

視線を用いた1次元ポインティングにおける 1次サッカードエラー率のモデル化

島田雄輝¹ 薄羽大樹¹ 宮下芳明¹

概要：視線を用いたポインティングでは、特に小さいターゲットを狙うときに1次みのサッカードでは到達できず、2次以上のサッカードが発生する。2次以上のサッカードの発生は操作時間を増加させるため、高速な選択を行いたい場合、1次サッカードのみでターゲットに到達できることが望ましい。本研究では、1次サッカードエラー率のモデル化を行う。提案モデルは、ターゲットまでの距離とターゲットの大きさをもとに、1次サッカードの終点分布の正規性と、標準偏差、平均の変動の傾向から、1次サッカードエラー率を予測する。1次元のポインティングタスクによる実験データに対し、提案モデルは高い適合度および、交差検証の結果、低い平均絶対誤差を示した。また、提案モデルを用いて、既存のGUIにおける1次サッカードエラー率を予測し、修正例を示した。

1. はじめに

安価なアイトラッカーの登場や、モバイルデバイス、ヘッドマウントディスプレイなどへのアイトラッカーの搭載により、視線推定技術は普及しつつある。それに伴い、今日では、3Dシューティングゲーム*1などにおいて、視線を用いた操作が実用化されている。特にポインティング(ボタンやアイコンなどのターゲットを選択する操作)は、Graphical User Interface (GUI)において重要な操作であり、視線を用いることで、フリーハンドでの操作 [1] や高速な選択 [2,3] が可能となる。

眼球運動は、基本的には注視とサッカードを交互に行っているとされる。注視とは、周囲の環境から視覚フィードバックを得るための期間であり、サッカードとは、最大視角速度 $900^\circ/\text{s}$ に達する [4] 高速な運動である。視線を用いたポインティングにおける眼球運動では、特に小さいターゲットを狙うとき、1次みのサッカードではターゲットに到達できず、2次以上のサッカードが発生する(図1 a) [5]。そのとき、発生する2次以上のサッカードと注視の分だけ操作時間が増加する。したがって、視線を用いたポインティングにおいて高速な選択を行いたい場合、1次サッカードのみでターゲットに到達できることが望ましい。

ある距離だけ離れたターゲットに1次サッカードのみで到達するためには、ターゲットを十分な大きさにする必要がある。一方で、大きいターゲットは画面を占有し、他の

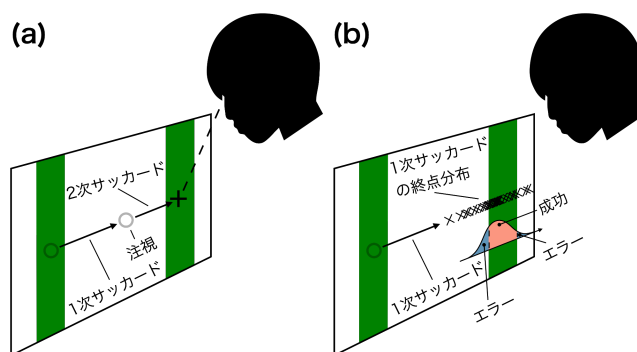


図1 視線を用いたポインティングにおける1次サッカードエラー率のモデル化を行う。(a) 1次サッカードのみではターゲットに到達できず、2次以上のサッカードが発生する場合がある。(b) 提案モデルは、ターゲットまでの距離とターゲットの大きさをもとに、1次サッカードの終点分布の正規性と、標準偏差、平均の変動の傾向から1次サッカードエラー率を予測する。

コンテンツの表示領域が制限される。デザイナーは、このようなことを考慮しながら適切なターゲットの大きさを決定する必要がある。

本研究では、視線を用いたポインティングにおける1次サッカードエラー率のモデル化を行う。1次サッカードエラーとは、1次サッカードのみでターゲットに到達できない場合を指す。提案モデルは、ターゲットまでの距離とターゲットの大きさをもとに、1次サッカードの終点分布の正規性と、標準偏差、平均の変動の傾向から1次サッカードエラー率を予測する(図1 b)。提案モデルを用いることで、例えば、ターゲットをある大きさに拡大した場合に削減可能なエラー率がわかる。つまり、ターゲットの拡大に

¹ 明治大学

*1 <https://gaming.tobii.com/games/the-division-2/>

よる画面占有のデメリットと、1次サッカードで到達しやすくなるメリットを考慮しつつ、ターゲットの大きさを決定できる。本論文における主な貢献は以下である。

- 1次サッカードの終点分布に関する3つの仮説を立て、1次サッカードエラー率のモデル化を行った。実験の結果はこれらの仮説を支持しており、提案モデル(式7)は高い適合度 ($\text{adj. } R^2 = 0.975$) を示した。また、交差検証の結果、低い平均絶対誤差 3.75% を示し、モデルは適切にエラー率を予測できると考えられる。
- 1次サッカードのみでターゲットに到達しやすくなるために、提案モデルを用いて既存の GUI の修正例を示した。本実験と同様の環境では、ActiGaze^{*2}で標準に設定されている 140 pixels のターゲット幅を 160 pixels に拡大すると、水平方向に発生する1次サッカードエラー率を約 4.10% 削減できることを示した。

2. 関連研究

2.1 選択におけるパフォーマンスモデル

HCI 分野では、これまでもエラー率のモデル化は行われてきた。タッチポインティング [6]、動的なターゲットのポインティング [7,8]、動的なターゲットのクロッシング [9]、限られた時間内でのポインティング [10]、限られた時間内での動的なターゲットのポインティング [11]、VR 空間でのポインティング [12] など、様々な状況におけるエラー率のモデル化が行われた。これらのモデルは、終点分布の正規性と終点分布へ影響を与える要因から導出された。

Fitts' law [13] は、ターゲットまでの距離 A とターゲットの幅 W が与えられたとき、ポインティングの操作時間を予測する。Wobbrock らは、Fitts' law にもとづき、ポインティングのエラー率のモデルを導出した [14,15]。しかし、Fitts' law は弾道運動(視覚フィードバックによる制御が行われない高速な運動 [16])には適用できないため、ほとんど単一の弾道運動でポインティングが行われる状況 [17] では Wobbrock らのモデルは適用できない。弾道運動の性質から導出されているエラー率のモデルも存在する。Meyer らのモデルは、ポインティングを2回の弾道運動の連続と仮定してエラー率を予測し [18]、Park らのモデルは、クリックの直前に行われた運動から予測する [19]。

2.2 弾道運動の終点分布

多くの研究では、弾道運動の終点分布はターゲットの中心を平均とした正規分布にしたがうことが仮定される [18,20,21]。

ターゲットを狙うタスクでは、速度と精度のトレードオフが存在し、より高速に狙うほど精度は減少する [22]。一定時間でタスクを行う必要がある状況では、ターゲットま

での距離が増加すると、より高速に操作することが求められる。したがって、速度と精度のトレードオフにより、弾道運動における終点分布のばらつきは増加する。Schmidt らによれば、ターゲットまでの距離 A が増加するほど弾道運動の終点分布の標準偏差 σ は増加し、与えられた制約時間が短いほど σ は増加する [23]。制約時間がない操作においても同様に、 A の増加により終点分布のばらつきが増加することが知られている。Howarth らによると、手による弾道運動の終点分布の分散 σ^2 は、式1で表される [24,25]。

$$\sigma^2 = a + bA^2 \quad (1)$$

ここで、 a は手の震えによる終点分布の分散を表し、 b は A^2 に対する σ^2 の増加傾向を表す。式1は、運動方向、運動と垂直方向の両方で適合する [26,27]。

