

幅の異なる経路が連結されたコーナリングタスクのモデル化

薄羽 大樹^{1,a)} 山中 祥太^{2,b)} 宮下 芳明^{1,c)}

概要：Graphical User Interface 上では、階層メニュー内のナビゲーション、投げなわ選択、レーシングゲームといった操作で角を曲がる操作（コーナリング）が要求される。本論文では、コーナリングの操作時間推定モデルの改善のために、同じ・異なる幅の経路が連結されたコーナリングタスクの実験を行う。実験の結果、幅が同じ場合には、ステアリングの法則で十分に操作時間が予測できることがわかった。また、幅が異なる場合には、2つのステアリングタスクがスムーズに繋がるとみなすモデルによって高精度に操作時間を予測できた。先行研究では、フィッツの項を加えることがコーナリングタスクのモデル適合度を向上させるとされていたが、その項がなくとも十分に予測可能であることを明らかにした。

1. はじめに

Graphical User Interface (GUI) 上におけるステアリングとは、ある幅内を逸脱せずにカーソルを動かしつつける操作のことである (図 1a)。ステアリングの代表的な例としては、階層メニュー内のナビゲーション（親メニューから子メニューへたどる操作）があげられる。ステアリングの操作時間はステアリングの法則 [1] で予測でき、例えば、長さ A 、幅 W の経路を通過する時間 MT は、2つの回帰定数 (a と b_s) を用いて、次のように表せる。

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

このとき、 A/W の項は、ステアリングの「Index of Difficulty (ID)」と呼ばれ、IDが増加することは、予測される MT が増加されること、つまり、その操作が難しく、時間がかかることを示している。

ステアリングの法則は投げなわ選択 [2] やペンジェスチャ [3] といった、より複雑な GUI 上の操作をモデル化する際にも用いられる。また、Virtual Reality (VR) 空間での自動車の運転 [4] や歩行 [5]、レーシングゲーム [6] にも適用できることが知られている。より一般的でロバストなモデルを構築・導出することは、より正確な操作時間の予測やタスク難易度の計算を可能にし、HCI 分野にも寄与していくと考えられる。

階層メニュー内のナビゲーションや投げなわ選択では、しばしば、角を曲がる操作（コーナリング）が要求される

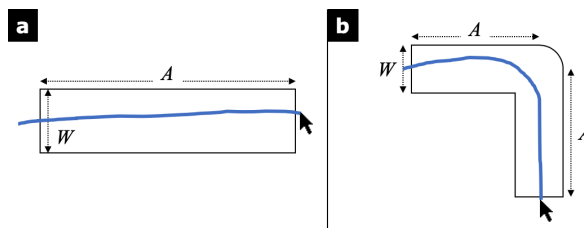


図 1 ステアリングタスクの例。(a) 線形経路。(b) 同 ID の経路を 90° に連結した経路。

(図 1b)。例えば、macOS のメニューバーにおいて、親メニューから子メニューに移動したい場合には、親メニューのアイテム内で曲がり、子メニューに到着する必要がある。また、投げなわ選択では、オブジェクト間を曲がり、選択したいオブジェクトのみを囲うように選択範囲を描くことで、それらを同時に選択できる。Pastel は、そのようなコーナリングタスクでは、経路幅が十分に広くなければ、角で減速する動きが見られることを明らかにしている [7]。また、そのような動きはターゲット周辺で速度を落とすポインティング操作と類似していることから、フィッツの法則（ポインティングのモデル） [8,9] の項をステアリングの法則に加えることで、コーナリングの操作時間をより正確に予測できると報告されている。一方で、我々が Pastel と同様の実験を行ったとき、確かに参加者は角で減速をするが、フィッツの項が有意にモデル適合度を向上させないことを発見した。このことは、図 1b のような幅の等しい経路が連結されたコーナリングタスクの操作時間は、ステアリングの法則のみで十分に予測可能であることを示している。また、オーバーフィッティングの可能性を防げることから、パフォーマンスモデリングにおいては、より定数が少なく精度の高いモデルを構築することが重要である。

¹ 明治大学

² ヤフー株式会社

a) m@mimorisuzu.co

b) syamanak@yahoo-corp.jp

c) homei@homei.com

そのため、フィッツの項を含めないよりシンプルなモデルを導出したことは、GUIやVRの設計に寄与する知見となるだろう。本論文では、幅の異なる経路が連結されている場合(図2b)についても検証し、コーナリングタスクのモデルの改善を行った。

2. 関連研究

2.1 ステアリングの法則

AccotとZhaiはステアリングの法則のグローバルモデルを次のように定義している[1].

$$MT = a + b_s \int_C \frac{dx}{W(x)} \quad (2)$$

ここで、 C は難易度を算出したい任意の経路、 x はカーソルの位置、 $W(x)$ は x での経路幅である。また、積分項はIDと呼ばれる。ステアリングの法則は多くの入力デバイス(例えば、マウス、指、ドライブシミュレータ[4,10,11])や、様々な経路形状(例えば、円形経路、狭まる・広がる経路、湾曲した経路、3次元経路[10,12-14])で成立することが知られている。加えて、ステアリングの法則は入力デバイスの操作性能の定量比較にも用いられる[5,10,11,15,16]。また、たとえ同じIDであっても、物理的な入力領域の違いによって異なるMTが観測されることが知られており、これは「Scale Effect」と呼ばれている[17]。同じIDであっても角度が違う経路[18,19]やインストラクションの違い[20]によっても、異なるMTが観測されることが知られている。

ステアリングの法則を他のモデルと組み合わせればより複雑な操作の時間も予測できる。例えば、階層メニュー内の操作時間は、フィッツの法則やヒック・ハイマンの法則をステアリングの法則に加えることで予測できる[21,22]。特に線形メニュー内の操作時間に関しては、機械学習によっても予測可能であることが知られている[23]。

2.2 停止動作が要求されるステアリング操作

式2によれば、図1bのような幅の同じ経路が連結されたコーナリングタスクのIDは次のように計算できる。

$$MT = a + b_s \frac{2A}{W} \quad (3)$$

Pastelによれば、コーナリングタスクでは角周辺で停止動作(Stop and Go)が要求されるため、フィッツの項[8,9](と追加の定数 b_p)を加えることでより正確にMTを予測できる[7]。つまり、式2は次のように修正される。

$$MT = a + b_s \frac{2A}{W} + b_p \log_2 \left(\frac{A}{W} + 1 \right) \quad (4)$$

