

携帯端末の3次元位置に基づく投影画面の表示と直感的な操作手法の試み

杉本 雅 則[†] 宮原 耕 介^{††}
井上 博 司[†] 田村 晃 一[†]

携帯電話やPDAをはじめとする携帯端末は、個人用の電子機器として広く利用されている。一方、携帯端末の多機能化にともない、複数の人々が1台の携帯端末を共有しつつ利用するという状況も見られるようになってきている。そこで、本研究では、携帯端末の画面を投影することによる複数人での共有、および共有された画面に対する直感的な操作を実現するための手法について議論する。任意の場所、大きさと携帯端末画面を投影することは、「プロジェクタを搭載した携帯端末」があれば可能である。しかし、プロジェクタを搭載し、かつ携帯端末の特徴である「携帯性」を維持することは、現在の技術ではまだ実現困難である。そこで本研究では、携帯端末の3次元位置および姿勢を、天井に設置したステレオカメラでトラッキングし、天井に設置した既存の液晶プロジェクタを用いることで、携帯端末の画面をテーブルに投影できるシステムを構築した。*Hotaru*と呼ばれる提案システムでは、ユーザは自分の指を使って、投影画面上の画像や文書にアノテーションを付けたり、自分の見やすい方向に回転させたりできる。また、複数の携帯端末の投影画面を重ね合わせることで、携帯端末間のファイル移動を行うことも可能である。評価実験を通して、本研究での提案手法が、ユーザにとって直感的であり、同じ場所を共有する複数の人々が参加して利用できることを示した。

Projecting Displays of Mobile Devices Based on 3D Positions and Intuitive Manipulation Techniques

MASANORI SUGIMOTO,[†] KOSUKE MIYAHARA,^{††} HIROSHI INOUE[†]
and KOICHI TAMURA[†]

Mobile devices (cellular phone, PDA, etc.) have so far been personal tools. Due to their evolution to multi-functionality, however, the devices have begun to be used by multiple people in co-located situations. This paper discusses techniques to allow multiple people to share mobile devices by projecting their displays and to conduct intuitive manipulations on them. It is possible to project a display of a mobile device in any location and size, when a mobile device that mounts a projector is available. In today's technologies, however, it is difficult to realize a mobile device with a small and lightweight projector that still retains the feature of mobility. Therefore, we have developed a system to project displays of mobile devices on a table, in order to track their three-dimensional positions and orientations by using a stereo camera and an existing LCD projector, both of which are installed onto a ceiling. The proposed system called *Hotaru* (a firefly, in English) allows users to annotate/rotate a picture or a document on a projected display by using their fingers. Users can intuitively transfer a file between multiple devices by making their projected displays overlapped. Evaluations of *Hotaru* indicated that the proposed manipulation techniques could support multiple people in co-located situations in conducting their tasks.

1. はじめに

携帯電話やPDA (Personal Digital Assistant) をはじめとする携帯端末は、我々の社会に急速に普及し

ており、多くの人々が日常生活で利用している。日本国内での携帯電話契約数は、2004年3月時点で約8,200万人に達しており、単純計算では、日本国内の4人に約3人が携帯電話を利用していることになる¹²⁾。

このような背景の1つとして、携帯端末の多機能化があげられる。最近の携帯端末は、本来の電話の機能やスケジュール表の機能に加え、web browser, デジタルビデオカメラ, ゲーム機, 音楽再生装置, テレビ,

[†] 東京大学

The University of Tokyo

^{††} 日本テレビ放送網株式会社

Nihon Television Network Corporation

GPS等、さまざまな機能を備えるようになってきている。それにより、計算能力の差はあるものの、携帯端末とパーソナルコンピュータとの機能的な差は小さくなりつつある。つまり、携帯端末には、デスクトップ型あるいはノートブック型のコンピュータに、「携帯性」の要素を加えた新しいコンピュータとしての役割が与えられつつある。さらには、従来の映像、音声機器の機能をも取り込むことで、「マルチメディア家電」としての役割も担い始めているといえる。それとともに、携帯端末は、1人の人間が使う、あるいは離れた場所にいる他者との1対1のコミュニケーションのための道具から、同じ場所を共有する複数の人々のコミュニケーション支援や共同作業支援のための道具としても使われるようになりつつある。そして、それによる問題点も明らかになってくる。

たとえば、カメラ付きの携帯電話であれば、写真を撮影したその場で、その写真を全員で同時に閲覧したいという要求が生じる。しかし、携帯電話の小さなスクリーンは、複数の人間で同時に閲覧するのに適しているとはいえない。また、撮影した写真を目の前の人から要求され、それをその人の携帯電話に送る場合、電子メールに添付する、あるいは赤外線通信を使う等の操作を行うことになる。しかし、小さなスクリーン上で少数のキーを使って入力して操作するのは、必ずしも直感的ではなく、煩雑である。

上記の問題を解決する1つの方法として、携帯端末の画面を複数の人間で共有できるように大きく投影し、その画面に対する直感的な操作を実現するというアプローチが考えられる。たとえば、携帯端末に搭載可能なプロジェクタを用いることができれば、ユーザはいつでもどこでも、任意の位置に任意の大きさで、携帯端末の画面を表示することができる。さらに、ユーザが投影画面上に書き込んだり、ファイルを選んだりする等の操作を、携帯端末に搭載可能なビデオカメラによって認識できれば、同じ場所を共有する複数の人々でのコミュニケーション支援や共同作業支援にもつながる。

