

ドローン操縦におけるポインティングの評価

山田 開斗¹ 薄羽 大樹¹ 宮下 芳明¹

概要: ドローンを操縦する場合、例えば、ドローンレースでは、トンネルを潜り抜けるような操縦が要求される。また、ドローンを用いた写真撮影では、ドローンを特定の場所まで運び、カメラの画角に被写体を取める必要がある。これらの操縦には、ポインティング、ステアリング、クロッシングが含まれていると考えられる。本稿では、ドローンの操縦とポインティングに焦点を当て、ポインティングの要因であるターゲットまでの距離とターゲット幅がドローン操縦に影響を及ぼすかを調査し、フィッツの法則についても検証した。その結果、ターゲットまでの距離とターゲット幅がドローンの操縦時間とエラー率に影響を与えることが示された。また、フィッツの法則への高い適合度は示されなかったが、さらなる検証のための実験設計を示した。

1. はじめに

ドローンを操縦する場合、状況によって様々な操縦が要求される。例えば、図1のように、ドローンレース^{*1}では、トンネルを潜り抜けるような操縦が要求される。また、ドローンを用いた写真撮影では、ドローンを特定の場所まで運び、カメラの画角に被写体を取める必要がある。ドローンによる映像制作も行われており、「Onnanocos」× Micro Drone^{*2}という作品では、人の手で作られたトンネルを潜り抜けるなどの操縦をしながら動画撮影をしている。

ドローンレースのトンネルを潜り抜ける操縦は、決められた幅で作られた経路内を通過する必要がある。ドローンによる写真撮影は、決められた大きさの被写体が画角に入る位置まで運ばなければならない。また、ドローンによる映像制作の椅子を潜り抜ける操縦は、決められた幅で作られた枠を通過しなければならない。つまり、これらの操縦にはポインティング、ステアリング、クロッシングの操作が含まれていると考えられる。

本稿では、ポインティング、ステアリング、クロッシングのうち、第一段階として、ポインティングを取り上げ、ポインティングの要因がドローン操縦にどのように影響を及ぼすかを調査する。調査結果をもとに、より良いドローン操縦手法・インタフェースの指針を示せると考えている。また、ポインティングのモデル化であるフィッツの法則 [1] についても検証する。



図1 ドローンの使用例（上から、ドローンレースのコース、ドローンによる写真撮影、ドローンによる映像制作）

¹ 明治大学
Meiji University

^{*1} <https://youtu.be/FgKZLk7pYrY>

^{*2} <https://youtu.be/MI2tgUKK3Ds>

2. 関連研究

2.1 ドローン操縦

これまで、ドローンの操縦手法・インタフェースを探索する研究は、数多く行われている。Hallらは、2種類のドローンを使い、ドローンを直接見て操縦する手法、タブレットに映るドローンからの映像を見て操縦する手法、ヘッドセットでドローンからの映像を見て操縦する手法の3つの手法のうち、どの操縦手法が最も速く写真を撮るタスクを達成できるかについて調査している [2]。また、Hansenらは、ドローンを操縦する時、目の動きとコントローラの2つの操作手法を組み合わせて、どの組み合わせが最適かという調査を行った [3]。

Choらは、ユーザの感じるドローンの方向と実際のドローンの方向が異なる事に関して議論しており [4]、Kasaharaらは、この問題を解決するために、タッチスクリーンデバイスの画面に映るドローンを触ることで操縦できる手法を提案した [5]。Gomesらは、ドローンをタッチ・ドラッグし操作する Bitdrones を提案した [6]。

Zollmannらは、遠距離でのドローン操縦において、ドローンの実際の高さや位置が正確に把握できない問題をARにより解決する手法を提案している [7]。Eratらは、狭い場所では、一人称視点のドローン操縦は困難であると述べており、ホロレンズを用いた三人称視点ドローン操縦手法を提案している [8]。Hedayatiらは、ドローンの視野をARで可視化する操作インタフェースを提案し、遠隔操作における衝突が減少したと述べている [9]。

本研究の目的はドローン操縦にどのような要因が影響するかを示すことであり、本研究の実験結果は今後の操縦手法の指針になると考えている。

2.2 操作のモデル化・性能評価

GUIにおいて、距離 D だけ離れたサイズ W のターゲットをクリックするまでの操作時間 MT (Movement Time) は、フィッツの法則 [1] により以下のように表される。

