

SmartSkin を用いた多点入力システムの実装

福地 健太郎[†] 暦本 純一^{††}

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同時操作や、オブジェクトに対する多様な操作を可能にする。我々は、非接触の人体形状センサである SmartSkin を用いて多点入力システムを構築した。SmartSkin は、センサ面上にある複数の手指の位置形状を、静電容量の変化を感知して計測する。試作システムでは画像処理技術を応用して、10 個以上の指先位置を実時間で追跡する。また、手全体の形状の動きを解析し、複数オブジェクトの同時操作のための新しい技術を開発した。本論文では多点入力システムの実装について述べ、同システムを用いた新しい対話技法を紹介する。

Multiple Pointing Input System on SmartSkin

KENTARO FUKUCHI[†] and JUN REKIMOTO^{††}

Multiple Pointing Input System (MPIS) allows multiple users to point to multiple positions on a graphical screen independently. It enables to control multiple objects on the screen simultaneously or increases the variety of manipulation. We implemented a new MPIS on SmartSkin, a sensor architecture for freehand manipulation. This sensor recognizes multiple hand positions and shapes and calculates the distance between the hand and the surface by using capacitive sensing and a mesh-shaped antenna. The prototype system can track over 10 fingertips motions simultaneously in real time. We also developed a new interaction techniques, which tracks the motion of the hand for massive concurrent manipulation. This paper describes the implementation of MPIS and new interaction techniques on the system.

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等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等によく見られるが、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、実際熟達したオペレータは両手を用いてこれらの部品を並行に操作する。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 (Multiple Pointing Input System, MPIS^{5),25}) 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同時操作が可能になる。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。また、複数の座標情報を用いた、より便利な入力手段をユーザに提供する。

SmartSkin¹⁵) は格子状に設置された電極と人体との間の静電容量を計測することで、電極上の人体の形状を測定するセンサである。センサ上の手や指の形状・位置を毎秒 10~20 回の頻度で計測することができる。

我々は、SmartSkin を用いて、指先で複数の座標を指示できる多点入力システムを実装した。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。本論文では、多点入力システムの実装技術と、本システムを利用したインタラクション技術について

[†] 電気通信大学

The University of Electro-Communications

^{††} ソニーコンピュータサイエンス研究所

Sony Computer Science Laboratories, Inc.

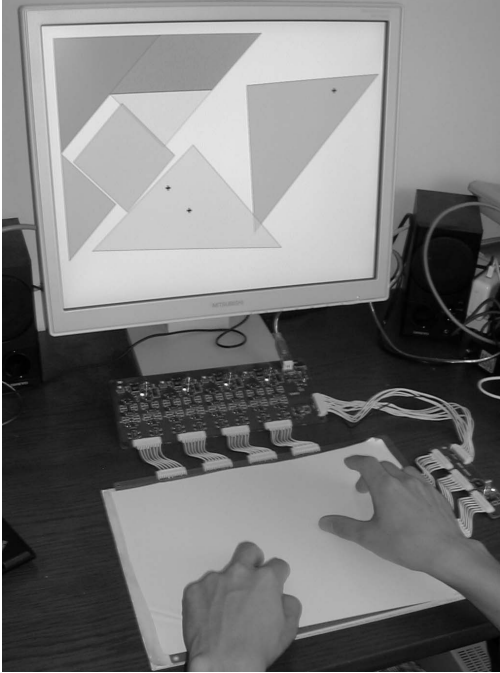


図 1 SmartSkin 外観：写真はタブレットサイズのもの
Fig.1 An overview of a tablet size interactive surface based on the SmartSkin sensor.

報告する．また、我々は SmartSkin による形状認識技術を用いた、新しい複数オブジェクト操作のためのインタラクション技術を開発した．上述の多点入力システムと組み合わせた運用についてあわせて報告する．

2. 多点入力システム

多点入力システムとは、GUI 画面上の複数の座標入力を受け付けるシステムである．ユーザは両手や指を使って複数の座標を同時に指示する．また、複数のユーザが、それぞれ独立にかつ同時に座標入力を行えるシステムも、多点入力システムの一つである．

2.1 多点入力システムを用いたインタラクション
従来の入力システムでは、1 つの座標入力と、それに付帯するボタン等の補助入力による操作が中心であり、複数の操作対象の同時操作は範囲指定等の副次的な操作を必要とする．多点入力システムでは、以下にあげるような操作が新たに可能となる．

- 複数オブジェクトの同時操作
画面上に複数の操作可能なオブジェクトがある場合、ユーザはそれらのオブジェクトを独立に指示することで、同時に操作することができる．たとえば、画面上にある複数個のファイルアイコンは、指先でそれぞれのアイコンを指して同時にドラッ

グできる．先にあげたオーディオミキサの場合、複数のスライダを並行に操作することが可能となる．

- 1 オブジェクトに対する多様な操作
1 つのオブジェクトに対し複数のポインティングデバイスを用いれば、複雑な指示をすることができる．たとえば図形エディタにおいて、2 つのポインティングデバイスを用いれば、対象図形の移動と回転あるいは拡大縮小操作を同時に行える．また、階層化メニューからアイテムを選択する場面では、階層が深くなるごとに別のポインティングデバイスを用いて指示をすることができるので、ポインティングデバイスを移動する手間を低減できる．
- 複数ユーザによる協調作業の支援
1 つの画面を、同じ場所にいる複数のユーザで共有するような場合、各ユーザは、物理的に共有された画面上の様々な箇所を独立に指示できる．

2.2 多点入力システムの分類

多点入力システムのうち、ポインティングのために何らかの物体を操作面に置き、その物体の座標が入力座標となるような形態をとるものを、本論文では有デバイス型と呼び、直接指先で座標を入力するものを、無デバイス型と呼ぶ．また、操作面に画面が重畳されており、画面上を直接触れるか操作デバイスを置くかして入力できるような形態を直接入力、そうでないものを間接入力と呼ぶ．

