

BOWL プロカムによる手前と奥の投影面を用いた インタラクションの実現にむけて

蔵田武志¹² 酒田信親¹² 興梶正克¹ 大隈隆史¹ 大田友一²

¹ 産業技術総合研究所 情報技術研究部門 ² 筑波大学

E-mail : kurata@ieee.org

あらまし 本稿では、頭部を拘束しない新しい装着型インタフェース、BOWL ProCam (BOdy-Worn Laser Projector Camera) を提案する。実世界と仮想世界をシームレスに融合させたインタラクション技法を、いつでもどこでもユーザに提供するために、BOWL ProCam は、焦点深度の深いレーザプロジェクタ、広範囲な状況把握を可能にする高精細魚眼カメラ、及び投影像の安定化などに有効な姿勢角センサなどを備える。本稿ではまず、ProCam システムの装着部位評価のためのシミュレーション実験とその結果について示す。実物体操作を伴う作業の支援に適した ProCam システムという観点で評価を実施し、その装着部位として胸部が選ばれた。次に、机や壁などの投影面に呈示されたコンテンツを、ユーザの手に代表される手前の投影面で遮り、すくい取るように選択することを可能にするための一実現手法について述べる。ここでは特に、デスクトップ画像とその投影像を撮影した入力画像とを用いたアクティブステレオ法と、ライトバルブ式プロジェクタを用いて開発したコンセプト検証システムによる予備実験結果について報告する。
キーワード ProCam システム, レーザプロジェクタ, ウェアラブルビジュアルインタフェース, 拡張現実インタラクション, 遠隔協調作業支援

Toward the Realization of Interaction Using Nearby and Far Projection Surfaces with the BOWL ProCam

Takeshi Kurata¹² Nobuchika Sakata¹²
Masakatsu Kouroggi¹ Takashi Okuma¹ Yuichi Ohta²

¹Information Technology Research Institute,
National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST),

²University of Tsukuba

Abstract In this paper, we propose a novel wearable interface, which we call BOWL ProCam (BOdy-Worn Laser Projector Camera). The BOWL ProCam is composed of a laser projector that has the wide focal depth, a high-definition fish-eye camera for enabling wide-range situation understanding, and attitude sensors for projection stabilization so as to couple virtual worlds with the real world seamlessly. We first show an evaluation result on the positioning around the human body in the context of real-world task support by means of MATLAB simulation. Next, we propose an interaction technique effectively employing both a nearby projection surface represented by the user's hand and a far projection surface such as a desktop and wall. In addition, we introduce an implementation with a proof-of-concept system with a conventional light-bulb projector.

Keywords ProCam, Laser Projector, Wearable Visual Interface, AR Interaction, Remote CSCW

1 はじめに

熟練労働者不足や安全管理の観点から作業支援インタフェースの必要性がこれまでも増して高まっている。移動と作業を伴う業務の従事者を支

援するための有望なインタフェースの一つに、視覚センサや視覚ディスプレイを用いて実世界や仮想世界、または遠隔地の人との直感的で円滑な対話を実現するウェアラブルビジュアルインタフェースが挙げられる [1][16][27]。中でも視覚情報を実物

体上に直接投影するインタフェースが近年数多く提案されている [5][8][9][12][13][20][23].

筆者らは以前、カメラとレーザーポインタを一体化したヘッド部を小型のパン・チルトアクチュエータ上に搭載した着用型入出力インタフェースである WACL (Wearable Active Camera with Laser-pointer [25]) を提案し、HMD (Head Mounted Display) と HMC (Head Mounted Camera) からなるヘッドセットとの比較のためのユーザーテストを実施した [19][24]. 実作業環境における協調作業では、作業は主に“対象物・場所の特定”, “手順の説明”, “理解の確認” の3段階に分類される [7]. WACL インタフェースは、作業者に優れた印象を与える一方で、レーザーポインタの表現能力の低さから“手順の説明”が複雑な場面においては作業時間を増加させることが、そのユーザスタディにより判明した. また、別の WACL ユーザに付加的なディスプレイ装置を装着することで、この問題が軽減されるという結果が別のユーザーテストにより得られている [26] が、視線を作業場所からしばしば外す必要があるため抜本的な解決策とは言えない.

