

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,a)} 薄羽 大樹^{1,b)} 宮下 芳明^{1,c)}

受付日 2021年4月16日, 採録日 2021年11月2日

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、1次のみで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は操作時間を増加させるため、1次サッカードのみでターゲットに到達しやすいことが望ましいと考えられる。本研究では、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次サッカードエラー率を予測できるモデルを提案する。1次サッカードエラー率とは、1次サッカードのみでターゲットに到達できない確率である。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、提案モデルに基づき、既存のインタフェースにおけるターゲットの大きさを修正する際に発生する1次サッカードエラー率を予測する例を示した。

キーワード: GUI, ポインティング, 視線, パフォーマンスモデル

Modeling Primary-saccade Error Rates in 1D Gaze-based Pointing

YUKI SHIMADA^{1,a)} HIROKI USUBA^{1,b)} HOMEI MIYASHITA^{1,c)}

Received: April 16, 2021, Accepted: November 2, 2021

Abstract: In gaze-based pointing, when a target is small, users cannot select it using only a primary-saccade. Consequently, secondary or higher saccades are performed. Performing secondary or higher saccades increases the movement time, and thus, it is desirable that users can easily reach the target using only the primary-saccade. In this paper, we propose a novel prediction model for the primary-saccade error rate in gaze-based pointing based on the distance to the target and the target width. Primary-saccade error rate means the probability that the users cannot reach the target using only the primary-saccade. To evaluate this model, we conduct an experiment in which participants perform a 1D gaze-based pointing task. Based on the result, our model shows a high adjusted R^2 and a low average MAE . In addition, we demonstrate an example of predicting the primary-saccade error rate based on our proposed model that occurs when modifying the target width on an existing interface.

Keywords: GUI, pointing, gaze, performance model

1. はじめに

安価な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。さらに、今日では、

Windows 10 における Eye Control^{*1}や Click2Speak^{*2}など、Graphical User Interface (GUI) における視線インタフェースが提供されている。GUI における操作の中でも、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) は重要な操作である。そのため、視線を用いたポインティングのユーザビリティの向上は重要で

¹ 明治大学
Meiji University, Nakano, Tokyo 164-8525, Japan

a) ukeyshima@gmail.com

b) m@mimorisuzu.co

c) homei@homei.com

*1 <https://support.microsoft.com/en-us/windows/eye-control-basics-in-windows-10-97d68837-b993-8462-1f9d-3c957117b1cf>

*2 <https://www.click2speak.net>

ある。

眼球運動では、基本的に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行動であり、サッカードとは、眼窩を目的の対象に移動するために行われ、最大視角速度 $900^\circ/\text{s}$ に達する [1] 高速な運動である。視線を用いたポインティングでは、Dwell-based Pointing [2] (一定時間、ターゲットを注視することで選択を行う手法) が主流である。このとき、選択のためにターゲットを注視する時間は Dwell Time と呼ばれる。Dwell-based Pointing では、サッカードによってカーソルを操作できるため、Dwell Time が短い場合、マウスを用いたポインティングに比べて高速に選択できる [3]。また、ターゲットが大きい場合には、1 次みのサッカードでカーソルがターゲットに到達できるため、高速に選択できる [4]。しかし、特にターゲットが小さい場合、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)) [4]。そのとき、2 次以上のサッカードと、サッカード間に発生する注視の分だけ操作時間が増加する。したがって、1 次サッカードのみでターゲットに到達できるようにすることは、視線を用いたポインティングのユーザビリティの向上につながる。しかし、ある程度離れた位置にあるターゲットに 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、他のコンテンツの表示領域が制限されてしまう。したがって、デザイナーが、1 次サッカードのみで

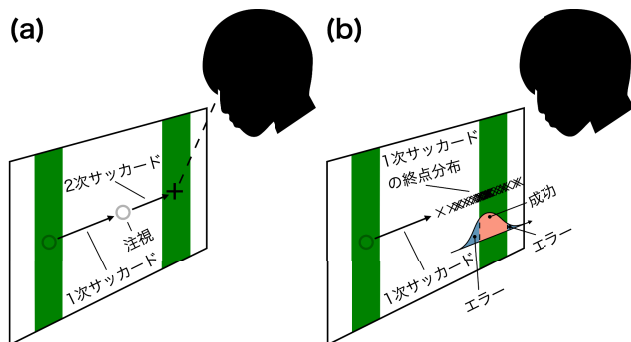


図 1 視線を用いたポインティングにおいて 1 次サッカードエラー率を予測できるモデルを提案する。(a) 1 次サッカードのみではターゲットに到達できず、2 次以上のサッカードが発生する場合がある。(b) 提案モデルは、ターゲットまでの距離とターゲットの大きさをもとに、1 次サッカードの終点分布から 1 次サッカードエラー率を予測する

Fig. 1 We proposed a novel prediction model for primary-saccade error rate in gaze-based pointing. (a) Users may not be able to reach the target using only primary-saccade, and secondary or higher saccades may be performed. (b) The proposed model can predict the primary-saccade error rate based on the distance to the target, the target width, and the primary-saccade endpoints.

