

多点入力 GUI による複数オブジェクトの 並行操作の評価

福地 健太郎^{†1,*1} 暦本 純 ^{†2,†3}

多点入力システムとは、ユーザが GUI 画面上の複数の箇所を同時に独立に指示できるシステムである。このシステムにより、画面上の複数のオブジェクトの並行操作や、オブジェクトに対する多様な操作を可能にする。我々はこれまでに、人体形状センサ SmartSkin を用いて多点入力システムを構築している。今回我々はこのシステムの基本性能の評価を行い、その入力の特性を調べた。またその結果をふまえて、画面上の複数のオブジェクトを同時に操作した場合の操作効率を評価した。その結果、多点入力による並行操作が、動かす方向・速度がある程度揃っている場合には効率良く働くことを確認した。一方で、条件が悪い場合には従来の 1 点入力による操作よりも効率が低下した。

An Evaluation of Concurrent Manipulation of Multiple Components on a Multipoint Input GUI

KENTARO FUKUCHI^{†1,*1} and JUN REKIMOTO^{†2,†3}

Multi-point input GUI allows users to point to multiple positions in a graphical screen simultaneously. It enables to control multiple objects in the screen simultaneously. We implemented a multipoint input GUI with SmartSkin, a sensor architecture for freehand manipulation. This prototype system can track over 10 fingertip motions simultaneously in real time. We ran three user tests to evaluate the robustness and efficiency of our input system. From the results we confirmed that our system worked efficiently to move multiple objects when they were moved towards the same direction in nearly the same speed. On the other hand, it decreased the efficiency in worse conditions.

1. はじめに

一般的な GUI システムでは、ユーザはマウスやペンなどのポインティングデバイスを用いて操作する。ユーザはポインティングデバイスを用いてディスプレイ上の座標を入力し、画面上に表示された図形を選択・移動する。普通、ポインティングデバイスは 1 つであり、ユーザは同時には 1 つのオブジェクトしか選択することはできない。

一方で、日常使用される機器においては、特にリアルタイム性が要求される専用機器などによく見られるが、複数の操作部品を同時並行に操作することが可能なものがある。たとえばオーディオミキサでは、各音源のボリュームを制御するスライダが数十個並べられており、それらは独立に操作することができる。しかし、オーディオミキサを GUI で操作できるソフトウェアは多くあるが、一般的なポインティングデバイスによる独立した並行操作を可能にしたものはない。

多点入力システムとは、ユーザが GUI 画面上の複数の箇所を同時に指示できるシステムで、複数のオブジェクトの並行操作を可能とする。本研究で目指す多点入力システムは、普通のデスクトップ機を使用するような環境でこうした並行操作を可能にする汎用な入力システムである。これまでに我々は人体形状センサ SmartSkin¹¹⁾ を用いて多点入力システムを実装している¹³⁾。このシステムでは 10 カ所以上の指先位置を追跡することができ、複数のユーザが複数の座標を同時に入力することができる。文献¹³⁾では実装の詳細および適用例について報告しているが、SmartSkin を使った指先入力の精度評価や多点入力の有効性の評価を課題としていた。本論文では、この多点入力システムを用いて実施した評価実験の結果について報告する。

2. 関連研究

近年は様々な技術を応用した多様な多点入力デバイスが発表されている^{1),4),6),9),12)}。し

†1 電気通信大学

The University of Electro-Communications

†2 東京大学大学院情報学環

Interfaculty Initiative in Information Studies, The University of Tokyo

†3 ソニーコンピュータサイエンス研究所

Sony Computer Science Laboratories, Inc.

*1 現在、独立行政法人科学技術振興機構 ERATO 五十嵐デザインインタフェースプロジェクト

Presently with Igarashi Design Interface Project, Japan Science and Technology Agency ERATO

かし多くの場合それらのシステムでは、たとえば 1 本の指で 1 つのオブジェクトを平行移動できるが 2 本で拡大操作や回転操作ができるようになるというように、多点入力は主に 1 つのオブジェクトに対する操作のバリエーションを増す目的で使われている。我々は多点入力を複数オブジェクトの並行操作に応用した場合の有効性を本論文で検証している。