現時点では、携帯端末に搭載可能なプロジェクタは、実現されていない。たとえば、Canesta Keyboard¹¹⁾は、机等に投影する仮想キーボードであり、プロジェクタとカメラから構成されるデバイスをPDAに搭載して利用する。しかし、このプロジェクタは1色のみでの表示であり投影距離が短いので、複数の人々と投影画面を共有するという用途には向かない。また、フルカラーのプロジェクタについては、その重量や消費電力等の問題があるため、携帯端末に搭載できるもの

はまだ実現されていない。しかし、携帯端末に搭載可能なプロジェクタの研究開発は進行中であり^{4),7)}、近い将来実現されると予想できる。一方、携帯端末に搭載可能なデジタルビデオカメラはすでに実現しており、投影画面上での操作を認識するために用いることが可能である。

そこで本研究では、*Hotaru*と呼ばれる以下のようなシステムを提案する。*Hotaru*では、携帯端末(本研究ではPDAを用いる)の3次元位置・姿勢に応じて、その投影画面を表示する。PDAの3次元位置・姿勢情報は、天井に固定されたステレオカメラによって取得される。PDAは、サーバコンピュータと無線LANで接続されている。各PDAの3次元位置と姿勢に基づき、その投影画面の位置、大きさ、形状がサーバコンピュータ上で計算され、天井に固定されたプロジェクタを介して、直下のテーブル上に投影される。したがって、ユーザは自分のPDAを3次元空間で移動することで、投影画面の表示位置、大きさ、形状を変えることができる。次に、携帯端末の上部に取り付けた小型ビデオカメラにより、投影画面およびその上での指の動きを認識することで、ユーザによる直感的な操作を可能にする。本研究では、指によるクリック、ダブルクリック、ドラッグ等の操作に加え、投影画面を共有するユーザが行うアノテーション、および画像や文書の回転を行えるようにする⁶⁾。さらに、複数のユーザが、各々の携帯端末画面の投影位置を自由に移動させ、それらを互いに重ねることによって、携帯端末間でのファイル移動を可能にする機能を実現する¹³⁾。

本論文の構成は、以下のとおりである。2章で、*Hotaru*の関連研究をあげる。3章では、携帯端末の3次元位置・姿勢情報を基に、固定プロジェクタを介して投影画面を表示し、それを携帯端末搭載のビデオカメラで認識する手法について述べる。4章では、投影画面上で行う直感的な操作を実現する手法について議論する。5章で*Hotaru*を評価するために行った実験について述べ、6章で本論文の結論を示す。

2. 関連研究

*Hotaru*の関連研究として、本章では位置情報を利用した投影画面の生成に関する研究、および投影画面に対する直感的な操作に関する研究について述べる。

iLamps⁹⁾は、複数台(cluster)の手で持てる(handheld)プロジェクタの3次元位置と姿勢を基に、適応的な投影を行うシステムである。iLampsの目的は、投影画像の重なりを自動修正することで、平面や球体の投影面に対してシームレスかつ整合性のあ

る投影画像を表示することであり、本研究の目的とは異なっている。

Everyday Display (ED)⁸⁾ は、“steerable interface” の概念に基づくシステムである。ED では、天井に設置された液晶プロジェクタから室内の壁、床等の任意の場所への投影を、ユーザの頭の位置のトラッキングとプロジェクタに取り付けられた鏡の角度の制御によって行う。BurningWell¹⁴⁾ は、各画素の位置情報をエンコードしたモノクロパターン画像を受光センサに投射することで、プロジェクタからの投影画面を適切な場所に表示したり、受光センサの移動に対して、投影画面の位置を追従させたりできるシステムである。ED および BurningWell の目的は、ユーザやデバイスの位置に応じた投影を行うという点で、本研究と関連する。しかし、デバイスの位置や姿勢に応じて、投影画面を拡大・縮小する、あるいは回転する等、複数の人間が投影画面を共有する際に要求される機能は、備えていない。

PaperWindows²⁾ は、紙の物理的な特性を生かしつつ、デジタルな情報を操作するためのシステムである。マーカを付加した紙の 3 次元位置と形状を 12 台のカメラで認識し、その 3 次元モデルに応じた画像を天井設置のプロジェクタから投影する。紙を裏返す、こする、重ねる等のジェスチャや、マーカを取り付けた指の動きにより、紙の上に投影されたデジタルな情報に対する直感的な操作を行うことができる。PaperWindows は 1 人のユーザによる支援を目指しており、複数の人間が共有可能な投影画面の生成と直感的な操作を実現する、という本研究の目的とは異なっている。

HyperPalette¹⁾ では、ユーザは PDA を揺らす、移動する等のジェスチャによって、机の上に投影されている写真を PDA に取り込んだり (scoop)、PDA 中の写真を机の上に表示したり (drop) することができる。HyperPalette は、PDA を用いた情報の直感的な移動を目的としているが、Hotaru のように投影画面を複数の人間で共有しつつ、PDA を持たないユーザが直感的な操作を行えることを目的とはしていない。

Augmented Surfaces¹⁰⁾ は、レーザポインタを用いることで、コンピュータ中の画像や文書を、机や壁の上にドラッグしたり、別のコンピュータに転送したりできるシステムである。一方、Hotaru では、携帯端末の携帯性を生かし、複数の投影画面を重ね合わせることによる操作や指を用いた操作によって、Augmented Surfaces とは異なる直感的な操作を提案している。

