

MAGIC Pointing の操作時間予測モデル

島田 雄輝¹ 薄羽 大樹¹ 宮下 芳明¹

概要: MAGIC Pointing は注視位置にカーソルをワープさせ、その後手動入力デバイスによりカーソルを動かすことで、速い移動と正確なポインティングを可能とする。ポインティングの操作時間は Fitts' Law によって予測可能であるが、MAGIC Pointing は Fitts' Law には適合しないことが知られている。本研究では、Fitts' Law, Two-Part Model, Zhang らのモデルを比較し、MAGIC Pointing の操作時間を最も正確に予測するモデルは Zhang らのモデルであることを示した。この結果より、MAGIC Pointing を用いたインタフェースを設計する際、未知の条件下において、従来のポインティング手法と MAGIC Pointing の操作時間を比較することが可能になった。

1. はじめに

視線推定技術の発展により、アイトラッカーは低価格化の傾向にある。また、スマートフォンや HMD (Head Mounted Display) にもアイトラッカーは搭載され、視線推定は様々なデバイスで一般に利用可能となっている。そのため、視線を用いて GUI (Graphical User Interface) 上を操作する研究は広く行われており、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) は視線を用いることで様々な利点があると考えられる。視線を用いたポインティングでは、高速な眼球運動を利用できるため、速い操作時間が期待できる [1, 2]。また、操作時間はポインティング手法の有用性を測る重要な指標の 1 つであり、より速く操作できることが望ましい。

視線を用いる代表的なポインティング手法として、滞留ベースの手法がある [3]。これは、一定時間ターゲットを注視することでターゲットの選択を行う手法であり、視線のみで行える利点がある。したがって、視線以外の入力を行えない状況や、ALS (Amyotrophic Lateral Sclerosis) 患者などの手を動かせないユーザでも用いることができる。また、滞留時間が 150 ms のとき、マウスよりも速く操作可能である [2]。しかし、滞留ベースのポインティングには様々な問題が挙げられる。第 1 に、視線は常にジッター (固視微動によって生じる視線の不意な動き) を伴うため、小さいターゲットを選択することは難しい。第 2 に、設定した滞留時間が短いと、選択するつもりのないターゲットを誤って選択してしまう問題 (Midas Touch) が生じる [4]。これらの問題から、手を用いられるユーザにとって、滞留

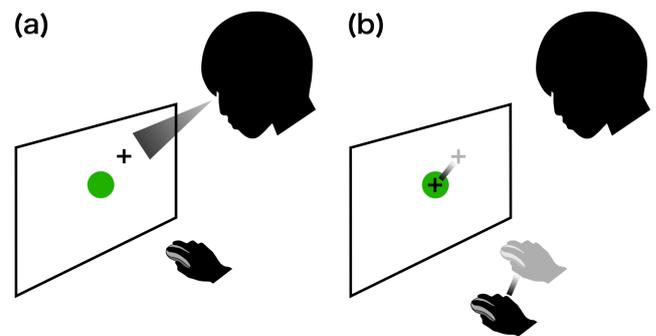


図 1 MAGIC Pointing 概要図: (a) まず、注視位置にカーソルをワープさせる。(b) 次に、手動でカーソルを操作する。

ベースのポインティングよりも、マウスなどの入力デバイスを用いたカーソル操作によってターゲットの選択を行うことが望ましい。

Zhai らが提案した MAGIC Pointing (以下、MAGIC) は、視線入力と手動入力を用いたポインティング手法である [1]。カーソルを注視位置にワープさせ、そこから手動入力デバイス (例えば、マウス) を用いてカーソルを動かす、クリックによってターゲットの選択を行う (図 1)。手動入力デバイスのみを用いて選択を行うことで、ジッターや Midas Touch といった滞留ベースのポインティングにおける問題は発生しない。また、眼球は手よりも速く運動できるため、高速なカーソル移動が期待される。そのため、マウスのみを用いたポインティングに比べ、大型ディスプレイなどのカーソルの移動距離が長い状況では、MAGIC は速く操作できる [5]。

ポインティングの操作時間は、ターゲットまでの距離とターゲット幅を用いて Fitts' Law [6] で予測できる。Fitts' Law によれば、速い操作時間のためには、ターゲットまで

¹ 明治大学

の距離を短くする、もしくは、ターゲット幅を大きくする必要がある。また Fitts' Law は、複数のポインティング手法において、未知の条件下で操作時間を比較する際にも用いられる [7]。MAGIC もポインティング手法の 1 つであるが、MAGIC は Fitts' Law への適合度が低いことが知られている [1]。

