

ペンを握る動作を利用したインタラクション手法の検討

鈴木 優^{†1} 三末 和男^{†1} 田中 二郎^{†1}

現在のペン入力インタフェースには限られた入力操作しか存在しない。そこで、入力操作を豊かにするために、ペンを握る力を利用したインタラクション手法、Grippingを提案する。Grippingとは、ペンを握った状態でペンを握る力を加減する操作である。Grippingはペンから指を離すことなく行えるため、従来のペンの使いやすさを保持したまま入力操作を増やすことができる。さらに、ペンをタッチディスプレイから離れた状態で操作できるため、タップやストローク操作とは独立した制御が行える。一方で、ペンを握る力を用いたインタラクション手法は今まで十分な検討が行われていない。本論文ではGrippingでの入力操作を離散的入力と連続的入力にわけ、ペンを握る力を用いたインタラクションの実現可能性について3つの実験を基に検証を行った。その結果、Grippingがペン入力インタフェース向けのインタラクション手法として有効に活用できる可能性を示すことができた。

An Exploration of Interaction Techniques Using Gripping Motions

YU SUZUKI,^{†1} KAZUO MISUE^{†1} and JIRO TANAKA^{†1}

Current pen-based interfaces have a limited number of input operations. We propose an interaction technique called “gripping” to enrich the input operation of pen-based interfaces. This is an operation involving a strong grip when holding a pen. It can provide new input operations while maintaining the usability of the pen because users can grip the pen without having to lift their fingers off it. In addition, users can independently control tapping or stroking operations because they can grip the pen when releasing its tip from a touch screen. On the other hand, interaction techniques using gripping strength have not been considered enough. In this paper, we divided input operations of gripping into discrete and continuous input, and examined the feasibility of gripping interaction based on three experiments. The results indicated that gripping has the potential to be an interaction technique for pen-based interfaces.

1. はじめに

ペンは多くの人が幼少のころから使い、慣れ親しんでいる道具の1つであり、ペンの持ち方や使い方は経験的に体得されている。ペン入力インタフェースはペンを模したデバイスであり、その操作にはペンの使用により得た経験を活かすことができる。よって、ペンの使用経験を持つ人間にとって、ペン入力インタフェースは使用方法に関して特別な学習の必要がなく、容易に扱うことができるデバイスであるといえる。

現在のコンピュータでは多種多様な作業支援が行われており、高度な作業を行うためには複雑な操作が要求されることもあるが、現在のペン入力インタフェースが備えている入力操作は座標入力と1つのスイッチが基本となっており、複雑な操作をするためにはGUIによるモード切替えやパラメータ変更が要求される。そのため、必ずしも使い勝手の良いインタフェースであるとはいえない。これを解決するためには、ペン入力インタフェースが持つ入力操作数を増やすことが1つの解決策となりうる。たとえば単純にペンに多くのボタンを付加することでも入力操作を増やすことはできる。しかしながら、そのような方法では操作の度にペンを握り直さなければならず、従来のペンの使用方法を逸脱してしまう。その結果、ペンの使用により得た経験を十分に活かすことができず、ペン入力インタフェースが備える使いやすさを失ってしまう。

本研究では、ペンの使いやすさを失わずに入力操作を増やすことができるインタラクション手法、Grippingを提案する。Grippingとは、ペンを握った状態でペンを握る力を加減する操作である。経験してきたペンの使い方を逸脱しないため、ペン入力インタフェースとしての使いやすさを維持できる。

ペンを握る力や位置などのペンの把持情報を利用したインタフェースについてはいくつかの研究^{14),15)}がなされている。しかしながら、本研究のようなペンを握る力のインタラクションへの応用は、まだ十分に検討されておらず、ここにペン入力インタフェースをさらに使い勝手の良いものにするためのインタラクション設計の余地が残されていると考えられる。我々はGrippingによる入力を離散的入力と連続的入力の2種類にわけ、それぞれにおけるインタラクション設計について検討する。本論文では、この検討に基づき、ペン入力インタフェース向けの新しいインタラクション手法としてのGrippingの可能性を示す。

^{†1} 筑波大学
University of Tsukuba

2. 関連研究

デバイスの把持情報に着目したインタラクション手法はいくつか検討されている。たとえば、握る操作をハンドヘルド PC の操作に利用する研究³⁾ や、マウス操作に圧力を利用する研究^{2),16)}、圧力を利用する新しい入力デバイス開発⁷⁾ などがある。本研究と同様に、ペンの把持情報に着目した研究も存在する。山本ら¹⁵⁾ はペンの把持情報の中でもペンを握る位置に関して調査し、それをペンストロークのパラメータ調整へと応用した。本研究は、デバイスとしてペンに着目し、さらに把持情報の中でもペンを握る力を利用するという点でこれらの研究とは異なる。本研究と同様にペンを握る力に着目した研究も存在する。川端¹⁴⁾ は各指にかかる無意識的な圧力の時間変化を調査し、個人認証への応用を目指した。一方、本研究はペンを握る力を用いてペン入力インタフェースの新しいインタラクション手法を創出することを目的としており、研究の目的という観点において差異がある。

また、ペン入力インタフェースの操作性向上を目指す研究として、ペン型デバイスの拡張^{1),5),9),11),12)} や、既存のデバイスから取得可能な入力情報の活用^{8),10),13)} などが行われている。これらの研究は我々と同様に、ペン入力インタフェースの使い方を拡張することでペン入力インタフェースの操作性向上を目指しているが、本研究はペンを握る力を用いており、アプローチという点で異なる。

