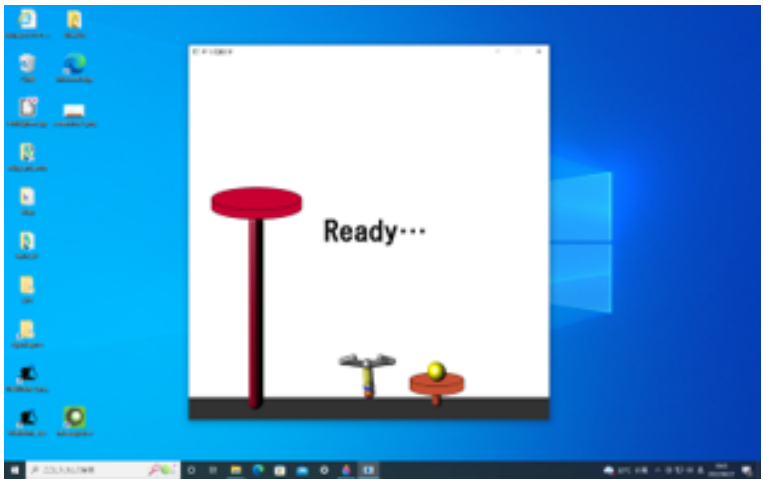

図 3.9: 実験 1 の操作画面

ドの操作に介在しているかどうか，介在していると感じる場合にはそれを協調と感じるか妨害と感じるか (他者の存在感)，回答してもらった．他者の存在を協調として感じるときは最大値を 5 として，感じないときは 0，妨害として感じる時は最小値-5 として評価してもらった．その結果，被験者は遅延 0~200ms でによって存在しない他者の存在を感知し，それを協調と感じることが示唆された (図 3.13)．

実験 3 では，実験 1 と同様に奥行き方向への移動を制限した (2 次元鉛直平面)．その他の要素については実験 2 と同じにした．実験の結果，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 3.14)．しかしながら，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みられた．またアンケート結果をみると，遅延の大きさが 50ms のとき自己主体感と拡大的身体所有感の高まりがみられた (図 3.15，図 3.16)．

これら 3 つの実験を比較して考察する．実験 1 ではわずかな遅延による操作成績の向上が見られ，要素を変更した実験 2 では見られなかった．そして，ほとんどの要素は実験 2 と同様で，ただし奥行き方向への移動制限のみ実験 1 と同じであった実験 3 では，遅延による操作成績の向上がみられた．実験 1~3 の条件と結果の違いから，わずかな遅延による操作への好影響は常にみられるとは限らず，例えば奥行き移動制限のような特定の条件，要素の違いにより現れる可能性が示唆された．

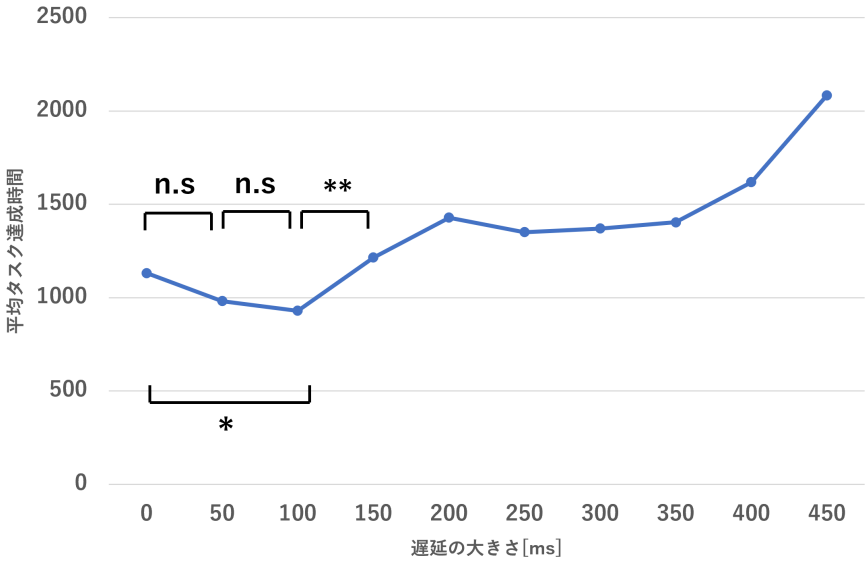

図 3.10: 実験 1 の遅延の大きさの変化に対する平均タスク達成時間の遷移 [9]

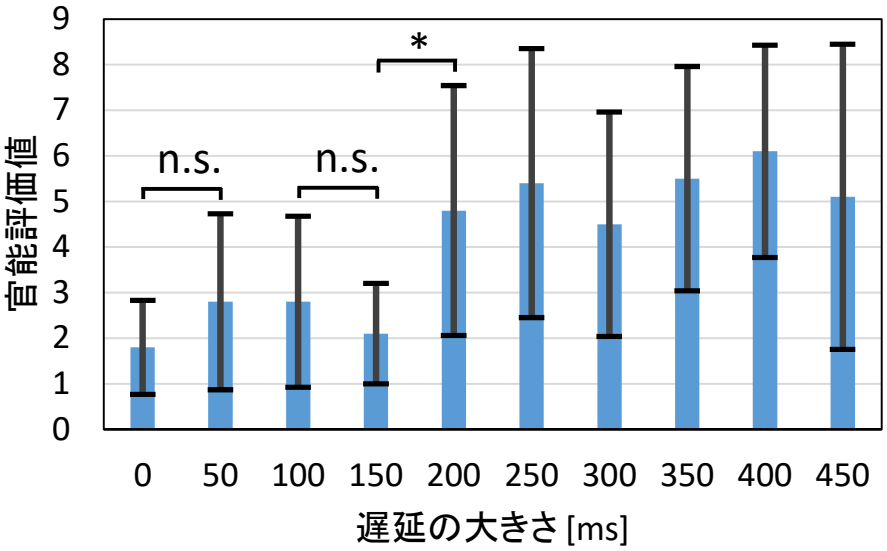

図 3.11: 実験 1 の遅延の大きさの変化と他者の存在感に関する官能評価の遷移 [9]

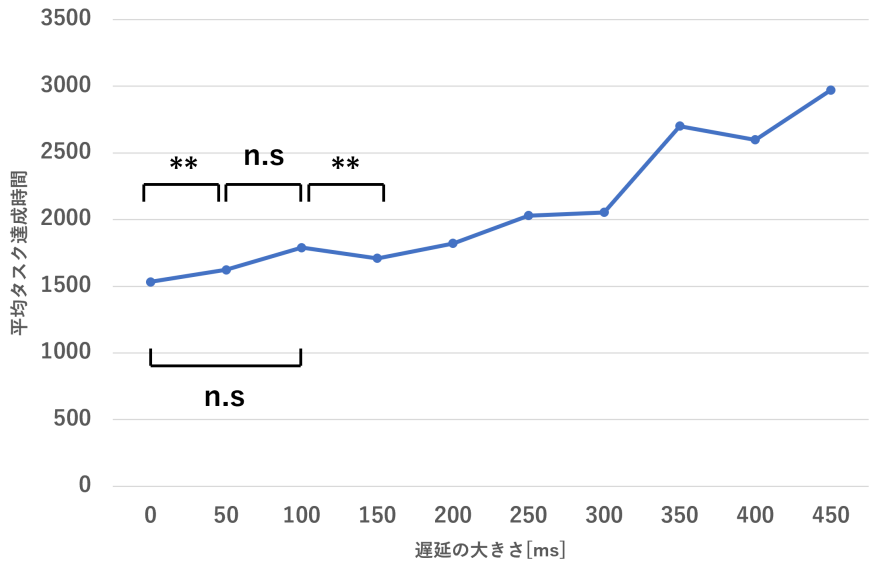

図 3.12: 実験 2 の遅延の大きさの変化に対する平均タスク達成時間の遷移 [9]

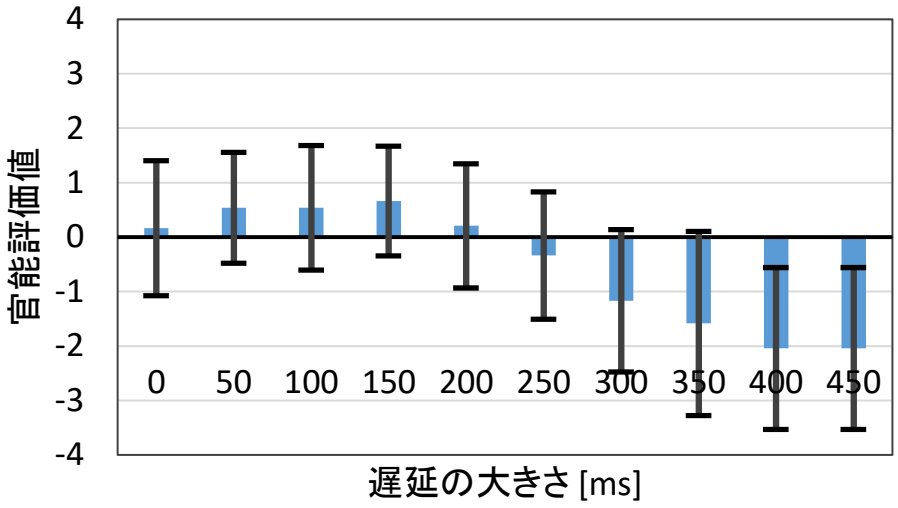

図 3.13: 実験 2 の遅延の大きさの変化と他者の存在感に関する官能評価の遷移 [9]

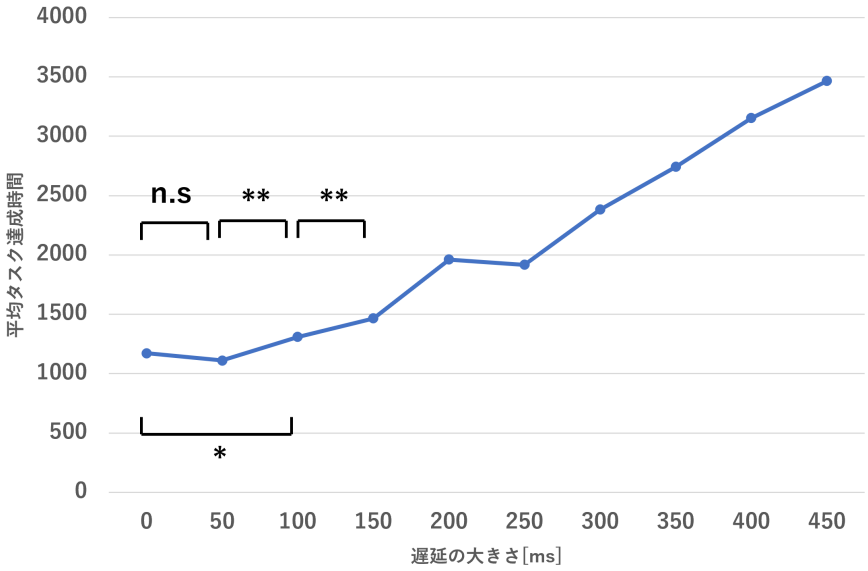

図 3.14: 実験 3 の遅延の大きさの変化に対する平均タスク達成時間の遷移

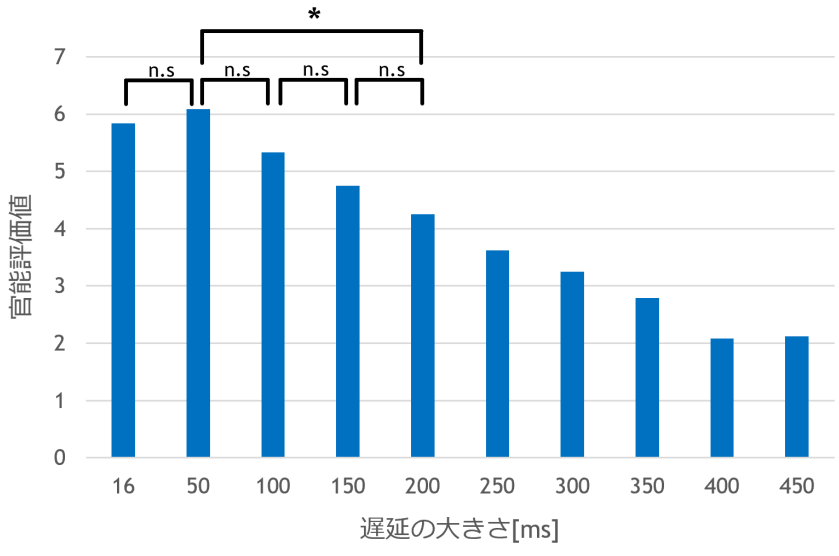

図 3.15: 実験 3 の遅延の大きさと自己主体感に関する平均官能評価の遷移

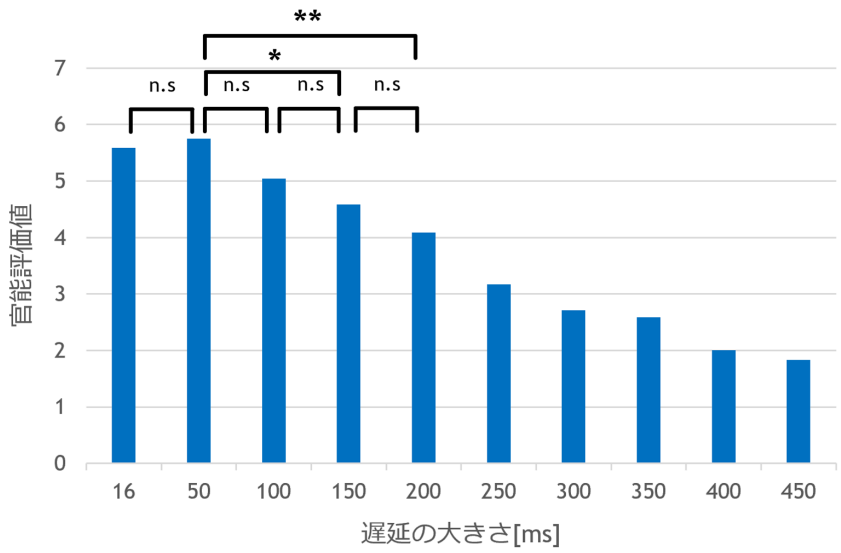

図 3.16: 実験 3 の遅延の大きさと拡大的身体所有感に関する平均官能評価の遷移

第4章　実験システムの要素

4.1　はじめに

先行実験にて実験システムの要素を変化させたところ，異なる実験結果が得られた．ここから実験システムのいくつかの要素はわずかな遅延による操作性の向上に寄与する可能性があると考えられる．本章では実験結果に影響を与えていると考えられる要素を整理し，列挙する．その後，各項目について詳細を述べる．合わせて，前章の実験結果に対する考察も付け加える．

