

ウィンドウ正面にユーザがいない場合の ステアリング時間のモデル化

元永 航陽¹ 本間 大一優¹ 笠原 暢仁¹ 山中 祥太² 宮下 芳明¹

概要: 空間内にあるユーザインタフェース (UI) に関して、ユーザがそのウィンドウの正面にいない場合にもどのように操作性が変化するかは、VR 空間内や立体的な操作空間において重要な問題である。これまで正面の場合の操作性に関する研究は行われてきたが、角度のついた位置にいる場合の研究はほとんど行われていない。そこで本稿では、VR 空間内においてウィンドウの正面にユーザがいない場合の円形経路通過タスク (ステアリングタスク) に着目し、ユーザが角度のついた位置にいる場合についての難易度と操作時間の関係を調査した。実験では、VR 空間内に配置された円形の経路に対してユーザが 4 種類の角度からステアリングタスクを行った。タスクの操作時間とユーザに対する経路の角度を分析した結果、見かけの経路の幅変化を考慮した難易度指標が実測された操作時間に対して高いモデル適合度を示すことが分かった。

1. はじめに

ユーザインタフェース (UI) 操作時の人間の行動をモデル化することは、HCI 分野における重要なテーマの一つである。Fitts の法則は、ターゲットをクリックやタップして選択するポインティングタスクの操作時間を予測できるモデルとしてよく知られている [1]。また、Accot と Zhai が提案したステアリングの法則 [2] は、特定の幅と長さの経路を通過するステアリングタスクにかかる操作時間をモデル化している。こうしたモデルは、UI の操作性を定量的に評価したり、UI 上でのユーザの行動結果を予測し、適切な支援を提供したりすることにつながる。

一方で、これらのモデルは基本的に、ユーザが理想的な環境で操作することを前提としているが、実用的なシチュエーションでは、必ずしもそのような前提が成り立つわけではない。例えば、常に利き手の人差し指で操作したり、ディスプレイの正面に座っていたり、静かな環境で操作したりするわけではないときにモデルが適合するか不明であることが指摘されている [3, 4]。

本稿では、起こりうる実用的なシチュエーションとして、大規模なディスプレイや三次元空間内でのインタラクションにおいて、ユーザが UI の正面にいない場合に着目する。こうした状況下では、UI を斜めから見るため、ターゲットのサイズや経路の形状が変形して見える。そこで、こうした状況下での UI の操作性を調査するため、円形ステアリ

ングタスクを用いて実験を行った。その結果、描画された経路の幅と長さの代わりに、ユーザ視点での見かけ上の幅と長さを使用することでモデル適合度が改善することが示された。

2. 関連研究

2.1 ステアリングの法則

ユーザがコンピュータを使用する際の操作として、細長い経路からカーソルやペンが逸脱しないように通過していくタスク (ステアリングタスク) がある。例えば階層メニューにおいてサブメニュー項目に向かって右向きに進んでいく操作は、メニュー項目から逸脱しないように経路を進んでいくステアリングタスクとみなせる。

Accot らのステアリングの法則 [2] はこのステアリングタスクにおける操作時間をモデル化している。このモデルは、式 1 に示されるようにタスクの難易度指標 ID (Index of difficulty) と操作時間 MT (Movement time) との間に線形関係があることを示している。

$$MT = a + b \times ID, \quad ID = \frac{A}{W} \quad (1)$$

ここで、 A と W はそれぞれの経路の長さや経路の幅であり、 a と b は実験により決定される回帰定数である。経路を進むにつれて幅が一定の割合で狭まる直線経路のタスクについてもモデル化されている。狭まる直線経路の難易度指標 ID_{NT} とその操作時間 MT には、同様に式 2 の線形関係がある。

$$MT = a + b \times ID_{NT}, \quad ID_{NT} = \frac{A}{W_2 - W_1} \times \ln \frac{W_2}{W_1} \quad (2)$$

¹ 明治大学

² LINE ヤフー株式会社

ここで、 A は経路の長さであり、 W_1 は W_2 より大きい幅であることを示す。また、 a と b は実験により決定される回帰定数である。複雑な経路にも対応する一般化したモデルも示されている。これは経路幅の逆数を経路長にわたって積分することで導出され、経路の難易度指標 ID_C とその操作時間 MT には式 3 の関係がある。

$$MT = a + b \times ID_C \quad ID_C = \int_C \frac{ds}{W(s)} \quad (3)$$

ここで、 C は任意の経路であり、 $W(s)$ は経路上の各点 s における経路の幅を示す。また、 a と b は実験により決定される回帰定数である。

2.2 円形経路のステアリングタスク

Accot らはステアリングの法則が円形経路においても適用できることを実験により示した [5]。円の中心から経路の中心までの距離を R とおくと、経路幅の中心が通る円周の長さは $2\pi R$ となるため、 ID と MT は式 4 の関係がある。

$$MT = a + b \times ID, \quad ID = \frac{2\pi R}{W} \quad (4)$$

この実験では、マウス、タブレット、トラックボール、タッチパッド、トラックポイントの 5 種類の入力デバイスを用いて円形経路のステアリングタスクを行ったが、すべての入力デバイスにおいて高い適合度 ($r^2 > 0.98$) が示された [5]。

