

画面内外を繋ぐ連続的なスクロールに関する検討

進士 奈菜^{†1} 高嶋 和毅^{†1} 北村 喜文^{†1}

概要: 本稿では、モバイルディスプレイなど限られたサイズのスクリーン上で、スクロール操作を画面外に拡張することができる連続的なタッチスクロール操作を提案し、検討する。本手法では、トラッキングシステムによりデバイスの周囲空間での指の動作を取得することで、タッチスクロール操作におけるユーザの運動領域を拡張し、長距離スクロールにおけるクラッチ数を減らすことができる。これにより、指や手が画面上を覆う時間（オクルージョン）を減らし、安定した画面の情報探索や、素早い画面外コンテンツの獲得を実現することができる。本研究では、大画面タッチスクリーンとモバイルタッチスクリーンの2つの代表的なスクリーン環境において、連続的なスクロールの基礎的なパフォーマンスを既存手法（ドラッグ、フリック）との比較を通して検証した。前者の環境では、スクリーン内に表示されたアプリケーションウィンドウの周囲にウィンドウ内と同一のタッチスクリーンが存在しており、これによりウィンドウ外での指の動きを計測する。後者では、スクリーン周囲は空中であるため、外部の3次元トラッキングシステムにより指の動きを計測した。ユーザスタディの結果、連続的なスクロールは既存手法よりもクラッチ回数、操作指によるオクルージョン、操作負担を減らすことができ、また見落としの少ない情報探索ができたことが分かった。また、実験結果をもとに連続的なスクロールの設計指針や実装例についても議論した。

An Empirical Study of Scroll Interaction Beyond Screen Edge

NANA SHINSHI^{†1} KAZUKI TAKASHIMA^{†1} YOSHIFUMI KITAMURA^{†1}

Abstract: We explore a scroll interface that can be continued beyond the screen edge by tracking a moving finger in around-screen space. Basic idea of this scroll technique is to extend the user's motor space around the screen or device by using a feasible tracking system. The extended motor space could contribute reducing the chance of clutching and increasing content visibility during casual and smooth content browsing. We empirically validated the scroll technique by comparing with traditional scroll interfaces (Drag and Flick) in two major screen conditions. The first screen condition was a large flat touch display where a non-full-screen window was displayed in its center and surrounding touch space was used for detecting user's finger movement to continue the scroll action beyond the screen edge. The second condition was a mobile device with an external 3D tracking system that enables to keep tracking user's mid-air moving finger in order to maintain the scroll action. Our study shows this scroll technique beyond the screen edge provides many advantages, such as less clutching actions, occlusion-less content observations, and fast and easy off-screen acquisitions and also provided some design implications for future scroll technique beyond the screen edge.

1. はじめに

タッチスクロールは、スクリーン上へのタッチおよびドラッグによってスクリーン上に表示する内容を幾何学的に遷移（移動）させるものであり、主に、スクリーン外のコンテンツをスクリーン内に取得するためになされる。このタッチスクロールは、小さいディスプレイ領域しか持たないモバイルデバイスを始め、大画面ディスプレイにおいても広大な情報空間を持つコンテンツを扱う際に極めて頻繁に行われる操作である。

通常のタッチスクロールでは、スクリーン上の指の動きと表示コンテンツの動きは1対1に対応している。タッチスクリーンの面積は表示すべきコンテンツの大きさに対して小さいことが多いため、コンテンツが大きくなるほどに（スクロールする距離が長くなるほどに）、指をタッチスクリーン内で置き換えるクラッチという操作が多くなる。これは、非常に非効率な動きである上に、画面上に指がある時間や間違っただけでコンテンツをタップする誤動作が増えるな

ど様々な問題を引き起こす。最近では、1対1にマッピングされたドラッグ操作だけではなく、クラッチを減らすために物体の慣性運動を考慮したフリックも一般的になってきているが、これは細かな位置制御に向いていない等の問題があり、特に画面を詳細に観察しなければいけないタスクには向いていない[8]。クラッチは、対象とする情報のサイズとその情報コンテンツを操作するための運動領域のギャップから生じるものである。マウスやタッチ패드などの間接指示入力デバイスを利用する場合は、C-D比（Control-Display）を調節してこの問題を軽減することができたが [11]、最近では、ディスプレイを直接タップする直接指示をするスマートフォンのユーザも劇的に増え、大量のクラッチによって引き起こされた指の腱鞘炎が報告されるなど、この問題はより深刻になっている [22]。

マウスやタッチ패드においても、クラッチを減らすとする研究は多い[5]。最近では、タッチスクロールにおけるクラッチの軽減を図ったシステムが多く提案されている。例えば、画面外のオブジェクトの位置情報の手がかりを画面内に提示して無駄なスクロールを減らす方法[2]や、音声

^{†1} 東北大学 電気通信研究所, Research Institute of Electrical Communication, Tohoku University

入力によるスクロールの継続・停止コマンド[20]等が検討されているが、クラッチを発生させている根本的な問題である運動領域の狭さに着目し、それを物理的に拡張させるという試みはない。また、2章でまとめているように、デバイスの周囲をインタラクション領域として利用する研究 ADI (Around-Device Interaction)についても近年盛んに行われているが、タッチスクロールにおけるクラッチを取り上げたものはなく、画面内と画面外を連続的につないだインタラクションについては検討されていない。

本研究では、クラッチ回数の増加を解消するために、デバイス周囲空間における指の位置をセンシングすることによりユーザの運動領域を拡張し、従来画面上でしか行えなかったドラッグによるスクロール操作を、画面内外で連続的に行うことができるスクロール方法を提案する（以後、連続スクロール）。連続スクロールは、2つの代表的な利用環境が想定される。1つ目は、デスクトップ GUI 環境におけるフルスクリーンでないアプリケーションウィンドウであり、連続スクロールを適用すると、タッチスクリーンが指をトラッキングできる範囲内で、ウィンドウサイズを越えた連続的なスクロール操作が実現できる（図 1(a)）。これは、既に市販されている GUI でもいくつか見られるスクロールであり、最も一般的な例として、Windows 8.1 が挙げられる。しかしながら、これは比較的新しいスクロールスタイルであり、HCI の分野で実験的な詳細な調査はなされていない。2つ目は、タブレットなどのモバイルディスプレイデバイスである。モバイルの小さいサイズを保持しながら、デバイスの周囲空間における指の動きをトラッキングすることで、運動領域を拡張し、画面内外を繋ぐ連続的なスクロール操作を可能とする（図 1(b)）。連続スクロールを利用する最大の利点はクラッチ回数の減少であり、それによって操作負荷の軽減だけではなく、クラッチという余計な運動を減らすことで素早いスクロールが可能であり、また指が画面外へ移行した後はオクルージョン（指や手による画面の遮蔽）が発生しないために連続的で慎重な情報閲覧についても効果的である。

本稿では、連続スクロールについて、従来手法であるドラッグ、フリックと比較してユーザの操作がどのように改善されるのか実験的に調査し、連続スクロールの持つ基本的な特徴と、デザインに関する知見を議論する。