Ramos ら⁸⁾ は筆圧を利用したインタラクション手法を開発した。彼らは筆圧を用いた離散入力操作を実現するために必要な調査、具体的には離散レベル、および離散の入力の決定操作に適したトリガ操作について調査した。その結果、筆圧では最大で 6 の離散の入力が可能で、筆圧を素早く弱くする操作がトリガ操作として適していることを示した。Mizobuchi らの研究⁶⁾ では、人間の筆圧制御に関する調査が行われ、適切な筆圧のレベルと強さが示された。これらの研究が行われていることから、ペン入力インタフェースにおける離散の入力の必要性がうかがえる。我々は、ペンを握る力の応用に関して、離散の入力に加え、連続の入力への応用についても検討を行った。

3. Gripping

Gripping はペンを握る力を利用した、ペン入力インタフェース向けのインタラクション手法である。ユーザはペンを握った状態で、ペンを握る力を加減することで Gripping を行う。

3.1 Gripping の利点

Gripping では、ペンの持ち方や使い方など、ペンの使用により得た経験を活用でき、こ

のことがさまざまな利点を生み出す。Gripping を使うために新しい操作を学習する必要がほとんどなく、普段の何気ない動作を少し意識して行うだけで操作できる。また、ペンから指を離すことなく操作できるため、従来のペンの使いやすさを保持したまま入力操作を増やすことができる。さらに、Gripping はペンをタッチディスプレイから離れた状態で操作を行えるので、タップやストローク操作とは独立した制御が行えるという利点もある。

Gripping はペンを握る力というアナログな情報を利用するため、入力値として連続値^{*1}をとる。よって、連続値の入力インタフェースとして利用できる。また、Ramos ら⁸⁾ の研究において、このような連続値を離散値として扱うことに成功しているため、Gripping も連続値だけではなく離散値の入力手法としても利用できる可能性がある。それぞれ入力手法としての利点が存在する一方、それらの実現にはいくつかの検討すべき課題が残されている。

3.2 離散の入力の利点と課題

Gripping による離散の入力により、直接 GUI を操作することなく、キーボードでのショートカットキーのような操作が行えるようになるため、操作性向上が期待できる。

筆圧を用いて離散の入力を行う手法⁸⁾ も存在する。筆圧にはタップやストローク操作が必須であるという欠点がある一方、Gripping はそれらの操作とは独立した、ペンをディスプレイから離れた状態でも行えるため、筆圧に比べて優位性がある。

Gripping による離散の入力を実現するためには、離散の入力を行うための人間の能力を調査する必要がある。具体的には、何段階の離散の入力を使い分けることが可能か、入力値を決定するためのトリガ操作にはどのようなものが適切かは分からない。そこで、これらを解明することを課題とする。

3.3 連続の入力の利点と課題

ペン入力インタフェースは座標入力とともに筆圧のような連続値を入力することができ、筆圧による連続の入力は Adobe Photoshop などの商用アプリケーションでも利用されており、絵や文字を書くなどのアーティスティックな作業を行うにあたって、連続の入力は有用で必要不可欠な入力操作となっている。Gripping と筆圧を組み合わせることで 2 つの連続値を同時に入力できるようになり、既存の入力インタフェースでは行えなかったような操作が可能になることが予想される。たとえば、2 つのパラメータを同時に変更するなどの操作が可能になるだろう。

*1 コンピュータでの処理の都合上、値はデジタル化されるために実装上は離散値であるが、人間がそれを連続値として認知できるだけの十分な細かさの離散値をとる。

しかしながら、人間がペンを握る動作と筆圧を同時に制御できるかどうかは分からない。そこで、これを解明することを課題とする。

4. Pressure-Sensitive Stylus

我々はペングリップにかかる指の力を検出できる Gripping 用のペン型デバイス、Pressure-Sensitive Stylus（以下、PS Stylus）を開発した（図 1）。

4.1 ハードウェア構成

ペンを握る際に利用する 3 本の指にかかる力を検出するために、インターリンク社製の感圧センサ FSR402 を 3 つ使用した。ペングリップにマジックテープのループ部を巻き付け、センサの裏にマジックテープのフック部を貼り付けることで、ペングリップにセンサを固定した。これはセンサ位置を可変にし、利用者ごとに異なる把持位置を微調整するためである。将来的にはペングリップをすべて覆うことが可能な感圧センサの利用を想定している。3 つそれぞれの感圧センサにより検出したアナログ値は Arduino によって AD 変換され、PC ヘデジタル信号として送られる。

PS Stylus は全長 170 mm、グリップ部の太さは 20 mm、重量は 45 g、ペン先から 90 mm の位置に重心がある。後述する 3 つの実験での握る力の計測にはこのデバイスを用いた。

4.2 デバイスの設計

人間は指先に強い力を長時間加え続けると、その検知能力は徐々に低下し、力の制御がうまくできなくなる。これは、触圧の検知を行う指先の機械受容器は一定時間の順応後、信号の発火が止まることに起因する⁴⁾。よって、ペンを強く握らなければならない設計は避けるべきである。また、ペン自体にも重量があるため、ペンの保持にも最低限の力が必要とな

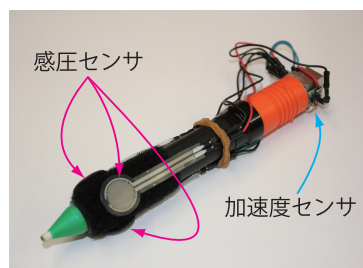


図 1 Pressure-Sensitive Stylus
Fig. 1 Pressure-Sensitive Stylus.