Fitts' Law 以外にもポインティングの操作時間予測モデルは存在する。Two-Part Model は、例えば、大型ディスプレイにおけるレーザーポインタのポインティング [8]、Zhang らが提案したモデルは、滞留ベースのポインティングに高い適合度を示す [9]。これらのモデルは高速な運動の後に低速な運動が行われるポインティングを対象としている。また、これらのモデルが MAGIC へ適合するかは検証されていないが、MAGIC の運動とモデルが対象とする運動は似ているため、MAGIC へ適合すると考えられ、Fitts' Law にかわるモデルとして利用できる可能性がある。本研究では、Fitts' Law、Two-Part Model、および Zhang らのモデルを比較し、MAGIC の操作時間を最も正確に予測するモデルを明らかにする。

2. 関連研究

2.1 ポインティングモデル

Fitts' Law は、ポインティングの操作時間を MT とし、ターゲットまでの距離 A とターゲット幅 W を用いて、式 1 で表される [6]。

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

a , b は回帰分析によって得られる定数である。また対数項は ID (Index of Difficulty) と呼ばれ、ポインティングタスクの難易度を表す。Fitts' Law は Card らによって GUI 上のポインティングに用いられ [7]、マウスやスタイラス、トラックボールなど、様々なデバイスにおいて適合することが知られている [10]。

Fitts' Law は、 MT に対する A と W の寄与が等しいことを表す。つまり、 A と W が等しく変化した場合、予測される MT には変化はない。それに対し、Two-Part Model は、 MT に対する A と W の独立した寄与を表すモデルである (式 2)。

$$MT = a + b_1 \log_2(A) - b_2 \log_2(W) \quad (2)$$

b_1 , b_2 は回帰分析によって得られる定数である。また式 2 では、 b_1 は、ターゲットに近づくための高速な運動、 b_2 は、ターゲットを正確に捕らえるための低速な運動に関係する係数である [11]。前者の運動は、視覚フィードバックに基づく運動方向の修正が行われず、Ballistic Movement と呼ばれる。後者の運動は、視覚フィードバックに基づく運動方向の修正が行われることから、Visually Controled

Movement と呼ばれる。式 2 は、ポインティングをこれらの運動の連続とみなし、それぞれの運動を区別したモデルであると言える。Graham の実験では、特定のゲイン (入力デバイスの動きと GUI 上のカーソルの動きの比) において、Fitts' Law よりも Two-Part Model (式 2) がより高い適合度を示すことが知られている [11]。

Shoemaker らは式 1, 2 に基づき、式 3 を提案した [8]。

$$MT = a + b_1 \log_2(A + W) - b_2 \log_2(W) \quad (3)$$

また、式 3 は式 4 のように変形できる。

$$MT = a + b \log_2 \left(\frac{A + W}{W^k} \right) \quad (4)$$

k は回帰分析によって得られる定数であり、ゲインに対して線形に変化する。 $k = 1$ のときに式 4 は式 1 と同じ式になる。 $k > 1$ では MT に対する W の寄与が A の寄与よりも高いことを、 $k < 1$ ではその反対を表す。

Zhang らは、滞留ベースのポインティングの操作時間予測モデル (式 5) を提案した [9]。

$$MT = a + b \frac{e^{\lambda A}}{W - \mu} \quad (5)$$

λ は回帰分析によって得られる定数であり、 μ は滞留ベースのポインティングの際に可能な最小ターゲット幅を表す。分数項は ID_{eye} として、視線を用いたポインティングにおける難易度として利用できると述べられている。また、カーソルが最初にターゲットに到達するまでの時間 (EMT) は、 $\mu = 0$ と考えられるため、式 6 で表せる。

$$EMT = a + b \frac{e^{\lambda A}}{W} \quad (6)$$

Zhang らはさらに、実験結果より、 $\lambda = 0.0005$ とし、式 5, 6 は分数項に係数 2000 を含めた式 7, 8 で表せるとした。

$$MT = a + b \times 2000 \frac{e^{0.0005A}}{W - \mu} \quad (7)$$

$$EMT = a + b \times 2000 \frac{e^{0.0005A}}{W} \quad (8)$$

2.2 MAGIC Pointing を用いたインタフェース

MAGIC のアプローチは、視線でカーソルの大まかな位置決めを行い、手動入力デバイスで細かい補正動作を行うことである。Zhai らは、Liberal と Conservative の 2 手法の MAGIC を提案した [1]。Liberal は常に注視位置にカーソルをワープさせる手法であり、Conservative はマウスを動かした瞬間に注視位置にカーソルをワープさせる手法である。実験の結果、Conservative は Liberal よりも遅く、実験参加者に好まれなかった。しかし、Conservative は Liberal よりも気を散らさないという意見もあり、Zhai らは