3. 携帯端末の投影と投影画面の認識手法

3.1 システム設計における検討事項

本章では、携帯端末の画面を投影する手法について、最初に議論する。Hotaru では、携帯端末の 3 次元位置・姿勢に応じて投影画面を表示するために、以下の条件について検討を行った。

1. 携帯端末の 3 次元位置および姿勢を自動的に認識できる。
2. 携帯端末の 3 次元位置および姿勢に合わせて、任意の方向への投影を可能にするため、プロジェクタの位置および姿勢を制御できる。

上記の 2. の条件を満足するためには、液晶プロジェクタの位置と投影姿勢を高速かつ正確に変更できる特殊な装置が必要となる。たとえば、回転雲台によるパンチルト機能を持ったプロジェクタ⁵⁾ を利用するという手法も考えられる。しかし、携帯端末の 3 次元位置および姿勢に応じて、液晶プロジェクタの位置と姿勢を瞬時に制御する機構を実現するのは容易ではない。一方、液晶プロジェクタの物理的な位置や姿勢を制御するというアプローチでなくても、携帯端末の 3 次元位置および姿勢情報を用いて、その画面を限られた範囲に投影することであれば、実現可能である。また、本論文で提案する直感的な操作手法について、その有用性を検討することもできると考える。そこで本研究では、液晶プロジェクタの物理的な位置や姿勢を制御することなく投影を行うこととした。具体的には、携帯端末の投影画面の位置や大きさを、プロジェクタ直下に置かれたテーブル上の指定された領域内で、ユーザが自由に変更しつつ表示できるようにした。

なお、現在のバージョンの Hotaru では、携帯端末として PDA を用いる。なぜならば、現在の携帯電話は PDA に比べると、システム開発のための環境がまだ十分には整備されていないためである。また、現在のモデルの PDA は、投影画面上でのユーザによる指操作認識のための画像処理を行うのに十分な計算能力が備わっていない。したがって、Hotaru では図 1 に示すように、サーバコンピュータ上でこの処理を行っている。

3.2 PDA の 3 次元位置および姿勢認識

PDA の 3 次元位置および姿勢認識は、赤外線 LED およびステレオカメラを用いて行われる。赤外線 LED は、図 2 に示すように、二等辺三角形となるように配

将来的には、十分な計算能力を持った携帯端末が利用可能になると考えられる。

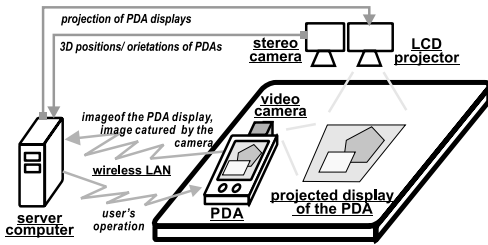


図 1 Hotaru のシステム構成
Fig. 1 System configuration of Hotaru.

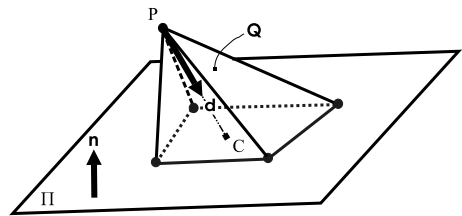


図 3 Hotaru による PDA の投影画面の生成
Fig. 3 How Hotaru generates a projected display of a PDA.

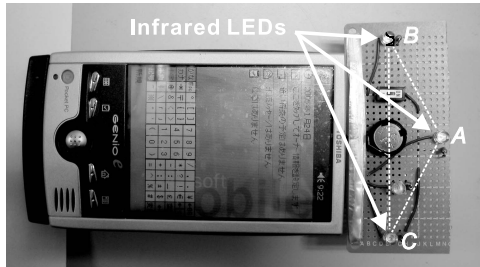


図 2 3 次元位置および姿勢認識のための赤外線 LED
Fig. 2 Infrared LEDs for position and orientation identification.

置されている (図 2 の A, B, C). ステレオカメラで得られた画像により, 点 A, B, C の 3 次元座標が求まる. このとき, PDA の 3 次元位置は, 二等辺三角形の重心 $P = (x_p, y_p, z_p)$ で表現される. また, PDA の姿勢は, \overline{BA} と \overline{CA} の和であり, $d = (x_d, y_d, z_d)$ と表現できる. 個々の PDA を認識するために, 頂点 A の赤外線 LED は PDA ごとに異なるパターンで点滅するようになっている.

なお, 本研究で用いたステレオカメラ (ViewPLUS 製 Bumblebee) を地上約 2.5 メートルの位置に取り付けた場合, カメラ直下の 1.5 メートル \times 1.5 メートル四方の空間において, 位置認識の誤差は最大 6 cm 以下, 姿勢認識の誤差は, 最大 5 度以下であった. また, 現在の実装では, 点滅パターンを正しく認識するのに要する時間は最大 1 秒以内である. よって, ユーザが PDA を持って最初に 1 秒ほど静止すれば, Hotaru は個々の PDA の同定, 位置, 姿勢をほぼ正しく認識できる.