2.3 3D におけるステアリングタスク

Liu らはステアリングの法則が、3D 操作タスクのパフォーマンスをモデル化することができることを実験により示した [6]。また、Wei らはハンドトラッキングのステアリングタスクにおけるパフォーマンスについての実験を行った [7]。これにより、仮想空間上にあるボールを摘んで操作する角度における操作時間の違いについては、方向ごとの特性が操作時間に大きな影響を及ぼすことが示された。 0° から 90° 刻みの操作角度に対する操作時間を確認すると、上向きの試行である 90° で一番長く、下向きの 270° で一番短いことが確認された。これは手に働く慣性力と重力に起因するものと結論づけられた。

2.4 見かけのサイズを考慮したポインティングタスク

Fitts は、クリックやタップをしてターゲットを選択する運動はターゲットの大きさやターゲットまでの距離による影響があることを調査した。実験の結果、Fitts の法則 (式 5) に示されるように、タスクの難易度指標 ID はターゲット間の距離 A とターゲットの幅の大きさ W によって決定されることを示した [1]。

$$ID = \log_2 \frac{2A}{W} \quad (5)$$

ID の値が大きくなるほど、タスクは難しくなるため、タ

スクを完了するのにかかる操作時間 MT は、式 6 のように示される。

$$MT = a + b \times ID \quad (6)$$

a と b は実験により決定される回帰定数である。

Kopper らは、ポインティングタスクにおいて、Fitts の法則のターゲット間の距離 A とターゲットの幅の大きさ W を、手元のコントローラ操作に要する移動角度ベースの距離と幅に変換しても操作時間を推定できることを示した [8]。また、Ens らは、没入型ディスプレイ (CAVE) 環境においても手元のコントローラ操作の角度における距離と幅によって操作時間を推定できることを示した [9]。

3. 使用するモデルの導出

本稿では、大規模ディスプレイや三次元空間でのインタラクションにおいて、ユーザが UI の正面に位置していない場合のステアリング時間をモデル化することを目的とする。見かけのサイズを考慮し、異なるアプローチで 2 つのモデルを導出した。1 つ目は、複雑な経路に対応する一般化したモデル (式 3) に基づいた、見かけの経路幅の非線形な変化を考慮したモデルである。2 つ目は、式 2 に基づいた、経路を 4 分割し各区間で見かけの幅が線形に変化すると近似するモデルである。本章では、これらのモデルの導出過程について述べる。モデルの導出においては、常に変化するコントローラの位置から見て、ターゲットの経路の長さや幅の角度を取得して計算することも可能であった。しかし、今後 UI の作成においてモデル式を使用することを考慮すると、理想的な HMD の位置 (実験環境を実行したときの HMD の初期位置) からモデル化を行うほうがより実用的であるため、以降では初期位置からの導出を行う。

3.1 使用する用語の定義

ウィンドウに表示された円形経路をターゲットと呼び、UI とユーザの位置関係、ターゲットの円周の距離 A 、ターゲットの幅 W 、角度条件 Angle (AG)、ユーザからターゲットまでの距離 L のパラメータを図 1 のように定義する。

3.2 非線形な幅変化を考慮したモデルを使用したモデル

正面にいない場合のステアリングの経路では、図 2 のように一周の操作の中で見かけの経路の幅が複雑 (非線形) に変化する。そこで、Accot らの複雑な経路に対応する一般化モデル (式 3) に基づいて、非線形な幅変化を考慮したモデルを導出する。まず、図 3 に示す p および q の点が、ユーザの視点から見たときに画面上にどのように投影されるかを計算し、その投影座標を求める。次に、 p と q の投影座標での距離を算出し、それを基に見かけの幅 $W(s)$ を導出する。最後に、式 3 を用いて ID_C を算出する。

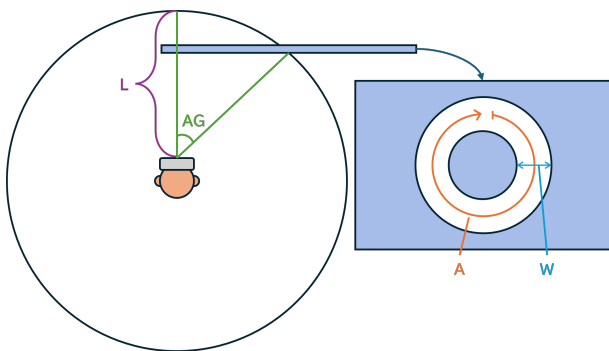


図 1: A, W, AG, L の定義と UI とユーザの位置関係。ユーザを囲う半径 L の円周上に UI の中心が配置され、正面からの角度を AG としている。