サッカードは、サッカード抑制 [28] と呼ばれる現象により、運動中に視覚フィードバックを受けないため、弾道運動とされる。速度と精度のトレードオフはサッカードにおいても発生し、平均速度が増加すると終点分布のばらつきが増加する [29]。さらに、運動距離の増加によっても終点分布のばらつきは増加する [30,31]。また、ターゲットが大きくなるほど、1次サッカードの運動距離が短くなる(ターゲットの手前側のエッジよりに着地する)傾向がある [31,32]。アイトラッカーによって検出されるサッカードの終点分布は、アイトラッキングの精度にも依存する。アイトラッキングの精度の評価には、正確度と精密度という指標が用いられる [33]。正確度とは、複数の検出された視線位置における誤差の平均を表し、精密度とは、複数の検出された視線位置における2乗平均平方根を表す^{*3}。

2.3 対象を見るときサッカード

対象を見るときサッカードでは、特に小さい対象を狙うときに1次のみでは到達できず、2次以上のサッカードが発生する [34,35]。視線を用いたポインティングにおいて2次以上のサッカードが頻繁に発生する場合、Fitts' law に適合する場合がある [5,36]。Schuetz らによれば、視線を用いたポインティングの難易度が一定より高いとき、2次以上のサッカードが頻繁に発生し、Fitts' law にしたがう [5]。一方で、ポインティングの難易度が一定より低いときにはほとんど1次サッカードのみで選択できたため、Schuetz らはこのようなデザインを推奨している。

また多くの場合、1次サッカードはアンダーシュート(対象よりも手前に着地すること)の傾向があることが示されている [34,37,38]。いくつかの研究では、このような傾向は、2次サッカードの準備時間 [39] や、サッカード中の運動時間 [40] を節約するためであると考えられている。

*2 <https://www.actigaze.com/>

*3 <https://www.tobiiipro.com/service-support/learning-center/eye-tracking-essentials/what-affects-the-accuracy-and-precision-of-an-eye-tracker/>

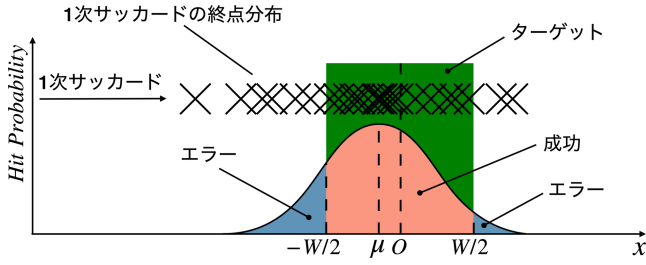


図 2 提案モデルの概要. 青い領域は 1 次サッカードエラー, 赤い領域は成功を意味する. 提案モデルは, 図中の青い領域の面積を計算することに相当する.

3. 1 次サッカードエラー率のモデル化

本研究では, 視線を用いたポインティングにおいて, ターゲットまでの距離 A , ターゲットの幅 W をもとに, 1 次サッカードの終点分布の正規性と, 標準偏差 σ , 平均 μ の変動の傾向から 1 次サッカードエラー率 ER をモデル化する (式 7). 本論文では, 今後の研究によって, 提案モデルがより複雑な状況下 (2 次元環境下でのポインティングなど) におけるモデル化に应用されることを期待し, 1 次元のポインティングタスク (ターゲットの高さが実質無限) におけるモデル化を行う. 以下では, 弾道運動やサッカードの先行研究を参考に, 1 次サッカードの終点分布に関する 3 つの仮説を述べ, モデルの導出を行う.

3.1 仮説

H1: 1 次サッカードの終点分布は正規分布にしたがう

サッカードの終点分布は, 正規分布と仮定される場合が多い [41, 42]. 本研究ではこれらの研究にならい, 1 次サッカードの終点分布は正規分布にしたがうと仮定する.

H2: 終点分布の標準偏差は $\sigma = \sqrt{a + bA^2}$ で表せる

先行研究では, A の増加によりサッカードの終点分布のばらつきが増加する傾向があることが示されており [30, 31], 手による弾道運動と同様の傾向がある. したがって, 1 次サッカードの終点分布においても式 1 が成り立つと仮定すれば, 標準偏差 σ は以下の式で表せる.

$$\sigma = \sqrt{a + bA^2} \quad (2)$$

ここで, a はアイトラッキングにおける精密度の 2 乗を表し, b は A^2 の増加に対する σ の増加傾向を表す.

H3: 終点分布の平均は $\mu = c + dW$ で表せる

ターゲットが大きくなるほど 1 次サッカードが手前側のエッジよりに着地する傾向 [31, 32] の理由は, 1 次サッカードにおけるアンダーシュートの傾向と同様に, 運動時間の節約のための戦略 [40] による可能性が挙げられる. より大きいターゲットでは, より手前に着地することで運動時間を節約できるため, ターゲットの中心とエッジの間を, 一貫した比で狙っている可能性が考えられる. この仮定が成

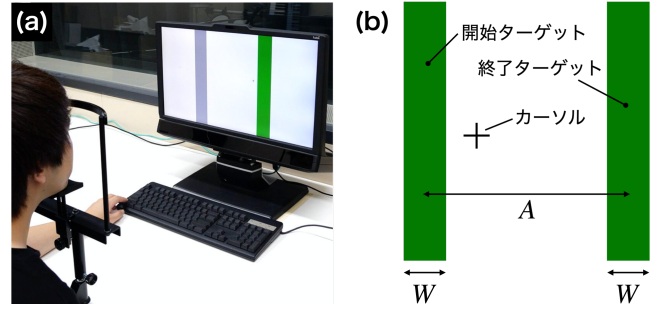


図 3 実験概要. (a) 実験参加者は, ディスプレイから約 60 cm 離れた顎台に顔を載せて実験を行った. (b) 開始ターゲットは常に左, 終了ターゲットは常に右に表示された. ターゲット間の距離を A , ターゲットの幅を W とした.

り立つ場合, W が増加するほど終点分布の平均 μ が線形に減少するはずであり, その関係は式 3 で表せる.

$$\mu = c + dW \quad (3)$$

ここで, c はアイトラッキングにおける正確度を表し, d は W の増加に対する μ の減少傾向を表す.

3.2 導出

H1 より, 1 次サッカードの終点分布 X は, ターゲットの中心を原点とし, ポインティングの進行方向を正とした座標系 x において, 正規分布 (式 4) にしたがうと仮定する (図 2).

$$X(x | \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (4)$$

1 次サッカードエラー率 ER は, 分布の全領域から, ターゲット内に位置する領域を差し引くことで計算される (式 5). これは, 図 2 中の青い領域の面積を求めることに相当する.

$$\begin{aligned} ER &= 1 - \left\{ \int_0^{W/2} X(x) dx - \int_0^{-W/2} X(x) dx \right\} \\ &= 1 - \frac{1}{2} \left[\operatorname{erf} \left(\frac{\frac{W}{2} - \mu}{\sigma\sqrt{2}} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{-\frac{W}{2} - \mu}{\sigma\sqrt{2}} \right) \right] \end{aligned} \quad (5)$$

ここで, erf は正規分布を積分する際に用いられる誤差関数 (式 6) である.

