

連結した直線経路をステアリングする動作の分析とモデル化

山中 祥太^{1,2,a)} Wolfgang Stuerzlinger³ 宮下 芳明¹

概要: ステアリングの法則は、単一の直線経路・環状経路を通過する時間を高精度に予測できることが知られている。また、コーナーで連結された経路を通過する時間を求めるバージョンなど、モデルにさらなる拡張が施されることもある。しかし、連結された直線経路、すなわち幅の異なる直線経路が直線状に繋がったものを通過する動作について詳細に分析・モデル化されたことはない。このような動作は、イラストレーションソフトのラッソ操作（投げ縄ツールのように自由選択をする操作）で求められる。本研究では、連結経路を通過するタスクにおける操作性能を検証するために3つの実験を行った。実験の結果、単一経路と連結経路を比較したとき、ユーザが明確に挙動を変えることを示し、その挙動変化は経路の連結点を通過するよりもかなり前もって決められていることを示した。単一の経路の難易度 (ID) を単純に加算することで、経路全体の通過時間を高精度に予測できる ($R^2 > 0.96$) ことがわかったが、より正確に予測可能なモデルを導出して比較議論する。 R^2 および赤池情報量基準 (AIC) の値の比較から、2本目の経路に進入する動作をクロッシングタスクと見なして ID を調整するモデルが最良であることが支持された。

Analyzing and Modeling the Steering Operations in Sequential Linear Path Segments

SHOTA YAMANAKA^{1,2,a)} WOLFGANG STUERZLINGER³ HOMEI MIYASHITA¹

Abstract: The steering law models human motor performance and has been verified to hold for a single linear and/or circular path. Some extensions investigated steering around corners. Yet, little is known about human performance in navigating joined linear paths, i.e., successions of path segments with different widths, although such operations appear in our graphical user interface tasks, including lasso operations in illustration software. In this work, we conducted three experiments involving joined paths. The results showed that users significantly changed their behavior, and that that strategy change can be determined beforehand. A simple model summing the two indexes of difficulty (ID s) for each path was efficient to predict the time ($R^2 > 0.96$), but more sophisticated models were also evaluated. The best model includes the ID of the crossing operation to enter the second path, in terms of both of R^2 and AIC values.

1. はじめに

ステアリングの法則は、コンピュータ上における線の描画や経路を通過するタスクなど、ストロークを描くタスクをモデル化するために提案された操作性能モデルである [1]。一般的には、幅の規定された経路からはみ出さな

いようにプローブ（マウスカーソルやペン先など）を通過させる時間の予測モデルであると説明される [14]。経路を通過する操作の典型例は、階層メニューにおいて上下の項目に移動しないようにしつつ子メニューを展開する操作である。ステアリングの法則は強固なモデルとして知られ、スタイラスやタッチスクリーンなどの様々な入力デバイス [2], [22], 3次元に置き換えたタスク（チューブ内をボールで通過する動作） [17], さらには仮想空間内で車を運転するタスクもモデル化できる [27]。

本研究の目的の1つは、ステアリングの法則の一般性を検証することである。ここでは、より多様な条件下でどれ

¹ 明治大学
Meiji University, Nakano, Tokyo, Japan

² 日本学術振興会
JSPS, Chiyoda, Tokyo, Japan

³ Simon Fraser University
Vancouver, British Columbia, Canada

a) stymnk@meiji.ac.jp

だけモデルが適合 (fit) するかを指標とし、ロバスト性と言い換えてもよい。この観点で、先述の各種デバイスでステアリングの法則が適合することを検証したり、子供から高齢者まで適用可能であること [20], 利き手と非利き手の両方の操作にモデルが適合すること [13] を示すのも一般性の検証といえる。

操作性モデルが適合する条件を検証することは HCI において核となるトピックであり、たとえばポインティングタスクのパフォーマンスモデルであるフィッツの法則 [11] について、縦横比の異なる矩形ターゲットにも適合するのか [5] などの一般性が議論され続けてきた。操作条件ごとに発生する誤差を吸収するようなモデルを導出することは、HCI 分野では特に GUI における新規な操作手法を提案するときに重要である。なぜなら、まず既存の操作性モデルを参照し、操作効率が改善されることを理論的に検討する手順を踏むことが多いからである。もし操作性モデルが一般性を欠くと、操作手法の有用性の議論において誤った結論を導く懸念があり、この観点で一般性の検証は不可欠である。

本研究では、経路が連結した場合にもステアリングの法則が適合するかを検証する。多くの先行研究では、単一の直線経路か、あるいは単一の環状経路でユーザ実験が行われており [2], [3], [20], [27], 経路の形状に関するロバスト性については未知の点が多い。幅が徐々に変化する直線経路 [1], [26] や螺旋経路 [1] などで実験された事例はあるが、複数の経路の明確な連結点があるわけではないため、本研究ではこれらを単一経路と解釈する。これまでに検証された連結経路の例は、コーナーで繋がった直線経路を通過するタスクである [6], [18]。我々の知る限り、直線状上に連結した経路にステアリングの法則を適用した研究はない。

ステアリング操作のより一般的な事例は、図 1a のようにイラストレーションソフトにおいてオブジェクトをラッソ (投げ縄、自由選択などと呼ばれる) で囲う操作である。ユーザが複数のオブジェクトを選択したいとき、広い経路や狭い経路、幅が徐々に変化する経路やコーナーなどを連続的に通過する必要がある。従来のステアリングの法則に関する研究では、これらの操作のうちの一部にのみフォーカスしており、図 1b のような単一の経路を通過するタスクでモデルの適合度が議論されていた。我々はより一般的な状況下におけるステアリングの法則の適合度について検証するために、その第一ステップとして幅の異なる 2 本の直線経路が直線状に連結した図 1c のような状況について考えることとした。本稿で述べる学術的な知見は以下の 2 点である。

(1) カーソルの軌跡を分析したところ、(a) 経路の結合部があることと、(b) 経路の幅の差によって、スピードアップ/ダウンさせる戦略が大きく変化していることを示した。それにも関わらず、2 本の経路それぞれの

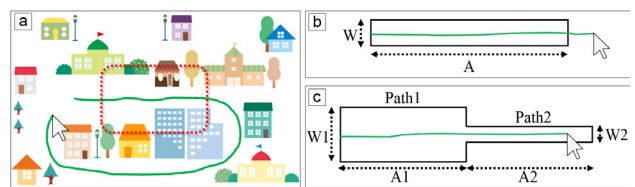


図 1 (a) イラストレーションソフト上におけるラッソ操作が緑線で描かれており、そのうち連結経路と見なせる部分が赤破線の領域で示されている。従来のステアリングの法則では (b) のような単一経路のみがモデル化されており、(c) のような 2 本の連結経路はモデル化されていない。

Fig. 1 (a) A lasso operation in a illustration application. (b) The steering law models strokes through a constant-width path. (c) Our work investigates steering through joined linear path segments with different widths.

