

# 机型実世界指向システムにおける紙と電子情報の統合 および手指による実時間インタラクションの実現

小池 英樹<sup>†</sup> 小林 貴訓<sup>†</sup>, 佐藤 洋一<sup>††</sup>

本論文は紙と電子メディアのスムーズな統合を目的とした机型実世界指向システム EnhancedDesk とその応用について述べる。システムはページに貼られた 2 次元バーコードを認識すると、自動的にそのページに関連する電子情報をデータベースから検索し机上に投影する。ユーザはその電子情報を自分自身の手指によって直接操作できる。ユーザの手指認識のために、我々は赤外線カメラ、テンプレートマッチング、パンチルトカメラを利用した新しい手法を開発した。本手法を用いると、ユーザの手指を実時間で高精度に安定して認識することができる。EnhancedDesk の応用例として計算機支援型学習環境 Interactive Textbook を試作した。

## Integration of Paper and Digital Information and Real Time Interaction by Hand on Augmented Desk System

HIDEKI KOIKE,<sup>†</sup> YOSHINORI KOBAYASHI<sup>†</sup>, and YOICHI SATO<sup>††</sup>

This paper describes an augmented desk system, named EnhancedDesk, which aims to integrate paper and digital information smoothly. When the system recognizes 2-D barcode attached on the page which has digital information, the system automatically retrieves the digital information and projects them onto the desk. Users can manipulate the digital information using their own hand or finger. To recognize users' hand/finger, we developed a novel method for hand/finger detection using an infrared camera, template matching technique, and a pan-tilt camera. Using our method, users' hand/finger is recognized in real time. We also showed an application of EnhancedDesk to computer supported learning environment, and the system was named Interactive Textbook.

### 1. はじめに

計算機ユーザインタフェース研究の重要な目的の 1 つは、より自然でより直観的なインタフェースを開発することである。現在のパーソナルコンピュータ(PC)におけるユーザインタフェースの標準である Graphical User Interface (GUI) は成熟しており、PC 操作に慣れたユーザには効率的な対話を提供する。しかし、GUI は必ずしも自然で直観的なインタフェースを提供するわけではない。たとえば、マウスは高速で高精度なポインティングを実現するが、マウスを初めて操作する人が混乱している姿をときどき見かけることから分かるように、画面上のカーソルを机上のマウス

で操作するのは必ずしも人間にとって自然とはいえない。画面上に表示された項目リストからある項目を選択したり、画面上の適当な位置を指し示したりするには、人差指を使用するほうがより自然で直観的であろう。実際、日常的なコンピュータユーザでない普通の人々が使うインタフェースにはタッチパネルインタフェースが多い(例: 銀行の ATM、駅の券売機、駅の観光案内用情報端末など)。また、コンピュータ画面に表示したものを説明するとき、つい画面を指で触ることがあるのも指によるポインティングが自然で直観的であることを示していると考えられる。

GUI のもたらす制限を取り払ったとき、より自然でより直観的なインタフェースを提供できる情報システムは数多い。たとえば、Bolt は Media Room<sup>2)</sup> においてジェスチャや音声によるマルチモーダルインタフェースの有効性を示した。また、最近では Turk があらゆるセンシング技術を利用してコンピュータと対話を行う Perceptual User Interface (PUI) を提案している<sup>20)</sup>。同様に Fitzmaurice<sup>3)</sup> や Ishii<sup>5), 21), 22)</sup>

<sup>†</sup> 電気通信大学大学院情報システム学研究科  
Graduate School of Information Systems, University of  
Electro-Communications  
現在、三菱電気株式会社設計システム技術センター  
Presently with Mitsubishi Electric Company

<sup>††</sup> 東京大学生産技術研究所  
Institute of Industrial Engineering, University of Tokyo

は実世界の物体を用いて電子情報を操作する Graspable/Tangible インタフェースを提案している。

こうした PUI インタフェースの 1 つに机型実世界指向システム<sup>1),10),11),15),16),21)~23)</sup>がある。机型実世界指向システムは、オフィスや教育環境で必ず使用する机に焦点をあて、そこでの作業を効率化することを目的としている。具体的には、机上に置かれた物や利用者の手指をシステムが認識し、これに基づきユーザが必要とする情報の生成や提示を行う。また情報の表示は一般的なディスプレイの代わりに、液晶プロジェクタなどを用い机面上に行うことが多い。

本研究の第 1 の目的は、机型実世界指向システムを利用し、伝統的な情報伝達メディアである紙と現在急速に普及の進む電子メディアとのスムーズな統合を行うことである。第 2 の目的は、机上に投影表示される電子情報のユーザの手指による直接操作を実現することである。特に、これまでの机型実世界指向システムにおいて解決されていない実時間かつ高精度な手指認識と、周囲の照明条件の影響を受けにくい口バストな認識を目指した。