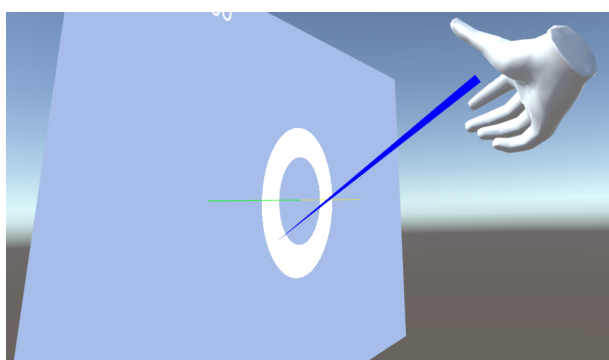


図 2: 正面にいない場合のステアリングの経路においては、経路を一周操作する中で見かけの経路の幅が複雑（非線形）に変化する。

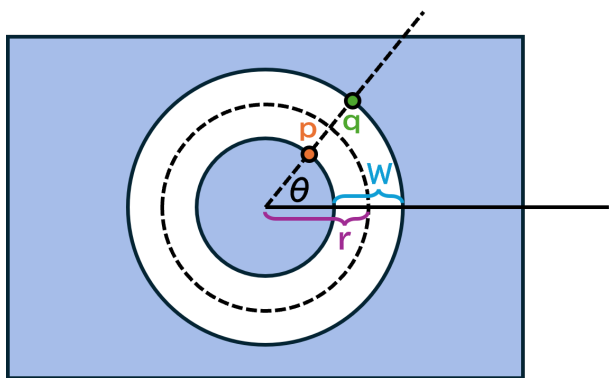


図 3: ターゲットの半径を r , 幅を W , 反時計回りを正として θ を定義する。

3.2.1 ウィンドウの平面におけるターゲットの幅の両端の座標の導出

図 3 のようにターゲットの経路における半径を r , 幅を W , ターゲットの中心から円の右端に引いた線を基準とし、反時計回りを正として θ を定義する。ターゲットの経路における内側の円上と外側の円上の点を p, q としてその座標を計算すると以下のように表せる。

$$p = \left(r - \frac{W}{2}\right) \begin{pmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$q = \left(r + \frac{W}{2}\right) \begin{pmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \\ 0 \end{pmatrix}$$

3.2.2 カメラ座標への変換

まず、グローバル座標でのユーザ（以降、カメラとする）とターゲットの位置を定める。ターゲットの中心を原点とし、カメラは原点から距離 L 離れた位置にあるとする。さらに、カメラは y 軸を中心に、 z 軸の正の方向を基準に ϕ と定義し、原点を向いているとする。 ϕ は AG が表す角度と同じものを表す。これにより、カメラとターゲットは、ターゲットの中心を原点として、図 1 のような位置関係になり、カメラはターゲットの中心を向いている。その時、カメラ位置は以下のように表せる。

$$\begin{pmatrix} -L \sin \phi \\ 0 \\ -L \cos \phi \end{pmatrix}$$

p 及び q の座標をカメラ座標に変換する。まず、並進補正を行い、並進後の p 及び q は以下のように表せる。

$$\begin{pmatrix} p'_x \\ p'_y \\ p'_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} p_x + L \sin \phi \\ p_y \\ p_z + L \cos \phi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \left(r - \frac{W}{2}\right) \cos \theta + L \sin \phi \\ \left(r - \frac{W}{2}\right) \sin \theta \\ L \cos \phi \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} q'_x \\ q'_y \\ q'_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} q_x + L \sin \phi \\ q_y \\ q_z + L \cos \phi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \left(r + \frac{W}{2}\right) \cos \theta + L \sin \phi \\ \left(r + \frac{W}{2}\right) \sin \theta \\ L \cos \phi \end{pmatrix}$$

また、カメラは ϕ 度時計回りに回転しているため、カメラ座標へ戻すには $-\phi$ 度回転を適用する。回転行列は以下のように表せる。

$$R_y(-\phi) = \begin{pmatrix} \cos \phi & 0 & -\sin \phi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \phi & 0 & \cos \phi \end{pmatrix}$$

回転を適用した後の p 及び q のカメラ座標は以下のように表せる。

$$\begin{pmatrix} X_{cp} \\ Y_{cp} \\ Z_{cp} \end{pmatrix} = R_y(-\phi) \begin{pmatrix} p'_x \\ p'_y \\ p'_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \left(r - \frac{W}{2}\right) \cos \phi \cdot \cos \theta \\ \left(r - \frac{W}{2}\right) \sin \theta \\ \left(r - \frac{W}{2}\right) \sin \phi \cdot \cos \theta + L \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} X_{cq} \\ Y_{cq} \\ Z_{cq} \end{pmatrix} = R_y(-\phi) \begin{pmatrix} q'_x \\ q'_y \\ q'_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \left(r + \frac{W}{2}\right) \cos \phi \cdot \cos \theta \\ \left(r + \frac{W}{2}\right) \sin \theta \\ \left(r + \frac{W}{2}\right) \sin \phi \cdot \cos \theta + L \end{pmatrix}$$

3.2.3 投影と距離計算

ピンホールモデルでは投影後の座標を以下のように表せる。ここで f は焦点距離である。

$$u = f \frac{X_c}{Z_c}, \quad v = f \frac{Y_c}{Z_c}.$$

よって, p, q 間の画像上の距離 d は以下のように示される。

$$d = \sqrt{(u_q - u_p)^2 + (v_q - v_p)^2}.$$

$$u_p = f \frac{(r - \frac{W}{2}) \cos \theta \cos \phi}{(r - \frac{W}{2}) \cos \theta \sin \phi + L}$$

$$v_p = f \frac{(r - \frac{W}{2}) \sin \theta}{(r - \frac{W}{2}) \cos \theta \sin \phi + L}.$$

$$u_q = f \frac{(r + \frac{W}{2}) \cos \theta \cos \phi}{(r + \frac{W}{2}) \cos \theta \sin \phi + L}$$

$$v_q = f \frac{(r + \frac{W}{2}) \sin \theta}{(r + \frac{W}{2}) \cos \theta \sin \phi + L}.$$