難易度 (ID) を加算したモデルによって、経路全体の通過時間を高精度に ($R^2 > 0.96$) 予測できることから、ステアリングの法則の強い一般性を示した。

(2) 2 本目の経路に進入する操作をクロッシングタスク [4] と見なして ID を加算することで、モデルの適合度が向上することを示した。

2. 関連研究

本章とそれ以降の数式に含まれる文字 a, b, c, d は、実験データをモデルに当てはめたときに回帰分析で決定される定数であり、フリーパラメータ (free parameter) と呼ばれる。

2.1 ステアリングの法則のモデル

ステアリングの法則は、図 1b のような全長 amplitude (A), 幅 width (W) の経路を通過する時間 movement time (MT) が次の関係になることを示す [1]。

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

このうち、 A/W がタスクの難易度 index of difficulty (ID , 単位: bits) と呼ばれる。移動距離 A が長くなるか幅 W が小さくなることで難易度 ID が上昇し、通過時間 MT が長くなる。ステアリングの法則は、間接制御のスタイラス操作 (手元でペンタブレットを操作し、それとは独立した画面上のカーソルを移動させる方式) で検証され [1], その後にマウス、タッチパッド、トラックボール、トラックポイント [2], 直接制御のスタイラス操作 (液晶ペンタブレット) [15], タッチスクリーン [22] などを使用してもモデルが適合することが示されている。また、タブレット入方面におけるペン先の移動距離と、ディスプレイ上のカーソル移動距離の比 (ゲイン) が異なる場合 [3] や、経路の通過方向・角度が異なる場合 [23] でも適合するとされている。

ステアリングの法則は、経路の幅 W に対する移動スピード v の関数として以下のようにも表現される。

$$v = a + bW \quad (2)$$

ここで v は A/MT である。幅 W が大きいほどハイスピードになるという関係がある。

ステアリングの法則は環状の経路を通過する時間もモデル化できる。半径 r の経路であれば、式 (1) において A を $2\pi r$ とすればよい [2], [3], [20], [27]。この他にも、幅が徐々に狭まる直線経路 [1], [26] や幅が広がる直線経路 [26], 幅が広がる螺旋経路 [1] など、経路の形状に合わせて改良されたモデルの適合度が検証されている。

2.2 ステアリングと他の操作を併合したタスクの操作性能モデル

2.2.1 ステアリングとポインティング

経路を通過した後ターゲットをクリックするようなタスク、たとえば階層メニューで最後に項目を選択する図 2 のような操作は targeted steering と呼ばれる [9], [16], [21]。ここではステアリング選択操作と呼ぶこととする。6.2 節で後述する議論のために、本節では 3 種類のモデルを紹介する。

まず、距離 A だけ離れた位置にある大きさ S のターゲットをクリックする操作は、フィッツの法則 [11] で次のようにモデル化される。

$$MT = a + b \log_2 \left(\frac{A}{S} + 1 \right) \quad (3)$$

このうち対数項はポインティングの難易度 ID (単位: bits) と呼ばれる。

Dennerlein らはステアリングの難易度 ID_S とポインティングの難易度 ID_P を個別に加算するモデルを提案した [9]。

$$MT = a + bID_S + cID_P \quad (4)$$

このモデルは $R^2 \geq 0.98$ の適合度を示している。

Kulikov と Stuerzlinger はステアリングとポインティングの難易度を 1 つの項にまとめたモデルを提案した [16]。

$$MT = a + b(ID_S + ID_P) \quad (5)$$

このモデルの利点はフリーパラメータの個数が減ることである。フリーパラメータの個数が多ければモデルの適合度は向上するが、実験で得られたデータに過度に適合してしまい (オーバーフィッティングと呼ばれる)、未知のデータを予測する性能が低減してしまう [7] ため、これを防ぐ目的で提案された。

Senanayake らは、ステアリングとポインティングの難易度を単純に加算する Dennerlein らや Kulikov らのモデルは不適切であると指摘している [21]。経路の終端から $n \times W$ だけ手前の地点まで到達すれば、残りの距離 $n \times W$ では経路からはみ出す危険がなくなるという報告 [24] を参照し、Senanayake らはステアリングとポインティングの 2 段階

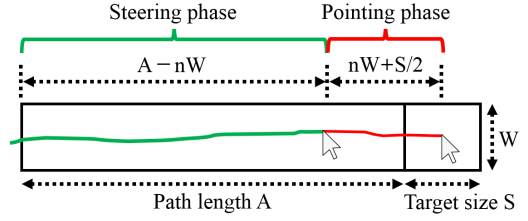


図 2 Senanayake らによるステアリング選択操作の 2 段階モデル。
Fig. 2 Two-phase model for targeted steering motion by Senanayake et al. [21]

に分けるモデルを提案した。

$$MT = a + b \left(\frac{A - nW}{W} \right) + c \log_2 \left\{ \frac{2(nW + S/2)}{S} \right\} \quad (6)$$

n の値は 5 が最適だという Thibbotuwawa らの報告 [24] の通り、 $n = 5$ で高い適合度を示している。つまり、ユーザは経路の終端から $n \times W$ だけ手前の地点でポインティングに移行すると考えられる。なお、Senanayake らはフィッツの法則を次の形式で参照している点で他のモデルと異なる。

$$MT = a + b \log_2 \left\{ \frac{2(A + S/2)}{S} \right\} \quad (7)$$

2.2.2 複数のステアリング

コーナーで連結された 2 本の経路を通過するとき、ユーザは曲がり角で一旦停止してから 2 本目の経路に進むことがわかっている [18]。コーナーの角度は 45° , 90° , 135° の 3 種類がテストされている。コーナーを目指して減速する挙動を、「曲がり角をポインティングするタスク」と見なし、難易度を加算する次のモデルが提案された。

$$MT = a + bID_S + cID_P \quad (8)$$

ここでポインティングのための距離は経路全体の半分 ($A/2$, つまり 1 本目の経路の長さ) である。この実験では 2 本の経路の幅 W は同一であり、さらに角度が 0° の場合は含まれていない。ユーザの挙動を考えるに、カーブが含まれていない場合には一時停止する動作が起こらないため、式 (8) のモデルは適合しないと考えられる。

Bateman らはレースゲームの実験でステアリングタスクを行っている [6]。このゲームでは 3 本の直線経路が 90° のカーブで S 字状に連結しており、マウス、ジョイスティック、ハンドル型コントローラで通過するタスクが設定されている。Bateman らは Zhai らのドライビング実験 [27] およびステアリングの法則 [1] をリファラーしているものの、ステアリングの法則の適合度や ID ごとの通過時間は示されていない。

