

3次元に拡張したダミーカーソル実験における自身のカーソルの特定

高橋 昇太[†] 相澤裕貴[†] 渡邊 恵太[†]

概要：色形が同様な複数のカーソルの中から自身の動かすカーソルを識別するダミーカーソル実験がある。この実験は、カーソルの動きの情報のみで自身のカーソルを特定できることを明らかにした。本研究では、3D 入力と 3D 表現した環境においても、同様に自身のカーソルを発見できるのかを検証した。その結果、3D 環境においても自身の手と同じ動きのカーソルを発見できることが明らかになった。

1. はじめに

渡邊らは、複数のダミーカーソルの中から自身のマウスで操作するカーソルを探索する「ダミーカーソル実験」を考案し、実験を行った[1]。この実験は、カーソルの動きの情報だけで自身のカーソルを発見できることを明らかにした。渡邊らのダミーカーソル実験は、マウスによる前後左右方の 2D の入力と画面上の上下左右の 2D 表現であった。

そこで本研究では、前後上下左右の入力可能な操作デバイスと前後上下左右に表現したグラフィック表現の環境を用いて、3D 環境においても自身の操作するカーソルを発見できるかを調査した。

2. 3D ダミーカーソル実験

渡邊らのダミーカーソル実験を 3D に拡張した実験環境を構築した。これを 3D ダミーカーソル実験と呼ぶ。ただし、ディスプレイは一般的な 2D 液晶ディスプレイであり、陰影や肌理の勾配表現を用いて 3D グラフィックを表現している (図 1)。

2.1 実験タスク

実験参加者は、手をパーの形にして地面と平行になるようにする (図 1)。その姿勢を保ったまま手を動かすと、複数のカーソル (球体) が動き出す。そして、手を止めると複数のカーソルも止まる。複数のカーソルはそれぞれ独立して動き、その中で一つだけ実験参加者の手と同じ方向に動くカーソルがある。実験参加者は、手を動かして「自身のカーソルだ」と感じるカーソルを探索する。

2.2 実装

筆者らは Leap Motion を用いて実験参加者の中指をトラッキングした。3D グラフィックの描画は Processing で実装し、カーソルは半径 30px の球体とした。また、奥行き方向をわかりやすくするため、上下左右のパネルには 60px (球体の直系) ごとに等間隔の直線を引いている (図 1)。

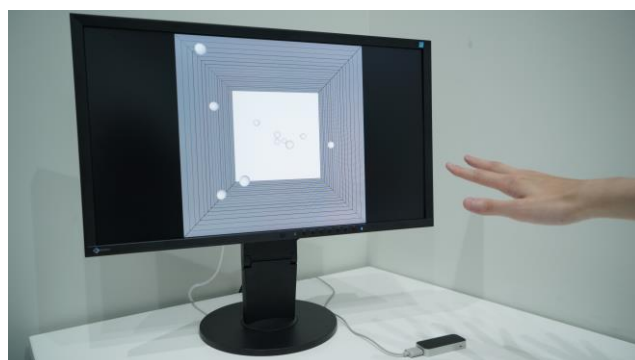


図 1 3D ダミーカーソル実験

2.3 ダミーカーソルアルゴリズム

本実験では、ダミーカーソルの動きを相澤らの回転角アルゴリズム[2]を 3D に応用したアルゴリズムで制御した (図 2)。1 フレーム当たりの手の移動距離を r としたとき、1 フレーム当たりの自身のカーソルの移動ベクトル (x, y, z) は以下になる。

$$x = r \sin \theta \sin \phi$$

$$y = r \sin \theta \cos \phi$$

$$z = r \cos \theta$$

ダミーカーソル数が n (実数) つだった場合、 k 番目 ($0 < k \leq n$ かつ実数) の 1 フレームにおけるダミーカーソルの移動ベクトル (x_k, y_k, z_k) は以下の様になる。

