

テーブル内蔵型 ProCam システムにおけるマーカ認識のための光学系の検討

- Tablescape Plus への適用 -

寛 康明[†], 苗村 健[†], 松下光範[‡]

[†]東京大学大学院学際情報学府

[‡]NTT (株) コミュニケーション科学基礎研究所

概要 筆者らは、実オブジェクトを用いたインタラクションの直感性と汎用性を高めるために、テーブル上の実オブジェクトを入力としてのみでなく、映像スクリーンとしても利用するテーブル型インタラクティブディスプレイ Tablescape Plus の提案を行ってきた。しかし、これまでの単体カメラのみの利用による光学系では、フレネルレンズでの反射光の影響によりスクリーンの一部でオブジェクトのマーカ情報が安定して取得できないという問題を抱えていた。そこで本稿では、Tablescape Plus の概要をまとめると共に、赤外線投光と 2 台のカメラを用いた光学系によるオブジェクト認識手法を提案し、実装システムでの有効性に関して述べる。

A Study on Optical Design for Marker Recognition on ProCam System Embedded in Table -Application for Tablescape Plus-

Yasuaki Kakehi[†], Takeshi Naemura[†] and Mitsunori Matsushita[‡]

[†] Graduate School of Interdisciplinary Inform. Studies, The Univ. of Tokyo

[‡]NTT Communication Science Laboratories, NTT Corporation

Abstract The overall goal of our research is to increase the understandability and flexibility of the interactive physical objects on a tabletop display. To achieve this goal, we have proposed a novel ProCam system 'Tablescape Plus' that utilizes tabletop objects as projection screens as well as input equipments. However, the original prototype system using one camera has a problem that it cannot detect markers of tabletop objects on a certain area of the table surface because of the light reflected on a tabletop Fresnel lens. In this paper, we describe the overview of the Tablescape Plus system and propose the optical design using two cameras for stable marker recognition.

1. はじめに

我々の日常生活では、食事や打合せなどテーブルを用いてさまざまな行為が行われる。本研究では、このようなテーブル上での作業を支援・拡張する情報環境の構築を目的とする。

テーブル上での情報の操作は、マウス・キーボードのみを用いるのではなく、実世界での行為を拡張するような、より自然で多様なインタラクションが必要とされる。その一つとして、テーブル上の実オブジェク

トを用いたインタラクションがある。テーブル上に置かれた実オブジェクトを、画面に映し出される情報と連携させて入出力ツールとして用いることで、直感的な操作や参加者間の相互理解が期待できる。

このようなインタラクションの実現にあたり、カメラで実世界の情報を取得し、プロジェクタで実世界に直接映像情報を提示できる ProCam (プロジェクタ+カメラ) システムは有効なメディアである。中でも、

- ユーザの手や実オブジェクトによる提示映像や

マーカの遮蔽が起こらない,

- マーカがユーザの視界に入らない,
- システムのサイズが小さくなる

などの理由から、テーブル内部に設置されたプロジェクタやカメラなどの電子装置により情報取得と情報提示を同時に実現できるテーブル内蔵型 ProCam システムは幅広い応用が期待される。

このような背景のもと、筆者らはこれまでに、指向性を持つ建築用素材をテーブルスクリーンとして利用することで、テーブル内蔵 ProCam 型のインタラクティブディスプレイを提案・実装してきた[1][2][3]。中でも Tablescape Plus[3] (図 1) は卓上オブジェクトを用いたインタラクションの拡張を目的とし、実オブジェクトを入力ツールとして用いると同時に、映像ディスプレイとしても利用することで、直感性と汎用性を同時に満たす卓上インタフェースを提供するテーブル型ディスプレイである。

3 章にて詳述するが、筆者らのシステムでは、テーブルスクリーンにおけるプロジェクション映像の輝度ムラを軽減するために、フレネルレンズをテーブル面に設置している。一方で、オブジェクト認識のためにシステム内部からアクティブに照射された光の一部がスクリーン面で反射し、安定した検出を阻害するという問題を持っていた。この問題の解決するために、筆者らは複数のカメラを用いた光学系の提案および Tablescape Plus への導入を行う。

