

SmartSkin: 複数の手の位置と形状を認識するセンサーとその応用

暦本純一

株式会社ソニーコンピュータサイエンス研究所
インタラクショナルラボラトリー
141-0022 東京都品川区東五反田 3-14-13
Phone: +81-3-5448-4380, Fax: +81-3-5448-4273
rekimoto@acm.org
<http://www.csl.sony.co.jp/person/rekimoto/>

要旨

実世界におけるテーブルや壁面などの上での複数の手による操作を認識するためのセンサー技術、SmartSkin について報告する。網状の電極を面上に敷設し、網交点と人体との距離を静電容量変化によって計測する。各交点からの値を時分割計測することで、複数の手の位置（センサー面上での2次元位置と、センサー面からの距離）を同時に判定することが可能になる。得られた値を内挿することにより電極の間隔よりも精度の高い位置計測が可能である。従来のテーブル型システムと異なり、外部にカメラなどを設置する必要や外乱光の影響がない。本論文では計測の原理と、この原理に基づいて開発したプロトタイプシステムと対話技法について説明する。

SmartSkin: An Infrastructure for Freehand Manipulations on Interactive Surfaces

Jun Rekimoto

Interaction Laboratory
Sony Computer Science Laboratories, Inc.
3-14-13 Higashigotanda, Shinagawa-ku Tokyo 1410022 Japan
Phone: +81-3-5448-4380, Fax: +81-3-5448-4273
rekimoto@acm.org
<http://www.csl.sony.co.jp/person/rekimoto/>

Abstract

This paper introduces a new sensor architecture for making interactive surfaces that are sensitive to human hand and finger gestures. This sensor recognizes multiple hand positions and their shapes as well as calculates the distances between the hands and the surface by using capacitive sensing and a mesh-shaped antenna. In contrast to camera-based gesture recognition systems, all sensing elements can be integrated within the surface, and this method does not suffer from lighting and occlusion problems. This paper describes the sensor architecture, as well as two working prototype systems: a table-size system and a tablet-size system. It also describes several interaction techniques that would be difficult to perform without using this architecture.

1 はじめに

実世界でのテーブルや壁などの「面」を、インタラクティブな装置として使うシステムが多く提案されている [14, 10, 12, 8]。これらのシステムは単体で、あるいは PDA などの携帯機器と併用して用いられ、ユーザの現実世界でのタスクを補助するためのツールとして、あるいは複数のユーザ間の共同作業支援装置として使われる。たとえばテーブル型ディスプレイに設計図面を表示してグループメンバーでの議論を支援したりするなどの利用例がある。これらのシステムでは、手や指によるジェスチャー操作が利用される場合が多い。従来の研究事例では、テーブル上(あるいは天井)に設置されたカメラを利用してコンピュータビジョンによって指の位置を検出する方式が多く用いられてきた ([14, 8])。しかし、この方法には、外界の光や照明条件などの影響を受けやすい、オクルージョン(体や頭によって手の映像が隠れる)などの問題がある。また、垂直方向の移動の検出(たとえば手がテーブルに触れているか、離れているかの判定)が困難である。

本論文では、カメラに換わる方法として、テーブル等の面に敷設された網状の電極と人体との静電容量変化を検出し、面上に置かれた複数の手の位置を同時に計測できるセンシング方式を提案する。センシングの原理、実際に試作した 2 種類のプロトタイプ構成・性能について述べ、プロトタイプ上で実現した種々の対話技法について説明する。最後に、このセンサー原理の他の応用可能性について議論する。

2 関連研究

静電容量計測の HCI への応用:

人体と機器間の静電容量の変移を利用して機器を制御しようという試みの例として、古くは 20 世紀初頭に発明された、電子楽器の一種であるテルミン (*Theremin*) がある。テルミンは二つのアンテナを備えており、演奏者が右手と左手を動かして、それぞれのアンテナとの距離を変化させることで音程と音量を制御する。テルミンでは単一電極による計測を行っているため、アンテナ全体と人体全体との間の静電容量変化が入力に寄与するので制御(演奏)には熟練を要する。

