



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

Positive effect of slight delay and task difference for operational performance

三輪陽雲¹⁾, 舟橋健司²⁾, 谷田公二³⁾, 水野慎士⁴⁾

Yakumo MIWA, Kenji FUNAHASHI, Koji TANIDA and Shinji MIZUNO

- 1) 名古屋工業大学 (〒465-8555 名古屋市昭和区御器所町, y.miwa.915@stn.nitech.ac.jp)
- 2) 名古屋工業大学 (〒465-8555 名古屋市昭和区御器所町, kenji@nitech.ac.jp)
- 3) 近畿大学 (〒577-8502 東大阪市小若江 3-4-1, tanida@mech.kindai.ac.jp)
- 4) 愛知工業大学 (〒407-0392 豊田市八草町八千草 1247, s_mizuno@aitech.ac.jp)

概要: 当研究室のこれまでの実験で、道具操作におけるわずかな遅延が操作成績を向上させることが示唆された。ところが、見栄えやタスクが若干異なる実験では好影響は確認できなかった。そこで本研究では、わずかな遅延により成績が向上する要件を調査した。見栄えは変更したままタスクを調整することで、改めて成績向上が示唆される結果を得た。操作タスクの難易度の影響が確認できた。

キーワード: 道具操作, 遅延, 操作感覚

1. はじめに

筆者らはこれまでに、遅延が道具操作に及ぼす影響を調査している。一般にレイテンシは操作感覚に悪影響を与えるだけだと考えられている。一方で、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。」と、遅延を好意的に捉えている(文献[1]の 2.2 節最後)。そこで、比較的簡単な道具操作を対象に実験を行い、遅延の影響を調べた。実験は、単純なボタン押し操作等よりもやや複雑なタスクにおいて、遅延を容易に実現するために、VR 環境で行った。画面にはマジックハンドが表示されている。被験者は 3 次元位置入力デバイスによりマジックハンドを操作する。そのマジックハンドにより、画面内で球を一方の台から他方の台へと移動させる(図 1)。なお、入力デバイスの操作から、画面内のマジックハンドの反応まで、意図的に遅延を設ける。その結果、50ms-100ms 程度のわずかな遅延において、操作成績が向上(球を移動させる時間が減少)した。より大きな遅延においては、成績は低下した(文献[2], 実験 1, 図 2(左))。この結果を再確認するために、同様の実験を改めて行った(文献[3], 実験 2, 図 2(右))。加えて、入力用に利用したデバイスの力覚提示

機能により操作支援や妨害を行うことがあるかもしれないと予め被験者に伝えておいた上で、実験後に官能評価を行った。その結果、50ms-150ms 程度の遅延において、被験者は支援を受けていると感じていたものの(図 3)、明確な成績の向上は確認できなかった。なお、より大きな遅延においては、成績は明らかに低下して、また妨害を受けていると感じていた。実験 2 の実験システムは、実験 1 の実験システムと同様ではあったが、若干の違いがあった。当初は、少々の差異は結果に本質的な影響はなく、同様の傾向が得られるものと想定していた。さらには、より顕著に傾向が現れることも期待していた。しかし結果は前述の通りであった。そこで本研究では、まずこれら 2 つの違いを精査する。その上で追加実験を行い、いずれの要素が遅延の好影響に繋がるのか評価する。

2. 実験 1 と 2

2.1 実験システムと手順

実験では、入力装置に PHANTOM (Geomagic Phantom Omni)を使用した。出力装置として 22 インチ液晶ディスプレイを用いた(図 4)。画面に表示されたマジックハンドは PHANTOM スタイラスと連動している。被験者は PHANTOM を操作することで画面上のマジックハンドを操作し、画面内の対象物を台から台へ移動させる。



図 1 (左)実験 1 の画面, (右)実験 2 の画面

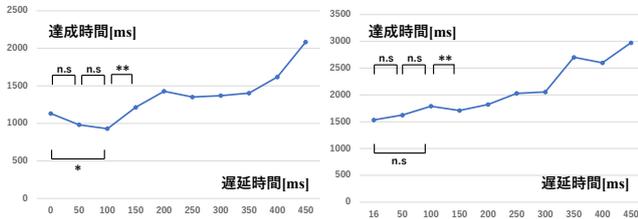


図 2 (左)実験 1 の操作成績, (右)実験 2 の操作成績

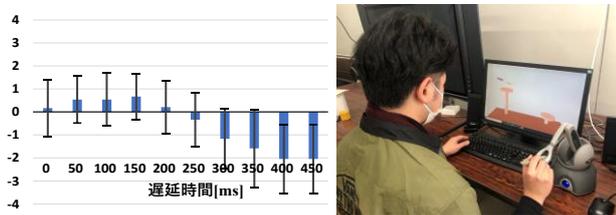


図 3 実験 2 における支援 (プラス)と妨害(マイナス)