(1) 操作量
  (1)-1 奥行き方向の移動制限の有無
  (1)-2 画面上マジックハンドと入力装置の移動量の比率
(2) 台
  (2)-1 台の大きさ
  (2)-2 台の位置関係
(3) 表示サイズ
  (3)-1 モニタサイズ
  (3)-2 ウィンドウサイズ
(4) 奥行き感
  (4)-1 視線の俯角
  (4)-2 床面の見え方
(5) 見栄え
  (5)-1 色合い
  (5)-2 陰影

4.2　操作量

4.2.1　奥行き方向の移動制限の有無

実験 1 では奥行き方向への移動操作を制限していた．すなわち，ボールを掴んだマジックハンドの移動は前後左右の移動のみが可能な 2 次元鉛直平面内に限られていた．一方で，実験 2 では奥行き方向への移動が可能だった．どちらの実験も上下左右方向の操作に制限はなかった (図 4.1)．それに対して実験 2 は対象物 (マジックハンドの操作部分) が台の奥行き分だけ前後にも移動することができた．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かとも思えるが，変わらないのは台の上面が帯状の前後稼働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 4.2 (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 4.2 (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．図 4.2 (下) の操作範囲である実験 2 では遅延による操作性の向上は見られなかった．それに対し，操作範囲を図 4.2 (上) 程度に制限した実験 3 では有意差は確認できなかったが操作性の向上が見られた．この実験結果の違いから，奥行き方向への移動制限は，わずかな遅延による道具操作への好影響に寄与する要素の可能性がある．

4.2.2　画面上マジックハンドと入力装置の移動量の比率

実験システムの構成により，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，実験 1 のこれらの距離の関係，すなわち比率 (手座標距離/画面座標距離) は 0.78 であり，実験 2 と 3 では 1.48 であった (表 4.1)．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．この移動量の比率が小さな実験 1 では有意差のある成績向上が見られたが，実験 2 と 3 では見られなかった．操作量の比率は小さいとき，わずかな遅延による道具操作への好影響に寄与する要素の可能性がある．

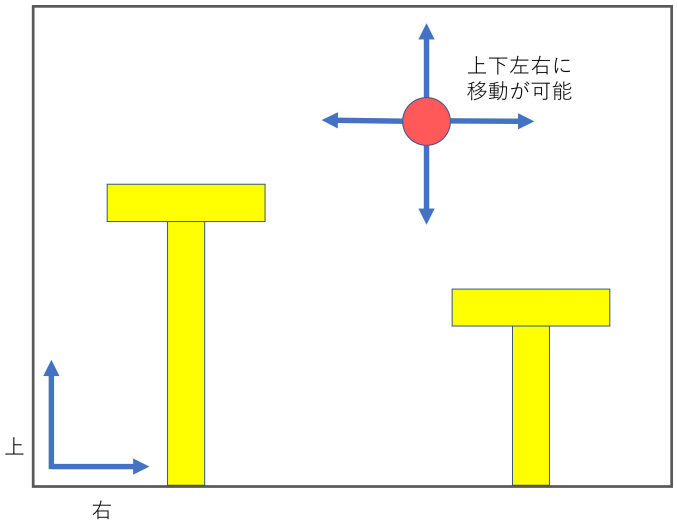

図 4.1: 実験システムの側面図

表 4.1: 先行実験における手座標と画面座標距離の関係

	手座標距離 [mm]	画面座標距離 [mm]
実験 1	1	0.78
実験 2 & 3	1	1.48

4.3　台

4.3.1　台の大きさ

実験ではマジックハンドを用いて球を一方の台からもう一方の台に移動させるタスクを被験者に課している．そのため台が小さいほど精密な動作が要求される．台の大きさや台同士の距離を表 4.2 に示す． 距離の各数値は左から順に, 台の直径/台同士の中心の垂直方向の距離/台同士の中心の水平方向の距離/台同士の中心の直線距離である．なお，実験 1 における台の直径は左右によって異なり, 手座標距離において左側が 71.8mm，右側が 43.1mm であった．実験 2 と 3 では左右の台の直径はともに 46mm であった．遅延による操作成績の向上が見られた実験 1 では左右の台の大きさが異なっていたため，実験 2 と 3 の結果と比較して台の大きさが遅延による操作成績の向上に寄与するか否かを明言することはできない．しかし平均的な大きさは実験 2 と 3 よりも大きい．台の直径は大きいとき，わずかな遅延による道具操作への好影響に寄与する要素の可能性がある．

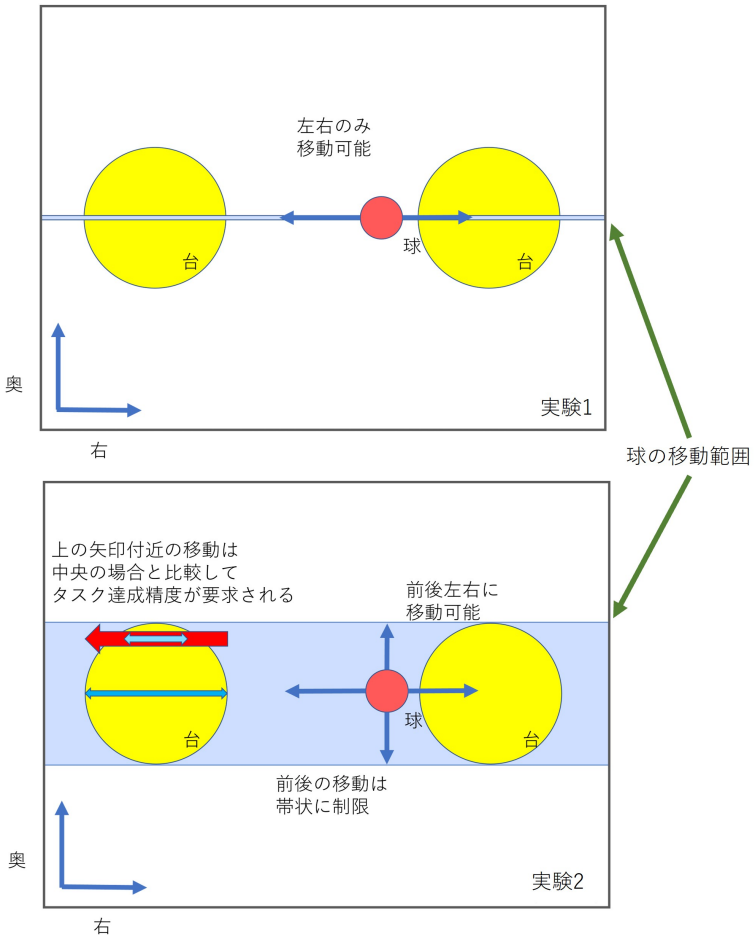

図 4.2: 移動制限のある実験システムの平面図 (上) と移動制限のない実験システムの平面図 (下)

4.3.2　台の位置関係

台の位置関係は 3 種類存在する．各実験システムにおいて似たような台の配置をそれぞれタイプ 1，2，3 とする．実験 1 においてはタイプ 1 に対してタイプ 2 は左右対象，タイプ 3 は台同士の関係は全体に高く同じ角度のまま中央に寄っており距離が近かった (表 4.2). 実験 2 と 3 の台の配置においては台同士の距離は一定であり，実験におけるタスク間の公平性を損なわないようにしている．手座標距離における台同士の距離は実験 2 と 3 よりも実験 1 の方が広い．前節と同様に，台同士の距離は広いとき，わずかな遅延による道具操作への好影響に寄与する可能性がある．

表 4.2: 先行実験における台の大きさと位置関係
(直径/垂直距離/水平距離/直線距離)

実験	手座標距離 [mm]	画面座標距離 [mm]	移動量の比率
実験 1(タイプ 1)	71.8/162/162/229	56/127/127/179	0.78
実験 1(タイプ 2)	71.8/162/162/229	56/127/127/179	0.78
実験 1(タイプ 3)	71.8/144/144/203	56/113/113/160	0.78
実験 1(平均)	71.8/156/156/220	56/122/122/173	0.78
実験 2 & 3	46/67/147/161	72/89/222/239	1.48

4.4　表示サイズ

4.4.1　モニタサイズ

モニタは BenQ G2200W 22inch，画素数 1680 × 1050 である．全ての実験にて同一のモニタを使用しているため，モニタの大きさを要因とする遅延による道具操作への影響は不明である．

4.4.2　ウィンドウサイズ

ウィンドウサイズは図 3.9 に示す通り，実験 1 は 800 × 800 であった．実験 2，3 では, 実験 1 とは異なる 1680 × 1050(フルスクリーン) であった (図 3.3)．実験 2 を実施する際，ウィンドウサイズが大きくなることで臨場感が向上し，そこから遅延による操作成績の向上が顕著にみられることを期待していた．先行実験の結果から，ウィンドウサイズは小さいとき，わずかな遅延による道具操作への好影響に寄与する要素の可能性がある．

4.5　奥行き感

4.5.1　視線の俯角

視線の俯角は，実験 1 では水平方向の平行投影を基に疑似的に立体感を表現していたため，単純に示すことが困難である．実験 2 と 3 は 15.8 度の角度である．直接的な比較ができないため，視線の俯角がわずかな遅延による操作性の向上に寄与するかはわからない．

4.5.2　床面の見え方

実験 1 において床は疑似的に表現しており，水平方向への平行投影を行っているため表示されている床は黒い帯状に見えている．実験 2，3 は床面として設定した平面が手前から奥行き方向に広がっているため図 3.3 の様に見える．床面の見え方は操作に直接の影響を及ぼさないため列挙した要素の中では，わずかな遅延による道具操作への好影響に寄与する可能性は少ないと考えられる．

4.6　見栄え

色合い，陰影に関しては，実験 1 は図 3.9，実験 2 以降は図 3.3 のとおりである．これらの見栄えは操作に直接の影響を及ぼさないため列挙した要素の中では，わずかな遅延による道具操作への好影響に寄与する可能性は少ないと考えられる．

第5章　操作タスクの難度に関わる要素の影響

5.1　はじめに

前章では実験結果に影響を与えていると考えられる実験システムの要素を列挙し，詳細を述べた．本章ではその中から実験結果に大きく影響を与えそうな，操作タスクの難度に関わる要素を変化させた比較実験を行う．それぞれの要素がわずかな遅延による操作への好影響に寄与するのか考察する．具体的には 4.2 節の操作量に関する要素と 4.3 節の台に関する要素を個別に変化させた実験を行う．

5.2　操作量に関する実験

5.2.1　実験の概要

4.2 節で述べた操作量に関する要素，すなわち奥行き方向への移動制限の有無と，画面上マジックハンドと入力装置の移動量の比率を変化させた実験 4，5 を行う．奥行き方向制限で 2 通り，移動量比率で 2 通りの計 4 つの実験を想定しているが，これらのうち 2 つは実験 2 と 3 で充当する．実験結果を比較することでこれらの要素がわずかな遅延による操作性の向上に寄与するのか考察する．被験者は大学生及び大学院生 (20 代) であり，実験 4 と 5 では 10 名であった．すべての被験者から実験参加について同意が得られている．

5.2.2　パラメータ設定

実験システムにおける各要素，パラメータの設定は特に言及しない限り実験 2 と同じである．実験 2 では奥行き方向への移動制限をしていなかったのに対して，実験 3 では制限を行った．同様に実験 4 では制限を行わず，実験 5 では制限を行うことで 2 次元鉛直平面上のみの移動が可能である．また実験 2 と 3 では，画面上マジッ

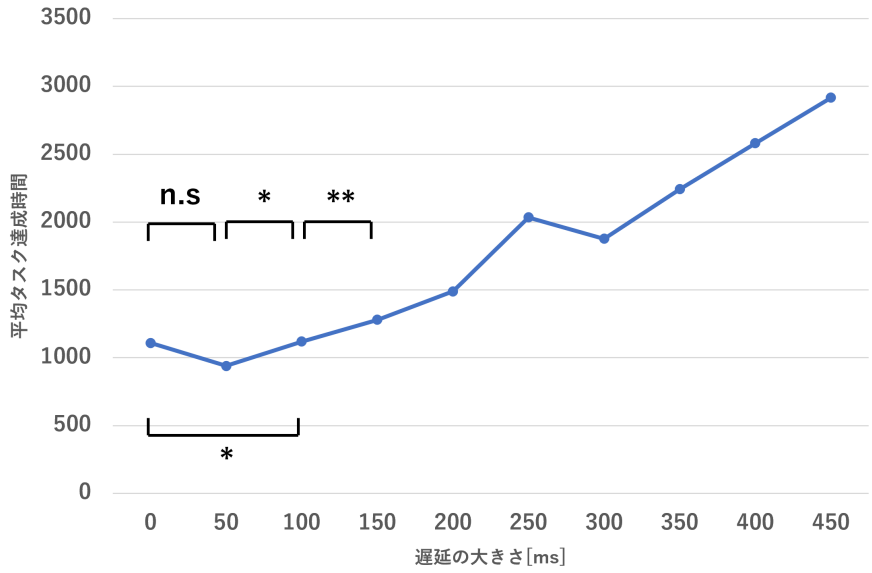

図 5.1: 実験 4 の遅延の大きさの変化に対する平均タスク達成時間の遷移

クハンド と入力装置の移動量の比率は 1.48 であった．実験 4 と 5 では (実験 1 と同じ) 0.78 に設定する．

5.2.3　実験の手順

実験手順は先行実験と同一である．同じ動作，手順，タスクを被験者に行ってもらう．自己主体感や拡大的身体所有感に関するアンケートも同じ評価基準で解答してもらう．

5.2.4　実験結果と考察

実験 4 の平均タスク達成時間を図 5.1，実験 5 の平均タスク達成時間を図 5.2 に示す．ともに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っている．しかし両実験とも遅延の大きさが 50ms のときの操作成績が 0ms のときよりも向上している．マンホイットニーの U 検定を行ったところ，実験 4 では 0ms と 50ms の操作成績の間に有意差が無かったが，実験 5 では 5%の有意差が見られた．実験 2~5 の操作量に関する要素と操作成績の関係を表 5.1 に整理し，比較する．実験 2 と 3，実験 4 と 5 を比較すると，奥行き方向への移動制限がもうけられている場合にわ