3. 関連研究

両手インタフェース

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¹⁾．Kurtenbach ら¹⁰⁾ や Hinckley ら⁶⁾ 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．

有デバイス型

Tangible User Interface^{8),14),19),20)} は、コンピュータ上の操作対象に関連づけられた入力デバイスを用意することで、ユーザがコンピュータ上の操作対象をあたかも直接操作しているかのようなイメージをいだかせることを目的としている．初期の研究では、操作デバイスは Phicon と呼ばれ、その形状は、操作対象を強く想起させるような関連性の強いものになっている．たとえば Illuminating Light¹⁹⁾ では、ユーザは光源・鏡・レンズの形状をした入力デバイスを机の上

で操作する．このシステムでは、複数のユーザが複数の Phicon を同時に操作することを可能にしており、自然な並行操作を実現している．しかしこうした Phicon を用いるインタフェースでは、入力デバイスはアプリケーションに特化したものになるため、複数のアプリケーションを切り換えて使うデスクトップインタフェースには向かなかつた．一方、Senseable¹⁴⁾ では、各操作デバイスはマウス大の汎用的な外見を持ち、操作対象との関連づけはユーザによる明示的な操作で行われる．

Graspable UI³⁾ は同時に 8 個のポインティングデバイスを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．評価実験では、画面上に 4 個の図形を表示し、それらを指定された場所・向きに合わせるタスクを課している．入力デバイスとして汎用な形状のものを使った場合と、画面上の図形に特化した外観を持つものを使った場合とを比較し、特化したデバイスを使う方が良い成績を出している．しかし、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さないため、デバイス間の衝突が起らない状況になっていたり、ユーザはただか 2 個のデバイスしか同時に操作できない、といった不備がある．

我々はこれまでに、ビデオカメラを使って卓上のデバイス位置を認識する有デバイス型の多点入力システムを試作している^{5),25)}．このシステムでは天板を透明なアクリル板にした机を用い、その上に操作デバイスを置いて使用する．各操作デバイスの底面は色付きのフェルト生地が貼られおり、システムは底面の色を見て各デバイスを識別し、その座標を計測する．また、システムは各デバイスの底面積の変化を計測し、そのデバイスのおおよその高さを得る．この試作機では、最大 8 個のデバイスの位置を同時に計測できる．図 2 に示すように、各デバイスは 2 cm 角程度の大きさであり、ユーザは指先を使って複数のデバイスを同時に操作することができた．また、手の縁を使って、複数のデバイスをまとめてかき集めるように動かす操作が可能である．

無デバイス型

Dual Touch は²⁶⁾、既存の感圧式タッチパネルを用いて擬似的に多点入力を実現するシステムである．ただし 2 カ所までしかポイントできず、また 2 つのポイント箇所を同時に動かすことはできない．

iGesture Pad⁷⁾ は、タブレット型の汎用ポインティングデバイスで、表面に面状の感圧センサを持ち、ユーザは指先で表面を触ることで位置入力ができる．本デ



図 2 過去の試作システムの操作

Fig. 2 Concurrent manipulation of multiple devices on the previous prototype.

バイスは多点入力をするにはできないが、人差指で入力をしているときに中指をセンサに接触させるとクリック操作、さらに薬指を添えるとダブルクリック操作ができる．

Enhanced Desk^{11),12)} では、カメラを用いて机上の手指の位置を解析し、多点入力を実現している．しかし、机の上から撮影した画像を使用しているため、オクルージョンの問題がある．また、画像から直接指先位置を知ることができないため、テンプレートマッチング等の画像処理を行って指先位置を検出している．また、指が机表面に接しているかどうかを識別することはできないため、このシステムではオブジェクトを操作するために指の曲げ動作やつまむ動作等のジェスチャ入力を要求する．SmartSkin を利用した本研究では、操作平面外部にカメラを設置する必要がなく、オクルージョンの影響を受けないため複数人での操作に支障はない．また、指先と操作平面との距離を認識できるため、指先と操作平面との接触を操作として採用しており、特別な操作を必要としない．

DiamondTouch²⁾ では、操作平面に送信電極が格子状に設置され、それぞれに異なる信号を発信させる．また、ユーザが座る椅子には受信電極を取り付ける．ユーザが椅子に座り、操作平面上の 1 点を指で触れると、人体を介して信号が電極間を流れるため、ユーザが平面上のどこを指したかを認識できる．2 点以上を指した場合は、それらを囲む矩形領域として認識されるため、複数の指先位置を同時に認識することはできないが、両手を使って矩形領域を指示する操作として利用できるとしている．SmartSkin では複数の指先位置を独立して計測できるので、こうした制約はない．

静電容量計測のインタフェース応用

静電容量計測技術を入力インタフェースとして応

用するものには、Zimmerman らによる先行研究がある²¹⁾。このシステムでは送信電極と受信電極を分離して設置する。それらの間に形成される電界に人体が干渉すると、その電極からの距離を計測できる。電極対を 2 組利用すれば、二次元平面上の位置を認識することができる。ただし、このシステムでは同時には 1 つの人体の位置しか計測することはできない。SmartSkin では電極対を格子状に配置することで、平面上の人体の位置と形状を同時に計測でき、その数や形状には制限がなく、また計測精度も向上している。

4. SmartSkin

SmartSkin¹⁵⁾ 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。ユーザの手の位置と形状を二次元で計測するとともに、センサ面から手までの距離を計測することができる。

4.1 原理

SmartSkin は送信器と受信器の電極を縦横に格子状に配置したセンサ面と、制御および D/A 変換のための回路からなる。センサ面の大きさは自由に広げることができ、また薄くすることが可能である。センサ面は平面である必要はなく、円筒面や球面への敷設も可能である。電極に銅線等柔らかい素材を用いれば、布地等、変形する面にも組み込むことができる。