図 4 実験の様子

PHANTOM とマジックハンドの間に遅延をもうけることで、被験者の手からマジックハンド、そして対象物の動きに対しての遅延を実現する。操作成績を得るために対象物の移動時間を計測したい。また定常状態と過渡状態を明確に分けたい。そこで移動開始前には画面中の対象物を固定する。このとき、視覚的にも固定されていることを表すために対象物の上に「ふた」を描画する。また同じく画面中のマジックハンドの移動も制限し、PHANTOM を固定する。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表示する。カウントダウン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。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恐れがあるため、台の位置も変更可能とする。ただし、互いの距離が変化してしまうとタスク間の公平性が保たず、移動時間の評価に支障をきたすため、これらの距離は大きく異なるものとする。

被験者には実験に先立ち、タスクの位置づけを理解してもらうため、以下の基準動作 1-4 を体験してもらう。

- 動作 1 手で対象物(スポンジ)を直接操作する。
- 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。
- 動作 3 遅延を最小としたシステムで対象物を操作する。
- 動作 4 実験における最大の遅延を設けてシステムにおいて対象物を操作する。

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うとともに、動作 2 により実際に道具を手にして道具

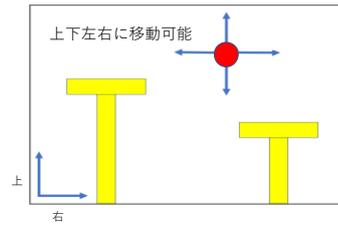


図 5 実験システムの側面図

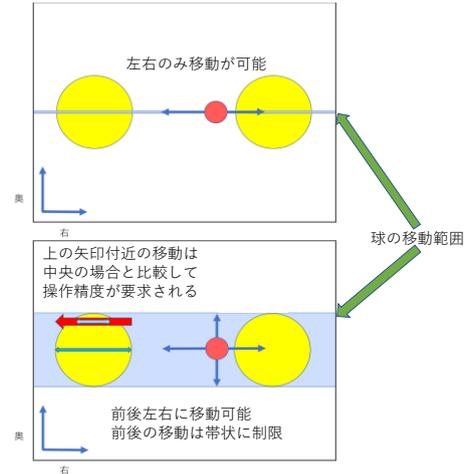


図 6 (上)実験 1 の平面図, (下)実験 2 の平面図

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 と同等と位置づけであるとの説明を与えると同時に、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ることも説明する。

実験における遅延は 0[ms](入力遅延と描画遅延を含めると最小でも実験 1 では 5[ms], 実験 2 では 16[ms]であるが、ここではそれぞれの遅延を「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。被験者には以下の通り、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。

- 手順 1 遅延と台の位置をセットする。
- 手順 2 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掴んでもらう。
- 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台にできるだけ早く滑らかに移動してもらう。
- 手順 4 各試行ごとに操作時の感覚について、アンケートに回答してもらう。(省略)

実験 1 では、被験者 20 名に対して 1 人あたり 5 試行、5 通りの遅延をランダムな順で割り当てた。実験 2 では、被験者 30 名に対して 1 人あたり 8 試行、8 通りの遅延をランダムな順で割り当てた。

表 1 手座標距離を基準とした各距離の関係

	手座標距離[mm]	台座標距離	画面座標距離[mm]
実験 1	1	2.78	0.78
実験 2	1	0.0167	1.55

表 2 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-タイプ	手座標距離[mm]	台座標距離	画面座標距離[mm]
1-1	71.8/144/144/203	200/400/400/566	56/113/113/160
1-2	71.8/162/162/229	200/450/450/636	56/127/127/179
1-3	71.8/162/162/229	200/450/450/636	56/127/127/179
1-平均	71.8/156/156/220	200/433/433/612	56/122/122/173
2-1	46/67/147/161	4/2.56/1.08/2.78	72/88/221/238
2-2	46/67/147/161	4/2.56/1.08/2.78	72/91/225/242
2-3	46/67/147/161	4/2.56/1.08/2.78	72/88/221/238
2-平均	46/67/147/161	4/2.56/1.08/2.78	72/89/222/239