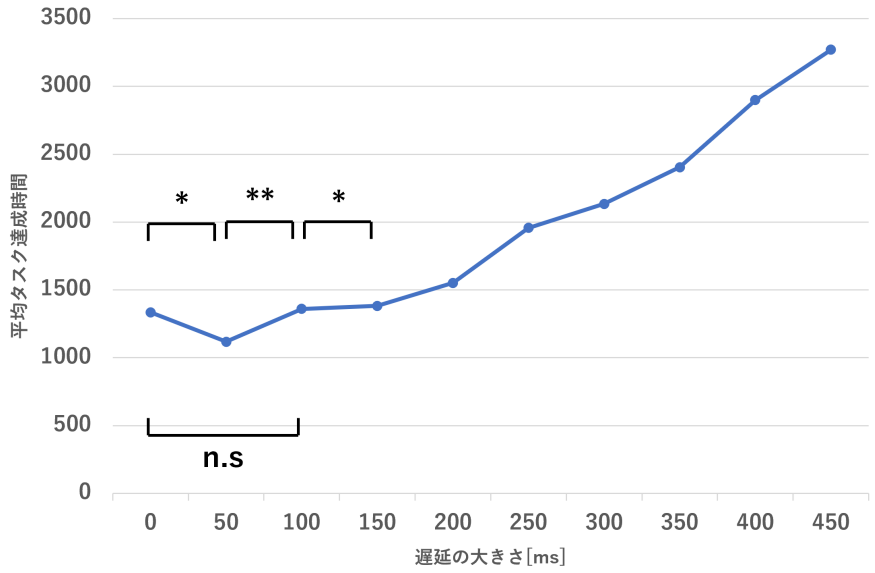

図 5.2: 実験 5 の遅延の大きさの変化に対する平均タスク達成時間の遷移

ずかな遅延によって操作成績が向上するようである．また実験 2 と 4，実験 3 と 5 を比較すると，移動量の比率は小さい場合にわずかな遅延によって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．

次に自己主体感と拡大的身体所有感に関するアンケート結果について考察する．自己主体感と拡大的身体所有感の官能評価は全体では遅延が大きくなるに従い小さくなった．実験 4 では自己主体感 (図 5.3) と拡大的身体所有感 (図 5.4) の官能評価は遅延 50ms で高まりがみられたが，実験 5 では自己主体感 (図 5.5) と拡大的身体所有感 (図 5.6) の遅延による高まりは見られなかった．実験 4 のアンケート結果に対して t 検定を行ったところ，自己主体感と拡大的身体所有感で 5%の有意差が見られた．実験 3 においても，有意差は無いものの実験 2 と比較して自己主体感と拡大的身体所有感の高まりがみられたことから，奥行き方向への移動の制限と移動量の比率は操作性を高めるのではないかと考えられる．しかしながら実験 5 で期待されるはずの自己主体感と拡大的身体所有感の高まりはみられないため，奥行き方向の移動制限と移動量の比率は必ずしも自己主体感と拡大的身体所有感を高めるとはいえない．

表 5.1: 実験 2~5 の比較項目と結果

		移動量の比率	
		0.78	1.48
奥行き方向への移動制限の有無	有り	実験 5[*] P=5.00%	実験 3[#] P=34.8%
	無し	実験 4[#] P=36.8%	実験 2[–]

[∗] 5%の有意差をともなう成績向上
[#] 有意差の無い成績向上
[–] 成績向上無し

5.2.5　追加実験

実験 5 ではわずかな遅延による有意差のある成績向上が見られた．有意差の無い成績向上が見られた実験 4 と比較すると実験 5 は奥行き方向への移動制限をもうけており，移動制限が成績の向上に寄与した可能性がある．また有意差の無い成績向上が見られた実験 3 と比べて実験 5 の移動量の比率は小さく設定されていた．そこで奥行き方向への移動制限の成績向上への有効性や，移動量の比率の小ささが成績向上への寄与を再確認するため，追加の実験 5 ’ を行う．具体的には，奥行き移動は同様に制限し，移動量の比率は少し小さな 0.58 で実験する．他の要素，条件は実験 5 と同じである．被験者は 5 名であり，全員から実験参加について同意が得られている．

実験 5 ’ の平均タスク達成時間を図 5.7 に示す．ほかの実験と同じく全体では遅延の大きさが大きくなるほど平均タスク達成時間は長くなった．しかし遅延の大きさが 50ms のとき操作成績が 0ms のときよりも向上している．マンホイットニーの U 検定を行ったところ，0ms と 50ms の操作成績の間に 5%の有意差が見られた．またこのときの P 値は 1.88 であり，実験 5 の P 値 5.00 よりも低い．奥行き方向への移動制限の有効性と，移動量の比率を小さくすることによる，わずかな遅延の操作成績向上への寄与が改めて示唆された．

次に実験 5 ’ の自己主体感のアンケート結果を図 5.8 に，拡大的身体所有感のアンケート結果を図 5.9 に示す．自己主体感も拡大的身体所有感も全体としては遅延が大きくなるごとに官能評価は小さくなっていった．しかし遅延 50ms において評価

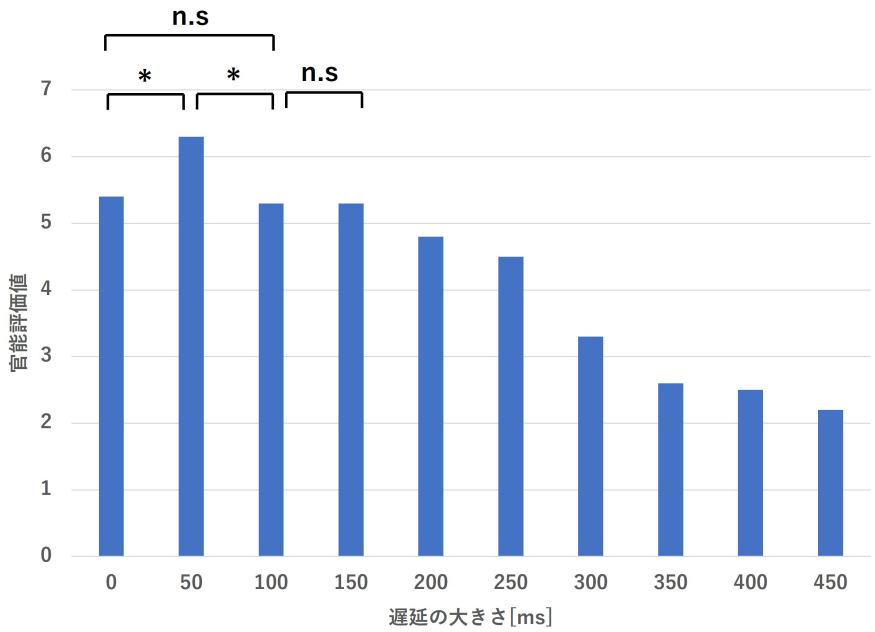

図 5.3: 実験 4 の遅延の大きさと自己主体感に関する官能評価の遷移

は 0ms の評価よりも高まった．実験 5 ’ のアンケート結果に対して t 検定を行ったところ，有意差は見られなかった．実験 4 では有意差のある評価の高まりが見られたが実験 5 と 5 ’ では有意差のある高まりが見られなかった．ここから奥行き方向への移動制限による評価の高まりへの寄与は考えづらく，自己主体感と拡大的身体所有感を高めるとは言えない．