元々、フィッツの法則は距離 A だけ離れた幅 W のターゲットをポインティングする際のモデルである。つまり、式4は、経路を通過する操作に加えて、角での減速をポ

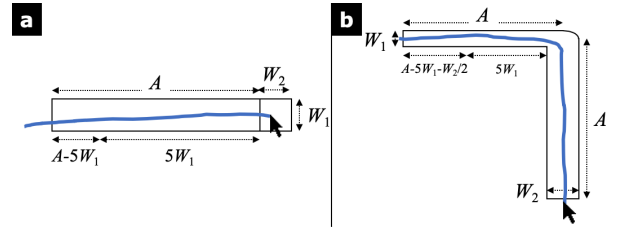


図2 (a) Targeted-tracking タスク。(b) 幅が異なる経路を曲がるタスク。

インティング操作にみられる減速とみなし、それも考慮するということである。コーナリングタスクはポインティングタスクやステアリングタスクのみに近似することはできず、フィッツの項は必要であるとPastelは述べている。

図2aに示されるタスクは、「Targeted-tracking タスク」と呼ばれる[24]。Targeted-tracking タスクとは、ユーザが経路を通過した後、ある幅内で動きを止める必要があるタスクのことである。Senanayakeら[24]によれば、ユーザはまずステアリングタスクを行い、ステアリング経路の終端から $5W_1$ 手前からは、残りの動作をポインティングタスクとして行う。その操作時間は式5(上段)によって示される[24]。このモデルは、慎重なステアリング操作が経路の終端の $5W_1$ 手前で終了するという事実[25]にもとづいている。本論文では、 $a' = a + b_s(-5W_1/W_1)$ とした式5(下段)をTargeted-tracking タスクのモデルとして扱う。

$$MT = a + b_s \frac{A - 5W_1}{W_1} + b_p \log_2 \left(\frac{2(5W_1 + W_2/2)}{W_2} \right) \quad (5)$$

$$= a' + b_s \frac{A}{W_1} + b_p \log_2 \left(\frac{2(5W_1 + W_2/2)}{W_2} \right)$$

なお、Senanayakeら[24]にもとづき、式5においては、 $\log_2(2A/W)$ をフィッツの項[8]として使用している。

コーナリングタスクでは、Targeted-tracking タスク同様、まずステアリングタスクに集中し、その後に角周辺から停止動作に集中し、角を抜けてからは再びステアリングタスクに集中すると想定される。例えば、経路長が2000 pixels、幅が10 pixelsのように狭く長い経路が連結されたコーナリングタスクにおいては、ユーザは経路のはじめの時点では停止動作に意識を向けず、ステアリング経路の終端から $5W_1$ 手前(すなわち、50 pixels)あたりから停止動作を意識し始めるだろう。一方で、Pastelが提案したモデルでは、経路長 A を停止動作までの距離として使用している(式4)。短い A を実験条件として使用した場合には、Pastelのモデルが適していると思われるが、前述のような長い A を使用する場合には、Senanayakeらのモデルも考慮した方が適切であると考えられる(後述する3章にて、Senanayakeらのモデルにもとづいたコーナリングモデルの改善を行う)。

なお、Pastel[7]の他に、コーナリングのモデルはいくつか存在するが[26,27]、これらの研究が対象とする操作

時間は、角に侵入してからその角を脱出するまでの時間である。我々や Pastel が対象とする操作時間は、経路を通過し、角を通り、再び経路を通過するまでの総時間である。そのため、上述の研究で提案されたモデルについては本研究では扱わない。

3. リサーチクエスト

Senanayake らのモデルにもとづけば、式 4 は次のように変形できる。

$$\begin{aligned} MT &= a + b_s \left(\frac{A - 5W_1 - W_2/2}{W_1} + \frac{A}{W_2} \right) + b_p \log_2 \left(\frac{2(5W_1 + W_2/2)}{W_2} \right) \\ &= \left[a + b_s \frac{-5W_1}{W_1} + b_s \left(\frac{A - W_2/2}{W_1} + \frac{A}{W_2} \right) + b_p \log_2 \left(\frac{2(5W_1 + W_2/2)}{W_2} \right) \right] \\ &= a' + b_s \left(\frac{A - W_2/2}{W_1} + \frac{A}{W_2} \right) + b_p \log_2 \left(\frac{2(5W_1 + W_2/2)}{W_2} \right) \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、 a' は角括弧内の数値を定数としてマージした値である。このモデルは、図 2b のような幅の異なる経路が連結された場合であり、特に、2つの経路が同じ幅 W を持つ場合には、 a'' を定数とし、次のように簡略化できる。

$$\begin{aligned} MT &= a' + b_s \left(\frac{A - W/2}{W} + \frac{A}{W} \right) + b_p \log_2 \left(\frac{2(5W + W/2)}{W} \right) \\ &= \left[a' + b_s \left(\frac{-W/2}{W} \right) + b_p \log_2 \left(\frac{2(5W + W/2)}{W} \right) \right] + b_s \left(\frac{2A}{W} \right) \\ &= a'' + b_s \left(\frac{2A}{W} \right) \end{aligned} \quad (7)$$

注目すべきは、フィッツの項が定数になり、グローバルモデルから導き出されるコーナリングのモデル (式 3) と一致することである*1。つまり、Senanayake らのモデルが適用できれば、2つの経路が同じ幅 W を持つ場合には、フィッツの項がなくとも、ステアリングの法則でコーナリングの操作時間を十分に予測可能ということになる。上述のモデルは、連結される経路が同じ幅を持つ場合のみであり、異なる幅の場合には、フィッツの項が必要になる可能性がある。また、Pastel のモデルは経路幅が同じ場合のみで検証されているため、そもそも、Pastel のモデルが適用できるか否かも未知である。そのため、次章では、経路幅が同じ・異なる条件を含めたコーナリング実験を行い、モデルの改善を行う。