$$\theta_k = 45^\circ + \frac{(k-1) \times 135^\circ}{(n-1)}$$

$$\phi_k = 45^\circ + \frac{(k-1) \times 270^\circ}{(n-1)}$$

$$x_k = r \sin(\theta + \theta_k) \sin(\phi + \phi_k)$$

$$y_k = r \sin(\theta + \theta_k) \cos(\phi + \phi_k)$$

$$z_k = r \cos \theta_k$$

[†] 明治大学 総合数理学部 先端メディアサイエンス学科

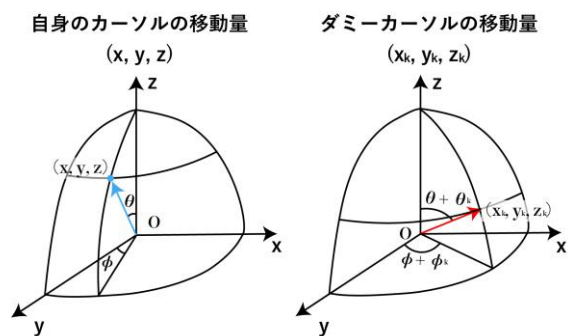


図2 ダミーカーソルアルゴリズム

このように自身のカーソルが (x, y, z) だけ相対的に移動したときに、ダミーカーソルは (x_k, y_k, z_k) だけ相対的に移動する。そのためダミーカーソルは、必ず自身のカーソルと異なった動きをする。

2.4 トーラス画面

先行研究[1]と同じく、3D ダミーカーソル実験でもトーラス画面[3]を採用した。トーラス画面では、画面外にカーソルが出たとき、その画面端とは逆側から同じ軌道をしたカーソルが出てくる。例えば、画面右方へ水平にカーソルが移動して画面外に出ると、画面外に出たと同時に左端から右方向へ水平にカーソルが出現する。

もしトーラス画面ではなかった場合、カーソルが画面外に出てしまい、画面内のカーソル数が変化してしまう。さらに自身のカーソルが画面外に出ていくことで、自身のカーソルを探索できない可能性がある。トーラス画面を採用することで画面内のカーソル数を統一し、かつ、自身のカーソルを画面内に表示し続けることができる。

3D ダミーカーソル実験では奥行方向にもトーラスを実装した。例えば、自身の手を手前側に引きカーソルを画面外に出すと、画面の最も奥の場所からカーソルが出現する。



図3 3D ダミーカーソル実験の様子

3. 実験

本実験では 3D ダミーカーソル実験において、複数のカーソルの中から自身のカーソルを発見できるかを検証する。また、ダミーカーソル数ごとに探索時間と発見成功率が変化するかも検証する。

3.1 実験機材

実験機材は以下を使用した。

- OS : Windows10
- ディスプレイ:サイズ 23 インチ, 解像度 1920×1080, リフレッシュレート 60 Hz
- トラッキング機材 : Leap Motion

また、自身の手を隠すための衝立を設置した(図3)。これにより、自身の手の動きとカーソルの動きを見比べて自身のカーソルを探すのを防ぐ。

3.2 実験手順

実験手順について詳細を記す。

- 1) ディスプレイ上でカウントダウンを表示する。
- 2) カウントダウンが終わると実験がスタートする。
- 3) 複数のカーソルを表示し、実験参加者は1つだけ存在する自身のカーソルを探索する。
- 4) 自身のカーソルを見つけたら、押しボタンを押す。

