

幅の変化する経路を逆向きにステアリングする 時間の予測方法の提案

山中 祥太^{1,2,a)} 宮下 芳明^{1,b)}

受付日 2015年5月11日, 採録日 2015年10月2日

概要: 経路内を移動する運動をモデル化したステアリングの法則によって, 操作時間をタスクの難易度 ID から予測できるようになった. 本稿では, 幅が線形に変化する直線状経路の移動時間が通過方向によって異なることに着目し, 通過方向ごとの難易度 ID の関係を表す式を導出した. これによって, 1方向の通過時間を十分に計測すれば, 他方向の通過時間は少ないデータから予測できるようになる. 実験では, 狭まる方向への通過時間を1種類の ID で計測するだけで, 残り5種類の ID における通過時間を高精度 (決定係数 $R^2 = .971$) で予測できることを示し, 有用性を確認した.

キーワード: ステアリングの法則, グラフィカルユーザインタフェース, ポインティング, 操作性

A Method to Predict Steering Time in the Opposite Direction through a Path with Non-constant Width

SHOTA YAMANAKA^{1,2,a)} HOMEI MIYASHITA^{1,b)}

Received: May 11, 2015, Accepted: October 2, 2015

Abstract: The performance of trajectory-based tasks is modeled by the steering law, which predicts the required time from the index of difficulty (ID). This paper focuses on the fact that the time required to pass through a straight path with linearly-varying width alters depending on the direction of the movement. In this study, an expression for the relationship between the ID of narrowing and widening paths has been developed. This expression can be used to predict the movement time needed to pass through in the opposite direction from only a few data points, after measuring the time needed in the other direction. In the experiment, the times for five ID s were predicted with high precision from the measured time for one ID , thereby illustrating the effectiveness of the proposed method.

Keywords: Steering law, graphical user interface, pointing, operation performance

1. はじめに

HCI分野において人間の運動のモデル化は重要なテーマであり, 1次元のポインティングタスクの所要時間を予測するフィッツの法則 [9] や, これを2次元に拡張したモデル [5] がよく知られている. 他にも, スタートラインとゴー

ルラインを通過する時間 [4] や, 細長い経路を通過する時間をモデル化したステアリングの法則 [1] などがある. これらはすべて, タスクの難易度指標 ID (Index of difficulty) と移動時間 MT (Movement time) に線形の関係があることを示している.

ステアリングの法則を導出した Accot らの文献 [1] において, 図 1 (a) のように幅が狭まる経路 (Narrowing Tunnel) の通過時間を予測するモデルが提案され, 実験で精度の高さが示されている. 著者らはこのモデルを追検証する実験において, 狭まる経路を図 1 (b) のように逆方向に通過すると操作時間が短縮されることを発見した. この通過方向 (狭まる方向, 広がる方向) による移動時間の差に何らかの

¹ 明治大学大学院理工学研究科新領域創造専攻デジタルコンテンツ系

Meiji University, Nakano, Tokyo 164-8525, Japan

² 日本学術振興会特別研究員

JSPS Research Fellow, Chiyoda, Tokyo 102-8472, Japan

a) stymnk@meiji.ac.jp

b) homei@homei.com

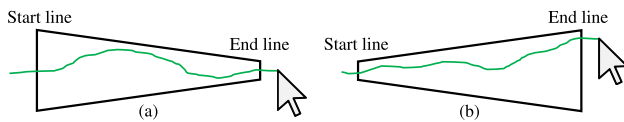


図 1 幅が狭まる経路 (a) と広がる経路 (b) の通過

Fig. 1 Steering through (a) a narrowing tunnel and (b) a spreading tunnel.

関係があるのか、あるいは無関係なのかについて検証された文献は見当たらない。たとえば狭まる方向は広がる方向に比べて一定値だけ ID が大きい、あるいは一定割合だけ大きいといった関係が判明すれば、逆方向の通過時間を容易に予測できるようになる。

そこで本稿では、狭まる方向と広がる方向の通過時間の関係を理論的に求め、実験でその妥当性を検証する。本研究の貢献は次の 2 点である。

- 通過方向による難易度 ID の関係を理論的に求めたこと
- 関係の正確さを実験により検証し、1 方向の通過時間から他方向の通過時間を高精度に予測できると示したこと

2. 関連研究

GUI 環境において、指定された軌道に沿う動きを求められることは多い。階層メニューから目的の項目を選んでいく操作などがこれに該当する。このような 2 次元方向に制約の課された動作をモデル化するために、Accot らによってステアリングの法則 [1] が提案された。この実験は、ディスプレイ内のカーソルを机上のスタイラス操作で移動させる間接制御方式で行われ、幅が一定で直線型の経路、幅が狭まる直線型の経路、幅が広がる螺旋型の経路の 3 種類ともモデルの高い一致度が示されている。さらに一定幅の環状経路 [2], [3] にも適用可能であることが分かっている。また様々な環境下でこの法則が成立することが示されており、デバイスの変更 [2], スケール (CD ゲイン) の変更 [3], 魚眼レンズの視覚効果の追加 [10], スタイラスを入力面から浮かせたまま動かすホバー操作 [11], カーソルサイズの変更 [16], スタイラス入力面の摩擦度合いの変更 [18] などの条件で実験が行われている。2 次元の GUI 環境以外では、3 次元入力 [7], [14] や、カーソルを自動車に置き換えたドライブシミュレータ [20] にもモデルを適用できることが示されている。

モデルの補正に関する議論もされている。経路の幅 W が広すぎると実際に使われる幅 (実効幅) の割合が低くなるため、これを考慮して ID を算出するモデルが提案されている [12]。この補正モデルでは、カーソルが経路から出た後もタスクを継続して実効幅を算出すればモデルが適用できることを示している。また、曲がり角を含む経路の通過時間を予測するための補正方法も検証されてお