2. ADI (Around Device Interaction)

モバイルデバイスの運動領域を画面外へ拡張しようとする研究 ADI (Around-device interaction) が近年活発になってきた。SideSight[4]では、デバイスの左右の側面に近接距離センサを配列して、デバイスの周囲（近接）空間での指の位置情報を取得することで、間接的にデバイス内の表示コンテンツを操作できる。Hoverflow[15]もほぼ同様であるが、赤外線センサの配列を工夫し、スクリーン上空での空



(a) 大画面タッチスクリーン上



(b) モバイルスクリーン上

図 1 画面内外にわたる連続スクロール

間的なジェスチャ入力が可能である。Surround-sec[23]は、スマートフォン内蔵カメラにパノラマレンズを取付け、システムがデバイス周囲の環境や指の動きを画像処理により認識できる。磁気を用いたワイヤレスセンシングにより、モバイルデバイス周囲の空中で指によるポインティングを可能にした研究もある[10][21]。これらの研究はいずれも、デバイスの周囲空間におけるユーザの操作指のトラッキングや動作認識技術に焦点を当てたものである。

ADI におけるインタラクションパフォーマンスの基礎的検討もなされているが、外部の高精度 3D モーションセンサや大画面タッチスクリーンを用いたシミュレーション環境を利用するものが多い。例として、画面外のターゲットへのポインティング[7]や、デバイスの周囲空間へコンテンツを配置（保管）する研究[9]、さらには、ズームとスクロールに関するナビゲーションタスクの検討などがある[13]。これらの研究は、ADI における基礎的な操作を実験的に評価するものだが、画面内と画面外をシームレスに繋げたスクロールについての提案はなく、また、クラッチという問題について取り組んでいない。

3. 連続スクロールの特徴と利用シナリオ

連続スクロールは、クラッチ回数の減少を図ることで、様々な利点が得られる。例えば、モバイルデバイスにおける連続スクロールでは、スクロール初期の運動は物理的なタッチスクリーンによって支えられた直感的かつ安定的なものであり、後半（画面外へ指が出た後）の位置調整に関わるフィードバック運動では、オクルージョンの少ない画面閲覧にスムーズに移行できるため、長距離スクロールに

おける画面の視認性は他の既存手法より高くなる。

モバイルデバイスを利用する場合は、そのモバイル性や小型性が活きる場面（例えば公共空間や電車など）では、連続スクロールを作動させることは望ましくない。ユーザが十分なスペースが確保でき、かつコンテンツを詳細に閲覧する（例えば長文を読む、地図を詳細に検証する）機会が生じた際に利用始めることが望ましい。連続スクロールは、既存ドラッグのシステムと非常に高い互換性があり、画面内においてはフリックとの共存も可能であるため、そのような状況に応じた使い分けにも対応可能と考えられる。ただし、本論文では、実装に関してはプロトタイプの議論に留めているため、実用上のスクロールモードの切り替えなどについては別途詳細な設計と検証が必要である。

4. 連続スクロールの検証実験

4.1 実験概要

本実験では、連続スクロールが一般的なスクロールタスクにおいてどのようなパフォーマンスを持つのかを評価する。評価指標は、一般的なタスク完了時間とエラーだけではなく、クラッチ回数、視認性（オクルージョンの割合）、作業負荷やオーバーシュートなどについて、スクロールにおける重要な複数の測定項目を用いた。

連続スクロールは、利用しているデバイスやアプリケーションウィンドウにおける周囲の状況やオブジェクトの存在などに依存する可能性が高いが、本実験は、スクロール操作に影響する周囲の障害物など（例：壁、コップ、スクリーンを持つ手、その他）の外的要因については考慮しない。加えて、モバイルスクリーンでの連続スクロール実現するために、外部の高精度 3D モーショントラッカを用いた。これは、2 章で述べたように利用可能な 3D トラッキングシステムの開発例はいくつかあるが、いずれも本実験で目的とする連続スクロールという新しいスクロールシステムの基礎的な実験には精度が不十分であるためである。

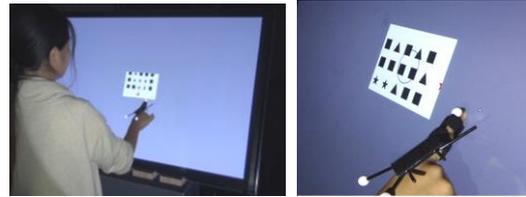
4.2 実験デザイン

本実験は、環境（大画面、モバイル）、タスク（ターゲット獲得、視覚探索）、スクロール手法（連続スクロール、ドラッグ、フリック）、ターゲット距離（短（9cm）、中（17cm）、長（24cm））の 4 つの実験要因を用いた。以下では、4 要因について説明する。

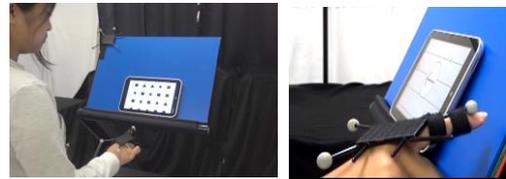
(1) 環境

図 2 に、本研究で想定した 2 つの主な連続スクロール利用環境を示す。大画面とモバイルという代表的なこの 2 環境を実験要因として扱い、両者を比較することで、モバイルスクリーンにおける空中での操作の難しさなどを議論することができる。

大画面タッチスクリーンを用いた実験環境では、50 インチ（w:111 × h:63 cm）のタッチスクリーン（Panasonic



(a) 大画面タッチスクリーンと指のトラッキング



(b) モバイルスクリーンと空中の指のトラッキング

図 2 実験の様子

PDP TH-P50ZT5, PQ-LAB's touch glass) を用いた。これを鉛直軸に対して 30° 傾けて設置した。この環境は、大画面上において、サイズの制限されたアプリケーションウィンドウをスクロール操作する状況をシミュレーションしている。簡単のため、操作対象のアプリケーションウィンドウは 1 つだけであり、図 2 (a) に示すように長方形として画面中央に表示される。その長方形の大きさはモバイルスクリーンの実験環境で用いる 8 インチのタブレット（w: 10.8 × h: 17.2cm）と同じサイズとした。白い長方形外の領域は画面外を意味し、灰色で塗りつぶして実験用のコンテンツは何も表示されないようにした。タッチ操作が画面内（白い長方形）から外（灰色）へ移行する時にも物理的なベゼルや突起物はなく、画面内外での指のトラッキング方法は PQ Lab driver と Windows 8 APIs を用いて同一である。

実験参加者はスクリーン正面に向かって立ち、右手の人差し指または中指（実験参加者が選択可能）に 3 次元モーションセンサのマーカを操作や画面閲覧の邪魔にもならないように装着してタッチスクリーン上のコンテンツを操作した（図 2 (a)）