図 3 は SmartSkin の構成を示している。センサ面の格子のうち、縦方向の電極は送信器に接続され、横方向の電極は受信器に接続されている。いま、送信器の 1 つが数百 KHz 程度の交流信号を印加したとすると、電極の各交点はコンデンサとして機能するため、交差する電極にも微弱な交流信号が流れ、受信器によって計測される。受信される信号の強度は交点付近の静電容量に比例する。このとき、接地された導電物体が交点付近に接近すると、送受信電極それぞれが物体と静電結合するため、送信器からの信号の一部が物体に流入し、受信器側の電極に流れる信号の強度は低下する。この信号強度の変化を計測することで、人体のように電極に比べて十分に大きく、仮想的に接地された導電物体と見なせるような物体の接近を計測することができる。なお、信号強度の低下幅は人体と交点との距離に反比例する。

次に、送受信電極を複数対使用する場合について述べる。制御部は時分割で各送信器から交流信号を送信する。この送信期間中に各受信器で信号強度を独立に計測することで、センサ面上のそれぞれの交点で、物体の近接を同時に検出することができる。したがって、センサ面に近接した複数の手や指の位置・形状を同時

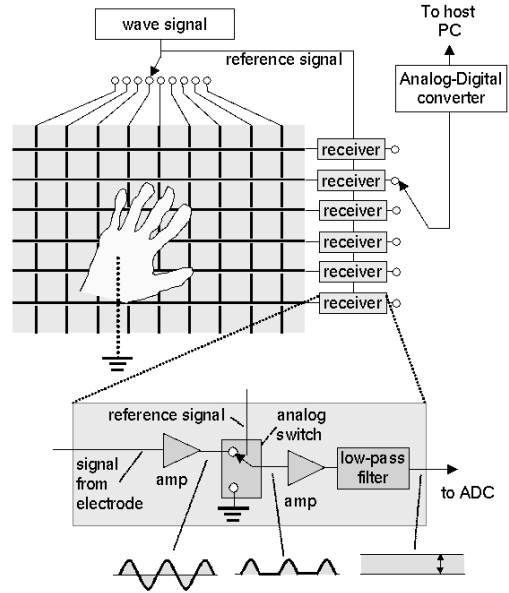


図 3 SmartSkin 仕様：格子状に張られたアンテナ上にかざされた手の位置と形状を認識する
 Fig.3 The SmartSkin sensor configuration: A mesh-shaped sensor grid is used to determine the hand's position and shape.

に得られることになる。得られるデータの解像度は、電極格子の密度に依存する。指の形状等を詳細に認識する必要がある場合は、電極間の距離を縮めればよい。

受信された信号には、付近の電子回路や電源等からのノイズが混入している。ノイズを低下させ信号精度を高めるため、SmartSkin はロックインアンプと呼ばれる技術を採用している。これは、送信信号と受信信号が同じ周波数・位相を持っていることを利用し、送信信号と異なる発信源からの信号を除去するものである。SmartSkin では送信器・受信器とも同じ回路にあるため、回路を単純化することができる。

このようにして得られたデータ(図 4 右上を参照)は、イメージセンサが映像を輝度値の 2 次元配列として得るのに類似している。画像データにおける輝度値は、SmartSkin においてはセンサ面と人体との距離に対応する。実際、次章以降で述べる SmartSkin を用いた入力システムの実装は、画像処理技術を応用したのものとなっている。

4.2 プロトタイプ

SmartSkin のプロトタイプはこれまでに 2 種類製作されている。1 つはテーブル型の試作システムで、8×9 の電極格子をテーブル天板の上に敷設しており、各格子の大きさは 10×10 cm となっている。出力データの解像度は 10 ビット(0-1023)で、毎秒 10 回の計

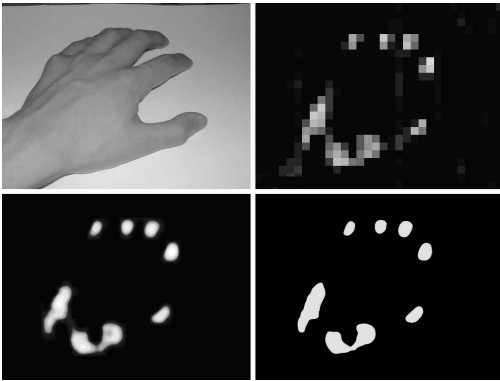


図4 指先認識の各段階：SmartSkin に手を乗せた状態（左上）、SmartSkin からの出力値（右上）、補間処理を施した状態（左下）、領域分割後の状態（右下）

Fig. 4 Each step of fingertips detection (upper left: a hand on the SmartSkin, upper right: raw input values, lower left: interpolated data, lower right: after segmentation).

測を行う。電極格子の上にさらに薄いベニヤ合板を敷き、その上に天井から吊るしたプロジェクタを用いて画面を投影することでタッチパネルと似た操作形態を構築した。このプロトタイプでは、複数のユーザの手の位置や腕の形等を認識できる。本プロトタイプの実装の詳細やアプリケーションの実装例等は、文献 24) を参照されたい。

2 番目はタブレット型のもので、 32×24 の電極格子からなり、各格子の大きさは 1×1 cm となっている。基板の構成は、送信部と、受信部および制御部、アンテナ部の 3 枚からなる。送信部には AVR 社の 8 ビット CPU AT90S8535 を用い、デジタル Out を駆動して矩形波を発信する。受信部には 4 個の AT90S8535 を用い、各々が 8 本ずつ、ロックインアンプで増幅した信号を計測する。計測された信号は 8 ビットのデジタルデータに変換し、FTDI 社の FT232AM を用いて USB ポートを経由して PC 本体にシリアル転送する。センサの感応範囲は、格子点上ではセンサ面から 5 mm 程度であり、また近付けた指先の大きさやセンサ面上の位置によってこれは様々であり、近接の検知には向かない。今回はアンテナ面に薄いシートを貼り、シートに直接指先で触れることで操作する形態をとった。計測回数は、現在の実装では毎秒 20 回までとなっている。交流信号を CPU から直接送信している都合上、これ以上速くすることは現状の実装では難しい。