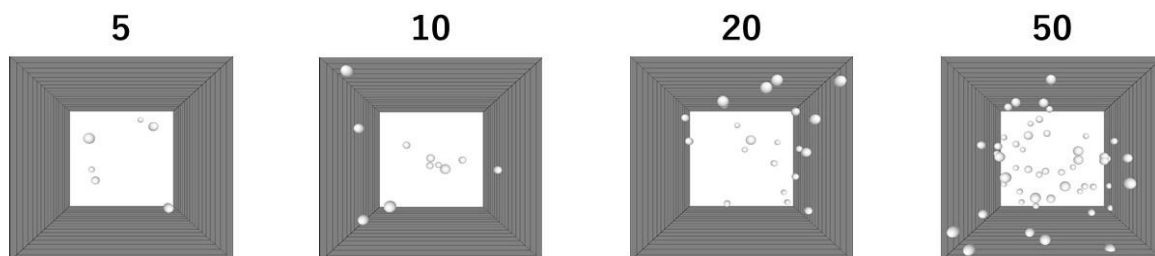


図4 実験画面の様子

左からダミーカーソル数が 5, 10, 20, 50 のとき

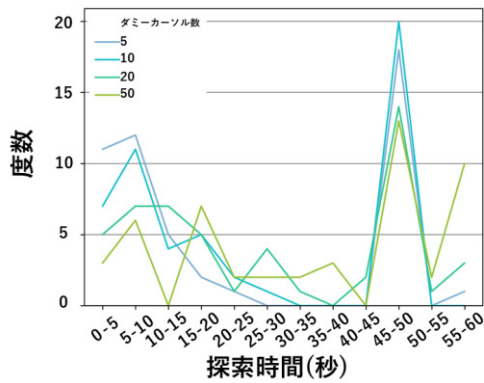


図 5 カーソル探索時間のヒストグラム

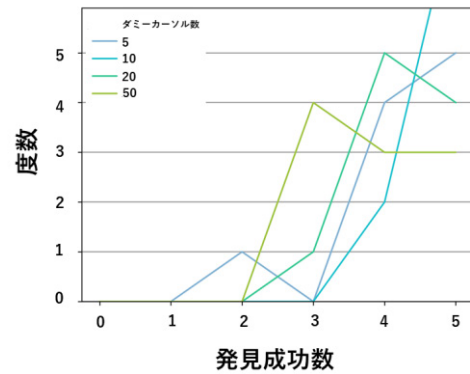


図 6 発見成功数のヒストグラム

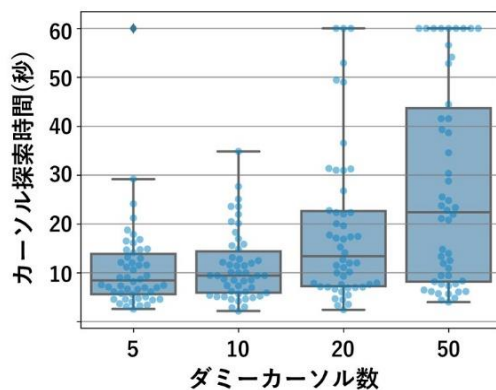


図 7 ダミーカーソル数ごとの探索時間

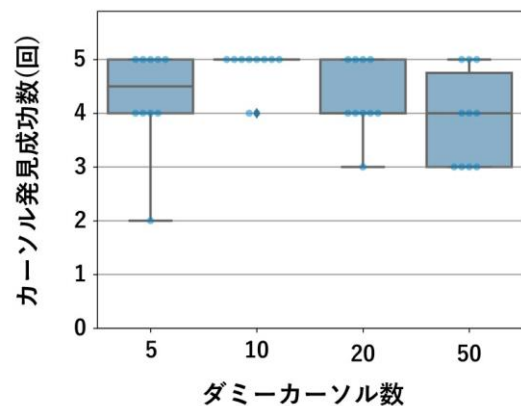


図 8 ダミーカーソル数ごとの発見成功数

- 5) 全てのカーソルに番号が振られる。実験参加者は自身のカーソルだと思うカーソルの番号を実験者に伝える。
- 6) 実験者はそれを記録し実験終了後に正誤を確認する。

実験がスタートすると同時にタイムカウントがスタートし、実験参加者が押しボタンを押すとタイムカウントが止まる。このタイムカウントを探索時間とみなして評価する。また、タイムカウントが 60 秒を超えると「タイムオーバー」とみなして、次のセッションに移行する。これは、探索時間が長引いて探索を諦めることを防ぐためである。

また、実験手順 5 で実験参加者が選んだカーソルが自身のカーソルである場合を「発見成功」、ダミーカーソルだった場合を「発見失敗」とする。そして、実験参加者はダミーカーソル数 5, 10, 20, 50 の 4 パターンで、それぞれ 5 回ずつ（合計 20 回）実験を行った。

3.3 実験参加者

実験参加者は健康な視力または矯正視力を持つ 10 名(男性 5 名, 女性 5 名)である。彼らは全員右利きで、右手の中指をトラッキングして実験を行った。

3.4 結果

ダミーカーソル数ごとのカーソル探索時間のヒストグラム(図 5)とその箱ひげ図(図 7)を示す。図 5 のヒストグラムが正規分布を仮定できないため、ダミーカーソル数ごとの自身のカーソル探索時間の差を Kruskal-Wallis 検定で評価した。その結果、カーソル探索時間に非常に強い有意な差があることが確認された($p < .001$)。また、カーソル探索時間における Steel-Dwass 検定の多重比較を行った。この結果、カーソル数が 5 つと 50 つの場合と、10 つと 50 つの場合において非常に強い有意差がみられた($p < .001$)。