まとめると、幅 W の異なる複数の経路が直線状に連結された場合、ステアリングの法則の適合度を先行研究から推測することはできない。考える最もシンプルなモデルは、2 本の経路 (経路 1, 経路 2 とする) の難易度 (ID_1 と ID_2) を次のように加算する方法である。

$$MT = a + bID_{2SS} \quad (9)$$

$$ID_{2SS} = ID_1 + ID_2 \quad (10)$$

2 個のフリーパラメータを導入してステアリング操作+ステアリング操作をモデル化したこの式を ID_{2SS} モデルと呼ぶこととする。このモデルはステアリングの法則の一般式、

$$MT = a + b \int_0^A \frac{dx}{W(x)} \quad (11)$$

からも求めることができる。式 (11) において、 A は経路の全長、 x は経路内の位置、 $W(x)$ は位置 x における幅である。この一般式は、経路全体の難易度が各位置における難易度を統合した値であることを意味している。

ユーザの戦略は、単一の経路を通過する場合と大きく異なると我々は予想する。まず単一経路では、ある地点のスピード v はそのときの経路幅 W に比例する [1]。

$$v = \frac{W}{\tau} \quad (12)$$

τ は実験によって決定される時間の定数である。一方で 2 本の経路が連結した場合に、たとえば経路 1 の幅 W_1 が 50 pixels、経路 2 の幅 W_2 が 25 pixels とすると、経路 1 におけるスピードは経路 2 の 2 倍のはずである。したがって、ユーザは経路 2 に入る前にスピードを落とす必要がある。よって経路 1 を見たとき、ステアリングの法則が想定している「スピード v は幅 W に比例する」という関係が崩れるのである。逆に $W_1 < W_2$ の状況（広がる経路）ではまた異なる挙動が見られると予想する。このような挙動差はステアリングの法則では考慮されておらず、移動時間 MT と通過難易度 ID の関係が破綻する可能性があると考え、以降の実験で検証することとした。

3. 実験 1：単一の直線経路を通過するタスク

連結経路における実験結果と比較するために、ここではベースラインとして単一経路を通過する実験を行う。

3.1 機材

PC は Sony Vaio Z (Intel Core i7-5557U, 3.10 GHz, 4 コア, Intel Iris graphics 6100, 16 GB RAM, Windows 10 Pro) を使用した。入力デバイスおよびディスプレイは、液晶ペンタブレットの Wacom Cintiq 27 Qhd Touch DTK-2700/K0 (27 インチ, 596.7 × 335.6 mm, 2560 × 1440 pixels) を使用した。ペンタブレットは図 3a のようにスタンドモードでテーブルに置き、角度を約 20° にセットした。摩擦を低減するために、実験参加者は綿のアーティスト手袋を着用した。実験システムは Hot Soup Processor 3.4 で実装し、フルスクリーンで起動した。システムは約 125 Hz で動作する。タッチ入力機能はオフにしてあり、参加者は手首や指がディスプレイに触れても問題ないことを

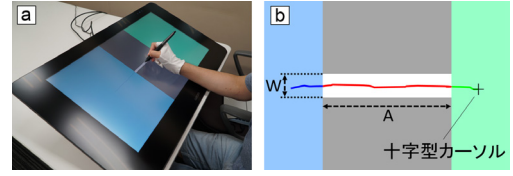


図 3 (a) 実験 1 の環境と (b) 実験画面の模式図。参加者が水色のスタート領域にペン先をつけ、白い経路を通過し、黄緑色のゴール領域でペン先を離すまでが 1 試行である。

Fig. 3 (a) Experimental setting and (b) the experimental screen layout.

通知された。

3.2 参加者

第一著者と同一研究室の学生 13 人が参加した。3 名が女性、10 名が男性、平均年齢は 21.9 歳、標準偏差は 2.15 歳であった。参加者は裸眼で通常の視力、あるいは矯正して PC 操作に支障がない視力であり、全員が右利きであった。

3.3 タスク

図 3b のように表示された画面上で、白色の経路内を速くかつ経路からはみ出さないように通過するのが目標である。スタイラスのペン先を画面に近づけると十字型カーソルが表示され、ペン先を接地させている間はカーソルの軌跡が描画される。経路の左側からカーソルを進入させ、右端から脱出すると成功を通知するためのベル音が鳴る。もし経路の上下にはみ出すと、失敗を通知するためにピープ音が鳴り、同じ経路をスタートから通過し直す。経路内でペン先を浮かせてしまった場合もやり直しとなるが、これはステアリングの法則の実験ではエラーにカウントせず、経路からはみ出した試行のみをエラーと見なす [3], [26]。

3.4 実験デザインと手順

移動距離 A は 2 種類 (480, 640 pixels ; それぞれ 112, 149 mm)、幅 W は 4 種類 (15, 23, 33, 45 pixels ; それぞれ 3.50, 5.36, 7.69, 10.5 mm) を採用した。 ID は 10.7 から 42.7 bits の範囲である。合計 8 種類の組み合わせがランダムな順序で選出されるのを 1 セットとする。各参加者は最初に 1 セットの練習を行い、続けて 10 セットの本番を行う。記録されるデータは 8 条件 × 10 セット × 13 名 = 1040 回分である。事前のインストラクションから全試行終了まで、1 名あたり 6-7 分を要した。

3.5 結果

合計 1079 回の試行があり、そのうちエラーは 39 回 (3.61%) であった。先行研究 [1], [2], [3], [26] にならい、エラーを排除した試行について繰り返しの分散分析 (反復測定) で分析する。多重比較には Bonferroni の手法を用いた。独立変数は A と W である。スピードの分析は実験

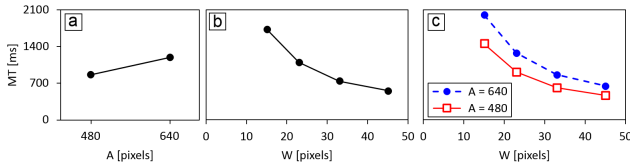


図 4 経路のパラメータごとの実験 1 の結果。

Fig. 4 MT for (a) A, (b) W, and (c) $A \times W$ values.

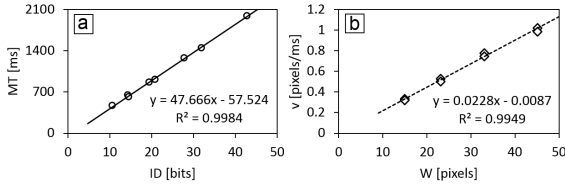


図 5 MT と v の形式によるステアリングの法則の適合度。

Fig. 5 Steering law fitness with (a) MT and (b) v forms.