Senanayake らの Targeted-tracking のモデル (式 5) であっても、 $W_1 = W_2$ であれば、フィッツの項は定数になり、消滅する。しかし、Senanayake らの論文 [24] では上記の点やコーナリングモデルへの適用は述べられていない。本論文では、モデル比較によって、Senanayake らのモデルがコーナリングモデルに適用可能であるか (フィッツの項をなくした場合にも操作時間を予測可能であるか) を明らかにする。

式 6 において、 $A - 5W_1 - W_2/2 < 0$ の場合 (タスクの始めからステアリングではなく停止動作に注力している場

*1 フィッツの法則は、様々なバージョンが存在するが [28, 29]、例えば、Shannon の式 [9] を用いた場合であっても、同様の式が得られる。

合) には、式 6 は次のようになる。

$$MT = a + b_s \frac{A}{W_2} + b_p \log_2 \left(\frac{2A}{W_2} \right) \quad (8)$$

式 6 では、対数項の分子は $2(5W_1 + W_2/2)$ であったが、 $A - 5W_1 - W_2/2 < 0$ の場合には、 $5W + W/2$ が A を超えるため、 A に置き換えるのが適切であると考えられる。本稿では、 $A - 5W_1 - W_2/2 < 0$ かどうかの場合分けを行い、それぞれの条件におけるモデルを検証する。

4. 実験

4.1 機材

PC は Apple MacBook Pro (Intel Core i5, 2.4 GHz, 2 コア, Intel Iris 1536 MB, 8 GB RAM, macOS Sierra, 図 3a) であり、解像度は 1680×1050 pixels (実寸は 13.3 inches, 286.47×179.04 mm, 0.17 mm/pixel) であった。入力デバイスはマウス (Logitech G-PPD-002WL, 3200 dpi) であり、1.80 m のケーブルで PC に繋がれており、下には十分大きなマウスパッド (899×420 mm) が敷かれていた。実験システムは JavaScript で開発されており、フルスクリーンで表示された。

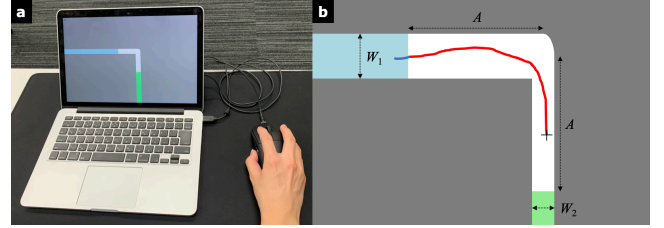


図 3 (a) 実験機材. (b) 実験タスクの概要.

4.2 参加者

12 名 (3 名は女性, 9 名は男性, $M = 22.08$ 歳, $SD = 2.02$ 歳) が参加した。すべての参加者が右利きであり、右手でマウスを操作した。2500 円が報酬として支払われた。

4.3 タスク

画面には青色の開始領域、白色の経路、緑色の終了領域が表示された (図 3b)。参加者は開始領域をクリックして試行を開始させ、経路から逸脱しないようにカーソルを操作し、終了領域で再びクリックして試行を完了させた。カーソルの軌跡は開始領域では青色、経路内では赤色、終了領域では青色で表示された [10]。開始領域からカーソルが脱出すると音が鳴らされるとともに計測が開始された。カーソルが経路から逸脱することなく終了領域に到達した上でクリックがなされると、成功を示す音が再生された。そうでない場合 (途中でカーソルが逸脱した場合)、失敗 (エラー) を示す音が再生され、参加者はその試行をやり直した。参加者には、クラッチ (マウスを置き直す動作) を

しないように指示し、もし、クラッチをした場合には、マウスの右ボタンを押して試行をやり直させた。クラッチによるやり直しはエラーとしてカウントしなかった。

4.4 実験デザイン

1つの経路の長さ A は 250, 380, 560, 700 pixels (それぞれ, 42.63, 64.80, 95.49, 119.36 mm) であった。全体の経路の長さは $2A$ であった。角の前後の経路幅 W_1 と W_2 はそれぞれ 30, 40, 60, 80 pixels (それぞれ, 5.12, 6.82, 10.23, 13.64 mm) であった。そのため、2つの経路幅が同じ・異なる条件が存在した。ステアリングの法則によって計算される1つの経路の ID は 3.13–23.33 であった。Pastelの実験における1つの経路の ID は 0.625–8 であり、Pastelの実験と比べ、本研究も十分に広い範囲の ID が設定されていると考えられる。

4.5 手順

A , W_1 , W_2 の順序はランダムであった。1セットは $4A \times 4W_1 \times 4W_2 = 64$ 試行であった。参加者はまず1セットの練習をし、実験データとして5セットを行った。全体では、3,840 試行 ($4A \times 4W_1 \times 4W_2 \times 5$ セット \times 12 名) であり、1名の参加者が実験に要した時間は30分であった。

4.6 インストラクション

先行研究 [2, 10] と同様、参加者には、経路を逸脱しない範囲で速度を出すよう指示した (つまり、速度より精度を優先するよう指示した)。予備実験では、参加者に速く正確にタスクを行うよう指示したが、その場合には高いエラー率が観測された。また、本実験では、Pastelの実験 [7] と比べると長く狭い経路を条件として使用するため、精度を優先したインストラクションを使用することとした。

4.7 計測値

従属変数は、操作時間 MT (開始領域を脱出してから、終了領域に侵入するまでの時間、エラーした試行を除く)、エラー率であった。

5. 結果

4,449 試行のうち、609回のエラーが観測された (13.54%)。Pastelの研究 [7] と比べると、やや高いエラー率が観測された。Pastelの研究では、軌跡の98%が経路に入っていればその試行が成功とされていたため、低いエラー率が観測されたのだと思われる。また、ステアリングタスクでは、エラー率が10–25% [10] になるのが通例とされているため、本実験のエラー率は標準的な値であると考えられる。

繰り返しのある分散分析で分析を行い、多重比較には Bonferroni の法を用いた。独立変数は A , W_1 , W_2 であり、従属変数は計測値で述べた値であった。以下のグラフ