このときの d は $W(\theta)$ に相当する。ここで, u_p, u_q, v_p, v_q の θ を $\theta = \frac{s}{r}$ で置き換えると以下の式が成り立つ。

$$W(s) = d(s) = \sqrt{(u_q(s) - u_p(s))^2 + (v_q(s) - v_p(s))^2}$$

これを用いて ID_C を導出すると式 7 になる。

$$ID_C = \int_0^{2\pi r} \frac{\left[(r - \frac{W}{2}) \cos \frac{s}{r} \sin \phi + L \right] \left[(r + \frac{W}{2}) \cos \frac{s}{r} \sin \phi + L \right]}{f L W \sqrt{\cos^2 \frac{s}{r} \cos^2 \phi + \sin^2 \frac{s}{r}}} ds \quad (7)$$

3.3 線形的な幅変化に近似したモデル

3.2 章では複雑な経路にも対応する一般化したモデルを使用した, その計算が複雑になることから, 本稿では近似した簡易モデルでの検証も追加で行う。ここでは, 2.1 章で紹介した Accot らのステアリングの法則 [2] の経路を進むにつれて幅が一定の割合で狭まる直線の経路のモデル (式 2) を使用した。 ID_{NT} の導出では, 実験環境を実行したときの HMD の初期位置から見たターゲット経路の長さ, 見かけの幅の角度を使用している。以降では, 経路を進むにつれて見かけの幅が一定の割合 (線形) で変化すると近似してそこから導出されるモデルの導出方法を説明する。

3.3.1 AG が 0 度の時の ID

AG が 0 度の時は, ターゲットの一周を通して幅変化が発生しないため, HMD から見た見かけの幅の角度を W' として ID は式 8 に示される。

$$ID = \frac{A}{W'} \quad (8)$$

このとき A はターゲットの円周の長さを示す。

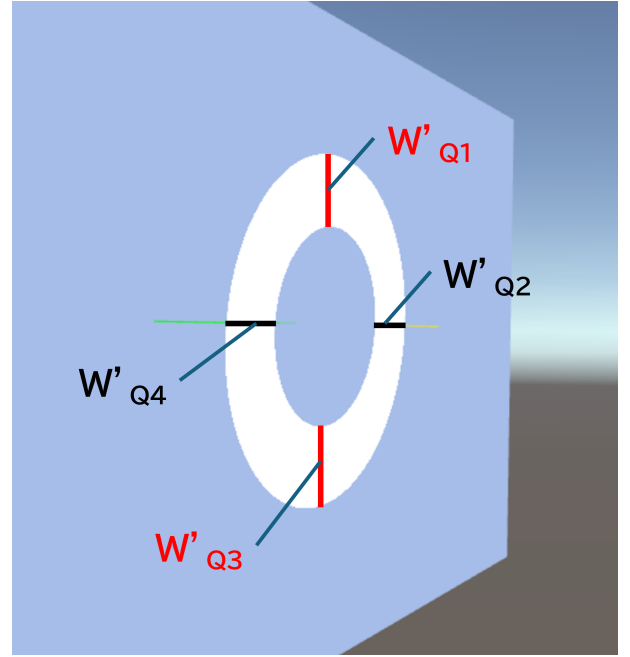


図 4: 時計回りに操作するとき, ターゲットの経路の見かけの幅が赤から黒の区間にかけては幅が減少し, 黒から赤の区間にかけては幅が増加する。また, HMD から見たターゲットの経路の見かけの幅の角度を $W'_{Q1}, W'_{Q2}, W'_{Q3}, W'_{Q4}$ を定義する。

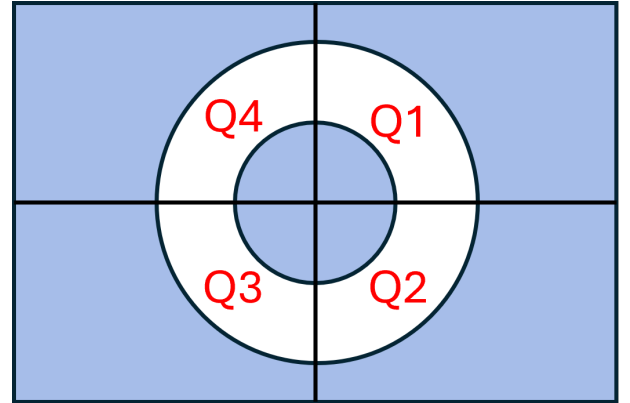


図 5: 90° ごとに区切った範囲の定義。

3.3.2 AG が 0 以外の時の ID

AG が 0 以外の時は, 図 4 のように HMD から見たターゲットの経路の見かけの幅が減少から増加する区間と, 増加から減少する区間がある。そのため, ターゲットを図 5 のように 90 度ごとに区切って $Q1, Q2, Q3, Q4$ の区間ごとの難易度指標をそれぞれ求めたのち合算させることで ID_{NT} を算出した。それぞれの区間ごとの ID を $ID_{Q1}, ID_{Q2}, ID_{Q3}, ID_{Q4}$ として, 図 4 のように HMD から見たターゲットの経路の見かけの幅の角度を $W'_{Q1}, W'_{Q2}, W'_{Q3}, W'_{Q4}$ と定義すると式 9, 式 10 が成り立つ。

$$ID_{Q1} = \frac{\frac{A}{4}}{W'_{Q1} - W'_{Q2}} \times \ln \frac{W'_{Q1}}{W'_{Q2}} \quad (9)$$