一方で、両手を用いた並行操作の有効性については、数多くの研究がある。Buxton らは両手による操作を、1 つの対象に対する入力の種類を増すために導入している³⁾。評価実験では一方の手で位置入力を、もう一方の手でスライダによる一次元の値の入力をさせ、両手操作による効率の向上を確認しているが、複数の位置入力についてのものではない。Kurtenbach ら⁸⁾ や Hinckley ら⁷⁾ は 1 つのタスクを達成するための両手による協調動作の有効性を示しているが、両手による 2 点の同時位置入力についての実験を実施している。Graspable UI⁵⁾ は同時に 8 個のポインティングデバイス进行操作できるシステムを、電磁誘導式のタブレットを用いて実装し、評価を行っているが、各入力デバイスはそれぞれに専用のタブレットの上でしか動かせないため、デバイス間の衝突が起こらない状況になっていたり、ユーザはたかだか 2 個のデバイスしか同時に操作できなかつたりする、といった不備がある。Balakrishnan らは両手による左右対称な並行操作において、左右に注意が分散するような状況では操作誤りが増大することを示している²⁾。

3. 多点入力システム

今回使用した多点入力システムの概要を述べる。実装の詳細については文献 11), 13) を参照されたい。

3.1 SmartSkin

本研究では指先位置の追跡のために、人体形状センサ SmartSkin¹¹⁾ を利用した。SmartSkin は、静電容量計測技術を応用した、人体の形状と位置を認識するセンサ技術である。送信器と受信器の電極を縦横に格子状に配置し、送信器から数百 KHz 程度の交流信号を印加する。電極の各交点は静電結合されるため、受信器側でこの信号を検知することができる。このとき、交点付近に接地された物体が近付くと受信器に流れる信号の強度が低下する。この低下量を計測することで、アンテナ上の人体の位置と形状を二次元的に計測することができる。信号強度の低下量は人体とセンサ面との間隔にほぼ反比例することが分かっており、そのためセンサ面から人体までのおおまかな距離を計測することができる。

今回使用した SmartSkin は、縦 32 本横 24 本の電極からなるセンサ面を持ち、電極の間隔は約 9 mm である。出力データの解像度は 8 ビット (0-255) であり、センサの感応範囲

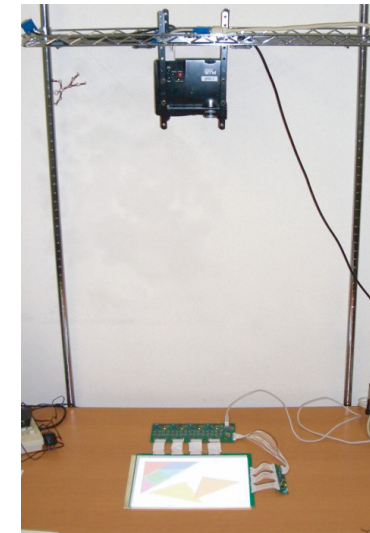


図 1 多点入力システム全体像
Fig. 1 System overview.

はセンサ面から 5 mm 程度となっている。計測速度は毎秒 20 回で、USB を経由して PC に転送される。

SmartSkin のセンサ面には白いシートを載せ、その上にプロジェクタを設置し画面をセンサ面に投影している。これにより、指先による画面上のオブジェクトの直接操作を可能にしている。システムの全体像を図 1 に示す。

3.2 多点入力

SmartSkin から得たデータから指先の動きを検出するまでの手順を簡単に述べる。まず計測データは 3 次畳み込み内挿法 (bicubic convolution interpolation) により、 32×24 点から必要な大きさへ拡大する。次に、閾値以下の値を切り捨てることで、センサ面から大きく離れた部位を除去する。その後、領域分割処理を施した上で定められた面積以下の領域のみを取り出し、これを指先と見なし、その重心を指先の座標として検出する。次に、得られた指先位置を前回の計測位置と照合し、各指先の動きを追跡する。動き追跡にはコスト最小化手法を用い、移動コストの最も小さい組合せを採用している。

今回の実験で使用したアプリケーションでは、入力の解像度は 496×368 ドット、またそ

の実寸は 276 × 204 mm である。投影されるアプリケーション画面の解像度は入力の解像度と等しく 496 × 368 ピクセル、またその実寸もセンサ面の大きさに合わせた。

4. 評価実験 1：位置入力の安定性の評価

4.1 実験の狙い

この評価実験は、本システムによる指先を用いた位置入力の有効性を検証することを目的としている。ここでは、指先がセンサ面に触れてから離されるまでの間に、検出位置がどれほど動いたかを調べることで、指先入力の安定性を検証した。具体的にはボタンを押下中の入力座標のブレ、また指が触れたとき、離れたときの入力座標の動きを計測した。

4.2 実験手法

SmartSkin のセンサ面上に、1 から 25 まで番号が振られた正方形を印刷した紙をガイドとして置き、被験者にそれらを順番に指先で触れてもらい、その入力位置を計測する。図 2 に実験環境の様子を示す。