Conservative の改善が重要だと述べている。Conservative では、カーソルをワープさせたときにはすでにマウスが動いているため、マウスを用いた補正動作が難しく、ターゲットをオーバーシュート（カーソルがターゲットを通り過ぎること）しやすかった。また、不意な手の動きにより、意図しないワープも発生する可能性があった。後の研究では、Conservative におけるトリガを他に置き換えることで、これらの問題を解決した。MAGIC Touch では、マウスに電極を取り付け、マウスに触れた瞬間をトリガとした [12]。MAGIC Button では、右クリックをトリガとすることで、移動するターゲットの選択において、従来の Conservative よりも速い操作時間と低いエラー率を達成している [13]。

MAGIC は、視角 79 度 × 40 度の大型ディスプレイにおいて、マウスのみを用いたポインティングよりも有意に速いことが示されている [5]。MAGIC は、マウスのみを用いるよりも、カーソルをディスプレイ上で見失わないことも示されている [12]。マウスのみを用いた場合、複雑な背景では、カーソルを見つけるためにカーソルを掻き回すような動作が必要である。しかし、MAGIC は注視位置にカーソルがワープするため、そのような動作は必要ない。そのため、白背景の場合、マウスのみを用いたポインティングと MAGIC に操作時間の差はないが、複雑な背景の場合、MAGIC が有意に速かった [12]。視線と頭の動きを用いた MAGIC も提案されている。Kurauchi らは、頭の動きのみを用いる手法と比較したとき、視角 11 度、視角 19 度の距離において、平均移動速度は MAGIC が有意に速いことを示した [14]。Jalaliniya らは、頭の動きのみを用いる手法と比較したとき、視角 2.0 度の距離では MAGIC が遅く、視角 5.6 度の距離では MAGIC が速いことを示した [15]。また、タブレット端末において、間接入力手法として MAGIC を用いたとき、ユーザ調査によって、使いやすさや学びやすさのスコアが高いことが示された [16]。

3. リサーチクエスチョン

MAGIC は、視線と手動入力デバイスによるカーソル操作で構成される。視線によるカーソル操作はサッカード（高速な眼球運動）で行われる。サッカードは最大 900 度/s の速度に達する [17] ため、視覚フィードバックを用いた運動方向の修正は不可能であり、Ballistic Movement であると考えられる。手動入力デバイスによる操作は、ターゲットの周辺のみで行われ、サッカードに比べ非常に低速であり、Visually Controlled Movement であると考えられる。したがって、MAGIC は Two-Part Model が対象とする運動であると考えられる。

また、式 6 は、滞留ベースのポインティングにおいて、カーソルをターゲットに到達させるまでの運動に適合する。このような運動では、ターゲット幅が大きい場合、複数のサッカードが発生する [18]。サッカード間には注視

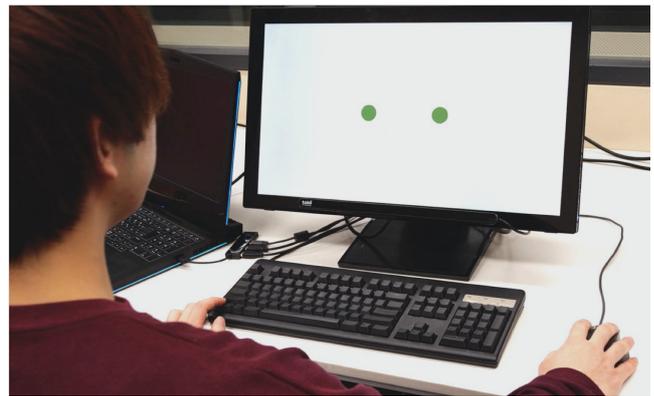


図 2 実験環境。

が発生し、2 次以上のサッカードは、1 次のサッカードでカーソルがターゲットに到達しなかった場合の修正運動として行われる。したがって、個々のサッカードは Ballistic Movement であるが、1 次のサッカードが終了した後の運動は、視覚フィードバックに基づく Visually Controlled Movement であると考えられる。つまり、サッカードによる Ballistic Movement の後に Visually Controlled Movement が行われるという点で、式 6 の対象とする運動と MAGIC は同じであると考えられる。