本章では、机型実世界指向システムとその問題点について述べる。そしてこれらの問題点を考慮して開発した EnhancedDesk システムについて述べる。3 章では EnhancedDesk の一応用例として、計算機支援型学習システム Interactive Textbook について述べる。4 章では本システムの問題点や関連研究との比較について述べる。5 章は結論である。

## 2. 机型実世界指向システム: EnhancedDesk

### 2.1 紙 vs. 電子メディア

World Wide Web (WWW) や CD-ROM に代表される電子メディアは、これまで紙には困難であったコンピュータグラフィックス (CG)、電子画像、音声データの出版や送信を可能とした。では紙はなくなるのかということ、当面はそうではない。なぜならば紙には電子メディアに比較し多くの利点があるからである。たとえば、紙は携帯性が高く、落下や折曲に強く、また表示された文字や画像の可読性も高い。

現在、人々は状況に応じて適当なメディアを選択して使い分けている。たとえば、多くの新聞社や出版社は、紙の新聞や雑誌とほぼ同じ内容を持つオンライン WEB ページを提供している。人々は、混んだ電車の中では、一般には紙の新聞や雑誌を読む方を選ぶ。一方、紙の新聞/雑誌には見られない動画などを見るためには、オフィスや家庭にあるコンピュータを使用する。

両者はこのように密接な関係を持っているにもかか

わらず、これらをリンクする手段は非常に少ない。たとえば、URL は雑誌とそれに関連する WEB ページをリンクする鍵である。しかしながら、利用者はその URL をキーボードで手入力しなければならない。また、いくつかの本は、マルチメディアデータを含んだ CD-ROM を付録として付けている。読者は適当なページにくと CD-ROM 内のプログラムを起動するよう指示される。これら 2 つのメディアを自動的にリンクする環境があれば、ユーザにとってさらに便利であろう。

### 2.2 EnhancedDesk によるメディアの統合

上述した紙と電子メディアの統合を実現するプラットフォームとして、我々は机型実世界指向システム EnhancedDesk を開発し、これを報告している<sup>7)</sup>。机型実世界指向システムの典型的な例は Wellner の DigitalDesk<sup>23)</sup>に見ることができる。DigitalDesk は (1) 普通の机、(2) 机上を観察するビデオカメラ、(3) ビデオカメラからの入力画像を処理し適当な出力画像を生成するコンピュータ、(4) コンピュータで生成された出力画像を机上に投影するビデオプロジェクタ、の 4 つを主たる構成要素とする。この構成はその後の多くの研究で参考にされている。

関連する机型実世界指向システムとの相違点は 4.6 節で述べるが、EnhancedDesk の主な特徴は次の 2 点である。

- 実世界物体認識に基づく電子情報の自動検索/表示  
本や書類を机上に置いたとき、システムはどんな書類が置かれているかを認識し、同時にこれに関連した電子情報をデータベースから自動的に検索し、机上に投影する。従来ユーザが行っている紙と電子情報の関係をシステムが自動的に行うことで、ユーザの負担を減らすことが目的である。なお、現在は実物体の認識に図 1 に示す 2 次元バーコード<sup>13)</sup>を使用している。
- ユーザの手指認識による電子情報の直接操作  
第 2 の特徴はユーザ自身の手指による電子情報の操作である。先に述べたように、ある種のアプリケーションにおいては、マウスより手指による操作の方がより自然で直観的である。本システムで

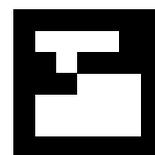


図 1 2次元バーコード

Fig. 1 2-D matrix code.

は後述する手指認識手法を用いて、マウスに劣らず高精度で高速な操作を実現した。また従来のシステムが暗く照明条件の一定な部屋でしか安定して動かないのに対し、本手法は照明の影響を受けにくく安定して稼働する。

4.6 節で詳しく述べるが、これまでに提案された机型実世界指向システムにおいて、この両者を同時に満たしているものはない。特に、後者の実時間性は EnhancedDesk によって初めて実現されるものである。

### 2.3 初期プロトタイプと実装上の問題点

開発した初期プロトタイプでの実験<sup>7)</sup>を通して、類似する構成を持つ机型実世界指向システムに共通する以下のような問題点が明らかとなった。

#### (1) 手領域の切り出し

従来の机型実世界指向システムにおいては、利用者の手領域を背景から切り出すために、肌色抽出を行うのが一般的である。しかし、机上に肌色に近い色の物体があると誤認識される。また、図 2 (左) に示すように、利用者の手の上にコンピュータ画面が投影されるため、手の色の変化し安定した認識ができない。