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

式1の対数項はポインティングの難易度を示すもので、 ID (Index of Difficulty) と呼ばれる。距離が離れるか、もしくはターゲットサイズが小さくなると ID の値が大きくなるため、 MT が大きくなるのがわかる。

これまで、ポインティングで用いられる多くの入力デバイスの性能評価が行われてきた。Cardらは、マウスやジョイスティックなどの性能について議論している [10]。Ramcharitarらは、ゲームコントローラの性能比較を行っている [11]。本研究の焦点はこれまで評価されてきたコントローラやジョイスティック自体ではなく、コントローラ

を含めたドローンの操縦である。

Montazerらはミシンにおける直線縫いがステアリングの法則 [12] によってモデル化できることを示しており [13]、Reedらは2人で操作する機械がフィッツの法則に適合することを示している [14]。Druryらはフォークリフトの運転がモデル化できることを示している [15]。Stormsらは、遠隔のロボットの運転をモデル化するための難易度指標を提示し、ロボットが2つの障害物の隙間を通過するモデルの指針を示した [16]。このように、GUI以外にも、フィッツの法則やステアリングの法則を用いた前例はあるため、ドローンの操縦についてもフィッツの法則を適用できると考えられる。

3. 実験

実験の目的は、GUIのポインティングの要素（ターゲットまでの距離 D とターゲット幅 W ）がドローンの操縦にどのような影響を与えるかを検証することである。そのため、GUIのポインティングタスクと同様、図2のように、ドローンをターゲットまで飛行させる実験を行う。以下に詳細を述べる。

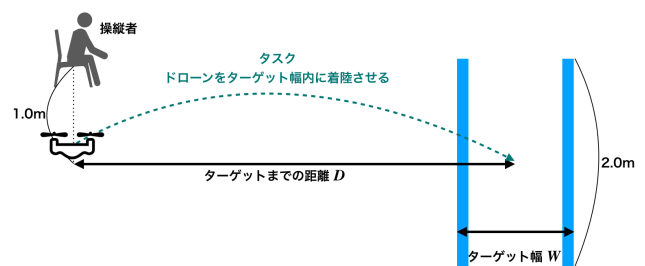


図2 実験概要



図3 実験に使用したドローンとコントローラ

3.1 実験環境

実験は、縦6.0m、横2.5mの障害物の無いスペースが確保できる屋内で、空調をオフにし、気流の影響を受けない環境で行った。使用したドローンは、CCPプログラミングテトラル (60.0×60.0×36.0mm)*³で、付属の専用コントローラを使用した (図3)。ドローンの速度は、コントローラ

*³ <http://ccp-jp.com/toy/products/item/262/>

ラのスティックの2軸で制御される。また、ドローンには上限の速度が3段階あり、最速の設定で操縦させた。

3.2 実験参加者

実験参加者は大学生及び大学院生の12名(男性9名,女性3名,平均22.3歳, $SD = 1.03$ 歳)である。実験参加者のうち6名はドローン操縦経験はほとんどなく,5名は著者らによる以前の実験で1時間ほど操縦したことがあり,1名は合計6時間程の操縦経験があった。

3.3 タスク

実験参加者は,図2のように,スタート地点からドローンを離陸させ,テープで示された幅内に着陸させるタスクを行う。この時,テープも幅内に含むとした。テープの長さは2mとし,十分な長さであることを確認した。また,参加者ごとの身長差の影響を減らすため,スタート地点から1.0mの椅子に座らせ操縦させた。図4が実際の実験の様子である。

実験参加者には,速く正確に,ドローンの中心部分を幅内に着陸させてほしいと伝え,速いと思う経路であれば,どの経路で幅内まで飛行しても良いと説明した。この実験では,ドローンが着陸し停止した時,ドローンの中心部分が幅内から外れればエラーとした。

