

トラックパッド使用時におけるクラッチ動作の分析

永渕玲緒菜^{†1} 山中祥太^{†2†3} 宮下芳明^{†2} 椎尾一郎^{†1}

概要: トラックパッドを用いてコンピュータ上のカーソルを移動する際、ユーザはしばしばクラッチを行う。クラッチとは、指や腕を持ち上げて、快適に入力できる位置に指を再配置する動作のことである。指を離している間はカーソルを移動できないため、ポインティング性能を低下させると言われている。しかし、この動作を避けるためにカーソル速度を上昇させると、かえって操作時間が増大することも示されている。また意図的にクラッチを避けようとしても、操作時間は短縮されず、むしろ操作ミスが増大してしまう。本研究では、操作時間に対しクラッチがどのような影響を及ぼしているかを分析し、検証する。実験結果から、1回のクラッチ時間は、ターゲットのサイズや移動距離に関係なくほぼ一定時間で行われていたことがわかった。また、クラッチの出現頻度は移動距離に比例することも判明した。これらの知見から、クラッチ時間を含めたタスク遂行時間のモデル化を試みた。

キーワード: ポインティング, フィッツの法則, クラッチ

Analysis of Clutching Using Trackpad

REONA NAGAFUCHI^{†1} SHOTA YAMANAKA^{†2†3}
HOMEI MIYASHITA^{†2} ITIRO SHIO^{†1}

Abstract: When user controls the cursor on the display with an input devices, a user often be clutches. Clutching is a motion which a finger or an arm is relocated on a comfortable position by lifting a finger or an arm from an input device. While clutching, user cannot input to computer because user's finger or arm is lifted. It is said that clutching decreases pointing performance. Although clutching occurrence could be decreased by increasing cursor speed, total operation time would increase. Clutching is necessary for a user to input computers comfortably, and research on clutching is important. In this paper, we observe and analyze clutching on a trackpad. From the analysis result, a clutching time is almost constant without regard to target width or height. We also conclude that the number of clutching is proportional to movement distance. We try to model the movement time of pointing involved clutching from these knowledges.

Keywords: Pointing, Fitts' Law, Clutching

1. はじめに

トラックパッドを使用して、コンピュータ画面上のカーソルを移動させるとき、指をタッチパッド上で1回滑らせただけでは目標の位置までカーソルが移動しない場合がある。そのような場合に、指をトラックパッドから離れた状態で元の位置まで戻し、再度トラックパッド上を滑らせてカーソルを移動させる動作を繰り返すことがある。このように指を持ち上げて、入力できる位置に再配置する動作をクラッチと呼ぶ。ポインティングやスクロールなど、多くの入力動作の操作性の評価が行われているが [1]、直接に入力に関与しないクラッチを含んだ性能モデルの検証や調査は少ない。

カーソル速度などの操作パラメータの条件や、使用する

入力機器変えて操作効率を検証することにより、より汎用性の高い操作性モデルが導出される [1]。また、新規なポインティング手法を提案する場合も同様の検証を必要とするため、 [2] [3] [4]のような研究が報告されている。例えば、ポインティング性能モデルであるフィッツの法則 [2]に対し、オクルージョン問題が起こった場合や、カーソルを移動させる方向に変化があった場合 [5] [6]に、フィッツの法則の適合可能性の評価がされていた。クラッチはカーソル操作中に発生するため、クラッチを含んだモデルの検討や議論をすることは重要であると考えられる。先行研究 [7]では、クラッチを入力動作の1つと捉えることが可能か否かを検討したが、実際にクラッチを含んだモデル化については議論されていない。

本研究では、トラックパッドを用いたクラッチの検証実験を行い、結果を分析し、クラッチを含んだ動作の性能モデルの導出を試みた。クラッチが発生する入力機器として、マウス、トラックパッド、トラックボール、相対入力のタッチペンなどが挙げられる。この中で、検証実験参加者が