実験に使用した紙には、1 辺の長さが 18.375 mm の正方形のボタンが、18.375 mm 間隔で 5 × 5 の格子状に配置されている。この寸法は、各ボタンの中心点が、電極の上であったり電極間であったりと様々な位置をとるように定めたものであり、ボタンと電極との位置関係が偏らないようにしている。番号は左下から右上に向けて順番に振っている。

センサ面の上方には、プロジェクタを用いて画面を投影し、そこに被験者に対する指示を表示した。アプリケーションはまず番号を示し、被験者にその番号が書かれた正方形を押すことを促す。指先の接触を検知するとまず最初に計測された指先位置を記録する。次に画面

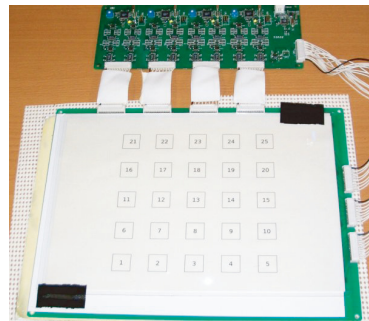


図 2 指先入力検証用のシート面

Fig.2 The environment of the stability test.

にはそのまましばらく押し続けるよう表示する。次に、押下動作中の指の姿勢が安定するのを待つために 10 フレーム分 (0.5 秒) の計測値を捨てた後、20 フレーム分 (1 秒) の指先位置を記録する。その後、指を離すよう表示する。指が離れる際に、最後に計測された指先位置を記録する。

記録されたデータを以下のように解析する。押下中に計測された 20 フレーム分の指先位置を平均する。次に 20 フレーム分の指先位置の、平均座標からの距離の和を累積誤差とする。また、最初に計測された指先位置と平均中心座標との距離を接触時誤差、最後に計測された指先位置と平均中心座標との距離を開放時誤差とする。計測する座標はアプリケーション内部に持つ座標平面上のもので、単位はドットである。1 ドットは実寸で約 0.6 mm に相当する。

実験は 9 人の被験者を対象に行った。9 人とも男の大学院生で、デスクトップ PC の操作にマウスを常用している。SmartSkin による指先入力の経験はなかった。

4.3 実験結果

接触時の計測結果は 25 力所 9 人の計 225 個得られたが、そのうち 1 個が、平均中心座標からの距離が 210 ドットと、通常の使用では考えられない数値をとっていた。その後の調査で計測プログラムのバグにより関係ない部位が接触した位置を計測していたものと分かったため、この値は取り除いて結果を算出した。224 力所分の計測データから得られた結果を表 1 に示す。

センサ面を押している間の平均累積誤差は 5.23 ドットであった。1 フレームあたりで平均すると約 0.26 ドットとなる。また第 1 四分位は 0 ドット、第 3 四分位は 9.6 ドットであり、これを 1 フレームあたりに平均すると 0.48 ドットであり、安定した結果が得られている。

最初に接触した時点での指先位置と平均中心座標との誤差を見ると、平均で 1.93 ドットあり、最大で 8 ドットほど動いていることが分かる。これは指先が最初に接触した時点では指先の先端部分が計測されるのに対し、さらに力が加わると指の腹の部分が計測され、全体の重心位置が手首方向に移動するためである。

表 1 押下時の指先の動き誤差

Table 1 Results from the stability test.

動作	平均誤差	標準偏差	最小値	最大値
押下中	5.23	5.46	0.00	25.3
接触時	1.93	1.63	0.00	8.04
解放時	0.976	1.41	0.00	9.33

(単位はすべてドット)

最後に計測された指先位置と平均中心座標との誤差を見ると、第3四分位数までは3ドット以内に収まっており、安定しているといえるが、最大で9.33ドットずれることが観測されている。

4.4 考察

押下中の指先のブレは1フレームあたり0.26ドットと、安定しているといえる。しかし接触時および開放時には指先位置の動きが観察されており、指先がセンサ面に触れるか離れる瞬間での計測位置のブレがあることが示された。これは、接触した瞬間に関連付けされた操作対象の値が変化してしまう、あるいは調整した値が開放時にずれてしまうという問題を引き起こすこととなる。対策としては、接触時・開放時の入力を数フレーム分切り捨てることが考えられる。ただしこの方法だと操作対象の応答性能の低下を招く。特に現行の実装では入力の計測速度が低いため、応答に要する計測回数が増えると消費する時間が著しく増えてしまうため、大幅な応答性能の低下につながるという問題が生じる。計測速度の向上が必須であろう。別の解決としてはPotterらの研究が示すように¹⁰⁾、接触時ではなく接触後に指を動かして操作対象に重ねることで選択をするといった操作を導入することが考えられるが、この操作を多点入力に導入しても有効に働くとは考えにくい。

