



わずかな遅延による操作成績向上の調査における 入力装置と道具特有の難易度の影響

Differences in input devices for improving tool performance with slight delay

木下新之助¹⁾, 舟橋健司²⁾, 谷田公二³⁾, 水野慎士⁴⁾

Shinnosuke KINOSHITA, 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, s.kinoshita.869@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 (〒 470-0392 豊田市八草町八千草 1247, s.mizuno@aitech.ac.jp)

概要: 当研究室では 3 次元入力装置を通した道具操作においてわずかな遅延が操作成績に与える影響を調査しており, 奥行き移動を制限することで成績が向上することが示唆されている. 先行研究ではマジックハンドを模した仮想の道具を操作しており, マジックハンドでは方向 (角度) が三角関数で位置に影響する道具特有の難しさがあつた. 本研究では, 2 次元入力装置 (マウス) を通して, 同様な難しさのある仮想の道具の操作において影響を調査した.

キーワード: 道具操作, 遅延, 2 次元入力装置

1. はじめに

遅延は一般的に道具の操作に悪影響を与えると考えられている [1][2]. しかし, 日本の自動車メーカーのマツダ株式会社では「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。」[3] と述べている. また, 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リチャード・ウィリアムズは「動画と音声を一致させるのが一番いいときもあれば, 動画を 1 フレーム前にするといったケースもある. 2 フレーム前にするとうまくいくケースは確かに多いが, 3 フレーム前にするともっとうまくいくこともある。」[4] と述べている. これらの知見から, わずかな遅延が時には好影響を与えるかもしれないと期待できる. そこで, 当研究室ではこれまでにわずかな遅延が道具の操作成績に与える影響を調査している [5][6][7]. 操作成績の評価は, 6 自由度の 3 次元位置入力も可能なペン型力覚装置 (Geomagic Phantom Omni) と 22 インチ液晶モニタから構成される評価システムで行われている. モニタにはマジックハンド, 高さの異なる 2 つの台, 球体が表示されている (図 1). 評価の参加者に PHANTOM を用いてマジックハンドを操作してもらい, 球体を掴み一方の台から他方の台へ移動してもらう (図 2). 球体を移動する動作を 5 往復繰り返してもらい 1 試行とする. マジックハンドの操作に様々な大きさの遅延を設け, 球体を台間で移動させるのに要した時間を操作成績とした. 先行研究では, 奥

行き方向の移動制限の有無, 実際の手とマジックハンドの移動距離の比率, 台同士の距離, 台の大きさなどの条件を変更し, 評価を行った. 奥行き移動を制限した場合や, 移動距離の比率が小さい場合に, 遅延を設けていない時よりも移動に要する時間が短かった, すなわち操作成績の向上が見られた. とところで先行研究では 3 次元入力装置を使用し, 3 次元空間を想定して評価を行った. 奥行き移動を制限することはマジックハンドの移動は 2 次元平面内の移動であった. そこで 3 次元入力装置を 2 次元入力装置に変更した場合でも道具操作の成績向上が見られるのか否か, 身近な入力装置「マウス」を用いて調査することを考えた [8]. しかし, PHANTOM のペン部分がマジックハンドのシャフト (アーム) に相当しており, クランプ (先端爪) の位置はシャフトの角度 (三角関数) によっても影響するという道具特有の難しさを想定していた. すなわちクランプが 2 次元平面内の移動であっても, グリップ (握り部) の動きが 2 次元平面内に限定されたわけではない. さらに 3 次元空間内での移動でもグリップは回転を含めた 6 自由度の移動であった. すなわち, 2 自由度のマウスでマジックハンドのグリップの位置のみを操作することは, クランプの位置を直接的に操作することと同様になってしまい, 道具特有の難しさはなくなってしまう. 本研究では, 架空のマジックハンド機構を想定し, マウスのある軸方向の値を三角関数によりシャフトの角度とすることで, 道具特有の難易度を前提としたわずかな遅延による操作成績向上の影響を, これまでの調査と異なる入力装置において調査した.