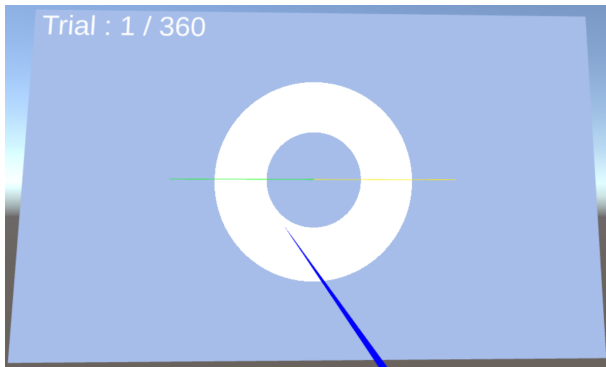


図 6: 実験開始時の HMD に表示される映像。

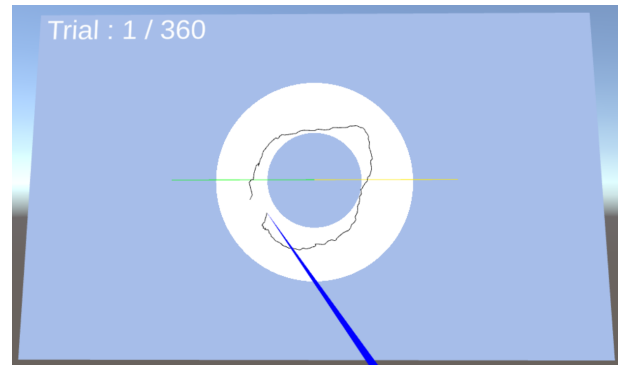


図 7: 実験中の HMD に表示される映像。

$$ID_{Q3} = \frac{\frac{A}{4}}{W'_{Q3} - W'_{Q4}} \times \ln \frac{W'_{Q3}}{W'_{Q4}} \quad (10)$$

このとき A は円周の長さを示す。式 2 のステアリングの法則は、 W_1 と W_2 の関係性を入れ替えても成立するため式 11 が成り立つ。

$$ID_{Q1} = ID_{Q2} \quad ID_{Q3} = ID_{Q4} \quad (11)$$

よってこれらから算出される ID_{NT} は式 12 となる。

$$ID_{NT} = 2 \times ID_{Q1} + 2 \times ID_{Q3} \quad (12)$$

AG が 20 度の場合において、いくつかの条件下では W'_{Q3} より W'_{Q4} が大きくなる場合があったが、これも式 2 のステアリングの法則において W_1 と W_2 の関係性を入れ替えても成立するため考慮されている。

4. 実験

実験開始時のヘッドマウントディスプレイ (HMD) に表示される映像を図 6 に示す。実験では 3 種類の A , 3 種類の W , 4 種類の角度条件 AG から操作時間の測定を行う。以下に詳細を述べる。

4.1 機材

PC (ASUS TUF Dash F15 FX516PR, Intel Core i7-11370H, GeForce RTX 3070 Laptop GPU, Windows 11 Home), HMD (Meta, Meta Quest 3, 片目あたり 2064 × 2208 pixels), コントローラ (Meta Quest Touch Plus コントローラ (右)) を使用した。システムは Unity (2022.3.11f1) で実装し、Meta Quest Link を使用して USB-C & USB-A ケーブル (3.0m, USB 3.0) で PC とヘッドマウントディスプレイを接続した。ヘッドマウントディスプレイのリフレッシュレートは 120Hz であった。地面と平行に回転する椅子を用意して使用した。

4.2 参加者

実験参加者は情報系の大学生及び大学院生の 12 名 (男性 8 名, 女性 4 名, 平均 21.17 歳, 標準偏差 0.90 歳) で

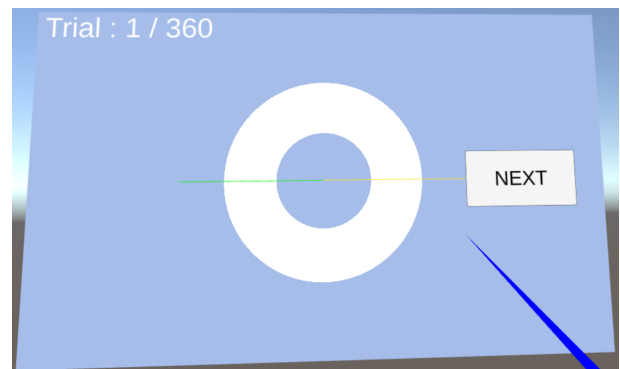


図 8: タスクが終了したときの HMD に表示される映像。

ある。参加者は全員が右利きで右手でコントローラを使用した。また、1 名を除いて HMD の着用経験があった。日常的に HMD を使用している参加者が 1 名いたが、コントローラを併用する頻度はあまり多くなかった。

4.3 タスク

実験中の HMD に表示される映像を図 7 に表す。参加者は時計回りにターゲットの中心から左に伸びている緑色の線分を下から上に通過し、経路から出ないように 1 周半通過したのちターゲット中心から右に伸びている黄色い線分を上から下に通過する。緑色の線分を下から上に通過したときにタスクを開始し、黄色い線分を上から下に通過したときにタスクを終了した。コントローラのトリガーボタンを押している間は仮想空間内上に表示されているコントローラの手元から出る青い光線 (レイ) の先からターゲットのある平面上の通過した経路が表示される。トリガーボタンを離すと通過した経路は消える。タスク中はトリガーボタンを押した状態で行い、離すと経路が消えてしまうのでその場合はもう一度やり直すように伝えた。