また、実物体としてのボリュームスライダなどでは、操作部品には静止摩擦力や慣性の法則が働くため、急な動きに対して抵抗することでこれらの意図しない動きに対処できている。これと同様の動きをGUI側で加えることで、この問題を解消できるのではないかと我々は考えている。しかしこの方法もスキャンレートが低い場合には応答性能の低下を招きかねない。

5. 評価実験2：ドラッグ操作の評価

5.1 実験の狙い

多点入力が有効に働く場面として我々は、操作対象を連続的に動かし続けるようなアプリケーションを想定している。つまり、いわゆるドラッグ操作を複数の指先で行うような場合である。そこで本実験では、つねに動き続ける目標地点に向けて操作対象を動かし続けるという課題を課し、どれだけ正確に操作対象を動かすことができたかを、単点入力をした場合と多点入力をした場合とで比較し、並行操作の有効性を検証する。

まずはじめに、SmartSkinでの指先入力によるドラッグ操作について、既存のポインティングデバイスと比較評価し、その有効性を検証する。その後、複数の操作対象の並行操作を指先入力で行い、その有効性について検証する。

この2つの評価実験では、同じ評価用アプリケーションを用いる。そのため、まず次節で評価用アプリケーションの仕様について記し、その後それぞれの評価実験について、実験手法と結果を述べる。

5.2 ドラッグ操作の評価アプリケーション

図3に評価用アプリケーションの画面を示す。記号の描かれた4枚のカードは被験者が移動させることができる。カードの初期位置は図5に示されるように画面下部に整列される。それぞれのカードには1つずつ目標地点が設定されており、黒枠の矩形で示される。また、カードと目標地点とを黒線で結び、その対応関係を示す。目標地点は、合図の後にはつねに動き続けており、被験者はカードを動かして、できるだけカードが目標地点に重なっている状態を維持することが求められる。

各目標地点の動きを図4に示す。グラフの各座標は、全フェイズの移動履歴のうち、最大値と最小値の平均を原点とした相対座標で示している。課題は大きく分けて4つのフェイズに分かれている。第1フェイズでは、すべての目標地点は画面を上下方向に1往復する。移動速度は2ドット/カウントである。第2フェイズでは、左の2個は第1フェイズと同じ動きで、右の2個は倍の速度で上下に2往復する。第3フェイズでは、Y軸は2ドット/カウント、X軸は0.5ドット/カウントの速度で斜めに移動する。左の2個はまず左斜め上に動いた後右斜め上へと移動し、その後左斜め下、右斜め下へと移動し元の位置に戻る。右の2個は左の2個と左右対称に動く。第4フェイズでは、右から順に1, 2, 3, 4ドット/カ

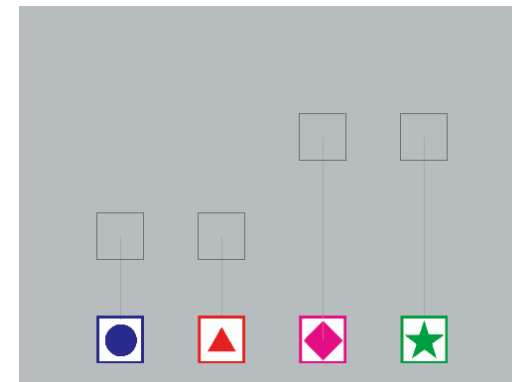


図3 ドラッグ操作の評価アプリケーション画面

Fig. 3 A snapshot of the application of the continuous tracking test.

2504 多点入力 GUI による複数オブジェクトの並行操作の評価

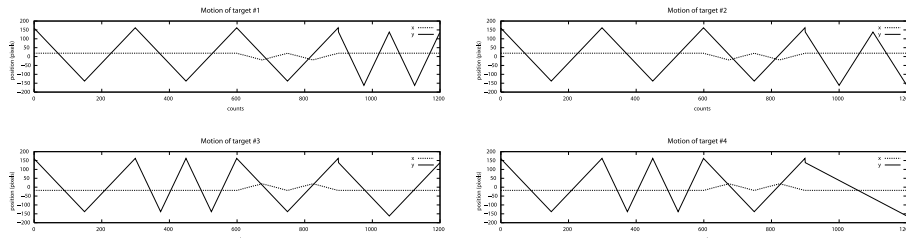


図 4 ターゲットの動き
Fig. 4 Motions of targets.