また、背景画像から手の切り出しを行うにあたり差分抽出を行うが、一般の動画画像処理と異なり、背景画像が動的に変化するため、手の安定した切り出しが難しい。

#### (2) 指先の認識

従来のシステムにおける指先の認識では、特定方向の手の向きを仮定したり、指先は 1 点としていたりするなどの制約が多く、また認識精度の不十分さが大きな問題である。

動画画像処理研究では手の 3 次元モデルを利用して指先を検出する手法などがあるが、本システムのように実時間性を要求される場合には適当でない。

#### (3) マーカの大きさ

机型実世界指向システムにおいては、実物体の認識にバーコードや RGB 3 色を利用したマーカを使用することが多い。そして、上方に設置した CCD カメラで机上全体を撮影するが、現在一般に入手可能な CCD カメラの解像度では十分な解像度が得られないため、マーカの大きさが大きくならざるをえない。

### 2.4 EnhancedDesk の改良点

前節で述べた問題点を解決するために、我々は EnhancedDesk に改良を加えた。図 3 に新しいシステムの概観とハードウェア構成を示す。DigitalDesk に代

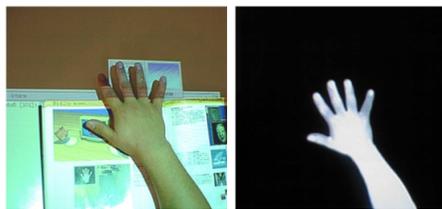


図 2 一般の CCD カメラで撮影した画像 (左) と赤外線カメラで撮影した画像 (右)

Fig. 2 Images captured by normal camera (left) and infrared camera (right).

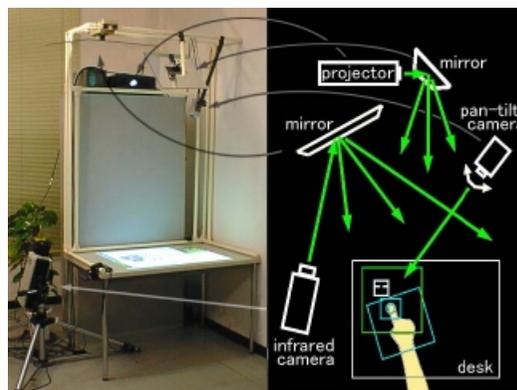


図 3 EnhancedDesk の概観とシステム構成

Fig. 3 An overview of EnhancedDesk and its system configuration.

表される一般の机型実世界指向システムでは 1 台の CCD カメラで机上を撮影している。これに対し、新 EnhancedDesk では赤外線カメラとパンチルトカメラの 2 台を使用する点が構成上の最大の相違点である。画像処理の詳細なアルゴリズムについては本論文のスコップから外れるため、別論文<sup>6),17)</sup>を参照された。ここでは処理の概略と特徴について要点を記す。

#### ● 赤外線カメラによる手領域の切り出し

手領域の切り出しには赤外線カメラ (Nikon サーマルビジョン LAIRD3A) を用いた。このカメラを利用して人の体温の近傍 (30~34°C) を撮影することにより、机上の手の様子を NTSC の 256 階調の映像として得ることができる。図 2 (右) に示すように背景画像や手に投影される画像に関係なく安定した手領域の切り出しが実時間で行える。色を利用した手認識の場合、照明の影響を受けやすいが、赤外線カメラではこうした問題はほとんど生じない。なお、体温と同程度の物体が机上に存在する場合には赤外線カメラによって検出されてしまうが、手に比べ大きすぎたり小さすぎたりする物体は除外する処理を行っている。

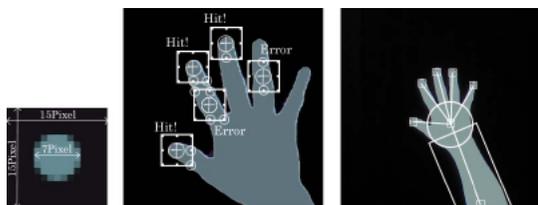


図4 テンプレートマッチングに使用した円形テンプレート(左), 検出結果(中), そして手指の認識結果(右)

Fig. 4 A template used for template matching (left), result of template matching (middle), and final result (right).



図5 利用者のポインティングジェスチャ(左)とパンチルトカメラによる指先周辺の拡大表示(右)

Fig. 5 Pointing gesture by the user (left) and a zoomed image captured by pan/tilt camera (right).