3.3 PDA 画面の投影

次に, 3.2 節で求めた PDA の 3 次元位置と姿勢に基づき, 固定の液晶プロジェクタを介して PDA の投影画面を表示する手法を示す. 図 3 に示すように, 点 P にある PDA の画面が投影される物体表面を Π , 点 P を始点としベクトル d 方向の直線と Π の交点を C , 点 P の仮想的なプロジェクタからの光線によ

て生成される四角錐 Q とする. このとき, PDA の投影画面は, Π による Q の切断面となる. 平面 Π はあらかじめ固定されているので, PDA の動きに応じて, 四角錐 Q の頂点 P および光軸の方向 d を変更すれば, 投影画面の位置, 大きさ, 形状も変化する.

PDA の位置および姿勢のトラッキングを実時間で行うためには, ステレオカメラのフレームレートをできるだけ高くする必要がある. 現在の実装では, フレームレートを 15 fps に設定している. しかし, 3.2 節で述べたように, PDA の位置および姿勢推定には誤差がともなう. したがって, PDA を 3 次元空間中に固定しても, その投影画面の位置, 大きさ, 形状はつねに変動するため, ユーザにとって目障りであり, 操作も行いにくい. そこで Hotaru では, 直前の 10 フレームから計算される PDA の位置および姿勢の平均を現在の PDA の位置および姿勢としている. これにより, PDA の変位に対する投影画面の追隨にやや遅れが生じるが, 投影画面の変動を抑えることができるため, ユーザが指操作等を行う際に及ぼす影響を軽減できる.

3.4 投影画面の認識

PDA の投影画面の認識は, PDA に搭載されたビデオカメラ (SONY 製 AVC666SN, 有効画素数: 25 万画素) によって, 以下のように行われる.

- (1) PDA 搭載のビデオカメラで取得された画像から, 投影画面の輪郭および頂点を抽出する.
- (2) 抽出された投影画面と PDA とを対応付ける.

投影画面の輪郭と頂点を抽出する過程を, 図 4 に示す. 複数の PDA の画面が投影された場合の認識に対応するため, ビデオカメラには広角レンズが取り付けられている. そこで Hotaru では, まず広角レンズを通して取得された画像の歪補正を行った後, Canny フィルタによりエッジを抽出する¹⁵⁾. エッジ抽出の結果, 各 PDA の投影画面の輪郭と 4 つの頂点が確定できれば, 投影画面の領域の確定に成功したことになる. 一方, 人間の手によるオクルージョンや, 複数の投影画面の重なり等により, すべての頂点を確定できない

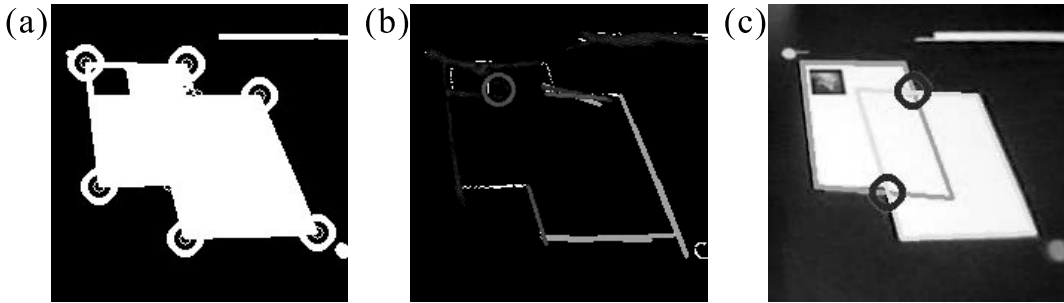


図4 投影画面の抽出。(a) 各投影画面の3頂点を抽出 (b) 各投影画面の4番目の頂点を推定 (c) 各投影画面の領域を認識

Fig.4 Extracting a projected display. (a) Three vertices of individual projected displays are determined. (b) The fourth vertex of each projected display is estimated. (c) The region of each projected display is recognized.

場合(図4(a))はHough変換により、認識できなかった頂点を推定する(図4(b))。

次に、投影画面とPDAとの対応付け(3.5節を参照)を行った後、投影画面の4頂点のカメラ座標と、PDAスクリーンの4頂点の絶対座標(PDAの3次元位置および姿勢から求められる)を対応付けることにより、2つの座標系の変換行列(平面射影行列)を計算する。この変換行列は、ビデオカメラで認識されたユーザの指の位置を、PDAスクリーン上での位置に対応付ける際に用いられる(4章を参照)。

3.5 投影画面とPDAとの対応付け

携帯端末搭載のカメラによって、複数の投影画面が取得された場合、どの投影画面がどの携帯端末に対応するのかを確定させる必要がある。Hotaruでは、各PDAの3次元位置と姿勢が分かっているので、その情報を利用すれば、カメラで取得された投影画面とPDAとの対応付けを推定することは可能である。しかし、PDAに搭載可能なプロジェクタが実現されれば、PDAの3次元位置と姿勢は、投影画面を生成するためには不要になる。逆にいえば、投影画面の生成のために利用されている情報を、それ以外の機能を実現するために利用するのは望ましくないといえる。したがって、PDAとその投影画面との対応付けは、PDA搭載可能なビデオカメラで取得される画像を用いて行う必要があると考えた。

我々は、各PDAスクリーン上の画像とカメラで取得された投影画面画像との類似度を計算することで、その対応付けを推定する方法を最初に試みた。しかし、PDA画面は互いに似ている(複数のフォルダおよび



図5 投影された地図へのアノテーション
Fig.5 Annotation to a projected map.