†1 お茶の水女子大学
Bunkyo-ku, Tokyo, Japan

†2 明治大学
Nakano-ku, Tokyo, Japan

†3 日本学術振興会
JSPS, Chiyoda, Tokyo, Japan

主に使用していた入力機器はマウスとトラックパッドであった。マウスの場合には、デバイスの重さが操作時間に影響する可能性があるために議論が一般化できないと考え、本稿の実験ではトラックパッドを入力機器として選んだ。先行研究 [8]ではカーソルの移動時間のみが評価されており、クラッチ時間(指をトラックパッドから離し、その後、指をトラックパッド上に再配置するまでの時間)やクラッチ回数、ターゲットの大きさや移動距離との影響を示した研究は類似例がない。クラッチの検証や分析を行うことによって、クラッチを含んだポインティングやドラッグを用いたファイル操作など、GUI操作のモデル化も可能になると推測できる。

本検証実験は、円形のターゲットから同形のターゲットまでのポインティングタスクである。今回はこの検証実験中に行われたクラッチ時間や回数を検証、分析した。また、クラッチを含んだ操作時間が、フィッツの法則に適合するかどうかを合わせて検証した。本稿における知見は以下の二点である。

- クラッチ時間はターゲットの大きさや移動距離に関わらず一定とみなせる。
- クラッチ回数は、移動距離が伸びるにつれて線形に増加する。

この2つの知見から、議論ではクラッチを含んだポインティングにおける性能モデルの導出を試みた。

2. 関連研究

2.1 フィッツの法則と関連するポインティング手法

Eppsらは、タッチパッド、マウス、トラックボール、ジョイスティックを用いた時のカーソルの移動時間が、フィッツの法則が適合しているかどうかを調べた [9]。Cardらは、フィッツの性能モデルを元に、入力機器の性能について議論している [1]。本研究では、トラックパッドを用いてクラッチを含んだカーソルの移動時間がフィッツの法則の性能モデルに適合可能か否かを検討する。

2.2 クラッチを削減することを目的とした手法

入力機器から指や腕を一旦離すため、クラッチ中はカーソル移動ができず、ポインティングパフォーマンスを下げ(操作時間が増大してしまう)と言われている。入力範囲の狭さ [10] [8]や手や指の位置により、クラッチは発生する。そのため、カーソル速度を高速化し指やマウスの移動距離を減らすことでクラッチを削減する手法 [10] [3]が提案されている。

Casiezらはトラックパッド上にゴム状の特殊装置を設置し、その装置を指で押した方向にマウスカーソルが移動するシステム RubberEdge [10]を開発した。Casiezらは RubberEdge システムがクラッチを含む通常のカーソルの移動よりも早く操作できるかを検証するため、クラッチ時間を実験結果から 0.2 秒と定め、クラッチを含む移動時間

のモデル化を検討した。しかし、クラッチを固定値と定めて評価することが適切か否かの検証はされていない。本研究では、クラッチ時間が固定値として扱えることが可能か否かを確認する。また、ターゲット間の距離が 400mm 以下の時、RubberEdge を用いたカーソルの移動時間と従来手法でのカーソルの移動時間との差はほぼ見られなかった。Beaudouin-Lafon らはフリックを行うと、カーソルの速度が一定時間ごとに追加され、滑るようにカーソルが移動するシステム Glide Cursor [3]を開発した。Beaudouin-Lafon らの研究においてクラッチがパフォーマンスの低下を促すものと捉え、クラッチの削減を目的として研究・開発されているが、実際にクラッチの頻度が減少したことでパフォーマンスが向上したかどうかは言及されていない。また、カーソル速度を制御しクラッチを防いでも操作性が下がる場合がある [11]。

2.3 マウスを使用したポインティング操作中のクラッチの影響について

Jellinek ら [4]は、マウスの加速度がカーソルの移動時間に影響を与えるかどうかを比較、検証した。通常のカーソル速度の半分速度で評価を行なった時、カーソルの移動時間が通常の移動時間の4倍かかっていたことが分かった。また、移動時間のうちの25%が、クラッチによるマウス滞空時間にあてられていた。Casiez ら [8]は Jellinek ら [4]の評価を、ディスプレイサイズを変えて評価し、同じ現象が発生することを確認した。しかし、これらは、クラッチに焦点を当てておらず、クラッチ中の時間やクラッチの頻度に関する評価や議論は行われていない。また、これらの研究はマウスを使用しており、トラックパッドでの評価は行われていない。