本実験において、タスク実行、実験用コンテンツ表示、3 次元モーションセンサからの指の位置データ取得を管理するソフトウェアを C# で実装した。このソフトウェアは、マーカを持つ指の位置の 3 次元情報を 60Hz で取得し、クラッチ回数、スクロールにあたっての指の総移動距離やオクルージョンの時間なども算出する。

モバイルスクリーンを用いた実験環境では、大画面タッチスクリーン環境で設けた白い長方形と同じ大きさの 8 インチのタブレット PC（Toshiba Dynabook Tab）を用い、鉛直軸に対して 30° 傾けて設置した。大画面タッチスクリーンの環境と同様に、実験参加者はタブレットに向かって立ち、右手の人差し指または中指に 3 次元モーションセンサのマーカを装着してタッチスクリーンのコンテンツを操作した（図 2 (b)）。画面内での指先の動きはタブレットに搭載されているタッチスクリーンによって計測され、画面外

での指先の動きはその指に装着したマーカの位置を計測した。本実験で用いたタブレットには 1.2cm (水平方向) あるいは 2.0cm (垂直方向) のベゼルがあったが、その影響は無視し、操作指が画面の端に到達した直後にデバイスのタッチスクリーンから 3D モーションセンサによる指先位置の計測方法を切り替えた。

(2) スクロール手法

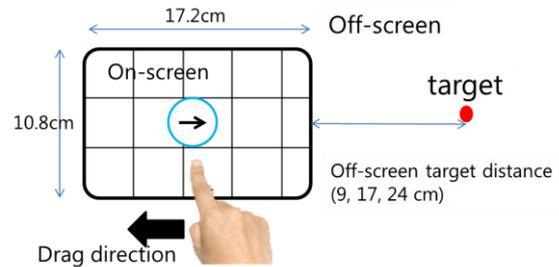
本実験では、最も単純なスクロール方法であるドラッグと、現在市販の商品 (例: Window8, iOS, Android) や関連研究 ([1][16]) でも広く使われている慣性フリックを比較対象として用いた。フリックについては、スクロールに関する最新技術 CycloPan と同等の効率であったとも報告されており [16]、比較のベースラインとしては妥当である。ただし、フリックは様々な実装が存在し、パラメータの設定に関する研究も行われているが [1][17][18]、本実験では WPF APIs を用いてパラメータを調整することにより、タブレットの業界で高いシェアをもつ iPad でのフリックの挙動と同じになるように実装した。実際に、パイロットから本実験まで全てを通して、実験用に実装したフリックの挙動について違和感を抱いた参加者はいなかった。ドラッグの条件では、画面表示の移動量と、指で画面上をドラッグする距離の比は 1 対 1 である。

モバイルスクリーンでの実験環境において、連続スクロールを行う時は、空中でスクロール操作の終点をシステムに伝える必要がある。いくつか方法が考えられるが、本実験ではジェスチャを用い、操作指を手前 (体方向) に閾値 5 mm/sec を超える速さで動かした (引きあげるような動き) 場合にスクロール操作を終えたと判定することとした。この閾値速度は、参加者が意図せずにスクロール操作を終えてしまうことを防ぐために、パイロット実験を踏まえて決定した。

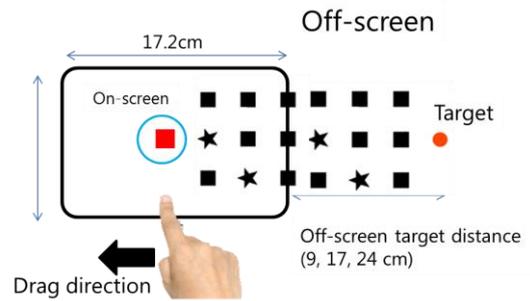
(3) タスク

スクロールは基本的には画面外のものを獲得するために行われるものであるが、目的によってスクロールの速さや操作の方法は変わる。本実験では、簡単な画面外ターゲット獲得タスクと、より画面の理解を必要とする視覚探索タスクの 2 つを用いた。

ターゲット獲得タスクとは、ユーザが画面外のターゲットの大まかな位置を知っている時、または何がターゲットであるかが明らかである場合における、ターゲットの視覚による獲得を想定したものであり、目的地に素早く到達することを重視したスクロールである。実験では、図 3(a) に示すように、タスク開始時にターゲットが存在する方向が画面中央に矢印で示される。実験参加者は与えられたスクロール手法を用いて、画面外にある赤いターゲットを画面中央にある半径 2cm の青い輪の中に入れるという試行を繰り返す。ターゲットを画面内に獲得後にタップをさせるようなタスクも考えられるが、ウェブサイト、長文閲覧など



(a) ターゲット獲得タスク



(b) 視覚探索タスク

図 3 タスクデザイン

の状況を考えると画面をタップする頻度より、視覚的に情報を画面内に獲得する頻度の方が遥かに大きいため、本実験では視覚的なターゲットの獲得をスクロールの達成と定義し、このようなタスクを設定した。次に述べる視覚探索タスクも同様の考えに基づいている。

視覚探索タスクでは、文章を読みながらスクロールをしてゆく場合など、画面内の情報を注意深く得る必要があるときのスクロールを想定している。このタスクでは、3種類の黒いシンボル (正方形, 星形, 正三角形) が登場する。タスク開始時に、まず、赤色の記号が 1 つ画面中央にターゲットシンボルとして表示される。図 3(b) に示すように、黒色の三種のシンボルは、始点 (画面中央) から画面外のターゲットまでに、ランダムに見えるように敷き詰められており、実験参加者は、スクロールをしながらターゲットシンボルと同じ形の記号の個数を数える。そして、ターゲット獲得タスクと同様に、赤色のターゲットを画面中央にある青い円に入れた時にタスクが終了となり、その後、数えた記号の数を口頭で実験者に伝える。黒色のシンボル群の中にターゲットシンボルが含まれる出現数は、少ない場合 (2-4 個) と多い場合 (5-7 個) の 2 つのレベルを用意して、これらのレベルの出現数はバランスを取った。このタスクでは、画面全体を注意深く閲覧する必要があり、オクルージョンについての問題を議論するために設定した。

(4) ターゲット距離

ターゲット距離は、スクロールに関する研究では手法の有効範囲を決定づける重要な要因である [11]。本実験では、最長の条件は、先行研究 [9] が提案する ADI の有効範囲として 40cm 以内にすべきという知見を採用した。最短の条件