これらから、MAGIC の操作時間は Two-Part Model、および式 6 に適合すると考えられる。本稿では、これらのモデルに加え、Fitts' Law を比較し、MAGIC の操作時間を最も正確に予測できるモデルを明らかにする。以降、式 4 を「Two-Part Model」、式 6 を「Zhang et al's Model」とする。

4. 実験

4.1 実験環境

PC は ALIENWARE 17 R4 (Intel Core i7-7700HQ, 2.80 GHz, 8.00 GB RAM, Windows 10 Home) であり、外部ディスプレイ (ProLite T2336MSC, 509.18 × 286.41 mm, 1920 × 1080 pixels) にアイトラッカー (Tobii 4C, Sampling rate = 90HZ), およびマウス (Naos QG, 1000 dpi), キーボード (Realforce103U SE02B0) を取り付けて実験を行った (図 2)。実験プログラムは Unity で作成され、フルスクリーンで表示された。計測値は 60 FPS で記録された。実験参加者はディスプレイの左右中央に着席し、ディスプレイ中央から顔までの距離は約 50 cm であった。実験中はなるべく顔を動かさないこと、およびクラッチ (操作中にマウスを浮かすこと) を行わないことを指示した。

4.2 実験参加者

19 歳–26 歳の 20 名 (14 名が男性, 6 名が女性) が参加した。ただし、2 名はキャリブレーションの時点で実験を

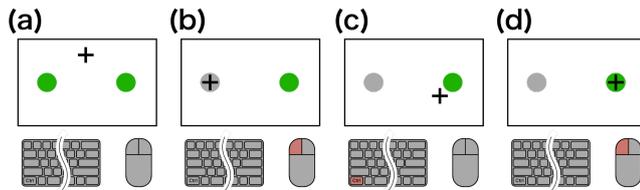


図 3 実験タスク手順：(a) 常に視線位置にカーソルが表示される。(b) 開始ターゲットにカーソルをあわせ、クリックする。(c) 終了ターゲットを注視し、Ctrl キーを押すことでカーソルを注視位置にワープする。(d) マウスでカーソルを操作し、終了ターゲットとカーソルをあわせ、クリックする。

中断したため、分析には 18 名（13 名が男性、5 名が女性）分のデータを用いた。7 名が裸眼であり、6 名が眼鏡、5 名がコンタクトレンズを装着していた。

4.3 実験タスク

実験参加者は開始ターゲットから終了ターゲットをポインティングするタスクを行った（図 3）。開始ターゲットは左、終了ターゲットは右に表示され、それぞれ緑色の円形であった。カーソルは 30 pixels (7.96 mm) の十字カーソルであった。開始ターゲットをクリックした時点から終了ターゲットをクリックするまでの時間を計測し、それを操作時間 MT とした。終了ターゲット外をクリックした場合はエラーとし、その試行をやり直させた。

開始ターゲットをクリックするまでは、カーソルは常に視線位置に表示され、マウスを用いたカーソル操作は無効とした（図 3 a）。視線でカーソルを開始ターゲットにあわせ、クリックするとカーソルはその位置に留まった（図 3 b）。その際に開始ターゲットが灰色になると同時に、開始音が鳴った。Ctrl キーを押すことで注視位置にワープした（図 3 c）。その後はマウスを用いたカーソル操作が可能であり、クリックで試行は終了した（図 3 d）。終了ターゲットをクリックしたときに成功音が鳴り、終了ターゲット外をクリックした場合はエラー音が鳴った。

本実験では、開始ターゲットをクリックし、Ctrl キーを押して、終了ターゲットをクリックする試行のみを扱った。したがって、開始ターゲットをクリックした後、Ctrl キーを押さずにクリックした場合、Ctrl キーが 2 度押された場合は、その試行をやり直させた。それらの試行は本来の MAGIC の操作とは異なるため、エラーとは扱わず、分析データには含まなかった。つまり、終了ターゲットの選択ミスのみをエラーとして扱った。

4.4 実験デザイン

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 は 4 条件であり、200, 450, 700, 950 pixels (53.04, 119.34, 185.64, 251.94 mm) であった。開始ターゲット、および終了ターゲットの直径 W は 7 条件であり、33, 49,

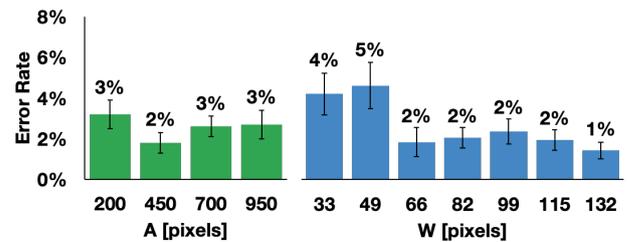


図 4 エラー率に対する A , W の影響。

66, 82, 99, 115, 132 pixels (8.75, 12.99, 17.50, 21.75, 26.25, 30.50, 35.01 mm) であった。画面と参加者が 50 cm 離れているとき、 A は視角 6.07, 13.61, 21.63, 28.28 度、 W は視角 1.00, 1.49, 2.01, 2.49, 3.01, 3.49, 4.01 度であった。