ファイルアイコンの配置)こと、複数の投影画面が重なった場合は、各々の特徴を十分に抽出できないこと、等の理由により、精度良く同定できないことが分かった。本研究の主たる目的の1つは、携帯画面を投影することで可能となる直感的な操作手法の検討であるため、投影画面を確実に認識できる手法を現段階ではとることにした。現在の実装では、各PDAの投影画面の左上に異なる色の円形マーカを割り当てて投影し、それをカメラで認識することで、PDAの同定を行っている(図5)。マーカをスクリーンおよび投影画面の内側に表示させた場合でも、カメラでの認識は可能であるが、PDAスクリーンおよび投影画面をできるだけ大きく利用するために、現在は投影画面の外側に表示している。ただし、上記の方法では、異なる色のマーカを確実に識別できる必要があるため、割り当て可能なマーカ数には限界がある。そこで、多数のPDAを同時に識別するための手法についての検討を、現在進めている。

上記の方法で4つの頂点を推定できなかった場合は、別のディスプレイに認識に失敗したメッセージを表示することで、ユーザに知らせている。

4. 指による操作の認識

本章では、PDA に搭載されたデジタルビデオカメラを用いて、指による直感的な操作を認識する手法について示す。

4.1 基本的な操作

我々は、DigitalDesk¹⁷⁾ に示されているように、指にマーカ等の装着をしない状態での操作の認識を、最初に試みた。しかし、マーカ等の装着なしでは、指の同定および操作認識の精度が低く、たとえば Enhanced-Desk³⁾ で用いられている赤外線カメラ等の装置を用いる必要があることが分かった。そこで、本研究では、ユーザの指先に赤色 LED を取り付けることにした。

Hotaru は、赤色の輝度が高い領域をユーザの指先領域の候補として抽出する。ユーザの指先と PDA スクリーンとの対応付けは、3.4 節で求めた変換行列を用いて行われる。また、カルマンフィルタ¹⁶⁾ を用いることで、現在およびこれまでの指先位置の情報から、次の指先位置を推定して候補を絞り込む。

以下に、指による操作のリストを示す。PDA 搭載のカメラによって、ユーザの指先が投影画面に触れたかどうかを判定し、クリック等の操作を行ったことを認識するのは困難である。そこで Hotaru では、ユーザの指先の動きや静止時間を基に、操作の認識を行っている。

- クリック：初期状態（アイコン等が選択されていない状態）でユーザの指先が1秒以上静止した場合、ユーザがクリックを行ったと認識する。
- ダブルクリック：初期状態でユーザの指先が2秒静止した場合、ユーザがダブルクリックを行ったと認識する。
- ドラッグ：クリックの後、ユーザの指が移動した場合、ユーザがドラッグを行ったと認識する。
- リリース：ドラッグの後、ユーザの指先が1秒以上静止した場合、ユーザがリリースを行ったと認識し初期状態に戻る。
- 中止：投影画面領域の外に指が出ると、現在の操作は中止され初期状態に戻る。

上記の静止時間は、Hotaru の開発過程でのインフォーマルなユーザスタディによって決定された。

具体的には、被験者6人に対し、

- 設定 A：クリック 0.5 秒，ダブルクリック 1.0 秒，リリース 0.5 秒
- 設定 B：クリック 1.0 秒，ダブルクリック 2.0 秒，リリース 1.0 秒
- 設定 C：クリック 1.5 秒，ダブルクリック 3.0 秒，

リリース 1.5 秒

- 設定 D：クリック 2.0 秒，ダブルクリック 4.0 秒，リリース 2.0 秒

という4つの実験設定の各々で、クリック-ダブルクリックおよびクリック-ドラッグ-リリースの操作を5回ずつ行ってもらった。そして、滞在時間の違いによる認識の正確さ（滞在時間が長いほど、認識率は高くなる）、および滞在時間に対する許容度（滞在時間が長いほど、フラストレーションがたまる）という観点から、望ましいと思う設定を各被験者に選択してもらい、最も支持された設定 B に決定された。

また、操作に対し聴覚的なフィードバックを与えた方が良いとのコメントが、上記の実験の過程で得られた。そこで、通常のマウス操作で発生する音を、聴覚的なフィードバックとして用いた。具体的には、投影画面上で指が1秒静止した場合はマウスボタンをクリックしたときの音を1回、さらにもう1秒静止した場合はクリックしたときの音を2回、クリックの後にドラッグが認識された場合はマウスボタンを押したときの音を1回、ドラッグの後に1秒静止した場合はマウスボタンをリリースしたときの音を1回鳴らすことで、クリック、ダブルクリック、ドラッグ開始、リリースが認識されたことを知らせるようにした。

4.2 投影画面に対する直感的な操作の例

本節では、投影画面に対する直感的な操作手法に関する例を示す。

4.2.1 アノテーション

Hotaru では、投影画面の文書や画像に対し、ユーザは指で書き込みを行うことができる。図5は、複数のユーザが机の上に投影された地図を見ている様子である。このとき1人のユーザが、指で線を書いたり、印を書き込んだりすることができる。たとえば、携帯端末を持つ1人のユーザが、web site にアクセスして地図を壁等に投影した際、別のユーザが目的地までの道順を指で書き込む、ということができる。

4.2.2 回転

PDA 中の文書や画像を机の上に投影した際、そのファイルを各ユーザが見やすい位置に回転させることができれば、共同作業の支援に有用であると考えられる。Hotaru では、ユーザが画像右下の端点を指でドラッグすることにより、投影画面上のファイルを自由に回転させることができる。このときの回転中心は、選択された文書や画像の中心点である。図6は、1人のユーザの PDA から机の上に投影された写真を、もう1人のユーザが自分の見やすい向きになるように回転させている様子である。