る。そこで、PS Stylus は 30～500 g 重の力を検出するように設計した。この力は 3 つのセンサから検出した圧力の平均値を用いて算出している。

検出した圧力は 1,024 の分解能で処理される。センサの特性上、センサの出力値と実際にかかる力の関係は線形ではなく対数特性を持つため、ソフトウェアで特性が線形になるように補正した。これにより、センサの出力値と実際の圧力はおおむね比例するようになったが、完全な線形特性には補正できていないため、かかる力が弱いときに出力値がやや大きくなる傾向がある。また、PS Stylus の時間分解能は 20 ms であるため、操作に対する遅延をほとんど感じずに操作することができる。

5. 実験 1：離散的入力に関する調査

5.1 目的

Gripping により何段階の離散的入力を使い分けることが可能か、入力値を決定するためにはどのようなトリガ操作が適切かについて調査する。

ここで、トリガ操作の必要性について詳細を説明する。ターゲット選択のような操作を行う場合、選択を確定するためのトリガが必要であるが、マウスを使った操作では一般的にはクリックがトリガ操作になっている。よって、Gripping のトリガ操作としてクリックに相当するタップを使用することも考えられるが、ペン先がディスプレイに接していない状態でも操作が完結するという Gripping の大きな特徴を失ってしまう。そこで我々は空中で行うことができる 4 種類の操作、*Keeping*, *Quick Release*, *Finger Release*, *Swinging*¹²⁾ をトリガ操作として試す。*Keeping* は握る力を一定時間（本実験では 1,000 ms）維持する操作、*Quick Release* はペングリップに加えている力を素早く緩める操作、*Finger Release* はペンから人差し指のみを離す操作、*Swinging* はペンを振る操作である。*Swinging* は空中で行え、かつ手首を回転させるだけで行える簡単な操作であることから採用した。

5.2 被験者と実験環境

被験者は 22～26 歳の男性 6 名、女性 2 名の合計 8 名のボランティアで、7 名は右利き、1 名は左利きである。ペンの持ち方は被験者ごとに多少異なっていたが、全員が 3 本の指を用いていた。被験者が普段どおりにペンを握ることができるように、各被験者の握り方に応じて PS Stylus の 3 つの感圧センサ位置を微調整した。被験者には普段どおりのペンの持ち方をするように指示をしたため、極端にペンを立てたり寝かせたりして持つ被験者はいなかった。また、*Swinging* を検出するために、ペンの上部に重量が 2 g の加速度センサモジュールを配置した（図 1）。実験には PS Stylus 以外に 1,280×1,024 ピクセルの解像度を

持つ 20 インチの LCD を用いた。握る力は PS Stylus の 3 つのセンサの平均値であるが、*Finger Release* を検出するために人差し指の力検出を担うセンサの値を個別に利用した。

5.3 タスク

握る力を制御してターゲットを選択するタスクを行った。ディスプレイ上にはボックスとカーソルが提示される。ボックスのサイズは 600×800 ピクセルで、カーソルは握る力に応じてボックス内を垂直方向に移動する。1,024 段階の圧力レベルは 800 ピクセルに均一にマッピングされており、圧力レベルが 0 のとき、カーソルはボックスの最下部に表示され、1,023 のときに最上部に表示される。ボックス内にターゲットが 1 つ提示されたら、被験者は握る力を制御してそのターゲットにカーソルを合わせ、その選択を決定するためのトリガ操作を行う。カーソルがターゲット内に入るとターゲットの色が変わるため、ユーザは操作に対する視覚的なフィードバックを得ることができる。

離散値の段階数 n は 2~12 の 11 段階を用意した。各段階のターゲットサイズは $800/n$ である。 n が大きくなればなるほど微妙な力加減が必要になり、被験者はより慎重な操作が要求される。各被験者はトリガ操作ごとに、11 段階の n の試行をそれぞれ 6 回ずつ行った。ターゲット選択に失敗した場合、成功するまでその試行を繰り返した。ターゲット選択後、圧力レベルが 0 になるまでペンを握る力を緩めると次のターゲットがセットされ、再び力を加えることで次の計測が開始する。4 種類のトリガ操作を行う順番、およびターゲットの提示順は被験者ごとに変え、順序が実験結果に与える影響を排除した。

5.4 パフォーマンスの測定

一般にコンピュータへの入力操作は素早く、容易に、正確に行えることが求められる。そこで本実験では、ターゲット選択のエラー率 (ER)、ターゲットをクロスした回数 (NC)、ターゲットの選択時間 (ST) の 3 つの観点から評価する。ER は 1 回あたりのターゲット選択で発生するエラー数、NC はいったんカーソルがターゲットに入った後にターゲットの境界をクロスした数 (たとえば、カーソルがターゲット内に入った後にターゲットを出て再度入った場合には $NC = 2$ となる)、ST は被験者が力を入れ始めてからターゲット選択が完了するまでの時間である。ER は正確さ、NC は容易さ、ST は素早さを示す指標として利用する。

5.5 結果

$\pm 2\sigma$ を超える 24 の計測値を外れ値としてデータセットから取り除いた。

エラー率の分析

エラー率 (ER) の結果を図 2 (a) に示す。Keeping は n が増加してもエラー率がほぼ 0

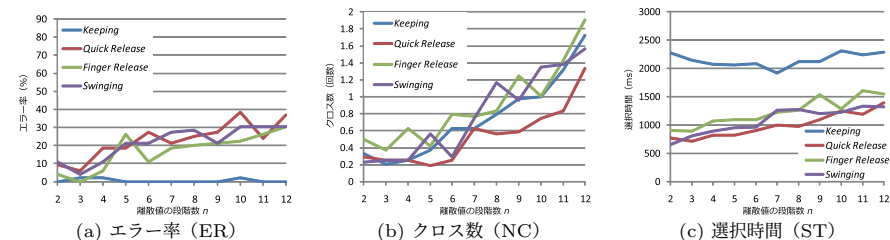


図 2 実験 1 の結果

Fig. 2 Results of experiment 1.