出力画面は別に用意する方法と、プロジェクタでセンサ面に投影する方法の 2 種類を試作した。システムの全体像は図 1 に見られる。

本論文で報告する多点入力システムは、後者のタブ

レット型のプロトタイプを用いた。

5. 多点入力システムの実装

本章では、SmartSkin 上に構築した多点入力システムの実装について説明する。

我々は、無デバイス型、すなわち指先で直接指示する形の多点入力システムを、タブレット型の SmartSkin 上に実装した。タブレット型の SmartSkin では、人間の指の形状がはっきりと認識でき、また高さ方向の認識範囲は 5 mm 程度であり、指先がセンサ面に触れているかどうかの識別ができる。これらの特性により、一般的なタッチパネルと同様の操作感覚を持ち、かつ複数のポインティング操作を同時に処理することが可能となった。

本実装では得られた形状データをもとに、1) 個々の指先を識別し、2) それぞれの動きを追跡することで多点入力システムを実現する。入力システムとして機能させるには、これらの動きを実時間で処理する必要がある。

5.1 指先の識別

まず、得られた形状データは解像度が粗くそのままでは処理に適さないので、補間処理を施す。今回の実装では、 32×24 のデータを 32 倍の $1,024 \times 768$ に拡大している。補間処理には 3 次畳み込み内挿法 (bicubic convolution interpolation) を用いた。この手法では、ある区間の値を補間する際に、区間端の 2 点に加えてそれぞれに隣接する 2 点の値を用いて、値を滑らかに補間している。図 4 で示されるように、補間処理後の画像 (左下) では指先の形状がはっきりと確認できる。

次に、補間処理後のデータから指先を識別する。まず、適当に定めた閾値以下の値を切り捨てる。これは、センサ面上の人体のうち、センサ面からある程度離れている箇所を無視することに相当する。この処理により、センサ面に接触ないし極度に近接している部分のみ取り出すことができる。図 4 の右下図は、切り捨て処理後の状態である。

次に領域検出のアルゴリズムを用いて、連続するピクセルを 1 つの領域と見なし、センサ面に接触している部分の領域を検出していく。認識された領域のうち、ある閾値以下の面積 (ピクセル数) を持つ領域を指先と見なし、その重心を指先の座標とする。

閾値以上の面積を持つ領域の扱いについては、6 章で説明する。

本実装手法では、指どうし間の距離が、格子の間隔よりも短い場合には、2 つの領域が融合してしま



図 5 5本の指先の動きが追跡されている。ユーザは片手の指すべてをセンサ面に接触させ、手全体を時計回りに円運動させている
Fig. 5 Five tracked motion of fingertips. The user is touching with five fingers and rotating his hand clockwise.

い、指先を識別することができなくなる。より精度の高い識別を要する場合は、格子の間隔を詰めてデータの解像度をあげる必要がある。

5.2 動き追跡

SmartSkin は検出された個々の指がそれぞれ誰のどの指なのかを識別することはできない。そのため、指先の時間軸方向の動きを追跡するためには、毎回の計測フレームで得られた指先の位置情報をもとに、各フレーム間で指先どうしの対応を判断する必要がある。本実装では動き追跡の手法として、エネルギー最小化問題の手法を応用した。

フレーム t での、各指先の座標を、 $F_{i,t}$ ($i = 1, 2, \dots, n_t$) とする。次のフレーム $t+1$ で、計測された入力点が $F_{j,t+1}$ ($j = 1, 2, \dots, n_{t+1}$) で与えられるとき、まず各 $F_{i,t}$ につき、カットオフ値 R に対して $|F_{i,t} - F_{j,t+1}| < R$ を満たす $F_{j,t+1}$ の集合 $S_{i,t}$ を対応点の候補とする。同様に、各 $F_{j,t+1}$ に対しても、 $|F_{i,t} - F_{j,t+1}| < R$ を満たす $F_{i,t}$ の集合 $S_{j,t+1}$ を求める。 $S_{i,t} = \emptyset$ となるような $F_{i,t}$ や $S_{j,t+1} = \emptyset$ となる $F_{j,t+1}$ は、対応点がないと見なし、指が離れたか(リリース)、あるいは新たに指が触れたか(タッチ)として扱う。

次に、残った $F_{i,t}$ に対応する点を決定するために、すべての組合せを探索する。組合せ T について、 $\sum_{i,j} T_{i,j} |F_{i,t} - F_{j,t+1}|^2$ をコストとし、コストが最小となるような組合せ T を採用する。組合せの予測値が多過ぎる場合には追跡を断念し、すべての指先をリリースさせる。今回の実装では、カットオフ値 $R = 200$ (ピクセル)、追跡を断念する組合せ数は 10^6 回とした。

我々が試したところ、動き追跡は十分に動作している。図 5 に 5 本の指先が同時に追跡されている様子を示す。ただし、指先を素早く動かすと追跡に失敗する

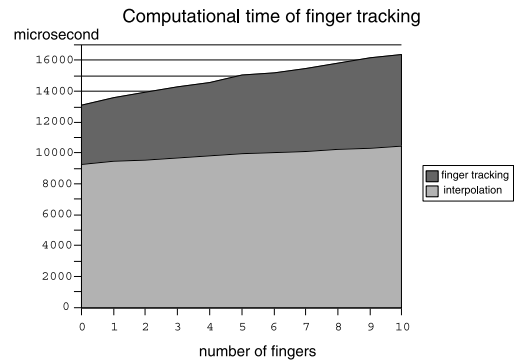


図 6 指先追跡の処理時間。

Fig. 6 Computational time of finger tracking.