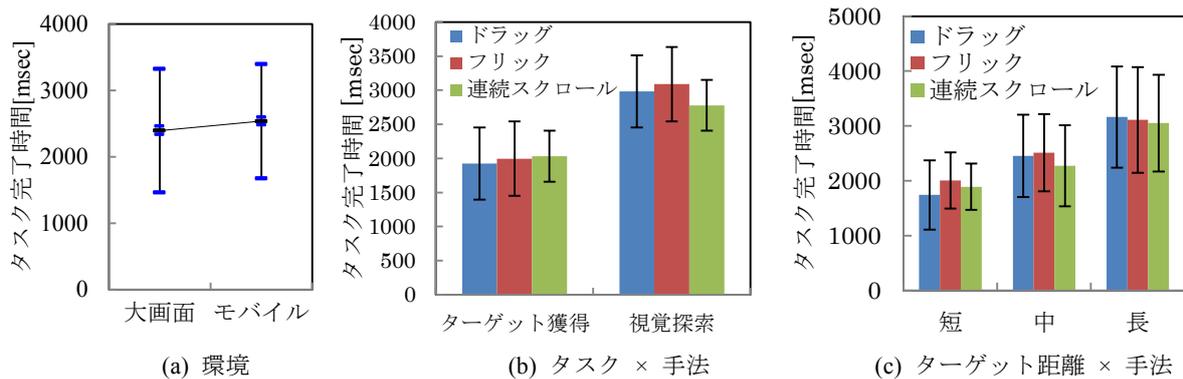


図 4 タスク完了時間

は、本実験で用いる 8 インチデバイスにおいて、どの方向に対しても、1 回のドラッグ（クラッチなし）ではタスクを完了できない状態を考え決定した。その結果、図 3 示すように、画面内とするスクリーンの端から赤色のターゲットは 9, 17, 24 cm の 3 つの距離に配置され、それぞれの条件のタスク終了に要する時間などを評価した。

4.3 実験手続き

実験参加者は、日常的にスマートフォンやタブレットを利用する、右利きの、21 歳～27 歳の 12 名(男性 8 名, 女性 4 名)の大学生および大学院生である。本実験は被験者内実験であり、全 6,912 データ (12 人 × 2 環境 × 2 タスク × 3 手法 × 3 距離 × 16 反復) を取得した、ここでの反復回数は、ターゲット出現方向の 4 方向 (上下左右) を 4 回反復したものである。

実験順序は、参加者 12 人に対して、環境とスクロール方法における 6 パターンを軸にしてカウンターバランスを取った。ターゲット距離および反復要因であるターゲット出現方向はランダムに発生した。実験に入る前に、実験参加者がそれぞれのスクロール方法に対して操作に慣れるまで、最長 5 分間の練習時間を設けた。1 つの実験環境、スクロール方法での実験が終わる度に、実験参加者には主観評価と NASA-TLX のアンケートに答えるように求めた。実験は 1 人あたりタスク遂行、アンケート、十分な休憩を全て含めて約 120 分かった。

5. 実験結果

全データのうち、スクロール回数とタスク完了時間に対して Grubbs-Smirnov 検定を用いて、1.2% を外れ値として取り除いた。この異常値の原因は、実験参加者がターゲットを完全に見失ってしまうことがあったことと、タッチ検出のための PQLab と OptiTrack から照射される赤外線が干渉を起こすことがあったためである。いずれも稀であり、実験解析には問題とはならないと考えている。連続スクロールのパフォーマンスを評価するため、1 タスク毎に完了時間、スクロール回数、操作指の総移動距離、オーバーシュート判定、操作指によるオクルージョンと、環境及びスクロール方法毎に主観評価、NASA-TLX を取得し、それら

について、先に述べた四要因 (環境, タスク, スクロール方法, ターゲット距離) を用いて分散分析を行った。

本実験では、連続スクロールの操作は画面上でのみ始めることができる設定とした。そのため、実験参加者がデバイスの周囲空間の空中で意図しないタイミングで操作を終了してしまった場合には、再び画面上からスクロール操作を始めなければならない。これにより、タスク完了時間、スクロール回数は増加するが、画面内から外への連続的スクロールを検証する実験であるため、妥当な設定である。

5.1 各測定項目の結果

(1) タスク完了時間

分散分析の結果、タスク完了時間は、タスク ($F_{1,11} = 53.9, p < .001$), ターゲット距離 ($F_{2,22} = 470, p < .001$) に主効果が表れた。また、環境 × 手法 ($F_{2,22} = 12.6, p < .001$), 手法 × ターゲット距離 ($F_{4,44} = 59.7, p < .001$) において交互作用が確認できた。実験中の環境ごとのタスク完了時間の平均を図 4(a) に示す。この結果からは、大画面タッチスクリーンの方がモバイルスクリーンよりも操作が速く行われたことが分かる。得られたタスク × 手法, 手法 × ターゲット距離の交互作用の関係をそれぞれ図 4(b) と (c) に示す。これらの単純主効果について TukeyHSD の多重比較により検証した結果、連続スクロールは、図 4(b) より、視覚探索タスクにおいて、フリック ($p < .01$), ドラッグ ($p < .05$) よりも速く操作を完了することができたことが分かった。また、図 4(c) に示すように、ターゲット距離が 17cm である時にドラッグ及びフリックより操作が有意に速かった ($p < .01$)。

(2) スクロール回数

分散分析の結果、スクロール回数は、環境 ($F_{1,11} = 8.67, p < .050$), スクロール手法 ($F_{2,22} = 24.5, p < .01$), ターゲット距離 ($F_{2,22} = 463, p < .01$) に主効果が確認できた。また、タスク × ターゲット距離 ($F_{2,22} = 15.3, p < .01$), スクロール手法 × ターゲット距離 ($F_{4,44} = 32.1, p < .01$) において交互作用が見られた。環境 × タスク, タスク × 手法, 手法 × ターゲット距離の関係をそれぞれ図 5 に示す。得られた主効果および交互作用の単純主効果を TukeyHSD の多重比較により検証した結果、図 5(a) より、モバイルスクリーン