2 と合わせて後に行う。

3.5.1 通過時間 MT

図 4a-c に平均 MT を示す。主効果が見られたのは $A(F_{1,12} = 87.607, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.880)$, $W(F_{3,36} = 48.130, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.800)$ であった。多重比較の結果、 A が大きくなるほど ($p < 0.001$), また W が小さくなるほど (全ての W のペアについて $p < 0.001$) MT が増大した。さらに $A \times W$ の交互作用が見られ ($F_{3,36} = 33.095, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.734$), 2 種類の A に対する MT の差は、 W が大きくなるほど減少した (図 4c)。

3.5.2 エラー

主効果が見られたのは $A(F_{1,12} = 10.749, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.472)$, $W(F_{3,36} = 9.768, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.449)$ であった。また $A \times W$ の交互作用が見られた ($F_{3,36} = 9.141, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.432$)。パラメータごとのエラー率は、 A は (A , エラー率) = (480, 1.52%), (640, 5.63%), W は (W , エラー率) = (15, 4.24%), (23, 2.80%) (33, 0.192%), (45, 0%) であった。

3.5.3 モデルの適合度

図 5a, b が示すように、ステアリングの法則は MT の式 (1) および v の式 (2) のいずれも高い適合度を示した ($R^2 > 0.99$, データ点の個数は $N = 8$)。

4. 実験 2: 全長 A が同一で幅 W の異なる 2 本の連結経路を通過するタスク

実験 2 の目的は、連結経路がユーザの挙動やモデルの適合度に与える影響を調査することである。内的妥当性を高めるために、実験 1 で採用した経路を単純に 2 本だけ連結し、また実験参加者とデバイスも同一にした。

4.1 実験デザイン

経路 1 と経路 2 の全長 A_1, A_2 は両方とも 480, 640 pixels の 2 種類であり、常に $A_1 = A_2$ である。また経

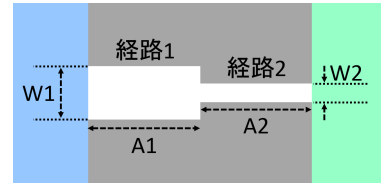


図 6 実験 2 における経路の模式図。

Fig. 6 Screen layout of experiment 2.

路 1 と 2 の幅 W_1, W_2 は同様に 15, 23, 33, 45 pixels の 4 種類であり、こちらは常に $W_1 \neq W_2$ である。パラメータの組み合わせは $2(A_1, A_2) \times \{4(W_1) \times 4(W_2) - 4(\text{同一幅の組み合わせを排除})\} = 24$ 種類であり、これがランダムな順序で選出されるのを 1 セットとする。練習として 0.5 セット (12 回の試行) を行い、その後 5 セットの本番を行う。通過方向は実験 1 と同様に常に右である。記録されるデータは 24 種類 \times 5 セット \times 13 名 = 1560 回分である。所要時間は 1 名あたり 15-20 分であった。2 本の経路は図 6 のように常に y 軸中央で連結し、連結点が画面中央に配置される。

4.2 結果

合計 1703 回の試行があり、そのうちエラーは 143 回 (8.40%) であった。以下ではまずモデルの適合度について分析し、その後 MT とエラーを分析する。

4.2.1 モデルの適合度

図 7a-c は経路 1 における適合度を示している。図 7a は狭まる経路 ($W_1 > W_2$), 図 7b は広がる経路 ($W_1 < W_2$) の適合度であり、両者ともデータ点数は $N = 6$ で $R^2 > 0.98$ の高い適合度を示している。図 7c は狭まる/広がる条件を区別しない条件であり ($N = 12$ 点), 適合度はやや低下する ($R^2 > 0.91$)。図 8a-c は経路 2 における適合度、また図 9a-c は経路全体について ID_{2SS} モデルの適合度を示している。経路全体の通過時間について、狭まる/広がる条件を区別せずに高い精度でステアリングの法則が適合しているため (図 9c, $R^2 > 0.98$), ステアリングの法則が破綻しているとは言えず、我々の仮説は支持されなかった。

4.2.2 通過時間 MT

経路 1 と 2 を区別した場合にはそれぞれ異なる値の ID を持つ (図 7, 8) ため、ここでは図 9 の経路全体の時間について、経路のタイプ (狭まる, 広がる) と難易度 ID (ここでは ID_{2SS} モデル) を独立変数とした繰り返しのある分散分析を行う。主効果が見られたのは経路のタイプ ($F_{1,12} = 15.405, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.562$), ID ($F_{11,132} = 41.969, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.778$) であった。多重比較の結果、狭まる経路に要した平均時間 2456 ms は、広がる経路の 2326 ms よりも有意に長かった ($p < 0.01$)。

4.2.3 エラー

主効果が見られたのは経路のタイプ ($F_{1,12} = 9.302, p <$

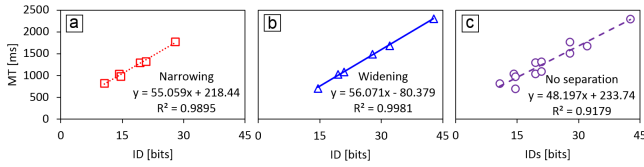


図 7 経路 1 における (a) 狭まる, (b) 広がる, (c) 両者を分けない条件下でのステアリングの法則の適合度.

Fig. 7 Model fitness of path1 in conditions of (a) narrowing, (b) widening, and (c) no separation of tunnel types.

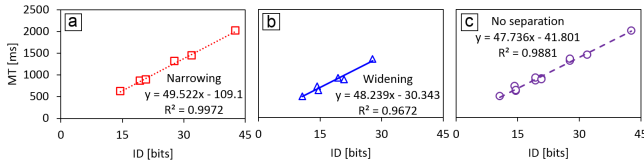


図 8 経路 2 におけるステアリングの法則の適合度.

Fig. 8 Model fitness of path2 in each condition.

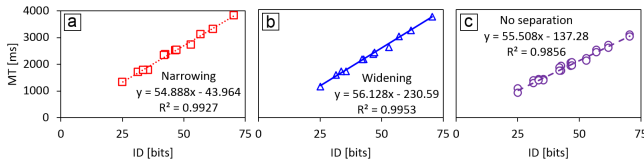


図 9 連結経路全体におけるステアリングの法則の適合度.

Fig. 9 Model fitness of total times for each condition.

0.05, $\eta_p^2 = 0.437$), ID ($F_{11,132} = 6.156, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.339$)であった. 多重比較の結果, 狭まる経路のエラー率は $54/834 = 6.47\%$ であり, 広がる経路の $89/869 = 10.2\%$ よりも有意に小さかった ($p < 0.05$).

4.2.4 スピードの分析を含めた議論

ユーザの挙動をより詳細に分析するために, 経路内でのスピード変化を観察する. スペースの都合上, ここでは結果の読み取りやすい事例についてスピードを比較する.

図 10a の赤いラインは, 実験 2 の $A_1 = A_2 = 480$, $W_1 = 23$, $W_2 = 15$ の条件における x 軸上のカーソル速度を示している. システムが取得したままの (125 Hz のサンプリングレート) の生データはノイズが多いため, また経路の連結点の影響を観察するため, ここでは x 軸上の速度を 40 pixels ごとに示している. また, 図 10a にある 2 本の青いラインは, 実験 1 における同一の A , W の条件下のスピードである. 実験 1 では $W = 23$ のとき MT が 991 ms, 実験 2 では経路 1 の MT が 1323 ms だったので, 経路 1 は実験 1 にくらべて非常に長時間を費やしていることがわかる (412 ms, 45% の時間増大). 一方で実験 1 では $W = 15$ において 1451 ms, 実験 2 では経路 2 の MT が 1444 ms だったので, 大きな変化がなかった (7 ms, 0.77% の時間増大).