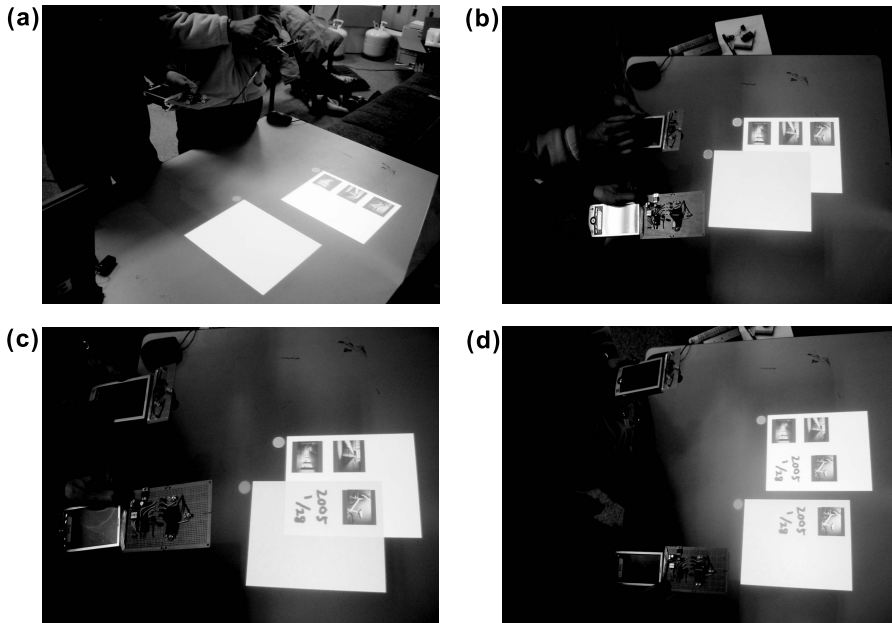


図 7 投影画面を重ね合わせることによる複数の PDA 間でのファイル転送。(a) ユーザ A とユーザ B の PDA 画面が投影されている。(b) ユーザ B がユーザ A の PDA 画面に自分の PDA 画面を重ねる。(c) 投影画面が重なっている部分へとユーザ A がファイルをドラッグする。(d) ファイルがユーザ B の PDA に転送される

Fig. 7 File transfer between multiple devices by overlapping. (a) Displays of User A's PDA and User B's PDA are projected. (b) User B moves his PDA so that its projected display overlaps with that of User A's PDA. (c) User A drags a file to the overlapping region of their projected displays. (d) The file in User A's PDA is transferred to User B's PDA.



図 6 投影画面の回転

Fig. 6 Rotation of a projected display.

4.2.3 投影画面を重ねることによるファイル移動

複数の PDA 間でファイルを転送する様子を、図 7 に示す。図 7(a) では、2 人のユーザの PDA の画面がテーブル上に投影されている。ユーザ B は、自分の PDA の投影画面をユーザ A の PDA の投影画面に重なるよう PDA を移動する(図 7(b))。投影画面が重なっている様子は、ユーザ A およびユーザ B の PDA スクリーンにも表示される。

このときユーザ A は、PDA スクリーン上でスタイラスペン、あるいは投影画面上で指によって、転送したいファイルを 2 つの投影画面が重なっている領域にドラッグする(図 7(c))。ユーザ A がファイルをリリースすると、ユーザ B の PDA のスクリーン上に、ファイル転送を許可するかどうかを確認するポップアップウィンドウが現れる。ユーザ B がポップアップウィンドウ上の“ok” ボタンをクリックすれば、図 7(d) のようにファイルはユーザ B の PDA に転送される。また、投影画面が重なっている領域に書き込みをすれば、カーボンコピーのように複数の PDA にその書き込みを反映させることもできる(図 7(c))。

5. 評価実験

5.1 概要

Hotaru を評価するために、以下の 2 つの実験を行った。

実験 1: 投影画面上での指によるポインティング精度に関する評価

実験 2: アノテーション、回転、ファイル移動についての評価

Hotaru では、PDA に搭載されたカメラにより、投影画面上の指での操作を認識する。実際の利用では、ユーザは PDA を手に持つことになるため、PDA が固定されている場合と手持ちの場合とでは、たとえばアイコンを指でクリックする際のポインティング精度に差が生じると考えられる。そこで、両者の相違について評価するのが、実験 1 の目的である。

一方、実験 2 では、4.2 節で示したように、画像ファイルへのアノテーションと回転、および複数 PDA 間のファイル転送の操作を行ってもらう。そして、実験中のビデオ分析および被験者へのインタビューを通して問題点を明らかにするのが、実験 2 の目的である。

5.2 実験 1

4 人の大学院生が、被験者として実験に参加した。各被験者には、PDA を固定した場合および手持ちの場合（以下では、「PDA 固定」および「PDA 手持ち」と呼ぶ）で、投影画面上にランダムに表示される点への指でのポインティングを行ってもらった。「PDA 固定」の条件では、PDA が投影面（テーブル）の上方 35 cm の位置に固定された。一方、「PDA 手持ち」の条件では、別の被験者に PDA を手で持ってもらった（投影面からの PDA の位置は、「PDA 固定」の条件とほぼ同様になるようにした）。各被験者は、各々の条件でポインティング操作を 10 回ずつ行った。