ウントの速さで上下に往復運動する．それぞれのフェイズは 300 カウントからなる．1 カウントは約 0.05 秒であり，つまり各フェイズは 15 秒，総計で 1 分の課題である．カードの初期位置や目標地点の動きは被験者間で同じものを用いた．

実験中は各カードと対応する目標地点のそれぞれの中心座標間の距離を誤差として各カウントごとに記録し，その総計をもって実験結果を評価する．

5.3 評価実験 2-1：単一操作対象のドラッグ操作

評価用アプリケーションを用いて，1 枚のカードのドラッグ操作を，2 種類の入力インタフェースで行って比較する評価実験を行った．入力インタフェースとしては，SmartSkin による指先入力と，比較対象としてマウスを使用した．マウスは Logitech 社の光学式無線マウス (diNoVo Cordless Desktop) を使用した．指先入力と条件を等しくするために，マウスの物理的移動量と投影画面上のマウスカーソルの移動量が等しくなるよう，ウィンドウシステム (X11) の機能を用いて調整した．アプリケーションの画面は SmartSkin 使用時はセンサ面に投影し，マウス使用時は光学マウスの反応が良い白色のシートを机上に敷いてその上に投影した．

本実験では，評価用アプリケーションで提示される 4 枚のカードのうち，左から 2 番目のカードを被験者に動かさせた．カードの操作は，マウスを用いた場合は通常のドラッグ操作と同様，カーソルをカードの上に重ねてボタンを押すことで行う．指先入力の場合，カードに指をのせ，そのままセンサ面上で指を滑らせることでカードを操作する．

各被験者には実験開始時に操作方法および課題を説明した後，本番と同じ課題を練習のために行わせた．被験者は，マウスによる操作および SmartSkin による指先操作ともに 8 人だが，2 つの実験で被験者に重なりはない．全員男の大学院生で，デスクトップ PC の操作にマウスを常用しているが SmartSkin による指先入力の経験はなかった．

表 2 各フェイズごとの誤差総計の平均
Table 2 Total amount of error in every phase.

フェイズ	マウス	SmartSkin
1	1,453	1,530
2	1,443	1,746
3	1,727	1,789
4	2,483	2,403
Total	7,105	7,468

単位：ドット

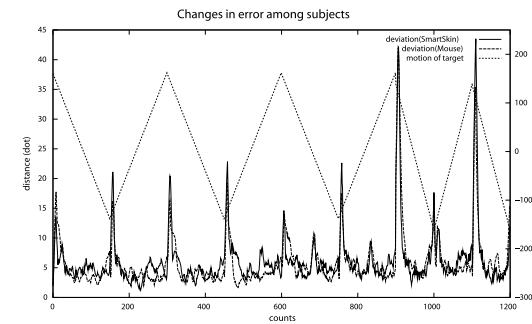


図 5 平均誤差の時間軸上の推移
Fig. 5 Results from the dragging test.

5.3.1 実験結果

表 2 に，各フェイズごとの誤差の総計を，被験者全体で平均したものを示す．また，誤差の平均値の推移をグラフにしたものを図 5 に示す．表より，指先入力によるドラッグ操作は，マウスに比べて誤差の総計は若干大きいことが分かるが，率にして 5% の増加であり，入力には差し支えない範囲であると考えられる．グラフを見ても両者はおおむね似たような挙動を示しており，SmartSkin での指先入力はマウス入力と同様に扱えることが示せた．

両者ともに，目標地点が方向転換するときに誤差が跳ね上がっている．急激な方向転換に被験者の反応が追いつかなかったためと考えられる．

5.3.2 考察

本実験の結果より，提案システム上で指先によるドラッグ操作が安定して行えることが分かった．これをふまえ，次節では指先入力による複数の操作対象の並行操作について，提案システムを用いて評価実験を行う．

5.4 評価実験 2-2: 複数オブジェクトの並行操作の評価

5.4.1 実験の狙い

本研究が対象とする領域では、操作対象を連続的に動かし続けるようなアプリケーションが存在する。たとえば音楽ミキサの例では複数のスライダを徐々に上げたり下げたりするような操作が頻繁に行われる。そこで本実験では、つねに動き続ける目標地点に向けて操作対象を動かし続けるという課題を課し、どれだけ正確に操作対象を動かすことができたかを、単点入力をした場合と多点入力をした場合とで比較し、並行操作の有効性を検証する。

5.4.2 実験手法

実験には 5.2 節で説明した評価用アプリケーションを用いた。本実験では被験者に 4 枚のカードすべてをドラッグ操作させる。被験者にはまず操作説明をした後、練習としてすべてのフェイズを、両手の指を使って行わせた。その後、はじめに指を 1 本だけ使って課題に挑戦させ、次に両手の指を使って行わせた。使用する指は被験者に自由に選ばせた。被験者は実験 1 と同じ大学院生 9 人である。