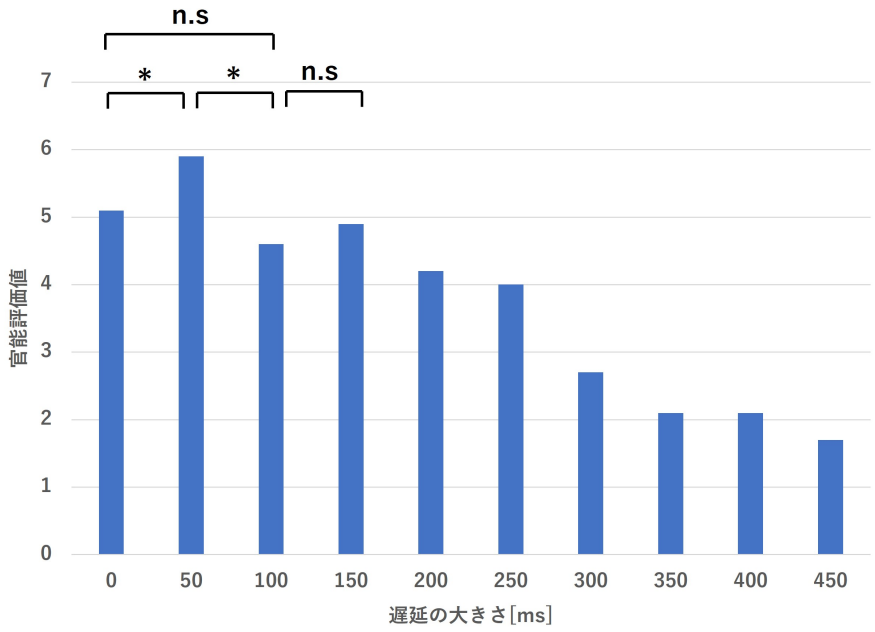

図 5.4: 実験 4 の遅延の大きさと拡大的身体所有感に関する官能評価の遷移

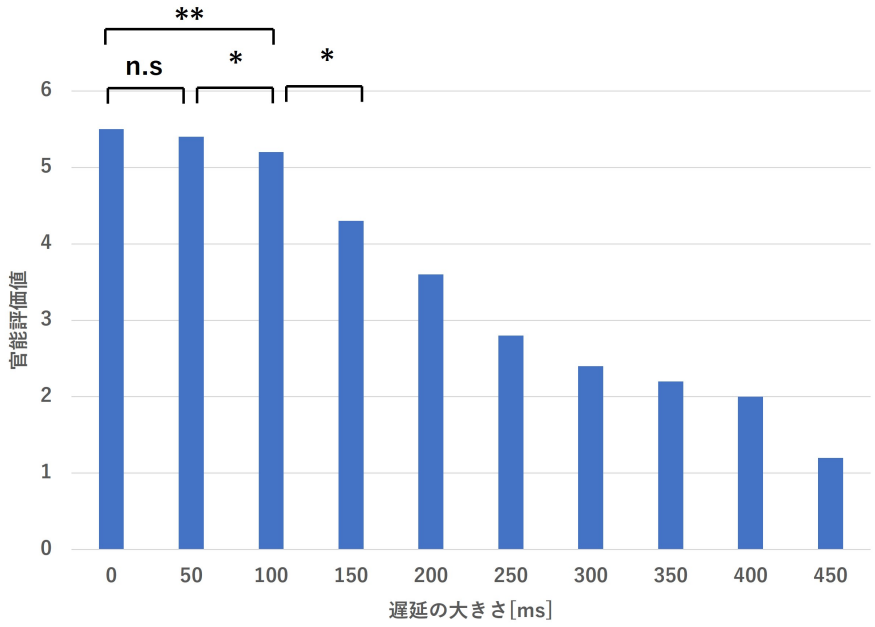

図 5.5: 実験 5 の遅延の大きさと自己主体感に関する官能評価の遷移

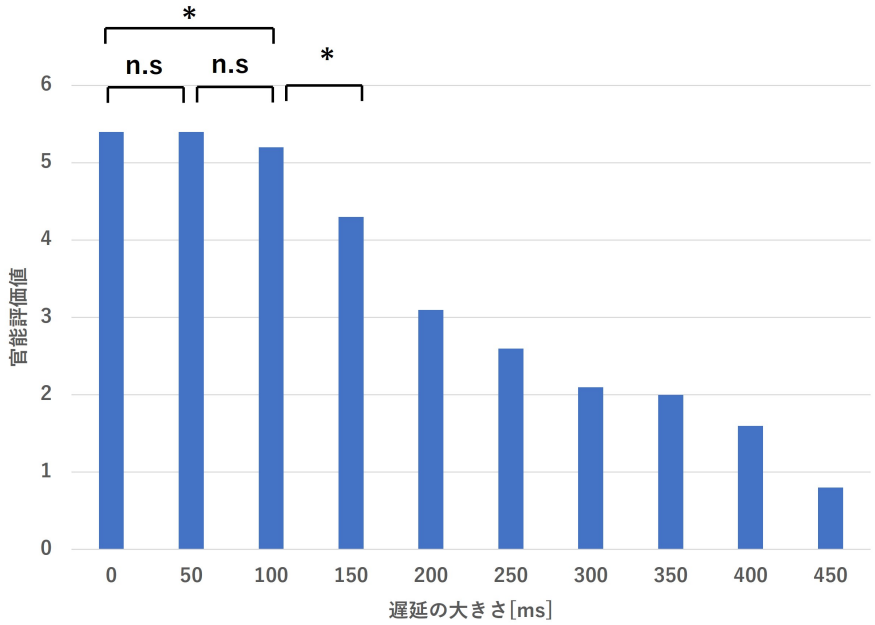

図 5.6: 実験 5 の遅延の大きさと拡大的身体所有感に関する官能評価の遷移

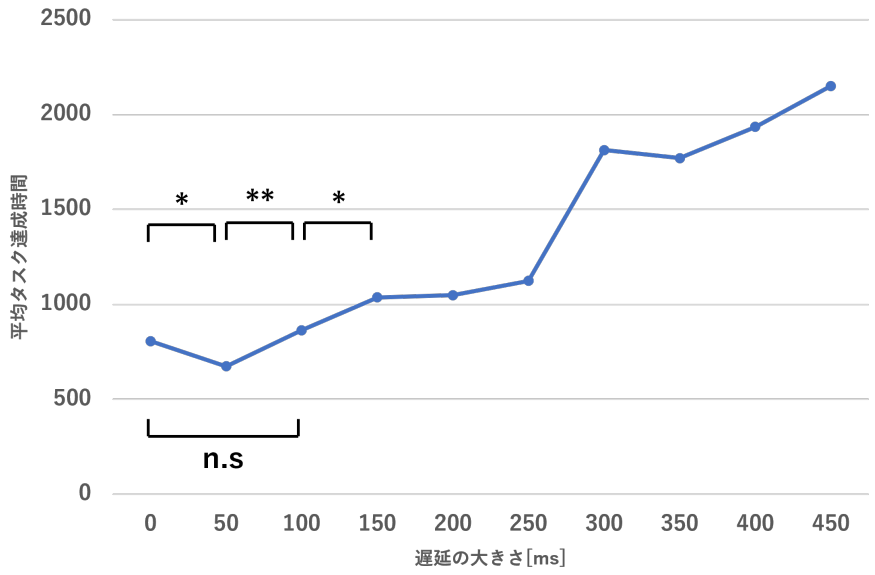

図 5.7: 実験 5 ’の遅延の大きさの変化に対する平均タスク達成時間の遷移

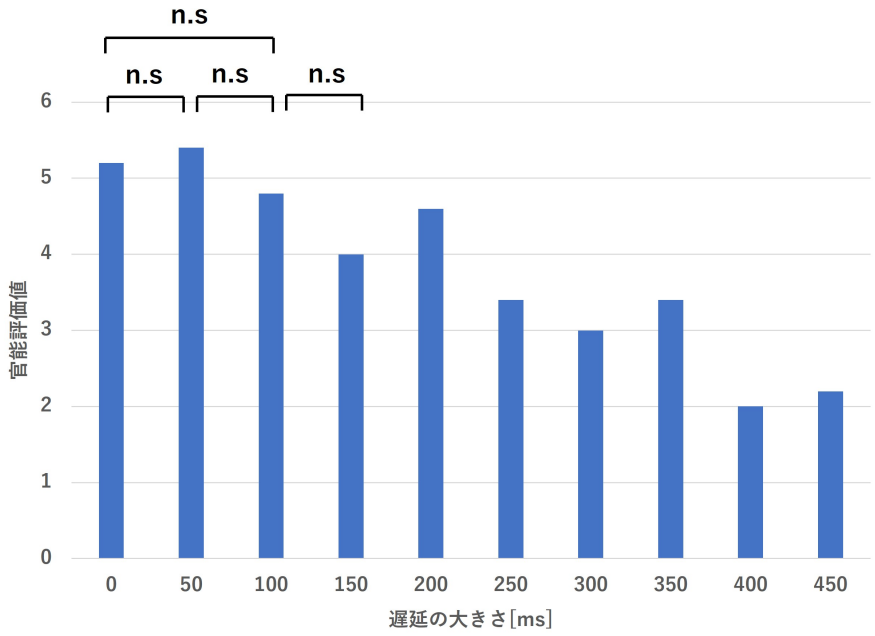

図 5.8: 実験 5 ’の遅延の大きさと自己主体感に関する官能評価の遷移

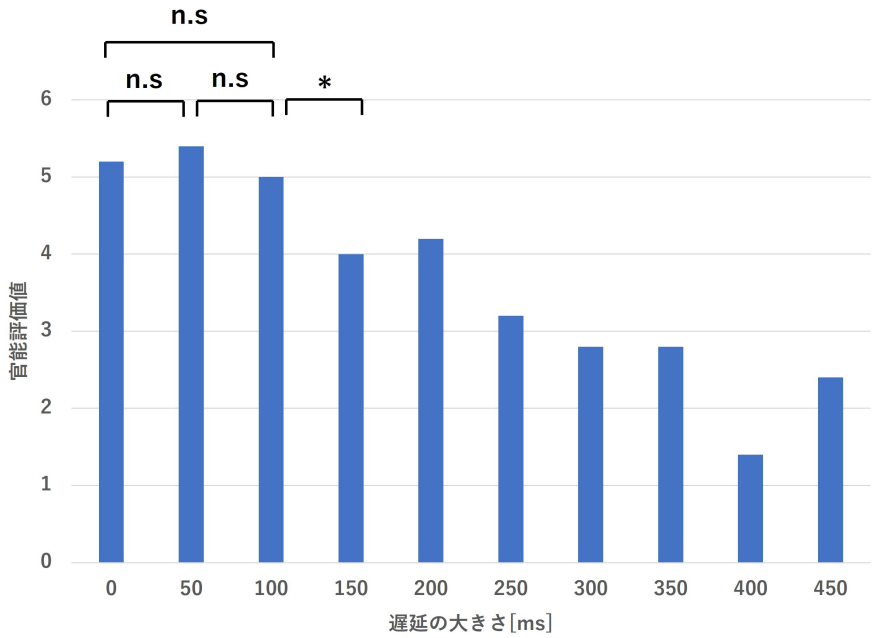

図 5.9: 実験 5 ’の遅延の大きさと拡大身体所有感に関する官能評価の遷移

5.3　台に関する実験

5.3.1　実験の概要

4.3 節で述べた台に関する要素，すなわち台の大きさと台の位置関係を変化させた実験を行う．まず，比較実験として顕著な違いが現れるか確認するために予備実験 6∼9 を行った．奥行き移動制限は行わずに，移動量の比率を，前節で行った実験における 2 つの値の中間に設定した．しかし比較に適した結果を得ることはできなかった．そこで奥行き移動制限は行わないまま，移動量の比率を，前節で行った実験において良好な結果が得られた小さな方に設定して，本実験を想定して実験 10∼12 を行った．しかし大きな違いはなく比較に適した結果を得ることができなかったため，実験 6∼9 を予備実験 1，実験 10∼12 を予備実験 2 と扱い，さらなる実験を行う．予備実験の詳細については本実験と合わせて後述する．本実験として，移動量の比率を前述の小さな方に設定した上で，前節で行った実験で良好な結果が得られた，奥行きへ方向への移動の制限ありで，実験 13∼15 を行う．予備実験 1 と 2，本実験のそれぞれの組では台の大きさで 2 通り，台同士の距離で 2 通りの計 4 通りの実験を行う．これらのうち 1 つを，予備実験 2 では実験 4 で，本実験では実験 5 で充当する．実験結果を比較することでこれらの要素がわずかな遅延による操作性の向上に寄与するのか考察する．被験者数は実験 6 は 18 名，実験 7 は 17 名，実験 8 と 9 は 7 名，実験 10∼15 (予備実験 2 と本実験) はそれぞれ 10 名であった．すべての被験者から実験参加について同意が得られている．

5.3.2　パラメータ設定

実験システムにおける各要素，パラメータの設定は特に言及しない限り実験 2 と同じである．予備実験 1 と 2 (実験 6∼12 および実験 4) では奥行き移動制限は行わず，本実験 (実験 13∼15 および実験 5) では奥行き移動制限を行う．台の大きさと位置関係について表 5.2 に示す．実験 2 では台の大きさは有意な成績向上の確認された実験 1 (平均値) よりも小さかった．実験 8 と実験 9，実験 11 と実験 12，実験 14 と実験 15 では台の大きさは実験 1 の台の大きさの平均値と同じ 58mm である．また実験 2 では台同士の距離は有意な成績向上の確認された実験 1 (平均値) よりも狭

表 5.2: 実験 1~15 における台の大きさと位置関係
(直径/垂直距離/水平距離/直線距離)

実験	手座標距離 [mm]	画面座標距離 [mm]	移動量の比率
実験 1(距離は平均)	71.8/156/156/220	56/122/122/173	0.78
実験 2 & 3	46/67/147/161	72/89/222/239	1.48
実験 4 & 5	46/67/147/161	72/89/222/239	0.78
実験 6	46/67/147/161	49/72/157/172	1.07
実験 7 & 9	46/92/201/220	49/98/215/235	1.07
実験 8	58/67/147/161	62/72/157/172	1.07
実験 9	58/92/201/220	62/98/215/235	1.07
実験 10 & 13	46/92/201/220	35/71/115/126	0.78
実験 11 & 14	58/67/147/161	44/52/115/126	0.78
実験 12 & 15	58/92/201/220	44/71/156/171	0.78

かった．実験 7 と実験 9，実験 10 と実験 12，実験 13 と実験 15 では台同士の距離は実験 1 の平均の値と同じ 220mm である．移動量の比率は実験 6~9 では 1.07，実験 10~15 (および実験 4 と 5) では 0.78 である．

5.3.3　実験の手順

実験手順は先行実験と同一である．同じ動作，手順，タスクを被験者に行ってもらう．自己主体感や拡大的身体所有感に関するアンケートも同じ評価基準で解答してもらう．なお実験 6 と実験 7 の被験者のうち 10 名は，1 回の試行において通常の 10 回よりも少ない 5 回の移動タスクを連続して行った．

5.3.4　実験結果と考察

実験 6~15 の各タスク達成時間を図 5.10~5.19 に示す．全ての実験において，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っている．しかし，実験 4 と実験 5 に加えて，実験 6 と実験 8，実験 11 と実験 12，実験 14 と実験 15 では遅延の大きさが 50ms のとき，操作成績が 0ms のときよりも向上した．マンホイットニーの U 検定を行ったところ，成績向上が見られた前述の 8 つのうち実験 5 を除く全ての実験において 0ms と 50ms の操作成績の間には有意差は見られなかった．予備実験 1 (実験 6~9) の結果を表 5.3 に，予備実験 2 (実験 4 と 10~12) の結果を表 5.4

に，本実験 (実験 5 と 13∼15) の結果を表 5.5 に整理し，比較する．まず，台同士の距離に着目する．実験 6 と 7，実験 8 と 9，実験 4 と 10，実験 5 と 13 の各ペアの結果を比較すると台同士の距離が近いときに操作成績は向上していた．本実験と位置付けている実験 5 と 13 の比較では，距離の近い実験 5 に有意差のある成績向上が確認できる．有意差に注目すれば，台同士の距離は小さいときに，わずかな遅延による操作成績の向上に寄与するようである．しかし，実験 11 と 12，実験 14 と 15 の比較では，台同士の距離にかかわらずいずれも向上が見られた．有意差は見られないものの検定における P 値を比較すると，距離の遠い方が P 値は低く，成績向上を期待できるのかもしれない．続いて台の大きさに着目する．実験 10 と 12，実験 13 と 15 の各ペアの結果を比較すると，台の大きさが大きいとき，わずかな遅延による操作成績の向上が見られた. なお，実験 6 と 8，実験 4 と 11 では，台の大きさにかかわらずいずれも向上が見られた．有意差は見られないものの検定における P 値を比較すると，台の大きい方が P 値は低く，成績向上を期待できるのかもしれない．一方で，実験 5 と 14 の結果を比較すると台の大きさが小さいときに有意差な成績向上が見られた. 有意差に注目すれば，台の大きさは小さいときに，わずかな遅延による操作成績の向上に寄与するのかもしれない.

次に自己主体感と拡大的身体所有感に関するアンケート結果について考察する (図 5.20∼5.39)．官能評価値は全体では遅延が大きくなるごとに小さくなっている．しかしいずれも官能評価値は実験 6 と実験 7，実験 10 と実験 11 では遅延が 50∼100ms もうけられているときに 0ms より高くなった．遅延の大きさが 0ms のときの官能評価と，50ms のときの官能評価に対して t 検定を行ったところ，有意差は見られなかった．また，これらのアンケート評価が高まった 4 つの実験には台に関するパラメータに共通する要素はなく，官能評価の高まりにおいて一貫した傾向は見られない．台の大きさと台同士の位置関係はわずかな遅延による官能評価の高まりには影響を与えてないようである.

表 5.3: 予備実験 1 (実験 6∼9) の比較項目と結果

		台同士の距離	
		近	遠
台の大きさ	大	実験 8[#] P=27.2%	実験 9[–]
	小	実験 6[#] P=54.8%	実験 7[–]

[#] 有意差の無い成績向上
[–] 成績向上無し

表 5.4: 予備実験 2 (実験 4 と 10∼12) の比較項目と結果

		台同士の距離	
		近	遠
台の大きさ	大	実験 11[#] P=31.2%	実験 12[#] P=20.6%
	小	実験 4[#] P=36.8%	実験 10[–]

[#] 有意差の無い成績向上
[–] 成績向上無し

表 5.5: 本実験 (実験 5 と 13∼15) の比較項目と結果

		台同士の距離	
		近	遠
台の大きさ	大	実験 14[#] P=44.4%	実験 15[#] P=33.7%
	小	実験 5[*] P=5.00%	実験 13[–]