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt \quad (6)$$

H2, H3 より, 提案モデルは式 5 において, 分布の標準偏差 σ , 平均 μ をそれぞれ式 2, 3 に置き換え, 式 7 で表される.

$$ER = 1 - \frac{1}{2} \left[\operatorname{erf} \left(\frac{\frac{W}{2} - (c + dW)}{\sqrt{2(a + bA^2)}} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{-\frac{W}{2} - (c + dW)}{\sqrt{2(a + bA^2)}} \right) \right] \quad (7)$$

ここで, a, b, c, d は回帰分析によって得られる定数であり, 各定数は, **H2, H3** で説明される.

4. 実験

本実験では、1次サッカードの終点分布の正規性と、ターゲットまでの距離 A 、ターゲットの幅 W が終点分布の標準偏差 σ 、平均 μ 、1次サッカードエラー率 ER に与える影響を調査した。実験により、仮説 **H1-H3** を検証した後に、提案モデル（式 7）を評価した。

4.1 環境

アイトラッカーは Tobii Pro TX300 (Sampling rate = 300 Hz) を用い、PC (Alienware m17 R2, Intel Core i7-9750H, 2.60 GHz, 16.00 GB RAM, Windows 10 Pro) に外部ディスプレイ (Tobii Pro TX300 付属のディスプレイ, 23 inch, 1920 × 1080 pixels) およびキーボード (Realforce103U SE02B0) を繋ぎ実験を行った (図 3 a)。カーソルは十字で表示され、アイトラッカーから得られた視線位置に約 60 Hz で表示された。Unity で作成された実験プログラムが外部ディスプレイにフルスクリーンで表示された。参加者は外部ディスプレイの左右中央に着席し、位置が固定された顎台 (株式会社 Namoto 製, TKD-UK1) に顔を載せ実験を行った。ディスプレイ中央から参加者の眼までの距離は約 60 cm であり、実験中はなるべく顔を動かさないように指示した。また、すべての参加者において、室外から光が差し込まない同じ部屋で実験が行われた。

4.2 参加者

15 名が参加したが、内 1 名は実験を中断したため*4、分析には 14 名 (20-24 歳, 11 名が男性, 3 名が女性) 分のデータを用いた。また、5 名が裸眼であり、4 名が眼鏡、5 名がコンタクトレンズを装着していた。参加者には、2000 円が謝礼として支払われた。

4.3 タスク

参加者は、左に表示される開始ターゲットを選択した後に、右に表示される終了ターゲットをできるだけ速く正確に選択するよう指示された (図 3 b)。ターゲットを 400 ms 注視することで選択が行われた。Nayyar らの実験によれば、400 ms はターゲットを選択するのに適した時間であった [43]。カーソルがターゲット内に位置している場合のみカウントが行われ、カーソルがターゲットから出た場合には、カウントはリセットされた。

開始ターゲットを選択すると開始を知らせる音が鳴り、開始ターゲットは緑色から灰色に変化した。終了ターゲットを選択すると成功を知らせる音が鳴り、次の実験画面に移行した。参加者には、開始ターゲットが灰色に変化したことを確認した後に、なるべく瞬きをせずに一度の視線移

動で終了ターゲットに視線を移すよう指示した。参加者がこれらを行えなかったと判断した場合、左手で Ctrl キーを押してその試行をやり直すことを指示した。

4.4 デザイン

開始ターゲットの中心から終了ターゲットの中心までの距離 A 、ターゲットの幅 W の 2 要因被験者内実験デザインを用いた。 A は 4 水準, 200, 400, 600, 800 pixels (それぞれ, 53.0, 106, 159, 212 mm), W は 4 水準, 40, 80, 120, 160 pixels (それぞれ, 10.6, 21.2, 31.8, 42.4 mm) であった。画面から眼までの距離が 60 cm のとき、 A はそれぞれ, 視角 5.06, 10.1, 15.1, 20.0 度であり、 W はそれぞれ, 視角 1.01, 2.02, 3.04, 4.05 度であった。参加者は、 $A \times W$ の 16 条件を 1 セットとし、25 セットを行った。1 セット内における条件の提示順序はランダムであった。

4.5 手順

実験参加者は、最初に、Tobii Pro Eye Tracker Manager*5による 8 点キャリブレーションを行い、1 セットの練習を行った後に本番の 25 セットを行った。5 セットごとに約 2 分間の休憩をとり、休憩後には必ずキャリブレーションを行った。実験中にトラッキング精度が悪化した場合はキャリブレーションのやり直しを申請することを指示した。参加者 1 名につき、実験時間は約 45 分であった。

5. 結果と検証

サッカードは、R で提供されるパッケージ *saccades**6により検出された。*saccades* は速度ベースのアルゴリズム [44] を用いて、注視や瞬き、それらに分類されない挙動 (サッカード終了時に生じる視線のぶれであるグリセード [45] など) をイベントとして検出できる。検出されたイベント以外をサッカードとし、最初に $A/2$ を超えたサッカードの終了地点を 1 次サッカードの終点として分析した*7。

5649 試行のデータが得られ、内 49 試行はやり直しが行われたデータであった。やり直しを除外した 5600 試行のデータから、イベントが検出できなかった 3 試行、瞬きが検出された 198 試行、 $A/2$ を超えたサッカードの終点が検出できなかった 64 試行を分析から除外した。また、終了ターゲットまでの視線移動において、意図せず短いサッカードが繰り返された試行などを分析から除外するために、各条件 ($A \times W$) ごとの 1 次サッカードの終点において平均から標準偏差の 3 倍以上離れているデータ (89 試行) を外れ値とした。分析には、5246 データ (93.7 %) を用いた。

*5 <https://www.tobii.com/product-listing/eye-tracker-manager/>

*6 <https://github.com/tmalsburg/saccades>

*7 終了ターゲットに視線を移す前に、開始ターゲット付近で生じる不意なサッカードを分析から除外するために、最初に $A/2$ を超えたサッカードの終了地点を 1 次サッカードの終点とした。

*4 実験を中断した 1 名については斜視であるという情報が得られ、トラッキング精度が悪く、タスクに支障が出たため中断した。

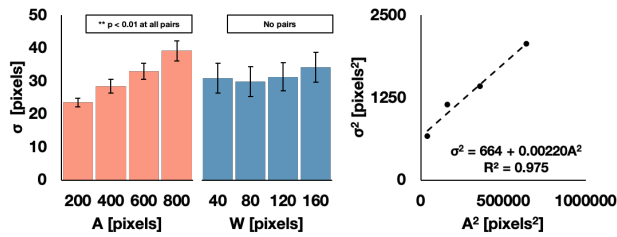


図4 (左) 標準偏差 σ に対する A , W の影響. (右) 分散 σ^2 と A^2 の関係.