2.4 クラッチのデザインや検討

Woźniak ら [7]は、クラッチが発生する原因の調査を行った。クラッチは物理的構造、デバイスの感度、照明の明るさの3つの制約があることを示し、これらをうまく利用して入力切り替えや拡張に繋がることが可能であると報告した。しかし、クラッチ時間や回数を調べるような検証実験や比較は行われていない。Nancel らは、カーソル速度を上げて、クラッチを含まないポインティング動作を行った移動時間と、カーソル速度は変えず、クラッチを含めた移動時間の比較を行った [12]。カーソル速度を上げてポインティングを行なった場合、カーソルを動かし始めるまでの時間がカーソル速度を上げた場合より長く、その結果カーソルの移動時間が長くなるという結果を示している。本研究での評価項目は、これらの研究と異なっており、クラッチ時間およびクラッチ回数に関して議論を行う。

3. 検証実験

トラックパッドを使用して、ポインティング動作を行った時のクラッチについて検証する。そのため以下のような

ポインティングタスクを作成し、評価実験を行なった。この検証実験の目的は、ポインティング動作中に発生するクラッチ時間とクラッチの回数を検証、分析することである。クラッチ時間及びクラッチ回数が、ターゲットサイズやカーソルの移動距離と依存関係があった場合、クラッチを含んだポインティングの性能のモデル化を検討することが出来る。

距離 A 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移動時間 MT (Movement Time) は、フィッツの法則 [2] により以下のように表される。

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

このうち、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 が長くなることが分かる。また、 a 、 b は、フリーパラメータである。検証実験では、トラックパッドを用いてクラッチを含んだカーソルの移動時間がフィッツの法則の性能モデルに適合可能か否かも検討する。

3.1 実験環境

DELL 社 24 インチ U2412M ディスプレイ (1920×1200) と MacBookPro Retina (Early 2015 モデル) に付属している 101 × 73 mm トラックパッドを使用した。この時の CD (Control Display) 比は 2 に設定した。クラッチを正確に検出するために、マルチタッチ機能はオフにした。指の動きとカーソルの動きを一致させる目的で、カーソルの移動速度に付与できる加速度設定は 0 に設定した。評価に使用したソフトウェアは MacOS 上で Swift2.2 を使用して開発した。このプログラムは、画面内のマウスカーソルの座標、指が触れている時のトラックパッド上の位置、クラッチを行っている時間、タスク完了までの時間を計測している。また、被験者が使用する机や椅子は、各被験者が最適な動作を行えるように本実験開始時に調整した。

3.2 被験者

実験参加者は、日常的に Apple 社のトラックパッドを使用する 22-60 歳のユーザ 10 名である。また、PC 操作に支障がないことを事前に確認した。全員が右利きである。

3.3 タスク

ディスプレイ上に、赤色の円形ターゲットと青色の円形ターゲットが表示されている。(図 1 参照。) トラックパッドを操作して、矢印型カーソルを赤色の円形ターゲットから青色の円形ターゲットまで移動させる。赤色の円形ターゲットをクリックすると時間計測がはじまり、青色のターゲットをクリックすると計測を終了する。今回は青色のターゲットを通過してしまった場合でもエラーにはカウントしていない。

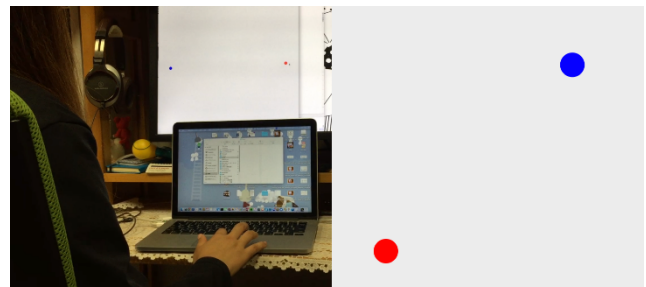


図 1 実験環境と提示した画面

Figure 1 Experimental environment and a screenshot of a task.