到達しやすいターゲットを設計したい場合、これらのバランスを考慮しつつ、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率とは、1 次サッカードのみでターゲットに到達できない確率である。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、たとえば、ターゲットをある大きさに拡大した場合に減少する 1 次サッカードエラー率が分かる。つまり、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、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 つの仮説をたて、1 次サッカードエラー率のモデル化を行った。実験によってこれらの仮説がすべて支持されることを示し、提案モデル (式 (7)) は高い適合度 ($\text{adj. } R^2 = 0.978$) を示した。また、交差検証の結果、低い平均絶対誤差 5.37% を示したため、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。
- 1 次サッカードのみでターゲットに到達しやすくするために、提案モデルを用いて GUI を修正する例を示した。Windows 10 のタブレットモードにおいて Eye Control を用いたとき、本実験と同様の環境では、境界線を 20 pixels から 80 pixels に拡大すると、1 次サッカードエラー率が 75.2% から 22.6% に減少することを示した。

なお、本論文は国内会議 [5] で口頭発表した内容を、再分析の後にまとめたものである。

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 をもとにポインティングの操作時間を予測する。Wobbrock らは、Fitts' law に基づき、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 [17]。また、単一のサッ

カードはサッカード抑制 [18] と呼ばれる現象により、運動中に視覚フィードバックが得られず、弾道運動とされる。そのため、Fitts' law を適用することはできない [4]。したがって、Fitts' law に基づく Wobbrock らのモデルでは、1 次サッカードエラー率を予測できないと考えられる。

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従うことが仮定される [19], [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]。Schmidt らによれば、運動時間が減少するほど、もしくは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 は増加する [23]。また、Howarth 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 の増加の割合を表す係数である。

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 [26]。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 [27], [28]。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）傾向があることが知られている [28], [29]。

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 [30], [31]。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 [4], [32]。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 に従う [4]。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、低い操作時間を保てたため、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 [30], [33], [34]。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 [35] や、サッカード中の運動時間 [36] を節約するためであると考えられている。

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から 1 次サッカードエラー率 ER をモデル化する (式 (7))。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おける平均 μ 、および標準偏差 σ を、 A 、 W によって表し、提案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従う

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 [37], [38]。本研究ではこれらの研究にならない、1 次サッカードの終点分布は狙った位置を中心とした正規分布に従うと仮定する。

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 [27], [28]、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^{*3}の 2 乗を表し、 b は A^2 の増加に対する σ の増加の割合を表す係数である。

H3 : 終点分布の平均は $\mu = c - dW$ で表せる

H1 によると、サッカードの終点分布は正規分布に従う。そのため、ユーザがターゲットの中心を狙った場合には、終点分布の中心がターゲットの中心に近くなり、終点はおおよそターゲット内に位置すると考えられる。一方で、ターゲットの手前側のエッジを狙うと、終点分布の中心はターゲットの手前側に寄り、終点分布の片側の端がよりターゲット外になる。そのため、中心を狙う場合に比べて、エラー率は高くなると考えられる。

しかし、1 次サッカードはつねにターゲットの中心付近に着地するのではなく、ターゲットが大きくなるほど、ターゲットの手前側のエッジよりに着地する傾向 [28], [29] がある。この理由は、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 [36] による可能性があげられる。つまり、より大きいターゲットでは、運動時間を節約するために手前側のエッジをより狙う可能性がある。

すなわち、エラー率を低く保つためにはターゲットの中

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

心を狙わなくてはならないが、運動時間を節約するためにはターゲットの手前側を狙わなくてはならない。そのため、運動時間を節約しつつ、エラー率を低く保つため、ユーザは、ターゲットの中心と手前側のエッジをつねに内分する位置を狙っている可能性が考えられる。この仮定が成り立つ場合、 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^{*3}を表し、 d は W の増加に対する μ の減少の割合を表す係数である。