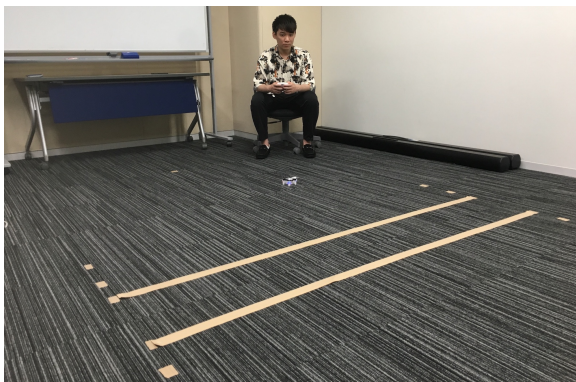


図4 実験の様子

3.4 実験デザイン

ターゲット幅 W は 0.4, 0.7, 1.1 m, ターゲットまでの距離 D は 2.0, 4.0 m, ID は 1.49-3.46 bits であった。1セットは $W(3) \times D(2) = 6$ 試行であり,順序効果を考慮するため,ラテン方格法による実験順序で実験を行った。

3.5 手順

まず,参加者は,ドローンの操縦に慣れるため,自由に5-10分間ドローンを操縦する時間が与えられた。次に,ドローン操縦におけるポインティングタスクに慣れるため,本番と同様の条件順序で,それぞれ5回成功するまで操縦

させた。本番では,その条件を再度3回練習し,その後,実験データとして10回タスクを行った。つまりは,それぞれの参加者は各セットを10回行い,全体では, $W(3) \times D(2) \times 10$ セット $\times 12$ 人 = 720 回のデータが集計された。それぞれの参加者が実験に要した時間は40-60分であった。

また,予備実験で,慣れにより実験後半の操縦時間が速くなることがわかっていたため,今回は,この学習効果を消すために練習を増やした。

3.6 計測するデータ

ドローンがスタート地点を離陸してから,ターゲット幅内に着陸し停止するまでの操縦時間 MT , エラー率を記録する。 MT は,実験を録画した動画より計測した。

4. 結果

独立変数を W (3水準)と D (2水準),従属変数を MT とエラー率とし,分散分析を行なった。その後の検定にはBonferroni法を用いた。グラフ中のエラーバーは標準誤差を示す。実験全体のエラー回数は,57回(7.8%)であった。

4.1 D と W の MT への影響

$W(F_{2,22} = 6.34, p < 0.01)$ でも, $D(F_{1,11} = 71.86, p < 0.01)$ でも,有意に MT への影響があることが示された。多重比較の結果, D が大きくなるほど,また W が小さくなるほど ($W=0.7$ m と $W=1.1$ m では $p > 0.10$, それ以外は $p < 0.05$) MT が増加した(図5)。

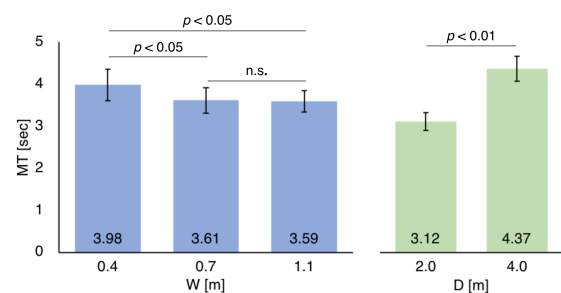


図5 D と W の MT への影響

4.2 エラー率

$W(F_{2,22} = 10.10, p < 0.01)$ でも, $D(F_{1,11} = 16.57, p < 0.01)$ でも,エラー率に有意差があることが示された(図6)。また,多重比較の結果, D が大きくなるほど ($p < 0.01$), W が小さくなるほど ($W=0.7$ m と $W=1.1$ m では $p > 0.10$, それ以外は $p < 0.05$) エラー率が増加した。

D においては,2.0mのとき3.3%であり,4.0mのとき12.3%であり, W においては,0.4mのとき17.9%,0.7mのとき2.9%,1.1mのとき2.5%であった。

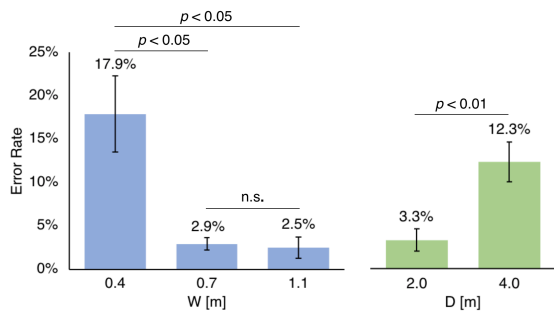


図 6 D と W のエラー率への影響

また、図 7 に示すように、 $D \times W$ では交互作用が見られ ($F_{2,22} = 3.69, p < 0.05$), D が大きくなるほど、 W の影響が大きくなることが観察された (図 7)。