同様に図 10b は広がる条件におけるスピードを示している. 経路 1 の通過時間は 1688 ms であり, 実験 1 と比較して 237 ms (16%) の増大, 経路 2 は 890 ms で 21 ms

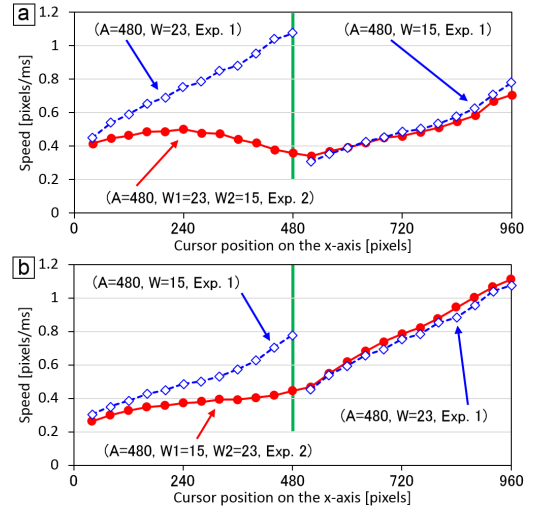


図 10 赤線は実験 2 における平均速度, 青線は実験 1 における平均速度を示す. 中央の緑線は実験 2 における経路の連結点.

Fig. 10 The average speed profiles in experiment 2 compared with those of experiment 1.

(2.3%) の増大であった.

狭まる/広がる経路ともに, スタート地点から緩やかにスピードが上昇していく傾向が見られるが, これはスタート地点の直前にペン先をつけて徐々に速度を上げていく様子が見られたことから自然な結果である. 興味深いのは, 図 10a, b ともに, 経路 1 のスピードが実験 1 に比べて遅く, 経路 2 では大差がない点である. 経路 1 と 2 の差は次の経路の有無であり, 経路 1 を通過中に (あるいは経路 1 に入るよりも前から) 経路 2 に進入することを先読みしてスピードを抑制しているのだと考えられる. さらに, ユーザは必要以上にスピードを抑制していることが窺える. すなわち, 図 10a においてユーザは経路 1 の $x = 240$ pixels 付近からスピードを落とし始めているが, 経路 2 で $v > 0.5$ pixels/ms に達しているため, 本来はスピードを落とさずに経路 1 で $v = 0.5$ pixels/ms 程度を維持すればよいはずである.

狭い経路が続く場合に, なぜこれほど速度を落とすのだろうか. このような実験をした例が HCI 分野には見当たらないため, ここでは心理物理学における類似した実験を参照して考察する. Warren らによれば, 人は歩いた先にあるゲートを通過するとき, ゲートが肩幅の 1.3 倍よりも狭いときには体をひねってから通るという [25]. もちろん歩いているときには体が多少なりとも左右に揺れるが, それでも肩幅の 1.3 倍だけ余裕があれば体をひねらずとも通過できそうに思える. しかし, 人間はその労力が無駄になったとしても, 危険を回避するために余裕をもった行動をとるのである. また Higuchi らは, 実際にはゲートを通過させずに, ゲートの 2.8 m 手前から「体をひねって通る必要があるか」を予測させる実験を行った [12]. その結果, 肩幅の 1.15 倍よりも狭いゲートは体をひねる必要があると回

答された。つまり、ゲートから離れるとやや予測精度が低下するものの、少し余裕をもって体を旋回させる必要性を判断するとされている。まとめると、人間は危険を回避するために実際に挙動を変化させるうえに、その挙動変化の必要性は前もって予測可能なことがわかる。これを今回の実験2に当てはめると、狭まる経路における必要以上のスピード減少は、経路2に進入するときエラーを起こさないように危険回避をするための戦略といえる。また経路の連結点よりもかなり前もってスピードを落とし始めたのは、Higuchiらの実験でいうところの、後に挙動を変化させる必要があるが事前に決定可能という知見で説明できる。

図10bにおいても、経路1のスピードは実験1より低かった。経路の終端から $5 \times W$ だけ手前の地点まで来れば経路からはみ出す心配がなくなる[24]ため、次の経路が存在する実験2よりも、単一経路の方がスピードアップするフェーズに移るタイミングが早いのだと考えられる。しかし、スピード差はスタート直後から生じているため、予め単一経路の場合とは異なる運動計画を立てている可能性がある。この理由について検証するのは今後の課題である。

図10に示した以外のパラメータについても、次のように図10とおおよそ似た傾向が見られた。経路2では実験1に近いスピードが見られ、狭まる条件での経路1のスピードは逆Uの字を描き、広がる条件での経路1のスピードは徐々に上昇するものの実験1よりも低速だった。

以上のようにユーザは実験1と比較して大きく異なる挙動を示したが、ステアリングの法則は実験2の条件下でも適合した。したがって、我々はステアリングの法則の新たな一般性を示した。すなわち、経路が2本連結していても、通過時間は計測済みのデータから高精度に予測できるのである。

しかし、ここで新たな疑問が生まれた。第一に、経路1と2の長さが異なる条件($A_1 \neq A_2$)におけるステアリングの法則の適合度である。実験2では、実験目的に照らして $A_1 = A_2$ の条件のみが採用されており、経路1と2の難易度(ID_1, ID_2)の比率が同一でも問題なかった可能性が残されている。もしこのバランスが崩れたとき、仮に $A_1 = 100, A_2 = 400$ pixelsの条件下では、 $0.2ID_1 + 0.8ID_2$ などと重みをかける必要が生じると予想する。第二に、 ID を単純に加算した ID_{2SS} モデルは $W_1 = W_2$ の条件下、つまり実験1と同様の単一経路に対しても一貫して適合するのかという疑問である。仮に $W_1 = W_2$ の条件を含めると適合度が大きく低下してしまうのであれば、経路内に連結点がある場合と区別しなければ通過時間を予測できなくなる。これらの条件が含まれるタスクにおけるステアリングの法則の一般性を検証するために、次の実験を行った。

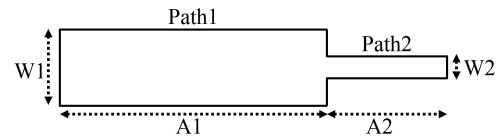


図11 実験3における経路のパラメータの定義。 $A_1 > A_2, W_1 > W_2$ の条件のみを示している。

Fig. 11 Parameter definition for experiment 3.