で横ばいに推移する一方で、他の 3 手法は n が増加するとエラー率が増加している。4 つの手法について分散分析を行った結果、有意差があることが分かった ($p < 0.001$)。さらに、4 手法のペア 6 組に対して t 検定を行った結果、Keeping とその他 3 手法すべてのペアに有意差があることが分かった ($p < 0.001$)。

クロス数の分析

クロス数 (NC) の結果を図 2 (b) に示す。4 手法とも n が増加するにつれてクロス数が指数関数的に増加する傾向が読み取れる。特に n が 6 を超えてから増加傾向が強い。4 つの手法について分散分析を行った結果、有意差は確認できなかった ($p = 0.313$)。

選択時間の分析

選択時間 (ST) の結果を図 2 (c) に示す。各手法とも n が増加するにつれて緩やかに選択時間も増加する傾向がある。また、Keeping が他の手法よりもおよそ 1,000 ms 選択に時間を費やしていることが分かる。4 つの手法について分散分析を行った結果、有意差があることが分かった ($p < 0.001$)。さらに、4 手法のペア 6 組に対して t 検定を行った結果、Keeping とその他 3 手法すべてのペア、および Quick Release と Finger Release のペアに有意差があることが分かった ($p < 0.001$)。

5.6 考察

離散値の段階数 n の決定

エラー率と選択時間は n の増加につれて緩やかな増加を示しているのに対して、クロス数は n が 6 を超えると急に増加傾向が強まる。つまり、 n が 6 を超えると操作が困難になる傾向が強いことが分かる。よって、Gripping による離散的入力に 6 段階以内で行うことが適切であるといえる。

トリガ操作の選定

エラー率を比較すると、*Keeping* は n が増加してもほぼ 0 である一方、その他の手法は n の増加にともないエラー率も上昇した。つまり、*Keeping* は n が増加しても正確に操作できることが分かる。よって、*Keeping* が適切なトリガ操作として有望であると考えた。選択時間では、*Keeping* は他の手法よりも選択に時間がかかり、その差はおよそ 1,000 ms であることが分かった。*Keeping* は握る力を 1,000 ms 間維持することで決定操作とする手法であるので、この差はあって然るべき差であるといえる。しかしながら、1 回の操作時間が 2,000 ms とやや長く、フラストレーションが溜まることも考えられる。これについては今後の課題として、力を維持する時間などの調整による操作時間を短縮を目指す。

6. 実験 2：ペンを握る力と筆圧の関係に関する調査

6.1 目的

人間がペンを握る動作と筆圧を同時に制御できるかどうか分からない。空中でも強くペンを握ることができることから、小さい筆圧に対して握る力を大きくすることは容易であると考えられる。一方、握る力が小さいままで大きな筆圧を加えることは困難であると想像できる。まず実験 2 では、握る力と筆圧を同時に制御できる境界を明らかにするために、最小のペンを握る力で加えることができる筆圧について調査する。

6.2 被験者と実験環境

被験者は 22～26 歳の男性 6 名のボランティア、5 名は右利き、1 名は左利きであった。全被験者とも 3 本の指を用いて正しくペンを握っており、実験 1 と同様に感圧センサの位置は被験者ごとに微調整した。ペンの握り方の指示も実験 1 と同様に行い、極端にペンを立てたり寝かせたりして持つ被験者はいなかった。

筆圧を測定するために、PS Stylus に付加しているものと同じ感圧センサをもう 1 つ利用した。感圧センサを机の上に置き、感圧センサをペン先で押さえることで筆圧を測定した。市販のペンタブレットなどを利用して筆圧を測定することも考えたが、センシング特性を揃えるために Gripping と筆圧の測定に同じセンサを利用した。ペンを握る力と筆圧は 50 Hz でサンプリングした。

被験者はイスに座った状態でペンを握り、机の上に置かれたセンサをペン先でセンサに圧力を加えた。

6.3 タスクと測定

被験者はまずペンを軽く握り、ペン先を感圧センサに接触させる。被験者は最小限の力で

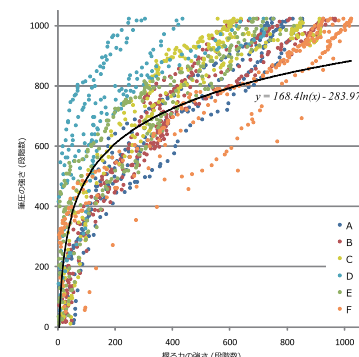


図 3 実験 2 の結果。X 軸はペンを握る力、Y 軸は筆圧を表す。A-F はそれぞれ被験者 1 人の計測値、曲線は被験者 F の回帰曲線を表す
Fig. 3 Results of experiment 2. X-axis represents gripping pressure and Y-axis represents pen pressure. A-F represents a participant respectively. A black curve line is a regression curve of participant F.

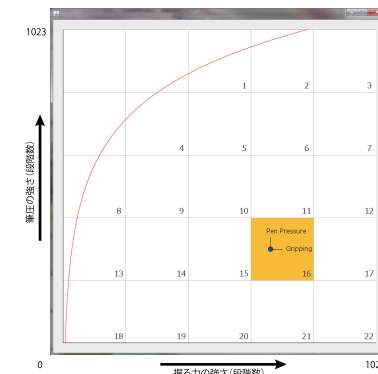


図 4 Pressure map. カーソルがターゲットに入った状態を示す
Fig. 4 A screenshot when the cursor is inside of the target.