4.5 実験手順

最初にアイトラッキングソフトウェア搭載の視線位置推定のキャリブレーションを行い、練習を 1 セット ($4A \times 7W = 28$)、本番を 10 セット行わせた。セット内の A と W の出現順序はランダムであった。5 セットごとに 1 分間の休憩が設けられた。実験中に参加者が視線位置推定が不正確であることを訴えた場合は、キャリブレーションをやり直させた。参加者 1 名につき、実験時間は 30 分であった。

5. 結果

5277 試行のデータが計測され、そのうち 88 試行は本来の MAGIC の操作と異なるとして、データから除外した。5189 試行のデータのうち、76 試行^{*1}を外れ値として除外した（つまり、5113 試行を実験データとした）。以下では、繰り返しのある分散分析で分析し、多重比較には Bonferroni 法を用いた。独立変数は A , W であり、従属変数はエラー率、 MT であった。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。全ての分析には IBM SPSS を用いた。

5.1 エラー率

5113 試行中、エラーは 147 試行であり、約 3% であった。 A において主効果は見られなかった ($F_{3,51} = 1.55$, $p = 0.213$, $\eta_p^2 = 0.0836$)。 W において主効果が見られた ($F_{6,102} = 3.80$, $p < 0.01$, $\eta_p^2 = 0.183$)。多重比較の結果は図 4 のとおりである。また、 $A \times W$ の交互作用は見られなかった ($F_{18,306} = 0.877$, $p = 0.608$, $\eta_p^2 = 0.049$)。

5.2 操作時間 MT

エラーを除いた 4966 試行のデータを用いて分析を行っ

*1 各条件における平均 MT から $3SD$ 離れたデータを外れ値とした [19]。

表 1 Fitts' Law, Two-Part Model, および Zhang et al's Model における MT の推定パラメータ, モデル適合度, および AIC . [min, max] は 95 % 信頼区間において, 推定パラメータの下限値と上限値を表す.

Model	Equation	a	b	k or λ	adj. R^2	AIC
Fitts' Law	$a + b \log_2 \left(\frac{A}{W} + 1 \right)$	629.2 [489.6, 769.0]	143.92 [99.005, 188.84]		0.635	345
Two-Part Model	$a + b \log_2 \left(\frac{A+W}{W^k} \right)$	1966 [1718, 2214]	91.891 [58.500, 125.28]	3.77 [2.39, 5.15]	0.941	296
Zhang et al's Model	$a + b \frac{e^{\lambda A}}{W}$	746.2 [731.5, 760.9]	15560 [14487, 16632]	0.000494 [0.000423, 0.000565]	0.991	244

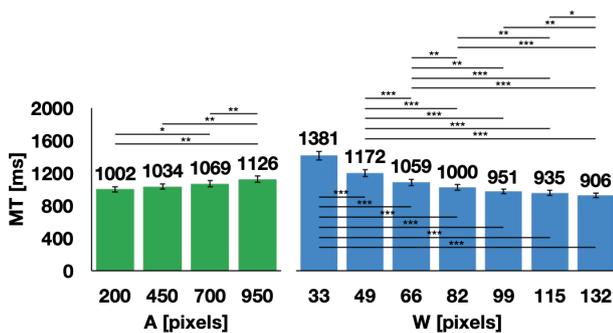


図 5 MT に対する A , W の影響.

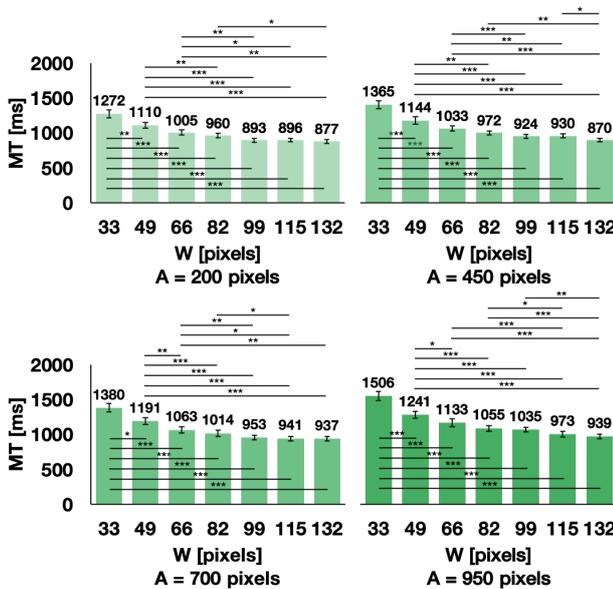


図 6 MT に対する $A \times W$ の影響.