ことがある。カットオフ値の 200 ピクセルはセンサ面上では 56 mm に相当するため、指先を秒速 1.1m 以上で動かしている計算となる。組合せ数の上限によるリリース処理は、1 人のユーザが操作している場合にはまず発生しないが、2 人以上のユーザで指を約 20 本以上同時に操作しようとして多くの指が近接すると発生することがある。

図 6 は、指先追跡にかかる処理時間を示したグラフである。実験では、1 人のユーザが指の本数を 10 本まで増しながら、センサ面の上で指を図 5 に示すように動かした。処理時間はそれぞれの指の本数のときにかかった計算時間を平均して算出している。薄い灰色の部分はセンサからデータを取得してから全体の補間処理に要した時間を示し、濃い灰色の部分は指先の識別および動き追跡に要した処理を示す。SmartSkin のデータ読み出し速度が毎秒 20 回であるので、現在の実装でも 1, 2 人による使用であればほぼ実時間処理が可能であることが分かる。ただし、以上の値は手の動きや指の位置関係によって大きく変動することが予想される。より詳細な実験は今後の課題としたい。

5.3 試作システム仕様

試作システムで得た指先の座標の解像度は 992×744 で、計測速度は SmartSkin の入力と同じ、毎秒約 20 回である。計測できる指先の最大数は明示的には定められていないが、センサ面の大きさの制限等から、20 個程度が限界となる。この数は、ユーザ 1 人の操作用途には十分である。2 人以上の使用の際には、各々が片手のみ使用するか、両手の人差指と中指を同時に使用するという程度であれば問題ない。

5.4 アプリケーション

指先による多点入力システムにより、様々な新しい

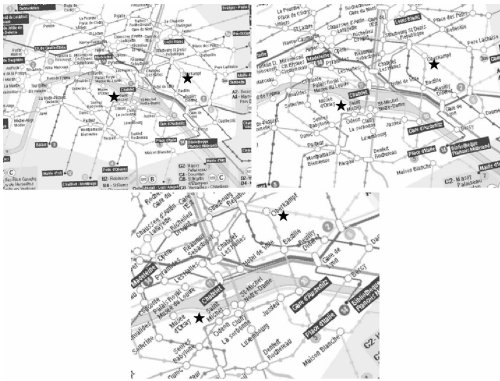


図 7 地図表示アプリケーション：各画面の 2 つの星印が、指で指示されている場所を示している。左上から順に、徐々に回転・拡大・移動が同時になされている

Fig. 7 Snapshot of the map viewer application. A subway map of Paris is shown and the user can pan, rotate and scale the map with two fingers.

インタラクション技術が可能になる。本節で、Smart-Skin 上の多点入力システムを使って構築したアプリケーションと、それぞれで使われているインタラクション技術について述べる。

地図表示アプリケーション

地図のスクロール・回転・拡大縮小操作を簡単にやるアプリケーションを開発した。図 7 に画面を示す。ユーザが 1 本の指で地図上の 1 点を指すと、その場所に応じた情報が表示される。一方、2 本の指で地図上の 2 点を指してから両方の指を動かすと、あたかも地図の表面が 2 本の指に貼りついているかのように、スクロール・回転操作ができる。2 点間の距離を変えると、長さに応じて地図の縮尺率が変化する。いずれの操作においても、2 本の指が指している地図上の場所は変化しない。

同様のアプリケーションは、metaDESK¹⁸⁾ においても実現されている。しかし metaDESK では地図上にある建物に対応する Phicon を用いて操作するので、自由な場所を指しての操作はできない。また、地図上の詳しい情報を得る等の操作をするには、また別の Phicon を用いる必要があった。一方で本手法では、地図上の場所の選択操作と、スクロール等の処理の切換えは、センサ面に触れる指の本数を増減するだけでユーザの操作にかかる負担は低い。

タングラムエディタ

複数ユーザによる両手操作の効果を検証するために、簡単な図形エディタの例としてタングラムエディタを製作した(図 8)。タングラムとは三角形および四角形からなる 7 枚の板を組み合わせて形を作る遊びで、それぞれの板は自由に移動・回転することができる。本

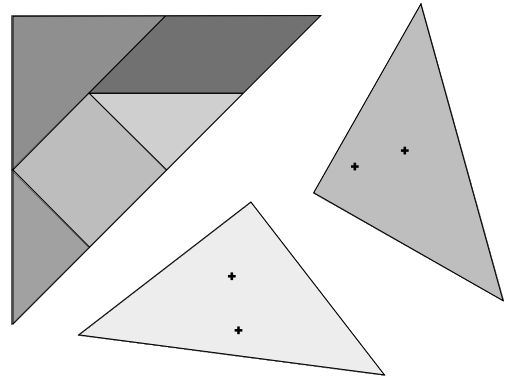


図 8 タングラムの操作画面：画面では、1 人のユーザが両手を使って、2 つの板を同時に操作している。4 つの十字カーソルは、ユーザが触れている箇所を示している

Fig. 8 Snapshot of tangram editor application. A user is rotating two polygons by his hands in parallel. Cross cursors shows the positions the user pointed to.

アプリケーションでは、板を 1 本の指で指示した場合はその板を移動でき、2 本の場合は移動と回転操作ができる。いずれも実際の板を指先で操作するのと同じような感覚を実現している。参加できるユーザの数に制限はなく、複数のユーザがそれぞれ違う板を複数枚同時に操作することが可能である。また、2 人のユーザで 1 つの板を操作することもできる。実際に 3~4 人の被験者に操作してもらったところ、それぞれが 1 つの板を片手を用いて回転操作を行うことができた。ただし全員が両手を使おうとしても、センサ面の大きさの制約があるため、被験者の手が干渉しあってしまう操作できない様子が観察された。

図形エディタ等従来の GUI ソフトウェアでは同種の操作は、操作モードをアイコン操作で切り換えたり、ポイントされた場所に応じて変更するといった手法が用いられる。こうした手法に比べ本手法は、モード切換えのコストがほとんどなく、また直感的な操作を実現している。同種の操作を実現した多点入力システムとして、陳らの研究^{9),22)} があげられる。この研究では左手と右手の特性の差に言及し、両手の指を 1 本ずつ使って回転操作をすることを前提としているが、我々の実装では、片手の 2 本指による操作でも特に違和感なく回転操作ができています。