Hinkley らは、マウスやトラックボールに静電



図 1: SmartSkin センサーに基づく対話型テーブルシステムの例

容量タッチセンサーをとりつけた入力装置を提案している [6]。たとえばマウスを手でつかむと、画面上にツールパレットが自動的に表示されるようなインタフェースが可能になる。

Zimmerman らは *electric field sensing* と称して静電容量計測をユーザ・インタフェースに適用したシステムを開発している [16]。また、計測用の交流信号にデータを重畳することで、人体を介してデータ転送を行う PAN (personal area network) を提案している [15]。これらのシステムでは、分離した送信電極と受信電極を用いている。たとえば椅子型の装置の座面に信号を印加した場合、それに座った人間に信号が伝送され、椅子の前に置かれたポール(受信電極)と手との距離が入力情報として認識される。

これらのシステムと比較して、SmartSkin の電極構造は送信と受信電極が組み合わさった構成をとっており、システム外部に独立した電極を設置する必要がなく、変移を検出する範囲は交点付近に限定できるなど、計測の範囲を制御できることが特徴である。また、複数の交点を格子状に配置し時分割計測することで、従来よりも精度の高い位置計測が可能になり、またその精度は電極の間隔によって必要に応じて調整することができる。

画像処理に基づくジェスチャー認識:

カメラによるジェスチャー認識の研究事例は数多くあるが、家庭やオフィスなど、照明条件を制御できないような環境下で、手の位置や形状を安定的に認識する技術が確立しているとは言い難い。EnhancedDesk [8] では、遠赤外線を撮影できるカメラを用いて人体と机面の温度差によって手を認

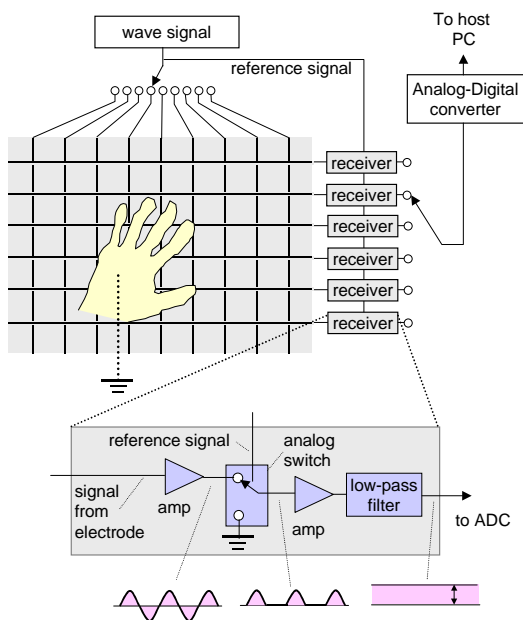


図 2: SmartSkin センサーの構成と計測原理

識している。HoloWall [10] やモーションプロセッサ [11] はカメラ側から近赤外線を照射し、その反射光によって近接物体を認識している。

これらの方式と比較して、SmartSkin の方法は、対話面付近の手形状のみを選択的に認識できる、背景・照明条件・オクルージョン等の影響を受けない、外部にカメラや赤外線照明などの装置を設置する必要がない、などの利点がある。

両手インタフェース

両手（複数のポインティングデバイス）を用いたインタフェースの研究事例としては [4, 1, 5, 13] が挙げられる。たとえば ToolGlasses [1] では、左手でツールパレットの位置を、右手のポインティングデバイスでツールを選択する、click-through と呼ぶ対話技法を提案している。後述するように、SmartSkin センサーを用いて同様な両手インタフェースを構築することも可能である。

このような両手インタフェースと比較して、複数の「指」を利用した提案の例は少ない。DualTouch DualTouch [9] は抵抗皮膜型タッチパネルの特性を応用して、最初の指を固定した状態で二番目の指がパネルにタッチするときに限定した対話技法を提案している。SmartSkin では複数の指の位置を同時に計測することができ、その位置関係やタッチ点の数に制約がないのでより自然なインタフェースを構成することができる。

