

InfoRoom: 実世界に拡張された直接操作環境

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
インタラクションラボラトリー
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

実空間に設置されたテーブル型や壁面型などのコンピュータ群と、各利用者が持ち運ぶ携帯型コンピュータ群との組合せによって動的に構成される情報環境の設計と実現について報告する。この環境では、テーブル面や壁面が、携帯型コンピュータを空間的に拡張する作業環境として機能する。また、実世界の事物(紙文書・カード・ビデオテープ等)を、マーカー認識によって特定し、それらの間での自由な情報交換を可能にする。利用者は、コンピュータの境界を越えて機能する直接操作技法(direct manipulation techniques)によって、個々の機器や物体のアドレスやIDを意識することなく、機器や物体の空間的な位置関係に基づいて情報を操作することができる。本論文では、拡張型情報空間の設計方針について議論し、実世界に拡張された各種の直接操作技法について報告する。

InfoRoom: Extending Direct Manipulation Interfaces to the Physical Environment

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 describes our design and implementation of a computer augmented environment that allows users to smoothly interchange digital information among their portable computers, table and wall displays, and other physical objects. Supported by a camera-based object recognition system, users can easily integrate their portable computers with the pre-installed ones in the environment. Users can use displays projected on tables and walls as a spatially continuous extension of their portable computers. Using an direct manipulation interaction techniques that are extended to physical spaces, users can manipulate digital information by understanding the physical relationship between them. We also provide a mechanism for attaching digital data to physical objects, such as a videotape or a document folder, to link physical and digital spaces.

1 はじめに

携帯型コンピュータの普及によって、会議室やプレゼンテーション・ルームなどに参加者がノートブックコンピュータやPDAを持ちこむのは日常的な光景となった。特にノートブックコンピュータは、個人が所有する大量の文書データ(たとえば過去に行ったすべてのプレゼンテーション資料など)を保持するに十分なハードディスク容量があり、会議の進行に合わせて自由に情報を取り出して、他の参加者と共有できる可能性を持っている。

その一方で、オフィス環境自身もコンピュータ化されつつある。たとえば液晶プロジェクタや電子黒板はもとより、会議室のテーブル自体もコンピュータ・ディスプレイとして利用する技術が登場している。

両者の技術の自然な発展として、近未来のコンピュータ環境では、個人が所有する強力な携帯型コンピュータと、部屋や環境に設置されたコンピュータ群とが動的に連携することが予測できる。しかし、従来の「電子化会議室」では、あらかじめ固定した機器構成を主に考慮しており、このように「携帯型コンピュータと設置されたコンピュータによって動的に環境に構成する」という発想はあまり見られなかった。その結果、たとえば持ちこんだコンピュータ間での情報交換などの単純な操作でも、互いの機器のアドレスを知る必要があったりと、使用者に余計な認知的負荷をかけてしまう。

筆者らは、電子壁面とPDAが連携する情報システム[8]や、情報家電間の統合的なコマンドとして機能する携帯型デバイス[2]などの研究を行って来た。これらの研究の基本的な発想は、従来、単一のコンピュータ内でのみ利用可能であった「See&Point」の原則(コマンドを介さず画面上のオブジェクトを直接指定する)や、「直接操作」(direct manipulation)の考え方を実世界に拡張し、コンピュータや機器の境界を越えても機能する対話技法を開発することにある。これを、「拡張直接操作」(augmented direct manipulation)と呼ぶ。本論文では、部屋環境に設置されたコンピュータ群(環境型コンピュータと呼ぶ)と、ユーザが持ち込む携帯型コンピュータ群によって動的に操作環境を拡張できるような情報空間について考察し、その設計方針、各種の拡張直接操作技法、および実際の試作システムについて報告する。

2 拡張型情報環境の設計方針

前節で述べたような、携帯型コンピュータと環境型コンピュータが複合した情報空間を設計するにあたり、以下の三点が特に重要であると考えて

いる。

2.1 環境型と携帯型コンピュータの連携

ユーザ各自がもつ携帯型コンピュータは、それ自身で完結したインタフェースを持っている。したがって、環境型コンピュータと連携した場合に、従来のインタフェースを全く置き換えてしまうのではなく、携帯型コンピュータの自然な延長として環境型コンピュータが機能することが望ましい。たとえばテーブル上に携帯型コンピュータを置くだけで、テーブル表面が携帯型コンピュータのための仮想的な拡張ディスプレイとして利用できるようになる、といった方向が考えられる。さらに、複数のユーザが同じテーブル上にそれぞれの携帯型コンピュータを置いた場合でも、テーブル表面をグループのための共有作業空間として利用できるようになる。図1に、各ユーザの携帯型コンピュータが、環境型コンピュータによって拡張されていく課程を示す。「コンピュータをテーブルに置く」という、利用者の物理的な行為そのものが情報環境の構成と連携している。