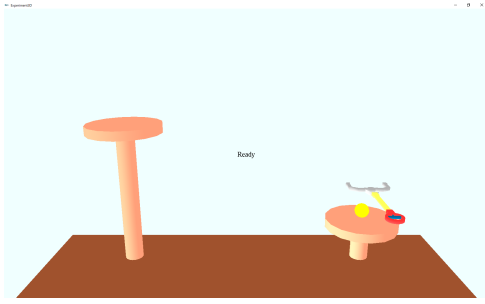


図 1: 先行研究での評価システムの画面

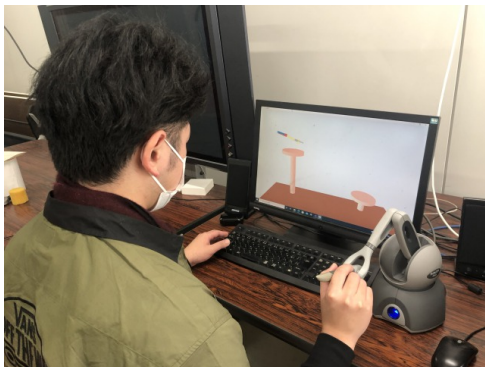


図 2: 先行研究での評価の様子

2. 架空のマジックハンド機構

現実のマジックハンドはグリップを把持している手を傾けることで、シャフトやクランプの角度を変えることができる。しかし、マウスでモニタ内のマジックハンドを傾けるには工夫が必要である。そこで、図 3 のような架空のマジックハンド機構を想定する。図 3 ではマジックハンドの紙面上の上下の位置をわかりやすくするために、便宜的に罫線を表示し、またクランプの把持中心を破線円で示している。赤色のグリップ部分の移動は上下に伸びるレール（線路）上に限定されている（図 3 (1)）。操作者は紫色のレバー（つまみ）をマウス（手のアイコン）により上下に動かすことで、マジックハンド全体を上下に動かすことができる（図 3 (2)）。また黄色のシャフト部分はグリップを中心に回転できる。レバーはシャフト上でスライドでき、三角形で示されたレバーのガイド上で左右にスライドできる。このガイド自体はグリップに合わせて上下に移動するが、ガイドの向きはレール方向に対して固定されている。操作者がレバーを左右に、例えばレバーの位置（グリップ中心からレバー中心までの初期（シャフトが左右に傾いていない）状態での長さ、 a ）と同じ長さだけ右（ $x = a$ ）に動かすと、シャフトは 45° （ θ ）右に傾き、灰色のクランプ部分の位置は右に、しかし初期位置よりも下に移動する（図 3 (3)）。すなわち $x/\sqrt{a^2 + x^2} = \sin \theta$ である。シャフト（マジックハンド全体）の長さ（ l ）に対して、クランプの横方向の位置 X は $l \sin \theta$ 、縦方向の位置 Y は $l \cos \theta$ である。そのため、

クランプの位置を左右に、真横に $Y = l$ のままで例えば $X = l \sin \theta$ へ移動したい場合には、レバーを右横に $x = a$ 、縦上に $y = l(1 - \cos \theta) = l(1 - 1/\sqrt{2})$ 操作する必要がある（図 3 (4)）。このように、通常のマジックハンドのようなシャフトの方向によりクランプの位置が大きく変わってしまうために操作が直接的でなく容易でない様を、架空の 2 次元マジックハンドとして想定した。なおマジックハンドのクランプはマウスの左ボタンを押すことで閉じ、ボタンを離すことで開く。

3. 二次元入力装置による評価

3.1 評価システム

モニタは先行研究と同じものを用いて、入力装置は PC 用のマウスを使用する。モニタには前節で述べた 2 次元マジックハンド、移動対象物としての赤い丸、移動元と移動先を表す台としての緑の丸が表示されている（図 4）。評価の参加者はマウス（手のアイコン）を介してマジックハンドのレバーによりマジックハンドを操作できる（図 5）。また左ボタンでクランプの開閉を操作できる。参加者が緑の台に乗った赤丸をマジックハンドで掴むことにより、一連の評価工程を開始する。まず赤丸を掴むと、操作成績としての作業時間を計測するために 3 秒間だけマジックハンドの動きを固定する。固定は 3 秒後に解除されるため、参加者はマジックハンドを操作して赤丸を他方の緑の台に乗せる。乗せると再び 3 秒間だけマジックハンドの動きが固定される。さらに 3 秒後、元の台に赤丸に乗せる。