3 センサー構成と動作原理

計測原理：

図 2 に SmartSkin の計測原理を示す。このセンサーは、格子状に配置された送受信の電極（実際にはウレタン被覆銅線）と信号処理回路から構成されている。縦方向の電線は送信電極で、横方向の電線は受信電極になる。送信電極のどれか一本に 100-500KHz 程度の交流信号を印加すると、各交点の静電容量に応じて横方向の電線にも信号が伝達される。受信する信号の強度は、送受信電極の交点の静電容量に比例する。ここで、この交点に接地した導電物体（たとえば人体）が接近すると、送受信電極それぞれが物体と静電結合するため、信号の一部が物体に流入する。その結果、受信電極で受信された信号が弱くなる。この変化を計測することによって、物体との距離を測定することができる。人体は電極と比較して十分に大きな物体なので、明示的に接地していなくても同じ効果を得ることができる。

次に、送受信電極が複数あった場合を考える。時分割で順々に送信電極に信号を印加し、複数の受信電極からの信号強度を独立に計測することで、複数の送受信電極のそれぞれの交点に物体が近接しているかどうかを計測することができる。この値を統合すると、たとえば電極が格子状に配置されている場合は、2次元平面上の格子点と物体との距離を計測することができる。これは、イメージセンサが映像を輝度値の2次元配列（ピクセル）として得るのと類似している。テーブル上に格子状の送受信電極を敷設すれば、テーブル上の手の位置と形を2次元画像として取り出すことができる。各点の値（ピクセルであれば「輝度」）は、センサー格子点と物体との距離に相当する。

ノイズ除去：

受信信号の強度変化は、オペアンプ等で入力信号増幅した後ローパスフィルターによって交流成分を取り除けば、電圧の変化として取り出すことができる。ただし、この方式では、電極の長さが増すにつれて、外界からのノイズによって計測する値が影響されてしまう。これを除去するために、以下の二つの処理を行う。

最初の処理は、計測などの分野で微弱な信号を測定するために利用されている「ロックインアンプ」という方法である。これは、測定対象が発信する信号と同じ周波数・位相によって受信信号を

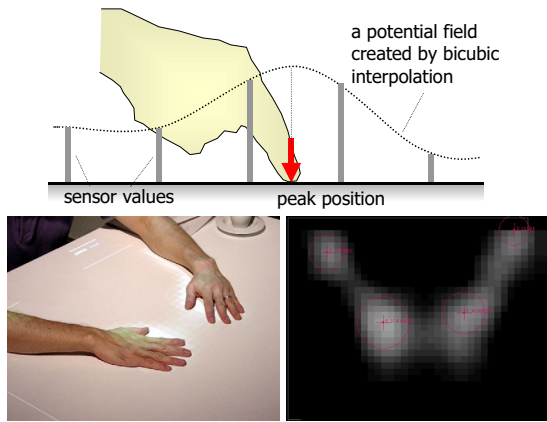


図 3: センサー値から形成されるポテンシャル面。上: 極大点を求め、指の位置とする。下: テーブルに置かれた手と対応するポテンシャル面 (濃淡画像として表現)。

フィルタリングするという技法である。測定対象と受信回路が独立している通常の場合では、このフィルタリングのための信号を生成すること自体が困難なことが多いが、SmartSkin センサーの場合は、送信信号も自分で生成しているので、この信号を単にフィルタリングのための制御信号として使うことができる。このフィルター処理によって、受信信号のうち送信電極からの信号でないものが除去される。

さらに、周辺の交流電源からのノイズを除去するために、受信信号強度を電源周波数 (たとえば 50Hz) の位相の 0 度と 180 度とのタイミングで 2 度サンプリングする。この値を平均することで、交流信号の影響による電圧のドリフトを除去することができる。

内挿処理:

格子状のセンサー点から得られた値から、面上にある物体の位置を推定することができる。各交点は、物体からの距離に応じた値を計測している。この値を連結すると、物体の位置を頂点とする二次元のポテンシャル面を得ることができる。ポテンシャルの極大値が物体のセンサー面上での (2 次元) 位置になる。具体的には、格子点から得られる値を 3 次畳み込み内挿法 (cubic convolution interpolation) して得られるポテンシャル面の極大点を計算し、物体の位置とする (図 3)。この内挿補完によって、物体の位置を格子点の間隔よりも高い精度で計測することができる。