ペンを握り、できる限り大きい筆圧を感圧センサに加えていく。さらに、筆圧が最大になるまで徐々に加える力を強くする。筆圧を強くしようとするとペンを握る力も自然に強くなるため、ペンを握る力と筆圧との関係が明らかになる。各被験者はこの試行を 5 回繰り返した。

6.4 結果

全計測データをプロットした散点図を図 3 に示す。X 軸と Y 軸はそれぞれペンを握る力と筆圧を、A-F はそれぞれ被験者 1 人の計測値を表す。

全計測値を分析した結果、ペンを握る力と筆圧は対数に回帰していることが分かった ($R^2 = 0.754$)。また、各被験者の計測値を分析した結果、被験者 F が最もペンを強く握る傾向があることも分かった。

6.5 考察

図 3 を見ると、ペンを握る力が非常に弱い状態では強い筆圧を加えることができないが、それ以外の状態では 2 つの力を同時に制御できる可能性があることが分かる。ペンを握る

力と筆圧の2次元の力空間としてとらえると、ある一定の空間内であれば2つの力を同時に制御できる可能性がある。

被験者Fが最もペンを強く握る傾向があり、ペンを握る力を x とおくと、そのときに加えられる最大の筆圧 y は $y = 168.4 \log x - 284$ で表現できる。よって、我々はこの式をペンを握る力と筆圧の関係の目安として採用する。この曲線とX軸で囲まれた部分が2つの力を同時に制御できる力空間である。2つの関係を単純に $y = x$ と定義するよりも、特に握る力が小さいときにより広い力空間が利用できる。この結果は、たとえばGrippingと筆圧を両方同時に利用するアプリケーションを設計する際に、ある握る力に対してユーザがとりうる筆圧の範囲を設定するために利用できる。

7. 実験3：適切な力空間に関する調査

7.1 目的

実験2の結果、人間が同時に制御が可能であろうペンを握る力と筆圧の力空間が明らかになった。そこで実験3では、力空間の中で人間が快適に制御できる領域を調査する。

7.2 被験者と実験環境

被験者は22～26歳の男性7名、女性2名の合計9名のボランティアで、8名は右利き、1名は左利きであった。全被験者とも3本の指を用いて正しくペンを握っており、実験1、2と同様に感圧センサの位置は被験者ごとに微調整した。ペンの握り方の指示も実験1、2と同様に行い、極端にペンを立てたり寝かせたりして持つ被験者はいなかった。

筆圧の測定には実験2と同様に感圧センサを1つ利用した。被験者はイスに座った状態でペンを握り、机の上に置かれたセンサをペン先でセンサに圧力を加えた。実験にはPS Stylus 以外に1,280×1,024ピクセルの解像度を持つ20インチのLCDを用いた。

7.3 タスク

握る力と筆圧の指定された領域をターゲットとして2つの力を制御するタスクを行った。

被験者には、被験者が加えている力とターゲットとなる力を示したPressure Map (図4)が提示される。Pressure Mapは握る力をX軸に、筆圧をY軸にとった力空間を表すマップである。被験者が加えている力を青色のカーソルで提示する。Pressure Mapは左下を原点とし、握る力と筆圧の両方が0のとき、カーソルは原点(左下)に配置される。被験者はカーソルの近傍に表示されているラベル表示によりいつでも座標軸と力とのマッピングを確認することができる(図4)。Pressure Mapは800×800ピクセルで、握る力と筆圧ともに1,024段階のうち、800段階(0-799)を800ピクセルにマッピングした。図3より、800

段階以上の筆圧はほとんど利用できないことが分かるため、このように設計した。Pressure Mapは縦横に5分割されており、合計25の矩形が存在する。これらの矩形が被験者が選択するターゲットとなる。Pressure Map上に描かれている赤色の曲線は、実験2で求めた、人間が同時に制御可能なペンを握る力と筆圧の境界を示す。曲線の上側領域にあたる力を加えることは困難なため、面積の半分以上が曲線の上側にある3つの矩形はターゲット候補から外した。そして、左上から順番に1-22の番号を割り振った。

タスクは2種類あり、それらの違いは試行開始時のカーソルの位置である。タスク1では、カーソルがPressure Mapの原点にある状態から試行を始め、タスク2ではカーソルが右上、すなわち握る力と筆圧が最大の状態から試行を始める。Grippingと筆圧を両方同時に利用するアプリケーションを実際に利用するシーンでは、入力開始時の2つの力の大きさは一定ではない。そこで、入力開始時の力の大きさに依存して快適に入力ができる領域が変化するかどうかを調べるために2種類のタスクを用意した。

実験が始まると、まず被験者はカーソルを開始位置に合わせる。すると、ターゲットが提示されるので、被験者は握る力と筆圧を調節してターゲットにカーソルを合わせる。カーソルがターゲット内に入るとターゲットの色が変化するため、被験者は視覚的フィードバックを基に力を制御できる。カーソル内でKeepingを行うと、そのターゲットが選択される。これをターゲットの数、すなわち22回行う。ターゲットの提示順はLatin squareを用いてバランスをとった。各被験者はこれを3回繰り返した。

7.4 パフォーマンスの測定

ターゲット選択時間(ST)とカーソルの移動距離(CM)の2つの観点から評価を行った。STは素早さ、CMは容易さを示す指標として利用する。開始時のカーソル位置とターゲット間の直線距離はターゲットごとに異なるため、STとCMをそのまま利用できない。そこで、我々は開始時のカーソル位置とターゲット間の距離 D をターゲットごとに定め、STとCMそれぞれを D で割ることで距離の影響を解消した。タスク1の場合、距離には原点からターゲット矩形の左下の座標までのユークリッド距離を採用した。タスク2の場合、距離には右上の座標(800, 800)からターゲット矩形の右上の座標までのユークリッド距離を採用した。そして、1つのターゲット矩形の辺の長さを1としたときの各ターゲットのユークリッド距離に1を加えたものを距離 D とする。これは原点を含むターゲットの距離を1とするためである。たとえば、タスク1でのターゲット14の距離は $D = 1 + \sqrt{2}$ 、ターゲット20の距離は $D = 3$ である。