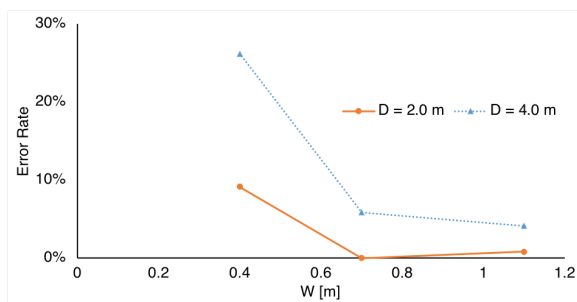


図 7 $D \times W$ のエラー率

4.3 フィッツの法則の適合度

MT と ID の関係を図 8 に示す。プロットされた各点は、 ID ごとの 60 回の試行の平均 MT を示す (参加者 12 名、各 10 回)。この結果を回帰分析すると、決定係数 R^2 は 0.68 となっており、フィッツの法則 (式 1) への高い適合度は確認されなかった [17, 18]。

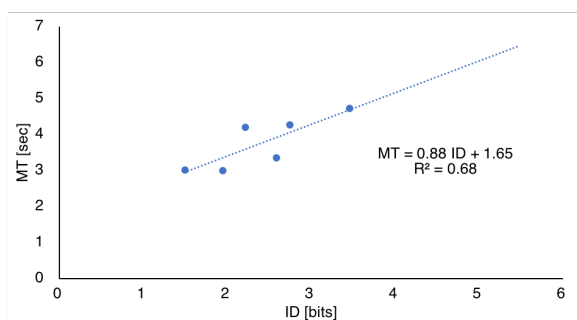


図 8 ID に対する MT の関係

4.4 学習効果

3.5 に記したとおり、今回の実験では、学習効果を防ぐ実験設計にした。図 9 は、実験順序ごとの平均 MT であり、学習効果に有意に差は見られなかった ($F_{5,55} = 0.87, p > 0.10$) ため、練習を増やした効果はあったと考える。

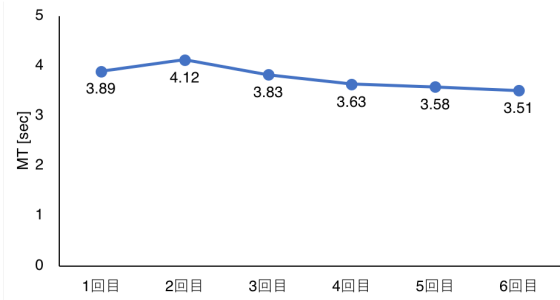


図 9 実験順序ごとの平均 MT

5. 考察

5.1 D と W の MT への影響

ターゲット幅 W とターゲットまでの距離 D が有意にドローンの操縦時間 MT へ影響を与えることがわかった。一方で、 W に関しては、0.7m と 1.1m の間には差がなく、0.7m が十分に簡単な幅であったと考えられる。また、 D に関しては、ドローンの速度の上限が低いために、 $D=2.0m$ と $D=4.0m$ の間には大きく MT に差がついたと考えられる。より速度を出せるドローンであれば、この MT の差は小さくなったであろう。

5.2 エラー率

図 6 に示すように、 D と W がエラー率へ影響を与えることがわかった。

5.2.1 ターゲットまでの距離 D

D が大きくなることで、エラー率が有意に大きくなった。また、図 7 に示すように、同じ W でも、 D が大きくなるほど、エラー率が増加している。これは、参加者から得られた「距離 (D) が遠くなると、ドローンとターゲットの距離感が掴みにくくなる」という意見と、 D が大きくなるにつれ (ターゲットが遠くなるにつれ)、同じ W であっても W が狭く見えることが原因であると考えられる。

5.2.2 ターゲット幅 W

W に関しては、0.7m と 1.1m 間で、 MT と同様エラー率に有意に差がなかった。これも、0.7m が十分に簡単な幅であるためだと考える。一方で、0.4m では、エラー率が 17.9% という非常に高い結果となった。今回、参加者から「一番狭い時は、入ったと思って着陸させたけど入らなかった」という意見が複数名から得られた。実際、0.4m の場合には、映像分析からもそのような操縦が多く観察された。