表 1 にダミーカーソル数ごとにおける発見成功率を示す。発見成功率は、全試行(10 人×5 セッション)中の発見成功数の割合である。表 1 を見るとどれも発見成功率が 75% 以上であり、特にダミーカーソル数が 10 のとき 95% を超えていた。発見成功数とダミーカーソル数のヒストグラム(図 6)とその箱ひげ図(図 8)を示す。図 6 のヒストグラムが正規分布を仮定できないため、発見成功率において Kruskal-Wallis 検定を行った。その結果、どのダミーカーソル数の間にも有意差がなかった($p > 0.5$)。

4. 考察

4.1 ダミーカーソル数と探索時間

ダミーカーソル数が少ない (5・10) とときと多い (50) ときの間に、ダミーカーソル数と探索時間における有意差があった。図7を見ると、ダミーカーソル数が増えるとともに探索時間が長くなっていることがわかる。これは渡邊らのダミーカーソル実験[1]でも同様の傾向が見られた。その理由として、ダミーカーソル数が増えるとカーソルの密度が高くなり、カーソルの動きを認知しにくくなることが考えられる。

4.2 ダミーカーソル数と発見成功率

ダミーカーソル数が 10, 20, 50 と増えていくと発見成功率が低くなり、タイムオーバー率が高くなる (表 1)。一方で発見失敗率はあまり変化していない。このことから発見成功率の低下は、ダミーカーソル数が増えることで探索時間が長くなり、制限時間内に自身のカーソルを発見できなくなっていくからだと考えている。

興味深い点は、ダミーカーソル数が 5 のときが最も発見成功率が低いことである。表 1 を見るとタイムオーバー率より発見失敗率が多いことから、ダミーカーソルを自身のカーソルだと勘違いしたことが発見成功率の低い主な原因だと考えられる。勘違いが多い理由としてダミーカーソル数と発見難易度の関係があげられる。実験後のインタビューでダミーカーソル数と発見難易度の関係について聞いたところ、「ダミーカーソル数が多いほど自身のカーソルを発見するのが難しい」と答える人が多かった。ダミーカーソル数が多いときは発見難易度が高いため、自身のカーソルを探すのに慎重になる。一方でダミーカーソル数が少ないと、「発見するのが簡単だ」と油断してしまう。それが、発見失敗率が高い原因だと考える。

5. 議論

5.1 自身のカーソル発見と自己帰属感

自身のカーソルを発見できる要因として Gallagher の自己帰属感 (Sense of Ownership)[4]があると考えられる。これは、「見ているものがまるで自分の身体の一部のように感じる」という感覚である。この感覚は自身の身体のみならず、自身の手と同じ動きをするオブジェクトにも生じると何度も報告されている [5, 6]。本実験では自身のカーソルは実験参加者の手と同じ動きをするが、それ以外のダミーカーソルは実験参加者の手と異なる動きをする。そのため実験参加者は自身のカーソルにのみ自己帰属感を感じている。それが自身のカーソルを発見できる要因であると考えられる。

5.2 手の動かし方

自身のカーソルを探索するのに、腕を直線的に動かす人が多かった。その理由として 2 つ考えられる。1 つ目はアルゴリズムの問題である。直線的に動かした方が、回転角アルゴリズムのダミーカーソルの動きと自身のカーソルの

表 1 ダミーカーソル数ごとの
発見成功率・発見失敗率・タイムオーバー率

ダミーカーソル数	5	10	20	50
発見成功率	76%	96%	86%	78%
発見失敗率	22%	4%	8%	4%
タイムオーバー率	2%	0%	6%	18%

動きの違いがわかりやすい可能性がある。2 つ目の理由として、直線的な動きの方が自己帰属感を感じやすいことが考えられる。動きの同期するオブジェクトに自己帰属感を感じることがわかっている[5, 6]が、どのような動きの方が自己帰属感を感じやすいのかは議論されてこなかった。直線的な動きはシンプルでわかりやすい。このような認識しやすい動きの方が自身のカーソルを発見しやすい、つまり自己帰属感を感じやすいのではないかと考えている。