図 8 では、投影画面上で指定された点と被験者によるポインティング操作が認識された点との距離を、誤差の分布として示している。ポインティング操作の誤差は、「PDA 固定」の条件で平均 6.6 (pixel)、標準偏差 5.1 (pixel)、「PDA 手持ち」の条件で平均 8.3 (pixel)、標準偏差 4.4 (pixel) となった。両条件ともに、平面

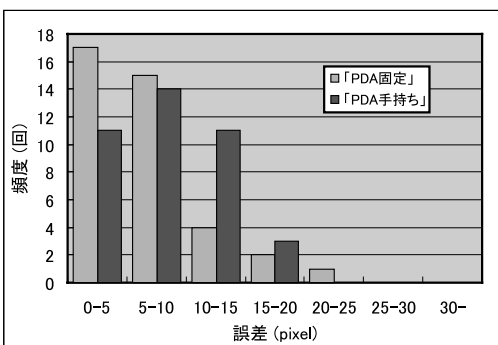


図 8 ポインティング操作の誤差分布

Fig. 8 Error distribution of pointing manipulations.

1 人の被験者については、実験の手違いにより各条件でのポインティング操作は 9 回であったため、4 人の被験者による総操作数は、両条件ともに 39 回となった。

射影行列 (3.4 節を参照) の誤差が原因で、正確なポインティング操作を必ずしも行えないことが分かる。「PDA 手持ち」の条件ではさらに、PDA 搭載カメラのぶれや投影画像の変位の影響も受ける。しかし、図 8 からその差は比較的小さいといえる (いずれも最大誤差 20 pixel 程度)。したがって、*Hotaru* で想定される「PDA 手持ち」の条件でも、クリックやドラッグの対象となるアイコンの大きさを、たとえば 40×40 pixel で設計すれば、指での操作をほぼ確実に認識できることが分かった。

なお、上記の 2 つの条件での誤差に大きな相違がない理由として、(1) 被験者の作業の妨げにならないために、PDA を持っているもう 1 人の被験者が、PDA の投影画面をできるだけ変化させないように気を付けていること、(2) 投影画面の位置が変化したとしても、PDA に取り付けられたカメラの動きとほぼ同期するため、その影響は予想されるほどは大きくないこと、等が考えられる。

5.3 実験 2

2 人ペア 3 組、3 人グループ 2 組の計 12 人の被験者が参加した。*Hotaru* を利用した時間は、各組約 30 分である。

被験者から得られた肯定的 (1-4) および否定的なコメント (5-7) のうち、代表的なものを以下に具体的に示す。

1. PDA を 3 次元空間で動かすことで、投影画面の位置、大きさ、形状を自由に換えられるので、直感的で分かりやすい。
2. 画面を投影すれば、PDA のスクリーンを肩越しに覗き込んだりしなくてもいいので、写真や文書が見やすくなる。
3. 投影画面に対し、指でアノテーションや回転の操作が行えるのは、直感的かつ有用である。
4. 投影画面を重ねることによって、複数の PDA 間のファイル転送ができるというのは、他のファイル転送方法に比べ、分かりやすくして面白い。
5. 指での操作は、反応が遅いため、フラストレーションがたまる。
6. PDA の位置がぶれると、指での操作がうまく認識できないことがある。
7. 共同作業を支援するためには、複数のユーザの指による操作を同時に認識できる方がいい。

コメント 1-4 から、*Hotaru* のアイデアが被験者に肯定的に受け入れられているといえる。一方、コメント 5 は、クリック、リリース、ダブルクリックを認識させるために、被験者が指の動きを静止して待つ必要

があることに起因している。これと同様のコメントは、他の論文¹⁸⁾でも報告されている。コメント6に関しては、ユーザがPDAを持ちながら別の手で投影画面上での操作を試みると、PDAがぶれて投影画面が移動するため、操作の認識に失敗することが多かった。ユーザが手に持っているPDAの位置に多少のぶれが生じて、指の操作が行えるようにするには、たとえば、加速度センサ等を用いてPDAの動きを検知し、その動きを反映させることで投影画面の位置の変化を最小限に抑える、等の手法を検討する必要があると考えている⁹⁾。コメント7については、現在は1人のユーザの指先位置の認識にしか対応していないが、今後は複数のユーザの認識が可能なマーカの利用を検討している。

6. む す び

本論文では、複数の人数によって共有可能な携帯端末の投影画面の表示と、投影画面上での直感的な操作を可能にするために、*Hotaru*と呼ばれるシステムを提案した。*Hotaru*では、携帯端末としてPDAを用いた。ステレオカメラによって取得されたPDAの3次元位置および姿勢情報を用いて、天井設置の液晶プロジェクタから直下のテーブルに投影画面を表示する手法とともに、投影画面に対する指による操作や複数の投影画面を重ね合わせることによるファイル転送の手法について議論した。

また*Hotaru*の評価実験を通して、指による操作誤差の評価、および*Hotaru*が実現する直感的な操作手法の有用性について示した。そして、*Hotaru*が、同じ場所にいる複数のユーザの参加を可能にすること、つまり、携帯端末が個人のための道具だけでなく、グループのための道具となりうることを示した。

一方、解決および検討されるべき課題も明らかになった。今後は、より詳細なユーザスタディとその分析を通して、*Hotaru*の性能向上および機能拡張を進めるとともに、さらなる応用可能性についても探りたいと考えている。