3.4 実験手順とパラメータ設定

ターゲット間の移動距離 A は 5 種類 (200, 400, 600, 800, 1000 pixels; それぞれ 47mm, 94mm, 141mm, 188mm, 235mm), ターゲットサイズ W は 2 種類 (26, 56 pixels; それぞれ 6mm, 13mm), 目標ターゲットの方向 D (Directions) は 8 種類 (0° , 45° , 90° , 135° , 180° , 225° , 270° , 315°) を採用した。合計 80 種類の組み合わせがランダムな順序で選出される。この 80 種類のタスクを 1 試行とする。各被験者は、最初にタスクの説明を受けた後、10 分間の練習時間を設けた。その後、3 セット続けて実験を行なった。本実験で記録されるデータは 80 (タスク) × 3 (試行) × 10 (名) = 2400 回分となる。実験は被験者一人あたり 25 分ほど要した。被験者の疲労などは特に報告されなかった。また、決められたパラメータ選出順がランダムになるようにした。これは、被験者に動作を覚えられないようにするためである。

4. 結果

4.1 1 回のクラッチ時間

検証実験から、クラッチ時間 (各距離に対してのクラッチ 1 回あたりの所用時間) を計測した。図 2 に各ターゲット距離 A における 1 回のクラッチ時間を表す。また、ターゲットサイズ W (2 水準) と距離 A (5 水準) の二元配置分散分析 (反復測定) の結果から、 W ($F_{2,40} = 3.9$, $p > 0.05$), A ($F_{5,16} = 2.49$, $p > 0.05$) の主効果は見られなかった。クラッチ回数

図 3 に各距離におけるタスク中に発生した平均クラッチ回数を示す。カーソルの移動距離が長くなるほど平均クラッチ回数が線形に増加していることが分かった。また、被験者ごとのクラッチ回数を調べたところ、各被験者の平均クラッチ回数も距離が伸びるにつれて増加していた。クラッチ回数のデータに対し、ターゲットサイズ W (2 水準) と距離 A (5 水準) の二元配置分散分析 (反復測定) を行った。結果から、ターゲットサイズ W ($F_{2,40} = 3.96$, $p > 0.08$) に主効果は見られなかった。また、距離 A ($F_{5,16} = 2.49$, $p < 0.0001$) においては効果があり、有意差があることが示された。

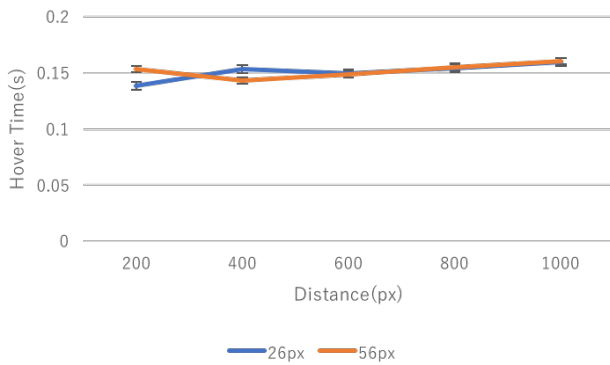


図 2 各距離におけるユーザの指のクラッチ時間
Figure 2 Hover time in a clutching operation.

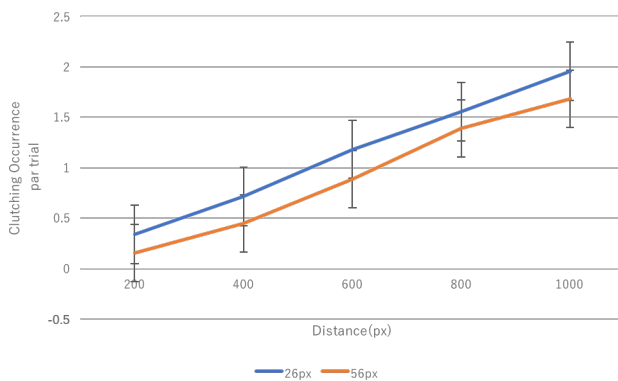


図 3 距離別における平均クラッチ回数のグラフ
Figure 3 Average of clutching times for each distance.