また、直線的な動きでも上下左右 (ディスプレイ画面と平行) に動かす人が多かった。これは 3D 表現での奥行き移動が認識しづらいが、上下左右の動きは認識しやすかったからだと考えている。また、何人かの実験参加者は上下左右に動かして探索しているが、途中で前後 (奥行き方向) に動かしていた。その理由として、実験後のインタビューで「本当に自身のカーソルかを確認するために前後に動かした」と述べていた。相澤らは、ダミーカーソル実験には自身のカーソルを探索するフェーズと本当に自身のカーソルかを確認するフェーズがあると考察している[6]。3D ダミーカーソル実験では、それらのフェーズごとに異なる動きをしていることが確認された。

5.3 今後の課題

5.3.1 トラッキング機材

本実験では Leap Motion を用いて手の動きをトラッキングした。Leap Motion は、地面に並行な動き (前後左右) の方が垂直な動き (上下) より認識しやすいという特徴があった。そのため同じ長さだけ手を動かしても、地面に並行に動かした場合と垂直に動かした場合でカーソルの移動ベクトルが異なってしまった。今後は、手を動かした方向によってカーソルの移動ベクトルが変化しないようなトラッキング機材を用いる予定である。

5.3.2 姿勢による腕の動かし方の制限

本実験において実験参加者は肘を曲げた状態で実験を行った (図 3)。実験参加者には手をパーにして地面に平行な状態で保つことを指示したため、実験参加者は手首を固定して肘と肩の関節を動かすことで手の位置を変えていた。しかしカーソルを左右に動かすときだけは、肩を固定し肘

を体の内側（または外側）に曲げることで手の位置を変えていた．このように今回の実験環境では，動かす方向によっては自由に手を動かすことができなかった．これは VIVE Cosmos のコントローラのようなトラッキング機材を用いることで解決できると考えている．

5.3.3 ディスプレイと 3D グラフィック表現

グラフィック表現の適切性の課題がある．手の動きは 3D になっているが，物理ディスプレイは平面であり限定的な奥行き表現であることが，自身のカーソル判別に影響している可能性がある．今後は，ヘッドマウントディスプレイを利用した VR 環境や Looking Glass のような視差による奥行き認知を配慮した 3D ディスプレイ環境で試す．

6. おわりに

本研究では，3D 環境下において複数の立体的なカーソルの中から，自身の手の動きと同期したカーソルを発見できるかを検証した．その結果，3D 環境においても複数のカーソルの中から動きの情報だけで自身のカーソルを発見できることが明らかになった．

参考文献

- [1] 渡邊恵太, 樋口文人, 稲見昌彦, 五十嵐健夫. 複数ダミーカーソル中における自分自身のカーソル特定. 情報処理学会インタラクション論文集, 25-31, 2013.
- [2] 相澤裕貴, 渡邊恵太. ダミーカーソルアルゴリズムがもたらす自身のカーソル発見への影響調査. 第 184 回ヒューマンコンピュータインタラクション研究発表会, 2019.
- [3] Huot, S., Chapuis, O., and Dragicevic, P. TorusDesktop: pointing via the backdoor is sometimes shorter. In Proceedings of CHI '11. pp. 829-838, 2011.
- [4] Gallagher, S. . Philosophical conceptions of the self: implications for cognitive science. Trends in Cognitive Sciences, 4(1), 14-21, 2000.
- [5] Tsakiris, M., Prabhu, G., and Haggard, P. . Having a body versus moving your body: how agency structures body-ownership. Consciousness Cogn, 15, 423-432, 2006.
- [6] Sanchez-Vives, M. V., Spanlang, B., Frisoli, A., Bergamasco, M., and Slater, M. . Virtual hand illusion induced by visuomotor correlations. PLoS One 5(4):e10381, 2010.
- [7] 相澤裕貴, 渡邊恵太, 樋口文人. ダミーカーソル環境におけるアイトラッカーを用いた自身のカーソル発見プロセスの調査. 第 181 回ヒューマンコンピュータインタラクション研究発表会, 2019.