参 考 文 献

- 1) Ayatsuka, Y., et al.: HyperPalette: A Hybrid Computing Environment for Small Computing Device, *Proc. ACM CHI2000*, pp.133-134 (2000).
- 2) Holman, D., et al.: PaperWindows: Interaction Techniques for Digital Paper, *Proc. ACM CHI2005*, Portland, OR, pp.591-599 (2005).
- 3) Koike, H., et al.: Integrating Paper and Dig-

- ital Information on EnhancedDesk: A Method for Real-Time Finger Tracking on Augmented Desk System, *ACM Trans. Computer Human Interaction*, Vol.8, No.4, pp.307-322 (2001).
- 4) Mitsubishi Electric Pocket Projector. <http://www.merl.com/people/raskar/pocket.html>
- 5) 満上, 浮田, 木戸出: 投影中心固定型パンチルトプロジェクタを用いた複数面投影, 画像の認識・理解シンポジウム (2005).
- 6) Miyahara, K., Inoue, H., Tsunesada, Y. and Sugimoto, M.: Intuitive Manipulation Techniques for Projected Displays of Mobile Devices, *Proc. ACM CHI2005 Extended Abstract*, Portland, Oregon, pp.1657-1660 (2005).
- 7) New York Times: *For Your Viewing Pleasure, a Projector in Your Pocket* (2004). (available at <http://www.nytimes.com/2004/11/04/technology/circuits/04next.html>).
- 8) Pingali, G., et al.: Steerable Computing Interfaces for Pervasive Spaces, *Proc. IEEE PerCom2003*, pp.315-322 (2003).
- 9) Raskar, R., et al.: iLamps: Geometrically Aware and Self-Configuring Projectors, *ACM Trans. Graphics*, Vol.22, No.3, pp.809-818 (2003).
- 10) Rekimoto, J. and Saito, M.: Augmented Surfaces: A spatially Continuous Work Space for Hybrid Computing Environments, *Proc. ACM CHI99*, pp.378-385 (1999).
- 11) Roeber, H., et al.: Typing in Thin Air: The Canesta Projection Keyboard—A New Method of Interaction with Electronic Devices, *Proc. ACM CHI2003*, pp.712-713 (2003).
- 12) 総務省: 平成16年版情報通信白書 (2004). <http://www.johotsushintokei.soumu.go.jp/whitepaper/ja/h16/index.html>
- 13) Sugimoto, M., Miyahara, K., Inoue, H. and Tsunesada, Y.: Hotaru: Intuitive Manipulation Techniques for Projected Displays of Mobile Devices, *Proc. INTERACT2005*, Rome, Italy, pp.57-68 (2005).
- 14) Summet, J. and Sukthankar, R.: Tracking Locations of Moving Hand-held Displays Using Projected Light, *Proc. Pervasive 2005*, Munich, Germany, pp.37-46 (2005).
- 15) Trucco, E. and Verri, A.: *Introductory Techniques for 3-D Computer Vision*, Prentice Hall (1998).
- 16) Welch, G. and Bishop, G.: An Introduction to the Kalman Filter, *SIGGRAPH 2001 Tutorial* (2001). (available at http://www.cs.unc.edu/~tracker/media/pdf/SIGGRAPH2001_CoursePack_08.pdf).
- 17) Wellner, P.: Interacting with Paper on the

DigitalDesk, *Comm. ACM*, Vol.36, No.7, pp.87–96 (1993).

- 18) Zhang, Z., et al.: Visual Panel: Virtual Mouse, Keyboard and 3D Controller with an Ordinary Piece of Paper, *Proc. Perceptual User Interface*, pp.1–8 (2001).

(平成 17 年 6 月 2 日受付)

(平成 18 年 3 月 2 日採録)



杉本 雅則 (正会員)

1990 年東京大学工学部航空学科卒業 . 1995 年同大学大学院工学系研究科博士課程修了 . 博士 (工学) . 同年より文部省学術情報センター (現 , 国立情報学研究所) 研究開発部助手 .

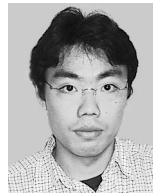
1997 年米国コロラド大学計算機科学科にて客員研究員 . 1999 年より東京大学情報基盤センター助教授 . 2002 年より同大学大学院新領域創成科学研究科助教授 . ヒューマンコンピュータインタラクション , モバイルコンピューティング , 複合現実感 , 協調作業・協調学習支援等の研究に従事 . ACM , IEEE , ISLS , 電子情報通信学会 , 人工知能学会 , 日本認知科学会 , 日本科学教育学会各会員 .



宮原 耕介 (正会員)

2003 年東京大学工学部電子工学科卒業 . 2005 年同大学大学院工学系研究科修士課程修了 . 現在 , 日本テレビ放送網株式会社勤務 . ヒューマンコンピュータインタラクション

の研究に興味を持っている .



井上 博司 (正会員)

2005 年東京大学工学部電子情報工学科卒業 . 現在 , 同大学大学院情報理工学系研究科修士課程在学中 . ヒューマンコンピュータインタラクションの研究に興味を持っている .



田村 晃一 (正会員)

2004 年東京大学工学部電子情報工学科卒業 . 現在 , 同大学大学院新領域創成科学研究科修士課程在学中 . ヒューマンコンピュータインタラクションの研究に従事 .