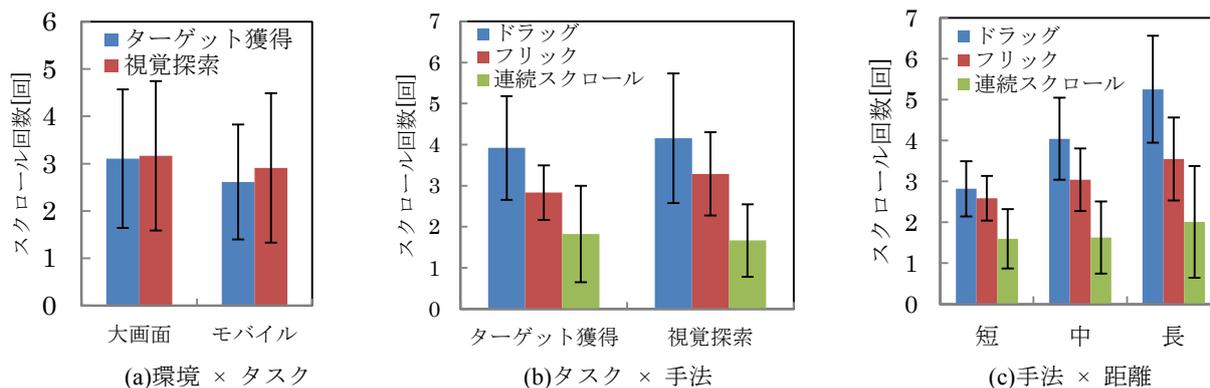


図 5 スクロール回数

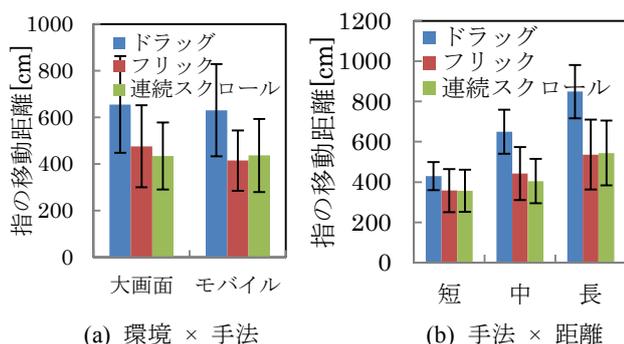


図 6 指の総移動距離

での操作では、ターゲット獲得タスクよりも視覚探索タスク遂行時に、スクロール回数が大きくなった ($p < .01$)。また、図 5(b)に示すように、連続スクロールがフリックやドラッグよりもスクロール回数が少ないことが確認できた ($p < .01$)。連続スクロールは、2種類のタスク間でスクロール回数に変化がないのに対して、ドラッグやフリックは視覚探索タスクにおいて、ターゲット獲得タスクよりスクロール回数が増加している ($p < .05, p < .01$)。また、図 5(c)に示すように、ターゲット距離が大きくなる程、ドラッグやフリックはスクロール回数も大きくなるのに対し、連続スクロールは短距離と中距離では変化がなかった。このことから、連続スクロールは短、中距離ではほとんどのタスクを1回のスクロール操作で終えていたことが分かる。長距離の条件では、実験参加者が空中で意図しない操作の終了してしまうことが何件もあり、それによってスクロール回数の平均値が増加したと考えられる。

(3) 指の総移動距離

本実験では1タスクを完了するまでの指の動きを、3D モーションセンサにより取得し、そのデータをもとに指の移動距離を算出し、分散分析を行った。この指の総移動距離とは、スクロール操作時、クラッチ動作時両方の指の移動距離を含んでいる。我々は、この測定値は、操作時の身体的操作負担を調べるための重要なものと考えて計測した。

指の総移動距離は、スクロール手法 ($F_{2,22} = 28.4, p < .01$)、ターゲット距離 ($F_{2,22} = 324, p < .01$)に主効果が確認できた。また、タスク × スクロール手法 ($F_{2,22} = 6.69, p < .01$)、

タスク × ターゲット距離 ($F_{2,22} = 32.2, p < .01$)、スクロール手法 × ターゲット距離 ($F_{2,22} = 15.3, p < .01$)、そして、スクロール手法 × ターゲット距離 ($F_{4,44} = 38.3, p < .01$)において交互作用が見られた。

これらの結果から主要な効果を見るために、環境 × スクロール手法、スクロール手法 × ターゲット距離の関係を示すグラフをそれぞれ図 6 に示す。全体を通して、ドラッグにおける指の総移動距離が1番大きく、フリックと連続スクロールの間には差がほとんど見られなかった。多重比較によると、連続スクロールとフリックは短、長距離では有意差がなく、中距離では連続スクロールの方が指の総移動距離は小さくなった。フリックの指の移動距離は、その特徴から非常に少なくなるものであるが、連続スクロールでそれと同程度の指の移動距離が計測できたことは意義がある。また、本計測指標においても、連続スクロールは中距離において非常によいパフォーマンスを出していたことが分かった。

(4) オーバーシュート

タスク遂行時に、ターゲットが画面中央の円を通り過ぎてしまうようなスクロール操作が行われた回数を調べ、それを操作の正確さの判断要因として検討した。分散分析を行った結果、オーバーシュート判定は、環境 ($F_{1,11} = 6.08, p < .01$)、タスク ($F_{1,11} = 88.2, p < .01$)、スクロール手法 ($F_{2,22} = 38.7, p < .01$)、ターゲット距離 ($F_{2,22} = 45.1, p < .01$)に主効果が確認できた。環境、タスク、スクロール手法の三つの主効果についての結果を図 7 に示す。図 7(a)より、モバイルスクリーンの方が、大画面タッチスクリーンよりもオーバーシュートが少ないことがわかる。これは、大画面タッチスクリーンでは、常に画面に触れていることで安心感があり、不必要に勢いのある大きいスクロールをする参加者がいたためと思われる。図 7(b)より、ターゲット獲得タスクよりも視覚探索タスクの方が、オーバーシュート判定が少なかった ($p < .01$)。この結果は、今回用いた2種類のタスクが、想定シーンを忠実に再現できていることを示している。