では、エラーバーは標準誤差を示し、***, **, *はそれぞれ、 $p < 0.001$, $p < 0.01$, $p < 0.05$ を示す。

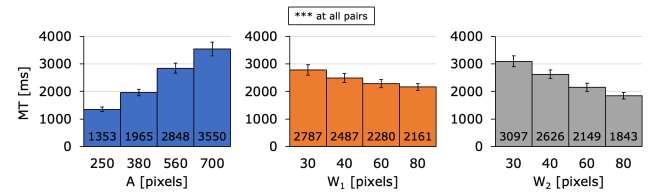


図4 MT に対する A , W_1 , W_2 の影響。

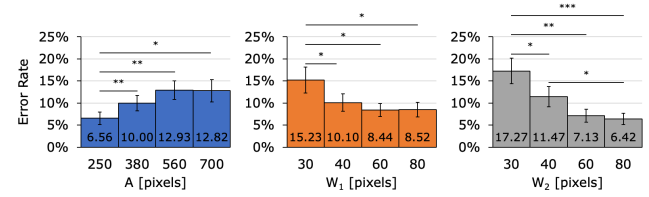


図5 エラー率に対する A , W_1 , W_2 の影響。

5.1 操作時間 MT

主効果が見られたのは、 A ($F_{3,33} = 153.16$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.93$), W_1 ($F_{3,33} = 66.40$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.86$), W_2 ($F_{3,33} = 188.22$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.94$) であった。図4に示されるように、 A が増加するほど、また、 W_1 や W_2 が減少するほど MT が増加した。交互作用が見られたのは、 $A \times W_1$ ($F_{9,99} = 23.01$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.68$), $A \times W_2$ ($F_{9,99} = 48.23$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.81$) であった。全ての交互作用において、経路長と経路幅の関係はステアリングの法則と一致していた (つまり、 MT は経路長と経路幅の比率に影響されていた)。

5.2 エラー率

主効果が見られたのは、 A ($F_{3,33} = 12.48$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.53$), W_1 ($F_{3,33} = 9.13$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.45$), W_2 ($F_{3,33} = 20.10$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.65$) であった。図5に示されるように、 A が増加するほど、また、 W_1 や W_2 が減少するほどエラー率が増加した。交互作用が見られたのは、 $A \times W_2$ ($F_{9,99} = 2.90$, $p < 0.01$, $\eta_p^2 = 0.21$) であった。 A が増加するほど W_2 間の差が増加していた。

6. モデル適合

6.1 幅の等しい経路が連結された場合

まず、経路幅が等しく ($W_1 = W_2$), $A - 5W_1 - W_2/2 \geq 0$ となる条件を抽出し、モデル適合度を検証した ($N = 14$, N は対象となる試行数)。本節では、 $W = W_1 = W_2$ とする。グローバルモデル (式2) によれば、コーナリングタスクの操作時間は式3で示される。また、たとえ、タスクを2つの連続したステアリングタスクとみなしても、

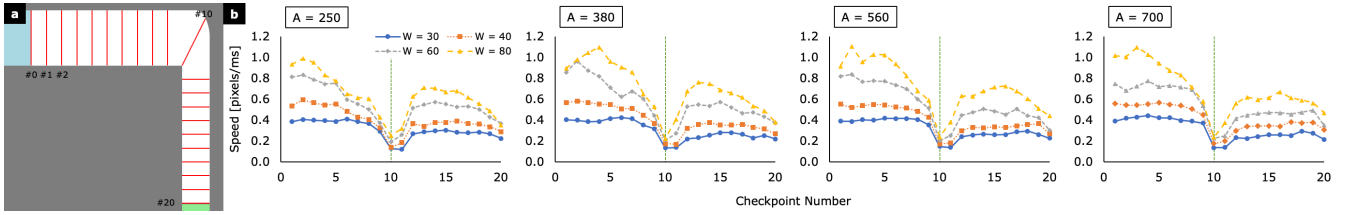


図 6 (a) 速度を計測するチェックポイント (赤色の線). (b) $W_1 = W_2$ における平均速度 (緑色の線は角の位置, W は W_1 と W_2 を示す.)

表 1 $W_1 = W_2$ におけるモデル適合度 ($N = 14$). [下限値, 上限値] として回帰定数 (a, b_s, b_p) の 95%信頼区間を示す.

Model	Equation	a	b_s	b_p	adj. R^2	AIC
Steering law	$MT = a + b_s \left(\frac{2A}{W} \right)$	337 [161, 513]	102 [95.2, 109]		0.987	181
Pastel's model	$MT = b_s \left(\frac{2A}{W} \right) + b_p \log_2 \left(\frac{A}{W} + 1 \right)$	-109 [-1587, 1370]	91.4 [55.0, 128]	198 [-452, 847]	0.986	183

$MT = [a + b_s(A/W_1)] + [a + b_s(A/W_2)]$ となり, 定数をマージすれば同様の式が得られる.

本節では, ステアリングの法則と Pastel のモデル (式 4) を検証する. ステアリングの法則は, 定数を 2 つしか持たないが, Pastel のモデルは 3 つの定数を持つ. そのため, adj. R^2 に加え, 赤池情報量規準 (AIC) [30] を用いモデル適合度を検証する. 良いモデルは高い adj. R^2 と低い AIC を示し [2, 31], また, AIC の差が 2 以上であれば, その差は考慮に値し [31, 32], その差が 10 を超えれば, 低い AIC を示すモデルの方が有意に良いとされる [32].

表 1 に示されるように, 2 つのモデル間の差は有意ではなかった. つまり, 幅の等しい経路が連結されたコーナリングタスクの操作時間は, 定数の少ないステアリングの法則で十分に予測可能ということである.

参加者がコーナリング時に停止動作を行っていたかも検証した. 図 6a に示されるように, 21 個のチェックポイント (#0-20, 赤色の線) を設置し, チェックポイントから次のチェックポイントを通過するまでの時間を計測し, その時間から速度を算出した. チェックポイントは角の前後にそれぞれ 10 個, 角に 1 個が設置された. 図 6b に示されるように, 参加者は角 (#10) で急激に速度を落としていたことがわかる. このことは, Pastel が述べていた「コーナリングタスクでは停止動作が要求される」を支持している. 一方で, 表 1 に示されるように, フィッツの項がなくとも操作時間を高精度に予測できることから, 確かに参加者は停止動作を行うが, 予測にはステアリングの法則のみで十分であることが示された. つまり, Senanayake らのモデルを適用することでフィッツの項が不要になる (式 7) という仮説は正しかった.