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)) に従うと仮定する (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。

$$ER = 1 - \left\{ \int_0^{W/2} X(x)dx - \int_0^{-W/2} X(x)dx \right\} \quad (5)$$

$$= 1 - \frac{1}{2} \left[\operatorname{erf} \left(\frac{W/2 - \mu}{\sigma\sqrt{2}} \right) - \operatorname{erf} \left(\frac{-W/2 - \mu}{\sigma\sqrt{2}} \right) \right]$$

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

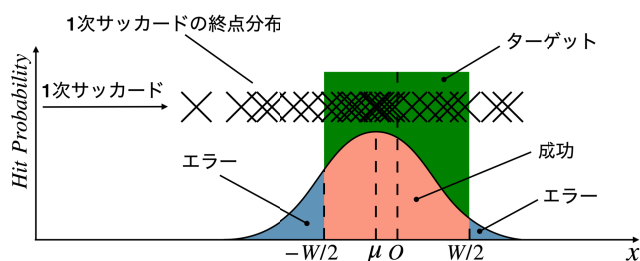


図 2 提案モデルの概要。青い領域は 1 次サッカードエラー、赤い領域は成功を意味する。提案モデルは、図中の青い領域の面積を計算することに相当する

Fig. 2 Proposed model outline. The blue region shows a primary-saccade error, and the red region shows that users succeed in performing pointing operations. The proposed model is formulated by calculating the area of the blue region.

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。

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

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) を使い、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, 1,920 × 1,080 pixels) およびキーボード (Realforce103U SE02B0) をつなぎ実験を行った (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

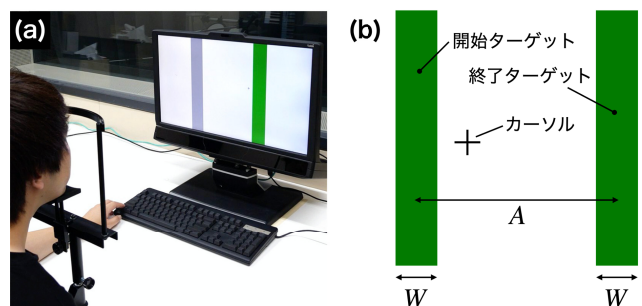


図 3 実験概要。(a) 実験参加者は、ディスプレイから約 60 cm 離れた顎台に顔を載せて実験を行った。(b) 開始ターゲットはつねに左、終了ターゲットはつねに右に表示された。ターゲット間の距離を A 、ターゲットの幅を W とした

Fig. 3 Experiment outline. (a) Participants sit at a distance of 0.6 m from the display, and their head is positioned on the chin rest. (b) Start and end areas are displayed on the left and right sides, respectively. A is the distance between the center of the start and end areas, and W is the area width.

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、うち 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、2,000 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 [39]。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、次の実験画面に移した。このとき、即座に次の実験画面に移行するため、終了ターゲットの色は変化しなかった。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° であり、 W はそれぞれ、視角 1.01, 2.02, 3.04, 4.05° 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 Man-

ager^{*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 [40] 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 [41] 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て分析した。また、タスク開始直後にも開始ターゲットを注視した際に生じるマイクロサッカード (注視時に生じる固視微動の一種) は終了ターゲットを狙ったサッカードではないと考えられる。そのため、マイクロサッカードを 1 次サッカードの分析から除外するために、最初に終点が $A/2$ を超えたサッカードを 1 次サッカードとして分析した^{*7} (図 4 左)。

5,649 試行のデータが得られ、うち 49 試行はやり直しが

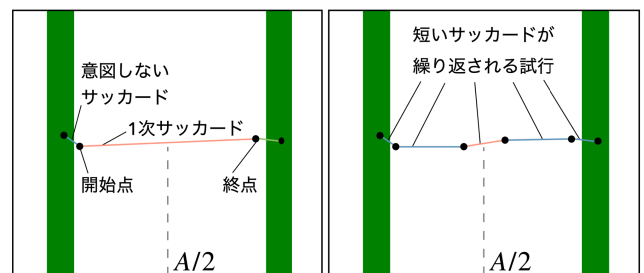


図 4 実験で得られたサッカードの概要。(左) 開始ターゲット付近で発生するマイクロサッカードは終了ターゲットを狙っていないと考えられるため、分析から除外した。そのため、終点が $A/2$ を最初に超えたサッカードを 1 次サッカードとして分析した。(右) 短いサッカードが繰り返された試行は外れ値として分析から除外した

Fig. 4 Saccade data outline obtained in the experiment. (Left) Because micro saccades that were performed near the start area are considered as non-targeting movements, we excluded them from the analysis. Therefore, we define a saccade the endpoint of which exceeds $A/2$ for the first time as the primary saccade. (Right) When the participants repeat the saccades with short distances, we exclude the trials as outliers.