通過した経路がターゲットの経路の内側の時は黒色で表現される。経路外にはみ出た場合は赤色で表現される。タスクが終了すると図 8 のようにターゲット右側に NEXT と表示されたボタン (NEXT ボタン) が出現し、参加者はレイをボタンに合わせた状態でトリガーボタンを押すと次のタスクへと移ることができる。

4.4 手順

仮想空間内の参加者とターゲットまでの距離 L はすべての試行で 100Unit (Unity 内の単位) とした。円周の距離 A は {20, 40, 60}Unit とした。経路の幅 W は {4, 6, 8}Unit とした。また、角度条件 AG は {0, 20, 40, 60}度 とした。Accot らによって提案されたステアリングの法則 [2] の式 1 を使用すると、 ID は 4.44 から 16.0 までの範囲であった。

パラメータの組み合わせは $3(A) \times 3(W) \times 4(AG) = 36$ 種類であり、ランダムな提示順の 36 試行を 1 セットとし、実験では 10 セット行った。ただし、最初の 1 セットは練習として記録するため分析からは除外する。そのため、本実験で記録されるデータは $36(試行) \times 9(セット) \times 12(名) = 3888$ 回分である。

試行間 (Next ボタンが表示されている間) には小休憩を自由に取ることができることを伝え、参加者には腕に負担を感じたら積極的に休むようにしてもらった。スピードを重視して試行を行うか、ミスをしないうこと重視して試行を行うかは参加者に委ねたが、肘は空中に浮かせるように指示した。事前のタスク説明から全試行終了まで参加者 1 人当たり約 40 分を要した。その後、参加者の性別や年齢、HMD の使用頻度、実験についてのインタビュー調査を行った。

4.5 計測するデータ

タスク開始直後の動き始めは、初速がゼロによる影響で徐々に加速する挙動が見られる [10]。先行研究 [11] では安定的な操作時間を得られる中間地点だけを分析しているため、本稿においても計測するデータは最初の 1/4 周と最後の 1/4 周を除外した一周分のデータを分析した。そのため計測した操作時間 MT はタスクを開始して最初にターゲットの 0 時の方角を通過した時間から 2 回目に 0 時の方角を通過するまでの時間となる。

また、全体の操作時間だけでなく図 5 に定義するように経路を 90 度ごとに区切ってそれぞれの範囲内の操作時間 $MT_{Q1}, MT_{Q2}, MT_{Q3}, MT_{Q4}$ を計測した。 MT と $MT_{Q1}, MT_{Q2}, MT_{Q3}, MT_{Q4}$ には式 13 の関係が成り立つ。

$$MT = MT_{Q1} + MT_{Q2} + MT_{Q3} + MT_{Q4} \quad (13)$$

実験では、経路から一度でも操作がはみ出した場合はその試行はエラーとして計測した。

5. 実験結果と考察

実験において、3888 試行のデータが得られた。同一条件の結果をすべて抽出し、四分位範囲にの 1.5 倍を超えて範囲外に位置するデータを外れ値として判定した。外れ値の処理を行った結果、67 試行が除外された。エラーした試行は他のステアリングの研究 [12] においても使用している

ことから本稿でも除外せず使用する。これについては、エラーが発生してもタスクを継続して、全試行の MT を分析に用いる KEEP ルールと、エラーしたらその試行をやり直すという RETRY ルールを比較して、両方ともステアリングの法則が適合すること [13] が示されたことを根拠とする。

すべての従属変数について、各参加者の 9 セットの平均値を算出し、分析した。ANOVA は軽度の正規性違反に対してもロバストな分析方法であるため [14, 15], RM-ANOVA (反復測定分散分析) によって分析を行った。ペアワイズテストにおける p 値の補正には Bonferroni の手法を用いた。以降のグラフにおいて、エラーバーは 95% 信頼区間、***, **, * はそれぞれ $p < 0.001$, $p < 0.01$, $p < 0.05$ を示す。

5.1 AG による影響

実験によって得られた各 AG における平均 MT を図 9a に示す。平均 MT は AG が 0 度において 1.43s, 20 度において 1.41s, 40 度において 1.50s, 60 度において 1.86s であった。多重比較の結果、0 度と 20 度の間を除くすべての組み合わせに有意差があった。

また、各 AG における平均エラー率を図 9b に示す。平均エラー率は AG が 0 度において 13.27%, 20 度において 13.58%, 40 度において 14.51%, 60 度において 30.97% であった。多重比較の結果では 0 度と 60 度, 20 度と 60 度, 40 度と 60 度の 3 つの組み合わせにおいて有意差があった。