- テンプレートマッチングによる指先認識  
赤外線カメラで撮影された画像は、画像処理ボード(HITACHI IP-5005)を装備したPC(CPU: Pentium II 450 Mhz, OS: Linux)に送られる。指先の認識には、テンプレートマッチングを利用した。図4(左)に示す小さな円をテンプレートとして使用し、入力画像から候補点をあげる〔図4(中)〕。候補点のうち誤検出の部分を除くことで、指先を検出することができる。図4(右)は指先および手の中心が認識された状態である。以上の処理は実時間で行われる。
- パンチルトカメラによる指先追跡と小型バーコードの認識  
ユーザが指さし動作を行うと〔図5(左)〕, PCはパンチルトカメラ(SONY EVI-D20)に制御コマンドを送り、指先の追跡を行うとともに、ズーム機能を用いて指先周辺を拡大撮影する〔図5(右)〕。この結果、従来は10cm四方のバーコードが認識の限界であったが、現在は2.5cm四方まで小型化することができた。なお、バーコード認識にはパンチルトカメラの画像をSGI O2のビデオ入力に取り込み、ソフトウェア処理で認識している。そして、出力画像を同じSGI O2で生成し、机上に投影する。
- 分散処理  
上記各プロセス間の通信にはダブル空間通信シス

テム TS System/s<sup>19)</sup>, 通称 Linda を用いている。Linda はダブルスペースと呼ばれる空間を共有し、その空間を介してデータのやりとりを行う。非同期通信のため、個々のプロセスが完全に独立して動作することができ、また新しいプロセスの追加や変更が容易である。

### 3. コンピュータ支援型学習への応用: Interactive Textbook

本章では EnhancedDesk における紙と電子情報の統合、そして手指による直接操作の例として、コンピュータ支援型学習への応用を提案し、開発したシステム Interactive Textbook について述べる。

#### 3.1 コンピュータ支援型学習の問題点

あらゆる教科の学習において教科書が用いられる。しかし、たとえば語学学習において正しい発音を教科書だけで理解することは難しい。また、科学の実験における動的な振舞いを教科書にある文章と静的な図だけで理解するのは難しい。

こうした教科書の弱点を補うためにビデオ教材やマルチメディア教材がしばしば用いられる。たとえば、語学ビデオは正しい発音やヒアリングの学習を助け、科学用教材は、CG やビデオによって科学実験をデモすることができる。

こうした教材の問題点は、学習に本質的に無関係な付加的操作を学習者に要求することである。たとえば、学習者は教科書のあるページに到達すると、CD-ROM に入っているアプリケーションプログラムを起動することを要求される。そのために学習者は、CD-ROM を CD ドライブにセットし、対応するアプリケーションを検索し、それを起動することを要求される。学習者の主たる目的は、実験を理解することであり、計算機の操作を学習することではない。こうした付加的な操作は学習者の集中を阻害すると思われる。

別な観点からいえば、不自然な対話操作は効果的な学習を妨げる可能性がある。たとえば、物理学におけるオモリとバネの実験を考えてみよう。学習者はマウスを使って計算機画面上的オモリを操作することができる。しかし、画面上に表示されたオモリをマウスで間接的に操作するのは必ずしも自然とはいえない。

#### 3.2 Interactive Textbook

前節で述べた問題点の一解決法として、我々はコンピュータビジョンを利用した学習支援システム Interactive Textbook を提案する。2章で述べた EnhancedDesk の特徴は Interactive Textbook において次のように活用されている。

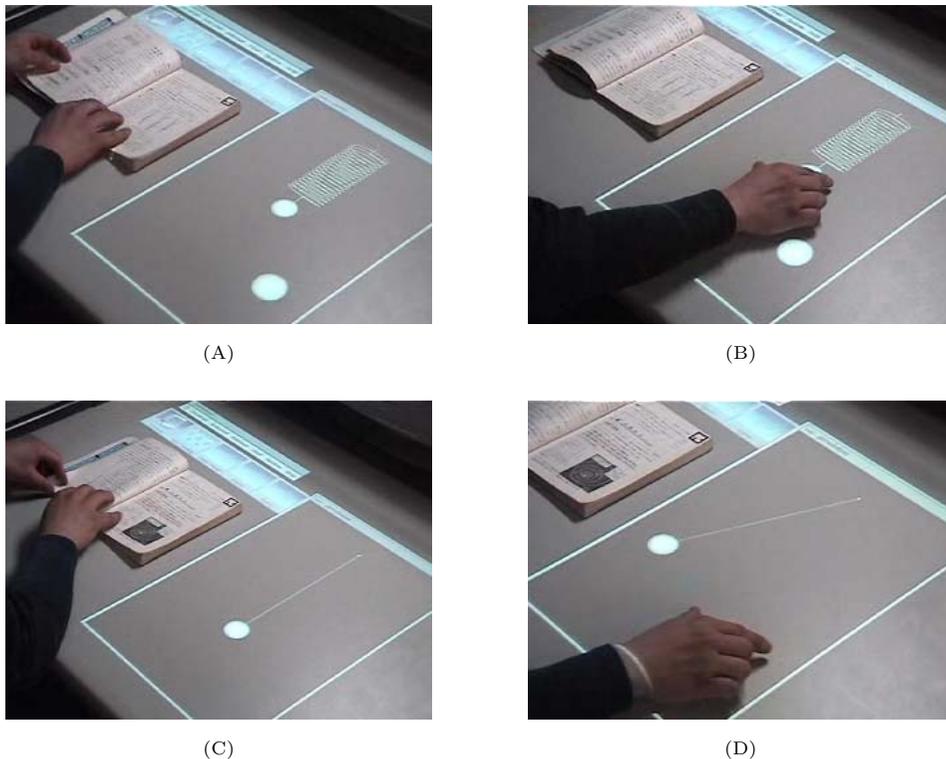


図 6 Interactive Textbook の利用例 . 利用者がバネとオモリの実験に関するページを開くと CG シミュレーションが自動的に表示される (A) . 利用者は手でオモリを操作することができる (B) . 同様に振り子の実験のページを開くと今度は異なる CG シミュレーションが表示される (C) , (D) .