Scarlatos の研究¹⁷⁾ では、ID を付加した実際のタングラム板を用い、ビデオカメラを用いて ID の位置と向きを認識することで、タングラムの操作平面上での配置を得て、それに応じた情報を提供する。こうした有デバイス型のシステムは最も自然で直感的な操作手段を提供しているといえるが、一方で計算機側から

板の配置を操作することはできない。我々の手法は、たとえば過去の板の配置の再現や板の大きさを動的に変更する等、計算機ならではの特性を活かしたい場合には有用である。

Touch Counter

今回構築した多点入力システム用のデモアプリケーションでは、これまでに紹介したようなアプリケーションを1つにまとめてあり、実行するアプリケーションを切り換えるためのメニューを設けている。このメニューから1つの項目を選択するとき、通常のGUIシステム上のメニューと同様、項目の1つを指で指示し、指を離すと選択されるようになっている。しかし、メニュー操作のためには画面を見なければならず、また場合によっては時間がかかる。これらの特徴は、対話相手を前にしてのデモの際には不便であると感じることが多かった。

そこで、我々はメニュー選択のための新しい手法として、“Touch Counter”を開発した。Touch Counterは画面の下半分の領域を占有し、この領域に触れた指の数を数える(図9)。たとえば、ユーザが2本の指でこの領域に触れた場合、2が入力値となる。また、指を離した後に300 msec以内に続けて触れられた場合は、その指の数がそれまでの値に加算される。たとえば3本の指で素早く2回触れた場合は、6が入力値となる。あらかじめメニューの各項目に数字を割り当てておけば、選択したい項目に対応する数字を、Touch Counterを使って入力することで、選択処理が実現できる。定められた領域内であればどこを触っても認識されるので、たとえば機械式ボタンを複数個用意して同等の機能を実現した場合に比べて、自由度が格段に大きい。

Touch Counterの特徴は、メニューの内容と対応する数値を記憶していれば、画面やセンサ面をまったく見ずに入力ができる点にある。したがって、デモの最中に視線を逸らさずにアプリケーションを切り換えたいという要求を実現することができる。また、メニューの項目がそれほど多くなければ、選択にかかる時間は一瞬であり、また細かい操作は必要ない。一方、Touch Counterのための領域は十分に大きい必要があるため、使用条件が非常に限られる。

6. かき集め操作

これまで述べてきたように SmartSkin 上の多点入力

メニューの各項目の大きさが小さい場合は選択に時間がかかる(Fitt's law)。一方、項目が大きいと、指を目的の項目に移動させるまでの時間が増える。



図9 Touch Counterの画面。画面下半分がTouch Counter領域。左上には通常のメニューも表示されている。画面では、指2本で触れ、“2”を入力したところ

Fig. 9 Snapshot of Touch Counter. The bottom half of the screen is for sensing the number of fingers. The user was touching with his 2 fingers and 2 was the input value.

システムでは、複数の操作対象の同時操作は指先を用いた多点入力により実現された。本章では、SmartSkinのデータを用いた、多点入力とは異なる同時操作のための手法について述べる。この手法は、すでに実装した多点入力システムと組み合わせて運用することができるものである。

Fitzmauriceは実験で、被験者に色付きのLEGOブロックの山を与え、ブロックを色ごとに分けるよう指示したところ、ブロックのまとまりを一度に動かすために手をブルドーザのようにして使う様が観察されると報告している⁴⁾。我々もデバイス型のプロトタイプを使った実験において、被験者が指先の代わりに手の縁を使って、動かす必要なくなった操作デバイスをかき集めて動かす様子を観察している。こうしたかき集め操作は、ユーザの手と操作デバイスとの物理的な接触を利用したものであり、無デバイス型の多点入力システムでは実現できていなかったが、我々は、手の形状データに動き追跡の手法を適用することで、かき集め操作をSmartSkin上で実現し、多点入力システムとの組合せを試みた²³⁾。

ユーザが手の平や縁でセンサ面に触れたとき、その接触面の形状は図4のように得られる。この接触面の形状や位置の変化を、オプティカルフローの手法を用いて解析する。形状データは処理速度向上のため64×48に縮小し、オプティカルフローを解析する。SmartSkinが出力する値は厳密には静電容量を表す

解析モジュールはIntel社のOpen Computer Vision Libraryを用い、解析手法はHorn & Schunckの手法を用いた。

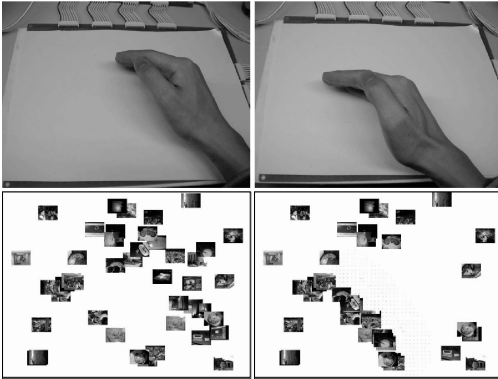


図 10 手の縁をセンサ面にあてながら動かすと（上図）、画面上のアイコンが片側に寄せ集められる（下図）。

Fig. 10 If the user touches to the surface with an edge of his hand and slide the hand (top), objects on the screen are scraped to a group along with the motion of the hand (bottom).