3.2 評価方法

評価の参加者はマウスによりマジックハンドを操作し、赤丸を掴み一方の台から他方の台へ移動する。赤丸を 5 往復繰り返して移動する動作を 1 試行とする。赤丸を台まで移動させるのに要した時間を操作成績とする。このときマジックハンドの操作に 0ms（入力遅延および描画遅延を含めると実際には最小で 16ms だが、本研究ではこれを 0ms とし て扱う）から 250ms の 50ms 刻み、すなわち 5 種類の遅延を設ける。評価の参加者にはまず、遅延を設けていない場合と体験してもらううちの最大遅延を設けた場合の 2 つのパターンで評価システムを体験してもらい、評価において遅延がどのようなものか体験してもらう。参加者には、試行ごとにランダムな順で割り当てられた遅延 5 種類に対して各 1 試行、計 5 試行を 1 セットとして評価してもらう。試行は 10 回の移動からなり、1 セットは 50 の操作成績からなる。机上でのマウスの移動量に対する画面内のカーソル（手のアイコン）の移動量の比は 0.77 とした。まず、レバーの位置 a を 3.6cm に固定した上で、シャフトの長さ（正確にはグリップ中心からクランプの把持中心までの長さ） l が画面上の実寸で 12cm, 15cm, 18cm と異なる 3 種類のマジックハンドを想定して比較評価した。大学生 10 名に参加を同意してもらい、評価に協力してもらった。すなわち、シャフトの長さ と遅延の各組み合わせに対してそれぞれ 10 試行、全 150 試行であり、全 1500 の操作成績を得た。続いて、シャフトの