り [17], より複雑なタスクを想定したモデルが構築されている。

ポインティングとステアリングが複合したタスクの操作時間を予測する方法も提案されている [8], [13]。たとえば階層メニューでは最初と最後に 1 つの項目をポインティングする操作が加わるため、既知のモデルを組み合わせても操作時間を予測できるか検証することは重要である。また操作時間に制約を設けた場合のエラー率を検証する実験も行われており [19], ステアリングタスクにおいて時間と正確さはトレードオフであることが示されている。

3. ステアリングの法則のモデル導出と通過方向による ID の差

ここでは Accot らのモデル [1] のうち、一定幅の線形経路と幅が狭まる線形経路の導出方法を説明し、通過方向によって操作時間に差が生じる理由を考察する。

3.1 ステアリングの法則のモデル導出方法

3.1.1 線形で一定幅の経路

図 2(a) のように、幅 W の線分が距離 A だけ離れて 2 本設置されているとき、これらを通過する時間 MT_1 は、

$$MT_1 = a + b \times ID_1, \quad ID_1 = \log_2 \left(\frac{A}{W} + 1 \right) \quad (1)$$

になることが実験で示されている。 a と b は実験により決定される定数である。これを基にして、図 2(b) のように距離 A を N 等分する位置に幅 W の線分を設置すると、そのすべてを通過するための難易度 ID_N は [1] によれば、

$$ID_N = N \log_2 \left(\frac{A}{NW} + 1 \right) \quad (2)$$

となる。ここで図 2(c) のように $N \rightarrow \infty$ とすると、 $ID_\infty = A/(W \ln 2)$ となり、 $\ln 2$ を定数 b に吸収させれば、

$$MT_\infty = a + b \times ID_\infty, \quad ID_\infty = \frac{A}{W} \quad (3)$$

となる。つまり無限個設置された線分をすべて通過する時間 MT は、

$$MT = a + b \times \frac{A}{W} \quad (4)$$

で求められる。これは一定幅の経路を通過するタスクと同じ動作であるから、幅 W 、距離 A の経路を通過するステアリングタスクの所要時間は式 (4) で求められる。

3.1.2 幅が狭まる経路

図 3(a) のように、距離 A で幅が W_L から W_R に狭まる経路の通過時間 MT_{NT} は式 (4) を基に算出される。図 3(b) のように経路を微小区間 dx ごとに分割し、短距離のステアリングを連続して行う動作と見なせば、 MT_{NT} は次のように表される。

$$MT_{NT} = a + b \times ID_{NT} \quad (5)$$

$$ID_{NT} = \frac{A}{W_R - W_L} \ln \frac{W_R}{W_L} \quad (6)$$

Accot らは MT_{NT} を幅が狭まる方向へ通過する時間であると定義し、実験でもその方向へのみ移動するタスクでモデルの正確さを検証している。

3.2 幅が広がる方向への移動

ここで著者が着目したのが、幅が広がる方向への移動時間 MT_{ST} も式 (6) と同じ式になる点である。図 3(a) の経路を左向きに通過する難易度を ID_{ST} とすれば、

$$ID_{ST} = \frac{A}{W_L - W_R} \ln \frac{W_L}{W_R} = \frac{A}{W_R - W_L} \ln \frac{W_R}{W_L} \quad (7)$$

となり、 $ID_{ST} = ID_{NT}$ である。しかし実際には幅が広が

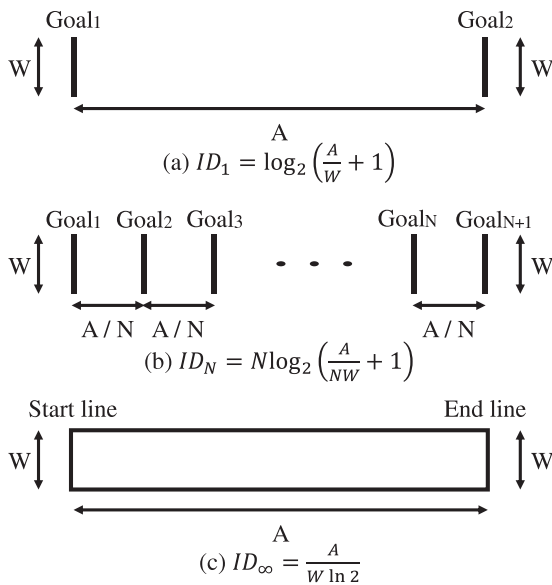


図 2 一定幅で直線形状の経路の難易度
Fig. 2 ID of a linear tunnel with constant width.

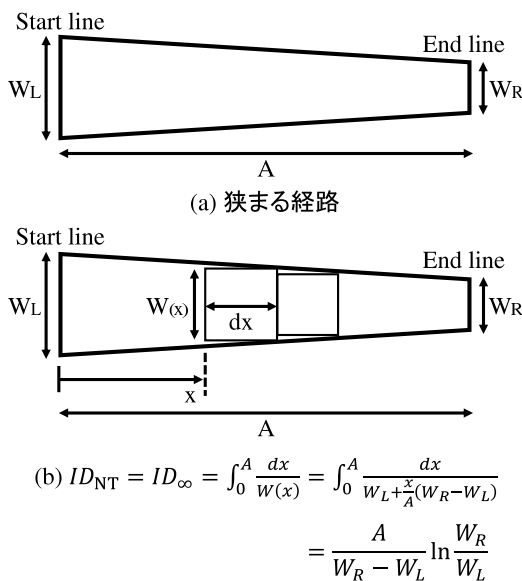


図 3 幅が狭まる直線形状の経路の難易度
Fig. 3 ID of a linear narrowing tunnel.