この環境では、GUI向けに開発された各種の対話技法(ポイント、ドラッグ、メニュー選択)を実世界に拡張することが可能になる。たとえば、後述する“hyper-dragging”とよぶ対話技法は、ドラッグ&ドロップ操作をコンピュータの外の世界に拡張している。また、携帯型コンピュータは、環境型コンピュータを操作するための手段としても有効である。たとえばポインティングデバイスは、携帯型コンピュータのスクリーン上だけでなく、テーブルや壁面ディスプレイのオブジェクトを操作するためにも利用できる。携帯型コンピュータのマイクやカメラなどの入力装置は、会議中に容易にボイスメモなどを作成するための手段として使うことができる。

2.2 情報操作の空間的連続性

コンピュータを含む多種多様な情報機器が動的に追加される環境を考えると、それぞれのネットワーク・アドレスや機器名を正確に把握するのはユーザにとって大変な負担となる。一方で、遠隔通信とは状況が異なり、たいいていの機器は「ユーザから見える範囲にある」のだから、操作の対象となっている事物を空間的に把握し、アドレスなどの間接的・記号的な概念を使わずに情報を操作できるようにすべきである。

たとえば、「コンピュータABCからコンピュータDEFにファイルを転送する」「プロジェクタCにスライドデータを送る」という指定方法ではなく、「右のコンピュータから左のコンピュータ」「左側のスクリーン」のように空間的な位置関係によっ

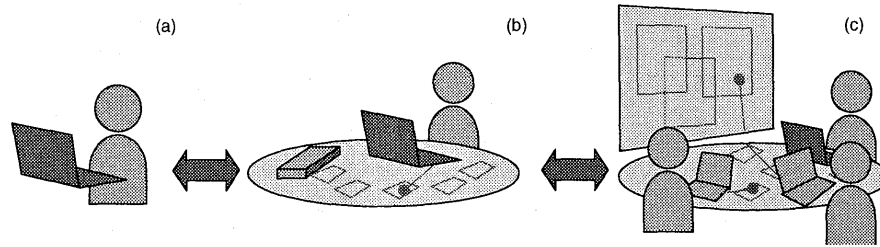


図1: 拡張する直接操作環境: (a) ユーザが各自の携帯型コンピュータで作業. (b) テーブル上にコンピュータを置くと、テーブル表面が携帯型コンピュータの空間的な延長として利用可能になる. (c) 参加者が同じテーブル上に複数のコンピュータを置きながら作業する. テーブルや壁の表面が、グループ間での共有可能な作業空間になる.

ても機器を指定できるべきである。また、前節で述べたような「携帯型コンピュータと環境型コンピュータの連携」を実現する場合に、ユーザが行う物理的な操作、たとえば「テーブルにPCを置く」、「PDAを黒板に近づける」がネットワークの接続に反映されることが望ましい。

2.3 実世界オブジェクトとの連携

一方、日常生活ではコンピュータ以外の非電子的な事物(文書やビデオテープなど)も頻繁に使われる。それらを情報環境の一部として取り込めることが望ましい。たとえば、印刷されたパンフレットから3次元モデルを選んで、それをテーブルや携帯型コンピュータに取り込んだり、会議資料と一緒に関連するスライドデータを持ち運んだり、ということが簡易に行えるべきである。これらの連携操作においても、上述の「空間的な連続性」の原則を守ることで、利用者の負荷を軽減することができる。たとえば、パンフレットから直接ドラッグアンドドロップで情報を取り出せるようなインタフェースでは、パンフレットと電子情報の結合関係(マッピング)をユーザが配慮する必要がなくなる。

実世界オブジェクトと電子情報を連携させる研究としては、[9, 11, 10]などがあるが、多くの事例はオブジェクトを物理化された「アイコン」として用いており、これらの物体には、電子情報を操作する以外の現実世界での用途は特に想定されていない。一方、我々は、日常の生活環境で用いられている既存の事物(文書フォルダ、書類、カード、ビデオテープ)も、電子情報を結合するためのオブジェクトとなり得ることが必要だと考える。たとえば、ビデオテープにその内容に関するデジタル写真を仮想的に添付して持ち歩いたり、文書フォルダに会議に関連するスライドデータを添付したりする用途を想定している。