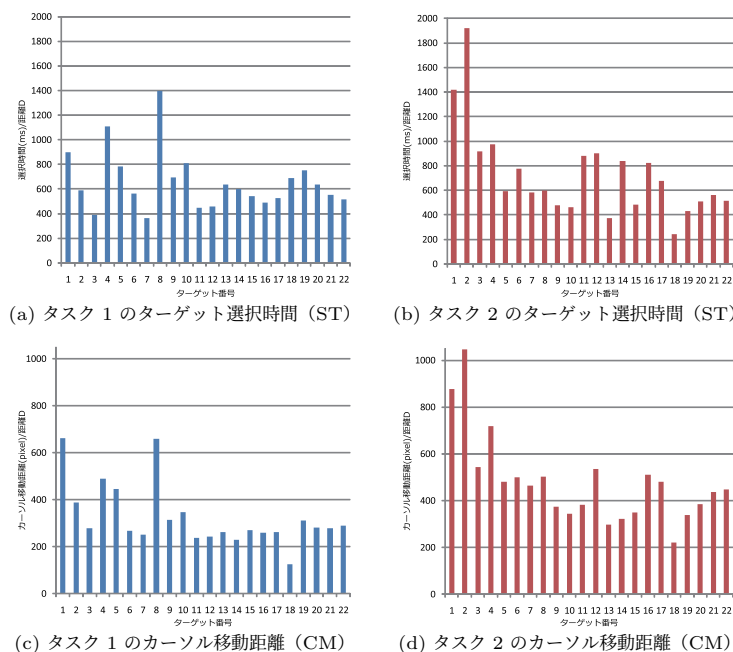


図 5 実験 3 の結果

Fig. 5 Results of experiment 3.

7.5 結 果

$\pm 2\sigma$ を超える 61 の計測値を外れ値としてデータセットから取り除いた。

ターゲット選択時間の分析

まず、タスク 1 とタスク 2 の 22 のデータセットについて相関を調べた。その結果、ターゲット選択時間 (ST) には相関は見られなかった ($r = -0.008$)。図 5(a) より、タスク 1 では 1, 4, 8 の 3 つのターゲット選択に多くの時間を費やしていることが分かった。また、図 5(b) より、タスク 2 では 1 と 2 の 2 つのターゲット選択に多くの時間を費やしていることが分かった。

さらに、選択に時間がかかった 1, 2, 4, 8 の 4 つのデータセットとそれ以外の 18 のデータセットにわけ、それぞれについて相関を調べた。その結果、1, 2, 4, 8 のデータセットには負の強い相関が見られた ($r = -0.996$)。もう一方には、やや弱い負の相関が見られた

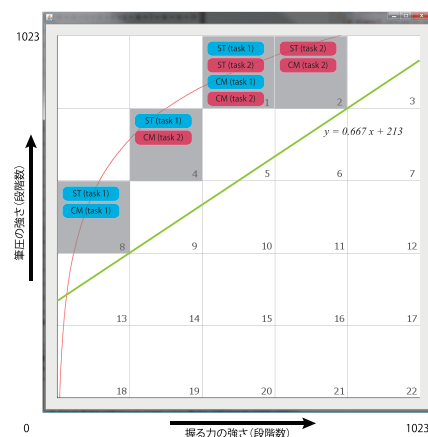


図 6 Pressure Map 上に選択が困難な 4 つのターゲットを示す

Fig. 6 Four difficult targets to select on pressure map.

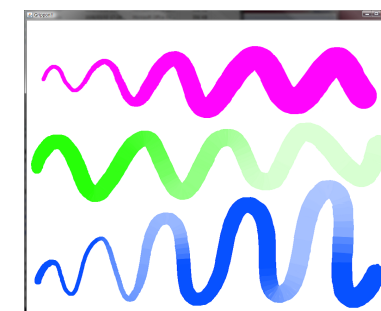


図 7 Gripping と筆圧を用いて描いた線。上の線は筆圧のみ、中央の線は握る強さのみ、下の線は両方を変えながら描いた

Fig. 7 A screenshot of gripping brush. The upper line is drawn while controlling only pen pressure, the middle line is drawn while controlling only gripping pressure and the lower line is drawn while controlling both gripping and pen pressure.

($r = -0.623$).

カーソル移動距離の分析

まず、我々はタスク 1 とタスク 2 の相関を調べた。その結果、カーソル移動距離 (CM) には相関は見られなかった ($r = 0.585$)。図 5(c) より、タスク 1 では 1 と 8 のターゲット選択にカーソル移動が多いことが分かった。また、図 5(d) より、タスク 2 では 1, 2, 4 のターゲット選択にカーソル移動が多いことが分かった。

さらに、選択に時間がかかった 1, 2, 4, 8 の 4 つのデータセットとそれ以外の 18 のデータセットにわけ、それぞれについて相関を調べた。その結果、1, 2, 4, 8 のデータセットには負の弱い相関が見られた ($r = -0.625$)。もう一方には、相関は見られなかった ($r = 0.323$)。

7.6 考 察

ST と CM の結果を解析した結果、両方において 1, 2, 4, 8 の 4 つのターゲット選択が難しいことが分かった。4 つのターゲットの位置を図 6 の Pressure Map に示す。図 6 を見ると、選択が困難なターゲットはすべて実験 2 で求めた曲線に沿ったものであることが分かる。つまり、この矩形領域に相当する力を人間が加えることは時間がかかり、簡単には

行えない。また、4つのターゲットに関してはタスク1とタスク2の間に負の相関が見られた。これは、入力開始時の力の大きさにより、選択が困難な場所が異なることを示す。しかしながら、どちらの場合にもその場所は曲線に沿っているため、やはりこれらの領域は選択が難しいといえる。よって、これらの領域をインタラクションに利用することは望ましくない。一方、それ以外の領域にはタスク1とタスク2の間に相関は見られなかったが、ある程度素早く容易にターゲットを選択できている。よって、これらの領域はインタラクションに利用可能であると思われる。