^{*5} <https://www.tobiiipro.com/product-listing/eye-tracker-manager/>

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

^{*7} マイクロサッカードの振幅は視角約 1° (40 pixels) 以下で行われるため、 A が最も短い (200 pixels) ときにも、マイクロサッカードは $A/2$ を超えないと考えられる。一方で、1 次サッカードの定義によっては分析に影響が出る危険性があるため、7.2 節で、他の分析方法についても検証した。

^{*4} 1 名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。

行われたデータであった。やり直しを除外した 5,600 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、意図せず短いサッカードが繰り返された試行を分析から除外するために、各条件 ($A \times W$) ごとの 1 次サッカードの開始点と終点位置において、平均から標準偏差の 3 倍以上離れているデータ (それぞれ、106, 89 試行) を外れ値とした (図 4 右)。分析には、5,140 データ (91.8%) を用いた。

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、正規分布に従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。この結果により、**H1** は支持された。

5.2 A, 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

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 次サッカードの終点がターゲット外にある場合をエラーとし、1 次サッカードエラー率 ER を算出した。 μ, σ, ER の検定には、IBM SPSS を用いて A, W を独立変数とした繰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、Mauchly の球面性検定 ($\alpha = 0.05$) が棄却された場合、F 値は Greenhouse-Geisser 法によって記述される。また、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

$A (F_{3,39} = 31.6, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.709)$, W において主効果が見られた ($F_{3,39} = 3.90, p < 0.05, \eta_p^2 = 0.231$)。また、 $A \times W$ において交互作用は見られなかった ($F_{9,117} = 1.41, p = 0.192, \eta_p^2 = 0.0977$)。 A, W ごとに平均化された標準偏差 σ を図 5 左に示す。多重比較の結果、 A の増加に従って σ が増加する傾向が見られたが、 W におけるすべてのペア間で有意差は見られなかった。図 5 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 ($R^2 = 0.989$) 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 ($F_{1,31,17.0} = 0.424, p = 0.578, \eta_p^2 = 0.0316$)、 W において主効果が見られ

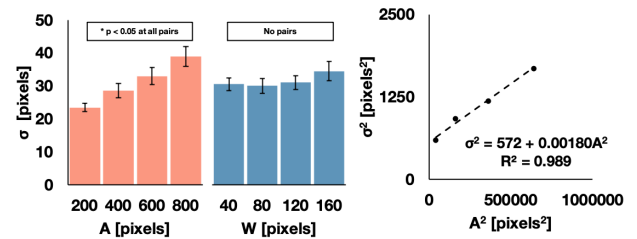


図 5 (左) 標準偏差 σ に対する A, W の影響. (右) 分散 σ^2 と A^2 の関係
Fig. 5 (Left) Effects of A and W on σ . (Right) Relationship between σ^2 and A^2 .

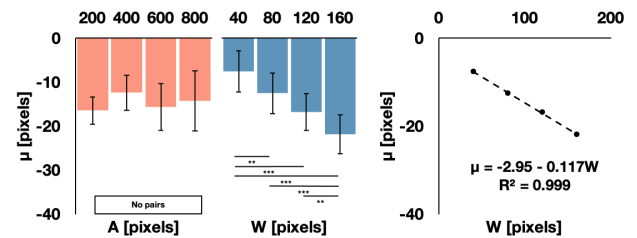


図 6 (左) 平均 μ に対する A, W の影響. (右) 平均 μ と W の関係
Fig. 6 (Left) Effects of A and W on μ . (Right) Relationship between μ and W .

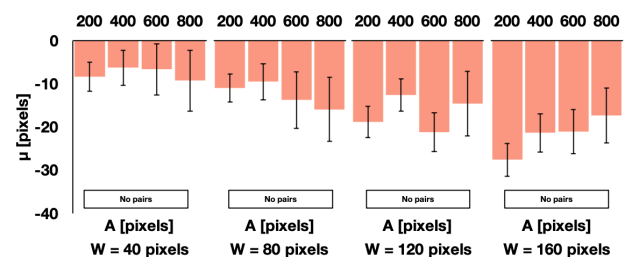


図 7 平均 μ に対する W ごと A の影響
Fig. 7 Effects of A on μ for each W .