る方向へ移動した方が短時間になるため、この導出方法では見落とされているポイントがあると考えられる。

著者らが文献を調査した限りでは、幅が変化する経路の通過方向を切り替えた実験は見当たらず、操作時間に差が生じることが発見されなかったのではないかと推測する。Accot らのオリジナルの実験 [1] では幅が広がる螺旋経路で実験されているものの、これは幅が狭まる向きで実験されておらず、やはり同一形状で通過方向だけが異なるタスクは比較されていない。

4. 逆方向への通過時間を予測する ID

ポインティングタスクについては、加速と減速を幾度も繰り返しながら目標地点に到達することが知られている [6], [15]。著者らは、狭まる経路のステアリングタスクも同様に、少しずつ方向と速度を修正しながら図 4 のような移動を繰り返していくと考えた。一方で Accot らが提案したモデル [1] は、狭まる経路を N 分割してそれぞれの微小区間の合計 ID を求め、 $N \rightarrow \infty$ とすることで経路全体の難易度 ID_{NT} を決定していた。図 4 のような移動方向の修正が、特定の距離を移動するたびに発生するのか、あるいは時間ベースで発生するのかわ定かではない。しかし $N \rightarrow \infty$ としたモデルは修正作業を無限回行うことになり、通過方向の難易度差は考慮されないことになる。

分割された微小区間でどの程度カーソル座標のずれ (図 4 であれば縦方向の揺れ動き) が生じてよいかを考えると、実際には Accot らが提案するような一定のものではなく、微小区間のエンドライン側の幅に依存する。なぜならカーソルは微小区間に進入した時点でエンドライン方向への速度を持っているため、進入直後にスタート側の経路幅いっぱいまでずれてしまうとは考えにくいからである。したがって、広がる方向への通過では図 5(a) のように微小区間の広い方 (エンドライン側) の幅いっぱいまでカーソルがずれてよいのに対し、(b) の狭まる方向への通過では広い方 (スタート側) の幅を有効に活用できず、通

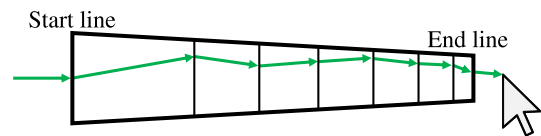


図 4 少しずつ方向を修正しながら狭まる経路を通過する運動
Fig. 4 Steering through a narrowing tunnel with small movement corrections.

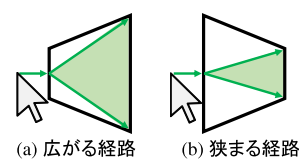


図 5 微小区間で許される誤差範囲
Fig. 5 Acceptable error movement in an infinitesimal path.

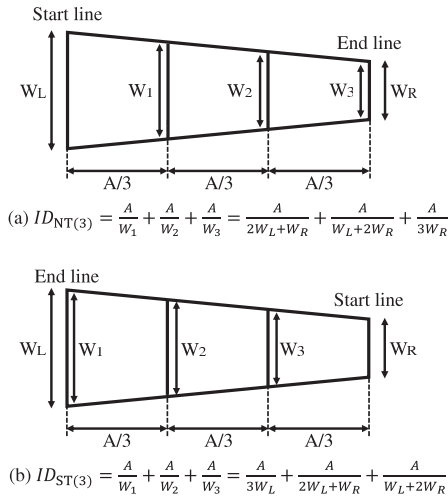


図 6 修正回数が $N = 3$ の場合の狭まる経路の通過

Fig. 6 Steering through a narrowing tunnel with three movement corrections.

過する難易度が上昇する。当然 (a) では微小区間のスタートラインの幅が (b) より狭いため、微小区間に進入するための時間は (b) より長いと考えられる。しかし経路全体で考えると、広がる経路で最も通過が困難なのはスタートラインであり、そのための微調整に要する時間はステアリングタスクの所要時間には含まれない。よって全体の通過時間は広がる経路の方が短い ($MT_{ST} < MT_{NT}$) というのが著者らの仮説である。もちろん微小区間の距離 dx を限りなく小さくすれば Accot らのモデルと一致するが、移動する間の修正回数が有限だとすれば、通過方向によって難易度に差が生じることになる。

より具体的に、たとえば経路内で $N = 3$ 回の修正作業が等距離で起こると仮定すると、図 6(a) のように幅が狭まる経路を右向きに通過する難易度 $ID_{NT(3)}$ は、

$$ID_{NT(3)} = \frac{A/3}{(2W_L + W_R)/3} + \frac{A/3}{(W_L + 2W_R)/3} + \frac{A/3}{(3W_R)/3} = \frac{A}{2W_L + W_R} + \frac{A}{W_L + 2W_R} + \frac{A}{3W_R} \quad (8)$$

である。これに対し、図 6(b) のように幅が広がる方向へ通過する難易度 $ID_{ST(3)}$ は、

$$ID_{ST(3)} = \frac{A}{3W_L} + \frac{A}{2W_L + W_R} + \frac{A}{W_L + 2W_R} \quad (9)$$

となる。この難易度の差を $ID_{GAP(3)}$ とすると、

$$ID_{GAP(3)} = ID_{NT(3)} - ID_{ST(3)} = \frac{A}{3W_R} - \frac{A}{3W_L} = \frac{A(W_L - W_R)}{3W_L W_R} \quad (10)$$

となる。分割数を一般的に N とした難易度差 $ID_{GAP(N)}$ は次のようになる。

$$ID_{GAP(N)} = \frac{A(W_L - W_R)}{N W_L W_R} \quad (11)$$

すなわち N は経路のパラメータをどの程度難易度差に反映させるか決める役割を果たす。

ここまでは距離 A を N 等分するという仮定で難易度差を算出したが、実際には距離や時間に関して等間隔に修正作業が発生するわけではなく、幅の変化度合いや距離 A 、操作デバイスによって異なる値をとるはずである。したがって式 (11) の等分割数 N を実験条件によって決定される重み (free weight [5]) $k (> 0)$ に置き換え、

$$ID_{GAP(k)} = \frac{A(W_L - W_R)}{k W_L W_R} \quad (12)$$

としたものが通過方向によるステアリングタスクの難易度差である。これは Accot らの提案するモデルの ID である式 (6) とは異なる式の構造を持っているため、一定値または一定割合だけ差があるという 1 章であげた例とは別の関係が示されている。