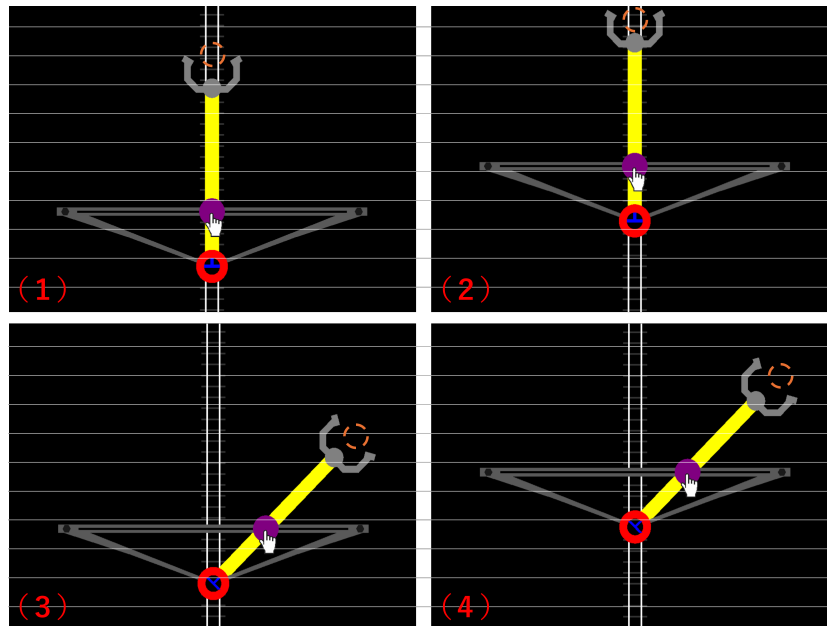


図 3: 架空のマジックハンド

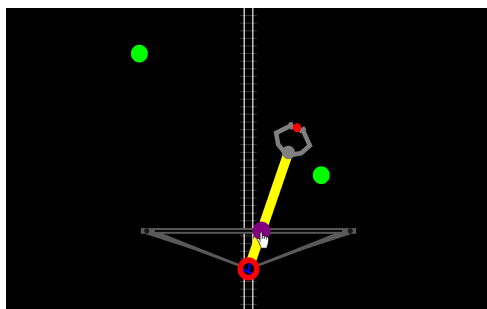


図 4: 評価システムの画面

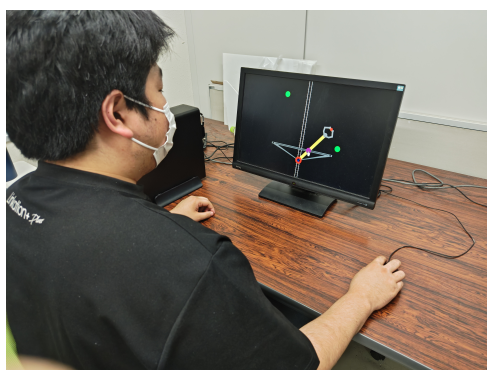


図 5: 評価の様子

長さ l を 15cm に固定した上で、レバーの位置 a が 3.6cm, 3.0cm, 2.4cm と異なる 3 種類を想定して比較評価した。同じ 10 名から、レバーの位置と遅延の各組み合わせに対して同数の操作成績を得た。なお評価日時が異なり、 $l = 15\text{cm}$, $a = 3.6\text{cm}$ の条件に対する操作成績を重複して得ている。

4. 評価結果

最初に、シャフトの長さが異なる条件における評価結果を示す。シャフトの長さ 12cm では、遅延が大きいほど実行時間も長いことが確認でき、成績向上していなかった (図 6 (1))。一方で 15cm では、遅延 0ms に対して 50ms の実行時間が短いことが確認でき、成績向上した (図 6 (2))。しかし、0ms の実行時間と 50ms の実行時間に対してマンホイットニーの U 検定を行ったところ有意差はなかった。長さ 18cm では、遅延が大きいほど実行時間も長いことが確認でき、成績向上していなかった (図 6 (3))。シャフトの長さが異なるマジックハンドでの 2 次元入力装置による評価では、長さが 15cm の場合に、わずかな遅延による操作成績の向上が確認できた。ただし有意差は確認できなかった。

次に、レバーの位置が異なる条件における評価結果を示す。レバーの位置が 3.6cm では、遅延が大きいほど実行時間も長いことが確認でき、成績向上していなかった (図 7 (1))。位置が 3.0cm でも、遅延が大きいほど実行時間も長いことが確認でき、成績向上していなかった (図 7 (2))。一方で 2.4cm では、遅延 0ms に対して 50ms の実行時間が短いことが確認でき、成績向上した (図 7 (3))。さらに、0ms の実行時間と 50ms の実行時間に対してマンホイットニーの U 検定を行ったところ 5% の有意差が確認された。レバーの位置が異なるマジックハンドでの 2 次元入力装置による評価では、位置が 2.4cm の場合に、わずかな遅延による操作成績の向上が確認でき、有意差も確認できた。

これまでの 3 次元入力装置を介したわずかな遅延による好影響の調査では、道具の難易度により結果に違いがあった。マジックハンドのシャフトが長く、またレバーの位置が回転中心であるグリップに近いと、シャフトの角度変化に大きく影響して道具としての難易度が上がるだろう。つま