5.1 終点分布の正規性

各参加者ごと各条件における 224 の終点分布 ($4A \times 4W \times 14$ 名) に対し, MATLAB による 1 標本の Kolmogorov-Smirnov 検定 ($\alpha = 0.05$) を行ったところ, 223 の分布 (99.6%) において, 正規分布にしたがっているという帰無仮説は棄却されなかった. また, 各条件における 16 ($4A \times 4W$) の分布に対して同様の検定を行ったところ, すべての分布において, 帰無仮説は棄却されなかった. この結果は, **H1** を支持している.

5.2 A , W が終点分布の標準偏差 σ , 平均 μ , 1 次サッカーエラー率 ER に与える影響

各参加者ごと各条件における 224 の終点分布から, MATLAB で提供される mle 関数を用いた最尤推定*⁸により, μ , σ を算出した. また, 1 次サッカーの終点がターゲット外にある場合をエラーとし, 1 次サッカーエラー率 ER を算出した. μ , σ , ER の検定には, IBM SPSS を用いて A , W を独立変数としたくり返しのある分散分析を行い, 多重比較には Bonferroni 法を用いた. 以降のグラフ中の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.

5.2.1 標準偏差 σ

A ($F_{3,39} = 34.7$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.728$), W において主効果が見られた ($F_{3,39} = 3.73$, $p < 0.05$, $\eta_p^2 = 0.223$). また, $A \times W$ において交互作用は見られなかった ($F_{9,117} = 1.36$, $p = 0.214$, $\eta_p^2 = 0.0948$). A , W ごとに平均化された標準偏差 σ を図 4 左に示す. 多重比較の結果, A におけるすべてのペア間では有意差が見られたが ($p < 0.01$), W におけるすべてのペア間で有意差は見られなかった. また, A の増加にしたがって σ が増加する傾向が見られた. 図 4 右に, A^2 ごとに 2 乗平均平方根化された σ^2 と A^2 の関係を示す. 結果として強い線形関係 ($R^2 = 0.975$) が見られ, **H2** は支持された.

5.2.2 平均 μ

A において主効果が見られず ($F_{3,39} = 0.530$, $p = 0.664$, $\eta_p^2 = 0.0392$), W において主効果が見られた ($F_{3,39} = 39.9$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.754$). A , W ごとに平均化された平均

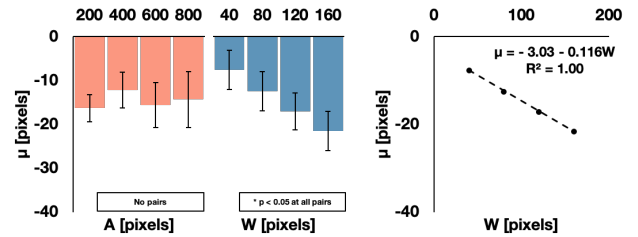


図5 (左) 平均 μ に対する A , W の影響. (右) 平均 μ と W の関係.

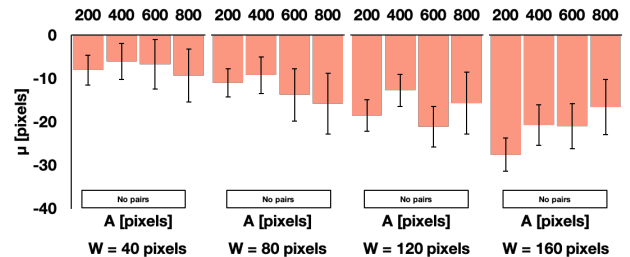


図6 平均 μ に対する W ごと A の影響.

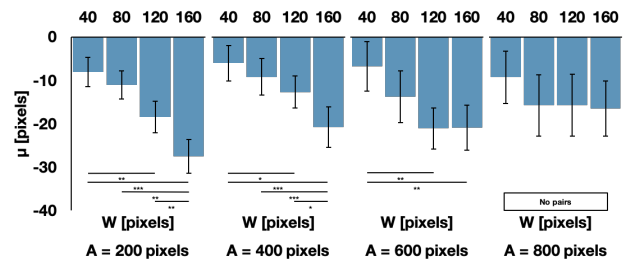


図7 平均 μ に対する A ごと W の影響.

μ を図 5 左に示す. 多重比較の結果, W におけるすべてのペア間で有意差が見られ ($p < 0.05$), W の増加にしたがって μ が減少する傾向が見られた. また, $A \times W$ において交互作用が見られた ($F_{9,117} = 2.99$, $p < 0.01$, $\eta_p^2 = 0.187$). W ごと A において平均化された μ , および A ごと W において平均化された μ を図 6, 7 に示す. W ごと A のペア間ではすべてにおいて有意差が見られなかった. また, A ごと W のペア間では, 有意差が見られたペアには, W の増加にしたがって μ が減少する傾向が見られた. 図 5 右に, W ごとに平均化された μ と W の関係を示す. 結果として強い線形関係 ($R^2 = 1.00$) が見られ, **H3** は支持された.

5.2.3 1 次サッカーエラー率 ER

A ($F_{3,39} = 188$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.935$), W において主効果が見られた ($F_{3,39} = 1359$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.991$). A , W ごとに平均化された 1 次サッカーエラー率 ER を図 8 左に示す. 多重比較の結果, A の増加にしたがって ER が増加し ($p < 0.001$), W の増加にしたがって ER が減少していた ($p < 0.01$). また, $A \times W$ において交互作用が見られた ($F_{9,117} = 38.7$, $p < 0.001$, $\eta_p^2 = 0.748$). W ごと A において平均化された ER , および A ごと W において平均化された ER を図 9, 10 に示す. W ごと A のペ

*⁸ 先行研究 [7-9] にない最尤推定を用いた.

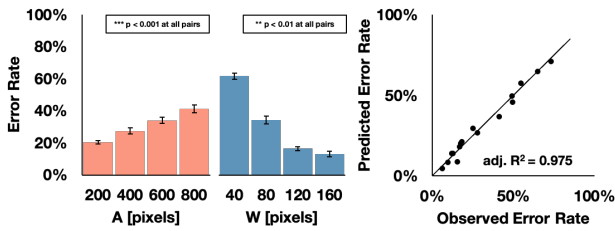


図 8 (左) 1次サッカーエラー率 ER に対する A , W の影響. (右) 1次サッカーエラー率 ER における観測値と、提案モデルによる予測値の関係.

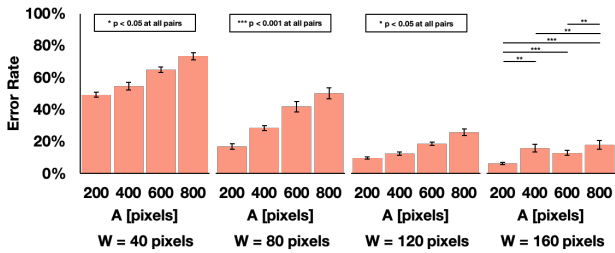


図 9 1次サッカーエラー率 ER に対する W ごと A の影響.

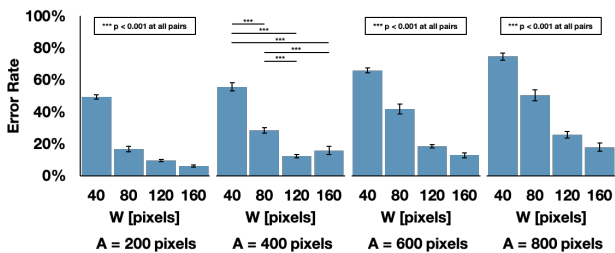


図 10 1次サッカーエラー率 ER に対する A ごと W の影響.