3 InfoRoom: 複合型情報環境の構築

前節で述べた情報空間設計の妥当性を検証するために、テーブル型コンピュータと壁面型コンピュータ、およびカメラの組合せからなる情報環境InfoRoomを構築中である。図2にシステムの外観を示す。市販のテーブルやホワイトボードと液晶プロジェクターの組合せによって映像を投影している。ユーザは通常の会議室と同様、個々の携帯型コンピュータや資料をこの環境に持ち込むことが可能であり、ホワイトボードも通常のように使用することが可能である。

ユーザが持ち込んだ携帯型コンピュータや物理的オブジェクトは、テーブル上に設置されたカメラによって認識され、テーブル上での位置も計測される。認識を容易にするために、(携帯型コンピュータを含む)各オブジェクトには、2cm×2cm程度のビジュアルマーカー(CyberCode)を添付している。以下では、この環境に特徴的な操作技法について解説する。

3.1 Hyper-dragging

ユーザが携帯型コンピュータ(以下PC)をテーブルの上に置くと、テーブル上に設置してあるテレビカメラがPCに添付してあるマーカーを読みとり、同時にテーブル上でのPCの位置と方向を認識する。認識したIDから、PCの(ネットワーク上での)アドレスを検索し、テーブル型コンピュータとの間での接続を確立する。ネットワーク接続に際し、ユーザには「テーブルにPCを置く」という物理的な行為以外の特別な機器操作は要求しない。接続の有無を視覚的にフィードバックするために、PCを取り囲む楕円形をテーブル面に投影表示する(この表示を“object aura”と呼んでいる)。PC以外の実世界オブジェクトをテーブル上に置いた場合も、同様なobject auraが表示される。

接続後は、ユーザはテーブル表面をPCの拡張

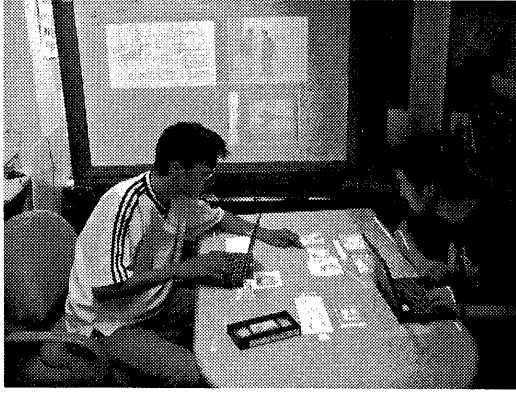


図 2: InfoRoom システム外観

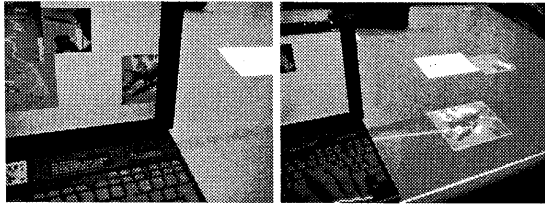


図 3: Hyper-dragging による情報移動

されたデスクトップのようにして扱うことができる。たとえば、ユーザがファイルや画像データなどを PC のポインティングデバイスでドラッグして、PC の画面の縁にまで移動させると、データのテーブルへの転送が自動的に行われ、テーブル上にデータが表示されるようになる。つまり、ユーザは通常のドラッグ操作の自然な発展として、PC とテーブル間での情報移動を行うことができる。この操作を“hyper-dragging”と呼ぶ。たとえば、頻繁に利用するデータを PC の周りに配置しておくことで、迅速に多くの情報にアクセスすることができる。テーブルや壁面に投影された情報は、PC のカーソルの他に、レーザーポインターをマウスのように使って操作することも可能である。

複数のユーザが各々のスライドデータを PC 上に入れて持ち寄り、それをテーブル上でレイアウトするようなタスクでは、各自のデータを hyper-dragging によって自由にテーブル上に移動させることができる。同様の操作で、他人がテーブル上に取り出したデータを自分の PC に取り込むことができる。つまり、テーブルの表面を、ユーザ間で情報を共有するための作業空間として利用することができる。