4.2 フィットの法則モデルの適合度

クラッチを含んだ移動時間とフィットの難易度 ID との関係を示したグラフを図 4(a), クラッチ時間をのぞいた移動時間と ID の関係を示したグラフを図 4 (b) に示す. フィットの法則の適合度はそれぞれ $R^2 > .95$, $R^2 = .97$ を示した. この結果から, クラッチ時間を除いたカーソルの移動時間がクラッチを含んだカーソルの移動時間より適合度が高かった.

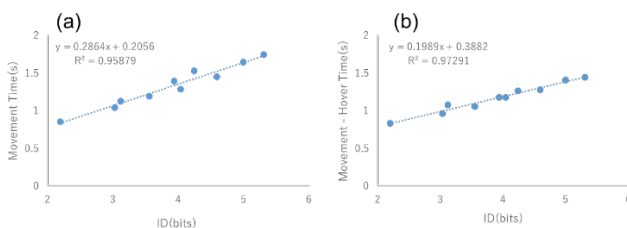


図 4 各 ID における移動時間(MT)のグラフ
Figure 4 Graph of movement time for each ID.

5. 議論

5.1 クラッチ時間について

結果から, クラッチ時間はターゲットの大きさや移動距離に関わらず一定ということがわかった. すなわち, クラッチ時間を定数とすることが可能である. [10]においてク

ラッチ時間を 0.2 秒と定めていたように, 1 回のクラッチ時間を一定の値と考えて性能モデルを検討できる確認にも繋がった.

また, 移動距離に応じてクラッチ回数は線形に増加することが分かった. つまり, 距離 A における予想クラッチ回数 N_c は,

$$N_c = k_1 + k_2A \quad (2)$$

と表せる. ここでの k_1 , k_2 は実験データからモデルに当てはめた時に回帰分析で決定される定数パラメータであり, フリーパラメータ (free parameter) と呼ばれる. また, 1 タスクにおける総クラッチ時間 HT (Hover Time) は (1) 式とクラッチ時間 h を用いて,

$$HT = hN_c = h(k_1 + k_2A) \quad (3)$$

と表せる. (2) 式から, ある移動時間におけるクラッチ時間は移動距離に比例していることが分かる. これはポインティングタスクに対して, クラッチ時間が予測可能であることと同義である. また, クラッチ時間とクラッチ回数に分かっていれば, 移動距離も導出できることが分かる.

5.2 フィットの性能モデルの適合について

結果から, フィットの性能モデルへの適合率は, クラッチ時間を除いた移動時間の場合の方が, クラッチを含んだ移動時間の場合より高かった. つまり, クラッチを含んだカーソルの移動時間は, フィットの法則に適合するとは考えにくい. 結果からクラッチ時間は距離に依存していることが分かったため, ここでは, クラッチ含む移動時間の性能モデルを検討する. ポインティングの性能モデルであるフィットの法則 [2] ((3) 式) に対し, クラッチ時間を加算したモデル

$$MT = a + b \log_2 \left(\frac{A}{W} + 1 \right) + h(k_1 + k_2A) \quad (4)$$

を提案する. この(4)式をさらに整理すると,

$$MT = a' + b \log_2 \left(\frac{A}{W} + 1 \right) + hk_2A \quad (5)$$

ただし,

$$a' = a + hk_1 \quad (6)$$

である. このうちカーソルの移動時間に影響を及ぼすものは, ポインティング中の難易度 ID である $\log_2 \left(\frac{A}{W} + 1 \right)$ と総クラッチ時間に関係する hk_2A により決定する.

この (5) 式の難易度 ID と, A をそれぞれ変数として重回帰分析を行ったところ, $R^2 > .98$ を示した. 4.2 節で示した適合度 $R^2 > .95$ よりも高くなる結果となり, 単純にフィットの法則に当てはめた結果に比べて, 提案したモデルの適合度が高いことが示された.