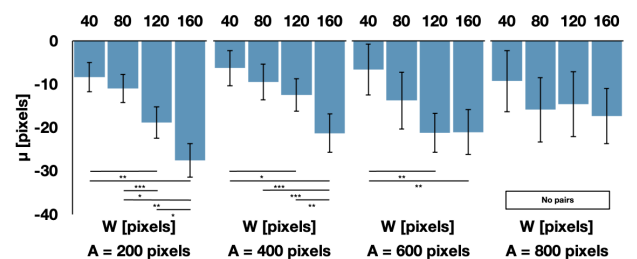


図 8 平均 μ に対する A ごと W の影響
Fig. 8 Effects of W on μ for each A .

た ($F_{3,39} = 41.4, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.761$)。 A, W ごとに平均化された平均 μ を図 6 左に示す。多重比較の結果、 A におけるすべてのペア間で有意差が見られず、 W の増加に従って 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 ($F_{9,117} = 2.90, p < 0.01, \eta_p^2 = 0.182$)。 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 7, 図 8 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

*8 先行研究 [7], [8], [9] にない最尤推定を用いた。

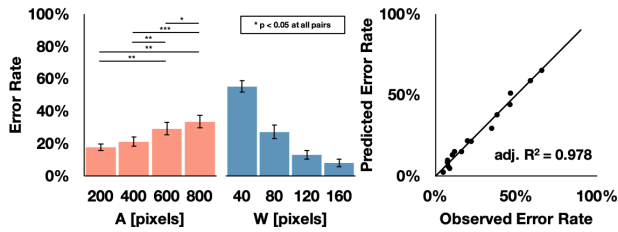


図 9 (左) 1次サッカーエラー率 ER に対する A , W の影響. (右) 1次サッカーエラー率 ER における観測値と、提案モデルによる予測値の関係

Fig. 9 (Left) Effects of A and W on ER . (Right) Relationship between observed and predicted ER .

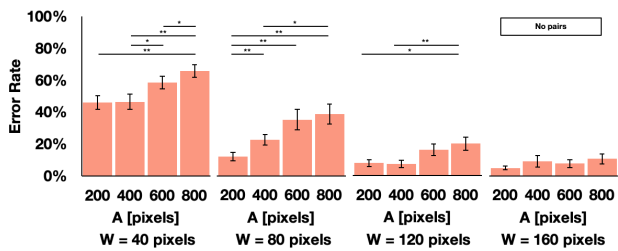


図 10 1次サッカーエラー率 ER に対する W ごと A の影響
Fig. 10 Effects of A on ER for each W .

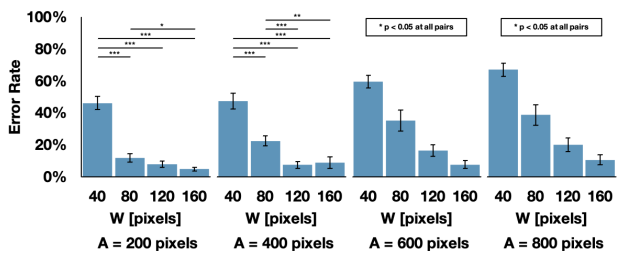


図 11 1次サッカーエラー率 ER に対する A ごと W の影響
Fig. 11 Effects of W on ER for each A .

かった。また、 A ごと W のペア間では、 W の増加に従い μ が減少する傾向が見られた。図 6 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 ($R^2 = 0.999$) 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 ($F_{1.59,20.7} = 23.0, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.638$), W において主効果が見られた ($F_{3,39} = 229, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.946$). A, W ごとに平均化された 1次サッカーエラー率 ER を図 9 左に示す。多重比較の結果、 A の増加に従って ER が増加し、 W の増加に従って ER が減少していた。また、 $A \times W$ において交互作用が見られた ($F_{9,117} = 4.57, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.260$). 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 10, 図 11 に示す。 W ごと A のペア間では、 A の増加に従い ER が増加し、 A ごと W のペア間では、 W の増加に従い 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、

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
Table 1 Estimated value and standard error for each parameter in the proposed model.

Parameter	Estimated value	Standard error
a	588	78.1
b	0.00214	0.000275
c	8.86	10.2
d	0.236	0.0757

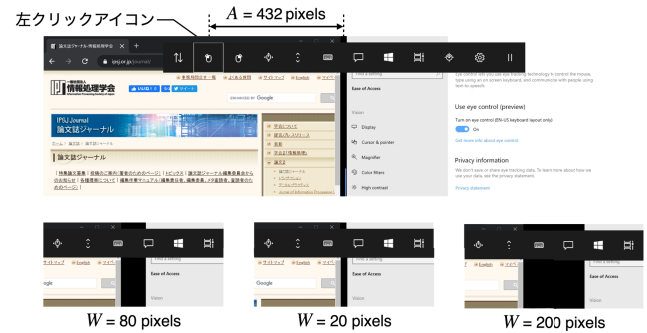


図 12 (上) Windows 10 のタブレットモードにおいて Eye Control を用いた図. (下) 境界線の幅を 20 pixels から 80, 200 pixels に拡大したときの図

Fig. 12 (Top) Eye Control on a tablet mode in Windows 10. (Bottom) An example of increasing the borderline width from 20 to 80 and 200 pixels.