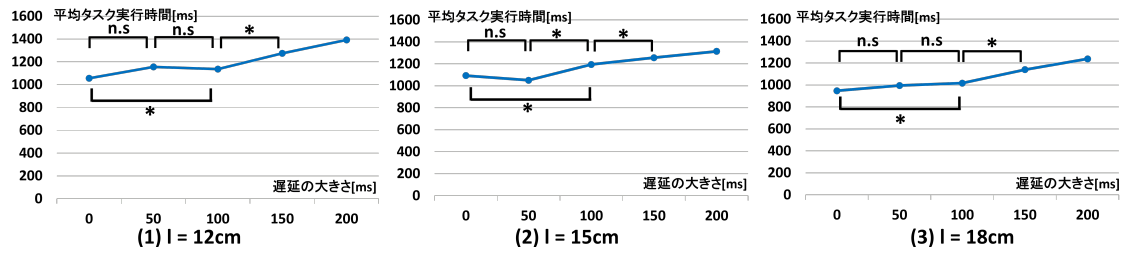


図 6: シャフトの長さ (l) が異なる条件における平均タスク実行時間

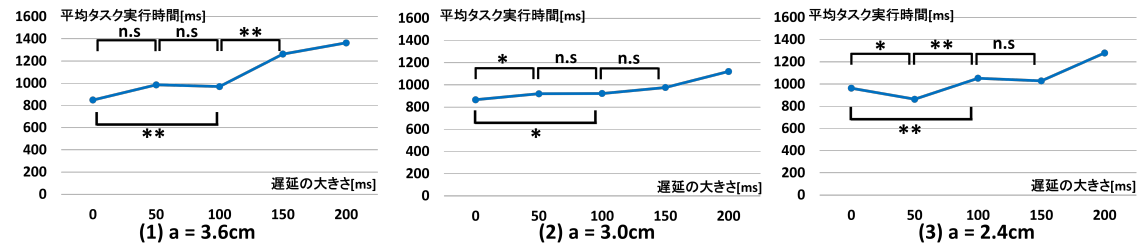


図 7: レバーの位置 (a) が異なる条件における平均タスク実行時間

り、2次元入力装置においても、わずかな遅延による好影響が示唆されるとともに、道具の難易度により結果に違いがあることも示唆された。

5. むすび

わずかな遅延が道具の操作成績に与える影響について、様々な条件における調査を行っている。先行研究では3次元入力装置を用いて評価を行っており、特に奥行き移動を制限して難易度をやや容易にした場合にわずかな遅延による好影響が確認されている。そこで2次元入力装置を利用した場合にも同様に好影響が確認できるのか、身近なマウスによる操作で評価を行うことにした。道具特有の難しさを再現した仮想のマジックハンドにおいて、2次元入力装置によるわずかな遅延の評価を行った。架空のマジックハンドの機構の各部の長さを変えて道具の難易度を調整することで、一定の条件においてわずかな遅延による操作成績の向上を確認するとともに有意差も確認した。これまでの3次元入力装置を介した調査同様に、2次元入力装置においてもわずかな遅延による好影響が示唆された。また一定の難易度の場合にだけ好影響があることも示唆された。今後は、評価システムにおける台同士の距離などの条件を変更して難易度を調整することで、わずかな遅延による好影響を強くできるのかどうか評価する。また1次元の入力でも同様の結果が得られるのか調査したい。

謝辞 本研究の一部はJSPS 科研費 JP23K11182 の助成を受けたものです。

参考文献

[1] T. Waltemate, I. Senna, F. Hulsman, 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”, VRST 2016, pp. 27–35, Nov. 2016.

- [2] H. Tochioka, H. Ikeda, T. Hayakawa, M. Ishikawa, “Effects of Latency in Visual Feedback on Human Performance of Path-Steering Tasks”, VRST 2019, No.65, pp. 1–2, Nov. 2019.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] R. Akimoto, M. Miyaji, K. Funahashi, K. Tanida, S. Mizuno, “Positive Effect of Slight Delay for Operational Performance”, IEEE-GCCE 2021, pp. 162–166, 2021.
- [6] Y. Miwa, K. Funahashi, K. Tanida, S. Mizuno, “Positive Effect of Slight Delay and Task Conditions for Operational Performance”, IEEE-GCCE 2023, pp. 460–464, 2023.
- [7] Y. Miwa, K. Funahashi, K. Tanida, S. Mizuno, “Effects of moving task condition on improving operational performance with slight delay”, IEEE VR 2024, pp. 903–904, 2024.
- [8] 木下新之助, 舟橋健司, 谷田公二, 水野慎士, わずかな遅延による操作成績向上の調査における奥行き移動制限にかかる入力装置の影響, 日本バーチャルリアリティ学会第30回大会講演論文集, 3C1-01, 2025.