ア間では、有意差が見られたペアには、 A の増加にしたがい ER が増加し、 A ごと W のペア間では、有意差が見られたペアには、 W の増加にしたがい ER が減少していた。

5.3 モデル適合

H1-H3 が支持されたため、提案モデル (式 7) を、MATLAB の提供する `fitnlm` 関数を用いた非線形回帰により検証した。各定数に対する推定値、標準誤差を表 1 に示す。また、観測値と予測値の関係を図 8 右に示す。結果として、高い適合度 ($\text{adj. } R^2 = 0.975$) が得られた。さらに、モデルの一般性を検証するために交差検証を行った。14 名の参加者のうち、ランダムに選出した 7 名のデータからモデルの定数 (a , b , c , d) を推定し、残りの 7 名のデータから得られた観測値と、得られた定数を用いた予測値の平均絶対誤差 (MAE) を算出した。100 回の繰り返しにより、平均 $MAE = 3.75\%$ ($SD = 1.59\%$) が得られた。同様に交差検証を行っている先行研究 [7-9] では、 $3.5\% - 5.8\%$ までの MAE を示しており、これらと同等の低い MAE が示されたことから、提案モデルは適切にエラー率を予測できると考えられる。

表 1 提案モデルにおける各定数に対する推定値、標準誤差。

| Parameter | Estimated | Standard error |
|-----------|-----------|----------------|
| a | 705 | 91.2 |
| b | 0.00338 | 0.000416 |
| c | 16.7 | 9.87 |
| d | -0.303 | 0.0769 |

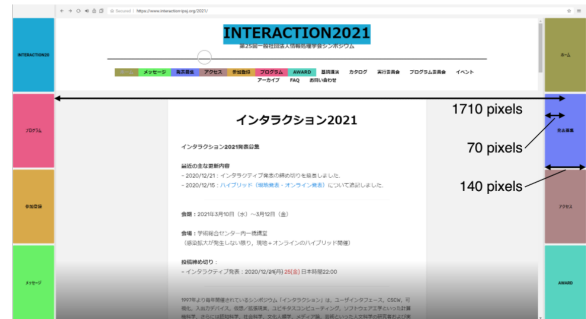


図 11 ActiGaze*2 の概要。1920 × 1080 pixels のディスプレイでは、70 pixels から 1710 pixels までの水平方向の視線移動が発生すると考えられる。

6. インタフェースデザインへの適用

ActiGaze*2 [46] では、ハイパーリンクなどの小さいターゲットを視線を用いて選択するために、そのターゲットに対応する大きいターゲットが画面横に表示される (図 11)。ユーザの視線位置周辺のターゲットが複数ハイライトされ、選択したいターゲットと同じ色の大きいターゲットを代わりに一定時間注視することで選択を行うことができる。画面横に表示される大きいターゲットは、標準で 140 pixels の幅に設定されている*9。基本的には視線は水平方向に移動し、また幅以上の高さを持つターゲットであれば 1次元状況下と大きくエラー率は変わらないはずであるため、提案モデルはこのようなインタフェースにおいてもエラー率を予測できると考えられる。

本実験を行ったディスプレイ (23 inch, 1920 × 1080 pixels) で ActiGaze を用いた場合、コンテンツの表示部分から画面端に表示されるターゲットの中心まで、最小で 70 pixels、最大で 1710 pixels の水平方向の視線移動が発生すると考えられる (図 11)。ユーザの眼とディスプレイまでの距離が 60 cm の場合、式 7 によれば、 W が 140 pixels のとき、 A が 70 pixels から 1710 pixels まで変化することで、1次サッカーエラー率は約 4.96% から 50.9% まで変化し (図 12, 13)、平均で約 27.1% のエラー率を示す。ここで、 W を 160 pixels まで拡大すれば、最小で 80 pixels、最大で 1680 pixels の水平方向の視線移動が発生すると考えられ、エラー率は約 3.67% から 45.1% まで変化し (図 12)、平均で約 23.0% のエラー率を示す。さらに W を 180 pixels

*9 HP*2 で提供されるアプリケーションは、先行研究 [46] からデザインが変更されている。アプリケーションの設定画面から、標準で 140 pixels の幅に設定されていることがわかる。

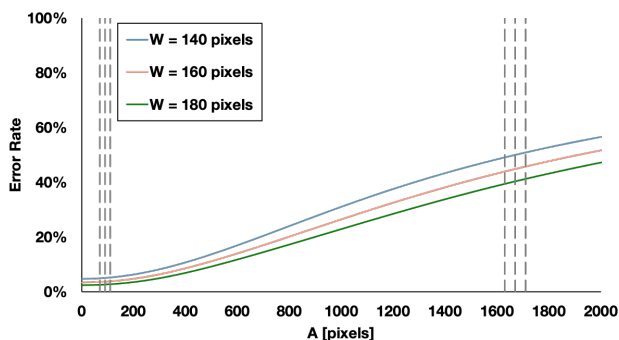


図 12 提案モデルによって予測された 1 次サッカーボードエラー率に対する W ごと A の影響。破線は、 $A = 70, 90, 110, 1630, 1670, 1710$ pixels を示す。

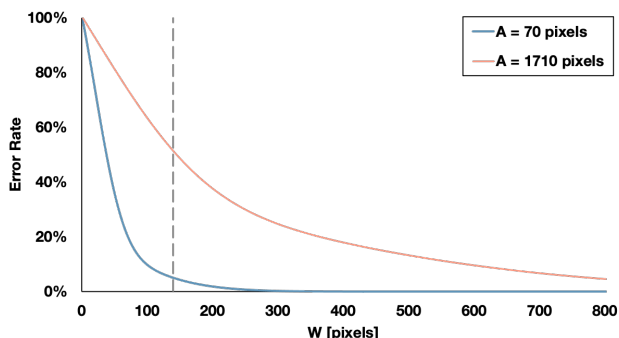


図 13 提案モデルによって予測された 1 次サッカーボードエラー率に対する A ごと W の影響。破線は、 $W = 140$ pixels を示す。

まで拡大すると、最小で 90 pixels、最大で 1650 pixels の水平方向の視線移動が発生すると考えられ、エラー率は約 2.68 % から 39.9 % まで変化し (図 12)、平均で約 19.7 % のエラー率を示す。したがって、 W が 140 pixels から 160 pixels まで増加した場合は平均して約 4.10 % のエラー率が減少したのに対し、160 pixels から 180 pixels まで増加した場合は約 3.30 % のエラー率の減少を示した。同様に 20 pixels の拡大を行ったにもかかわらず、わずかながらエラー率の減少が小さくなるのがわかる。これは、図 13 で示される傾向と一致している。図 13 によれば、 W が小さいときには、 W を増加することで大きくエラー率が減少するのに対し、 W が大きいときには、 W を増加することでのエラー率の減少が小さくなる。提案モデルを用いた予測により、デザイナーは、このようなことを考慮して適切な設計を行うことができる。

7. 制約と展望

7.1 エリアカーソルを用いる場合

本実験では、十字の中心部分でのみ選択が行われるポイントカーソルを用いた。一方で、視線を用いたポインティングでは、より大きい選択範囲があるエリアカーソル [47] が用いられる場合がある。例えば、EyeGuitar [48] は、音楽に合わせてレーン上を流れてくるノーツに対し、視線で