Fig. 6 Interactive Textbook in use. When the user opens a page describing mass-spring experiment, CG simulation is automatically projected onto the desk (A) and he/she can manipulate the mass using his/her own finger (B). In the same way, the user open a page describing pendulum experiment, another CG simulation is projected onto the desk (C), (D).

- 電子情報の自動検索と自動起動  
物理学の学習において学習者の主たるタスクは教科書に説明された実験の理解であり、計算機使用の能力を示すことではない。よって、システムが現在学習している内容をシステムが理解し、関連する電子情報を自動的に表示することができれば、学習者は本来のタスクに集中できる。
- 手指による電子情報の直接操作  
学習者がある学習項目を理解し、それを長く記憶していることができるかどうかは、学習の経験がいかに印象深いものであったかに依存する。前述したように、学習者自身の手指による直接操作はマウスによる間接操作に比べより深い印象を与えることができると考える。マウスはオフィスなどでの仕事には便利だが、学習においては手指による操作のほうが効果的である。

図 6 に示すように Interactive Textbook では、開

連する電子情報を持つ教科書のページに 2 次元バーコードが添付される。個々のバーコードは個々のアプリケーションに対応する。学習者がバーコードの添付されたページを開くと、システムはバーコードを認識し、電子情報を自動的に机上に投影表示する。システムはバーコードのユニークな ID を識別するだけでなく、バーコードの大きさとも認識する。この大きさと傾き情報を利用して、システムは電子情報をどこにどの大きさで投影するかを決定する。たとえば、教科書が机上で斜めに置かれていても、電子情報は正しい位置に投影される。

図 6 は学習者が物理学の教科書を読んでいるところである。オモリとバネに関する実験を記述したページに到達すると、オモリとバネの CG シミュレーションが教科書の横に投影される ( 図 6 (A) ) . 学習者は自分の手指を用いてオモリを操作し、オモリとバネの挙動を観察することができる ( 図 6 (B) ) . 次に、振り子の

実験を説明するページを開くと、今度は振り子の CG シミュレーションが机上に投影され(図 6(C)), 学習者は手指を用いて振り子の挙動を観察できる(図 6(D)).

表示された電子情報の消去は自動的には行われず、学習者が明示的に行わなければならない。ページめくり(バーコードが隠れる)とともに、電子情報を自動的に消去すると、異なるページに関連付けられた複数の電子情報を同時に参照できず、場合によってはこれが不便と判断したためである。なお、投影されるウィンドウは X ウィンドウシステムの 1 プロセスとして実現されている。ウィンドウを消去するには、マウスでウィンドウメニューの終了項目を選択するのと同様に、手でこれを選択する。

## 4. 考察

### 4.1 自然で直観的なインタフェース

Bolt<sup>2)</sup>の Media Room において、ユーザは壁面に投影表示された電子情報を“Put that”と言いながら指さし、移動したい場所を指さし“there”と言うことにより電子情報の移動を行った。ここで重要な点はユーザに計算機の実在を意識させていないことである。これが、Media Room の自然で直観的なインタフェースを実現している大きな要因であると考えられる。

同様に EnhancedDesk ではこの自然で直観的なインタフェースを実現するために、(1) 実物体認識に基づく電子情報の自動検索/表示と、(2) ユーザの手指認識による電子情報の直接操作を行った。つまり、ユーザが本を開くという操作で自動的に対応する電子情報が検索され机上に投影される。また、表示されている電子情報の中から動かしたい物を直接手で動かすことで直観的な操作を実現した。Media Room 同様にこの間、ユーザは計算機の実在を意識することはない。たとえば EnhancedDesk の一応用例である Interactive Textbook においては、従来の計算機支援型学習環境で必要だった、CD-ROM などからの対応アプリケーションの検索、マウス操作といった学習に本来関係のない操作を行う必要がない。この結果、学習者は本来の目的である教科の学習に集中することができると考えられる。

この Interactive Textbook に関する正式な評価は行っていない。ただ、我々は本システムを高等学校の教師数名に見てもらい意見をもらった。全般的には「興味深い」、「できれば使用してみたい」という好意的な意見が多かった。批判的なものとしては「コストが問題」、「グループ学習に対応してほしい」というものがあった。コストの問題に関しては、プロジェクトと赤