本稿では以後、Tablescape Plus の設計、マーカ認識を用いたインタラクションの概要、および複数カメラを用いた光学系に関して述べる。



図 1: Tablescape Plus

2. 関連研究

DigitalDesk[4] に代表されるように、従来から CHI (Computer Human Interaction) や Mixed Reality, CSCW (Computer Supported Cooperative Work) などの分野ではテーブル上にディスプレイを埋め込む検討がなされてきた。InfoBinder[5] や metaDesk[6] はテーブル上の実オブジェクトを用いた映像の操作を実現した先駆的な研究である。

テーブルへの情報提示には、InteractTable[7]のようにモニタを水平に設置する方法と、EnhancedDesk[8]のようにプロジェクタを用いてテーブル面に映像を投影する手法が挙げられる。プロジェクタを用いる手法は、モニタを用いる手法に比べ、画面サイズ、形状および素材の制約が少なく、Illuminating Cray[9]のように平面以外の場所にも情報を提示できるといった特徴がある。

一方、テーブル上に置かれた実オブジェクトを認識する手法としては主に、特殊な電子デバイスを取り付けたオブジェクトを用いるアプローチと、カメラを用いた画像処理ベースのアプローチが挙げられる。Sensetable[10]や DataTiles[11]は、前者の代表例である。また、後者は、ARToolkit[12]や CyberCode[13]などマーカを利用したものや、オブジェクトの色情報・形状情報を利用したものなど多岐に渡る。これらと比較すると、カメラによるアプローチには、インタラクションの多様性、オブジェクト加工の容易さなどの点に特徴がある。

このような点から、プロジェクタ+カメラの構成を採り、実オブジェクトを用いたインタラクションを可能にするテーブル型ディスプレイが数多く提案されてきた。その中でも、DigitalDesk や Shader Lamps[14] は、テーブル面だけでなく、オブジェクト面に対してもプロジェクタ映像を投影するという点で Tablescape Plus のアプローチと近い。しかし、これらは、システム上方のプロジェクタからテーブル上に映像を投影する手法を採っており、手や物の影が映像閲覧の妨げとなることや、装置規模が大きくなるといった問題点が挙げられる。

Tablescape Plus では、ユーザへの特殊な機材の装着やオブジェクトへの電気的な仕掛けをすることなく、テーブル内部の装置 (プロジェクタ+カメラ) のみを用いて、テーブル面および卓上オブジェクトにインタラクティブに情報を提示することにより、これらの問

題を解消できる。これは、従来のテーブル内蔵型 ProCam システム (Holowall Table[15]など) に用いられる拡散素材のスクリーンではなく、指向性を持つスクリーンの利用および光学設計により実現される。

3. Tablescape Plus の概要

3.1 Tablescape Plus の機能・特徴

筆者らの提案する Tablescape Plus の主な機能および特徴として、以下の3つを挙げる。

(1) 水平面と垂直面への映像提示

本システムでは、テーブル面とテーブル上に置かれた実オブジェクトの両方に異なる映像表示を実現する。この際、ユーザは特殊な機器の装着を必要としない。また、テーブル内部から映像を投影することで、ユーザの手やオブジェクトによる映像の遮蔽の影響を軽減する。

(2) カメラによるオブジェクト認識

テーブル上に置かれた実オブジェクトの ID・位置・向きを実時間で認識し、システムへの入力とする。実オブジェクト自体には電気的な仕掛けをせず、テーブル内部に設置されたカメラとオブジェクトの底面に貼付されたマーカを用いる。

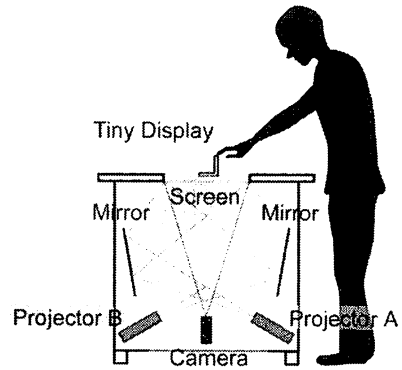
(3) オブジェクトの位置・向きに応じた映像提示

テーブル上でユーザが実オブジェクトを動かした際に、その位置や動きに応じてオブジェクトごとに適切に映像を投影する。また、垂直面に投影された映像とテーブル水平面に投影された映像を有機的に連携させた情報提示を可能にする。