式 (12) で $k \rightarrow \infty$ とすれば $ID_{GAP(\infty)} = 0$ となり、難易度は通過方向に関係ないとする Accot らの導出方法と合致する。これは修正作業を無限回行うことになり、通過方向による難易度の差を適切に表せないと考える。逆に $k \rightarrow 0$ とすると $ID_{GAP(0)} = \infty$ となり、これも難易度差として不適切である。よって難易度差を最も適切に表す k の値 ($0 < k < \infty$) が存在すると考えられる。

この難易度差 ID_{GAP} を利用する方法として、次の 2 つが考えられる。

- 狭まる経路の通過難易度 ID_{NT} を $ID_{NT} + ID_{GAP}$ に補正して、移動時間 MT を予測する。
- 広がる経路の通過難易度 ID_{ST} を $ID_{ST} - ID_{GAP}$ に補正して、移動時間 MT を予測する。

本稿では、1 方向に通過する時間から他方向の時間を予測するという利用例を想定しているため、操作時間が長いと考えられる MT_{NT} を計算で求められた方が利得が大きいと見え、6 章の考察では前者を採用する。

5. 実験

提案する難易度差の妥当性を検証するために、通過方向を切り替えて移動時間を計測する実験を行う。以下に詳細を述べる。

5.1 タスクと教示

タスクが開始されると、液晶ペンタブレット上に図 7 のように色分けされた画面が表示される。実験参加者はスタートエリア内にスタイラスを接地させ、ピンク色の矢印で指定された方向へスタートラインを通過する。その後、スタイラス先を経路から出ないように移動させてエンドラインを通過する。そしてエンドエリアからスタイラスを離すと次のパラメータが選出されて画面に表示される。

スタイラスをタブレット面に近接させると、黒色で長さ 25 ピクセルの十字型カーソルが表示される。スタートエリ

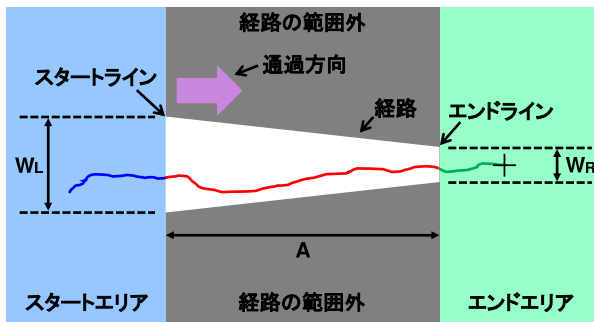


図 7 実験の画面構成. 狭まる経路を右向きに移動する場合
Fig. 7 Screen layout of the experiment.

ア内ではカーソル座標の軌跡が青色の線で描画される。スタートラインを通過した後は軌跡が赤色になり、データの計測開始がフィードバックされる。エンドラインを通過するとベル音が鳴って試行成功が通知され、エンドエリアでは軌跡が緑色になる。また経路外にはみ出た軌跡は明るいオレンジ色で描画される。

カーソルが経路からはみ出したとき、スタイラスをタブレット面から浮かせてしまった場合にはビープ音が鳴り、試行が中断される。実験参加者はスタイラスを離してから再びスタートエリア内に接地させ、タスクをやり直す。ただしエラーにカウントされるのは経路からはみ出したときだけである。スタイラスを離してしまうのは、本実験で観察したい幅変化の影響とは異なる性質のミスであると考え、エラーとしない。これは文献 [3] と同様の条件である。実験参加者には可能な限り速くかつミスせず操作するよう教示する。

5.2 使用機器など

PC は Sony VAIO Z SVZ1311AJ (2.1GHz × 4 コア, 8GB RAM) を使用した。ディスプレイおよび入力デバイスは液晶ペンタブレット Wacom Cintiq 12WX (IPS 液晶, 261.12 × 163.2mm, 1,280 × 800 ピクセル) であり, HSP 3.32 で実装した実験システムをフルスクリーンで表示する。システムは約 125 Hz で動作する。

5.3 実験参加者

実験参加者は情報系の大学生および大学院生の 11 名 (男性 11 名, 平均 21.9 歳, $SD = 2.27$ 歳) である。全員が利き手の右手でスタイラスを操作した。スタイラス操作に習熟している参加者が 1 名おり、ペンタブレットを 5 年間、液晶ペンタブレットを 1 年間ほど継続利用していた。先行研究 [3], [12] ではスタイラス操作に習熟した参加者がいなかったが、ステアリングの法則は成立していたため、本実験でも全員がスタイラスを使用する。

5.4 手順

距離 A は {300, 600} ピクセルである。経路の幅は W_L ,

W_R とともに {11, 31, 51} ピクセルであり, $W_L \neq W_R$ になる組合せだけ選出される。またスタートラインからエンドラインへの移動方向 MD は {右, 左} である。それぞれのパラメータは文献 [1], [2], [3], [8], [12] を参考に設定した。通過方向 {狭まる方向, 広がる方向} は, W_R, W_L, MD の組合せによって決定される。

パラメータの組合せは合計で $2(A) \times (3(W_L) \times 3(W_R) - 3(\text{左右が同じ幅になる組合せを排除})) \times 2(MD) = 24$ 種類あり, ID は 7.47 から 31.1 までの範囲である。これらがランダムに選出させるタスクを 6 セット行い, 第 1 セットが練習, 続く 5 セットが本番である。本番で記録されるデータは 24 パターン × 5 セット × 11 名 = 1,320 回分である。練習時に椅子の高さやタブレットの角度などを調整させ, また各セットの間には 30 秒間の休憩を設けて, 参加者がタスクに集中できるようにした。所要時間は, 事前のインストラクションから全試行終了まで 20 分程度である。その後, 実験の所感を尋ねるアンケート調査を行った。

5.5 計測するデータ

スタートラインを通過してからエンドラインを通過するまでの時間 MT , エラー率, タイムスタンプ付きのカーソル座標の軌跡を記録する。また軌跡のデータを基に, y 軸座標の標準偏差 SD_y を算出する。実効幅を利用した分析手法 [12] は一定幅のステアリングタスクに対して効果が議論されており, 幅が変化する経路に対してそのまま適用可能かは不明であるため, ここでは採用しない。