5.3 フィッツの法則モデルの適合度

今回の実験では、 $R^2=0.68$ となりフィッツの法則に適合しなかった。その原因として、以下の 3 点が考えられる。

- ターゲット難易度設定
- 参加者の正確さに対する意識

- 提示する条件のランダム性

5.3.1 ターゲット難易度設定

W では、0.4m と 0.7m で有意差が見られるも、0.7m と 1.1m では有意に差が見られなかった。つまり、 W の上限は 0.7m 付近であると考えられる。

また、 D に関しては、ドローンの速度に上限があるため、 $D=2.0\text{m}$ と $D=4.0\text{m}$ 間では、 MT に大きく差がついたと考えられる。しかし、より速度の速いドローンを実験に用いることで、 $D=2.0\text{m}$ と $D=4.0\text{m}$ 間の差は縮まり、適合率も高くなるのではないかと考える。

5.3.2 参加者の正確さに対する意識

参加者によるアンケートと映像分析により、6人の参加者が「幅内に入る前に着陸ボタンを押し、下降の最中に前進して幅内に着陸させる」という戦略で操縦していることがわかった。この戦略では、着陸動作に入るとその後ドローンを上昇させることはできない。着陸動作に入ってから着陸までの時間は一定であるため、この戦略で操縦した参加者は、 W が狭くなっても調整時間が増えることはなく、エラー率が増加するのみである。

また、映像分析により、特に $W=0.4\text{m}$ の時に、「速く正確に」と教示しているにも関わらず、速さと正確さにおいて、速さを重視している参加者が多いと感じた。実際、 MT が速い参加者はエラー率が高くなっていた。そのため、参加者が「速く正確に」操作するために実験設計の修正が必要である。本研究の実験では、ドローンをターゲット幅内に着陸させるタスクを採用したが、着陸時にドローンが幅内に入るかを上空で判断するのは難しい。そのため、例えば、「空中のターゲット幅内に一定時間滞在させるタスク」のように、着陸を参加者の動作に含まないタスクが適切であると考えられる。このようなタスクを設計することにより、教示通り「速く正確に」タスクをこなすと考えている。

5.3.3 提示する条件のランダム性

今回は、テープを張り替えることでタスクの条件を変えていたため、条件をランダムに提示することは困難であった。そのため、参加者は同じ条件のタスクを10回連続で行う実験設計となっていた。

参加者から、「離陸してから、頭の中で秒数を数えて、3秒後に下降バーを下げるようにしていた」、「プロペラの音で、下降バーを下げるタイミングを決めていた」という意見が複数得られた。例えば、秒数を数えていた参加者の $W=0.4\text{m}$ におけるエラー率は55%となっていた。このように、1つ前の操縦と同じタイミングで下降バーを下ろす戦略は、同じ条件を連続で行う実験ではエラー率を増加させる原因となる。そのため、ドローンのポインティングにおいてもランダムに条件を提示する必要があるだろう。

5.4 参加者からの意見

5.2.2項で述べたように、「ターゲットまでの距離が離れると、距離感が掴みにくくなる」という意見が得られた。今回の参加者は、スタート位置の横からドローンを見て操縦していたため、ドローンが離れるにつれ、ドローンとターゲットの距離感がつかみにくくなっていた。一方で、もし、参加者がターゲットの横でドローンを操縦した場合、ドローンが参加者とターゲットに近づいてくるため、ターゲット付近でのドローンとターゲットの距離感は掴みやすくなると考えられる。つまり、立ち位置もドローンの操縦に影響を与えると考えられるので、立ち位置を条件に入れた実験も検討したい。

また、予備実験では、「影を参考に飛ばした」という意見も得られた。ドローンの視野を可視化するインタフェース [9] のように、ドローンの現在位置を地面に描画することで、参加者がより操作しやすくなると考えられる。

6. 結論

12人の参加者にポインティングタスクをさせたところ、ドローンの操縦時間とエラー率は、ターゲット幅とターゲットまでの距離に影響を受けることがわかった。しかし、フィッツの法則への高い適合は示されなかった ($R^2=0.68$)。そして、参加者の戦略や実験結果をもとに、参加者が速く正確にタスクをこなせる実験設計を示した。