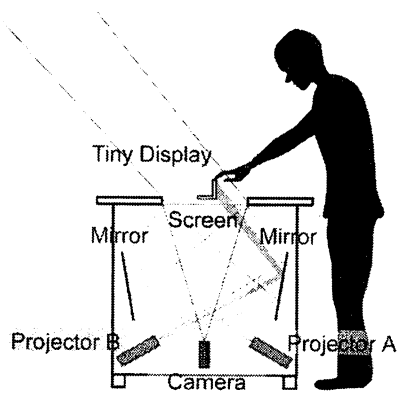
3.2 システムの基本光学設計

図 2 にシステムの基本設計図を示す。ここで、映像の観察はプロジェクタ A の投影光に正対する方向からとする。テーブル内部に 2 台のプロジェクタとカメラを設置し、テーブル上には縦型のスクリーンを持つ実オブジェクトを観察方向に正対する向きに配置する。

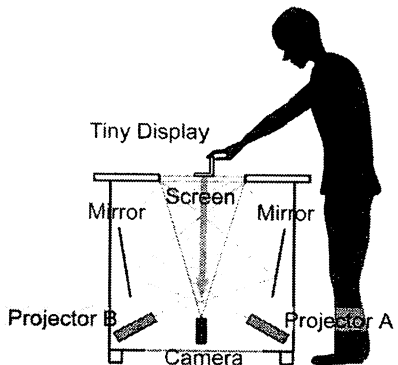
本システムでは、テーブル上の映像スクリーンとして Lumisty (タイプ MFY-2555) [16]を利用する。Lumisty は、図 3 のようにスクリーンに対して 25~55 度の範囲で入射してきた光のみ拡散させ、他の角度から入射する光は透過するという性質を持つ。さらにスクリーン部には、投影光の入射角を均一にするためにフレネルレンズを重ねて配置する。これにより下記の3つの機能を同時に実現できる。



(a) テーブル面への情報提示



(b) オブジェクト面への情報提示



(c) カメラによるテーブル上の観察

図 2: Tablescape Plus 基本設計

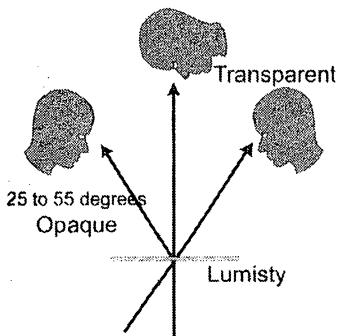


図 3: Lumisty の特性

(1) テーブル面への映像投影

図 2(a) においてプロジェクタ A から投影された映像はテーブル面で拡散し、ユーザはテーブル上にてその映像を観察できる。

(2) オブジェクトへの映像投影

図 2(b) に示すように、プロジェクタ B の映像はテーブル面を透過して実オブジェクトに直接到達し、拡散する。

(3) テーブル上の撮影

Lumisty は図 3 のように垂直方向の入射光を透過するという特性を持つため、図 2(c) のようにシステム内部に鉛直上向きにカメラを設置することで、テーブル上の様子を撮影できる。

筆者らは、この設計に基づきプロトタイプシステムを実装した (図 4)。図 5 にテーブル面と卓上のオブジェクトの映像を投影した試行結果を示す。

この際、テーブル面のスクリーンサイズは 50cm×50cm とし、テーブルスクリーンへの映像投影用に輝度 1300ANSI ルーメンのプロジェクタ (PLUS 製 V-339)、オブジェクトへの映像投影用に輝度 2000ANSI ルーメンのプロジェクタ (PLUS 製 U4-237) をそれぞれ使用した。

また、図 6 にスクリーン面にフレネルレンズを設置した場合と設置しない場合でのテーブル面の投影映像を示す。このように、Lumisty をテーブル面のスクリーンとして用いる場合には、フレネルレンズの利用により、テーブル面の映像の輝度ムラが改善される。