5.6 結果

距離 A [3], 幅 W [3], [12] によって操作時間 MT に差が生じることが既知であるため, ここでは本研究で焦点を当てている通過方向の影響について分析するべく独立変数は A および W を統合した ID を利用する。また左右の移動方向 MD をまとめた平均 MT がステアリングの法則に従う [12] ことから, 左右を区別せず扱うことで移動方向の影響を平滑化する。

5.6.1 操作時間 MT

図 8 (a) に通過方向ごとの ID と MT の関係を示す。プロットされた点は 110 回の試行の平均値を示す。通過方向ごとの平均操作時間は, 狭まる方向が 1,233 ms, 広がる方向が 826 ms であり, 有意差が認められた ($t = 4.09, p < .01$)。

5.6.2 エラー率

図 9 に ID に対するエラー率を示す。平均エラー率は狭まる経路が .073, 広がる経路が .011 であり, 有意差が認められた ($t = 2.92, p < .05$)。したがって同一の経路であっても, 幅が狭まる方向への移動は操作ミスが増加することが分かった。

5.6.3 y 軸座標の標準偏差 SD_y

通過方向ごとの SD_y は, 狭まる経路が 2.46 ピクセル,

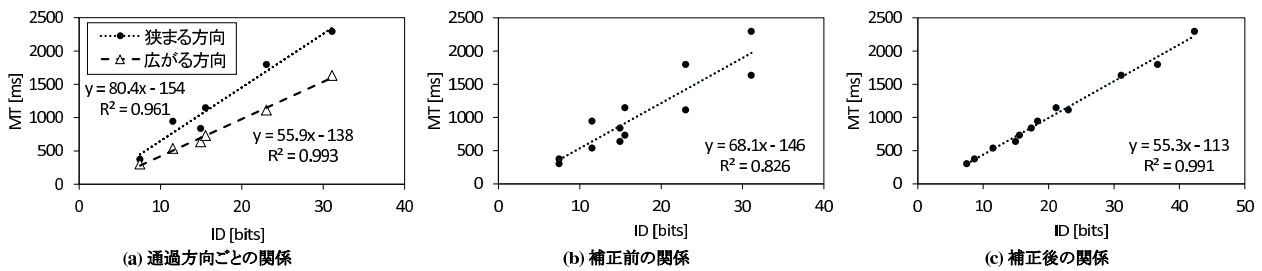


図 8 ID に対する MT の関係

Fig. 8 MT versus ID.

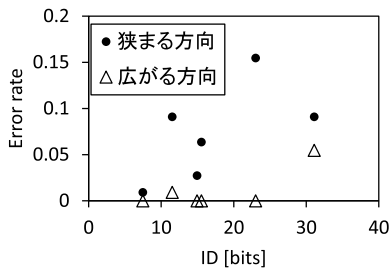


図 9 ID に対するエラー率

Fig. 9 Error rate versus ID.

広がる経路が 2.85 ピクセルであり、有意差が認められた ($t = 7.59, p < .001$)。同一経路でも広がる方向への移動はカーソルの揺れ動きが大きいことが分かった。

6. 考察

6.1 MT, エラー率, SD_y に関して

まったく同一形状の経路であっても、広がる方向へ通過した方が SD_y が大きかった。つまり経路から出ない範囲内で y 軸方向により大きく揺れながら移動しており、慎重な操作を要さないことが分かる。これが MT に差が生じた要因の 1 つであると考えられる。アンケートでも、「出口側が広いと簡単だった」、「幅が太いと加速できた気がする」という旨の回答をした参加者が 4 名おり、通過方向によって難易度が変化すると感じられていたことが分かる。

広がる方向への移動は、 SD_y が有意に大きいにもかかわらず、いずれの ID においてもエラー率は低減しており (図 9, 平均値は 1/6 倍未満)、ずれが大きいからといってミスは誘発するほどではないことが確認された。以上をまとめると、幅が広がる方向へ通過する方が MT が短く、 SD_y が大きくなるものの、エラー率は低減することが確認された。

6.2 ID の補正

狭まる経路の難易度を $ID_{NT} + ID_{GAP}$ に補正し、通過方向にかかわらず MT を ID の関係式で表せるか検証する。図 8(a) では通過方向ごとに MT の式を求めていたが、これを通過方向の区別なく回帰分析したものが図 8(b) である。次に狭まる方向の ID を補正すると、 k の値によって

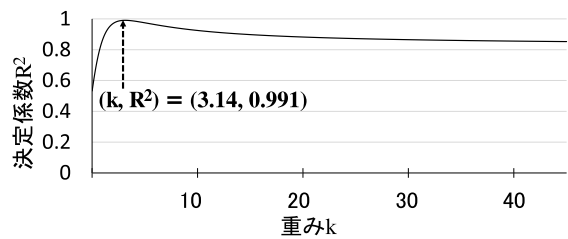


図 10 重み k によるモデルの一致度

Fig. 10 Model fitness depending on k value.