実験の結果、25の領域に分割された力空間のうち、物理的に入力が困難な3領域、および選択が困難であると判明した4領域を除いた18の領域では、握る力と筆圧を組み合わせた操作が容易に行えることが分かった。つまり、握る力と筆圧の2つの力を自由に制御できる力空間は十分に広いことがいえる。よって、Grippingと筆圧を組み合わせて2つの連続値を同時に入力するインタフェースの実現が可能であることが示された。

今回、我々はGrippingと筆圧を組み合わせた操作が可能であることを示したが、握る力の大きさによって加えることができる筆圧の範囲が異なるため、筆圧のある範囲の連続値の入力として利用するためには補正が必要である。そのため、実験結果に基づいて、握る力が x のときに入力できるであろう最大の筆圧を $y = 0.667x + 213$ という式で表現することにした。これはターゲット2と8の右下の座標を線形に結ぶ直線(図6中の緑の直線)の式である。実際には、この式が示す y よりも大きい筆圧を加えることも可能な場合もあるが、個人差を考慮し、かつアプリケーションの実装を簡単にするためにこの式を採用した。我々はこの式を用いてアプリケーションをデザインし、9.2節で紹介するGrippingと筆圧を組み合わせた操作を実現した。

8. 議 論

実験2, 3の結果、Grippingと筆圧の組合せ操作が可能であることが分かった。しかしながら、この実験では被験者全員が20代であったため、これらの結果が高齢者や子供にも適用できるとは限らない。高齢者や子供を対象とした実験は今後の課題の1つであるが、少なくとも20代の男女でポジティブな結果を得られたことには意義がある。

また、今回の実験ではGrippingを長時間使用することによる順応の影響について検証を行っていない。Grippingだけでなく、力を加えることによるインタラクションを考える場合、順応を考慮に入れたデザインは必要不可欠であると思われるので、これについては今後の課題とする。

9. アプリケーション

実験結果を基に、我々はいくつかのアプリケーションをデザインし、実装した。

9.1 離散的入力のアプリケーション

実験1の結果、Grippingは最大で6の離散的入力として利用できることが分かった。Grippingによる離散的入力はペン先がディスプレイから離れた状態で操作できるため、タップやストローク操作とは独立した入力操作を提供できる。これは筆圧やバレルボタンでは実現できない、Grippingだからこそ実現可能な操作である。

Gripping ランチャ

Gripping ランチャは6つの離散値に対して、アプリケーション固有の機能などを割り当て、キーボードのショートカットキーのような操作を実現するアプリケーションである。ペン入力インタフェースでメニューバーや小さなメニューアイコンなどのメニューインタフェースを操作することは容易ではない。Gripping ランチャは利用頻度の高いアプリケーションの起動や、アプリケーション内で利用頻度の高い機能の呼び出しなどに利用できる。我々はペイントツールでの機能呼び出しのショートカットとして実装した。

また、小画面デバイスの場合、画面領域は貴重であり、メニューアイコンの表示などに領域を浪費することは望ましくない。Gripping ランチャを小画面デバイス向けにデザインすることで、表示を最小限にしたメニューシステムを構築できる。

9.2 連続的入力のアプリケーション

実験2, 3の結果、Grippingと筆圧を同時に利用した入力操作が可能であることが分かった。つまり、操作を中断せずに2つのパラメータを同時に変更しながら作業を行うことができる。このような操作が行えるようになることもGrippingの大きな特徴である。

Gripping brush

いくつかのペイントツールでは筆圧をサポートしており、ストロークを行いながら筆圧により線幅を変更できる。我々が開発したペイントツールも同様に筆圧で線幅を変更でき、筆圧を強くするにつれて線幅が太くなる。さらに、Grippingにより線の彩度を変更できるようにした。強くペンを握ると彩度が低くなり、弱く握ると彩度が高くなる。Grippingと筆圧を用いると、図7のような線が描ける。図7の上の線は筆圧のみ、中央の線は握る強さのみ、下の線は両方を変更しながら描いている。それぞれの割当てでは変更することができ、グラデーションの制御や透明度の制御にも割り当てることができる。ストローク操作を行いながら2つのパラメータを同時に変更する操作はGrippingを開発したからこそ実現可能に

なった操作である。

本ツールの試用に際して、「両方の力を同時に制御することは難しいと予想していたが、予想に反して簡単であった」などというコメントが得られた。アプリケーションレベルでの実用性に関する厳密な評価は今後行う必要があるが、この試用から Gripping と筆圧の組合せ操作のアプリケーションレベルでの高い実用性が期待できることが分かった。

行動推定

これは無意識的なペンを握る力を連続的入力にとらえたアプリケーションである。システムはつねにペングリップにかかる圧力を 1,024 段階で検出している。よって、利用者が意識的に加える力だけでなく、無意識的に加えている握る力も検出できる。このような無意識的な力も含めてペンを握る力の時間変化を解析することで、利用者の行動を推定可能ではないかと考えている。たとえば、利用者が筆を休めているのか、描画作業を始めようとしているのかを検出できる可能性がある。これが可能になれば、利用者が特別な操作をしなくても必要なサポートを自動的に提供することができる。たとえば、キャンパスの表示内容（レビュー表示/描画用グリッド表示など）の自動的な切替えなどが実現できる。