複数の物体 (たとえば複数の利用者の手) が同

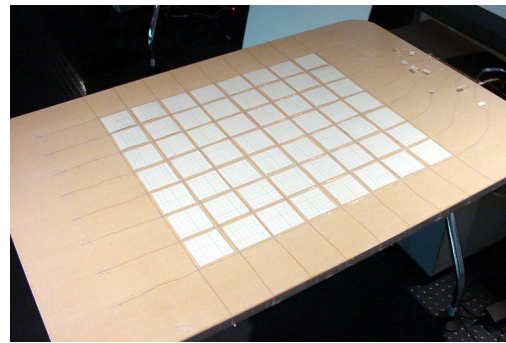


図 4: テーブル表面に敷設された電線。使用時には表面をベニヤ合板でカバーする。白い矩形は電線を合板の重量から保護するためのスペーサー。

時にセンサーに接近した場合は、ポテンシャル面に複数の極大点が生じることになる。従って、それぞれの極大点を認識することで、複数の物体の位置を独立に計測することが可能になる。同時に計測できる物体の個数には制限がないが、識別できる物体間の距離には限界がある (物体間の距離が電極の間隔よりも小さい場合は、二つの極大点が融合してしまうので分離が不可能になる)。

逆に、電極の密度を上げていくことで、物体の位置のみならず、その形状を認識することも可能である。

4 対話型テーブルの試作

前節で説明したセンシング原理の性能を評価するために、テーブル形式のインタラクティブシステムを試作した。このシステムは木製テーブルの表面に 8 × 9 本のウレタン被覆銅線 (太さ 0.5mm) を 10 センチ間隔で敷設し、さらにその表面を薄いベニヤ合板で覆ったものを使用している (図 4)。通常のテーブルとして利用することも可能である。天井釣りのプロジェクタと組み合わせて対話型テーブルとして機能する。

送信用の電極には、マイクロプロセッサ (Atmel AVR) の IO ポートが直接接続されており、IO ポートをソフトウェアで駆動することで 160KHz の矩形信号を発生させている。受信側は op アンプで増幅した後、前節で述べたようなフィルタリング処理を行っている。この信号は AD 変換した後、ホスト PC にシリアルケーブル経由で送信している。現在の実装では、毎秒 30 フレーム程度で全交点の値を計測・送信することができる。

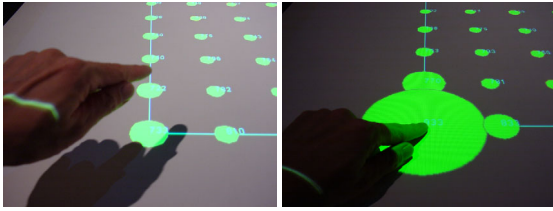


図 5: 垂直方向の距離の認識。表示された円の直径がセンサー値を示している。

ので、対話的な操作を行うプラットフォームとして使うことが可能である。

図 1 は複数の利用者が同時にテーブル面を操作している様子を示している。図 5 は、テーブルと指との距離を検知している様子を示している。この構成で、手の位置の認識精度は 1cm 程度だった。

4.1 対話技法

マウス互換操作と複数点の同時制御

このプラットフォーム上で、2種類の対話技法を試みた。最初の方式は通常のマウス等の入力装置からの置き換えを想定したもので、手の2次元位置をカーソルの位置に、手と平面との距離をマウスボタンに対応させている。距離に閾値を設定し、手の距離が一定以下になった場合にマウスボタンがプレスされたものと判定している。この値は、ユーザごとに調整して設定してある。