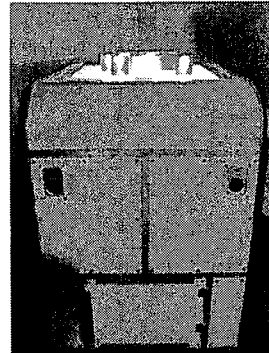


図 4: プロトタイプシステム概観

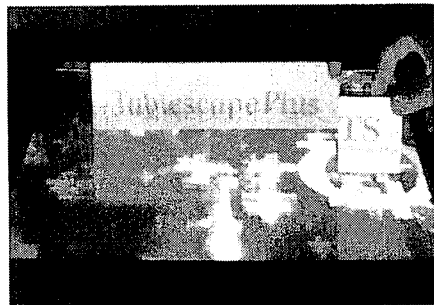
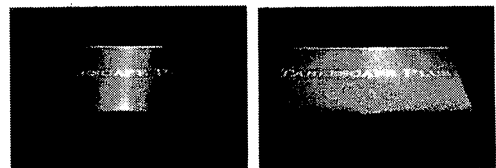


図 5: 映像を投影した様子



(a) フレネル無し (b) フレネル有り

図 6: フレネルレンズの有無による
テーブル面の映像投影結果の違い

3.3 インタラクティブな情報提示

図 8 は、Tablescope Plus において使用する卓上オブジェクトの基本構造である。オブジェクトは映像投影用の垂直スクリーン面と、マーカを貼付できる底面から構成される。この際、プロジェクタ光を拡散するものであれば、オブジェクトの素材は問わない。

本システムでは、プロジェクタの影響を受けることなく、カメラ画像中よりマーカを検出するために、可視光カットフィルタを装着した赤外カメラと赤外線投影器を用いる。これにより、可視光領域での変化に依らず、赤外領域での安定した観察が可能になる。さら

に、投光器から照射された赤外線を効率的にカメラの方に集光するために、マーカの素材には再帰性反射材を用いる。これによりカメラ画像中において、マーカ部は他の部分に比べて明るく映り、検出が容易になる。

マーカの認識には、ARToolKit ライブラリ[12]を用いる。これによりテーブル上のオブジェクトに貼付されたマーカの ID、重心位置、向きをリアルタイムに検出する。

実オブジェクトの配置された位置に応じて、リアルタイムに映像を投影するためには、投影映像の位置合わせが必要になる。筆者らが文献[3]で報告したように、Tablespace Plus では、カメラ・プロジェクタ座標間の対応を示す座標変換行列を事前に導く。カメラ座標系で得られたマーカ情報を、これらの行列を用いてそれぞれのプロジェクタ座標系に変換することで、オブジェクトの位置・向きに合わせた映像投影が可能となる。

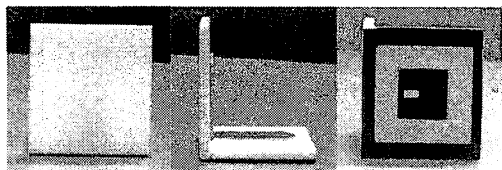


図 7: オブジェクトの基本構造

4. マーカ認識のための複数カメラを用いた光学系

3.3 で述べたマーカ認識を用いたインタラクションにおいて、単体のカメラのみを用いた場合には安定したマーカ検出ができない場合がある。本章では、この問題を解消するためのカメラ光学系の提案および実装を行う。

4.1 反射光の影響と複数カメラを用いる光学系

テーブル内部に設置した赤外線投光器でテーブルスクリーンに向けて照射した光の一部は、テーブル面のフレネルレンズやアクリル板の表面において反射し、透過することなくテーブル内部に戻ってくる。図 8 はテーブルスクリーン上にオブジェクトを置いていない状態でのカメラ入力の様子を示す。白く光る部分が赤外線投光器の光が反射する領域である。この領域に対応する位置にオブジェクトが置かれた場合、マーカが反射光に遮蔽されカメラで認識することができない。すなわち、単体のカメラではオブジェクトの認識可能範囲が制限され、スクリーン全体を用いたインタラク