外線カメラの低価格化が鍵である。グループ学習に関しては、現在のシステムは 2 本の手しか認識できないという制約がある。ただし、処理速度をある程度犠牲にすれば、複数人にも対応は可能である。

### 4.2 実時間手指認識手法

EnhancedDesk で実現した手指認識手法の特徴をまとめると次のようになる。

- 実時間処理

赤外線カメラによる手領域の高速な切り出しと、テンプレートマッチングによる指先認識により、実時間での対話が可能となった。

- ロバスト性

画像処理を利用した手指認識でしばしば問題とされるのは、認識が照明条件の影響を受けやすく不安定な点である。このためこうした研究の多くは照明条件の一定な実験環境で行われる。これまでの机型実世界指向システムも同様であった。これに対し、赤外線カメラを利用した本手法は、照明の影響を受けにくいロバストなものである。

### 4.3 タッチパネルとの比較

投影表示された電子情報の指による直接操作を実現するために、タッチパネルを利用する方法も考えられる。しかし、机型実世界指向システムにタッチパネルを利用した場合には以下の問題点がある。

第 1 の問題点は、机上に他の物を置けないことである。机型実世界指向システム、特に EnhancedDesk の目的は、現実のオフィス作業の支援である。オフィスの机上には様々な書類や物が置かれる。この目的に対し、机上に物の置けないタッチパネルは不適当である。

第 2 の問題点は、一般にタッチパネルでは一度に 1 点のポインティングしかできないことである。これに対し、本手法では一度に複数の手指の位置と姿勢を認識することができる。これは、たとえば両手を使ったより複雑な作業や、複数ユーザによる同時利用を可能とする。

### 4.4 アプリケーションの開発効率

現在は X ウィンドウシステム上に X イベントを利用したドライバを作成し、マウスと同じように指を使用することができるようになっている。つまり、X のアプリケーションとして記述されたプログラムの大半は、EnhancedDesk 上で指で操作することができる。

従来の手指操作を行う机型実世界指向システムのアプリケーションは、その目的のために特別に開発することが多く、アプリケーションの開発効率が低かった。これに対し、我々の手法を用いると X アプリケーションの開発がすなわちシステムのアプリケーション開発

となるので、開発効率が大幅に向上した。

#### 4.5 EnhancedDesk の他の応用分野

本論文では、EnhancedDesk の応用分野としてコンピュータ支援型学習への応用を示したが、ほかにも我々は情報検索システムへの応用<sup>6)</sup>、地理情報システムへの応用<sup>7)</sup>、小規模グループにおける文献管理への応用<sup>12)</sup>を試作している。

また、EnhancedDesk の技術は様々なメディアアートの分野でも利用された<sup>8),9),18)</sup>。たとえば、Berlin の Bauhaus Museum<sup>18)</sup>では博物館の展示物のナビゲーションシステムとして利用された。ピジターは手で EnhancedDesk に表示された展示物の索引に手で触れることで、その詳細情報を見ることができた。このナビゲーションシステムの使用法に関する記述はなかったが、ピジターはすぐに操作を理解することができた。国際会議 Visionplus<sup>7)9)</sup>では会場に直径 3m の円卓を設置し、天井に設置したプロジェクタから様々な電子情報を投影表示した。こうした大型表示装置では、マウスはもちろんタッチパネルなども使用することはできない。EnhancedDesk が提案するピジョンによる入力は今後の情報システムにおける有力な候補の 1 つになると考えている。

#### 4.6 関連研究

机型実世界指向システムの研究は Wellner の DigitalDesk<sup>23)</sup>が有名である。DigitalDesk はその後の机型実世界指向システムの指針となる基本的ハードウェア構成を提案した。そして、計算機デスクトップの机上への投影と指によるその操作を行った。しかし、DigitalDesk が用いた手指認識は、肌色抽出による手領域切り出しなど、比較的初歩的な認識を用いており、本システムで実現したような実時間で高精度な手指認識は行えない。また周囲の光の影響を受けやすく動作も不安定である。第 2 に DigitalDesk では投影された電子情報の操作に焦点があり、本システムが実現した実物体(教科書)と電子情報の統合は行われなかった。Krueger<sup>10)</sup>や MacKay<sup>11)</sup>も机型実世界指向システムに関する研究を行っているが、白色背景からの差分抽出による手指認識など、初歩的な手指認識にとどまっている。

紙と電子情報の統合に関しては、Arai の Interactive Desk<sup>1)</sup>が 1 次元バーコードを用いて実世界の紙のフォルダと関連する電子メールや WEB ページへのリンクを行った。また、Robinson<sup>16)</sup>は DigitalDesk を用いて、プリンタ出力された WEB ページとオリジナルの WEB ページとのリンクを行った。これらの研究においては、電子情報との対話はマウスとキーボードを用

表 1 従来の机型実世界指向システムとの比較

Table 1 Comparison between other augmented desk systems.