が、これを輝度情報としてオプティカルフロールーチンに与えても手の動きを追跡することができた。

解析されたフローは離散ベクトル場 V として得られる。画面上の移動可能なオブジェクトに対し、そのオブジェクトが V 上の点 $p_i (p = 1, 2, \dots, n)$ と重なっている場合に、そのオブジェクトが受ける力を $\sum_{0 < i \leq n} V_{p_i}$ とし、オブジェクトの移動量を求める。これにより、手の動きを利用しての大量のオブジェクトの同時操作が実現される。

すでに述べたように、認識された接触面の領域のうち、小さい面積のものは指先として認識される。ここで、指先として認識されなかった大きな領域を、上述したかき集め操作のためのフロー解析に用いると、指先による多点入力と手全体を使ったかき集め操作を統合することができる。ユーザは手の使い方を切り換えるだけで（ほかの方法で操作モードを切り換えたりすることなしに）2つの操作を使い分けることができる。また、多点入力とかき集め操作を同時に行うことも可能である。

図 10 はかき集め操作の例を示す。画面上には大量のアイコンが配置されている。それぞれのアイコンを指先で指示することにより、複数のアイコンの同時操作が可能だが、たかだか 10 個までのアイコンしか操作できない。かき集め操作を使うと、一度に大量のアイコンを動かすことができる。図 10 では画面中央付近に空き領域を作るためにかき集め操作を行っている。

7. 議 論

従来の多点入力システムのうち、無デバイス型のものと比べると、今回の我々の実装には次にあげる利点がある。

SmartSkin を利用した本実装は、Enhanced Desk のようなビデオカメラ入力画像を用いたものに比べて、大がかりな装置を必要としない。現在の SmartSkin プロトタイプは B4 サイズの電極面と制御基板からなり、持ち運びが可能である。また、外光条件やオクルージョンの問題もないため、間接入力の形態を使用するのであればどのような場所でも使用可能であり、可搬型の PC に組み込んだり外付け機器として使用したりする等の応用も可能であると考えられる。また、ユーザにマーカやセンサ等を装着させる必要もなく、複数のユーザが手軽に操作できる。

また、カメラ画像を用いる場合は取得画像から指先位置を検出するために、パターンマッチングをはじめ様々な処理を行うため計算負荷が高い。そのため、画像処理ボードを使用する等の対策をとる場合がある¹⁶⁾。また、複数のユーザによる同時多点入力を実現するのは困難であった。本研究ではセンサ面との接触部位の面積をもとに判断しているため、計算負荷は非常に低い。ただし、既存手法が人間の手指の構造をもとに指先位置に制約を設けて判断しているのに対し、我々の手法ではこうした制約はいっさい考慮していないため、掌等がセンサ面に軽く触れた場合等に誤認識をする場合がある。

Dual Touch や DiamondTouch 等、人体とセンサ面との接触を認識する入力デバイスを用いた先行研究では、入力できるポイント数や、その動き等に強い制約があったが、本研究ではこうした制約はない。一方で、DiamondTouch ではセンサ面に触れられている指先がどのユーザのものかを識別できるが、こうした機能は現在の SmartSkin では実現できていない。

有デバイス型と無デバイス型の比較においては、運用の問題ともからむために一概にどちらが優れると判断することはできないが、既存の有デバイス型多点入力システムが共通してかかえる問題として、デバイスの位置を計算機側から操作するのが非常に困難であり、そのため計算機による操作支援を受けにくい、というものがある。たとえば我々が以前試作した有デバイス型入力システム上で使用した評価用アプリケーションでは、課題を終えるたびに画面上の操作可能オブジェクトの位置を開始位置に戻しているが、ユーザはそれに合わせて操作デバイスを開始位置に手動で戻

する必要があった。市販のオーディオミキサでは、各スライダ・つまみ等にアクチュエータが組み込まれ、状態を復元することが可能なものがあるが、これらはその動きが1次元であり、強い制約がある。Actuated Workbench¹³⁾では、電磁石を用いて操作デバイスの位置を制御して、操作デバイス位置の保存・復元を可能にしているが、複数の操作デバイスにはまだ対応できていない。

また、Senseable 等多くの有デバイス型システムでは、指先を用いての複数デバイス操作は困難である。5.4 節で示したように、指先を使った多点入力では、多様な操作を簡単に行うことができる。こうした操作は有デバイス型では困難である。

有デバイス型では各デバイスの操作に腕や他の道具を使ってかき集める等の操作が可能であり、多数のデバイスの一斉操作が可能という特徴がある。これまでの無デバイス型の多点入力ではユーザの手指の数以上の同時操作は不可能であり、より多数の操作対象を同時操作したい場面では不満が残る。今回6章で述べた手法で、上述の一斉操作を無デバイス型の入力でも実現できることを示した。しかし有デバイス型での一斉操作と異なり、人体以外の物体を使っての操作はまだ実現できていない。たとえば導電性の金属棒を用意し、それを手で持ってセンサ面上に置けば、金属棒の位置・形状は SmartSkin によって観測することができるので、上述の操作を実現できる可能性はある。

8. まとめと今後の課題

指先で指示する形の多点入力システムを、人体形状を認識するセンサである SmartSkin を用いて構築した。このシステムは SmartSkin を用いてセンサ面に接触した指先を認識し、個々の指先の動きを追跡する。試作システムが複数ユーザによる複数箇所への指示を同時に処理できることを確認した。

構築したシステムを用いる実験アプリケーションを開発し、多点入力の有効性を検証した。地図表示アプリケーションは1人のユーザ向けのもので、指の本数による操作の切換えと、2本の指を用いた回転・拡大縮小操作が有効であることを確認した。タングラムエディタでは、複数のユーザが同時に多点入力を使った操作ができることを示した。Touch Counter は、小さな数を入力するために、指の本数を使ったインタラクションが効果的であることを示した。

大規模操作のために、多点入力とは異なる新しいインタラクション技術として、形状データをオプティカルフロー法で解析する手法を提案した。これにより、

手の縁を使ってのかき集め操作が実現できた。

今後の課題は、多点入力システムを用いた GUI システムの拡張、および各種アプリケーションへの応用、試作システムの評価実験がある。

既存の GUI 部品は基本的に、ポインティングデバイスが1つのみ存在することを前提としている。しかし、部分的に並行操作の可能性のある場面は多々ある。たとえば、スライダやチェックボタン、あるいはダイアルのそれぞれの集まりは、個々の部品を独立に操作可能である。一方で、ラジオボタンや Yes/No ダイアログのように、同時操作が許されないものもある。こうした点を考慮しながら、既存の GUI ツールキット — GTK+, QT, Java AWT 等 — を多点入力に対応させることを目標とする。