[∗] 5%の有意差をともなう成績向上
[#] 有意差の無い成績向上
[–] 成績向上無し

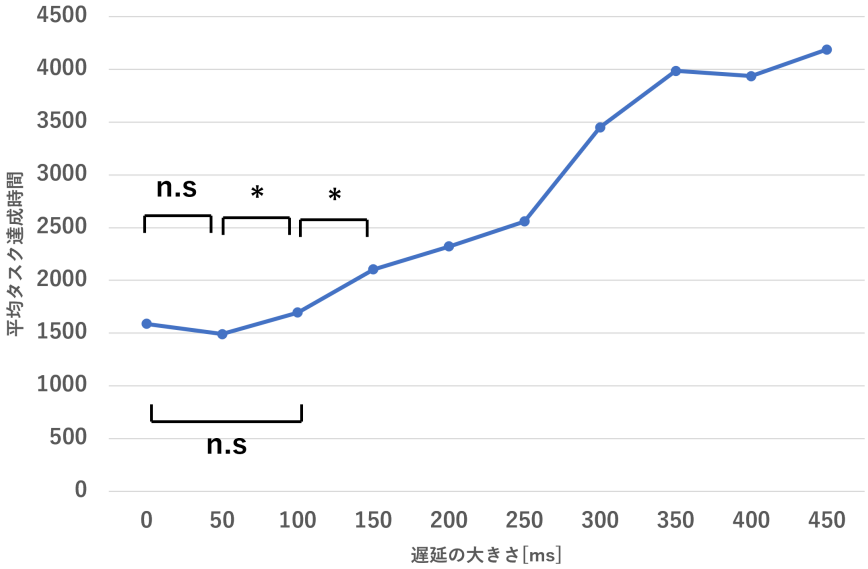

図 5.10: 実験 6 の遅延の大きさの変化に対する平均タスク達成時間の遷移

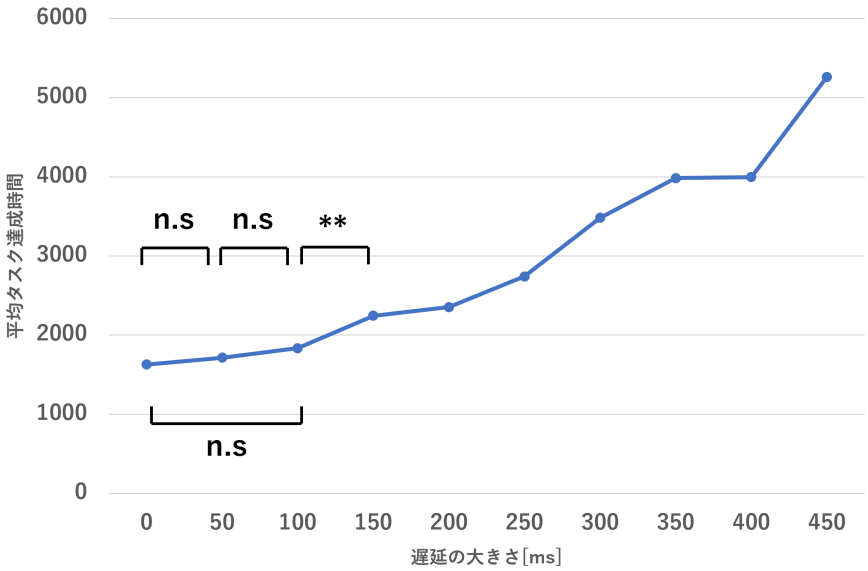

図 5.11: 実験 7 の遅延の大きさの変化に対する平均タスク達成時間の遷移

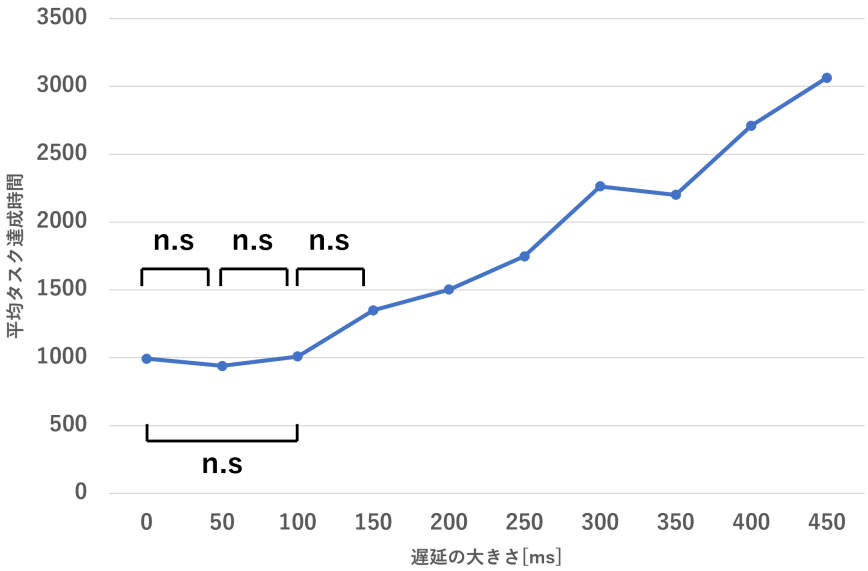

図 5.12: 実験 8 の遅延の大きさの変化に対する平均タスク達成時間の遷移

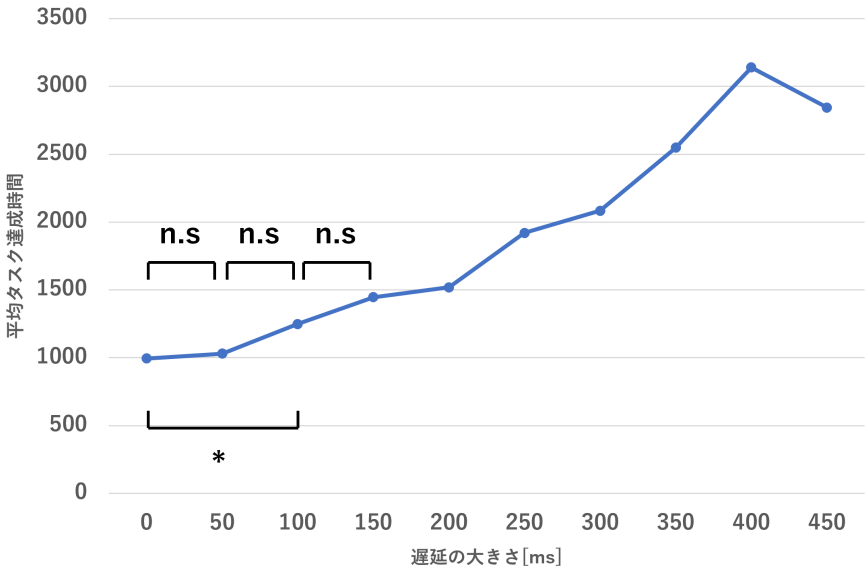

図 5.13: 実験 9 の遅延の大きさの変化に対する平均タスク達成時間の遷移

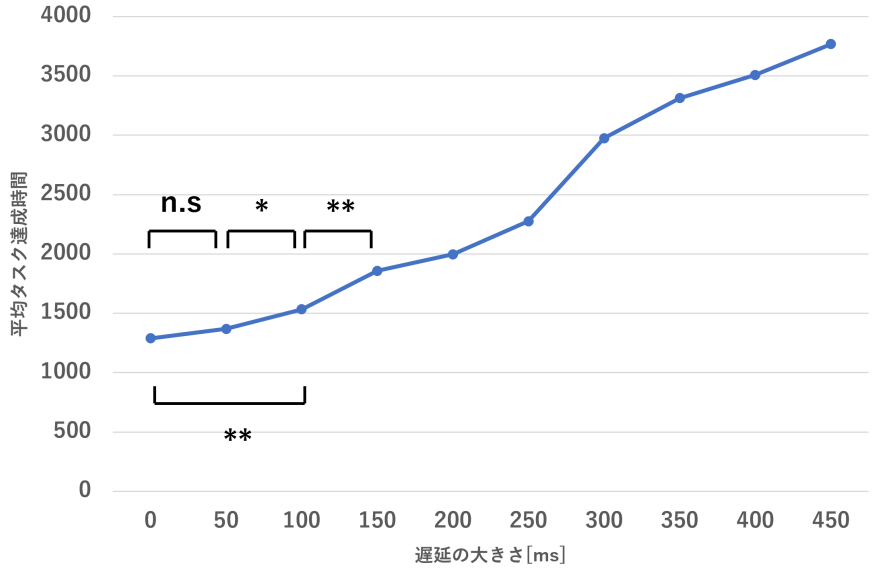

図 5.14: 実験 10 の遅延の大きさの変化に対する平均タスク達成時間の遷移

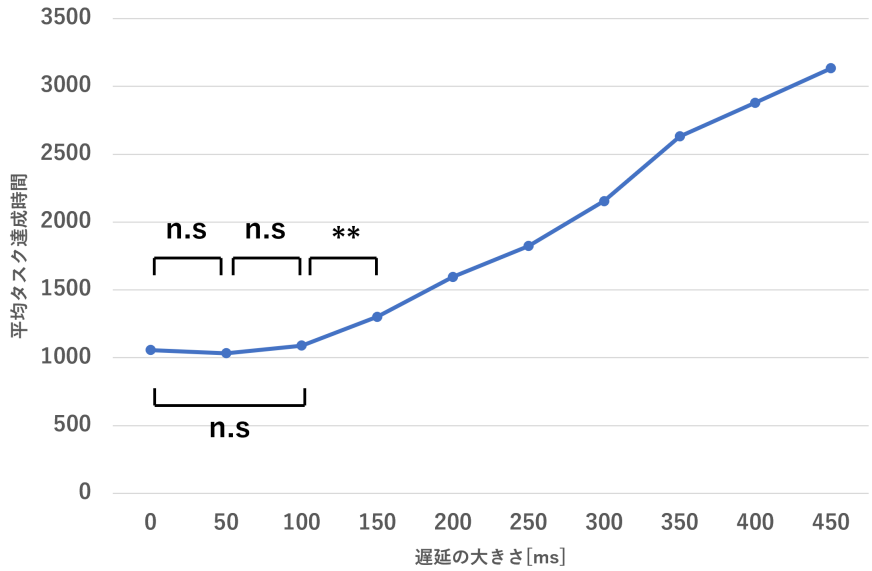

図 5.15: 実験 11 の遅延の大きさの変化に対する平均タスク達成時間の遷移

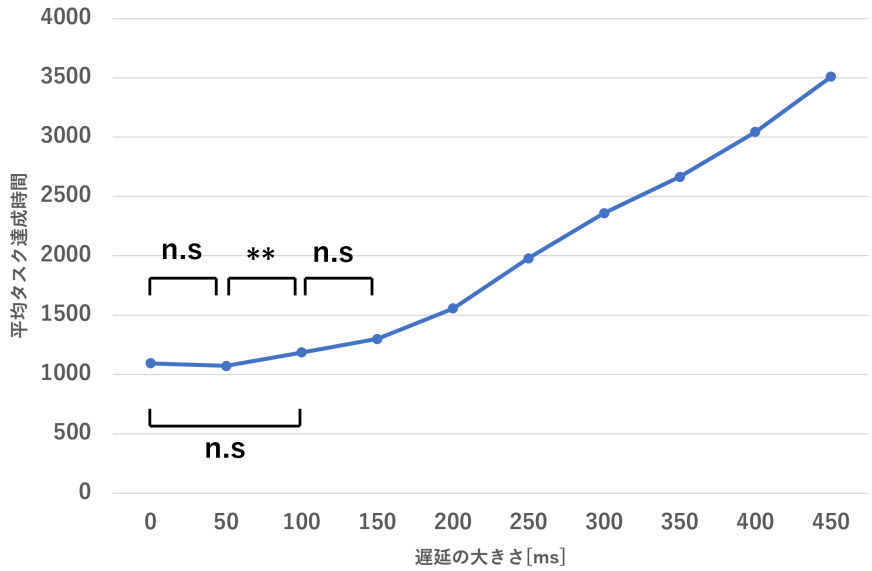

図 5.16: 実験 12 の遅延の大きさの変化に対する平均タスク達成時間の遷移

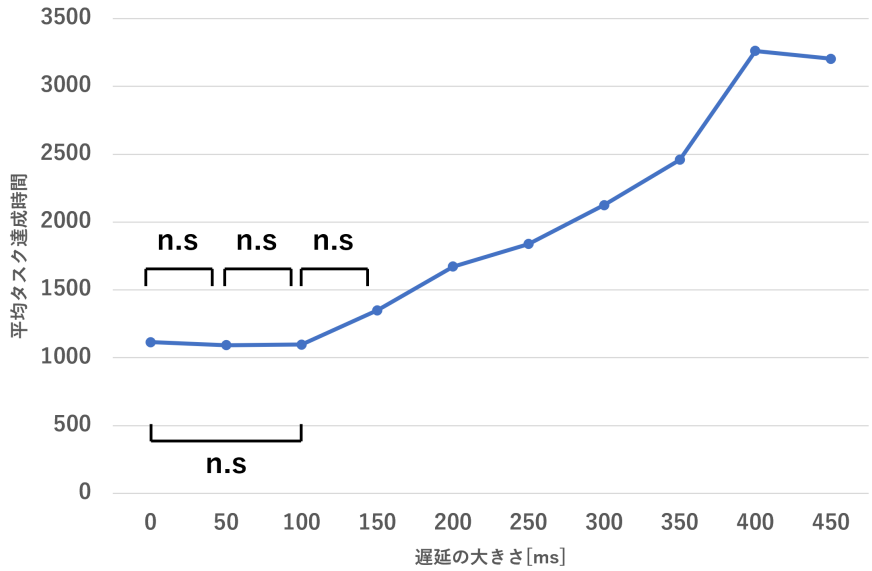

図 5.17: 実験 13 の遅延の大きさの変化に対する平均タスク達成時間の遷移

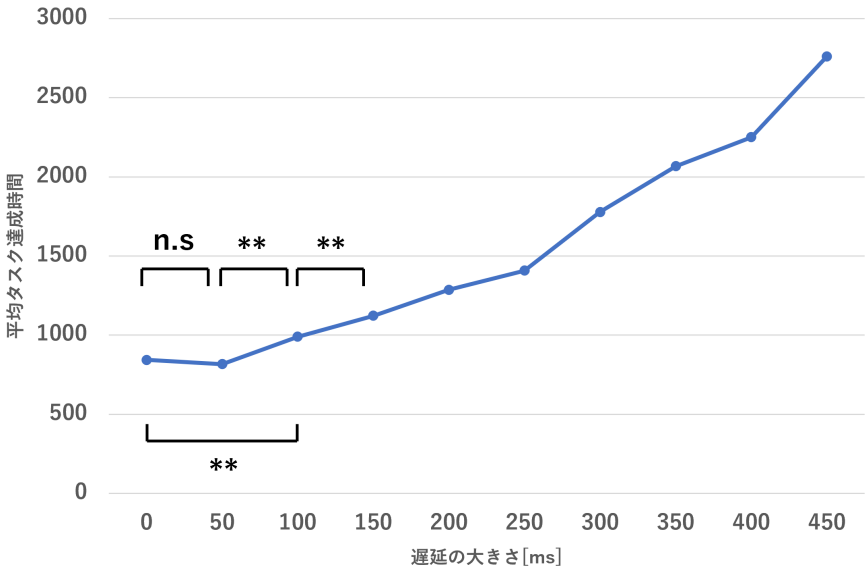

図 5.18: 実験 14 の遅延の大きさの変化に対する平均タスク達成時間の遷移

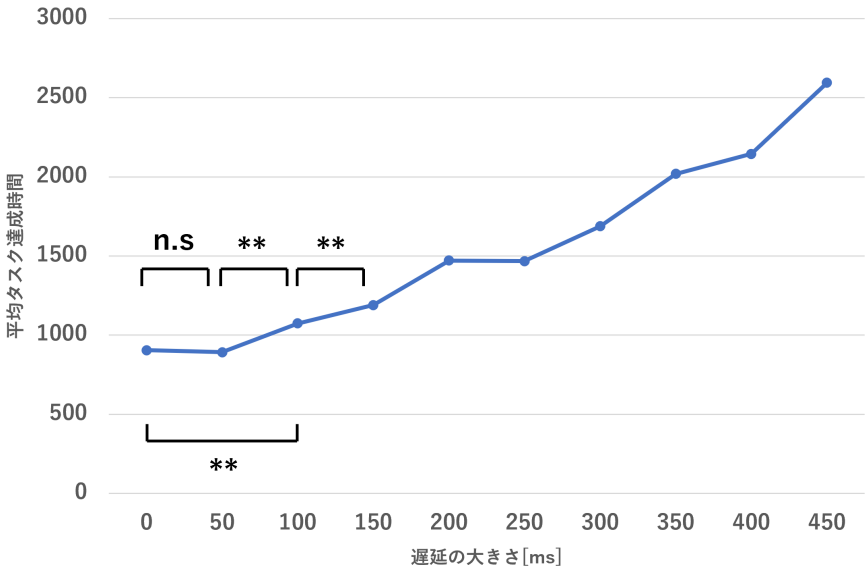

図 5.19: 実験 15 の遅延の大きさの変化に対する平均タスク達成時間の遷移

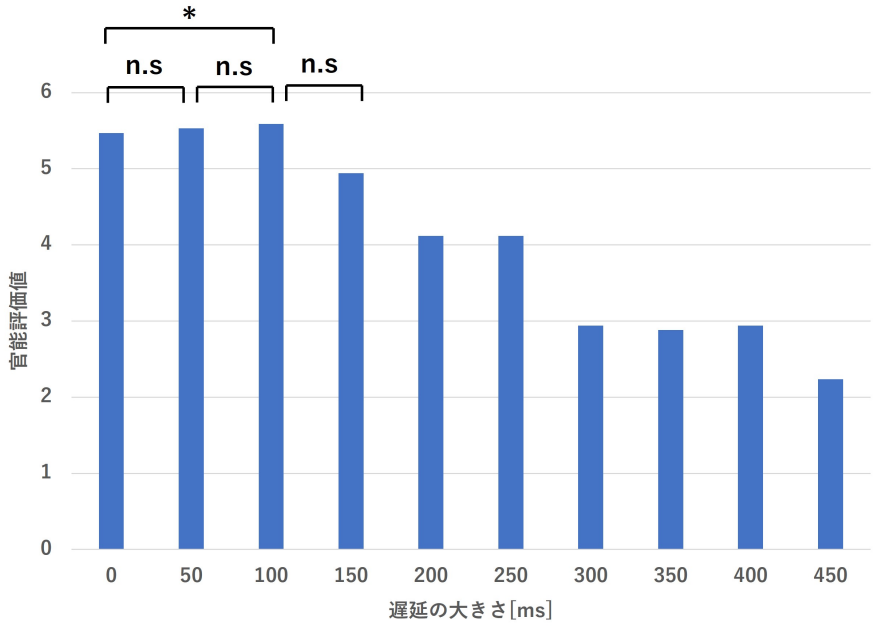

図 5.20: 実験 6 の遅延の大きさと自己主体感に関する官能評価の遷移

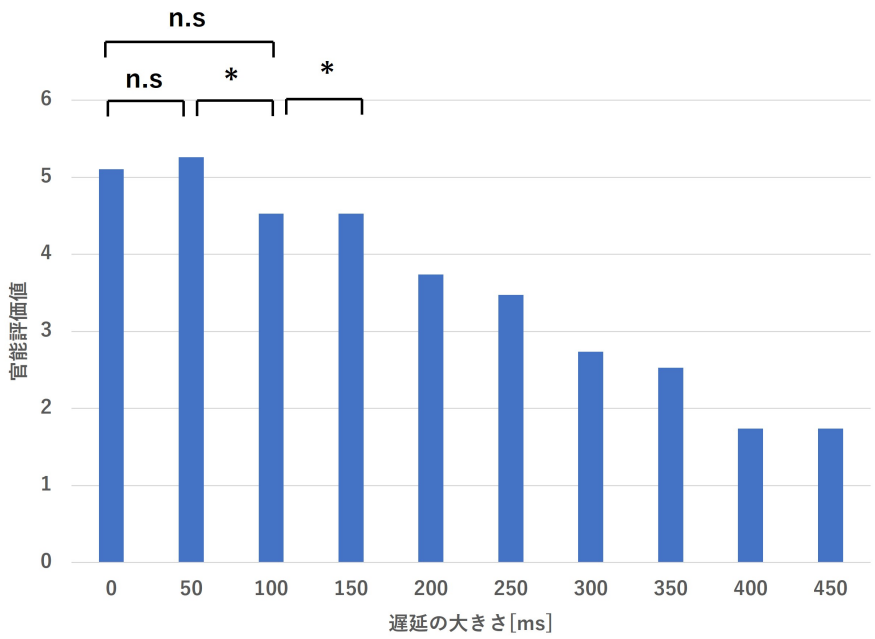

図 5.21: 実験 6 の遅延の大きさと拡大的身体所有感に関する官能評価の遷移

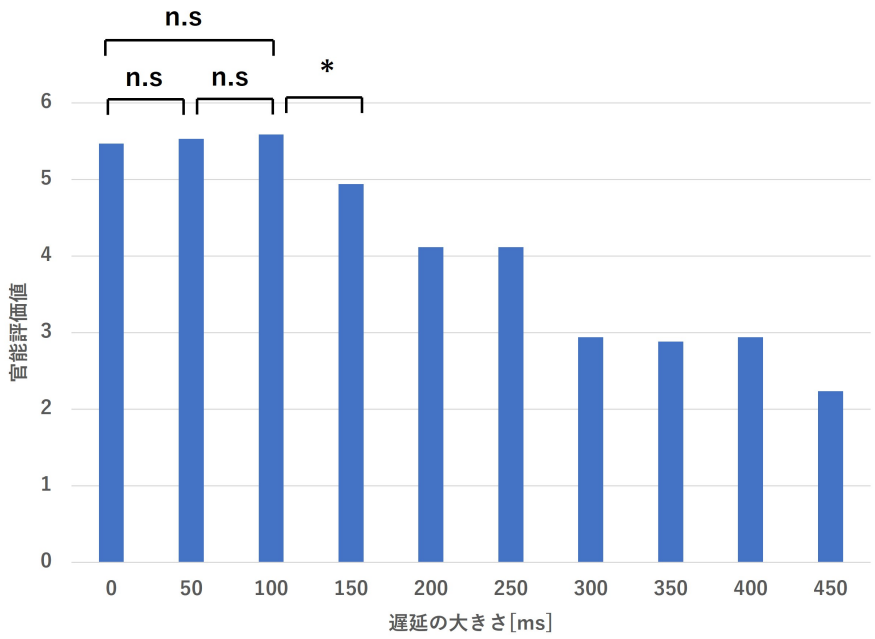

図 5.22: 実験 7 の遅延の大きさと自己主体感に関する官能評価の遷移

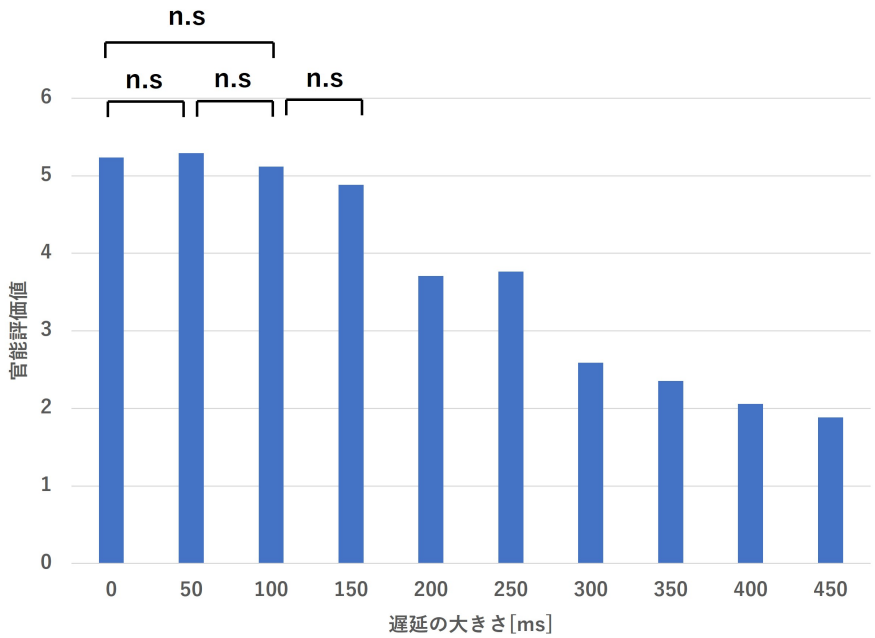

図 5.23: 実験 7 の遅延の大きさと拡大的身体所有感に関する官能評価の遷移

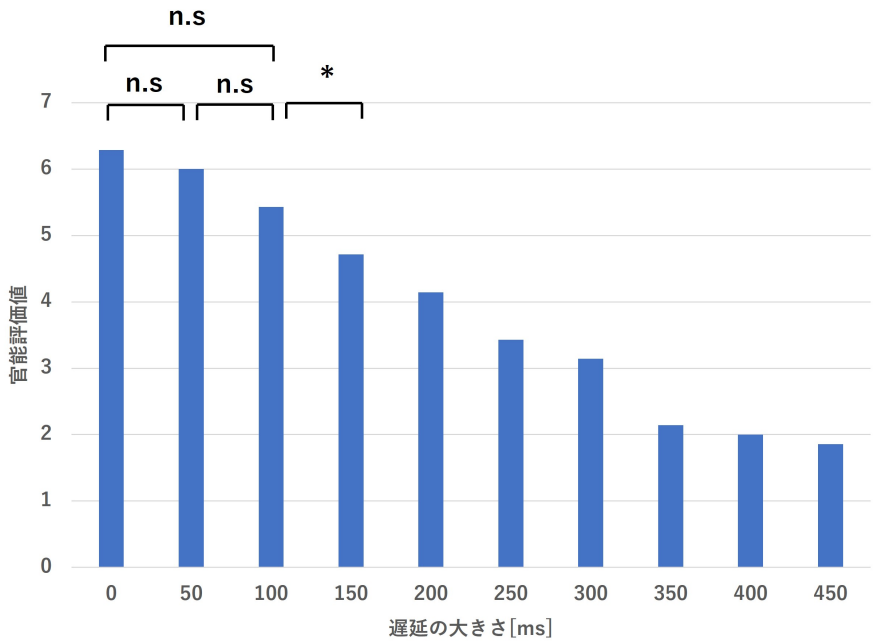

図 5.24: 実験 8 の遅延の大きさと自己主体感に関する官能評価の遷移

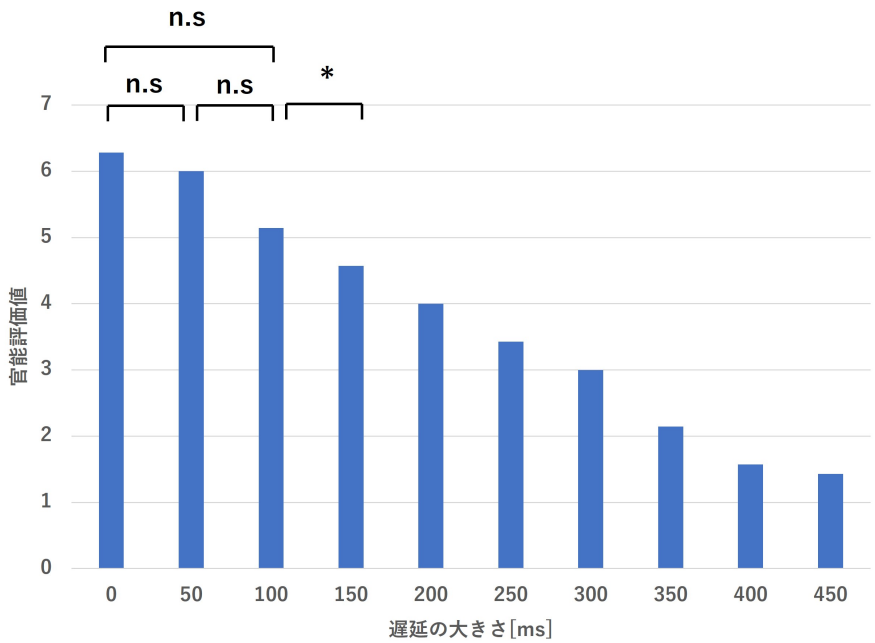

図 5.25: 実験 8 の遅延の大きさと拡大的身体所有感に関する官能評価の遷移

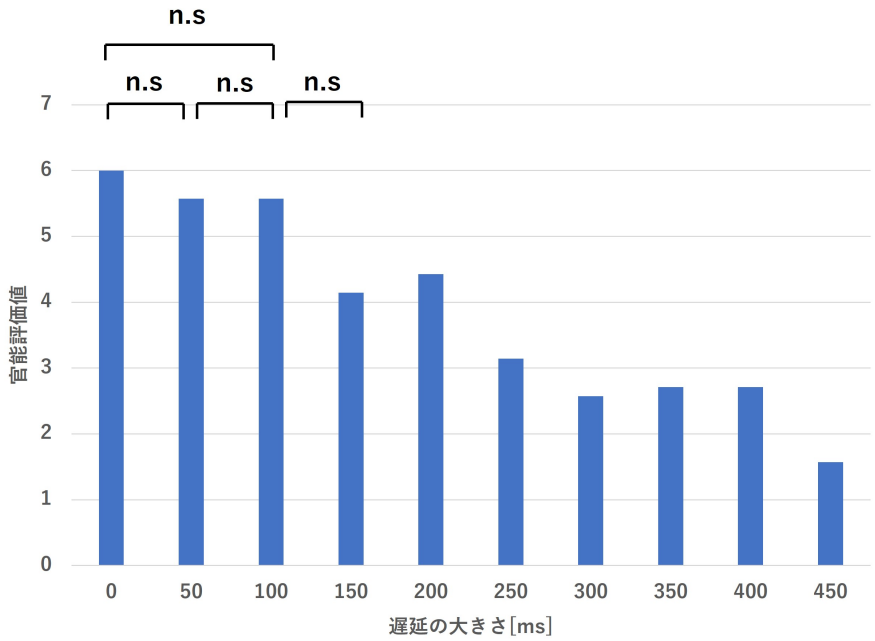

図 5.26: 実験 9 の遅延の大きさと自己主体感に関する官能評価の遷移

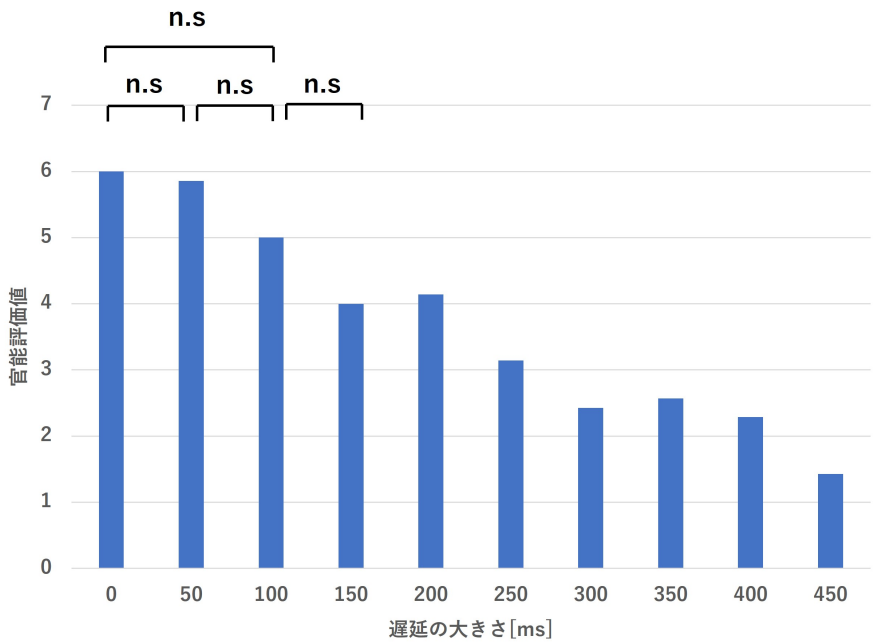

図 5.27: 実験 9 の遅延の大きさと拡大的身体所有感に関する官能評価の遷移