表 1 実験パラメータごとの ID

Table 1 ID by the experiment parameters.

| A | 一方の幅 W | 他方の幅 W | ID 補正前 | ID 補正後 |
|-----|--------|--------|--------|--------|
| 300 | 31 | 51 | 7.47 | 8.68 |
| 300 | 11 | 51 | 11.5 | 18.3 |
| 600 | 31 | 51 | 14.9 | 17.4 |
| 300 | 11 | 31 | 15.5 | 21.1 |
| 600 | 11 | 51 | 23.0 | 36.6 |
| 600 | 11 | 31 | 31.1 | 42.3 |

R^2 は図 10 のように変化し、 $k = 3.14$ のときに R^2 が最大の .991 となった。式 (12) に $k = 3.14$ を代入して ID_{GAP} を求めると、各 ID は表 1 のように補正される。図 8(c) に補正後の ID と MT の関係を示す。 R^2 がきわめて高い .991 となったことから、通過方向ごとの難易度 ID には式 (12) の関係があるといえる。いい換えると、狭まる方向の ID を適切な k で補正すれば、広がる方向への移動時間のグラフとほぼ一致するというのである。今回の実験結果であれば、図 8(a) の広がる方向の ID を補正した次式で $k = 3.14$ とすると、狭まる方向への移動時間と近い数値が得られる。

$$MT = -138 + 55.9 \times \left(ID + \frac{A(W_L - W_R)}{kW_L W_R} \right) \quad (13)$$

ただし k は実験条件によって異なる値をとりうるため、ここで算出した $k = 3.14$ がつねに最適な値であるとは限らない。

6.3 高い ID における MT の推定

実験結果では $k = 3.14$ のときに最もモデルの一致度が高くなった。では次に、実験の工程を削減しても操作時間

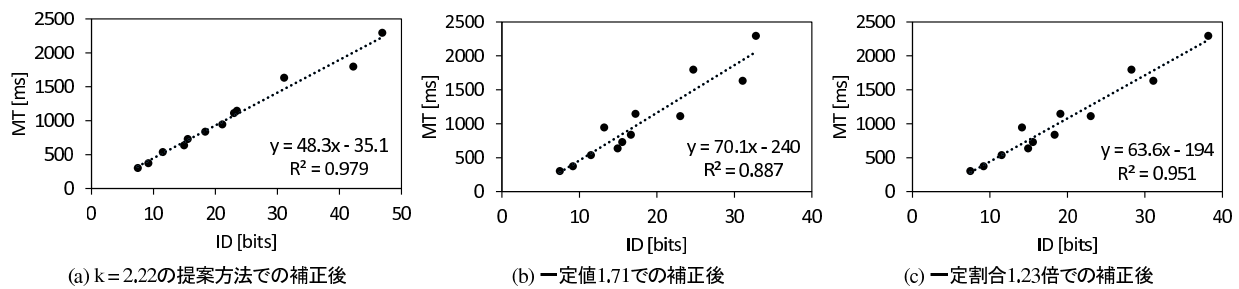


図 11 各方法で ID を補正した後の MT との関係

Fig. 11 MT versus corrected ID.

表 2 $k = 2.22$ での提案方法の式 (a), 一定値 1.71 の差 (b), 一定割合 1.23 倍の差 (c) で補正した ID

Table 2 Corrected ID.

| ID 補正前 | (a) 提案方法 | (b) 一定値 | (c) 一定割合 |
|--------|----------|---------|----------|
| 7.47 | 9.18 | 9.18 | 9.18 |
| 11.5 | 21.1 | 13.2 | 14.1 |
| 14.9 | 18.3 | 16.6 | 18.3 |
| 15.5 | 23.5 | 17.2 | 19.1 |
| 23.0 | 42.5 | 24.7 | 28.3 |
| 31.1 | 46.9 | 32.8 | 38.2 |

が予測できる利得について考察する。まず広がる方向への通過時間をすべての ID で測定し、狭まる方向は 1 種類の ID だけで測定する。そこから最適な k を求め、他の ID の通過時間はその k の値を用いて予測する、という方法である。

ID が最も低い (短時間で計測が終わる) $ID = 7.47$ の実験パラメータだけで測定すると、これは図 8(a) より 375 ms である。式 (13) で $MT = 375$ となるための ID_{GAP} は、

$$375 = -138 + 55.9 (7.47 + ID_{GAP}) \Leftrightarrow ID_{GAP} = 1.71$$

である。ここから k を求めると、

$$1.71 = \frac{300 (51 - 31)}{k \cdot 51 \cdot 31} \Leftrightarrow k = 2.22 \quad (14)$$

となる。その他 5 種類の ID について $ID_{GAP(2.22)}$ を用いて ID を補正すると、表 2(a) のような値が得られる。この補正後 ID を用いた MT との関係は図 11(a) のようになり、 $R^2 = .979$ の高い決定係数が得られた。よって、最も容易な ID だけで実験を行っても、未実験のパラメータにおける通過時間を高精度に予測可能であると確認された。

先行研究 [1], [4] によれば、モデルの決定係数 R^2 が高いことを根拠にそれぞれ「ステアリングタスクはこのモデルで説明できる」、「線分をクロスするタスクでは、操作時間と ID の間に強固な規則性がある」と主張されている。本実験結果を同様に考察すると、最適な k の値をとるときに $R^2 = .991$ の高い決定係数が得られ (6.2 節)、また最低 ID から求めた k の値を用いたデータも $R^2 = .979$ でフィットしていたことから、通過方向による難易度差は式 (12) の ID_{GAP} で表せると考えられる。

6.4 一定値の差があると仮定した補正方法

提案する ID の補正方法を、その他の考える補正方法と比較して議論する。まず通過方向によって一定値だけ ID の差があると仮定すると、 $ID = 7.47$ における ID_{GAP} は 1.71 であり、これを他の ID にも加算して表 2(b) のような補正後の ID が得られる。MT との関係は図 11(b) のようになった。これは ID が大きくなるほど MT の差が増大するという測定結果を反映できておらず、高い決定係数が得られないことが分かった。

6.5 一定割合の差があると仮定した補正方法

一定割合だけ差があると仮定すると、最も低い ID では倍率が $9.18/7.47 = 1.23$ となる。元の ID を 1.23 倍した数値を補正後の ID とすると表 2(c) の値が得られ、MT との関係は図 11(c) のようになり、 $R^2 > .95$ の高い決定係数が得られた。

この補正方法によって得られた ID と、提案方法で補正した ID を用いた場合とで予測精度に差があるか調べる。すなわち最低 ID から求めた k の値 2.22 を用いて算出した ID (表 2(a)) と、同じく最低 ID から求めた倍率 1.23 を用いて算出した ID (表 2(c)) から操作時間 MT を予測し、それが実際に測定された MT とどの程度合致しているかを検証する。