5.4.3 実験結果

実験結果を表 3 に示す。またグラフを図 6 に示す。グラフ中の“single”で示された線は単点入力での結果で、“multiple”で示された線は多点入力での結果を示す。また、“single tracking”は前節の実験で得られた、1 つのカードのみ追跡したときの誤差の平均を表している。

5.4.4 考察

図 6 より、フェイズ 1 から 3 の間では、ほぼすべてのカウントにおいて多点入力の方が単点入力に比べ、少ない誤差で追跡ができていることが分かる。フェイズごとの誤差総計を見ても、フェイズ 1 から 3 の間は多点入力が単点入力に比べ 4 倍程度精度が向上している。しかしフェイズ 4 ではほぼ同等の誤差が計測された。

フェイズ 1 から 3 では、多点入力の場合にはほぼ混乱もなく、安定して追跡できていたことが、精度が向上している理由である。一方、フェイズ 4 の後半では各カードがそれぞれバラバラの向きに動くため並行操作は困難になり、そのため誤差の合計が増加している。フェイズ 4 の最後では急激に誤差が上昇しているが、無理に並行操作をしようとして無駄な動きが増えていることに加え、両手を画面に置くことで画面が見えなくなり、目標地点の位置が確認できなくなっていることがその原因である。一方、指を 1 本だけ使う単点入力では、追跡は依然困難ではあるものの、被験者は混乱することなく、逐次的に操作対象を動かせばよいので、フェイズ後半になっても大きな乱れは見られなかった。一例として、被験者のうち

表 3 各フェイズごとの誤差総計

Table 3 Total amount of error in every phase.

フェイズ	単点入力	多点入力	1 枚のみ追跡
1	48,329	10,649	1,530
2	66,654	17,284	1,746
3	54,415	14,637	1,789
4	63,845	65,481	2,403
Total	233,233	108,051	7,468

単位: ドット

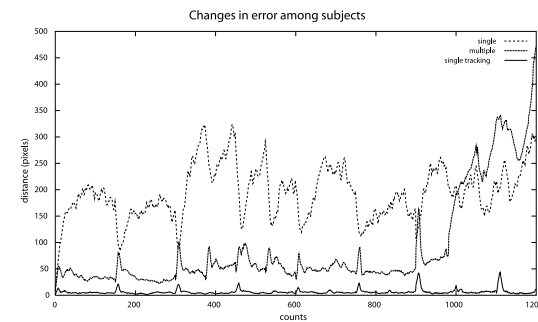


図 6 誤差の総和の時間軸上の推移

Fig. 6 Changes in the averaged error.

1 人によるカード操作の履歴と目標の動きとを重ねたものを図 7 および図 8 に示す。図 7 は目標の Y 軸の動きと、単点入力をした際のカードの Y 軸の動きとを重ねたものであるが、フェイズ 4 後半でそれぞれのカードができるだけ目標地点に近付けられるよう操作されていることが分かる。一方図 8 は、多点入力をした際の目標の動きとカードの動きを重ねたものを示しているが、フェイズ 4 後半になるとまったく動かされていないカードがあったり、目標から遠ざかるように操作されているものがあったりするなど、被験者が操作に支障をきたしていることがうかがえる。こうした傾向は他の被験者のデータからも観察された。

また、被験者の操作の観察から、操作対象間の距離が離れるに従って指先が計測できなくなるといった現象が確認された。通常は被験者はセンサ面上を指差すときは指とセンサ面とがなす角度は浅い。しかし操作対象間の距離が離れるに従って人指し指と中指とを離して使うこととなり、手首側に近い方の指はセンサ面となす角度が大きくなる傾向があった。このような状況下では、指とセンサ面との接触面積が減少するため、面積が閾値より小さくなった

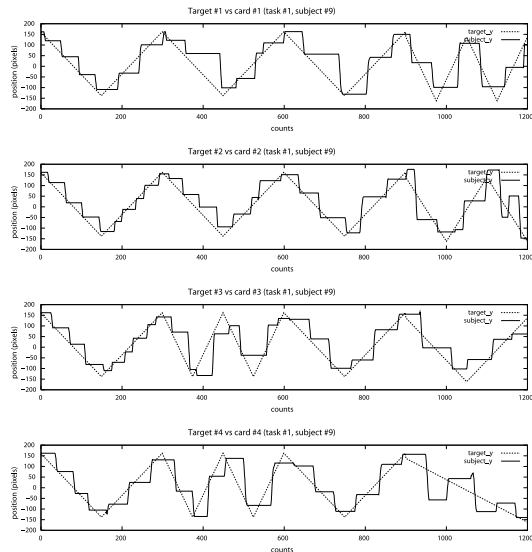


図 7 目標地点の動きと単点入力をした際の動きの比較 (被験者 9 番)
Fig. 7 Comparison of motions: Single pointing vs. targets (subject #9).