5. 実験3：全長 A が異なり幅 W が同一の条件を含む連結経路を通過するタスク

実験3の目的は、経路1と2の長さが異なる場合、および連結経路および単一経路において一貫してステアリングの法則が適合するかを検証することである。そのために、2本の経路の長さが異なる条件($A_1 \neq A_2$)および幅が同一の条件($W_1 = W_2$)を含める。実験参加者とデバイスは実験1・2と同一である。

5.1 実験デザイン

図11に実験3の経路の模式図を示す。経路1の全長 A_1 は5種類(150, 250, 400, 600, 800 pixels;それぞれ35.0, 58.3, 93.2, 140, 186 mm)である。経路2の全長は400 pixelsで固定し、 A_1/A_2 の比率は0.375, 0.625, 1.00, 1.50, 2.00となる。経路の幅 W_1 と W_2 は3種類(15, 23, 39 pixels;それぞれ3.50, 5.36, 9.09 mm)である。パラメータの組み合わせは $5(A_1) \times 1(A_2) \times 3(W_1) \times 3(W_2) = 45$ 種類であり、これがランダムな順序で選出されるのを1セットとする。参加者はまずランダムに選出された20回の試行で練習し、続く4セットの本番を行う。通過方向は常に右である。記録されるデータは45種類 \times 4セット \times 13名=2340回分である。1名あたりの実験時間は20-25分であった。2本の経路は常にy軸中央で連結し、連結点が画面中央に配置された。

5.2 結果

合計2582回の試行があり、そのうちエラーは242回(9.37%)であった。経路のタイプ(狭まる, 広がる, 一定幅)によって難易度 ID_{2SS} の値が異なるため、モデルの適合度についてのみ報告する。図12a-cに示すように、全ての経路のタイプに関して $N = 15$ 点のデータが高い適合度が確認された($R^2 > 0.95$)。また図12dに示すように、 $N = 45$ 点のデータに対して $R^2 > 0.96$ の高い適合度が確認された。

5.2.1 スピードの分析を含めた議論

A_1 と A_2 の公約数である50 pixelsごとの平均スピードを図13に示す(25 pixels間隔ではまだノイズが多く見られた)。図13a-eは狭まる経路($W_1 > W_2$)であり、経路1の方が経路2よりも高いスピードを出せるはずである。しかし図13aを見ると、 A_1 が短距離なために満足に加速する

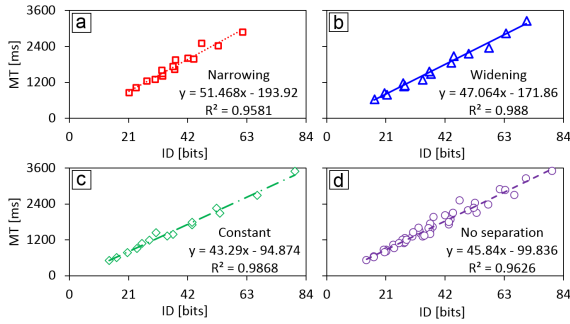


図 12 (a) 狭まる, (b) 広がる, (c) 一定幅, (d) これらの形状を分けない条件でのステアリングの法則の適合度.

Fig. 12 Model fitness in experiment 3.

前に経路 2 の幅 W_2 に合わせたスピードに調整し始めてしまっている. これは図 13e と比較するとわかりやすい. 図 13e では経路 1 で最大 0.620 pixels/ms まで加速できるにも関わらず, 図 13a では 0.477 pixels/ms までしかスピードを出せていない (23%の低減). これは移動距離 A が短いと, 幅 W に適したスピードに達する前に経路から脱出してしまうという Senanayake ら [22] および Thibbotuwawara [24] の報告と一致する.

経路 1 では幅に適したスピードに達さず, 一方で経路 2 では幅に適したスピードに達するのだから, 経路全体の通過時間は式 (12) のステアリングの法則を破綻させそうに思われる. さらに, 経路 1 の平均スピードは A_1 の値によって大きく異なる. 狭まる条件では, 経路 1 のスピードを $A_1 / (\text{経路 1 の } MT)$ で求めると, $A_1 = 150$ から 800 pixels の順に 0.360, 0.393, 0.422, 0.432, 0.432 pixels/ms であった. 幅が $W_1 = 23$ の経路 1 では, A_1 がおよそ 400-600 pixels 程度あれば一定値になることがわかる. 一方, 広がる条件の経路 1 の幅 $W_1 = 15$ pixels において, スピードは 0.341, 0.358, 0.323, 0.338, 0.308 pixels/ms であり, 特定の傾向は見られなかった. 一定幅の条件では, 予想通り実験 1 のような徐々にスピードアップする挙動が見られた.

まとめると, 経路のタイプと経路の長さ A によってユーザは明確に挙動を変化させていたことが観察された. このような変化があるにも関わらずステアリングの法則が適合したことから, 我々は今回の実験 2, 3 の条件においてステアリングの法則のさらなる一般性を確認した. すなわち, 2 本の直線経路が直線状に連結しているとき, 各経路の長さに関わらず, また幅が狭まるか/広がるか/一定に関わらず, ステアリングの法則が高い適合度を示すことを確認した.

6. 総合的な議論

6.1 次の経路を先読みすることによる挙動の変化

本研究の目的の 1 つは, 連結した経路を通過することによる挙動の変化を分析することであった. 図 10, 13 が示すように, ユーザが挙動を変えるという予想は強く支持さ

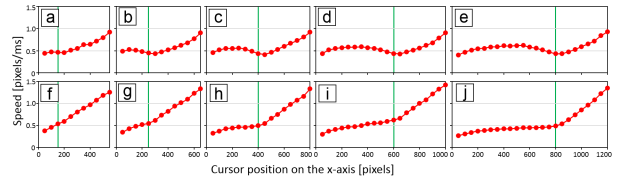


図 13 $W = 15, 23$ pixels で, 上 5 つが狭まる条件, 下 5 つが広がる条件, 左から右へ順に $A = 150$ から 800 pixels.

Fig. 13 Average speed profiles in experiment 3.

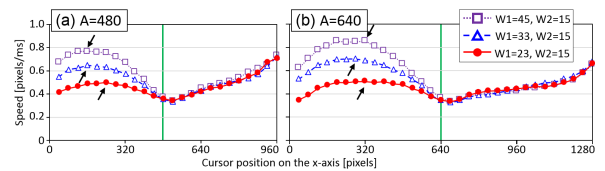


図 14 実験 2 における狭まる条件下の平均スピード. 黒矢印は経路 1 におけるスピードのピークを示す.

Fig. 14 Average speed profiles of narrowing condition in experiment 2.

れた. ユーザは経路 2 が 1 と比較して狭まるか/広がるか/同一の幅かによって, 前もってスピードを変化させるのである. コーナーで連結された経路を通過するタスクでも減速が見られた [18] と報告されているが, 曲がり角を通過するときには移動方向を切り替えるための減速が求められるのに対し, 本実験では同一直線上を移動するので, 本実験における減速は異質なものと考えられる.

では, 減速するための先読みは, 経路 1 のどの地点から行われているのであろうか. 式 (12) から考えると, 先読みを始める距離は 2 本の経路の幅 W に依存するはずである. なぜなら, まず経路 1 と 2 のスピード差が大きいほど, 経路 2 の幅 W_2 に適したスピードにまで減速するための距離が必要になり, さらにスピードは現在の幅 W に比例するからである. つまり W_1 と W_2 の差が大きいほど, 経路 1 内で前もって減速し始めると予想される.