10. ま と め

本論文では、ペンを握る動作を利用したインタラクション手法、Gripping を提案した。そして、ペンを握る力を用いたインタラクションの実現可能性について、離散的入力と連続的入力の 2 つの観点から検証を行った。その結果、Gripping を離散的入力として用いる場合、ペンを握る力は 6 段階に使い分け、ターゲット選択のためのトリガ操作には握る力を一定時間維持する操作が適当であることが分かった。また、Gripping を連続的入力として用いる場合には、Gripping と筆圧を組み合わせた操作も実現可能であることが分かった。さらに、これらの結果を基に、いくつかのアプリケーションのデザインを示した。

参 考 文 献

- 1) Bi, X., Moscovich, T., Ramos, G., Balakrishnan, R. and Hinckley, K.: An Exploration of Pen Rolling for Pen-based Interaction, *UIST'08*, pp.191–200 (2008).
- 2) Cechanowicz, J., Irani, P. and Subramanian, S.: Augmenting the Mouse with Pressure Sensitive Input, *CHI'07*, pp.1385–1394 (2007).
- 3) Harrison, B.L., Fishkin, K.P., Gujar, A., Mochon, C. and Want, R.: Squeeze Me, Hold Me, Tilt Me! An Exploration of Manipulative User Interfaces, *CHI'98*, pp.17–24 (1998).

- 4) Kandel, E.R., Schwartz, J.H. and Jessell, T.M.: *Principles of Neural Science*, McGraw-Hill (2000).
- 5) Miura, M. and Kunifuji, S.: RodDirect: Two-Dimensional Input with Stylus Knob, *MobileHCI'06*, pp.113–120 (2006).
- 6) Mizobuchi, S., Terasaki, S., Keski-Jaskari, T., Nousiainen, J., Ryyanen, M. and Silfverberg, M.: Making an Impression: Force-Controlled Pen Input for Handheld Devices, *CHI'05*, pp.1661–1664 (2005).
- 7) Pintaric, T., Kment, T. and Spreicer, W.: SqueezeOrb: A Low-Cost Pressure-Sensitive User Input Device, *VRST'08*, pp.269–270 (2008).
- 8) Ramos, G., Boulos, M. and Balakrishnan, R.: Pressure Widgets, *CHI'04*, pp.487–494 (2004).
- 9) Rekimoto, J. and Sciammarella, E.: ToolStone: Effective Use of the Physical Manipulation Vocabularies of Input Devices, *UIST'00*, pp.109–117 (2000).
- 10) Ren, X., Yin, J., Zhao, S. and Li, Y.: The Adaptive Hybrid Cursor: A Pressure-based Target Selection Technique for Pen-based User Interfaces, *INTERACT 2007*, LNCS4662, pp.310–323 (2007).
- 11) Siio, I. and Tsujita, H.: Mobile Interaction Using Paperweight Metaphor, *UIST'06*, pp.111–114 (2006).
- 12) Suzuki, Y., Misue, K. and Tanaka, J.: Pen-based Interface Using Hand Motions in the Air, *IEICE Trans. Inf. & Syst.*, Vol.E91-D, No.11, pp.2647–2654 (2008).
- 13) Tian, F., Xu, L., Wang, H., Zhang, X., Liu, Y., Setlur, V. and Dai, G.: Tilt Menu: Using the 3D Orientation Information of Pen Devices to Extend the Selection Capability of Pen-based User Interfaces, *CHI'08*, pp.1371–1380 (2008).
- 14) 川端一輝：認識ペンによる直筆・オンライン署名同時生成方式認証システムの開発，「IPA 創造的ソフトウェア育成事業」最終成果報告発表会論文集 (1998).
- 15) 山本景子，金谷一郎，佐藤宏介：ペンの把持情報を利用したペンタブレット型ドローイング支援インタフェース，インタラクション 2010 論文集，pp.239–242 (2010).
- 16) 中橋佑介，福井幸男，西原清一，佐藤 滋，北島宗雄：操作時の把持力を利用したポインティングデバイスの研究，情報処理学会第 67 回全国大会講演論文集，pp.4:13–4:14 (2005).

(平成 22 年 6 月 28 日受付)

(平成 23 年 1 月 14 日採録)



鈴木 優 (学生会員)

1984 年生。2006 年京都産業大学工学部情報通信工学科卒業。2008 年筑波大学大学院システム情報工学研究科コンピュータサイエンス専攻博士前期課程修了。現在、筑波大学大学院システム情報工学研究科コンピュータサイエンス専攻博士後期課程在学中、およびグローバル COE プログラム「サイバニクス：人・機械・情報系の融合複合」研究補助員。ヒューマン・コンピュータ・インタラクションに興味を持つ。ACM, 電子情報通信学会, ヒューマンインタフェース学会各会員。



三末 和男 (正会員)

1984 年東京理科大学理工学部卒業。1986 年同大学大学院理工学研究科修士課程修了。同年富士通株式会社入社。思考支援システムや視覚的テキストマイニングの研究開発に従事。2004 年から筑波大学に勤務。現在、筑波大学大学院システム情報工学研究科准教授。情報可視化, 特にネットワーク情報や多次元時系列情報の可視化に興味を持つ。博士 (工学)。ACM, IEEE, 電子情報通信学会, 人工知能学会, 日本ソフトウェア科学会各会員。



田中 二郎 (正会員)

1975 年東京大学理学部卒業。1977 年同大学大学院理学系研究科修士課程修了。1984 年米国ユタ大学大学院計算機科学科博士課程修了。Ph.D. in Computer Science. 1985 年から 1988 年に (財) 新世代コンピュータ技術開発機構において主任研究員として第五世代コンピュータ核言語の技術開発に従事。1993 年から筑波大学に勤務。現在、筑波大学大学院システム情報工学研究科教授。ユビキタスコンピューティングや未来の情報環境に興味を持つ。ACM, IEEE, 電子情報通信学会, 人工知能学会, 日本ソフトウェア科学会各会員。2007 年から 2009 年まで本学会理事。