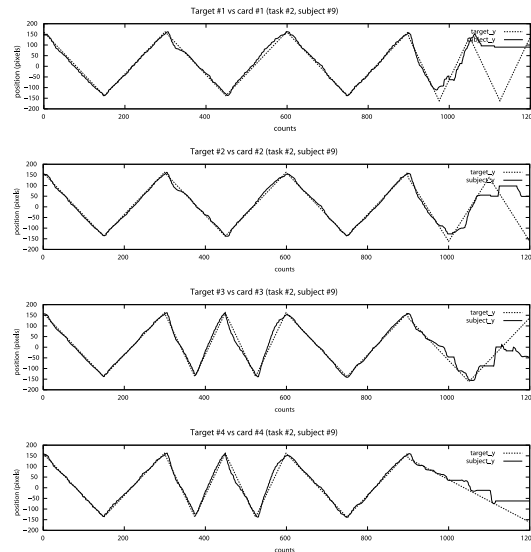


図 8 目標地点の動きと多点入力をした際の動きの比較 (被験者 9 番)
Fig. 8 Comparison of motions: multiple pointing vs. targets (subject #9).

時点でシステムは指先がセンサ面から離れたと認識することとなる。

なお、図中いくつか、多点入力では誤差が増加している局面で単点入力では減少している箇所が見られるが、これは目標地点が画面上端または下端で折り返すときに起きている (図 9 参照)。これは、多点入力をしている際には、突然目標地点が折り返したときに被験者の反応が追いつかず、誤差総計を増加させているのに対し、単点入力では操作対象が静止していても、いったん離れた目標地点が折り返して再び近付いてくるため総計誤差が低く抑えられることに起因する。今回の実験では目標地点は被験者の意図とは無関係に移動するのでこのような結果を得たが、実際の使用場面では目標地点は利用者が意図して設定する場合がほとんどであり、このような現象は生じないと考える。

6. 議 論

評価実験の結果から、並行操作が有効に働くための条件が示された。まず動きの独立性が低いような場面においては有効に働くことが、フェイズ 1 から 3 までの結果から示された。並行操作をリアルタイムに実施しなければならない画面において累積誤差を低く保つため

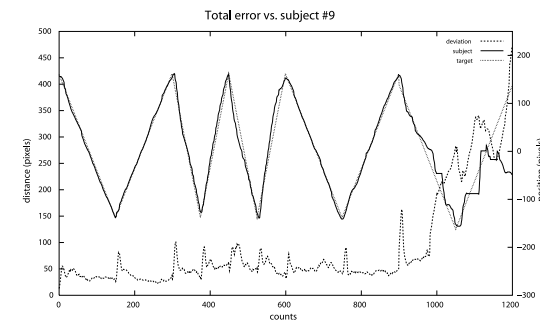


図 9 操作記録と誤差との比較
Fig. 9 Comparing the averaged error with the motion log of the cadr and the target.

には、本入力システムは有効である。またこの実験では、目標が急に向きを変えた場合に被験者の反応が遅れたり、右側の目標の動きに左手がつられてしまったりするなど、誤差が増加する局面が見られたが、これらは目標の動きが被験者の意図とまったく関係ないことが

ら生じているためであり、実アプリケーションにおいてはこうした問題点は生じないと考えられる。今後さらに詳しく特性を調べるためには、被験者の自由意志による並行操作の実験を行うことが必要である。

現在の実装では、指とセンサ面との角度が大きくなったときに指先が計測できなくなるという問題がある。このとき、指先はセンサから離されたと認識され、位置追跡は中断される。また、被験者は位置追跡が中断されたことに気がつかずしばらく操作を続けた後で、操作対象が期待どおりに動いていなかったことに気がつき、放置された対象を動かすべく指先を再度対象に重ねようとして、今まで片方の指先で操作していた対象を1度離して操作しようとするため、全体の操作が中断されるという状況を招いていた。まとめると、指先計測が確実にないことに加え、認識されなくなったことが利用者がすぐに知覚できないことが問題である。センサの解像度の精密化による認識率の向上を図るとともに、利用者へのフィードバックについては、画面表示での視覚フィードバックや音による聴覚フィードバックを工夫することに加えて、センサ面を振動させることによる触覚フィードバックにより指先に直接知覚させることを検討したい。

上記の問題に関連するが、継続的な並行操作時にも様々な理由でいったん指を離し、また再度触れるという操作がなされることが分かった。それゆえ、4章での実験で判明した指先の接触・開放時の位置ずれ誤差が多点入力で問題になる可能性がある。特に並行操作時は利用者が慌てたり注意が逸れていたりといった理由により、実験時よりさらに誤差が増大するものと予想されるため、4.4節で述べたような対策は必須であろう。