この仮説を検証するために, 4 種類の幅 W を採用していた実験 2 のデータを再分析した. 減速開始地点を W_1 と W_2 の差の関数 (モデル) でシンプルに表せることを期待したが, 図 14 に示すように, 経路 1 では幅 W_1 が大きいほどピーク速度が大きい, x 軸上のピーク位置に特定の関係は見られなかった. また, 仮にそのようなモデルが構築できたとしても, 図 13 から読み取れるようにピーク位置は A_1 の影響を強く受けるため, 一般性が低い懸念がある.

実験 3 では A_2 の値を固定したが, A_2 の値によって経路 1 内の挙動に変化が生じる可能性が残されている. 極端な例として, もし狭まる条件で A_2 が 30 pixels 程度であれば, 経路 2 からはみ出してしまう危険がほぼなくなり [24], 経路 1 で大きく減速する必要はなくなる. 本研究の議論の限界として, 経路 2 の全長 A_2 が最低でも 400 pixels だけ確保されていたことが挙げられる.

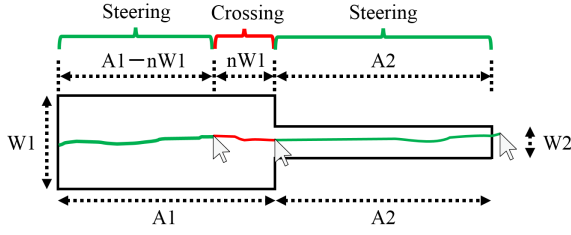


図 15 2 回のステアリングと 1 回のクロッシングに段階を分けたモデル。

Fig. 15 A model of two steering and one crossing phases.

6.2 他のモデルとの比較

難易度を加算したモデル ID_{2SS} も十分に適合したが、スピードを分析するとユーザは単純に 2 回のステアリング操作をしているわけではないことが判明した (図 10, 13)。そこで、他に考えうるモデルと ID_{2SS} を比較する。

モデルの性能を比較するための指標として決定係数 (R^2) がしばしば採用されるが、フリーパラメータの個数を増やせばモデルの適合度は自然と上昇する。そこで、本研究では R^2 に加えて赤池情報量基準 (AIC) [7] の値を比較する。この統計方法は、モデルの複雑さ (フリーパラメータの個数) と適合度 (fitness) のバランスを考慮して最適なモデルを判断する指標である。簡単な説明として、(a) AIC の値が小さいモデルほど良い、(b) 最低 AIC 値から +2 以内の AIC 値であれば最適なモデルと比較する価値がある、(c) 最低 AIC 値から +10 以上だけ大きな AIC 値であれば不採用として問題ない、という基準がある。 AIC は Chapuis と Dragicevic [8] や、Ren ら [19] によるポインティングタスクのモデル選択でも採用されている。

ID_{2SS} モデルの他の候補として、Dennerlein ら [9] のように経路 1 と 2 の難易度を個別の項として加算する方法が考えられる。

$$MT = a + b \frac{A_1}{W_1} + c \frac{A_2}{W_2} \quad (13)$$

これを ID_{3SS} モデルと呼ぶ (3 個のフリーパラメータでステアリング操作 + ステアリング操作をモデル化したもの)。次に、Senanayake ら [21] の方法を本研究に当てはめたモデルを導出する。ユーザは経路 2 に進入するためにスピードを落とし、その後は単一の経路を通過するのと同様の挙動を示すことがわかっている (図 10, 14)。このことから、2 回のステアリング時間に加えて、ゲート (連結部) を通過するための時間変化を考慮すべきだと考えた。つまりクロッシングタスクの難易度 [4] を導入するアイデアである。クロッシングとは、カーソルから距離 A だけ離れた位置にある長さ W の線分を通過する動作であり、フィッツの法則 [11] と同一の式 (3) でモデル化される。これを図 15 のように 3 段階の操作に分けて難易度を加算すると、次の式が得られる。

$$MT = a + b \left(\frac{A_1 - nW_1}{W_1} \right) + c \log_2 \left(\frac{nW_1}{W_2} + 1 \right) + d \frac{A_2}{W_2} \quad (14)$$

表 1 候補モデルの R^2 と AIC の値。a-d はモデルの定数。

Table 1 R^2 and AIC values for four candidate models.

実験	モデル	a	b	c	d	R^2	AIC
2	ID_{2SS}	-137.3	55.51	—	—	0.986	290
	ID_{3SS}	-137.3	51.77	59.24	—	0.992	277
	ID_{4SCS}	-319.0	60.99	187.5	49.73	0.994	272
	ID_{3SCS}	-67.71	55.45	80.02	—	0.996	272
3	ID_{2SS}	-99.84	45.84	—	—	0.963	578
	ID_{3SS}	-111.8	45.62	46.75	—	0.963	580
	ID_{4SCS}	-261.4	49.84	228.3	31.14	0.979	556
	ID_{3SCS}	-115.1	45.97	91.84	—	0.970	571

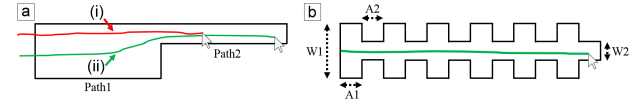


図 16 本研究の実験で扱わなかった条件。(a) 2 本の経路が y 軸の上端で連結した場合。(b) 短距離の経路 1 と 2 が連続的に連結した場合。

Fig. 16 Two cases that our current work cannot describe adequately.

これを ID_{4SCS} モデルと呼ぶ。最後に、 ID_{4SCS} モデルにおける 2 回のステアリング操作の難易度を 1 つの項にまとめる方法が考えられる。

$$MT = a + b \left(\frac{A_1 - nW_1}{W_1} + \frac{A_2}{W_2} \right) + c \log_2 \left(\frac{nW_1}{W_2} + 1 \right) \quad (15)$$

これを ID_{3SCS} モデルと呼ぶ。 ID_{4SCS} 、 ID_{3SCS} モデルともに、 n の値は先行研究と同じく 5 で固定する。

表 1 に結果を示す。全体的に ID_{4SCS} と ID_{3SCS} モデルが良好な値を示している。 R^2 および AIC について、実験 2 では ID_{4SCS} と ID_{3SCS} モデルの差は小さく、 R^2 の差は 1% 未満、 AIC は同じ値であった。また実験 3 では、 ID_{4SCS} と ID_{3SCS} の R^2 の差は同様に 1% 未満であるが、 AIC の差は 15 であった。したがって、統計的には ID_{4SCS} モデルがベストであると考えられる。なお、 n の値を操作することによって最適な R^2 、 AIC の値を求めた場合にも結論に影響はない。

6.3 限界と今後の課題

本研究の考察は実験で採用した経路のパラメータ値による制約がある。さらに、経路の連結方法にも制約がある。例として、図 16a のように経路が y 軸上端で連結している場合には、ユーザの戦略が変化すると考えられる。あるユーザは移動距離を最短にするために、経路の上端に近いところを通過する可能性がある (図 16a-i)。また他のユーザは経路からはみ出すリスクを回避するために、経路 1 では y 軸中央付近を通過し、経路 2 に進入する直前で上方向に移動する (図 16a-ii)、などという戦略の差が生じる。