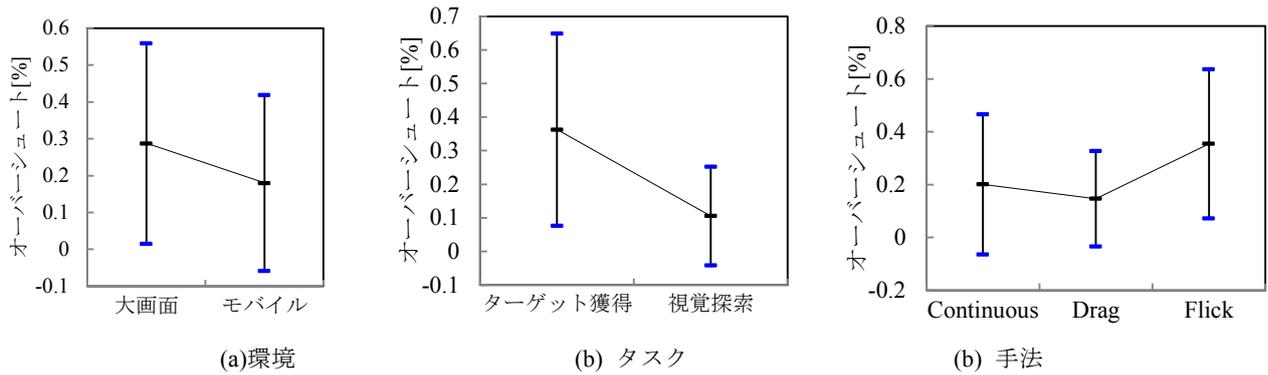


図 7 オーバーシュート

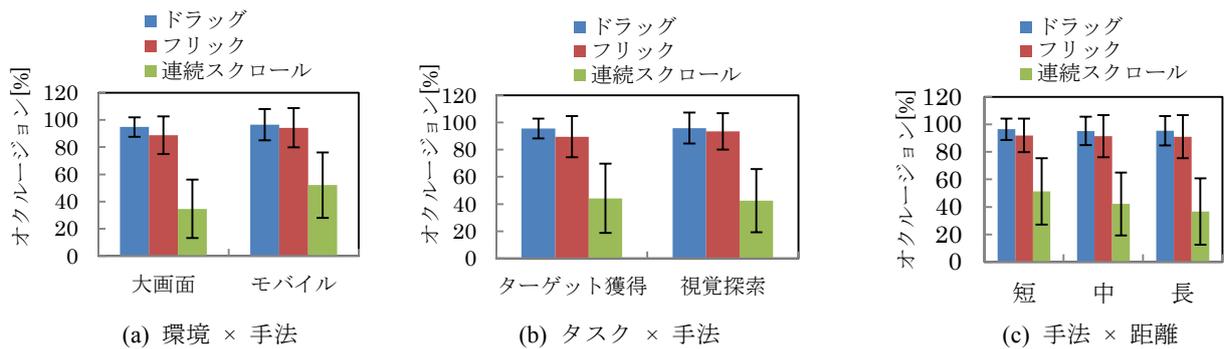


図 8 操作指によるオクルージョンのあった時間

(5) 操作指によるオクルージョン

本実験では、タスク遂行中に、実験参加者の操作指が画面上にある時間を調べ、それを指がオクルージョンを引き起こしていた時間とみなした。オクルージョン時間そのものは、視覚探索タスクなど参加者の視覚や探索精度にどのような影響を与えていたかを直接測るものではないが、画面内の情報を 100%獲得することが不可能な時間として重要な指標として考えている[22].

ここでは、タスク完了時間に対するオクルージョンを引き起こしていた時間の割合を算出し、分散分析をした。その結果、環境 ($F_{1,11}=16.1, p<.01$), スクロール手法 ($F_{2,22}=41.1, p<.01$), ターゲット距離 ($F_{2,22}=59.1, p<.01$)の主効果が確認できた。また、環境 × スクロール手法 ($F_{2,22}=12.0, p<.01$), タスク × ターゲット距離 ($F_{2,22}=7.04, p<.01$), スクロール手法 × ターゲット距離 ($F_{2,22}=18.9, p<.01$)において交互作用が見られた。そのうち、環境 × スクロール手法, タスク × スクロール手法, スクロール手法 × ターゲット距離の交互作用を示す結果を図 8 に示す。TukeyHSDを用いた事後検定によると、図 8 全体を通して分かるように、連続スクロールは他のスクロール手法に比べてオクルージョンを大きく減少させることができた ($p<.001$)。図 8(a)にて、連続スクロールのオクルージョン時間は、大画面タッチスクリーンよりもモバイルスクリーンでの実験の方が増えているが ($p<.01$)、これについても、タスク完了前の意図しない操作終了があり、再度画面に触れて操作を開始しなければいけなかったケースがあった

めだと考えられる。図 8(b)からは、フリックのみが、わずかながらタスクによってオクルージョンの時間が有意に変化したことが分かった。図 8(c)より、連続スクロールは、その原理上予想できる結果であるが、ターゲット距離が大きくなるにつれてオクルージョン時間の割合を 50%以下にまで減少させることができていた。

(6) 視覚探索タスクの正答率

視覚探索タスクにおいて参加者が口頭で回答したシンボル数の正答率について解析した。それぞれのタスク正答率の平均は、90.9, 91.9, 89.0%であり、統計的有意差が認められるものではなかったが、フリックは他 2 手法よりも正答率がやや低かった。連続スクロールは、既存の安定したドラッグと同等の滑らかな情報の閲覧ができることが分かった。いずれも高い正答率であり、全被験者が要求通りのタスクを実践したことを示している。

(7) NASA-TLX と主観評価

NASA-TLX を用いた分析結果によると、連続スクロールは、大画面タッチスクリーンにおいて、フリックよりも精神負荷を減少させることがわかった。図 9 には、NASA-TLX の全体負荷の平均値を、環境 × スクロール手法を区別して示している。同図より、連続スクロールは大画面タッチスクリーンにおいては他の手法より負荷を減少させおり、モバイルスクリーンにおいてはフリックと同等の負荷であったことが分かった。

実験後のインタビューによると、空中での操作は、何人かの実験参加者は、困難な操作だと感じていた。しかし、

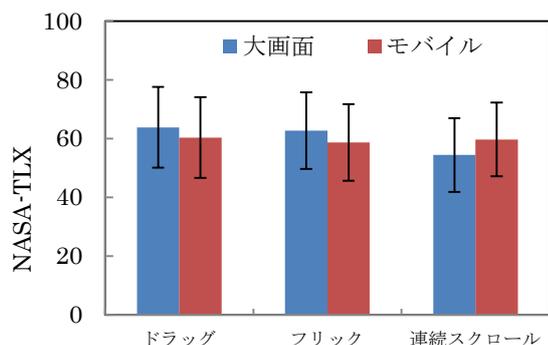


図 9 NASA-TLX

空中での操作を要するとしても、連続スクロールの総合的な負荷は他の画面に触れたまま行える操作手法とあまり変わらなかったことは重要な点である。

アンケートによる主観評価からは、連続スクロールは、大画面タッチスクリーンにおいて他の操作手法より一般的に好かれていた。しかしながら、モバイルスクリーンにおいてはそれほど大きな利点は見られなかった。多くの実験参加者が日常的に連続スクロールを用いることに興味を示し、他の手法よりも操作を楽しんでいた。また、今回の実装に対して操作時に違和感を持つ人もいなかった。

インタビューを通して、画面全体を見る必要がある視覚探索タスクにおいて、実験参加者はオクルージョンのない連続スクロールを好んでいたことを確認した。今回のモバイルスクリーンでの実験において、画面内外で操作のセンシング方法が切り替わることに気付いた人もいた。本実験では致命的なものではなかったが、変化に戸惑うことがあれば操作の終了や、精神負荷に影響すると思われる。また、ドラッグとフリックは日常的に広く用いられているスクロール手法であるが、スクロールしながら画面に表示される情報を詳細に見る場面では、フリックは不向きであり、ドラッグを利用していると認識している実験参加者は多かった。

6. 議論

6.1 実験結果

本研究の実験から、連続スクロールは、ドラッグやフリックを用いた操作よりもクラッチ回数の減少を可能にすることがわかった。それにより、関連する評価指標であるタスク完了時間、指の総移動距離、操作指によるオクルージョンも改善できることがわかった。また、連続スクロールがドラッグと同等の正確さを持つスクロール方法であることも確認できた。

連続スクロールは、大画面タッチスクリーンとモバイルスクリーンとで異なる効果も得られた。最も異なる結果はタスク完了時間であり、モバイルでは、大画面と比較してタスク完了時間は有意に長いものであった。これは、人間の腕の構造上、平面に触れることなく空中で正確な軌道を描いて指先を操作することが難しいためである。この点は、

3DUI の研究分野において同様の議論は行われてきている [3][12]。本実験においても、連続スクロールはターゲット距離が長距離である時にはそのパフォーマンスは下がっており、中距離で 1 番良い結果が得られた。