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 9 右に示す。結果として、高い適合度 ($\text{adj. } R^2 = 0.978$) 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 回の繰返しにより、平均 $MAE = 5.37\%$ ($SD = 2.49\%$) が得られた。同様に交差検証を行っている先行研究 [7], [8], [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。

6. インタフェースデザインへの適用例

1次サッカーのみでターゲットに到達しやすくするためにインタフェースを修正する際に、提案モデルを用いて、発生する 1次サッカーエラー率を予測する例を紹介する。図 12 (上) は Windows 10 のタブレットモードにおいて Eye Control を用いた例を示している。中央の黒線は左右のウィンドウをリサイズするための境界線であり、上部のアイコン群は Eye Control のインタフェースである。Eye Control を用いて境界線を選択するためには、ユーザはまず左クリックアイコンを選択し、続いて境界線を選択す

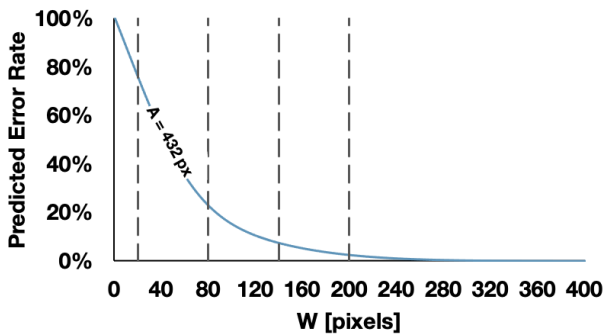


図 13 提案モデルによって予測された 1 次サッカードエラー率に対する W の影響. 破線は, $W = 20, 80, 140, 200$ pixels を示す

Fig. 13 Effects of W on predicted primary-saccade error rate. The dashed lines show $W = 20, 80, 140, \text{ or } 200$ pixels.

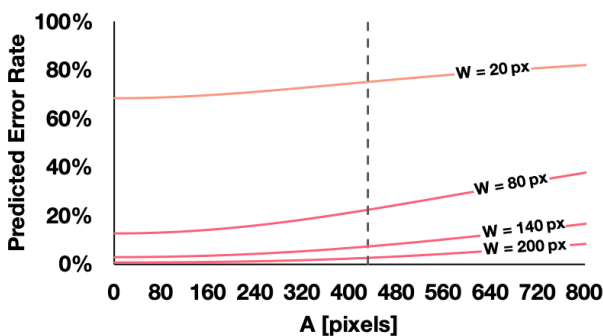


図 14 提案モデルによって予測された 1 次サッカードエラー率に対する A の影響. 破線は, $A = 432$ pixels を示す

Fig. 14 Effects of A on predicted primary-saccade error rate. The dashed lines show $A = 432$ pixels.

る. この例では, 左クリックアイコンから境界線までの距離 A は約 432 pixels, 境界線の幅 W は約 20 pixels である. 本実験条件と同じく, ディスプレイからユーザの眼までの距離が 60 cm の場合, A, W はそれぞれ視角 $10.9^\circ, 0.51^\circ$ である. 提案モデルによれば, この条件下では, 1 次サッカードエラー率は 75.2% を示すことが分かった (図 13, 図 14). ここで, 可能な限り 1 次サッカードエラー率を減少させたい場合, W を 200 pixels (視角 5.06°) 程度まで拡大すれば, 1 次サッカードエラー率は 2.48% まで減少する (図 13, 図 14). しかし, 200 pixels の W は非常に大きく, ディスプレイの表示領域を制限する (図 12 下) ため, ユーザにとって好ましくない可能性がある. また, Schuetz らの実験では, ターゲットサイズが視角約 3° (本研究では, 120 pixels に該当) 以上ではほとんど 1 次サッカードのみで選択でき, ほぼ一定の低い操作時間を保てる [4]. そのため, 視角約 3° 以上のターゲットサイズの増加は, あまり 1 次サッカードエラー率を減少できず, 操作時間も減少できない. 本研究と Schuetz らとは, ターゲットの形状やターゲットまでの距離の実験条件が異なるため, 同様とは限らないが, Schuetz らとの実験条件の違いを考慮しても, 200 pixels の W は大きすぎると考えられる.