予測時間を従属変数、補正方法 {一定割合, 提案方法} を独立変数として、 $ID = 7.47$ 以外の 5 点の対応あり t 検定を行うと有意差が確認された ($t = 2.94, p < .05$)。よって一定割合と提案方法とは異なる予測時間が算出されることが分かった。予測時間を横軸、計測された時間を縦軸にプロットしたのが図 12 である。 R^2 が 1 に近いほど予測時間と計測時間が近く、高精度なモデルであることを意味する。提案方法の方がわずかに高い R^2 の値を得られたが、「予測時間と計測時間の差の絶対値」を従属変数とした t 検定では有意差が見られなかった ($t = 1.65, n.s.$)。今回実験した ID の範囲であれば、一定割合の差があるとした方法でも遜色ない予測精度が得られることが分かった。

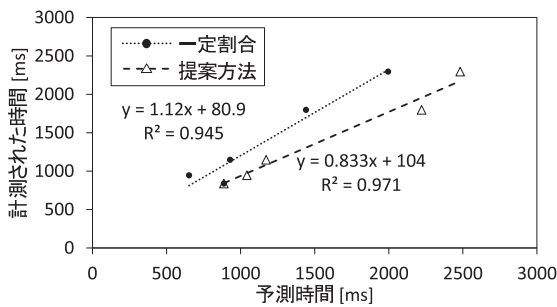


図 12 計測された時間と予測時間の関係

Fig. 12 Observed time versus predicted time.

7. 限界と課題

同一の ID であっても、カーソルのサイズ [16] や経路のスケール [3] によって操作時間が異なることが知られている。つまり実験条件が異なるときには ID を統一的に扱えないことが複数の研究から判明している。本稿では完全に同一の経路・カーソルサイズであっても操作時間が変化する新たな要素（通過方向）があることを発見した。そして差が発生する理由を理論的に求め、通過方向の間にある ID の関係がその理論に沿うことを実験で確かめた。本研究の貢献は、一方の通過時間のデータを基にして、逆向きに通過する時間を少ない実験（最も容易・短時間で測定が終る ID ）の測定結果から高精度に予測できることにある。逆方向の通過時間も十分に測定できるのであれば、通過方向ごとに MT と ID の関係式を求めればよい。本研究は Accot らのモデル [1] の価値を低減させるものではない。

本研究の限界として、高精度に予測できるのはあくまで実験で採用した ID の範囲内であることがあげられる。より高い ID では、低い ID の実験結果を基に予測すると精度が低下するおそれがある。一定割合で補正した場合も $R^2 > .95$ と高精度であったが、こちらも同様に高い ID の予測精度は未知である。先行研究ではより高い ID で狭まる経路を通過する実験を行い、高い決定係数を得ている事例 ([1] では ID が 10.9 から 76.4 の範囲で $R^2 = .978$) があるため、 ID の範囲にかかわらず予測できることを期待したいが、今回の結果から主張できるのは ID が 7.47 から 31.1 の範囲で $R^2 = .971$ の精度が得られたことである。より広範囲の ID での予測精度検証は今後の課題としたい。

また今回の実験では $k = 3.14$ が最適値であったが、これは実験によって決定されるため、実験環境やユーザによって値が変動しうる。同様に最低 ID における k の値 2.22 も実験環境によって変わるため、これを異なる実験条件/ユーザにそのまま適用しても操作時間は適切に予測できないと考えられる。たとえば文献 [5] では、Accot らが独自に行った実験のデータと、過去の文献のデータにそれぞれ提案モデルを適用している。その結果、Accot らの実験デー

タでは重みの値が 0.137 だったのに対し、過去のデータでは 0.32 であると報告している。よってこういった重みはユーザや操作環境などによって値が調整されるため、モデルのフィッティングおよび MT の予測に用いる k の値は各々の条件下で測定する必要がある。

計測する ID の個数が少ない場合でも高精度に予測できると利得が大きくなるが、こういった条件での精度測定も行っていきたい。たとえば狭まる経路の通過時間を予測するための ID と MT の関係式を求めたいときに、本研究の知見を用いれば最低 2 種類の ID を用いた実験で次のように求められる。まず 2 種類の ID で広がる方向への通過時間を測定し、 ID と MT の関係式を求める。次に小さい方の ID で狭まる方向への通過時間を測定する。こうすれば 6.3 節と同様の手順で、狭まる方向へ通過する MT と ID の関係式を導出できる。特に、高い ID で狭まる方向へ通過するのは操作時間が増大するため、広がる方向へ通過したデータから予測できると時間短縮の利得が大きくなる。さらに広がる方向への通過は平均エラー率が有意に低減することから、測定時間には表出しない「測定実験全体の時間」も短縮することが期待できる。ただし 2 種類の ID だけでは精度を確保できない懸念もあるため、たとえば $R^2 > .95$ を保つ最低限の ID の個数を求めたり、逆にそれ以上 ID の種類を増やしても精度を向上させられない上限数を求めたりすることにも意義があると考えられる。

ステアリングの法則は元々 GUI を対象に研究されていたが、バーチャルリアリティ空間において車が道路から逸脱しないように運転するタスクにも適用できると報告されている [20]。この文献では一定幅の直線状経路と環状経路のみが扱われていたが、道幅が変化する道路を採用することでより多彩なタスクを設計できるであろう。しかしその分だけパラメータは増加し、タスクの設計は煩雑になる。もしドライビングタスクにも本稿の提案モデルが適用できれば、道路ごとの難易度設定が容易になると考えられる。たとえば文献 [20] の実験では 1 回の試行に数十秒~百秒程度を要するタスクが設定されているが、提案モデルを用いて操作時間を予測すればタスクの設計と検証に要する時間を大幅に削減できる。その他の利用例として、ビデオゲームにおいて操作キャラクタが落ちないように細長い道を歩かせたり、ダメージを受ける両脇の壁に接触しないように自機を操縦したりするシーンの設計支援があげられる。これらも同様に道幅が変化する場合の制限時間設定や、往路と復路の難易度をどの程度変えるかをデザインする一助になると考えられる。