た. A において主効果が見られた ($F_{3,51} = 18.0, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.514$). W において主効果が見られた ($F_{6,102} = 107, p < 0.001, \eta_p^2 = 0.863$). 多重比較の結果は図 5 のとおりである. また, $A \times W$ において交互作用が見られた ($F_{18,306} = 1.99, p < 0.05, \eta_p^2 = 0.105$, 図 6).

5.3 モデル適合

Fitts' Law, Two-Part Model, Zhang et al's Model への適合を検証した. 各モデルにおいて, 推定パラメータ数

が異なるため, adjusted R^2 (adj. R^2) に加え, AIC (赤池情報量基準) を用いて分析した. 良いモデルは高い adj. R^2 と低い AIC を示す. また AIC の差が 2 以上であればその差は考慮に値し, 10 以上であれば低い AIC を示すモデルが十分に良いとされる [20]. 表 1 に示されるように, Zhang et al's Model が最も良いモデルであった.

6. 議論

予測精度が最も良いモデルは Zhang et al's Model であった. Zhang らは, 式 6 は $\lambda = 0.0005$ とし, 分数項に係数 2000 を含めた式 8 で表せるとした. 本実験において λ を回帰分析の定数として推定したところ, $\lambda = 0.000494$ であり, Zhang らの $\lambda = 0.0005$ と近い結果となった (表 1). したがって, 式 8 の検証を行ったところ, adj. $R^2 = 0.991, AIC = 243$ であり, 式 6 と同じ adj. R^2 , およびより低い AIC を示した (表 2). しかし, 表 2 に示す通り, 式 8 は, 式 6 に比べ, adj. R^2 および, AIC は単位に大きく依存する. デバイスの解像度によってはピクセルに対応する実寸は変わり, デバイスまでの距離によって視角も変わる. モデルはこれらの異なる環境下でも適合することが求められるため, 単位に依存しないことが望ましい. 結論として, モデルに式 8 を用いるべきではなく, 式 6 を用いるべきである.

7. 制約と展望

7.1 Zhang et al's Model の適用範囲

Fitts' Law において, a は $ID = 0$ のときの MT を表す. ID は $A = 0$, もしくは $W = \infty$ のときに 0 となる. 対して, ID_{eye} は $A = 0$ のときには 0 とならず, $W = \infty$ のときに 0 となる. しかし, $W = \infty$ を仮定すると, Zhang et al's Model が MAGIC の操作時間を適切に予測できていないと考えられる. $W = \infty$ のとき, MT は Ctrl キーを押す時間 + クリックする時間であると考えられる. この時間は, Keystroke-Level Model [21] を用いて予測できる. Keystroke-Level Model は, キーを押す時間やクリック時間を K , これらを準備するための時間を M として, それぞれ 200 ms, 135 ms としている. したがって, Keystroke-Level Model を用いてこの時間を求めると, $M + K + K = 175$

表 2 式 6, 式 8 における単位 (pixels, mm, 視角) ごとの MT の推定パラメータ, モデル適合度, および AIC .

Equation	Unit	a	b	λ	adj. R^2	AIC
$a + b \frac{e^{\lambda A}}{W}$	pixels	746.2 [731.5, 760.9]	15560 [14487, 16632]	0.000494 [0.000423, 0.000565]	0.991	244
	mm	746.3 [731.6, 760.9]	4124.8 [3840.3, 4409.2]	0.00186 [0.00160, 0.00213]	0.991	245
	degrees	746.9 [732.3, 761.6]	469.35 [436.58, 502.11]	0.0167 [0.0143, 0.0191]	0.990	245
$a + b \times 2000 \frac{e^{0.0005A}}{W}$	pixels	746.5 [732.4, 760.7]	7.7435 [7.4315, 8.0555]		0.991	243
	mm	740.5 [705.3, 775.6]	2.6094 [2.3511, 2.8676]		0.945	294
	degrees	746.0 [701.0, 791.0]	0.31444 [0.27388, 0.35501]		0.911	307

ms である。それに比べ、本実験において予測された MT は $a = 746$ ms であり、Keystroke-Level Model によって予測された時間とは異なる。