提案モデルによれば, W が約 80 pixels (視角 2.02°) 以上するとき, W を増加することによる 1 次サッカードエラー率の減少が小さいことが分かる (図 13). たとえば, W を 20 pixels から 80 pixels まで増加させた場合, 1 次サッカードエラー率は 52.7% 減少するが, 同様に 60 pixels 増加させ, 80 pixels から 140 pixels (視角 3.54°) まで増加させた場合, 15.2% 減少する. つまり, この例では, W が約 80 pixels 以上では, 約 80 pixels 以下のときよりも, W を増加させる (すなわち, より画面を占有する) ことでの 1 次サッカードエラー率を減少するメリットが低く, 一考の余地があることが分かる. このように, 提案モデルを用いた予測により, デザイナがインタフェースをデザインする際に, W を増加することによって 1 次サッカードエラー率を減少できるメリットと, 画面を占有してしまうデメリットを事前に考慮することができる.

7. 制約と展望

7.1 1 次サッカードエラー率の許容範囲

Schuetz らの実験では, ターゲットサイズが視角約 3° 以上ではほとんど 1 次サッカードのみで選択でき, ほぼ一定の低い操作時間を保てる [4]. すなわち, 1 次サッカードエラー率は極端に低くしなくても, ある基準値よりも低ければ, 低い操作時間を保つことができると考えられる. したがって, 適切な基準値を見つけ出せれば, 適切な (画面を過剰に占有せず, 低い操作時間で選択できる) 大きさを持つターゲットをデザインできるはずである. この適切な基準値を調査することは, 今後の課題である.

7.2 分析方法による影響

本研究では, 終点が最初に $A/2$ を超えたサッカードを 1 次サッカードとして分析した. しかし, 先行研究では, (1) 最初に発生した 20-100 ms の運動時間を持つサッカード [4], (2) 最初にターゲットの中心から視角 2.5° 以内の領域に着地したサッカード [42], を 1 次サッカードとしていた. これらの方法を用いたときの提案モデルの適合度を分析した. 結果として, (1) では, $\text{adj. } R^2 = 0.980$, 平均 $MAE = 6.05\%$ ($SD = 2.85$), (2) では, $\text{adj. } R^2 = 0.980$, 平均 $MAE = 5.28\%$ ($SD = 2.53$) が得られた. したがって, 1 次サッカードの分析方法を変更しても, 提案モデルは提案モデルは高い適合を示した.

7.3 頭部を固定しない場合

本研究では, 顎台により参加者の顔が固定された状態で実験が行われた. 頭部の固定にかかわらず, 視角約 20° 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とまわずに眼球運動のみで行われる [43]. したがって, この条件下では, 提案モデルは適切に 1 次サッカードエラー率を予測できると考えられる. 一方で, これ以上の運

動距離では頭部の動きをとまなうことが多く、頭部が固定された本実験とは状況が異なる。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。

7.4 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 W に加えて高さ H を持ち、サッカー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の精度が異なる [44]。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修正することで 2次元環境下のエラー率もモデル化できると考えている。

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。さらに、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次サッカーで到達しやすくなるメリットを考慮しつつ、インタフェースを設計することができる。