$A - 5W_1 - W_2/2 < 0$ となる条件は 2 つしか存在しなかったため, 本節ではその条件におけるモデル適合度は検証しない.

6.2 幅の異なる経路が連結された場合

次に, 経路幅が異なる条件を含めたすべての条件でのモデル適合度を検証する. 図 7 に示されるように, 参加者は角で速度を急激に落としていた. また, たとえ $W_1 = W_2$ の場合であっても, 角の前後におけるそれぞれのピーク速度は異なっていた. つまり, 角の前後のそれぞれの経路では, たとえ同じ経路幅であっても, 異なる操作時間が観測されていた. そのため, それぞれの経路においてステアリングの法則を適用した場合, 異なる傾き b_s が得られると推測した. 図 8 に示されるように, それぞれの経路でステアリングの法則は高い適合度を示し, W_1 の経路の傾きは W_2 の経路の傾きの 2 倍であった. これを踏まえ, 検証するモデルに, それぞれの経路で異なる傾きを使用する「Steering law (segmented)」(表 2-4) を加えた. 「Steering law (global)」(表 2-4) は, 上記のモデルにおいて, ステアリングにかかる定数をマージしたバージョンである. 同様にして, 「Pastel's model (global)」(表 2-4) から「Pastel's model (segmented)」(表 2-4) を導出した.

まず, $A - 5W_1 - W_2/2 \geq 0$ となる条件を抽出し, モデル適合度を検証した ($N = 56$). 上記の候補モデルに加えて, $A - 5W_1 - W_2/2 \geq 0$ であるため, ステアリングの項が含まれる「Senanayake et al.'s model (global)」(表 2) と, 異なる傾きを使用する「Senanayake et al.'s model (segmented)」(表 2) を検証した. 表 2 に示されるように, 異なる傾きを使用する Segmented バージョンがより良い適合度を示した.

次に, $A - 5W_1 - W_2/2 < 0$ になる条件を抽出し, モデル適合度を検証した ($N = 8$). $A - 5W_1 - W_2/2 < 0$ であるため, Senanayake らのモデルは式 8 をもとにした「Senanayake et al.'s model」(表 3) を使用した. Senanayake et al.'s model では, ステアリングの項は 1 つであるため, Segmented バージョンは存在しない. 表 3 に示されるように, Steering law (global) 以外のモデルはより良い適合度を示した.

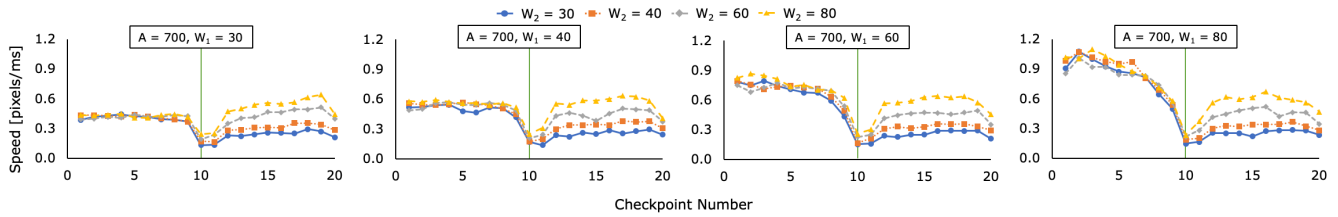


図 7 $A = 700$ における平均速度 (緑色の線は角の位置)。

表 2 $A - 5W_1 - W_2/2 \geq 0$ になる条件におけるモデル適合度 ($N = 56$)。 b_{s1} と b_{s2} は回帰定数。

Model	Equation	a	b_{s1}	b_{s2}	b_p	adj. R^2	AIC
Steering law (global)	$MT = a + b_{s1} \left(\frac{A}{W_1} + \frac{A}{W_2} \right)$	221 [63.9, 378]	106 [100, 113]			0.951	767
Steering law (segmented)	$MT = a + b_{s1} \frac{A}{W_1} + b_{s2} \frac{A}{W_2}$	255 [177, 332]	74.1 [68.2, 80.0]	136 [131, 142]		0.988	689
Pastel's model (global)	$MT = a + b_{s1} \left(\frac{A}{W_1} + \frac{A}{W_2} \right) + b_p \log_2 \left(\frac{A}{W_2} + 1 \right)$	-786 [-972, -600]	75.9 [69.8, 82.0]		490 [409, 572]	0.987	695
Pastel's model (segmented)	$MT = a + b_{s1} \frac{A}{W_1} + b_{s2} \frac{A}{W_2} + b_p \log_2 \left(\frac{A}{W_2} + 1 \right)$	-191 [-557, 176]	73.3 [67.6, 79.0]	112 [91.4, 132]	211 [40.8, 381]	0.989	684
Senanayake et al.'s model (global)	$MT = a + b_{s1} \left(\frac{A - W_2/2}{W_1} + \frac{A}{W_2} \right) + b_p \log_2 \left(\frac{2(5W_1 + W_2/2)}{W_2} \right)$	-426 [-584, -269]	104 [101, 107]			0.987	692
Senanayake et al.'s model (segmented)	$MT = a + b_{s1} \frac{A - W_2/2}{W_1} + b_{s2} \frac{A}{W_2} + b_p \log_2 \left(\frac{2(5W_1 + W_2/2)}{W_2} \right)$	89.1 [-321, 499]	84.7 [70.2, 99.3]	125 [109, 140]	66.0 [-58.3, 190]	0.989	687