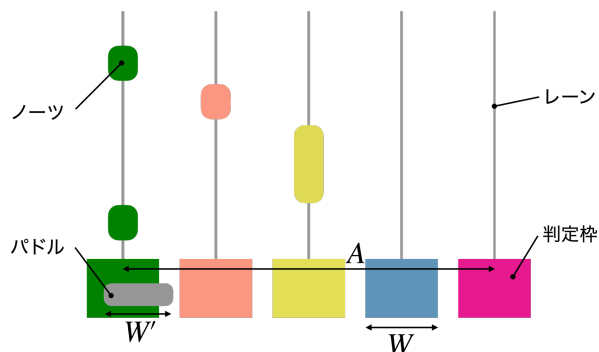


図 14 EyeGuitar [48] の概要。音楽に合わせてノーツがレーン上を流れる。ユーザは視線で幅 W' のパドルを水平方向に操作し、幅 W の判定枠に合わせる。

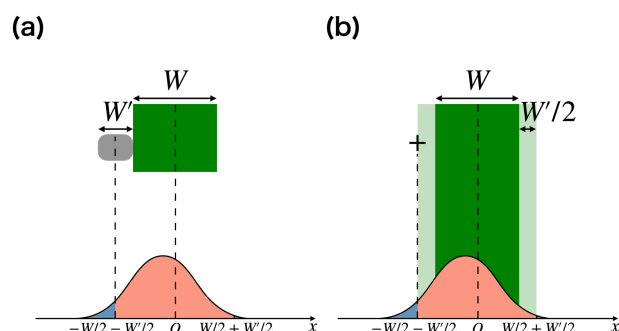


図 15 式 8 の概要。青い領域は 1 次サッカーボードエラー、赤い領域は成功を意味する。(a) 幅 W' のエリアカーソルを用いた場合、 $-W/2 - W'/2$ から $W/2 + W'/2$ の範囲外にある場合にエラーとなる。(b) これは、ポイントカーソルを用いた場合に、ターゲットの両端に見えない $W'/2$ の選択可能な領域があることと実質的に同じと考えられる。

操作するパドルを水平方向に移動させ、判定枠にあわせるリズムゲームである (図 14)。視線で操作するパドルはエリアカーソルであり、パドルの端が判定枠に触れた時点で成功となる。つまり、視線座標に幅 W' のパドルの中心が位置し、判定枠が幅 W であるとき、判定枠の中心を原点として、視線座標が $-W/2 - W'/2$ から $W/2 + W'/2$ の範囲内のときに成功となる (図 15 a)。これは、ポイントカーソルを用いた場合に、ターゲットの両端に見えない $W'/2$ の選択可能な領域があることと実質的に同じであり (図 15 b)、式 7 は式 8 のように修正されると考えられる。

$$ER = 1 - \left\{ \int_0^{W/2+W'/2} X(x) dx - \int_0^{-W/2-W'/2} X(x) dx \right\} \quad (8)$$

$$= 1 - \frac{1}{2} \left[\operatorname{erf} \left(\frac{W+W'}{2} - \frac{(c+dW)}{\sqrt{2(a+bA^2)}} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{-W+W'}{2} - \frac{(c+dW)}{\sqrt{2(a+bA^2)}} \right) \right]$$

このように提案モデルを修正することで、エリアカーソルを用いる場合においても、1 次サッカーボードエラー率を予測できる可能性がある。

7.2 頭部を固定しない場合

本実験では、顎台により頭部が固定されることで、ディスプレイから参加者の眼までの距離が約 60 cm に固定された。頭部が固定されず、ディスプレイから眼までの距離が変化するとき、対象の見かけの大きさが変化するため、同じ A , W でも異なるエラー率が観測されると考えられる。一方で、見かけの大きさは視角で表せるため、視角が同じときには予測が適用できると考えられる。例えば、本実験で用いたディスプレイにおいて、ディスプレイから眼までの距離が約 60 cm のとき、 A を 200 pixels, W を 40 pixels とすると、 A は視角約 5 度、 W は視角約 1 度であり、提案モデルによれば、49.6 % のエラー率を示した。ディスプレイから眼までの距離が約 90 cm のとき、 A を 297 pixels, W を 60 pixels であれば、 A は視角約 5 度、 W は視角約 1 度となり、ほとんど同じエラー率が観測されると考えられる。

頭部を固定しない場合、視角約 20 度までの距離を運動するサッカードは、ほとんど頭部の動きを伴わずに眼球運動のみで行われる [49]。一方で、これ以上の運動距離では視野内か外かに関わらず頭部の動きを伴うことが多く、頭部が固定された本実験とは異なる。したがって、より長い運動距離におけるモデルの検証は今後の課題である。

7.3 アイトラッキングの精度による影響

アイトラッキングの精度は、アイトラッカーの性能に加え、照明環境やユーザの目の特性など様々な要因に影響を受ける [33, 50]。1 次サッカードエラー率はアイトラッキングの精度に依存すると考えられるが、本研究では、アイトラッキングの精度がエラー率へ与える影響は検証していない。しかし、提案モデルはアイトラッキングの精度を表す定数 (a , c) を含んでおり、アイトラッキングの精度に大きく依存せずエラー率を予測できると考えている。

7.4 ターゲットの視覚的特徴による影響

本研究における仮説 **H3** では、 W の増加により μ が減少する傾向は、ターゲットの中心と手前側のエッジの間を一貫した比で狙っている可能性があるとしている。これは、サッカードの終点がターゲットのエッジに依存することを意味しており、先行研究 [51] と一致している。したがって、ぼやけているターゲットや背景と輝度が近いターゲットのような、エッジを認識しにくい状況では異なる効果が発生する可能性がある。しかし、このような視覚的特徴の変化により μ に対する W の影響が弱まる場合、定数 d が変化することで、提案モデルは適切にエラー率を予測できるはずである。したがって、モデルの適合に関して大きな影響はないと考えている。

7.5 ターゲットの位置把握による影響

本実験は、選択すべきターゲットのみが表示され、ターゲットの位置を事前に把握している前提のもとに行われている。人間の中心窩で対象を正確に視認できる範囲は視角約 1.1 度であり [52]、これ以上離れた位置の対象は正確に視認できない。したがって、例えば初めて訪問するウェブサイトにおいては、ユーザはまず、ボタンやアイコンを中心窩で捉えるためにウェブサイト上を探索する。これは、本実験とは異なる状況であるため、このときのボタンやアイコンなどに向かう 1 次サッカードエラー率は適切に予測できない可能性がある。一方で、何度も訪問したウェブサイトにおいては、選択したいボタンやアイコンなどの位置を把握している。また、前章で紹介した ActiGaze [46] では、選択したい小さいターゲットに対応する大きいターゲットが同じ色で固定された位置に配置されるため、大きいターゲットの位置を事前に把握できる。EyeGuitar [48] においても、ノーツに対応する判定枠の位置を事前に把握できるため、これらのインタフェースにおいては提案モデルが適用できると考えられる。