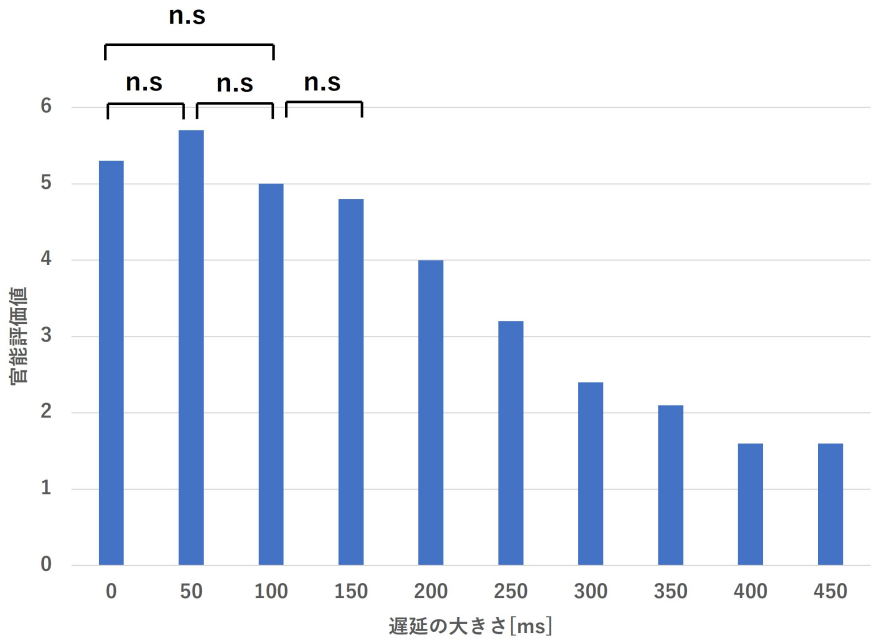

図 5.28: 実験 10 の遅延の大きさと自己主体感に関する官能評価の遷移

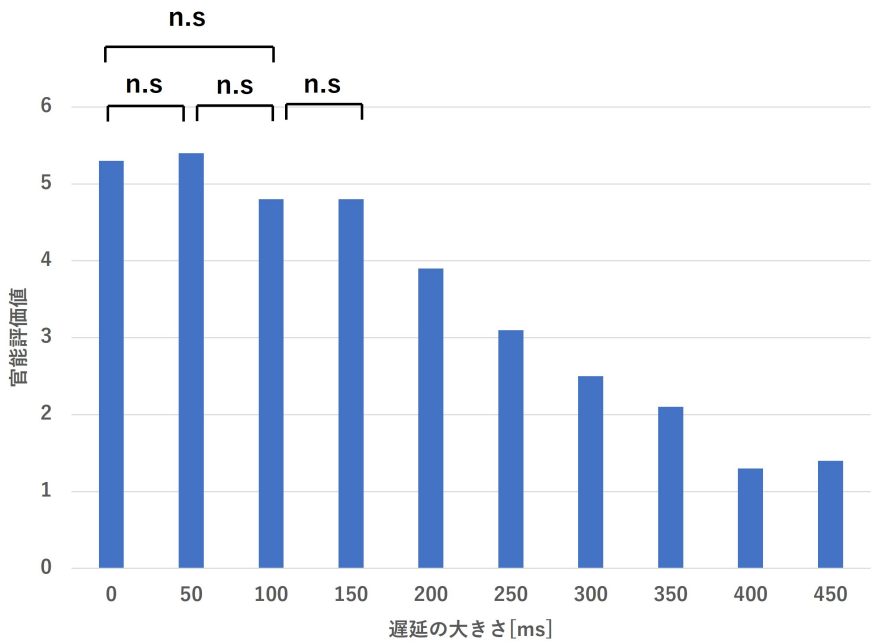

図 5.29: 実験 10 の遅延の大きさと拡大的身体所有感に関する官能評価の遷移

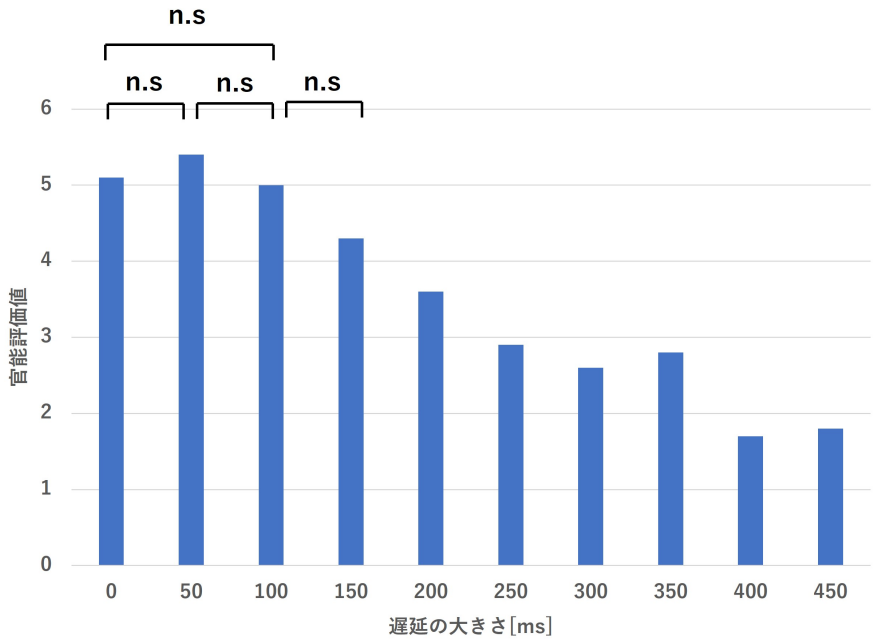

図 5.30: 実験 11 の遅延の大きさと自己主体感に関する官能評価の遷移

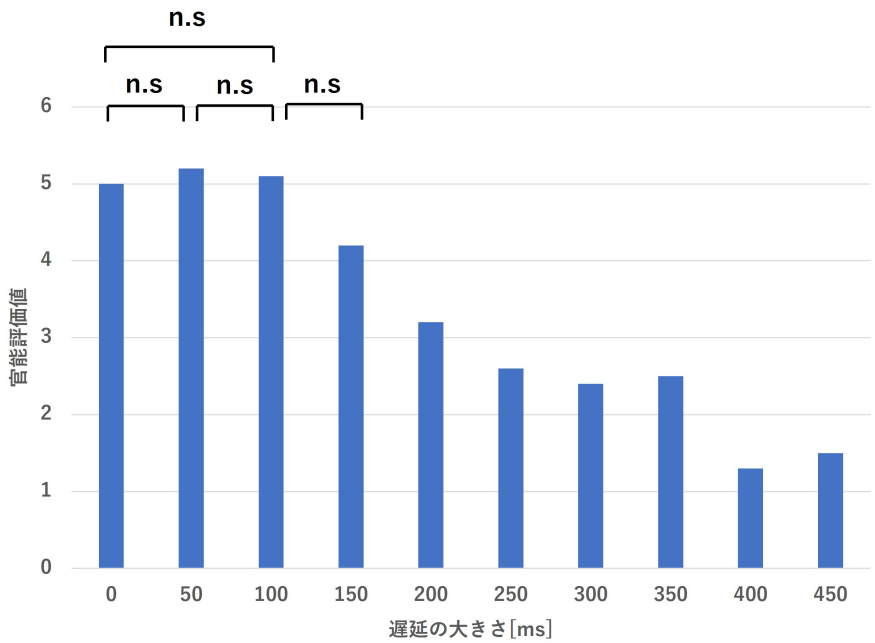

図 5.31: 実験 11 の遅延の大きさと拡大的身体所有感に関する官能評価の遷移

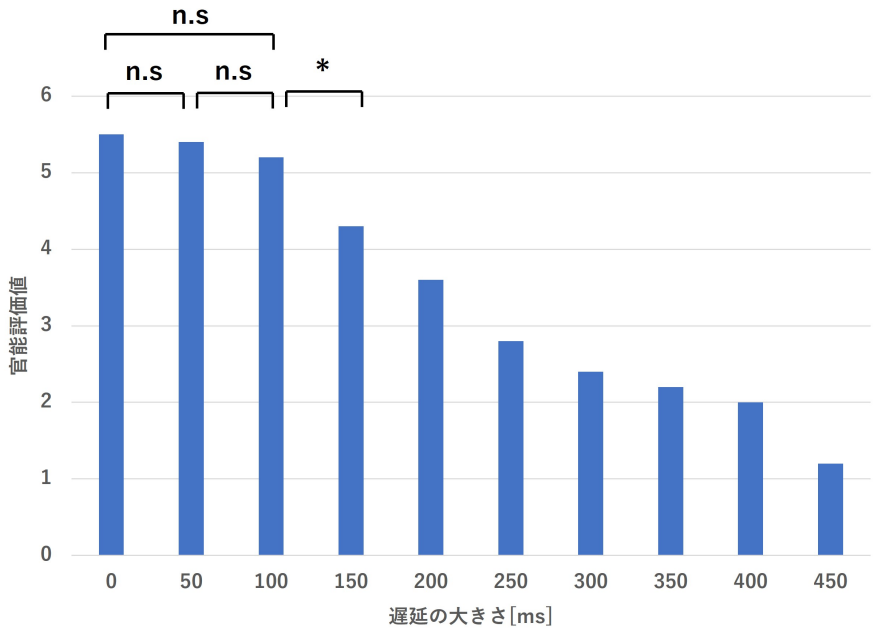

図 5.32: 実験 12 の遅延の大きさと自己主体感に関する官能評価の遷移

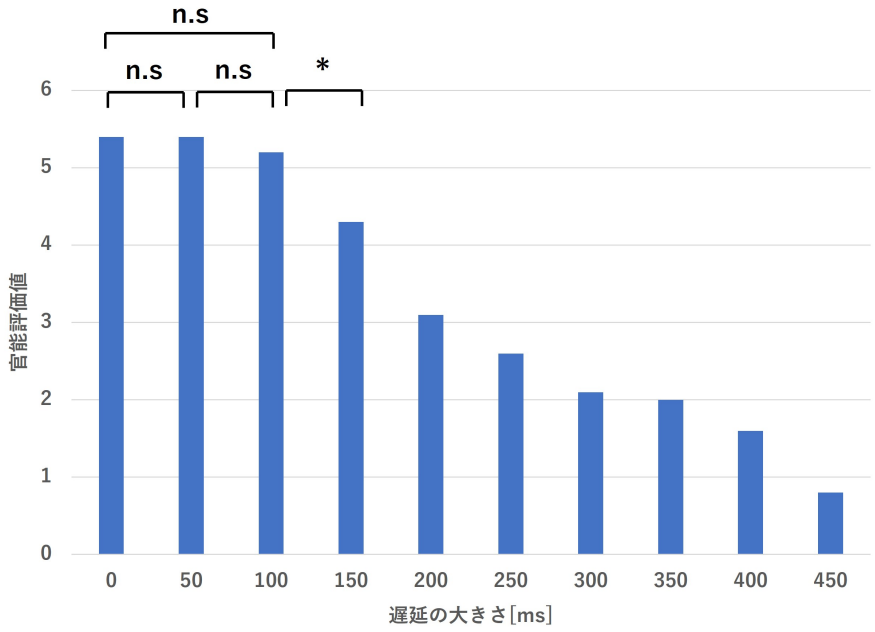

図 5.33: 実験 12 の遅延の大きさと拡大的身体所有感に関する官能評価の遷移

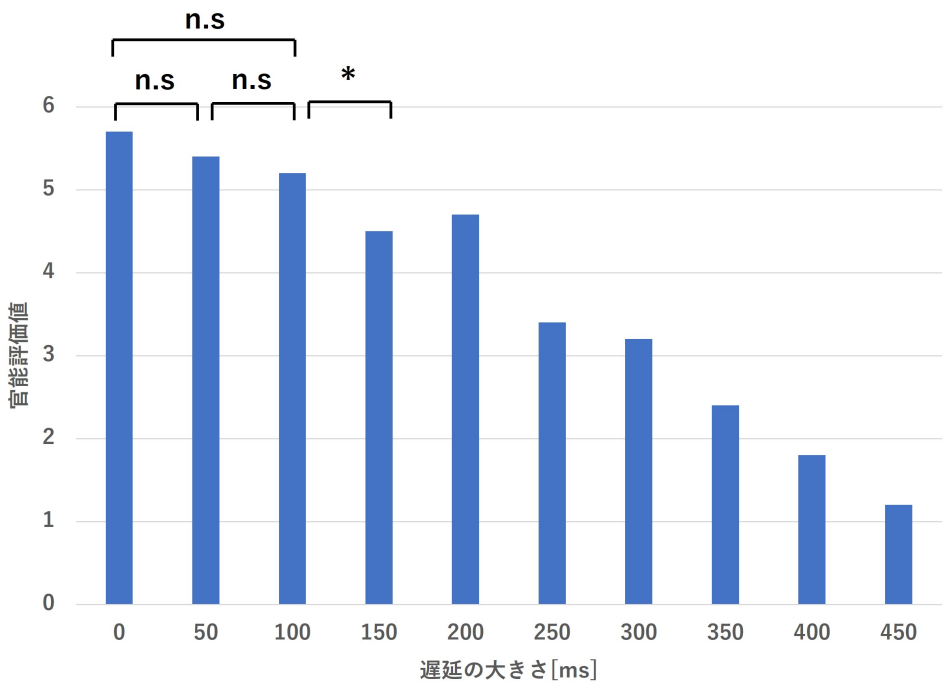

図 5.34: 実験 13 の遅延の大きさと自己主体感に関する官能評価の遷移

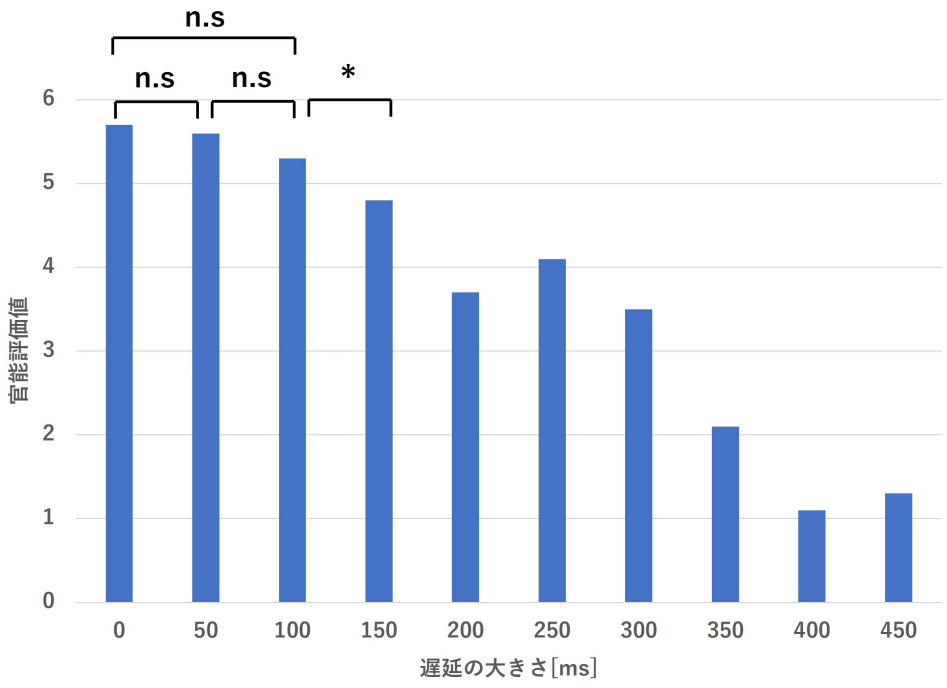

図 5.35: 実験 13 の遅延の大きさと拡大的身体所有感に関する官能評価の遷移

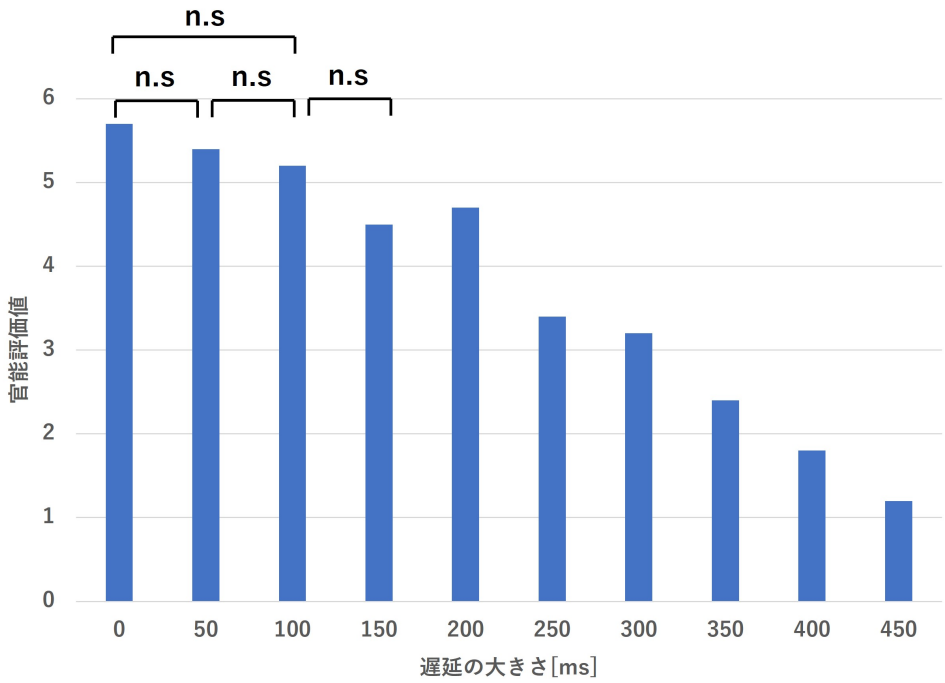

図 5.36: 実験 14 の遅延の大きさと自己主体感に関する官能評価の遷移

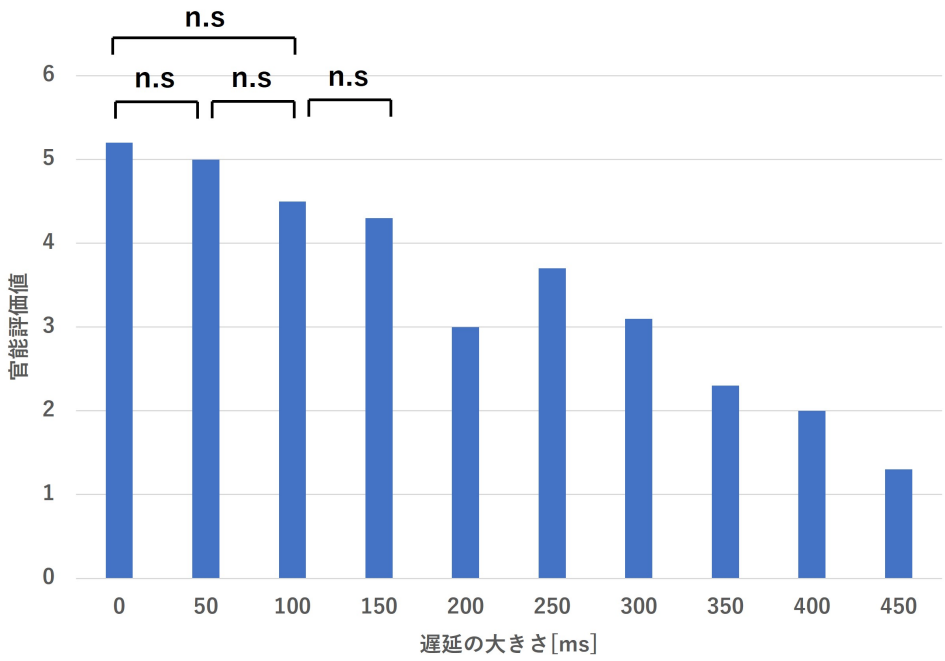

図 5.37: 実験 14 の遅延の大きさと拡大的身体所有感に関する官能評価の遷移

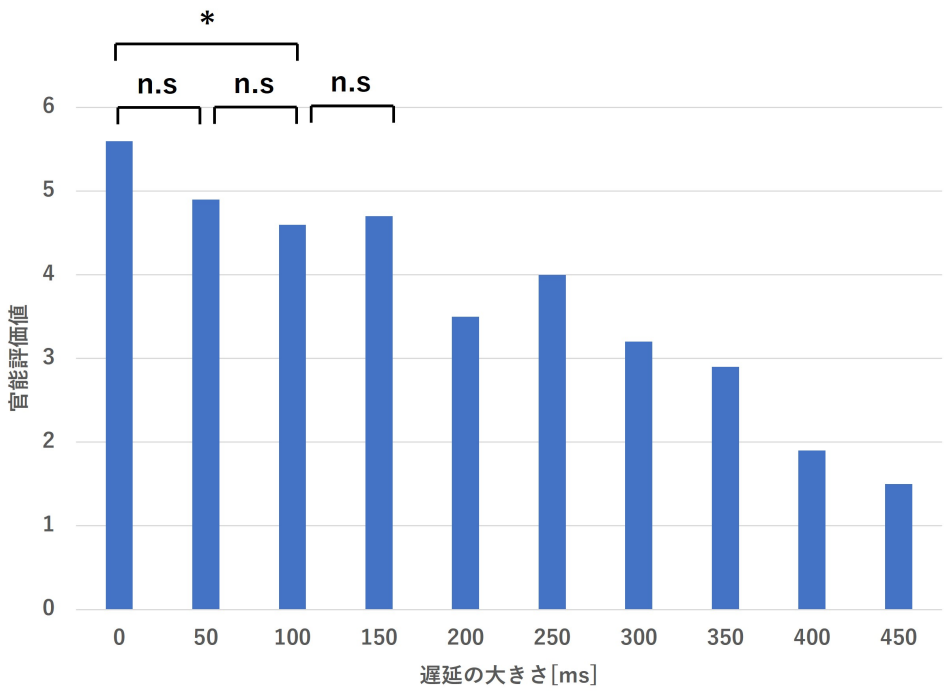

図 5.38: 実験 15 の遅延の大きさと自己主体感に関する官能評価の遷移

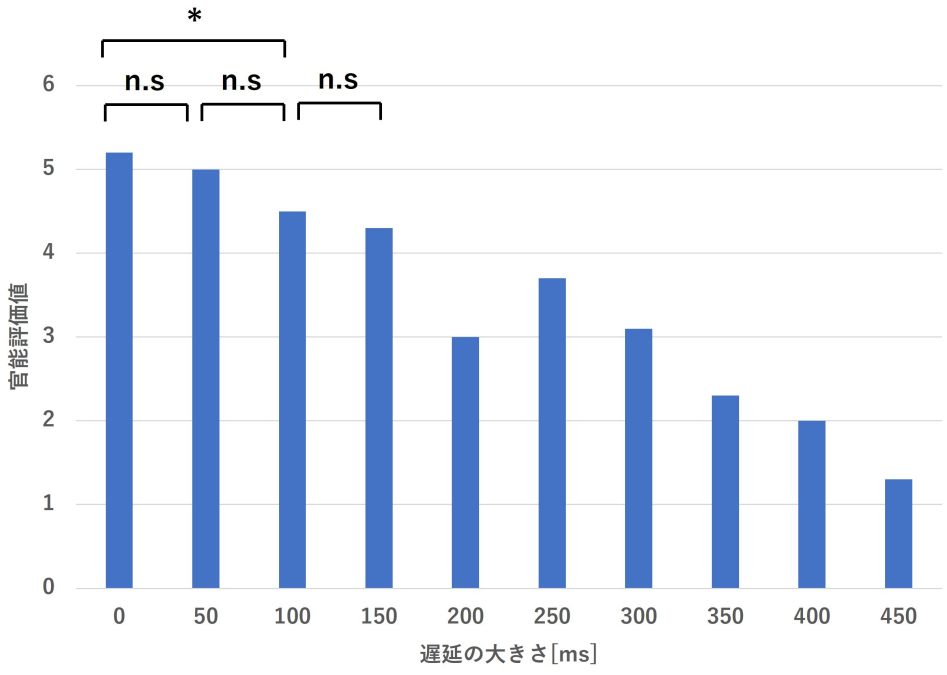

図 5.39: 実験 15 の遅延の大きさと拡大的身体所有感に関する官能評価の遷移

表 5.6: 実験 2∼15 の比較項目と結果

		台距離: 近		台距離: 遠	
		台: 大	台: 小	台: 大	台: 小
奥行き制限あり	比率 0.58		実験 5 ’ [*] P=1.88%		
	比率 0.78	実験 14[#] P=44.4%	実験 5[*] P=5.00%	実験 15[#] P=33.7%	実験 13[–]
	比率 1.48		実験 3[#] P=34.8%		
奥行き制限なし	比率 0.78	実験 11[#] P=31.2%	実験 4[#] P=36.8%	実験 12[#] P=20.6%	実験 10[–]
	比率 1.07	実験 8[#] P=27.2%	実験 6[#] P=54.8%	実験 9[–]	実験 7[–]
	比率 1.48		実験 2[–]		

[∗] 5%の有意差をともなう成績向上
[#] 有意差の無い成績向上
[–] 成績向上無し

5.4　全体を通した考察