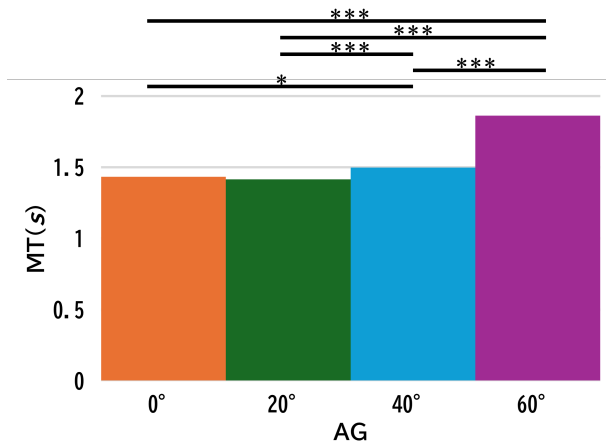
これより、 AG の値が大きくなると操作時間が長くなり、エラー率が高くなることが示された。特に 60 度の時にその結果は顕著になり、角度が大きくなると操作がしづらくなることを示唆している。実験後のインタビューについても 2 名が AG が 60 度の時の試行が難しかったと回答していた。

5.2 ID と操作時間の関係

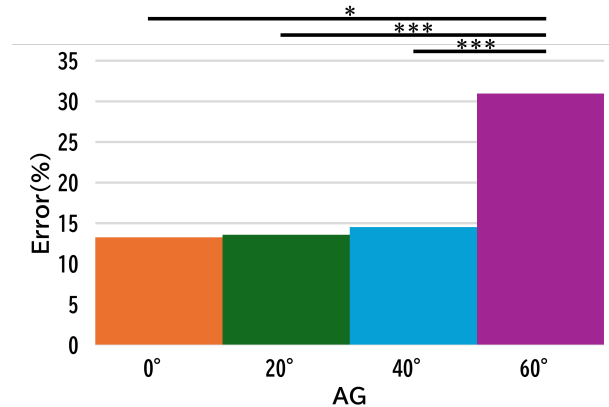
実験において得られた MT と ID の関係を図 10 に示す。ここでの ID はターゲットの円周の長さ A とターゲットの幅 W を、2 章の式 1 のステアリングの法則に適用したものを使用した。各 AG における決定係数は、0 度において $R^2 = 0.995$, 20 度において $R^2 = 0.995$, 40 度において $R^2 = 0.996$, 60 度において $R^2 = 0.994$ であった。これは、各 AG における経路通過時間がステアリングの法則にしたがっていることを示している。しかし、全ての AG 条件を混在させて分析すると $R^2 = 0.904$ になり、角度によって操作時間に差が生じ、 ID による MT の推定精度が下がることがわかった。

5.3 ID_C と操作時間の関係

3.2 章で導出した ID_C と実験により得られた MT の関係



(a) AG と MT の関係.



(b) AG とエラー率の関係.

図 9: AG が高くなるにつれて MT とエラー率が高くなり、参加者が AG の影響によって操作がしにくくなることを示唆している。

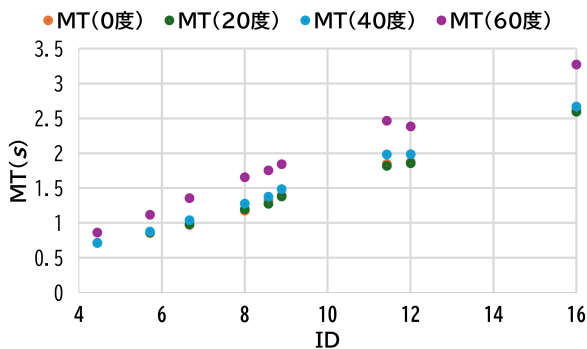


図 10: MT と ID の関係

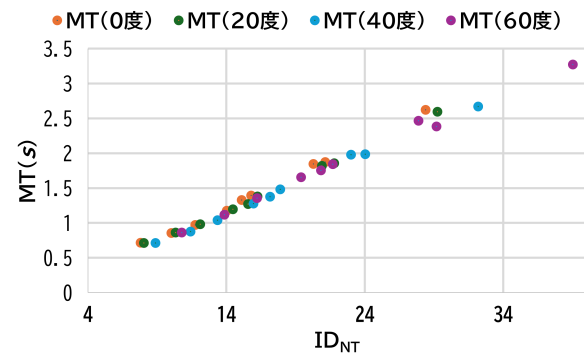


図 12: MT と ID_{NT} の関係

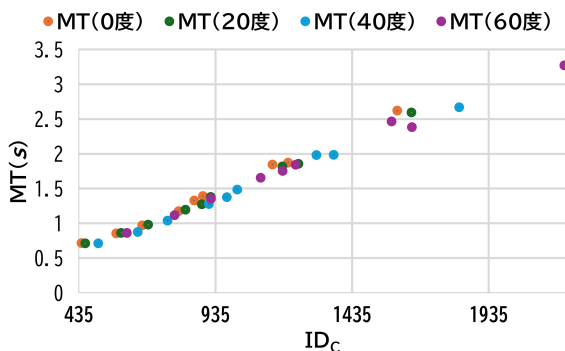


図 11: MT と ID_C の関係

を図 11 に示す。ここで、 ID_C の積分は解析的に解くことが困難であるため、数値積分によって計算を行った。回帰式は $MT = a + b \times ID_C$ で表され、決定係数は $R^2 = 0.988$ であった。結果、 ID に比べて ID_C は全体に対して高いモデル適合度を示し、ユーザの経路に対する立ち位置を考慮できる可能性が示唆された。

5.4 ID_{NT} と操作時間の関係

3.2 章で導出した ID_{NT} と実験により得られた MT の関係を図 12 に示す。回帰式は $MT = a + b \times ID_{NT}$ で表さ