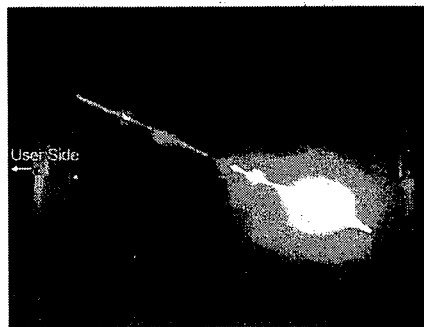


図 8: カメラ入力画像と反射光

ションの実現は難しい。

この問題を解消するために、テーブル内部に複数のカメラを設置し、両方の入力画像を参照することで、オブジェクト認識を行う手法を提案する。カメラ画像中における赤外光の反射範囲は、テーブル中のカメラと赤外線投光器の位置関係により決定される。複数のカメラをテーブル下部にて位置をずらして設置することで、テーブル面におけるそれぞれの反射領域の重なりを小さくし、情報を補いながらスクリーン全体を観察する。

今回、筆者らの実装したプロトタイプでは、図 9 のように、テーブル下部に 2 つのカメラを約 10cm の間隔で離して設置し、その間に赤外投光 LED をテーブルスクリーン全体が照射される向きに配置した。この配置におけるそれぞれのカメラ入力画像を図 10 に示す。この配置では、それぞれのカメラ画像中で反射光の位置が異なるために、図 10 のように、カメラ A では反射光で遮蔽されたマーカを他方のカメラ B で観察できる場合がある。同様に、カメラ B からは遮蔽されたマーカをカメラ A で観察することもできる。

なお、2 台のカメラ入力のソフトウェアにおける処理は、それぞれのカメラ座標系において ARToolKit ライブラリによって得られたマーカ座標情報を、共通するプロジェクタ座標系に変換し、比較・統合して扱う。

4.2 認識実験

上述のように、複数台のカメラで観察することで、オブジェクトを認識可能な範囲は広がる。本節では、今回の実装システムにおける認識範囲を調べる。

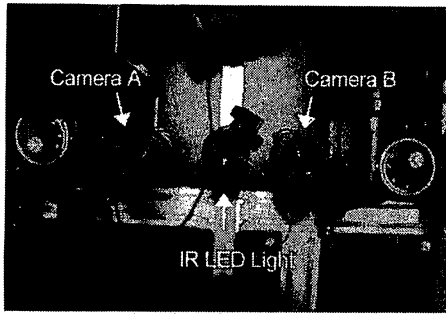
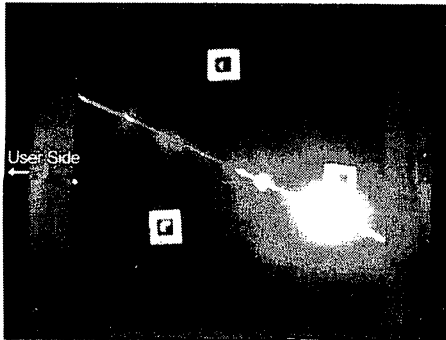
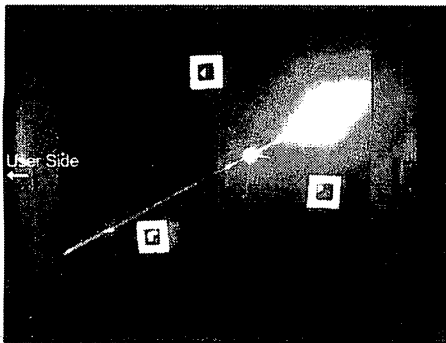


図 9: カメラと赤外線投光器の配置



(a) Camera A の画像



(b) Camera B の画像

図 10: 2 台のカメラ入力画像

図 9 のような配置で構成される 2 台のカメラ光学系のもとで、テーブルスクリーン上の各点に図 7 に示す形状のマーカを配置し、ARToolKit ライブラリでの認識の可否を調べた。この際、マーカの大きさは 5cm 角とし、マーカの配置位置はスクリーン上の縦横 5cm 間隔、計 100 点とした。