3.2 Anchored cursor

複数のユーザが同時に操作を行うと、テーブル上にカーソルが複数個表示されて、カーソルの所属が紛らわしくなる。これを解消するために、本シ



図 4: anchored cursor

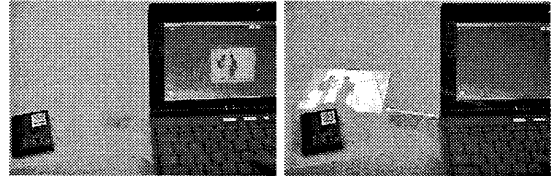


図 5: 実世界物体に電子情報を添付する。

ステムでは、カーソルの元となる携帯型コンピュータと、テーブル上に出ているカーソルとの間に線を表示することで、誰に所属するカーソルかが視覚的に把握できるような表示の工夫を施している。このカーソルを“anchored cursor”と呼んでいる。

3.3 実世界オブジェクトとの連携

Hyper-dragging 操作は、コンピュータ間だけではなく、実世界の事物(書類、本、カード、ビデオテープ)とコンピュータとの間に対しても拡張することができる。マーカーを添付した物体をテーブル上に置くと、テーブル上のカメラがそれを認識し、PC の場合と同様な object aura を物体の周囲に投影表示する(図 5)。この表示は、hyperdrag すべき領域を示す目的に使われる。電子オブジェクトを hyperdrag してオブジェクト・オーラの内側まで移動させ(この時、オーラの輝度が変化してユーザにフィードバックする)、カーソルを放すことで電子オブジェクトが物理オブジェクトに結

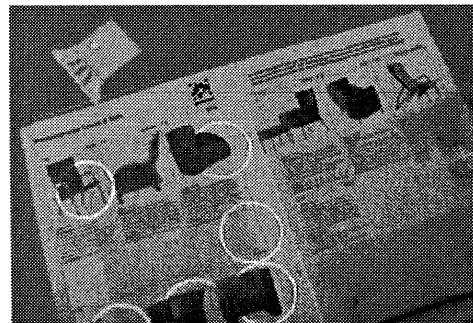


図 6: 印刷されたパンフレットから情報を取り出す

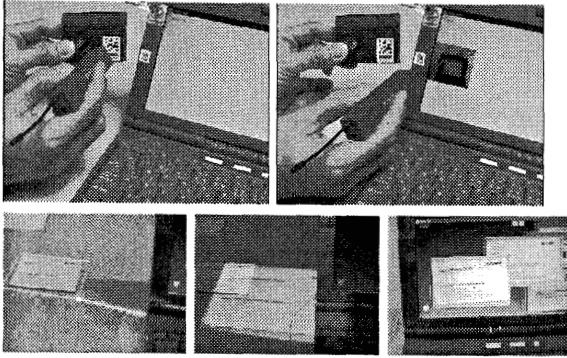


図7: 実世界での drag-and-drop 操作: (上) 実物から情報を PC にドラッグ. (下) 名刺の画像を携帯型コンピュータに取り込む (左: ラバーバンドでテーブルの領域を選択. 中: 天井のカメラが指定領域を撮影. 右: 撮影した画像を PC に取り込む.)

合する。即ち、単一コンピュータ内での GUI 操作と全く同じ操作で、実世界のオブジェクトを対象とした処理を行うことができる。

Object aura の形状は、物体の種類によって種々の形態を取り得る。たとえば、パンフレットのページごとに個別のマーカを添付することで、各ページに電子情報が埋め込まれた「複合型の紙パンフレット」を作成することができる。この場合、オーラの形状はパンフレットの外形と同じにし、結合されたオブジェクトの所在を示す表示をページ上に投影する (図6)。電子データは、マーカ ID と、マーカからの相対位置情報と共に登録されているので、ユーザからは、ページ上の位置に情報が埋め込まれているように扱うことができる。たとえば、ユーザは、PC のカーソルやレーザーポインターで、ページ上の電子データをドラッグして、テーブル上に移動させることができる。

このようにして実世界オブジェクトに結合した電子情報は、ネットワーク上の共有サーバーに格納されているので、InfoRoom 外の環境でもネットワークにアクセスできれば操作することができる。図7-上は、小型のマーカリーダー (ワイヤレスカメラ) による hyper-dragging によって、実オブジェクトから PC にデータを取り出す例を示している (物体と PC に添付されたマーカの認識順序によって、データの転送方向を決定している)。このようにして、コンピュータ外の世界においても直接操作的なインタフェースを構築することができる。たとえば、印刷文書のマーカをプリンタ (のマーカ) に hyper-drag することで、文書のコピーを生成するような応用が考えられる。