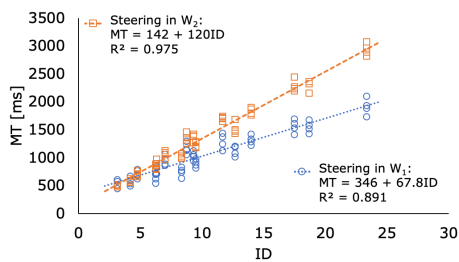


図 8 それぞれの経路における MT と ID の関係 ($N = 64$)。

最後に、 $A - 5W_1 - W_2/2$ の場合わけをせず、すべての条件 ($N = 64$) におけるモデル適合度を検証した。候補モデルは、Steering law, Pastel's model の両バージョンである。表 4 に示されるように、Steering law (segmented) と Pastel's model (segmented) はより良い適合度を示した。

Steering law (segmented) と Pastel's model (segmented) は Senanayake et al.'s model の両バージョンと比べても同程度以上の適合度を示した。また、Steering law (segmented) と Pastel's model (segmented) は場合わけを必要としない。そして、Steering law (segmented) は Pastel's model (segmented) と比べて定数の個数が少ないにもかかわらず、同程度の予測精度であった。以上をまとめると、コーナリングモデルは Steering law (segmented) が最適であると考えられる。

7. 議論

7.1 幅の等しい経路が連結された場合

実験の結果、幅の等しい経路が連結されたコーナリングタスクにおいては、ステアリングの法則で十分に操作時間を予測できると示された。Pastel の研究においても、ステ

アリングの法則は高い適合度 ($R^2 = 0.99$) を示していたが、Pastel は、コーナリングタスクはステアリングタスクと近似できないため、ステアリングの法則では十分ではない (つまり、予測のためにはフィッツの項を加えるべきである) と述べていた [7]。しかし、今回の実験結果では、フィッツの項を加えることによるモデル適合度の向上は有意ではなかった (回帰分析の結果、 $p = 0.517$ であった)。つまり、幅が等しい経路が連結されたコーナリングタスクの操作時間の予測には、ステアリングの法則を使用すれば十分ということになる。

7.2 幅の異なる経路が連結された場合

各モデルの Global バージョンと Segmented バージョンを比較すると、Segmented バージョンの適合度は有意に高かった。つまり、それぞれの経路において異なる傾きを使用することがモデル適合度を向上させることがわかる。先行研究 [18, 19] によれば、経路が横向き (x 軸方向) でなくともステアリングの法則が成立し、角度に応じて操作時間が異なることが知られている。つまり、ステアリングの法則によって算出される傾きも角度に応じて異なる。それゆえ、 x 軸方向と y 軸方向の経路ごとに異なる傾きを使用した Steering law (segmented) が Steering law (global) よりも高い適合度を示したのだといえる。また、Yamanaka らが行った Experiment 3 では、参加者は x 軸方向に連結された 2 つの直線経路を通過するタスクを行った [33]。各経路ごとにステアリングの法則を適用する再分析を行った結果、それぞれの経路において近い傾きが得られた (図 9)。そして、[33] の Table 1 に書かれる ID_{2ss} と ID_{3ss} は、それぞれ本論文での Steering law (global) と Steering law

表 3 $A - 5W_1 - W_2/2 < 0$ になる条件におけるモデル適合度 ($N = 8$).

Model	Equation	a	b_{s1}	b_{s2}	b_p	adj. R^2	AIC
Steering law (global)	$MT = a + b_{s1} \left(\frac{A}{W_1} + \frac{A}{W_2} \right)$	115 [-117, 347]	126 [101, 151]			0.956	94
Steering law (segmented)	$MT = a + b_{s1} \frac{A}{W_1} + b_{s2} \frac{A}{W_2}$	413 [275, 551]	35.0 [-0.029, 70.0]	132 [123, 141]		0.995	77
Pastel's model (global)	$MT = a + b_{s1} \left(\frac{A}{W_1} + \frac{A}{W_2} \right) + b_p \log_2 \left(\frac{A}{W_2} + 1 \right)$	-164 [-310, -18.5]	43.4 [8.16, 78.6]		393 [232, 554]	0.994	78
Pastel's model (segmented)	$MT = a + b_{s1} \frac{A}{W_1} + b_{s2} \frac{A}{W_2} + b_p \log_2 \left(\frac{A}{W_2} + 1 \right)$	158 [-375, 691]	35.0 [0.120, 69.8]	91.2 [8.06, 174]	182 [-186, 551]	0.996	76
Senanayake et al.'s model	$MT = a + b_{s1} \frac{A}{W_2} + b_p \log_2 \left(\frac{2A}{W_2} \right)$	307 [-386, 1000]	98.8 [-0.121, 198]		411 [-804, 1625]	0.990	83

表 4 すべての条件におけるモデル適合度 ($N = 64$).

Model	Equation	a	b_{s1}	b_{s2}	b_p	adj. R^2	AIC
Steering law (global)	$MT = a + b_{s1} \left(\frac{A}{W_1} + \frac{A}{W_2} \right)$	252 [128, 375]	105 [99.9, 111]			0.960	869
Steering law (segmented)	$MT = a + b_{s1} \frac{A}{W_1} + b_{s2} \frac{A}{W_2}$	252 [192, 312]	74.3 [69.1, 79.4]	136 [131, 141]		0.990	778
Pastel's model (global)	$MT = a + b_{s1} \left(\frac{A}{W_1} + \frac{A}{W_2} \right) + b_p \log_2 \left(\frac{A}{W_2} + 1 \right)$	-683 [-855, -511]	76.4 [70.7, 82.2]		459 [381, 536]	0.988	794
Pastel's model (segmented)	$MT = a + b_{s1} \frac{A}{W_1} + b_{s2} \frac{A}{W_2} + b_p \log_2 \left(\frac{A}{W_2} + 1 \right)$	-65.3 [-355, 225]	73.3 [68.3, 78.4]	118 [100, 135]	156 [16.2, 295]	0.991	775

(segmented) に該当するが、これらのモデルの適合度は同程度であった。つまり、コーナリングなどの水平に経路が連結されないタスクの場合には、ステアリングの項を経路ごとに分けることが適合度を向上させるといえる。

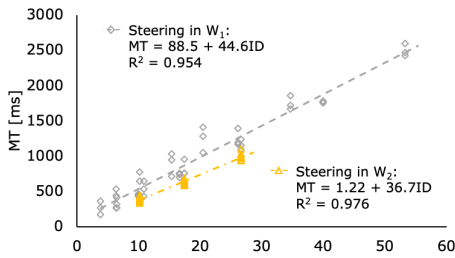


図 9 [33] のそれぞれの経路における MT と ID の関係 ($N = 45$).