実際にテーブル上に図形を表示して、移動操作等を試みた。現在の実装ではXY方向の解像度が若干不足しているが、ほぼ通常のマウスと同等の操作感を与えることができた(図6)。このセンサーの特徴として、複数の点を同時に計測することが可能なので、両手を同時に使った操作(たとえば二つの図形を両手で移動させて、接触させることで連結させる)が可能である(図7)。また、複数の利用者がテーブルを囲んで操作しているような場合、並行して操作を行うことが可能である。これは日常でテーブル上のカードを配置しているような感覚と非常に近く、テーブル型のインタフェースとしては必須な機能であるという感想をもった。

ポテンシャル面による操作

さらに、マウスのような「一点」を制御するようなタイプ以外の対話技法の可能性として、手や腕によって生成されるポテンシャル面そのものを操作に用いる方式を試みた。前節で説明したように、このセンサーでは手や腕の接近に応じたポテンシ

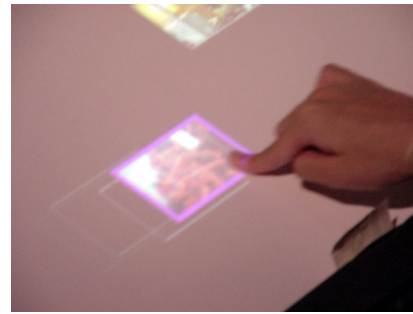


図 6: 指によるドラッグ操作

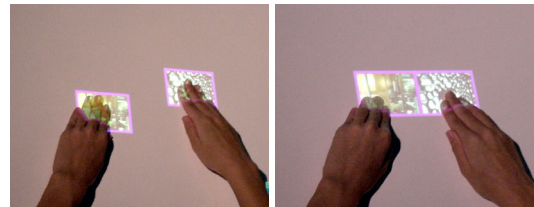


図 7: 両手操作によって二つのオブジェクトを接続している

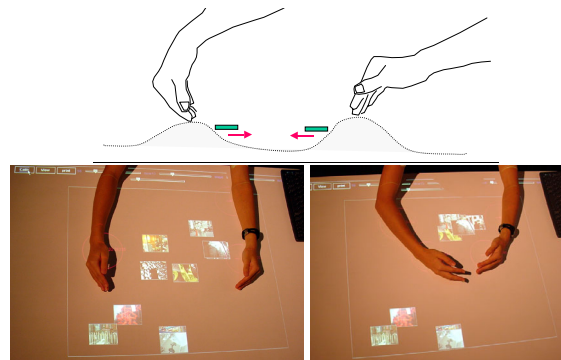


図 8: ポテンシャル面の変形によるオブジェクト操作

ル面が生成される。面上に表示した物体が、このポテンシャル面の傾斜に応じて移動するように設定しておく、手の動きに応じて物体を制御することができる(図8)。たとえば傾斜を下るような設定では、物体と手の間に反発力が生じるような感覚を与えることができる。

この方式を数人の利用者に特に事前の説明を与えずに試用してもらったが、指や手と反発力の関係をいったん理解すると、容易に物体を制御することが確認できた。また、両手を使った操作や、両手を輪の形にして物体を「囲い込む」操作や、複数の利用者間での協調的な操作などを、利用者自身が自発的に発見していく過程が観察できた。