	電子情報の自動 検索および表示	手による直接操作
EnhancedDesk		
DigitalDesk	×	
Krueger	×	
MacKay	×	
InteractiveDesk		×
Robinson		×
MetaDesk	×	
Augmented Surfaces		×

いて行われる。バーコードの使用という点では我々の研究に類似するが、本研究で使用した 2 次元バーコードは大きさや傾き情報を使用できる点が異なる。さらに、本研究における電子情報の操作は利用者の手指を用いて行われる点が異なる。

Ishii らの MetaDESK<sup>5)</sup>は机上に投影された地図の操作に Phicon と呼ばれる実世界の物体を使用した。しかし、手指による電子情報の直接操作は実現されていない。

Rekimoto らの Augmented Surfaces<sup>15)</sup>は PC、電子テーブル、電子黒板などの間でのスムーズな電子情報の移動を行った。また、パンチルトカメラを用いて小さなバーコード認識を行っている。しかし、Augmented Surfaces のパンチルトカメラは観察するテーブル面を  $6 \times 6 = 36$  の領域に分け、これを定期的に順番に撮影するため、全領域の撮影に 30 秒かかる。したがって、突然のバーコードの出現などの実時間性に難があると考えられる。一方、EnhancedDesk はユーザが指さし動作をするとパンチルトカメラが指を追跡し、発見したバーコードを実時間で認識する。また MetaDESK 同様、手指による電子情報の直接操作は実現されていない。

以上、従来の机型実世界指向システムとの比較を表 1 にまとめる。

また、赤外線を用いた認識に関する研究としては、Rekimoto らの HoloWall<sup>14)</sup>があげられる。HoloWall は赤外線ライトと赤外線フィルタを装着したビデオカメラを使用している。このシステムは近赤外線を使用するため、人間の手だけでなくスクリーン付近の物体をも認識してしまう。これに対し、本研究で使用した赤外線カメラは遠赤外線を使用するため、温度の設定によって人間の手だけを認識することができる。

子供用玩具などの中に紙と電子情報のリンクの概念を用いているものがある(例: PCPICO<sup>24)</sup>)。これらはタッチパネル上に専用の紙(シート)を装着し、ペ

ンで入力を行う。こうした機器と EnhancedDesk との最大の相違点は、この紙(シート)が単体として機能するか否かである。つまり、EnhancedDesk では、バーコードの貼られた教科書は、EnhancedDesk がない場合には普通の教科書として機能する。これに対し、上記デバイスで用いる紙(シート)はそれ自身では機能しない。また手指による直接操作も実現されていない。

## 5. おわりに

本論文は机型実世界指向システム EnhancedDesk について述べた。赤外線カメラの使用やテンプレートマッチング技術の応用によって、実時間で高精度な手指認識が可能となった。次に、EnhancedDesk 上で開発したコンピュータビジョンを利用した学習支援システム Interactive Textbook について述べた。Interactive Textbook では 2 次元バーコードを用いた電子情報の自動検索と自動投影表示、および、手指による電子情報の直接操作を行った。この結果、学習者はコンピュータの操作という付加的なタスクをする必要がなく、本来の目的である学習に集中することができると思われる。

今後の課題としてはまず、バーコードを使用しない物体認識を実現したいと考えている。また、実物体と電子情報のリンクを簡単に実現できるオーサリングツールの開発が必要であると考えている。さらに、EnhancedDesk を使用した新たなアプリケーションを開発していきたい。

謝辞 2 次元バーコードをご提供いただいたソニー CSL の暦本純一氏に感謝いたします。

## 参考文献

- 1) Arai, T., Machii, K. and Kuzunuki, S.: Retrieving electronic documents with real-world objects on InteractiveDesk, *Proc. ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST'95)*, pp.37-38 (1995).
- 2) Bolt, R.A.: *The Human Interface*. Lifetime Learning Publications, Belmont, CA (1984).
- 3) Fitzmaurice, G.W., Ishii, H. and Buxton, W.: Bricks: Laying the foundations for graspable user interfaces, *Proc. ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI'95)*, pp.442-449 (1995).
- 4) Freeman, W.T., Anderson, D.B., Beardsley, P.A., Dodge, C.N., Roth, M., Weissman, C.D. and Yerazunis, W.S.: Computer vision for interactive computer graphics, *IEEE Computer*