れ、決定係数は $R^2 = 0.989$ であった。結果、 ID に比べて ID_{NT} も全体に対して高いモデル適合度を示し、ユーザの経路に対する立ち位置を考慮できる可能性が示唆された。

5.5 ID_C と ID_{NT} の違いによる考察

ID_C と ID_{NT} を算出し、実験から得られた MT を適用すると、わずかな差ではあるが幅が一定の割合で狭まる直線のモデルのほうが適合度が高い結果となった。これらは、正面にいない場合のステアリングの経路において、見かけの経路の幅が非線形に変化する経路を線形の変化とみなしてモデル化を行うほうがよい可能性を示唆している。この原因として、ユーザは経路の幅が急激に減少する区間では減少した後の幅に適応する速さで操作し、急激に増加する区間においては増加した後の幅に対応する速さで操作していることが考えられる [16]。

6. 結論

本稿では大規模なディスプレイや三次元空間内でのインタラクションなどにおいて、ユーザが UI の正面にいない場合のステアリング時間のモデル化を行った。Accot らのステアリングの法則 [2] における、複雑な経路にも対応

する一般化したモデル(式3)と、経路を進むにつれて幅が一定の割合で狭まる直線の経路のモデル(式2)の2つのモデルを導出し実験で得られたMTを適合した。どちらのモデルにおいてもステアリング時間の高精度な予測($R^2 > 0.988$)が可能であることが示された。このことから、ユーザがUIの正面にいない場合には、ユーザから見た経路幅と経路長を用いてタスク難易度を算出すべきであることが示された。2つのモデル間の比較では、経路を進むにつれて幅が一定の割合で狭まる直線の経路のモデル(式2)のほうがわずかに高い精度で操作時間を予測できる可能性が示された。

参考文献

- [1] Fitts, P. M.: The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement., *Journal of experimental psychology*, Vol. 47, No. 6, p. 381 (1954).
- [2] Accot, J. and Zhai, S.: Beyond Fitts' law: models for trajectory-based HCI tasks, *Proceedings of the ACM SIGCHI Conference on Human factors in computing systems*, pp. 295-302 (1997).
- [3] Yamanaka, S. and Usuba, H.: 0.2-mm-Step Verification of the Dual Gaussian Distribution Model with Large Sample Size for Predicting Tap Success Rates, *Proc. ACM Hum.-Comput. Interact.*, DOI: 10.1145/3698153 (2024).
- [4] Findlater, L., Zhang, J., Froehlich, J. E. and Moffatt, K.: Differences in Crowdsourced vs. Lab-based Mobile and Desktop Input Performance Data, *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '17, New York, NY, USA, ACM, DOI: 10.1145/3025453.3025820 (2017).
- [5] Accot, J. and Zhai, S.: Performance evaluation of input devices in trajectory-based tasks: an application of the steering law, *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '99, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, DOI: 10.1145/302979.303133 (1999).
- [6] Liu, L., Martens, J.-B. and van Liere, R.: Revisiting path steering for 3D manipulation tasks, *International Journal of Human-Computer Studies*, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2010.11.006> (2011).
- [7] Wei, Y., Xu, K., Li, Y., Yu, L. and Liang, H.-N.: Exploring and Modeling Directional Effects on Steering Behavior in Virtual Reality, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, DOI: 10.1109/TVCG.2024.3456166 (2024).
- [8] Kopper, R., Bowman, D. A., Silva, M. G. and McMahan, R. P.: A human motor behavior model for distal pointing tasks, *International Journal of Human-Computer Studies*, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2010.05.001> (2010).
- [9] Ens, B., Ahlström, D. and Irani, P.: Moving Ahead with Peephole Pointing: Modelling Object Selection with Head-Worn Display Field of View Limitations, *Proceedings of the 2016 Symposium on Spatial User Interaction*, SUI '16, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, DOI: 10.1145/2983310.2985756 (2016).
- [10] Senanayake, R., Hoffmann, E. R. and Goonetilleke, R. S.: A model for combined targeting and tracking tasks in computer applications, *Experimental Brain Research*, DOI: 10.1007/s00221-013-3700-4 (2013).
- [11] Montazer, M., Drury, C. and Karwan, M.: An optimization model for self-paced tracking on circular courses, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, DOI: 10.1109/21.23090 (1988).
- [12] Shota Yamanaka, Hiroki Usuba, H. T. and Miyashita, H.: Predicting Success Rates in Steering Through Linear and Circular Paths by the Servo-Gaussian Model, *International Journal of Human-Computer Interaction*, DOI: 10.1080/10447318.2023.2212221 (2024).
- [13] Yamanaka, S.: Sample-size and Repetition Effects on the Prediction Accuracy of Time and Error-rate Models in Steering Tasks, *Journal of Information Processing*, DOI: 10.2197/ipsjip.32.247 (2024).
- [14] Dixon, P.: Models of accuracy in repeated-measures designs, *Journal of Memory and Language*, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jml.2007.11.004> (2008). Special Issue: Emerging Data Analysis.
- [15] Blanca, M., Alarcón, R., Arnau, J., Bono, R. and Bendantayan, R.: Non-normal data: Is ANOVA still a valid option?, *Psicothema*, DOI: 10.7334/psicothema2016.383 (2017).
- [16] Yamanaka, S., Stuerzlinger, W. and Miyashita, H.: Steering Through Sequential Linear Path Segments, *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '17, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, DOI: 10.1145/3025453.3025836 (2017).