また、本実験では、開始ターゲット、終了ターゲットは画面中央から均等に配置されていた。しかし、アイトラッカーの精度は画面中央から端に向かうにつれて悪くなることが知られている [22]。そのため、本実験においては、ターゲット周辺のアイトラッカーの精度は A に依存する。Ctrl キーを押した際のカーソルのエンドポイントはアイトラッカーの精度に依存すると考えられるため、その後のマウスを用いたカーソル操作の操作時間も同様に、アイトラッカーの精度に依存すると考えられる。それにより、例えば終了ターゲットの位置を固定して A を変化させた場合、本実験とは異なる A の影響が観察される可能性がある。しかし、サッカードによる Ballistic Movement の後に Visually Controlled Movement が行われるという点では変わらないため、モデルへの適合に対して、大きな影響はないと考えている。

7.2 MAGIC の幅と高さが異なるターゲットのポインティングモデル

一般的な GUI において、ターゲットは幅 W に加え、高さ H が存在するが、Fitts' Law は W のみを考慮した式である。したがって、幅と高さが異なるターゲットにおいてより正確な操作時間の予測のために、Accot らによって W と H を考慮した式 9 が提案されている [23]。

$$MT = a + b \log_2 \left(\sqrt{\left(\frac{A}{W}\right)^2 + \eta \left(\frac{A}{H}\right)^2} + 1 \right) \quad (9)$$

η は回帰分析により得られる定数である。

これと同様に、Zhang らは式 6 を式 10 のように拡張している [24]。

$$EMT = a + b e^{\lambda A} \sqrt{\frac{\omega}{W^2} + \frac{1-\omega}{H^2}} \quad (10)$$

ω は回帰分析により得られる定数である。

本実験では幅と高さが等しい円形のターゲットを用いて実験を行い、式 6 へ適合することがわかった。幅と高さが異なるターゲットを用いたときのモデルは未検証であるが、式 6 を拡張した式 10 に適合する可能性は高いと考えられる。

8. 結論

本研究では、Fitts' Law, Two-Part Model, Zhang et al's Model を比較し、MAGIC Pointing の操作時間を最も正確に予測するモデルを明らかにした。結果として、Zhang et al's Model が最も良い適合 ($\text{adj. } R^2 = 0.991$, $AIC = 244$) を示した。この結果から、MAGIC Pointing を用いたインタフェースを設計する際、未知の条件下において、従来のポインティング手法と MAGIC Pointing の操作時間を比較し、適切なポインティング手法を選択できる。また、Zhang et al's Model から、MAGIC Pointing の操作時間はターゲットまでの距離よりも、ターゲット幅に影響を受けることがわかる。したがって、MAGIC Pointing において操作時間を速くするためには、ターゲットの幅を大きくするよりもターゲットまでの距離を短くすることが効果的である。