5.3 検証実験の検証範囲の限界と今後の課題

今回の検証実験で採用した移動距離やターゲットの大きさ, 入力装置には制約がある. 例えば, 本検証実験で使用

したディスプレイよりもさらに大きなディスプレイを用いて長い移動距離を移動する時や、スマートウォッチなどの小さなディスプレイ上での短い距離の移動時ではクラッチ回数が増加するかどうかは不明である。また、マウスやタッチパネルなどの入力機器の違いによってクラッチ回数やクラッチ時間が変化する可能性は残されている。また、全体の移動時間のうち、クラッチに用いられていた時間は15-20%であった。Casiezらがマウスで実験した場合では、全体の移動時間の4%がクラッチ時間であり、本研究とは異なっていた [8]。原因は入力装置の違いによる、指や腕の可動範囲の差と著者は考えているが、明確な答えを得るため、今後さらに検証する必要がある。

6. おわりに

トラックパッドを用いたポインティング動作中のクラッチについて着目し、検証と分析を行った。実験結果から、1回のクラッチ時間は、ターゲットサイズや移動距離に関係なくほぼ一定時間で行われていた。また、クラッチ回数は移動距離に比例して増加しており、この2点の知見を用いてモデル化を試みた。導出したモデルでは、タスクの所要時間はクラッチ無しの時の所要時間に総クラッチ時間を加えた時間になる。ここで総クラッチ時間はターゲットまでの距離と比例関係にある。しかしながら、適合度は低く、さらなる議論や検討が必要である。また、今回はトラックパッドを用いて検証を行ったが、クラッチは入力装置の違いにも影響があると考えられ、今後は様々な入力装置での検証実験を行っていききたい。

本研究は JSPS 科研費 JP26330219 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] Stuart K. Card, Jock D. Mackinlay, and George G. Robertson. 1991. A morphological analysis of the design space of input devices. *ACM Trans. Inf. Syst.* 9, 2 (April 1991), 99-122.
- [2] Paul M. Fitts. 1954. The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *Journal of Experimental Psychology*, Vol.47, No.6, 381-391.
- [3] Michel Beaudouin-Lafon, Stéphane Huot, Halla Olafsdottir, and Pierre Dragicevic. 2014. GlideCursor: pointing with an inertial cursor. In *Proceedings of the 2014 International Working Conference on Advanced Visual Interfaces (AVI '14)*. ACM, New York, NY, USA, 49-56.
- [4] Herbert D. Jellinek and Stuart K. Card. 1990. Powermice and user performance. In *Proceedings of*

the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '90), Jane Carrasco Chew and John Whiteside (Eds.). ACM, New York, NY, USA, 213-220.

- [5] I. Scott MacKenzie and William Buxton. 1992. Extending Fitts' law to two-dimensional tasks. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '92)*, Penny Bauersfeld, John Bennett, and Gene Lynch (Eds.). ACM, New York, NY, USA, 219-226.
- [6] Jennifer Bützler, Christopher M. Schlick. Investigation of the angle and age effect using Fitts' Law for mouse input *19th Triennial Congress of the IEA, Melbourne*, 9-14.
- [7] Pawel Woźniak, Morten Fjeld, and Shengdong Zhao. 2014. Limiting trial and error: introducing a systematic approach to designing clutching. In *Proceedings of the Second International Symposium of Chinese CHI (Chinese CHI '14)*. ACM, New York, NY, USA, 35-39.
- [8] Géry Casiez and Daniel Vogel and Ravin Balakrishnan and Andy Cockburn, A. The impact of control-display gain on user performance in pointing tasks. *HCI23,3* (2008), 215-250.
- [9] Brian W. Epps (1986). Comparison of six cursor control devices based on Fitts' law models. *Proceedings of the 30th Annual Meeting of the Human Factors Society* vol. 30, 4: pp. 327-331.
- [10] Géry Casiez, Daniel Vogel, Qing Pan, and Christophe Chaillou. 2007. RubberEdge: reducing clutching by combining position and rate control with elastic feedback. In *Proceedings of the 20th annual ACM symposium on User interface software and technology (UIST '07)*. ACM, New York, NY, USA, 129-138.
- [11] Olivier Chapuis and Pierre Dragicevic. 2011. Effects of motor scale, visual scale, and quantization on small target acquisition difficulty. *ACM Trans. Comput.-Hum. Interact.* 18, 3, Article 13 (August 2011), 32 pages.
- [12] Mathieu Nancel, Daniel Vogel, and Edward Lank. 2015. Clutching Is Not (Necessarily) the Enemy. In *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '15)*. ACM, New York, NY, USA, 4199-4202.