天井に設置されたカメラは、テーブル上に置かれた印刷物等を撮影する目的にも利用できる。図7-下は、PC のカーソルでテーブル上にラバーバンドによる領域を設定し、カメラによって撮影し、

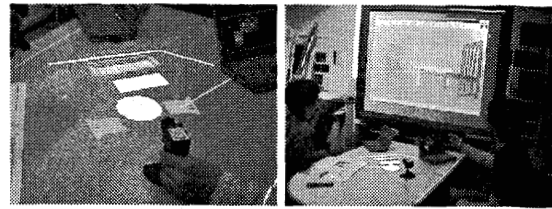


図8: カメラ模型を利用した三次元シーンの生成.

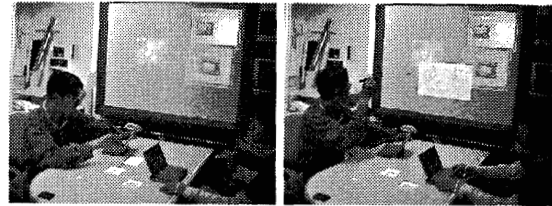


図9: Pick-and-Beam: レーザーポインタによる情報転送

生成されたオブジェクトを hyper-dragging によって取り込む過程を示している。このようにして、実世界のオブジェクトを迅速に PC 内に取り込むことができる。

カメラ認識によって、実世界オブジェクトを用いたテーブル上での操作が実現できる。たとえば、図8では、「カメラの模型」にマーカを添付することで、テーブル上のレイアウトされたオブジェクトから3次元シーンを生成するための「仮想カメラ」として利用している例を示している。カメラ (模型) をテーブルに置くことで、3次元シーン生成プログラムが自動的に起動され、壁面ディスプレイに結果を表示する。カメラをテーブル上で動かすことで、3次元シーンの視野を直観的に変更させることができる。

同様に、テーブル上の物理オブジェクトを利用して、テーブル上の情報と周辺環境を結合することが考えられる。たとえばテーブル上に置いた、プリンタに対応する紙カードにデータを hyper-drag することでハードコピー出力を得たり、名刺にドラッグすることで電子メールとして送信したりするような応用が可能であろう。

3.4 Pick-and-Beam

テーブルと壁面間では、hyper-dragging によって情報を転送することも可能だが、Pick-and-Beam と呼ぶ、Pick-and-Drop[7] のレーザーポインターによる実現を利用することもできる。ユーザは、テーブル上のオブジェクトをレーザーポインターによりクリック (ビームの点滅によって表現) し、次に壁面をポイントすることで、所望のオブジェクトをテーブルから壁面に移動させることができる (図9)。即ち、レーザーポインターによってオ

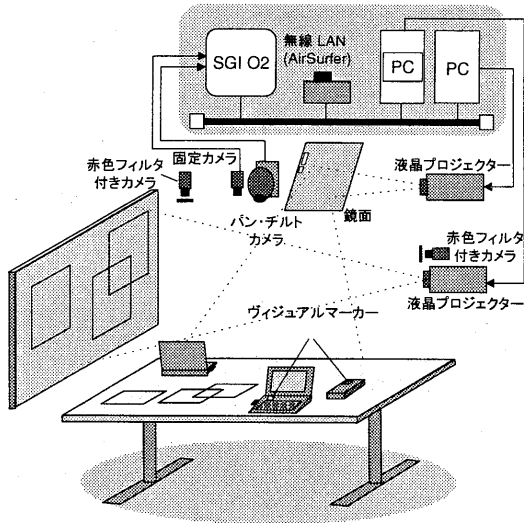


図 10: システム構成

プロジェクトがテーブルから「拾い上げ」、壁面にビームするような感覚をユーザに提供している。Pick-and-Dropは、ペンによってユーザの「手の届く範囲」に情報を移動させる対話操作だが、Pick-and-Beamは、ユーザから離れた位置にある壁面に情報をビームすることが可能である。

4 システム構成

前節までに述べたインタラクションを実現するためには、テーブル上の物体の特定と位置認識が必要である。本システムでは、テーブル上に設置された複数のカメラと物体に添付したビジュアルマーカーとの組み合わせによって実現している。図 10にシステム構成を示す。