本研究では 2 本の経路のみを扱い、 ID_{2SS} モデルで十分にモデル化できることを確認した。しかし、仮に図 16b のように短い距離の経路 1 と 2 が多く連結した場合には、難

易度の単純な加算ではモデル化できないと考えられる。このような条件下では、ユーザは経路1の幅が広いことを十分に活かしてスピードアップすることができない。この問題はDrewesが指摘したものであり[10]、本研究の実験結果はこの仮説を支持する。すなわち、ユーザは経路1にいる時点で経路2の幅 W_2 に合わせたスピードになるように先読みして低速化させる必要があるため、経路の幅が常に W_2 であると見なして難易度を算出すべきだと考えられる。この予想を検証するためにも、経路の連結数を増やし、より一般的な条件下で実験することが必要である。

最後に、本稿で導出した4種類のモデルはいずれも通過時間 MT を高精度に予測できるが、これは連結経路を通過する実験でデータを計測する必要がある。つまり、実験1のような単一経路を通過するデータを計測しても、そこから連結経路の通過時間は予測できないのである。単一経路のデータから予測するためのモデルを導出することも考えたが、図10、14に見られる連結経路独特の加減速は単一経路の実験データから導出できず、各々の実験条件下でのデータ計測が必要なことがわかっている。

7. おわりに

ステアリングの法則の一般性の検証に向けて、本研究では2本の経路が連結した場合の操作性能モデルについて報告した。単一の経路を通過する場合と比較すると、ユーザが次の経路を先読みして挙動を変化させていたことが明確に観察された。このような変化が生じたにも関わらず、2本の経路の難易度を加算するモデルでも十分高精度にモデル化できることを示した。また、通過時間をモデル化するための4種類のモデルを導出し、 ID_{4SCS} が最良のモデルであることが支持された。

謝辞 本研究はJSPS科研費15J11634の支援を受けた。

参考文献

- [1] Accot, J. and Zhai, S. 1997. Beyond Fitts' law: models for trajectory-based HCI tasks. In *Proc. of CHI '97*, 295–302.
- [2] Accot, J. and Zhai, S. 1999. Performance evaluation of input devices in trajectory-based tasks: an application of the steering law. In *Proc. of CHI '99*, 466–472.
- [3] Accot, J. and Zhai, S. 2001. Scale effects in steering law tasks. In *Proc. of CHI '01*, 1–8.
- [4] Accot, J. and Zhai, S. 2002. More than dotting the i's — foundations for crossing-based interfaces. In *Proc. of CHI '02*, 73–80.
- [5] Accot, J. and Zhai, S. 2003. Refining Fitts' law models for bivariate pointing. In *Proc. of CHI '03*, 193–200.
- [6] Bateman, S., Doucette, A., Xiao, R., Gutwin, C., Mandryk, R. L., and Cockburn, A. 2011. Effects of view, input device, and track width on video game driving. In *Proc. of GI '11*, 207–214.
- [7] Burnham, K. P. and Anderson, D. R. 1998. *Model selection and multimodel inference: a practical information-theoretic approach*. Springer.
- [8] Chapuis, O. and Dragicevic, P. 2011. Effects of motor scale, visual scale, and quantization on small target acquisition difficulty. *TOCHI*, **18** (3), Article 13.
- [9] Dennerlein, J. T., Martin, D. B., and Hasser, C. 2000. Force-feedback improves performance for steering and combined steering-targeting tasks. In *Proc. of CHI '00*, 423–429.
- [10] Drewes, H. 2013. *A lecture on Fitts' law*. http://www.cip.ifi.lmu.de/~drewes/science/fitts/A_Lecture_on_Fitts_Law.pdf
- [11] Fitts, P. M. 1954. The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *Journal of Experimental Psychology*, **47** (6), 381–391.
- [12] Higuchi, T., Takada, H., Matsuura, Y., and Imanaka, K. 2004. Visual estimation of spatial requirements for locomotion in novice wheelchair users. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, **10** (1), 55–66.
- [13] Hoffmann, E. R. 1997. Movement time of right- and left-handers using their preferred and non-preferred hands. *Int. J. Ind. Ergon.*, **19** (1), 49–57.
- [14] Hoffmann, E. R. 2009. Review of models for restricted-path movements. *Int. J. Ind. Ergon.*, **39** (4), 578–589.
- [15] Kulikov, S., MacKenzie, I. S., and Stuerzlinger, W. 2005. Measuring the effective parameters of steering motions. In *Ext. Abst. of CHI '05*, 1569–1572.
- [16] Kulikov, S. and Stuerzlinger, W. 2006. Targeted steering motions. In *Ext. Abst. of CHI '06*, 983–988.
- [17] Liu, L., Martens, J.-B., and Liere, R. v. 2011. Revisiting path steering for 3D manipulation tasks. *International Journal of Human-Computer Studies*, **69** (3), 170–181.
- [18] Pastel, R. L. 2006. Measuring the difficulty of steering through corners. In *Proc. of CHI '06*, 1087–1096.
- [19] Ren, X., Kong, J., and Jiang, X.-Q. 2005. SH-model: a model based on both system and human effects for pointing task evaluation. *IPSJ journal*, **46** (5), 1343–1353.
- [20] Ren, X. and Zhou, X. 2011. An investigation of the usability of the stylus pen for various age groups on personal digital assistants. *Behaviour & Information Technology*, **30** (6), 709–726.
- [21] Senanayake, R., Hoffmann, E. R., and Goonetilleke, R. S. 2013. A model for combined targeting and tracking tasks in computer applications. *Experimental Brain Research*, **231** (3), 367–379.
- [22] Senanayake, R. and Goonetilleke, R. S. 2016. Pointing device performance in steering tasks. *Perceptual and Motor Skills*, **122** (3), 886–910.
- [23] Thibbotuwawa, N., Goonetilleke, R. S., and Hoffmann, E. R. 2012. Constrained path tracking at varying angles in a mouse tracking task. *Hum. Factors*, **54** (1), 137–149.
- [24] Thibbotuwawa, N., Hoffmann, E. R., and Goonetilleke, R. S. 2012. Open-loop and feedback-controlled mouse cursor movements in linear paths. *Ergonomics*, **55** (4), 476–488.
- [25] Warren, W. H. Jr. and Whang, S. 1987. Visual guidance of walking through apertures: body-scaled information for affordances. *J. Exp. Psychol. -Hum. Percept. Perform.*, **13** (3), 371–383.
- [26] Yamanaka, S. and Miyashita, H. 2016. Modeling the steering time difference between narrowing and widening tunnels. In *Proc. of CHI '16*, 1846–1856.
- [27] Zhai, S., Accot, J., and Woltjer, R. 2004. Human action laws in electronic virtual worlds: an empirical study of path steering performance in VR. *Presence*, **13** (2), 113–127.