本研究の特徴的な点として、多くの指標によってスクロールの性能を評価しようとするところがある。例えば、図 5(b)(c)において、ターゲット獲得タスクや短距離においては、連続スクロールがドラッグやフリックと比較して有意に速くタスクを完了できていた訳ではなかった。ドラッグとフリックの圧倒的なシェアを考えると理解できる結果である。しかしながら、連続スクロールは少なくとも一つの指標において、それらより優位な結果を得ることができている。スクロールは日常的なものであるが単純なものだけという訳ではなく、深い認知的負荷を引き起こす難しい課題もある。そのため、タスク完了時間のみを軸に性能を判断すべきではなく、本研究で提案しているように、タッチデバイス独特の指標であるオクルージョンや指がどのように動いたか等、詳細な運動に関する項目における指標を導入して様々な角度から判断すべきである。それによって、冒頭に述べた腱鞘炎などの深刻な問題への対応などにもつながると考えられる。

本実験では実験結果をスクロール方向毎に解析していない。これは、ドラッグやフリックにおける方向毎のスクロール回数は、画面のアスペクト比 (16:9) に影響を受けており、本実験の目的に強く合致しないためである。しかしながら、簡単な解析のまとめでは、連続スクロールは操作スペースがディスプレイの形に依存することがないため、ドラッグやフリックに比べてスクロール方向が結果に影響することは少なかったことが分かっている。

大画面環境の連続スクロールの評価実験については、従来研究として実現されている手法のパフォーマンスを検討するための基本的知見を提供できると考える。12 人の中に商用的にこのスクロールスタイルが利用可能であることを認識していた参加者はいなかった。今後普及していくと考えられる壁面サイズの大画面ディスプレイやタイルドディスプレイ環境など、ディスプレイスペースに余裕があっても人の視野角の制限などで一つ一つのアプリケーションウィンドウを大きくしにくい場面における連続スクロールの有用性を示したと考えられる。

6.2 ADI とスクロール支援技術

本研究は、操作できるスペースを拡張し限られたスペースでの反復動作を減少させるという点で、AD-binning[9]と共通したコンセプトがある。しかしながら、[9]をはじめ、画面外での空中ポインティングに関する研究例[7]等では、デバイス周囲の何も存在しない空間に向けて指を移動させるが、その操作を助けるため、画面内に強い視覚的フィードバックを重畳させて表示している。これ自体は大きな問題にはならないが、本来必要な画面領域を狭くしてしまう

ことになるため、複雑なタスクになれば様々な混乱や負の効果を生み出す可能性もあり、繊細に設計されるべき事項である。本研究では、スクロール操作の反応が画面上で視覚的に明確である。そのため、連続スクロールは、非常にシンプルで慣れ親しんだ形で ADI の強みを主張できている技術と考えることができる。

マルチモーダルなインタラクション[20]や、円を描くようなジェスチャを用いたスクロール手法[16]との比較をすることも興味深く、今後の重要な課題である。しかし、これらはオクルージョンに関する問題を解決していない。また、ディスプレイの縁を利用したインタラクション[19]などの研究は、オクルージョンの問題をほぼ完全に解決しているが、タッチスクリーン上での直感的なタップや選択の機能との連携を失っている。連続スクロールは、画面内で、直感的で安定したスクロールをスタートし、画面外で、画面閲覧を邪魔しないスクロールを行うという二段階に分かれているが、タッチスクリーンの利点も保持しつつオクルージョンの問題も軽減する妥当な方法であると考えられる。

6.3 デザイン検討

(1) スクロール距離

実験結果によると、連続スクロールは、画面外での操作範囲は中距離程度において最も強い効果が表れていた(例:画面の端から 17cm)。大画面の条件のように、平面に触れたまま指を動かせるのであれば、腕の長さで最大限動かせる範囲での操作が望ましい(画面中央から 36cm で、画面の端からは 23-28 cm)。一般的な人の腕の長さ、実験で用いた 8 インチのデバイスという点を考慮すると、今回得たデザインについての指針は、先行研究[9]を支持するものである。

長距離でのスクロール操作方法に関して、画面外では、違和感のない程度に、C-D ratio を変えてスクロール操作を行うという方法もある[5]。これは仮想的に運動領域を拡張する際に、画面内では少ない動きで長距離スクロールを続けることができることを意味し、有効と考えられる。ただし、スクロール終盤の細かな動きがどこまで正確に制御できるかが重要な課題となる。

(2) 操作判定範囲

今回の実験を通して、ユーザのスクロール動作は指の位置が遠くなるにつれて画面手前に上がることが観察できた。この動きは、人の腕の関節構造を考えると当然であり、より快適な動きをサポートするためには、その曲線軌道を考慮した操作判定基準を設定するなど重要である。これにより、意図しない操作終了を防ぎ、空中での操作時間やスクロール回数に関するパフォーマンスはさらに改善できる。

(3) 空中でのジェスチャ

今回の実験では、空中での操作終了時に、操作の自然さを重視して、単純に指を手前に引くというジェスチャを用いた。ある実験参加者からは、もし 2 本の指をトラッキン

グすることができるなら、2 本指でつまむ様よりはつきりしたジェスチャが望ましいと提案があった。

また、拡張する運動領域の最大範囲をセンサの認識できる範囲や、ユーザが快適に操作できる範囲に限定し、適度なスクリーン上視覚的フィードバックを与えてユーザに画面外スクロールの範囲をユーザに伝えるアプローチも有意義であると考えられる。

(4) 画面内外の操作切り替え

本実験では 1mm 単位での認識精度を持ち、サンプリング周期が 100Hz である 3 次元モーションセンサを用いたため、空中でのセンシング精度は画面に触れて行う操作と同等であったと思われる。しかし、指の位置のトラッキングが、画面上でのタッチセンサから空中でのセンサに切り替わる際に表示画面が反映されるのに数ミリ秒程度のギャップがあった。このようなギャップは、画面内外にわたる連続的な操作をするうえで、ユーザに違和感を与え得る。同様に、スクリーン周囲にあるベゼルもまた問題になりうる。今回の実験で用いたデバイスはディスプレイとの境界で凹凸のない平らなベゼルであったためにユーザの指の動きに影響を与えることはなかったが、もしデバイスに大きく出っ張ったベゼルがあった場合は、連続的な操作は難しくなる。これらは、センサの実装などハードウェアを考える際に非常に重要な技術的な課題であると言える。

6.4 モバイルスクリーンでの操作指認識システム

デバイスの縁に配列した近傍センサや、デバイス内蔵カメラを用いた画像認識は、理論的にはデバイスの周囲空間での指の位置や動きを認識できる。しかし、赤外線センサはごく近傍での距離計測が困難であるため、画面内外の連続した操作への利用には向いていない。奥行きセンサ[14]のような外部センサは、センシング精度は十分であるが、利用シーンが限定されるという問題がある。今日存在するトラッキングシステムでは、実験と同等のパフォーマンスを実現することはできないが、本稿では現時点利用可能性を持つ 2 つの実装例を紹介する。