4.1 複数カメラによる能動認識

画像入力を認識に用いる上では、カメラの解像度と視野のトレードオフがある。民生用のビデオカメラでは、有効画素数は30万程度であり、テーブル全領域を撮影してしまうと、認識可能なマーカーのサイズが非現実的に大きくなってしまふ。我々のシステムでは、物体に添付しても実用上問題がない程度のマーカーサイズ(2×2cm)程度を想定しているので、この解像度では不十分である。たとえばDigitalDesk[13]では、机の一部を高解像度で撮影するカメラを追加しているが、操作の自由度が制限されてしまふ。

そこで、本システムでは、全体を低解像度で撮影するカメラと、部分的に高解像度で撮影するパン・チルトカメラ(Sony EVI-30)とを併用している。高解像度カメラは、テーブルをいくつかの部

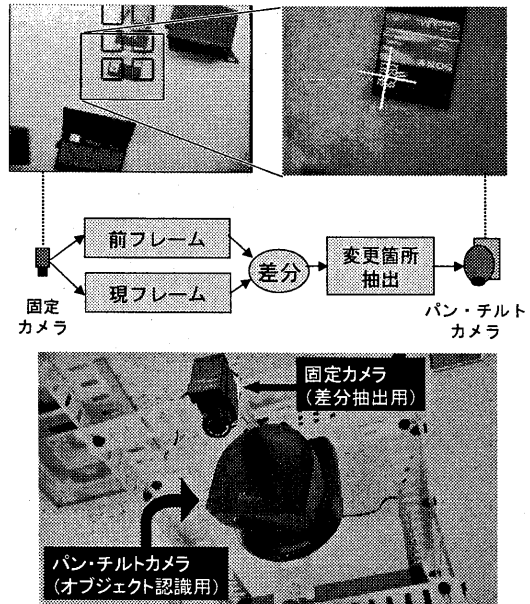


図 11: Desksat: 全体と部分カメラによる認識システム

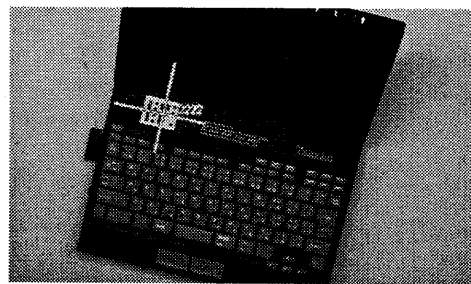


図 12: 認識されたマーカーの位置と方向

分領域ごとに分割して撮影する。低解像度カメラから、テーブル全体の画像のフレーム間差分を求め、差分の発生した部分領域を高解像度カメラが撮影するように指令を出している(図 11)。

この機構(LandSatが地面を部分的に撮影するのに模して“Desksat”と呼んでいる)によって、通常の会議中での物体認識には十分な追従速度でテーブル全体を高解像度で撮影することが可能である。差分が発生した領域は(他の領域で変化が発生するまで)優先的に認識され続けるので、たとえば、前述した「カメラ模型」の操作対しては、ほぼ実時間で追従するようになっている。

名刺や紙文書などの撮影するときは、パン・チルトカメラをさらにズームさせている。カメラはテーブル中央付近の上1.6mの個所に設置されているが、この位置から、テーブルの任意の表面が約100dpiの解像度で撮影でき、名刺や手書きメモ等を簡易かつ迅速にスキャンする目的でパン・チルトカメラを用いることができる。

レーザーポインターの認識には、赤色レーザー光の波長(900nm)付近のみを透過する色フィルタを装着したカメラを、壁とテーブル用に1台ずつ設置している。色フィルタによって、テーブルや黒板上の映像はほとんどキャンセルされ、レーザーポインタのスポットのみが明るい光点となって撮影される。その結果、単純な閾値処理によるスポット検出で、十分な安定性と追従性が得られる。

4.2 ビジュアルマーカの検出

物体に添付するビジュアルマーカは一種の2次元バーコードで、筆者らが、過去に拡張現実感システム用に開発したもの[14]を改良したものになっている。ドットパターンによって 2^{24} 個のIDが識別可能で、2cm×2cm程度のサイズのマーカを添付すれば、Desksatによって天井に設置されたカメラからの認識が可能になる。