参考文献

- [1] 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).
- [2] Hall, B. D., Anderson, N. and Leaf, K.: Improving Human Interfaces for Commercial Camera Drone Systems, *Proceedings of the 2017 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, ACM, pp. 112–117 (2017).
- [3] Hansen, J. P., Alapetite, A., MacKenzie, I. S. and Møllenbach, E.: The use of gaze to control drones, *Proceedings of the Symposium on Eye Tracking Research and Applications*, ACM, pp. 27–34 (2014).
- [4] Cho, K., Cho, M. and Jeon, J.: Fly a Drone Safely: Evaluation of an Embodied Egocentric Drone Controller Interface, *Interacting with Computers*, Vol. 29, No. 3, pp. 345–354 (2017).
- [5] Kasahara, S., Niiyama, R., Heun, V. and Ishii, H.: ex-Touch: spatially-aware embodied manipulation of actuated objects mediated by augmented reality, *Proceedings of the 7th International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction*, ACM, pp. 223–228 (2013).
- [6] Gomes, A., Rubens, C., Braley, S. and Vertegaal, R.: Bitdrones: Towards using 3d nanocopter displays as interactive self-levitating programmable matter, *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, ACM, pp. 770–780 (2016).
- [7] Zollmann, S., Hoppe, C., Langlotz, T. and Reitmayr,

- G.: FlyAR: augmented reality supported micro aerial vehicle navigation, *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, Vol. 20, No. 4, pp. 560–568 (2014).
- [8] Erat, O., Isop, W. A., Kalkofen, D. and Schmalstieg, D.: Drone-Augmented Human Vision: Exocentric Control for Drones Exploring Hidden Areas, *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, Vol. 24, No. 4, pp. 1437–1446 (2018).
- [9] Hedayati, H., Walker, M. and Szafir, D.: Improving Collocated Robot Teleoperation with Augmented Reality, *Proceedings of the 2018 ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction*, ACM, pp. 78–86 (2018).
- [10] 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, *Ergonomics*, Vol. 21, No. 8, pp. 601–613 (1978).
- [11] Ramcharitar, A. and Teather, R. J.: A Fitts' Law Evaluation of Video Game Controllers: Thumbstick, Touchpad and Gyroensor, *Proceedings of the 2017 CHI Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, ACM, pp. 2860–2866 (2017).
- [12] 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*, ACM, pp. 295–302 (1997).
- [13] Montazer, M. A., Vyas, S. K. and Wentworth, R. N.: A study of human performance in a sewing task, *Proceedings of the Human Factors Society Annual Meeting*, Vol. 31, No. 5, SAGE Publications Sage CA: Los Angeles, CA, pp. 590–594 (1987).
- [14] Reed, K., Peshkin, M., Colgate, J. E. and Patton, J.: Initial studies in human-robot-human interaction: Fitts' law for two people, *Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA '04. 2004 IEEE International Conference on*, Vol. 3, IEEE, pp. 2333–2338 (2004).
- [15] Drury, C. G. and Dawson, P.: Human factors limitations in fork-lift truck performance, *Ergonomics*, Vol. 17, No. 4, pp. 447–456 (1974).
- [16] Storms, J., Chen, K. and Tilbury, D.: Modeling teleoperated robot driving performance as a function of environment difficulty, *IFAC-PapersOnLine*, Vol. 49, No. 32, pp. 216–221 (2016).
- [17] Soukoreff, R. W. and MacKenzie, I. S.: Towards a standard for pointing device evaluation, perspectives on 27 years of Fitts' law research in HCI, *International Journal of Human-Computer Studies*, Vol. 61, No. 6, pp. 751 – 789 (オンライン), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2004.09.001> (2004). Fitts' law 50 years later: applications and contributions from human-computer interaction.
- [18] Gori, J., Rioul, O., Guiard, Y. and Beaudouin-Lafon, M.: The Perils of Confounding Factors: How Fitts' Law Experiments Can Lead to False Conclusions, *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '18, New York, NY, USA, ACM, pp. 196:1–196:10 (online), DOI: 10.1145/3173574.3173770 (2018).