図 7 に示されるように、幅が異なる場合においても、角で急激に減速しており、「コーナリングタスクでは停止動作を行う」という Pastel の主張は正しかったように思える。また、Senanaya らのモデルを適用したコーナリングモデルの適合度も高かったことから、角に近くにつれてユーザが停止動作に注力するという仮説も正しかったのであろう。一方で、前段のとおり、 AIC や定数の数を考慮すれば、コーナリングタスクのモデルとして適切なのは Steering law (segmented) であると考えられる。つまり、コーナリングタスクはスムーズに連結された 2 つのステアリングタスクとみなせる。また、Steering law (segmented) は、幅が同じ経路が連結されている場合には、定数をマージすることでステアリングの法則と一致するため、幅が同じ・違うどちらの条件においても Steering law (segmented) が使用可能であるといえる。

8. 制約と展望

Pastel の研究では、経路が連結される角度は 90° だけでなく、 45° や 135° といった角度も実験条件に含まれていた。本研究では、 90° に連結される場合しかテストしていないため、他の角度においても Steering law (segmented) がモデルとして適しているかは不明である。一方で、本研究の実験結果や Yamanaka ら [33] の実験結果を考慮すれば、 90° に加え 0° においても Steering law (segmented) を検証したといえる。その点を踏まえると、 0 から 90° の角度においては、傾きの値を変化させることで、Steering law (segmented) が十分に操作時間を予測できると考えている。また、Thibbotuwawa ら [19] にもとづけば、ステアリングの項にサイン ($\sin \theta$) を加えることで、角度を考慮できるモデルになると考えている。

また、モデル比較の結果、「ステアリング経路の終端から $5W_1$ 手前からユーザの動きが変化する」はコーナリングタスクにおいても見られた。一方で、 nW_1 の $n = 5$ となるのは直線経路をステアリングする際に見られる現象であり、コーナリングタスクの場合には $n = 5$ よりも適した値が存在する可能性がある。また、本実験では、参加者に速さよりも正確さを重視するように指示しており、また、図 7 を見ても、 W_1 や W_2 が大きい条件であっても速度変化は ballistic よりも visually-controlled に近かった。コーナリングタスクにおける最適な n が調査されれば、モデルはさらに改善されると考えられる。

投げなわ選択タスクでは、コーナリング操作が含まれるため、Pastel の研究にもとづき、そのモデルにはフィッツの項が含まれている [2]。一方で、本実験の結果にもとづけば、フィッツの項がなくともコーナリングタスクの操作

時間は十分に予測できるため、投げなわ選択のモデルについても改善できる可能性がある。Yamanakaら [2] がモデル化した投げなわ選択は、グリッド状にアイコンが整列されている場合であり、水平経路と垂直経路しか存在しないため、ステアリングの項が多くとも2つの傾きを有すれば、操作時間は予測可能であろう [18,19]。一方で、もし、アイコンがランダムな位置に存在する場合には、経路の角度の種類が増えるため、その分だけ傾き（定数）が必要になる可能性がある。あまりにも定数が多いと、適合度は上がるが、オーバーフィッティングを引き起こす可能性がある。しかし、コーナリングタスクにおいては、Steering law (global) も高い適合度を示していたため、オーバーフィッティングの場合には、ステアリングのグローバルモデルを使用することで、投げなわ選択の操作時間を予測できるだろう。このように、本研究の実験結果は、コーナリングタスクだけでなく、そのタスクを含む他のタスクのモデル化についても寄与していくと考えられる。

9. 結論

本実験では、コーナリングモデルの改善のために、幅の異なる経路が連結されたコーナリングタスクを行った。実験の結果によれば、幅が同じ・異なる経路において、ステアリングの法則は十分な適合度を示した。特に、幅の異なる場合においては、コーナリングタスクを2つのステアリングタスクがスムーズに連結されたタスクとみなすことで、フィッツの項がなくとも、操作時間を高精度に予測可能であると示した。今後は、実験結果にもとづき、コーナリングが含まれる投げなわ選択タスクなどのモデルの改善を行っていく予定である。