- Graphics and Applications*, May-June, pp.42-53 (1998).
- 5) Ishii, H. and Ullmer, B.: Tangible bits: Towards seamless interface between people, bits and atoms, *Proc. ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI'97)*, pp.234-241 (1997).
- 6) Koike, H., Sato, Y., Kobayashi, Y., Tobita, H. and Kobayashi, M.: Interactive Textbook and Interactive Venn Diagram: Natural and Intuitive Interface on Augmented Desk System, *Proc. Human Factors in Computing Systems (CHI'2000)*, pp.121-128, ACM (2000).
- 7) Kobayashi, M. and Koike, H.: EnhancedDesk: Integrating paper documents and digital documents, *Proc. 1998 Asia Pacific Computer Human Interaction (APCHI'98)*, pp.57-62, IEEE CS (1998).
- 8) [http://www.ntticc.or.jp/special/utopia/index\\_e.html](http://www.ntticc.or.jp/special/utopia/index_e.html)
- 9) <http://www.visionplus7.com/>
- 10) Krueger, M.: *Artificial Reality*, 2nd edition, Addison-Wesley (1991).
- 11) MacKay, W.: Augmenting reality: Adding computational dimensions to paper, *CACM*, Vol.36, No.7, pp.96-97 (1993).
- 12) 中西, 小池: Enhanced Proceedings: 紙インタフェースのアプリケーションとしての論文管理システム, *インタラクション 2000 論文集*, pp.25-32, 情報処理学会 (2000).
- 13) Rekimoto, J.: Matrix: A realtime object identification and registration method for augmented reality, *Proc. 1998 Asia Pacific Computer Human Interaction (APCHI'98)*, pp.63-68 (1998).
- 14) Rekimoto, J., Oka, M., Matsushita, N. and Koike, H.: HoloWall: interactive digital surfaces, *Proc. Conference on SIGGRAPH 98: conference abstracts and applications*, p.108 (1998).
- 15) Rekimoto, J. and Saito, M.: Augmented surfaces: A spatially continuous work space for hybrid computing environments, *Proc. ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI'99)*, pp.378-385 (1999).
- 16) Robinson, P.: Animated paper documents, *Proc. HCI'97 (21B)*, pp.655-658 (1997).
- 17) Sato, Y., Kobayashi, Y. and Koike, H.: Fast Tracking of Hands and Fingertips in Infrared Images for Augmented Desk Interface, *Proc. of IEEE Automatic Face and Gesture Recognition (FG'2000)*, pp.462-467, IEEE/CS (2000).
- 18) <http://www.vogue.is.uec.ac.jp/~zetaka/Public/kenky-u/table/berlintable.html>

- 19) <http://www.sanpo.t.u-tokyo.ac.jp/~terada/ts.html>
- 20) Turk, M.: Moving from GUIs to PUIs, *Proc. 4th Symposium on Intelligent Information Media* (1998).
- 21) Underkoffler, J. and Ishii, H.: Illuminating light: An optical design tool with a luminous-tangible interface, *Proc. ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI'98)*, pp.542-549 (1998).
- 22) Underkoffler, J. and Ishii, H.: Urp: A luminous-tangible workbench for urban planning and design, *Proc. ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI'99)*, pp.386-393 (1999).
- 23) Wellner, P.: Interacting with the paper on the DigitalDesk, *CACM*, Vol.36, No.7, pp.87-96 (1993).
- 24) <http://www.pcpico.com>

(平成 12 年 5 月 1 日受付)

(平成 12 年 12 月 1 日採録)



小池 英樹 (正会員)

1991年東京大学大学院工学系研究科情報工学専攻博士課程修了。工学博士。同年電気通信大学電子情報学科助手。1994年同大学院情報システム学研究科助教授。現在に至る。1994~1996年, 1997年 U.C. Berkeley 客員研究員。情報視覚化の研究に従事。特に視覚化へのフラクタルの応用, 視覚化を用いた情報検索システム, Perceptual User Interface, 情報セキュリティへの視覚化の応用に興味を持つ。1991年日本ソフトウェア科学会高橋奨励賞, 情報処理学会 DICOMO2000 最優秀論文賞を受賞。ACM, IEEE/CS, 日本ソフトウェア科学会各会員。



小林 貴訓 (正会員)

1973年生。2000年電気通信大学大学院情報システム学研究科博士前期課程修了。同年三菱電機(株)入社。現在, 設計システム技術センターに所属し, ソフトウェア生産システムの開発に従事。



佐藤 洋一 (正会員)

1990年東京大学工学部機械工学科卒業。同大学院情報工学専攻を経て, 1991年から CMU ロボティクス学科博士課程に在籍。1997年 Ph.D. in Robotics 修了。1997年より東京大学生産技術研究所研究機関研究員, 講師を経て現在同研究所助教授。コンピュータビジョン, ヒューマン・コンピュータ・インタラクション, およびコンピュータグラフィックスに関する研究に従事。平成 11 年山下記念研究賞, Int. Conf. Shape Modeling and Applications'97 最優秀論文賞, MIRU2000 最優秀論文賞, 平成 11 年度日本バーチャルリアリティ学会論文誌論文賞を受賞。電子情報通信学会, 日本バーチャルリアリティ学会, ACM, IEEE 各会員。