2.2 実験システム 1 と 2 の違い

本節では、前述の各実験システムの差異について考察する。まず、違いを列挙する。

(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

(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 視線の仰角

(4)-2 床面の見え方

(5) 見栄え

(5)-1 色合い

(5)-2 陰影

続いて、各項目について詳細を述べる。

(1)-1 : 実験システム 1 では、タスクを簡単化するために、奥行き方向の移動を完全に制限していた。実験システム 2 では、3 次元的な移動が行えることで臨場感が高まり、遅延の好影響が顕著になることを期待して、一定範囲での奥行き移動を可能にした。図 5 に示すように、被験者から見て、実験 1 では上下左右方向の移動に限定していた。実験 2 では同様の左右上下の移動に加えて、対象物が台の奥行分だけ前後にも移動することができた。奥行き方向への移動は台の直径分に限定していたため操作難易度は変わらないと期待していたが、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 6(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違いが生じた (図 6(下))。

(1)-2 : それぞれの実験システムでは、実際に手を移動する量と画面内のマジックハンドの移動量の関係について、厳密な考察は行なっていなかった。それぞれを手座標、画面座標として、また参考にプログラム内の台座標系を加えて、

各移動量(距離)の関係、すなわち比率を調べた。なお両実験とも奥行きを意識した画面であるが、実験システム 1 は並行投影により、実験システム 2 では透視投影により描画しており、加えて立体視を行っていたわけではない。被験者がどのように奥行きを感じていたのか不明であるため、実際のモニタ表面での距離を画面座標距離としている。また、透視投影ではモニタの中央よりも端では台が小さく描画される。そこで実験 2 では実際に台を配置している付近で計測した。手座標距離を基準とした各距離の関係を表 1 に示す。手が一定の距離を移動したときに画面上のマジックハンドは、実験 2 では実験 1 の約 2 倍の距離を移動することが分かる。

(2) : 前述の各座標系の対応比にも依存するが、各実験の台の位置関係、すなわち球を移動する量や、ターゲットの台の大きさについては経験的に設定していた。台同士の配置は各実験で 3 種類を用意していた。それぞれを、各実験で近い配置を同じ数字により、タイプ 1, 2, 3 とする。各台の大きさと位置関係を表 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 の台の直径に関しては、ターゲット台の直径を表 2 に示しており、スタート台は手座標系で 43.1[mm]、台座標系で 120、画面座標系で 34[mm]と異なる大きさにしていた。各平均値を比較すると、水平方向の手座標距離はおおよそ同じであった。垂直方向の手座標距離は実験 1 が実験 2 の 2 倍程度大きい。また実験 2 は実験 1 と比較して水平方向の画面距離はおおよそ 2/3 倍、垂直方向の画面距離はおおよそ 2 倍であった。

(3) : モニタは、いずれも BenQ G2200W 22inch、画素数 1680×1050 と同じであった。ウィンドウサイズは図 1 に示す通り、実験 1 は 800×800 であった。実験 2 は、視野角の広い方が臨場感が高まることにより好影響が顕著になることを期待して、1680×1050 (フルスクリーン)であった。

(4), (5) : 視線の仰角は、実験 1 では水平方向の並行投影をベースに擬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 では、15.8 度の角度で見下ろしていた。床面は、図 1 の通りである。色合い、陰影なども、図 1 に示す通りである。

次節では、まず上記(1)-1 に注目して、実験システム 2 をベースに、すなわち(2)-(5)は実験 2 と同じまま、奥行き方向への移動を完全に制限した実験 3 を行う。続いて(1)-2 に注目して、同様に実験システム 2 をベースに実際の手の移動量と画面内でのマジックハンドの移動量の比率を実験 1 に合わせた実験 4 を行う。

3. 実験 3

実験システム 2 をベースに、奥行き方向への移動を、実験 1 と同様に制限した実験 3 を行った。すなわち、対象物は上下左右の移動のみに限定して、垂直な平面内でしか動かすことが出来ない。奥行き移動を制限することでタスク

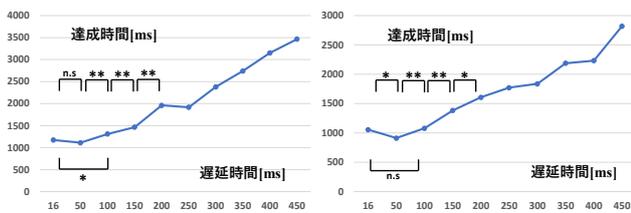


図 7 (左)実験 3 の操作成績, (右)実験 4 の操作成績

表 3 手座標距離を基準とした各距離の関係

	手座標距離[mm]	台座標距離	画面座標距離[mm]
実験 3	1	0.0167	1.55
実験 4	1	0.0167	0.78

の容易化が期待できる。被験者は大学生及び大学院生の男性 23 名, 女性 1 名の計 24 名である。22 名が右手で操作し, 2 名が左手で操作した。またすべての参加者から実験参加について同意が得られている。被験者 24 名に対して 1 人あたり 10 試行, 10 通りの遅延をランダムな順で割り当てる。実験の準備や手順については, 2.1 節に示した実験 1, 2 と同様である。