1 つ目は赤外線距離センサ (Leap motion) を用いた例である。これは、マーカレスの指のトラッキングシステムであるが、小型で USB 給電であるため、モバイルデバイスに容易に取り付けることができる。そして、センサ本体から広角 110° で 2.5~60cm での認識が可能であり、図 10(a) のように 11.6 インチのタブレット PC (VAIO Duo 11) に設置した場合、運動領域は画面上方向に 5cm、左右方向には、画面下部からの高さに応じて 3-10cm 拡張できた。しかしながら、Leap が正確に操作指を認識するためには、操作指およびデバイスの把持においてもやや窮屈な姿勢を強いられることと、安定した計測に関して課題がある。

2 つ目の例は、ペンとそのペンの位置情報を追跡するレシーバ (PNF's Duo Pen) を用いた例である。ペンをユーザに持たせるという妥協的な面はあるが、操作点 (ペン先)

の位置を安定して高精度に取得することができ、また、画面外での操作終了もペン付属のボタンにより判定できるため、連続スクロールを実現するにはかなり強力な方法であると考えられる[6]。図 10(b)のように設置した場合、レーザー装着位置とペンの位置認識可能範囲により、運動領域は上方向に 6cm、下左右方向に 15cm 程度拡張できた。

6.5 制約

本研究は、8 インチのデバイスまたはアプリケーションウィンドウを想定して実験を行った。これは iPad mini や ASUS タブレットに見られるように、このサイズのデバイスが徐々に主流になってきているためである。また、デバイスの持ち方も考慮した。スマートフォンの大きさでも連続スクロールは有効に働く可能性はあるが、デバイスを把持する際に、その周囲が指で覆われることが多いため、それが画面内と外の物理的なギャップになる可能性がある。タブレットの場合はその影響が少ないため、本研究では、7-15 インチのデバイスとターゲットとしている。

デバイス周囲空間での指の位置認識をするにあたり、意図しないスクロールなどの誤操作が行われないために、周囲にある物や、操作に関係ない指についての認識に注意する必要がある。これを解決する簡単な方法は、画面上でのみ操作を開始できるという制限をつけた。これは、全ての操作を空中やデバイス周囲でのみ行う ADI に比べて、タッチスクリーンも併用する連続スクロールの利点であると言える。

7. まとめ

本研究では、クラッチ回数を軽減するために、画面上でのタッチスクロール操作を画面外にも拡張することができる連続スクロールについて検討した。大画面タッチスクリーン上のアプリケーションウィンドウとモバイルスクリーンという代表的な 2 つの環境において連続スクロールと従来手法（ドラッグ、フリック）を比較し検証した。その結果、連続スクロールはクラッチ回数を減少させ、オクルージョンを減らし、効率を上げ、操作負担を減少できることがわかった。また、連続スクロールの効果は操作指のセンシング環境にも依存することも明らかになった。今後は、連続スクロールに向けたセンサなどの実装や、新たな設計要因について検討を行う予定である。

参考文献

- 1) D. Aliakseyeu, P. Irani, A. Lucero, and S. Multi-flick: an evaluation of flick-based scrolling techniques for pen interfaces. CHI, pp.1689-1698 (2008).
- 2) P. Baudisch and R. Rosenholtz. Halo: a technique for visualizing off-screen objects. CHI, pp.481-488 (2003).
- 3) G. Bruder, F. Steinicke, and W. Sturzlinger. To touch or not to touch? comparing 2D touch and 3D mid-air interaction on stereoscopic tabletop surfaces. SUI, pp.9-16 (2013).
- 4) A. Butler, S. Izadi, and S. Hodges. SideSight: multi-"touch"



(a) 小型モーションセンサ (b) デジタルペンと受信機

図 10 Continuous Scroll の実装例

interaction around small devices. UIST, pp. 201-204 (2008).

- 5) G. Casiez, D. Vogel, Q. Pan, and C. Chaillou. RubberEdge: reducing clutching by combining position and rate control with elastic feedback. UIST, pp.129-138 (2007).
- 6) X. Chen, T. Grossman, D. Wigdor, and G. Fitzmaurice. Duet: exploring joint interactions on a smart phone and a smart watch. CHI, pp.159-168 (2014).
- 7) B. Ens, D. Ahlström, A. Cockburn, and P. Irani. Characterizing user performance with assisted direct off-screen pointing. MobileHCI, pp.485-494 (2011).
- 8) S. Fitchett, A. Cockburn. Evaluating Reading and Analysis Tasks on Mobile Devices: A Case Study of Tilt and Flick Scrolling. OZCHI, pp.225-232 (2013).
- 9) K. Hasan, D. Ahlström, and P. Irani. Ad-binning: leveraging around device space for storing, browsing and retrieving mobile device content. CHI, pp.899-908 (2013).
- 10) C. Harrison and S. E. Hudson. 2009. Abracadabra: wireless, high-precision, and unpowered finger input for very small mobile devices. UIST, pp.121-124 (2009).
- 11) K. Hinckley, E. Cutrell, S. Bathiche, and T. Muss. Quantitative analysis of scrolling techniques. CHI, pp.65-72 (2002).
- 12) K. Hinckley, R. Pausch, J. Goble, and N. F. Kassell. A survey of design issues in spatial input. UIST, pp.213-222 (1994).
- 13) B. Jones, R. Sodhi, D. Forsyth, B. Bailey, and G. Maciucci. Around device interaction for multiscale navigation, MobileHCI, pp.83-92 (2012).
- 14) S. Kratz, P. Chiu, and M. Back. PointPose: finger pose estimation for touch input on mobile devices using a depth sensor. ITS, pp.223-230 (2013).
- 15) S. Kratz and M. Rohs. HoverFlow: expanding the design space of around-device interaction. MobileHCI, Aticle 4, 8 pages (2009).
- 16) S. Malacria, E. Lecolinet, and Y. Guiard. Clutch-free panning and integrated pan-zoom control on touch-sensitive surfaces: the cyclostar approach. CHI, pp.2615-2624 (2010).
- 17) P. Quinn, S. Malacria, and A. Cockburn. Touch scrolling transfer functions. UIST, pp.61-70 (2013).
- 18) P. Quinn, A. Cockburn, G. Casiez, N. Roussel, and C. Gutwin. Exposing and understanding scrolling transfer functions. UIST, pp.341-350 (2012).
- 19) V. Roth and T. Turner. Bezel swipe: conflict-free scrolling and multiple selection on mobile touch screen devices. CHI, pp.1523-1526 (2009).
- 20) D. Sakamoto, T. Komatsu, and T. Igarashi. Voice augmented manipulation: using paralinguistic information to manipulate mobile devices. MobileHCI, pp.69-78 (2013).
- 21) P. Son, N. Takahashi, J. Tanaka. G-Shark: 磁石を利用した携帯端末 3 次元入力インタフェース。インタラクション 2013, pp.787-789 (2013).
- 22) D. Vogel and G. Casiez. Hand occlusion on a multi-touch tabletop. CHI, pp.2307-2316 (2012).
- 23) X. Yang, K. Hasan, N. Bruce, and P. Irani. Surround-see: enabling peripheral vision on smartphones during active use. UIST, pp.291-300 (2013).