7.6 2 次元環境下への拡張

一般的な GUI は 2 次元であり、ターゲットは幅に加えて高さを持ち、サッカードの運動方向も水平のみではない。ターゲットの高さが小さければ、エラー率は増加し、また、運動方向によってもサッカードの精度が異なる [53]。より正確にエラー率を予測するためには、ターゲットの高さやサッカードの運動方向などの要因を考慮する必要がある。このとき、本研究の提案モデルを応用することでモデル化できる可能性がある。

8. 結論

本研究では、視線を用いた 1 次元のポインティングにおける 1 次サッカードエラー率のモデル化を行った。提案モデルは、条件 (A , W) をもとに、終点分布の正規性と、標準偏差、平均の変動の傾向から導出されており、実験の結果、高い適合度を示した。交差検証の結果、低い平均絶対誤差を示し、モデルは適切にエラー率を予測できると考えられる。また、提案モデルを用いることで、ターゲットの拡大による画面占有のデメリットと、1 次サッカードで到達しやすくなるメリットを考慮しつつ、既存の GUI を改善できる。

参考文献

- [1] Minakata, K., Hansen, J. P., MacKenzie, I. S., Bækggaard, P. and Rajanna, V.: Pointing by Gaze, Head, and Foot in a Head-Mounted Display, *Proceedings of the 11th ACM Symposium on Eye Tracking Research & Applications*, ETRA '19, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 1–9, DOI: 10.1145/3317956.3318150 (2019).
- [2] Ware, C. and Mikaelian, H. H.: An Evaluation of an Eye Tracker As a Device for Computer Input, *Proceedings of the SIGCHI/GI Conference on Human Factors in Computing Systems and Graphics Interface*, CHI '87, New York, NY, USA, ACM, pp. 183–188, DOI: 10.1145/29933.275627 (1987).
- [3] Sibert, L. E. and Jacob, R. J. K.: Evaluation of Eye Gaze Interaction, *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '00, New York, NY, USA, ACM, pp. 281–288, DOI: 10.1145/332040.332445 (2000).
- [4] Bahill, A., Clark, M. R. and Stark, L.: The main sequence, a tool for studying human eye movements, *Mathematical Biosciences*, Vol. 24, No. 3, pp. 191 – 204, DOI: 10.1016/0025-5564(75)90075-9 (1975).
- [5] Schuetz, I., Murdison, T. S., MacKenzie, K. J. and Zanolli, M.: An Explanation of Fitts' Law-like Performance in Gaze-Based Selection Tasks Using a Psychophysics Approach, *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '19, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 1–13, DOI: 10.1145/3290605.3300765 (2019).
- [6] Bi, X. and Zhai, S.: Predicting Finger-Touch Accuracy Based on the Dual Gaussian Distribution Model, *Proceedings of the 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 313–319, DOI: 10.1145/2984511.2984546 (2016).
- [7] Huang, J., Tian, F., Fan, X., Zhang, X. L. and Zhai, S.: Understanding the Uncertainty in 1D Unidirectional Moving Target Selection, *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '18, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 1–12, DOI: 10.1145/3173574.3173811 (2018).
- [8] Huang, J., Tian, F., Li, N. and Fan, X.: Modeling the Uncertainty in 2D Moving Target Selection, *Proceedings of the 32nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '19, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 1031–1043, DOI: 10.1145/3332165.3347880 (2019).
- [9] Huang, J., Tian, F., Fan, X., Tu, H., Zhang, H., Peng, X. and Wang, H.: Modeling the Endpoint Uncertainty in Crossing-Based Moving Target Selection, *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '20, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 1–12, DOI: 10.1145/3313831.3376336 (2020).
- [10] Lee, B. and Oulasvirta, A.: Modelling Error Rates in Temporal Pointing, *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '16, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 1857–1868, DOI: 10.1145/2858036.2858143 (2016).
- [11] Huang, J. and Lee, B.: Modeling Error Rates in Spatiotemporal Moving Target Selection, *Extended Abstracts of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '19, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 1–6, DOI: 10.1145/3290607.3313077 (2019).
- [12] Yu, D., Liang, H.-N., Lu, X., Fan, K. and Ens, B.: Modeling Endpoint Distribution of Pointing Selection Tasks in Virtual Reality Environments, *ACM Trans. Graph.*, Vol. 38, No. 6, DOI: 10.1145/3355089.3356544 (2019).
- [13] 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).
- [14] Wobbrock, J. O., Cutrell, E., Harada, S. and MacKenzie, I. S.: An Error Model for Pointing Based on Fitts' Law, *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '08, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 1613–1622, DOI: 10.1145/1357054.1357306 (2008).
- [15] Wobbrock, J. O., Jansen, A. and Shinohara, K.: Modeling and Predicting Pointing Errors in Two Dimensions, *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '11, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 1653–1656, DOI: 10.1145/1978942.1979183 (2011).
- [16] Welford, A. T.: The fundamentals of skill (1968).
- [17] Gan, K. and Hoffmann, E.: Geometrical conditions for ballistic and visually controlled movements, *Ergonomics*, Vol. 31, No. 5, pp. 829–839, DOI: 10.1080/00140138808966724 (1988).
- [18] Meyer, D., Abrams, R., Kornblum, S., Wright, C. and Smith, J.: Optimality in Human Motor Performance: Ideal Control of Rapid Aimed Movements, *Psychological review*, Vol. 95, pp. 340–370, DOI: 10.1037/0033-295X.95.3.340 (1988).
- [19] Park, E., Kim, H., Lee, I. and Lee, B.: Whether Moving or Not: Modeling and Predicting Error Rates in Pointing Regardless of Target Motion, *ArXiv*, Vol. abs/1806.02973 (2018).
- [20] Grossman, T. and Balakrishnan, R.: A Probabilistic Approach to Modeling Two-Dimensional Pointing, *ACM Trans. Comput.-Hum. Interact.*, Vol. 12, No. 3, pp. 435–459, DOI: 10.1145/1096737.1096741 (2005).
- [21] Grossman, T., Kong, N. and Balakrishnan, R.: Modeling Pointing at Targets of Arbitrary Shapes, *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '07, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 463–472, DOI: 10.1145/1240624.1240700 (2007).
- [22] Zhai, S., Kong, J. and Ren, X.: Speed-Accuracy Trade-off in Fitts' Law Tasks: On the Equivalency of Actual and Nominal Pointing Precision, *Int. J. Hum.-Comput. Stud.*, Vol. 61, No. 6, pp. 823–856, DOI: 10.1016/j.ijhcs.2004.09.007 (2004).
- [23] Schmidt, R., Zelaznik, H., Hawkins, B., Frank, J. and Quinn, J.: Motor-output variability: A theory for the accuracy of rapid motor acts, *Psychological review*, Vol. 47, pp. 415–51, DOI: 10.1037/0033-295X.86.5.415 (1979).
- [24] Howarth, C., Beggs, W. and Bowden, J.: The relationship between speed and accuracy of movement aimed at a target, *Acta Psychologica*, Vol. 35, No. 3, pp. 207 – 218, DOI: 10.1016/0001-6918(71)90022-9 (1971).
- [25] Beggs, W. and Howarth, C.: The accuracy of aiming at a target: Some further evidence for a theory of intermit-