タスク達成時間について考察する(図 7(左))。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。ところが, 50[ms]に着目すると, 0[ms]に比べ平均タスク達成時間が短くなっている。遅延が 0[ms]の平均タスク達成時間と 50[ms]の平均タスク達成時間の差に有意差があるかどうかマンホイットニーの U 検定を行ったところ, 有意差は見られなかった。しかし, 達成時間の傾向は実験 1 に近いものがあり, 奥行き移動制限は遅延による操作成績の向上に影響していると期待できる。

4. 実験 4

実験 3 の結果は, 有意差は見られなかったが, 奥行き移動の制限は結果に影響していることが示唆された。そこで実験 4 では実験 3 をベースに, すなわち実験システム 2 をベースに奥行き移動を制限した上で, さらに画面上でのマジックハンドの移動量と入力装置の移動量の比率を実験 1 相当に揃える(表 3)。手座標系と台座標系の変換は同一である。台座標系から画面座標系への投影変換において変更を加えることで調整する。よって台座標系における台の大きさや位置関係は実験 2, 3 と同一であり, またタスク実施時の手座標系における手の移動量も変わらない。画面座標系におけるマジックハンドと球の移動量がおよそ 0.5 倍になる。実験 4 における台の大きさや位置関係(表 2 実験 2 参照)は, 手座標と台座標においては変わらず, 画面座標における距離(平均)は 36/46/114/124 になる。実験 1 に対して, 実験 2 と 3 では実際の手の移動量は少ないが, 画面上では大きかった。実験 4 では手の移動量は少ないままで, 画面上での移動も小さくなる。例えばマウスを一定距離だけ動かした時に, 画面内のマウスポインタが大きく動く場合は, たくさんの移動を必要とする作業に向いている。一方で小さく動く場合は, より細かく正確な操作が可能であ

る。今回の実験タスクでは, 対象物を移動させる距離は大きくなく, それほど大きくない台に乗せるため, 正確さが必要だろう。この実験 4 では実質的な移動量や台の大きさは変更しておらず, 画面上の見かけだけ変更しているため, タスクの容易さは変わっていないはずだが, 印象の面において容易であると感じられるかもしれない。なお, まず大学生及び大学院生 3 名の男性被験者による予備実験を行った。全員 PHANTOM を右手で操作した, また実験参加の同意が得られている。被験者 3 名に対して 1 人あたり 10 試行, 10 通りの遅延をランダムな順で割り当てる。実験の準備や手順については, 実験 1, 2, 3 と同様である。

タスク達成時間について考察する(図 7(右))。全体では実験 3 と同じように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。50[ms]に着目すると, 0[ms]に比べ平均タスク達成時間が短くなっている。遅延が 0[ms]の平均タスク達成時間と 50[ms]の平均タスク達成時間の差に有意差があるかどうかマンホイットニーの U 検定を行ったところ, 5%の有意差が見られた。この予備実験からは, 画面上での移動量と入力装置操作の移動量の比率調整のみが好影響に繋がったのか, 加えて奥行き移動制限も強く影響しているのか分からない。また少ない試行数による予備実験ではあるが, 実験 1 に続いて改めてわずかな遅延の好影響が強く示唆される結果を得た。

5. むすび

本研究では, わずかな遅延に対する好影響を確認するための実験において, 異なる結果が得られた 2 つの実験の違いを精査した。その上で, どの違いが遅延の好影響に繋がるか調査した。具体的には, 奥行き移動の制限と実際の手の移動量と画面内での移動量の比率に注目して, 実験を行った。奥行き移動の制限のみの実験では有意差は無いものの若干の成績向上が期待できる結果を得た。奥行き移動制限に加えて移動量比率を小さくしたところ, 有意差も確認できた。今後は移動量比率のみでも成績向上が確認できるのか, また 2.2 節に列挙した台の大きさや位置関係など他の項目の変更でも成績向上が確認できるのか実験したい。

謝辞 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] 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, p42-47, 2015.
- [2] 宮路大勇, 舟橋健司, 谷田公二, “遅延が操作における身体所有感に与える影響に関する調査”, VR 学会第 24 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 5B-01, 2019.
- [3] R. Akimoto, M. Miyaji, K. Funahashi, K. Tanida, S. Mizuno, “Positive Effect of Slight Delay for Operational Performance”, IEEE-GCCE, 162-166, 2021.