操作性に影響を与えていると考えられる要素を個別に変更した実験 2∼15 を対象に，操作量に関する要素や台に関する要素の，わずかな遅延による操作性の向上への影響を調査した．実験の結果を表にまとめ比較すると (表 5.6)，奥行き方向への移動制限と操作量の比率は操作成績の向上に寄与することが示唆された．一方で台の大きさと台同士の距離に関する要素は成績向上に寄与しているようでもあるが，傾向を確認することはできなかった．自己主体感や拡大的身体所有感といった操作感覚に関する官能評価では，わずかな遅延による高まりが見られる場合もあったが，各要素との明確な関係を見出すことはできなかった．

第6章　むすび

本研究では，どのような要素，条件が適切な遅延による操作性の向上に寄与するのか調査した．その結果，奥行き方向への移動制限と，実際の手の移動量と画面内のマジックハンドの移動量の比率は，わずかな遅延による操作成績の向上に寄与することが示唆された．一方で台の大きさと台同士の距離に関しては，傾向を確認することはできなかった．それぞれの要素の変更により自己主体感や拡大的身体所有感のわずかな遅延による高まりが見られる場合もあったが，各要素との明確な関係を見出すことはできなかった．しかし冒頭に述べたように一部の要素を的確に設定することで操作成績の向上につなげられるのであれば，これはユーザーインターフェースの改善や操作機器の設計に応用できると期待できる．

今後は，第 4 章で挙げた操作量と台に関する以外の要素を変更し，わずかな遅延による操作成績の向上に寄与するさらなる要素を明らかにしていきたい．また自己主体感や拡大的身体所有感の高まりが見られないのは 50ms 間隔の遅延が，第 2 章で述べた知覚と触覚の知覚までの時間差を補うのに適していないことが原因の可能性がある．遅延の大きさをより細かく変更することで知覚と触覚の知覚までの時間差を補うのに最適な遅延の大きさを調査し，適切な遅延によって自己主体感や拡大的身体所有感を高めることができるかもしれない．さらなる研究によって遅延による操作成績の向上や，自己主体感や拡大的身体所有感の高まりを誘発させ，道具操作におけるユーザーエクスペリエンスの向上に貢献したい．

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.

最後に，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.

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, 2013.

[3] Shaun Gallagher, “Philosophical conceptions of the self: Implications for cognitive science”, Trends in Cognitive Science, 4, pp.14–21, 2000.

[4] 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.

[5] 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.

[6] 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.

[7] 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，マツダ技報，No.32， pp. 42-–47，2015.

[8] C.Farrer，G.Valentin，J.M.Hupe，“Thetimewindowsofthesenseofagency”，ConsciousnessandCognition，Vol.22，No.4，pp.1431–1441，Oct.2013.