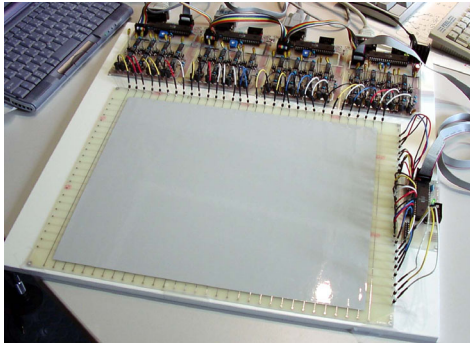


図 9: 指・手形状を認識する SmartSkin センサー。
1cm 間隔の電極を 32 × 24 本用いている。

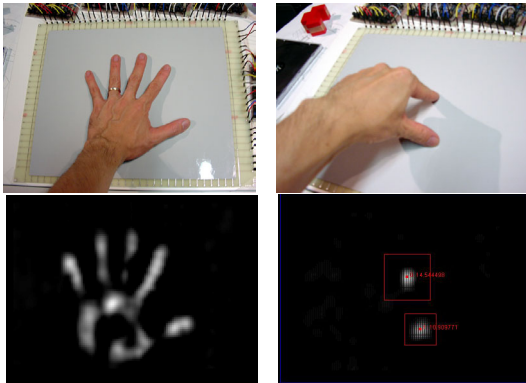


図 10: 手形状と対応するセンサー値

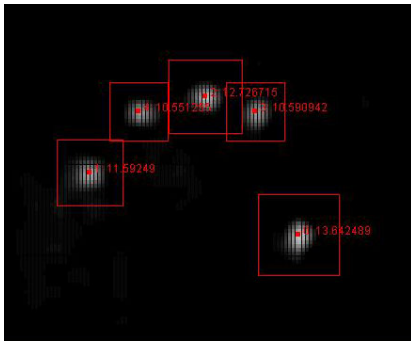


図 11: 指先認識の例

5 手・指形状の認識

テーブル型のシステムでは、少数のアンテナ線であっても、マウス相当の制御をテーブル面に与えることができることを確認できた。電極の本数を増やして、格子点の密度を上げていくことで、より正確な手形状の認識が可能になることを実証するために、第二の試作システムを開発した。このシステムでは、認識可能な面のサイズは 32cm ×

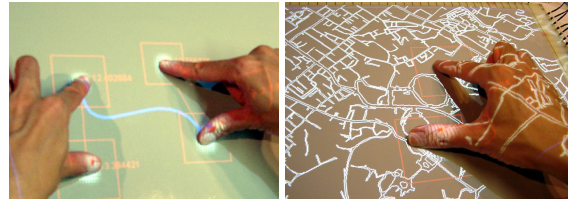


図 12: 複数指による操作の例

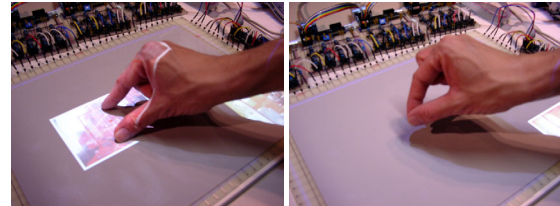


図 13: 2 本指ジェスチャーによる「つまみ上げ」
操作

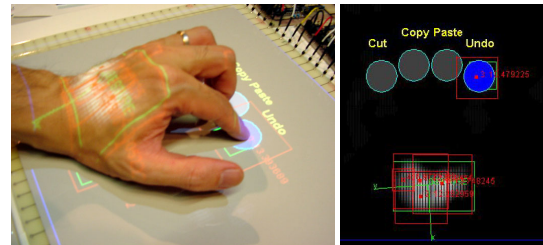


図 14: 掌の形状によるメニュー起動と指による
選択。

24cm で、電極を 1cm 間隔に配置してある。電極の本数は 32 本(受信) × 24 本(送信)である(図 9)。

このセンサーでは、単に手の位置だけでなく、手の形状や指の位置を認識することができる。図 10 はセンサーの値から内挿処理によって得た手の形状で、図 11 は極大値検出アルゴリズムによってセンサー面に触れている指先の位置が独立して検出できることを示している。

5.1 対話技法

手形状や複数の指の認識によって、複数の制御点を同時に制御するようなインターフェース、手の形状そのものをコマンドとして与えるインターフェース、他の物理的なオブジェクトを認識して、それをコマンドや制御用のツールとして用いるインターフェースが可能になる。図 12 に 2 本指を用いたインターフェースの例を示す。複数の指を使って、ジェスチャーコマンドを定義することも可能である。

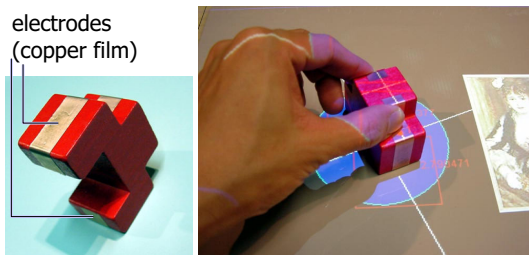


図 15: 実物体の認識とそれを用いた操作の例

図 13 では、2 本指を接近させた後に上に持ち上げる「つまむ」ジェスチャーを識別している例である。

手の形状そのものを使う例としては、図 14 に示すようなメニュー選択を試みた。まずユーザがセンサー面に掌を置いたことを、その面積によって判定する。また手の方向を掌の形状（モーメント）によって判定し、メニューコマンドを手の周辺に表示する。メニューコマンドは指のタップによって行う。