スクリーン上の各点におけるそれぞれのカメラでのマーカ認識の結果を図 11 に示す。それぞれのカメラ

はマーカを認識できない範囲(カメラ A: 14 点, カメラ B: 12 点)を有するが、両方のカメラで取得された情報を統合すると、100 点全てにおいてマーカを認識することができた。これは本手法の導入が、テーブルスクリーン上全体を用いたインタラクションを可能にすることを示す。

一方で、より大きなマーカを用いた場合など、マーカ部分が両方の反射領域に重なる際には、2 台のカメラを用いても認識に失敗することがある。このような場合における認識は、より高度な画像処理手法の導入など今後の課題である。

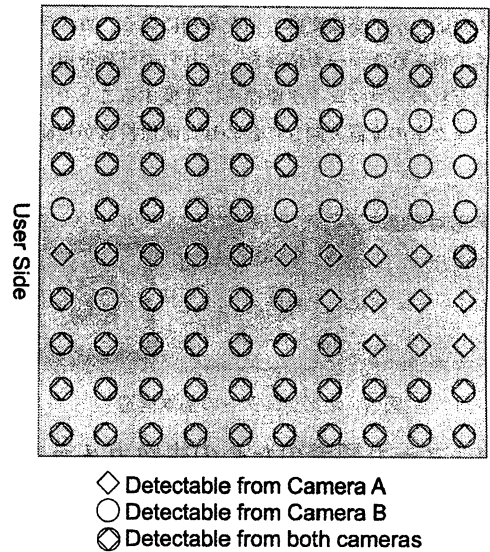


図 11: 認識結果

3.4 インタラクティブアプリケーション例

上記のようにテーブル全面でオブジェクトの認識が可能になると、多様なインタラクションが実現できる。筆者らは、本システムの応用の可能性を示すために、テーブル面とオブジェクト面の役割や連携をデザインし、いくつかのインタラクティブなアプリケーションを実装した。

図 12 に示すデジタルキオスクアプリケーションでは、テーブル上の実オブジェクトを、テーブル面に提示された映像の付加的情報を表示するディスプレイとして用いる。テーブル上に表示される地図上にオブジェクトを載せると、その場所の付加的情報がオブジェクト面に現れる。

テーブルシアターアプリケーション（図 13）は、テーブル上をミニチュアの劇場に仕立て、実オブジェクトを“動きを持った人形”として用いる。オブジェクト面には、その位置・動きに合わせてキャラクター、テーブル面にはそれに対応した影が投影され、ベンチに座る、互いに挨拶するなど、オブジェクトの位置関係による多様なインタラクションが用意されている。

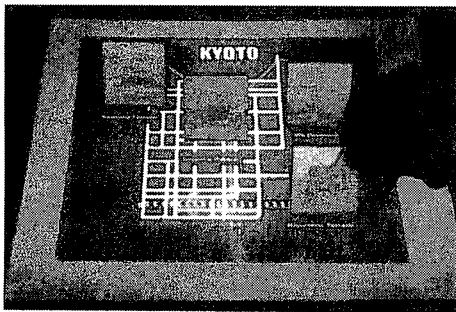


図 12: Digital Kiosk

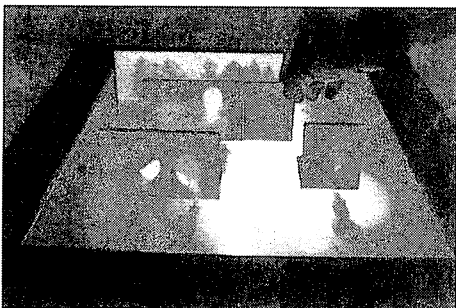


図 13: Tabletop Theater

5. まとめと今後の課題

本稿では、テーブル面に加え、その上に配置された実オブジェクトにインタラクティブに情報を提示できるテーブル型ディスプレイ Tablescape Plus に関して報告した。また、フレネルレンズを搭載したテーブル内蔵型 ProCam システムにおいて、複数カメラを用いることで安定したマーカ認識を可能にした。

Tablescape Plus に関する今後の課題としては、まず提示映像の品質改善が挙げられる。特に、オブジェクト配置位置における投影解像度・輝度の変化やテーブル面とオブジェクト面の輝度差に関して、ハードウェアの改善やソフトウェアによる補正を施すことを考えている。また、使用するオブジェクトの形状・大きさに関しても、光学的な焦点深度の問題とともに、奥