- tent control, *Acta Psychologica*, Vol. 36, No. 3, pp. 171 – 177, DOI: 10.1016/0001-6918(72)90001-7 (1972).
- [26] Lin, J.-F., Drury, C., Karwan, M. and Paquet, V.: A General Model that Accounts for Fitts’ Law and Drury’s Model (2009).
- [27] Lin, R. and Drury, C.: Verification of Two Models of Ballistic Movements, Vol. 6762, pp. 275–284, DOI: 10.1007/978-3-642-21605-3_31 (2011).
- [28] Matin, E.: Saccadic suppression: A review and an analysis, *Psychological bulletin*, Vol. 81, pp. 899–917, DOI: 10.1037/h0037368 (1975).
- [29] Abrams, R., Meyer, D. and Kornblum, S.: Speed and Accuracy of Saccadic Eye Movements: Characteristics of Impulse Variability in the Oculomotor System, *Journal of experimental psychology. Human perception and performance*, Vol. 15, pp. 529–43, DOI: 10.1037/0096-1523.15.3.529 (1989).
- [30] Al-Aidroos, N., Fischer, M., Adam, J. and Pratt, J.: Structured Perceptual Arrays and the Modulation of Fitts’s Law: Examining Saccadic Eye Movements, *Journal of motor behavior*, Vol. 40, pp. 155–64, DOI: 10.3200/JMBR.40.2.155-164 (2008).
- [31] Dick, S., Ostendorf, F., Kraft, A. and Ploner, C.: Saccades to spatially extended targets: The role of eccentricity, *Neuroreport*, Vol. 15, pp. 453–6, DOI: 10.1097/00001756-200403010-00014 (2004).
- [32] Ploner, C., Ostendorf, F. and Dick, S.: Target Size Modulates Saccadic Eye Movements in Humans, *Behavioral neuroscience*, Vol. 118, pp. 237–42, DOI: 10.1037/0735-7044.118.1.237 (2004).
- [33] Feit, A. M., Williams, S., Toledo, A., Paradiso, A., Kulkarni, H., Kane, S. and Morris, M. R.: Toward Everyday Gaze Input: Accuracy and Precision of Eye Tracking and Implications for Design, *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI ’17, New York, NY, USA, ACM, pp. 1118–1130, DOI: 10.1145/3025453.3025599 (2017).
- [34] Becker, W. and Fuchs, A.: Further properties of the human saccadic system: Eye movements and correction saccades with and without visual fixation points, *Vision Research*, Vol. 9, No. 10, pp. 1247 – 1258, DOI: 10.1016/0042-6989(69)90112-6 (1969).
- [35] Prablanc, C., Massé, D. and Echallier, J.: Error-correcting mechanisms in large saccades, *Vision Research*, Vol. 18, No. 5, pp. 557 – 560, DOI: 10.1016/0042-6989(78)90202-X (1978).
- [36] Wu, C.-C., Kwon, O.-S. and Kowler, E.: Fitts’s Law and speed/accuracy trade-offs during sequences of saccades: Implications for strategies of saccadic planning, *Vision Research*, Vol. 50, No. 21, pp. 2142 – 2157, DOI: 10.1016/j.visres.2010.08.008 (2010).
- [37] Henson, D.: Corrective saccades: Effects of altering visual feedback, *Vision Research*, Vol. 18, No. 1, pp. 63 – 67, DOI: 10.1016/0042-6989(78)90078-0 (1978).
- [38] Weber, R. B. and Daroff, R. B.: The metrics of horizontal saccadic eye movements in normal humans, *Vision Research*, Vol. 11, No. 9, pp. 921 – 928, DOI: 10.1016/0042-6989(71)90212-4 (1971).
- [39] Robinson, D.: Models of the saccadic eye movement control system, *Kybernetik*, pp. 71–83, DOI: 10.1007/BF00288906 (1973).
- [40] Harris, C. M.: Does saccadic undershoot minimize saccadic flight-time? A Monte-Carlo study, *Vision Research*, Vol. 35, No. 5, pp. 691 – 701, DOI: 10.1016/0042-6989(94)00163-G (1995).
- [41] Collins, T.: Extraretinal signal metrics in multiple-saccade sequences, *Journal of vision*, Vol. 10, No. 7, pp. 1–14, DOI: 10.1167/10.14.7 (2010).
- [42] Tian, J., Ying, H. S. and Zee, D. S.: Revisiting corrective saccades: Role of visual feedback, *Vision Research*, Vol. 89, pp. 54 – 64, DOI: 10.1016/j.visres.2013.07.012 (2013).
- [43] Nayyar, A., Dwivedi, U., Ahuja, K., Rajput, N., Nagar, S. and Dey, K.: OptiDwell: Intelligent Adjustment of Dwell Click Time, *Proceedings of the 22Nd International Conference on Intelligent User Interfaces*, IUI ’17, New York, NY, USA, ACM, pp. 193–204, DOI: 10.1145/3025171.3025202 (2017).
- [44] Engbert, R. and Kliegl, R.: Microsaccades uncover the orientation of covert attention, *Vision Research*, Vol. 43, No. 9, pp. 1035 – 1045, DOI: 10.1016/S0042-6989(03)00084-1 (2003).
- [45] Nyström, M. and Holmqvist, K.: An adaptive algorithm for fixation, saccade, and glissade detection in eyetracking data, *Behavior research methods*, Vol. 42, pp. 188–204, DOI: 10.3758/BRM.42.1.188 (2010).
- [46] Lutteroth, C., Penkar, M. and Weber, G.: Gaze vs. Mouse: A Fast and Accurate Gaze-Only Click Alternative, *Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST ’15, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 385–394, DOI: 10.1145/2807442.2807461 (2015).
- [47] Kabbash, P. and Buxton, W. A. S.: The “Prince” Technique: Fitts’ Law and Selection Using Area Cursors, *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI ’95, USA, ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., pp. 273–279, DOI: 10.1145/223904.223939 (1995).
- [48] Vickers, S., Istance, H. and Smalley, M.: EyeGuitar: Making Rhythm Based Music Video Games Accessible Using Only Eye Movements, *Proceedings of the 7th International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology*, ACE ’10, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 36–39, DOI: 10.1145/1971630.1971641 (2010).
- [49] Sidenmark, L. and Gellersen, H.: Eye, Head and Torso Coordination During Gaze Shifts in Virtual Reality, *ACM Trans. Comput.-Hum. Interact.*, Vol. 27, No. 1, DOI: 10.1145/3361218 (2019).
- [50] Zhang, X., Sugano, Y. and Bulling, A.: Evaluation of Appearance-Based Methods and Implications for Gaze-Based Applications, *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI ’19, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 1–13, DOI: 10.1145/3290605.3300646 (2019).
- [51] Tandonnet, C. and Vitu, F.: Stimulus properties and saccade metrics: when local features are more critical than global features, *Behavioral neuroscience*, Vol. 127, pp. 121–125 (2013).
- [52] MacKenzie, I. S.: An Eye on Input: Research Challenges in Using the Eye for Computer Input Control, *Proceedings of the 2010 Symposium on Eye Tracking Research & Applications*, ETRA ’10, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 11–12, DOI: 10.1145/1743666.1743668 (2010).
- [53] Poletti, M., Intoy, J. and Rucci, M.: Accuracy and precision of small saccades, *Scientific Reports*, Vol. 10, No. 1, DOI: 10.1038/s41598-020-72432-6 (2020).