5.2 物体の認識と操作

このセンサーでは、手や指による操作に加えて、実物体を介した操作 ([2, 7]) を併用することが可能である (図 15)。操作に利用する物体は木やプラスチックなどの絶縁体から出来ており、底面に金属箔でパターンが貼り付けられている。このパターンは導線によって結合され、物体上部の金属箔と接続している。この物体をセンサー面に置いた状態では（金属箔は接地されていないので）、センサーの値には影響が起きない。利用者が物体上部部に触れると、頭頂部の金属箔を介して底面の金属箔パターンが接地され、そのパターンをセンサーが読み取ることが可能になる。底面のパターンによって物体の種類を識別することができ、さらに物体のセンサー面上での位置や方向を認識することができる。

指の認識と併用すれば、「物体を面に置いてある操作モードを選択し、さらに指による操作を加える」といった、複合的な操作が可能になる。

6 他の応用と今後の可能性

本論文では、カメラに依存しないジェスチャー認識の手法を提案し、テーブル型対話システム等に



図 16: SmartSkin の衣服への組み込み

適用したシステムと、その対話技法について報告した。本論文で紹介した試作システムは SmartSkin の可能性の一部を実現しているにすぎず、今後、他の応用への検討や、新しいインタフェース技法の提案などを行っていききたい。以下で、現在までに構想しているいくつかの将来計画について述べる。他の面、機器への組み込み：

SmartSkin センサーはセンスする面が平面である必要がないので、現実世界を構成する種々の面に組み込んでインタラクティブなものにする可能性をもっている。たとえばソファに組み込んで利用者の姿勢に応じて映像の表示方法を変えたり、アームレスト上でのジェスチャーで番組を選択したりできるような「スマート家具」などの例が考えられる。また、キーボードの下に SmartSkin を組み込むことを考える。キーボード上に置かれた手の形状を認識できるので、キーボード上でタブレットのように指で描画するインタフェースや、両手で打鍵しているときは文字入力モードで、右手がマウス上に置かれると左手部分のキーボードアサインが自動的にコマンドキーに切り替わるような入力方式を提供することができる。

図 16 は衣服へ組み込むためのセンサー例で、ポケットの中に入れておけば外側から指の運動を認識することができる。携帯音楽機器を衣服の外からコントロールするような応用や、さらには「インタラクティブ衣服」などの分野への応用が考えられる。

このように、従来の機器の表面形状を一切変更することなく、付加的な機能を組み込むことが可能ではないかと考えている。

触覚フィードバックとの融合：

SmartSkin は入力センサーであり、人工物の表面に「皮膚感覚」のようなセンサー機能を組み込むための技術だといえる。一方「触覚フィードバック」技術は、人工物から人体（の皮膚感覚）への情報であり、両者を相補的なものと考えることができ

る。これらを組み合わせることにより、たとえば機の表面に仮想的なクリック感を与えるといったインタフェースを構成できる。従来の触覚フィードバックインタフェース ([3] 等) では、ユーザの指が対象物に接触していない場合はフィードバックを返すことが不可能だった。SmartSkin では、指の近接を認識できるので、たとえば左手で持った PDA の操作面に指を接近させると (PDA 筐体の振動により) フィードバックを返すような方式が構成可能である。

透明電極の適用：

SmartSkin を構成する電極は ITO 皮膜などの透明な電極で置き換えることが可能である。これにより、平面型の表示装置と一体化した入力装置を構成することができる。