最後に、今回の実験は 2 次元の GUI 環境で、直接タッチ方式のスタイラスを用いた結果について議論した。カーソルを間接制御するスタイラス入力 [1] やその他のデバイス [2]、3 次元空間 [7]、[14] でも同様の予測方法が有効かは今後の検討課題である。また、環状および螺旋状の経路や、

中央が膨らんだ/窪んだ形状を持つ複雑な経路，さらにドライブシミュレータの経路にも今回のような関係が存在するか検証し，提案方法の適用範囲を調査していきたい。

8. おわりに

本稿では幅が線形に変化する直線状経路を対象に，通過方向によって操作時間 MT が変化する原因を理論的に求め，通過方向間の ID の差を導出した。スタイラスを用いて経路を左右方向に通過する実験によって，補正 ID を用いた MT との関係式が回帰分析で高い決定係数を得たことから，導出した ID 差が今回の実験環境において一定の妥当性を持つことを示した。また，広がる方向への通過時間と，最小 ID での狭まる方向への通過時間を測定することで，残りの ID における通過時間が高精度 ($R^2 = .971$) に予測できることを示した。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 15J11634，および JST CREST の支援を受けたものです。

参考文献

- [1] Accot, J. and Zhai, S.: Beyond Fitts' law: Models for trajectory-based HCI tasks, *Proc. CHI '97*, pp.295–302 (1997).
- [2] Accot, J. and Zhai, S.: Performance evaluation of input devices in trajectory-based tasks: An application of the steering law, *Proc. CHI '99*, pp.466–472 (1999).
- [3] Accot, J. and Zhai, S.: Scale effects in steering law tasks, *Proc. CHI '01*, pp.1–8 (2001).
- [4] Accot, J. and Zhai, S.: More than dotting the i's – foundations for crossing-based interfaces, *Proc. CHI '02*, pp.73–80 (2002).
- [5] Accot, J. and Zhai, S.: Refining Fitts' law models for bivariate pointing, *Proc. CHI '03*, pp.193–200 (2003).
- [6] Asano, T., Sharlin, E., Kitamura, Y., Takashima, T. and Kishino, F.: Predictive interaction using the delphian desktop, *Proc. UIST '05*, pp.133–141 (2005).
- [7] Casiez, G., Plénacoste, P. and Chaillou, C.: Does DOF separation on elastic devices improve user 3D steering task performance?, *Proc. APCHI '04*, pp.70–80 (2004).
- [8] Dennerlein, J.T., Martin, D.B. and Hasser, C.: Force-feedback improves performance for steering and combined steering-targeting tasks, *Proc. CHI '00*, pp.423–429 (2000).
- [9] 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, pp.381–391 (1954).
- [10] Gutwin, C. and Skopik, A.: Fisheyes are good for large steering tasks, *Proc. CHI '03*, pp.201–208 (2003).
- [11] Kattinakere, R.S., Grossman, T. and Subramanian, S.: Modeling steering within above-the-surface interaction layers, *Proc. CHI '07*, pp.317–326 (2007).
- [12] Kulikov, S., MacKenzie, I.S. and Stuerzlinger, W.: Measuring the effective parameters of steering motions, *Ext. Abst. of CHI '05*, pp.1569–1572 (2005).
- [13] Kulikov, S. and Stuerzlinger, W.: Targeted steering motions, *Ext. Abst. of CHI '06*, pp.983–988 (2006).
- [14] Liu, L., Martensb, J.-B. and Liere, R.V.: Revisiting path steering for 3D manipulation tasks, *International Jour-*

nal of Human-Computer Studies, Vol.69, No.3, pp.170–181 (2011).

- [15] Mott, M.E. and Wobbrock, J.O.: Beating the bubble: using kinematic triggering in the bubble lens for acquiring small, dense targets, *Proc. CHI '14*, pp.733–742 (2014).
- [16] Naito, S., Kitamura, Y. and Kishino, F.: Steering law in an environment of spatially coupled style with matters of pointer size and trajectory width, *Proc. APCHI '04*, pp.305–316 (2004).
- [17] Pastel, R.: Measuring the difficulty of steering through corners, *Proc. CHI '06*, pp.1087–1096 (2006).
- [18] Sun, M., Ren, X., Zhai, S. and Mukai, T.: An investigation of the relationship between texture and human performance in steering tasks, *Proc. APCHI '12*, pp.1–6 (2012).
- [19] Zhou, X., Cao, X. and Ren, X.: Speed-accuracy tradeoff in trajectory-based tasks with temporal constraint, *Proc. INTERACT '09*, pp.906–919 (2009).
- [20] Zhai, S., Accot, J. and Woltjer, R.: Human action laws in electronic virtual worlds – an empirical study of path steering performance in VR, *Presence*, Vol.13, No.2, pp.113–127 (2004).



山中 祥太 (学生会員)

2013年明治大学大学院理工学研究科博士前期課程修了，同年より同研究科博士後期課程に在籍。2013年より明治大学理工学部助手，2015年度より日本学術振興会特別研究員DC2，現在に至る。ユーザインタフェース研究，特にポインティング手法の研究に興味を持つ。情報処理学会 HCI 研究会学生奨励賞，同研究会貢献賞，第15回ヒューマンインタフェース学会論文賞を受賞。



宮下 芳明 (正会員)

千葉大学工学部卒業(画像工学)，富山大学大学院で音楽教育を専攻，北陸先端科学技術大学院大学にて博士号(知識科学)取得，優秀修了者賞。2007年度より明治大学理工学部に着任。2009年度より准教授。2013年より同大学総合数理学部先端メディアサイエンス学科所属。2014年より教授，現在に至る。情報処理学会，日本ソフトウェア科学会，VR学会，ヒューマンインタフェース学会，ACM各会員。