参考文献

- [1] 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*, CHI '97, New York, NY, USA, ACM, pp. 295–302, DOI: 10.1145/258549.258760 (1997).
- [2] Yamanaka, S. and Stuerzlinger, W.: Modeling Fully and Partially Constrained Lasso Movements in a Grid of Icons, *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '19, New York, NY, USA, ACM, pp. 120:1–120:12, DOI: 10.1145/3290605.3300350 (2019).
- [3] Cao, X. and Zhai, S.: Modeling Human Performance of Pen Stroke Gestures, *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '07, New York, NY, USA, ACM, pp. 1495–1504, DOI: 10.1145/1240624.1240850 (2007).
- [4] Zhai, S., Accot, J. and Woltjer, R.: Human Action Laws in Electronic Virtual Worlds: An Empirical Study of Path Steering Performance in VR, *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, Vol. 13, No. 2, pp. 113–127, DOI: 10.1162/1054746041382393 (2004).
- [5] Monteiro, P., Carvalho, D., Melo, M., Branco, F. and Bessa, M.: Application of the steering law to virtual reality walking navigation interfaces, *Computers & Graphics*, Vol. 77, pp. 80 – 87, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cag.2018.10.003> (2018).
- [6] Bateman, S., Doucette, A., Xiao, R., Gutwin, C., Mandryk, R. L. and Cockburn, A.: Effects of View, Input Device, and Track Width on Video Game Driving, *Proceedings of Graphics Interface 2011, GI '11*, School of Computer Science, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada, Canadian Human-Computer Communications Society, pp. 207–214, available from <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1992917.1992952> (2011).
- [7] Pastel, R.: Measuring the Difficulty of Steering Through Corners, *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '06, New York, NY, USA, ACM, pp. 1087–1096, DOI: 10.1145/1124772.1124934 (2006).
- [8] 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).
- [9] MacKenzie, I. S.: A Note on the Information-Theoretic Basis for Fitts' Law, *Journal of Motor Behavior*, Vol. 21, No. 3, pp. 323–330, DOI: 10.1080/00222895.1989.10735486 (1989).
- [10] 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, ACM, pp. 466–472, DOI: 10.1145/302979.303133 (1999).
- [11] Senanayake, R. and Goonetilleke, R. S.: Pointing Device Performance in Steering Tasks, *Perceptual and Motor Skills*, Vol. 122, No. 3, pp. 886–910, DOI: 10.1177/0031512516649717 (2016).
- [12] Yamanaka, S. and Miyashita, H.: Modeling the Steering Time Difference Between Narrowing and Widening Tunnels, *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '16, New York, NY, USA, ACM, pp. 1846–1856, DOI: 10.1145/2858036.2858037 (2016).
- [13] Nancel, M. and Lank, E.: Modeling User Performance on Curved Constrained Paths, *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '17, New York, NY, USA, ACM, pp. 244–254, DOI: 10.1145/3025453.3025951 (2017).
- [14] Kattinakere, R. S., Grossman, T. and Subramanian, S.: Modeling Steering Within Above-the-surface Interaction Layers, *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '07, New York, NY, USA, ACM, pp. 317–326, DOI: 10.1145/1240624.1240678 (2007).
- [15] Wang, Q., Ren, X., Sarcar, S. and Sun, X.: EV-Pen: Leveraging Electro-vibration Haptic Feedback in Pen Interaction, *Proceedings of the 2016 ACM International Conference on Interactive Surfaces and Spaces*, ISS '16, New York, NY, USA, ACM, pp. 57–66, DOI: 10.1145/2992154.2992161 (2016).
- [16] Wang, Q., Ren, X. and Sun, X.: Enhancing Pen-based Interaction Using Electro-vibration and Vibration Haptic Feedback, *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '17, New York, NY, USA, ACM, pp. 3746–3750, DOI: 10.1145/3025453.3025555 (2017).
- [17] Accot, J. and Zhai, S.: Scale Effects in Steering Law Tasks, *Proceedings of the SIGCHI Con-*

- ference on Human Factors in Computing Systems, CHI '01, New York, NY, USA, ACM, pp. 1–8, DOI: 10.1145/365024.365027 (2001).
- [18] Zhou, X., Ren, X. and Hui, Y.: Effect of Start Position on Human Performance in Steering Tasks, *2008 International Conference on Computer Science and Software Engineering*, Vol. 2, pp. 1098–1101, DOI: 10.1109/CSSE.2008.1310 (2008).
- [19] Thibbotuwawa, N., Goonetilleke, R. S. and Hoffmann, E. R.: Constrained Path Tracking at Varying Angles in a Mouse Tracking Task, *Human Factors*, Vol. 54, No. 1, pp. 138–150, DOI: 10.1177/0018720811424743 (2012).
- [20] Zhou, X. and Ren, X.: An investigation of subjective operational biases in steering tasks evaluation, *Behaviour & Information Technology*, Vol. 29, No. 2, pp. 125–135, DOI: 10.1080/01449290701773701 (2010).
- [21] Ahlström, D.: Modeling and Improving Selection in Cascading Pull-down Menus Using Fitts' Law, the Steering Law and Force Fields, *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '05, New York, NY, USA, ACM, pp. 61–70, DOI: 10.1145/1054972.1054982 (2005).
- [22] Cockburn, A., Gutwin, C. and Greenberg, S.: A Predictive Model of Menu Performance, *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '07, New York, NY, USA, ACM, pp. 627–636, DOI: 10.1145/1240624.1240723 (2007).
- [23] Li, Y., Bengio, S. and Bailly, G.: Predicting Human Performance in Vertical Menu Selection Using Deep Learning, *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '18, New York, NY, USA, ACM, pp. 29:1–29:7, DOI: 10.1145/3173574.3173603 (2018).
- [24] Senanayake, R., Hoffmann, E. R. and Goonetilleke, R. S.: A model for combined targeting and tracking tasks in computer applications, *Experimental Brain Research*, Vol. 231, No. 3, pp. 367–379, DOI: 10.1007/s00221-013-3700-4 (2013).
- [25] Thibbotuwawa, N., Hoffmann, E. R. and Goonetilleke, R. S.: Open-loop and feedback-controlled mouse cursor movements in linear paths, *Ergonomics*, Vol. 55, No. 4, pp. 476–488, DOI: 10.1080/00140139.2011.644587 (2012).
- [26] Pastel, R., Champlin, J., Harper, M., Paul, N., Helton, W., Schedlbauer, M. and Heines, J.: The Difficulty of Remotely Negotiating Corners, *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, Vol. 51, No. 5, pp. 489–493, DOI: 10.1177/154193120705100513 (2007).
- [27] Helton, W. S., Head, J. and Blaschke, B. A.: Cornering Law: The Difficulty of Negotiating Corners With an Unmanned Ground Vehicle, *Human Factors*, Vol. 56, No. 2, pp. 392–402, DOI: 10.1177/0018720813490952 (2014).
- [28] Drewes, H.: Only One Fitts' Law Formula Please!, *CHI '10 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '10, New York, NY, USA, ACM, pp. 2813–2822, DOI: 10.1145/1753846.1753867 (2010).
- [29] Hoffmann, E. R.: Which Version/Variation of Fitts' Law? A Critique of Information-Theory Models, *Journal of Motor Behavior*, Vol. 45, No. 3, pp. 205–215, DOI: 10.1080/00222895.2013.778815 (2013).
- [30] Akaike, H.: A new look at the statistical model identification, *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 19, No. 6, pp. 716–723, DOI: 10.1109/TAC.1974.1100705 (1974).
- [31] Ren, X., Kong, J. and Jiang, X.-Q.: SH-Model: A Model Based on Both System and Human Effects for Pointing Task Evaluation, *IPSJ Digital Courier*, Vol. 1, pp. 193–203, DOI: 10.2197/ipsjdc.1.193 (2005).
- [32] Burnham, K. P. and Anderson, D. R.: *Model selection and multimodel inference: a practical information-theoretic approach*, Springer Science & Business Media (2003).
- [33] 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, ACM, pp. 232–243, DOI: 10.1145/3025453.3025836 (2017).