7. ま と め

SmartSkin を用いた、指先での直接入力による多点入力を実装し、評価実験を実施した実験結果から、本入力システム上で安定した位置入力が可能であることを示し、また、複数の値をリアルタイムに同時に変化させる操作において本手法が有効に働くことを示した。一方で、操作の方向が食い違うような場合においては、単点入力に比べて効率が大きく低下することも明らかになった。加えて、今回の実装で採用した指先追跡の手法では並行操作時にうまく追跡しきれないことが分かった。この問題は実物体を入力デバイスとするような既存の並行操作のための入力機器ではあまり問題になっておらず、今後の課題となった。こうした操作上の特性の差はこれまでの先行研究では明らかではなかった。

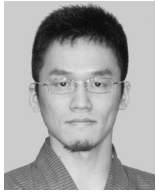
今後の課題として、指先位置認識のさらなる安定のための手法の検討と評価、また指先追跡に失敗した場合のフィードバックを返すための手法の検討をあげた。

参 考 文 献

- 1) Apple Inc.: Apple iPhone (online). available from <http://www.apple.com/iphone/> (2008.4.18).
- 2) Balakrishnan, R. and Hinckley, K.: Symmetric Bimanual Interaction, *Proc. CHI 2000*, pp.33-40 (2000).
- 3) Buxton, W. and Myers, B.: A STUDY IN TWO-HANDED INPUT, *Proc. CHI'86*, pp.321-326 (1986).
- 4) Dietz, P.H. and Leigh, D.: DiamondTouch: A Multi-User Touch Technology, *Proc. UIST'01*, pp.219-226 (2001).
- 5) Fitzmaurice, G. and Buxton, W.: An Empirical Evaluation of Graspable User Interfaces: Towards specialized, space-multiplexed input, *Proc. CHI'97*, pp.43-50 (1997).
- 6) Han, J.Y.: Low-Cost Multi-Touch Sensing Through Frustrated Total Internal Reflection, *UIST '05: Proc. 18th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, pp.115-118, ACM Press (2005).
- 7) Hinckley, K., Pausch, R., Proffitt, D., Patten, J. and Kassell, N.: Cooperative Bimanual Action, *Proc. CHI'97*, pp.27-34 (1997).
- 8) Kurtenbach, G., Fitzmaurice, G., Baudel, T. and Buxton, W.: The Design of a GUI Paradigm based on Tablets, Two-hands, and Transparency, *Proc. CHI'97*, pp.35-42 (1997).
- 9) Microsoft Corp.: Microsoft Surface (online). available from <http://www.microsoft.com/surface/> (2008.4.18).
- 10) Potter, R.L., Weldon, L.J. and Shneiderman, B.: IMPROVING THE ACCURACY OF TOUCH SCREENS: AN EXPERIMENTAL EVALUATION OF THREE STRATEGIES, *Proc. CHI '88*, New York, NY, USA, ACM, pp.27-32 (1988).
- 11) Rekimoto, J.: SmartSkin: An Infrastructure for Freehand Manipulation on Interactive Surfaces, *Proc. CHI2002*, pp.113-120 (2002).
- 12) SMART Technologies ULC: SMART Board interactive white boards (online). available from <http://smarttech.com/> (2008.4.18).
- 13) 福地健太郎, 暦本純一: SmartSkin を用いた多点入力システムの実装, *情報処理学会論文誌*, Vol.46, No.7, pp.1682-1692 (2005).

(平成 19 年 8 月 28 日受付)

(平成 20 年 4 月 8 日採録)



福地健太郎（正会員）

2000年東京工業大学大学院情報理工学研究科修士課程修了。2004年同博士課程を退学後、電気通信大学に勤務。ユーザインタフェースやエンタテインメント応用、音楽・映像分野との協調に興味を持つ。2002年FIT船井ベストペーパー賞受賞。



暦本 純一（正会員）

1986年東京工業大学理学部情報科学科修士課程修了。日本電気、アルバータ大学を経て、1994年より株式会社ソニーコンピュータサイエンス研究所に勤務。現在、同研究所インタラクショナルラボラトリー室長。理学博士。ヒューマンコンピュータインタラクション全般、特に実世界指向インタフェース、拡張現実感、情報視覚化等に興味を持つ。ACM、日本ソフトウェア科学会各会員。1990年情報処理学会30周年記念論文賞受賞、1998年MMCAマルチメディアグランプリ技術賞受賞、1999年情報処理学会山下記念研究賞受賞。2003年日本文化デザイン賞受賞。