このマーカの特徴は、ID認識と同時にマーカの位置・方向が測定可能な点にある。マーカの4隅のカメラ画像上での位置から、マーカの(カメラに対する)3次元的位置・方向が推定している。パン・チルトカメラの座標系をテーブル上の座標系に変換することで、テーブル上の携帯型コンピュータや実世界物体を特定し、テーブルの座標系における位置と方向が計測できる。Hyper-draggingなどの処理で、テーブル上でのカーソルの位置を、この情報に基づいて計算することができる。また、「模型カメラ」の視点の位置・方向も、同様な仕組みによって求めている。

パン・チルトカメラの座標系とテーブル面の座標系との相互変換行列は、カメラの方向やズーム値によって変化する。この変換行列を自動的に計測するためにキャリブレーションツールを作成した。このツールは、テーブル上に位置と方向が既知の直線を複数投影し、それをカメラ経由で認識することで、変換行列を推定する。Desksatで利用する可能性のあるパン・チルト・ズーム値の組み合わせに対して、この行列をあらかじめ計測してファイルに保存しておく。処理は自動的に行なわれ、数分程度で終了する。テーブル・カメラ・プロジェクタの設置関係を変更しなければ、キャリブレーションを再度行う必要はない。

5 システム利用経験

InfoRoomは、現段階で試作がほぼ終了し、筆者らのグループ内において実験的な利用が開始されている。ここでは、現在までの利用において得られた定性的な知見について述べる。

テーブル型のコンピュータでは、複数のユーザがテーブルを囲んで作業することになる。したがっ

て、テーブル型コンピュータには固定的な「上下方向」はなく、各ユーザの着席する位置に依存する。InfoRoomでは、携帯型PCの位置と方向によってメニューやカーソルの表示方向を決定している。また、対面しているユーザに情報を見せる場合のために、テーブル上での画像の回転機能を提供したが、同時に複数のユーザが同じデータを見る場合にはあまり有効ではなかった。むしろ、参加者全員が見る必要のある情報は、Pick-and-Beamを使って壁面に貼り付ける方が自然であった。たとえば、テーブル上に何種類かのムービーを置いておき、再生のときに壁面ディスプレイに貼り付ける、といった利用方法が多くとられた。このように、空間内の面でも、位置・サイズ・方向によってその用途(役割)が微妙に異なることを再認識した。

Hyper-draggingのような操作では、カーソルの移動量と移動距離によって、ユーザがカーソルを制御している、という感覚は大きく左右される。携帯型コンピュータのスクリーンと、テーブル面(プロジェクタの投影面)では、画素のサイズが著しく異なるので、単純に携帯型コンピュータ上での移動量を当てはめると、カーソルがテーブルに飛び移った瞬間に不自然な速度の変化が起きたように感じられる。同様な理由で、移動するオブジェクト(たとえばデジタル写真)の表示倍率も、PCとプロジェクタの解像度に合わせて調節する必要があった。

6 関連研究

対面型のコラボレーションを、複数のコンピュータや電子機器を動的に組み合わせておこなおうという研究では、(筆者らによる)MBoard[8]や、Pebbles[6]がある。MBoardではペンコンピュータやPDAをデジタル白板のインタフェースとして利用する。PebblesはPDAをプレゼンテーションの操作デバイスとして用いている。

近傍のコンピュータ間で動的にネットワークを構成する、いわゆるad hocネットワークの研究事例も多いが、いずれもコンピュータのアドレス(IPアドレスやマシン名)をユーザに意識させる。InfoRoomでは、実世界での物理的・空間的な配置や操作と、ネットワーク上での情報操作が一致している点に特徴がある。

テーブル上に情報を表示し、ユーザに操作させる環境の先駆的な例としては、Kruegerが行ったVIDEODESK[3]と呼ばれる一連のインストールがある。DigitalDesk[13]は、テーブル上に置かれた紙の書類を、プロジェクタによる投影画像によって強化しようという試みである。LuminousRoom[12]は種々の(物理的な)部品をテ

ーブル上で操作することでコンピュータと対話する。Streitzらは、テーブル、壁面、椅子などにコンピュータを組み込んだ未来のミーティングルームの実験環境 (RoomWare[10]) を構築している。これらの事例と比較して、本研究は、テーブル型や黒板型のコンピュータと、携帯型コンピュータの動的な結合に主に重点を置いている。また、物理オブジェクトと携帯型コンピュータ間での情報交換が空間性を保ったまま行えるのも特徴のひとつである。