センサー面を介したデータ通信：

SmartSkin センサーでは電極に交流信号を印加して計測を行っている。この信号にデータを (周波数変調などにより) 重畳することで、面上の物体との間で情報通信を行うことが可能である。たとえば、テーブル上に置かれた携帯機器が自動的にシンクロナイズするなどの応用例が考えられる。また、テーブル上での座標情報をデータとして送信すれば、テーブル上の携帯機器が、「どのテーブルのどの位置にあるか」を「知っている」ことになる。このような識別・位置情報を利用すると、同じテーブルの上の機器同士でのみデータ通信を許すようセキュリティ設定や、Augmented Surface システム [12] が提案しているようなインタフェースが構築可能になる。

謝辞

システム実装に協力して頂いた石澤太祥、戸田麻子両氏に感謝する。計測原理と回路設計に関しては田島茂氏から貴重な助言を頂いた。

参考文献

- [1] Eric A. Bier, Maureen C. Stone, Ken Pier, William Buxton, and Tony DeRose. Toolglass and Magic Lenses: The see-through interface. In James T. Kajiya, editor, *Computer Graphics (SIGGRAPH '93 Proceedings)*, volume 27, pages 73–80, August 1993.
- [2] George W. Fitzmaurice, Hiroshi Ishii, and William Buxton. Bricks: laying the foundations for graspable user interfaces. In *CHI'95 Conference*, pages 442–449, 1995.
- [3] Masaaki Fukumoto and Toshiaki Sugimura. ActiveClick: Tactile feedback for touch panels. In *CHI 2001 summary*, pages 121–122, 2001.
- [4] Y. Guiard. Asymmetric division of labor in human skilled bimanual action: the kinematic chain as a model. *Journal of Motor Behavior*, pages 485–517, 1987.
- [5] Ken Hinckley, Randy Pausch, John C. Goble, and Neal F. Kassell. Passive real-world interface props for neurosurgical visualization. In *CHI'94 Proceedings*, pages 452–458, 1994.
- [6] Ken Hinckley and Mike Sinclair. Touch-sensing input devices. In *CHI'99 Proceedings*, pages 223–230, 1999.
- [7] Hiroshi Ishii and Brygg Ullmer. Tangible Bits: Towards seamless interfaces between people, bits and atoms. In *CHI'97 Proceedings*, pages 234–241, 1997.
- [8] Hideki Koike, Yoichi Sato, Yoshinori Kobayashi, Hiroaki Tobita, and Motoki Kobayashi. Interactive textbook and interactive venn diagram: natural and intuitive interfaces on augmented desk system. In *CHI 2000 Proceedings*, pages 121–128, 2000.
- [9] Nobuyuki Matsushita, Yuji Ayatsuka, and Jun Rekimoto. Dual Touch: a two-handed interface for pen-based PDAs. In *ACM UIST 2000 Proceedings*, pages 211–212, 2000.
- [10] Nobuyuki Matsushita and Jun Rekimoto. HoloWall: Designing a Finger, Hand, Body, and Object Sensitive Wall. In *Proceedings of UIST'97*, October 1997.
- [11] Shunichi Numazaki, Akira Morshita, Naoko Umeki, Minoru Ishikawa, and Miwako Doi. A kinetic and 3D image input device. In *Proceedings of the conference on CHI 98 summary*, pages 237–238, 1998.
- [12] Jun Rekimoto. A multiple-device approach for supporting whiteboard-based interactions. In *Proceedings of ACM CHI'98*, pages 344–351, February 1998.
- [13] Jun Rekimoto and Eduardo Sciammarella. ToolStone: Effective use of the physical manipulation vocabularies of input devices. In *Proc. of UIST 2000*, 2000.
- [14] Pierre Wellner. Interacting with paper on the DigitalDesk. *Communication of the ACM*, 36(7):87–96, August 1993.
- [15] Thomas Zimmerman. Personal area networks: Near-field intrabody communication. *IBM Systems Journal*, 35(3-4):609–617, 1996.
- [16] Thomas G. Zimmerman, Joshua R. Smith, Joseph A. Paradiso, David Allport, and Neil Gershenfeld. Applying electric field sensing to human-computer interfaces. In *CHI'85 Proceedings*, pages 280–287, 1995.