[9] 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, 第 24 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 2019.

[10] R. Akimoto, M. Miyaji, K. Funahashi, K. Tanida, S. Mizuno, “Positive Effect of Slight Delay for Operational Performance”, IEEE-GCCE, pp.162–166, 2021.

[11] Tobias Heed, “Somatosensory Cortex Efficiently Processes Touch Located Beyond the Body”, Current Biology, 29, 24, pp.1301–1303, 16, December 2019.

[12] 桑原圭裕, 映像と音の同期–「動画先行の原則」の根拠と応用, 映像学, No.102, pp. 54–74, 2019.

[13] 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.

[14] エルンスト・ペッペル (著), 田中忠行・尾形啓次 (訳) , 意識の中の時間, 岩波書店, 1995.

[15] トム・スタンフォード/マットウェブ (著)，夏目大 (訳)，Mind Hacks ——実験で知る脳と心のシステム，オライリージャパン，p.216，2005.

[16] 田中美幸, 石橋圭太, 岩永光一, ソレノイドによる触覚刺激に対する反応時間について, 日本人間工学会第 53 回大会, 2012, doi:10.14874/jergo.48spl.0.274.0

[17] 三輪陽雲，舟橋健司，谷田公二，水野慎士, 道具操作におけるタスクの違いとわずかな遅延の積極的影響に関する調査，第 27 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集，2D1-5, 2022.

発表論文リスト

1. 三輪陽雲，舟橋健司，谷田公二，水野慎士, 道具操作におけるタスクの違いとわずかな遅延の積極的影響に関する調査，第 27 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集，2D1-5，2022.9.
2. 三輪陽雲，舟橋健司，谷田公二，水野慎士, 移動タスク距離の違いがわずかな遅延による操作成績向上に与える影響に関する調査，第 28 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集，2D2-01，2023.9.
3. Yakumo Miwa and K. Funahashi and 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.459–463，2023.10.
4. Yakumo Miwa and K. Funahashi and K. Tanida and S. Mizuno，Effects of moving task condition on improving operational performance with slight delay，The 31st IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (採録)，2024.3.