また、図形エディタのように複雑なポインティングデバイスを要求するアプリケーションに対して、多点入力システムが有効に働くかどうかを検証することを目標とする。

最後に、試作システム上で評価実験を行い、多点入力システムの有効性を検証することを課題とする。

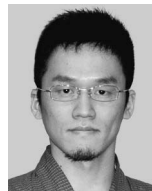
参考文献

- 1) Buxton, W. and Myers, B.: A study in two-handed input, *Proc. CHI'86*, pp.321-326 (1986).
- 2) Dietz, P.H. and Leigh, D.: DiamondTouch: A Multi-User Touch Technology, *Proc. UIST'01*, pp.219-226 (2001).
- 3) Fitzmaurice, G. and Buxton, W.: An Empirical Evaluation of Graspable User Interfaces: towards specialized, space-multiplexed input, *Proc. CHI'97*, pp.43-50 (1997).
- 4) Fitzmaurice, G.W.: Graspable User Interfaces, Ph.D. Thesis, Dept. of Computer Science, University of Toronto (1996).
- 5) Fukuchi, K. and Matsuoka, S.: An Evaluation of Multiple Pointing Input Systems, *Proc. INTERACT'01*, pp.739-740 (2001).
- 6) Hinckley, K., Pausch, R., Proffitt, D., Patten, J. and Kassell, N.: Cooperative Bimanual Action, *Proc. CHI'97*, pp.27-34 (1997).
- 7) iGesturePad.
<http://www.fingerworks.com/igesture.html>
- 8) Ishii, H. and Ullmer, B.: Tangible Bits: Towards Seamless Interfaces between People, Bits and Atoms, *Proc. CHI'97*, pp.234-241 (1997).
- 9) Koike, H., Chen, X., Nakanishi, Y., Oka, K. and Sato, Y.: Two-handed drawing on augmented desk, *Proc. CHI2002*, pp.760-761 (2002).

- 10) 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).
- 11) Motoki, K. and Hideki, K.: Enhanced Desk, Integrating Paper Documents and Digital Documents, *Proc. APCHI'98*, pp.167-174 (1998).
- 12) Oka, K., Sato, Y. and Koike, H.: Real-time fingertip tracking and gesture recognition, *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol.22, No.6, pp.64-71 (2002).
- 13) Pangaro, G., Maynes-Aminzade, D. and Ishii, H.: The Actuated Workbench: Computer-Controlled Actuation in Tabletop Tangible Interfaces, *Proc. UIST'02*, pp.181-190 (2002).
- 14) Patten, J., Ishii, H., Hines, J. and Gian, P.: Sensetable: A Wireless Object Tracking Platform for Tangible User Interfaces, *Proc. CHI2001*, pp.253-260 (2001).
- 15) Rekimoto, J.: SmartSkin: An Infrastructure for Freehand Manipulation on Interactive Surfaces, *Proc. CHI2002*, pp.113-120 (2002).
- 16) Sato, Y., Kobayashi, Y. and Koike, H.: Fast Tracking of Hands and Fingertips in Infrared Images for Augmented Desk Interface, *Proc. IEEE Automatic Face and Gesture Recognition*, pp.462-467 (2000).
- 17) Scarlatos, L.: An Application of Tangible Interfaces in Collaborative Learning Environments, *SIGGRAPH 2002 Conference Abstracts and Applications*, pp.125-126 (2002).
- 18) Ullmer, B. and Ishii, H.: The metaDESK: Models and Prototypes for Tangible User Interfaces, *Proc. UIST'97*, pp.223-232 (1997).
- 19) Underkoffler, J. and Ishii, H.: Illuminating Light: An Optical Design Tool with a Luminous-Tangible Interface, *Proc. CHI'98*, pp.542-549 (1997).
- 20) Underkoffler, J., Ullmer, B. and Ishii, H.: Emancipated Pixels: Real-World Graphics In The Luminous Room, *Proc. SIGGRAPH'99*, pp.385-392 (1999).
- 21) Zimmerman, T.G., Smith, J.R., Paradiso, J.A., Allport, D. and Gershenfeld, N.: Applying Electric Field Sensing to Human-Computer Interfaces, *Proc. CHI'95*, pp.280-287 (1995).
- 22) 陳 欣蕾, 岡 兼司, 中西泰人, 佐藤洋一, 小池英樹: 机型インタフェースにおける両手直接操作による描画システム, *インタラクティブシステムとソフトウェア IX: 日本ソフトウェア科学会 WISS2001 暦本純一 (編)*, pp.179-184, 近代科学社 (2001).
- 23) 福地健太郎, 暦本純一: 人体形状センサ Smart-Skin を利用した複数オブジェクトの同時操作手法, 第 2 回情報科学技術フォーラム (FIT2003) 論文集 (2003) .
- 24) 福地健太郎, 暦本純一: 人体形状センサのエンターテインメント応用とそのインタラクション技術, *エンタテインメントコンピューティング 2003 論文集*, pp.70-74 (2003).
- 25) 福地健太郎, 松岡 聡: 複数ポインティング入力システムの構築, *情報処理学会研究報告*, Vol.2000, No.61, pp.15-21 (2000).
- 26) 松下伸行, 綾塚祐二, 暦本純一: Dual Touch: ペン型 PDA のための新しい操作手法, *インタラクティブシステムとソフトウェア VII: 日本ソフトウェア科学会 WISS'99 安村通晃 (編)*, pp.23-32, 近代科学社 (1999).

(平成 16 年 10 月 20 日受付)

(平成 17 年 5 月 9 日採録)



福地健太郎 (正会員)

1975 年生。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)

1961 年 2 月 4 日生。1986 年東京工業大学大学院情報理工学研究科修士課程修了。日本電気、アルパータ大学を経て、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ンラボラトリー室長。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。