行き方向に並べられるオブジェクト数なども考慮しながら、コンテンツに応じて最適なものを検討する。

さらに、可視化ツールや遠隔支援への応用など、テーブル面および実オブジェクト面の両方のスクリーンを効果的に用いたさらなる情報提示アプリケーションの提案を予定している。

謝辞 本研究を進めるにあたり、有用なご助言をいただいた東京大学 原島 博教授、飯田 誠講師、NTT コミュニケーション科学基礎研究所 松田昌史氏に感謝いたします。

関連研究

- [1] Y. Kakehi, M. Iida, T. Naemura, Y. Shirai, M. Matsushita, and T. Ohguro: "Lumisight Table: Interactive View-Dependent Tabletop Display," *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol. 25, no.1, pp. 48-53, 2005.
- [2] Y. Kakehi and T. Naemura: "through the looking glass -You can play against your own reflection-," *ACM Intern. Conf. Advances in Computer Entertainment Technology (ACE2005)*, pp. 373-374, 2005.
- [3] 寛康明, 飯田誠, 苗村健, 松下光範: "Tablescape Plus: インタラクティブな卓上映像シアター", *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol. 11, No. 3, pp. 377-386, 2006.
- [4] P. Wellner: "The DigitalDesk calculator: Tangible manipulation on a desktop display," *In Proceedings of UIST'91*, pp. 27-34, 1991.
- [5] I. Sio: "InfoBinder: A Pointing Device for Virtual Desktop System," *Proceedings of HCI International'95*, pp.261-264, 1995.
- [6] B. Ullmer and H. Ishii: "The metaDESK: Models and Prototypes for Tangible User Interfaces," *In Symposium on User Interface Software and Technology (UIST'97)*, pp. 223-232, 1997.
- [7] Streitz, N. A. et al.: "i-LAND: An Interactive Landscape for Creativity and Innovation," *Proceedings of Proceedings of the ACM SIGCHI Conference on Human Factors in*

- Computing Systems (CHI'99), pp. 120-127, 1999.
- [8] K. Oka, Y. Sato, and H. Koike: "Real-time tracking of multiple fingertips and gesture recognition for augmented desk interface systems," Proc. 2002 IEEE Int'l Conf. Automatic Face and Gesture Recognition (FG 2002), pp. 429-434, 2002.
- [9] B. Piper, C. Ratti and H. Ishii: "Illuminating Clay: A 3-D Tangible Interface for Landscape Analysis," Proceedings of the ACM SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI'02), pp.355-362, 2002.
- [10] J. Patten, H. Ishii, J. Hines and G. Pangaro: "Sensetable: A Wireless Object Tracking Platform for Tangible User Interfaces," Proceedings of the ACM SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI'01), pp. 253-260, 2001.
- [11] J. Rekimoto, B. Ullmer and H. Oba: "DataTiles: A Modular Platform for Mixed Physical and Graphical Interactions," Proceedings of Proceedings of the ACM SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI'01), pp.269-276, 2001.
- [12] H. Kato, M. Billinghurst: "Marker Tracking and HMD Calibration for a video-based Augmented Reality Conferencing System," In Proceedings of the 2nd International Workshop on Augmented Reality, pp. 85-94, 1999.
- [13] 曆本純一: "2次元マトリックスコードを利用した拡張現実感の構成手法," 日本ソフトウェア科学会 WISS'96 論文集, pp.199-210, 1996.
- [14] R. Raskar, G. Welch, K. Low and D. Bandyopadhyay: "Shader Lamps: Animating Real Objects with Image-Based Illumination," Eurographics Workshop on Rendering (EGWR 2001), pp. 89-102, 2001.
- [15] J. Rekimoto and N. Matsushita, "Perceptual Surfaces: Towards a Human and Object Sensitive Interactive Display," Workshop on Perceptual User Interfaces (PUI'97), 1997.
- [16] 川村和充: "視界制御フィルム「ルミステイ」", 新素材, 1993.