参考文献

- [1] 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).
- [2] Ware, C. and Mikaelian, H.H.: An Evaluation of an Eye Tracker As a Device for Computer Input, *Proc. SIGCHI/GI Conference on Human Factors in Computing Systems and Graphics Interface, CHI '87*, pp.183–188, ACM, DOI: 10.1145/29933.275627 (1987).
- [3] Sibert, L.E. and Jacob, R.J.K.: Evaluation of Eye Gaze Interaction, *Proc. SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '00*, pp.281–288, ACM, DOI: 10.1145/332040.332445 (2000).
- [4] Schuetz, I., Murdison, T.S., MacKenzie, K.J. and Zannoli, M.: An Explanation of Fitts' Law-like Performance in Gaze-Based Selection Tasks Using a Psychophysics Approach, *Proc. 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '19*, pp.1–13, Association for Computing Machinery, DOI: 10.1145/3290605.3300765 (2019).
- [5] 島田雄輝, 薄羽大樹, 宮下芳明: 視線を用いた 1次元ポインティングにおける 1次サッカーエラー率のモデル化, *インタラクティブ 2021 論文集*, pp.31–40 (2021).
- [6] Bi, X. and Zhai, S.: Predicting Finger-Touch Accuracy Based on the Dual Gaussian Distribution Model, *Proc. 29th Annual Symposium on User Interface Software and Technology*, pp.313–319, Association for Computing Machinery, 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, *Proc. 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '18*, pp.1–12, Association for Computing Machinery, DOI: 10.1145/3173574.3173811 (2018).
- [8] Huang, J., Tian, F., Li, N. and Fan, X.: Modeling the Uncertainty in 2D Moving Target Selection, *Proc. 32nd Annual ACM, Symposium on User Interface Software and Technology, UIST '19*, pp.1031–1043, Association for Computing Machinery, 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, *Proc. 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '20*, pp.1–12, Association for Computing Machinery, DOI: 10.1145/3313831.3376336 (2020).
- [10] Lee, B. and Oulasvirta, A.: Modelling Error Rates in Temporal Pointing, *Proc. 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '16*, pp.1857–1868, Association for Computing Machinery, 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*, pp.1–6, Association for Computing Machinery, 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, pp.1–13, 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, *Proc. SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '08*, pp.1613–1622, Association for Computing Machinery, DOI: 10.1145/1357054.1357306 (2008).
- [15] Wobbrock, J.O., Jansen, A. and Shinohara, K.: Modeling and Predicting Pointing Errors in Two Dimensions, *Proc. SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '11*, pp.1653–1656, Association for Computing Machinery, 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] Matin, E.: Saccadic suppression: A review and an analysis, *Psychological Bulletin*, Vol.81, pp.899–917, DOI: 10.1037/h0037368 (1975).
- [19] 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).
- [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, *Proc. SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '07*, pp.463–472, Association for Computing Machinery, 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.415–451, 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 intermittent control, *Acta Psychologica*, Vol.36, No.3, pp.171–177, DOI: 10.1016/0001-6918(72)90001-7 (1972).
- [26] 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.529–543, DOI: 10.1037/0096-1523.15.3.529 (1989).
- [27] 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.155–164, DOI: 10.3200/JMBR.40.2.155-164 (2008).
- [28] Dick, S., Ostendorf, F., Kraft, A. and Ploner, C.: Saccades to spatially extended targets: The role of eccentricity, *Neuroreport*, Vol.15, pp.453–456, DOI: 10.1097/00001756-200403010-00014 (2004).
- [29] Ploner, C., Ostendorf, F. and Dick, S.: Target Size Modulates Saccadic Eye Movements in Humans, *Behavioral Neuroscience*, Vol.118, pp.237–242, DOI: 10.1037/0735-7044.118.1.237 (2004).
- [30] 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).
- [31] Prablanc, C., Massé, D. and Echallier, J.F.: Error-correcting mechanisms in large saccades, *Vision Research*, Vol.18, No.5, pp.557–560, DOI: 10.1016/0042-6989(78)90202-X (1978).
- [32] 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).
- [33] 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).
- [34] 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).
- [35] Robinson, D.: Models of the saccadic eye movement control system, *Kybernetik*, pp.71–83, DOI: 10.1007/BF00288906 (1973).
- [36] 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).
- [37] 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).
- [38] 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).
- [39] Nayyar, A., Dwivedi, U., Ahuja, K., Rajput, N., Nagar, S. and Dey, K.: OptiDwell: Intelligent Adjustment of Dwell Click Time, *Proc. 22nd International Conference on Intelligent User Interfaces, IUI '17*, pp.193–204, ACM, DOI: 10.1145/3025171.3025202 (2017).
- [40] 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).
- [41] 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).
- [42] Ohl, S., Brandt, S.A. and Kliegl, R.: Secondary (micro-) saccades: The influence of primary saccade end point and target eccentricity on the process of postsaccadic fixation, *Vision Research*, Vol.51, No.23, pp.2340–2347, DOI: 10.1016/j.visres.2011.09.005 (2011).
- [43] 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).
- [44] Poletti, M., Intoy, J. and Rucci, M.: Accuracy and precision of small saccades, *Scientific Reports*, Vol.10, No.1, pp.1–13, DOI: 10.1038/s41598-020-72432-6 (2020).



島田 雄輝 (正会員)

2020年度に明治大学大学院で修士号(数理科学)を取得。2021年度からteamLab株式会社に所属、現在に至る。



薄羽 大樹 (学生会員)

2018年度に明治大学大学院で修士号(理学)を取得。2019年度から同大学院博士後期課程に所属、現在に至る。



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で博士号 (知識科学) 取得, 優秀修了者賞, 2007年 明治大学理工学部に着任. 2009年 准教授. 2013年 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. 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.