参考文献

- [1] Zhai, S., Morimoto, C. and Ihde, S.: Manual and Gaze Input Cascaded (MAGIC) Pointing, *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '99, New York, NY, USA, ACM, pp. 246–253 (online), DOI: 10.1145/302979.303053 (1999).
- [2] 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 (online), DOI: 10.1145/332040.332445 (2000).
- [3] 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 (online), DOI: 10.1145/29933.275627 (1987).
- [4] Jacob, R. J. K.: The Use of Eye Movements in Human-computer Interaction Techniques: What You Look at is What You Get, *ACM Trans. Inf. Syst.*, Vol. 9, No. 2, pp. 152–169 (online), DOI: 10.1145/123078.128728 (1991).
- [5] Lischke, L., Schwind, V., Friedrich, K., Schmidt, A. and Henze, N.: MAGIC-Pointing on Large High-Resolution Displays, *Proceedings of the 2016 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '16, New York, NY, USA, ACM, pp. 1706–1712 (online), DOI: 10.1145/2851581.2892479 (2016).
- [6] Scott MacKenzie, I.: A Note on the Information-Theoretic Basis for Fitts' Law, *Journal of Motor Behavior*, Vol. 21, pp. 323–330 (online), DOI: 10.1080/00222895.1989.10735486 (1989).
- [7] Card, S. K., English, W. K. and Burr, B. J.: Evaluation of Mouse, Rate-Controlled Isometric Joystick, Step Keys, and Text Keys, for Text Selection on a CRT, *Human-Computer Interaction: A Multidisciplinary Approach*, San Francisco, CA, USA, Morgan Kaufmann Publishers Inc., pp. 386–392 (1987).
- [8] Shoemaker, G., Tsukitani, T., Kitamura, Y. and Booth, K. S.: Two-Part Models Capture the Impact of Gain on Pointing Performance, *ACM Trans. Comput.-Hum. Interact.*, Vol. 19, No. 4 (online), DOI: 10.1145/2395131.2395135 (2012).
- [9] Zhang, X., Ren, X. and Zha, H.: Modeling Dwell-based Eye Pointing Target Acquisition, *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '10, New York, NY, USA, ACM, pp. 2083–2092 (online), DOI: 10.1145/1753326.1753645 (2010).
- [10] MacKenzie, I. S., Sellen, A. and Buxton, W. A. S.: A Comparison of Input Devices in Element Pointing and Dragging Tasks, *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 161–166 (online), DOI: 10.1145/108844.108868 (1991).
- [11] Graham, E. D.: Pointing on a Computer Display, PhD Thesis, CAN (1996).
- [12] Drewes, H. and Schmidt, A.: The MAGIC Touch: Combining MAGIC-Pointing with a Touch-Sensitive Mouse, *Proceedings of the 12th IFIP TC 13 International Conference on Human-Computer Interaction: Part II, INTERACT '09*, Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, pp. 415–428 (online), DOI: 10.1007/978-3-642-03658-3_46 (2009).
- [13] Hild, J., Gill, D. and Beyerer, J.: Comparing Mouse and MAGIC Pointing for Moving Target Acquisition, *Proceedings of the Symposium on Eye Tracking Research and Applications*, ETRA '14, New York, NY, USA, ACM, pp. 131–134 (online), DOI: 10.1145/2578153.2578172 (2014).
- [14] Kurauchi, A., Feng, W., Morimoto, C. and Betke, M.: HMAGIC: Head Movement and Gaze Input Cascaded Pointing, *Proceedings of the 8th ACM International Conference on Pervasive Technologies Related to Assistive Environments*, PETRA '15, New York, NY, USA, ACM, pp. 47:1–47:4 (online), DOI: 10.1145/2769493.2769550 (2015).
- [15] Jalaliniya, S., Mardanbegi, D. and Pederson, T.: MAGIC Pointing for Eyewear Computers, *Proceedings of the 2015 ACM International Symposium on Wearable Computers*, ISWC '15, New York, NY, USA, ACM, pp. 155–158 (online), DOI: 10.1145/2802083.2802094 (2015).
- [16] Pfeuffer, K., Alexander, J., Chong, M. K., Zhang, Y. and Gellersen, H.: Gaze-Shifting: Direct-Indirect Input with Pen and Touch Modulated by Gaze, *Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on User Interface Software Technology*, UIST '15, New York, NY, USA, ACM, pp. 373–383 (online), DOI: 10.1145/2807442.2807460 (2015).
- [17] 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 (online), DOI: [https://doi.org/10.1016/0025-5564\(75\)90075-9](https://doi.org/10.1016/0025-5564(75)90075-9) (1975).
- [18] Schuetz, I., Murdison, T. S., MacKenzie, K. J. and Zanolini, 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, ACM, pp. 535:1–535:13 (online), DOI: 10.1145/3290605.3300765 (2019).
- [19] Soukoreff, R. W. and MacKenzie, I. S.: Towards a Standard for Pointing Device Evaluation, Perspectives on 27 Years of Fitts' Law Research in HCI, *Int. J. Hum.-Comput. Stud.*, Vol. 61, No. 6, pp. 751–789 (online), DOI: 10.1016/j.ijhcs.2004.09.001 (2004).
- [20] Strawderman, R.: Model Selection and Inference: A Practical Information-Theoretic Approach by Kenneth P. Burnham; David R. Anderson, *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 95 (2000).
- [21] Card, S. K., Moran, T. P. and Newell, A.: The Keystroke-Level Model for User Performance Time with Interactive Systems, *Commun. ACM*, Vol. 23, No. 7, pp. 396–410 (online), DOI: 10.1145/358886.358895 (1980).
- [22] 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 (online), DOI: 10.1145/3025453.3025599 (2017).
- [23] Accot, J. and Zhai, S.: Refining Fitts' Law Models for Bivariate Pointing, *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 193–200 (online), DOI: 10.1145/642611.642646 (2003).
- [24] Zhang, X., Feng, W. and Zha, H.: Modeling Dwell-Based Eye Pointing at Two-Dimensional Targets, *CHI '12 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, New York, NY, USA, Association for Computing Machinery, pp. 1751–1756 (online), DOI: 10.1145/2212776.2223704 (2012).