Ariel[5] や transBOARD[1] はバーコードを利用して、デジタル情報を紙やカードなどの物理オブジェクトに結合している。Insight Lab[4] は会議データをバーコードによって管理している。これらのシステムでは、IDを認識する際にバーコードリーダーによる「スキャン」操作が必要で、IDの個数が多くなるとその操作が複雑になる。またID間の空間的な位置関係は認識されないので、hyperdraggingなどの操作との結合が困難である。

7 結論および今後の課題

本論文では携帯型コンピュータと環境型コンピュータの動的な連携を特徴とする情報環境の設計および実現について述べた。この環境では、ユーザ各自が持ち込んでテーブル上に置いた携帯型コンピュータを環境型コンピュータが認識し、空間的に連続した作業環境を各ユーザに提供する。また、テーブル上に置かれた印刷文書などの非電子オブジェクトと電子情報を連携させることが可能になっている。

今回は主にノート型コンピュータ、実世界オブジェクトと環境型コンピュータ(テーブルや黒板)との連携について考察したが、より小型のコンピュータ(PDAやパッジ型コンピュータ)と環境型コンピュータの連携も興味ある課題である。たとえばPDA自体の(移動/回転などの)操作を環境型コンピュータへの指令として利用するシステムを構築中である([15])。

謝辞

本システムの構築にあたり、設計と実装作業に協力して頂いた齋藤政則氏、有益な助言を頂いた綾塚祐二、松下伸行、戸塚卓志、所真理雄の諸氏に感謝する。

参考文献

- [1] Hiroshi Ishii and Brygg Ullmer. Tangible Bits: Towards seamless interfaces between people, bits and

- atoms. In *CHI'97 Proceedings*, pp. 234–241, 1997.
- [2] Naohiko Khotake, Jun Rekimoto, and Yuichiro Anzai. InfoStick: An interaction device for inter-appliance computing. In *Workshop on Handheld and Ubiquitous Computing (HUC'99)*, 1999.
- [3] Myron W. Krueger. *Artificial Reality II*. Addison-Wesley, 1990.
- [4] Beth M. Lange, Mark A. Jones, and James L. Meyers. Insight Lab: An immersive team environment linking paper, displays, and data. In *CHI'98 Proceedings*, pp. 550–557, 1998.
- [5] W.E. Mackay, D.S. Pagani, L. Faber, B. Inwood, P. Launiainen, L. Brenta, and V. Pouzol. Ariel: augmenting paper engineering drawings. In *CHI'95 Conference Companion*, pp. 420–422, 1995.
- [6] B. A. Myers, H. Sitel, and R. Gargiulo. Collaboration using multiple PDAs connected to a PC. In *ACM CSCW'99*, pp. 285–294, 1999.
- [7] Jun Rekimoto. Pick-and-Drop: A Direct Manipulation Technique for Multiple Computer Environments. In *Proceedings of UIST'97*, pp. 31–39, October 1997.
- [8] Jun Rekimoto. A multiple-device approach for supporting whiteboard-based interactions. In *Proceedings of ACM CHI'98*, pp. 344–351, February 1998.
- [9] Itiro Siio. InfoBinder: a pointing device for a virtual desktop system. In *6th International Conference on Human-Computer Interaction (HCI International '95)*, pp. 261–264, July 1995.
- [10] Norbert A. Streitz, Jorg Geisler, and Torsten Holmer. Roomware for cooperative buildings: Integrated design of architectural spaces and information spaces. In Norbert A. Streitz and Shin'ichi Konomi, editors, *Cooperative Buildings - Integrating Information, Organization, and Architecture*, 1998.
- [11] Brygg Ullmer, Hiroshi Ishii, and Dylan Glas. media-Blocks: Physical containers, transports, and controls for online media. In *SIGGRAPH'98 Proceedings*, pp. 379–386, 1998.
- [12] John Underkoffler. A view from the Luminous Room. *Personal Technologies*, Vol. 1, No. 2, June 1997.
- [13] Pierre Wellner. Interacting with paper on the DigitalDesk. *Communication of the ACM*, Vol. 36, No. 7, pp. 87–96, August 1993.
- [14] 暦本純一. 2次元マトリックスコードを利用した拡張現実感システムの構成手法. インタラクティブシステムとソフトウェア IV, pp. 199–208. 近代科学社, 1996.
- [15] 綾塚祐二, 松下伸行, 暦本純一. HyperPalette: PDAを利用した複合計算機環境. インタラクティブシステムとソフトウェア VII, pp. 109–118, 1999.