2 BOWL ProCam

本稿において筆者らは、上記の WACL に関するユーザーテストの結果に基づいた新しい装着型入出力インタフェースである BOWL ProCam (BOdy-Worn Laser Projector Camera)¹ を提案する. その完成イメージ図と開発中の試作機を図1に示す. BOWL ProCam は、レーザープロジェクタ、高精細広角カメラ、慣性センサから構成され、いくつもの優れた特徴を備える.

まず、高精細広角カメラを用いることにより、作業者の動きに関わらず作業空間を把握しやすいという WACL の特徴を維持している. これにより、同一対象を継続的に観測・把握可能であり、投影像のスタビライズや作業履歴記録なども容易になる. アクティブカメラと比較し、高精細化や広角化に伴うモーションブラーや露光の難しさなどの問題 [15][21] があるが、アクチュエータが不要であるという利点は大きい.

レーザープロジェクタの特徴は、高度な視覚情報を実世界に直接投影可能であるだけでなく、焦点深度が深い、小型化が容易、消費電力が低いなどがあげられる. さらに、本研究のレーザープロジェクタでは、ステンレス製のミラー、駆動部、及びその駆動部上にエアロゾルデポジション (AD) 法により形成される圧電素子からなる小型スキャニングミラー [4] を採用しており、一般的な MEMS スキャナと比較し、高速走査、高画角化、低コスト化の実

¹なお、“BOWL(ボウル)”はその完成イメージが御碗型であることにも由来している.

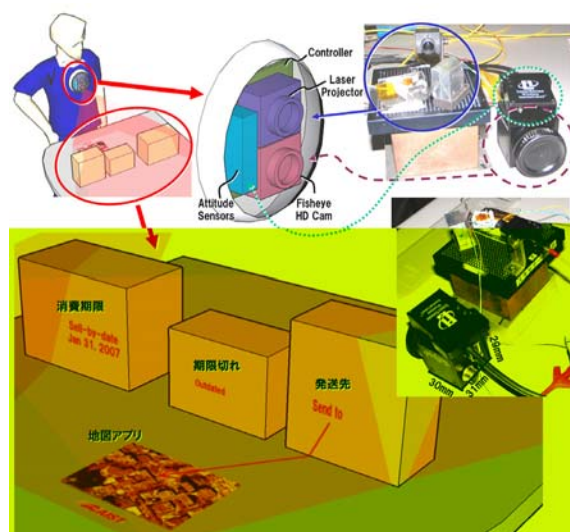


図 1: BOWL ProCam のイメージ図 (左) と試作中のデバイス (右).

現が容易である.

さらに、ProCam システムとしては、アクティブステレオ技術 [10] や Shape-from-Motion 技術 [17] の組み合わせにより実世界の 3次元構造獲得も可能となるため、システムがユーザや実環境をより把握した状態での直感的なインタラクション技法を提供することができる. 以下、次節では BOWL ProCam の装着位置について評価し、4 節では、ユーザの手と壁面を用いたインタラクション技法およびその実現手法について紹介する. さらに 5 節では、本システムの実装および手前側投影面の検出に関する予備実験結果を示す.

3 装着位置の評価

カメラの装着位置は、装着者視点からの映像を得るため、装着者周囲 (前方、後方、全体) の状況を捉えるため、手指の動作や歩行動作を捉えるため、日常無理なく装着できるようにするためなど、様々な理由により設定されている [15][21]. これらは経験的、もしくは実験の見地により決められたものが多いが、より客観的にカメラの装着位置を評価するために、Mayol らは 1800 ポリゴンからなる人間の多関節モデル [2] を用いたシミュレータを開発した [22].

本研究では、実物体操作を伴う作業の支援のための ProCam システムという観点で Mayol らのシミュレータを改良し、BOWL ProCam の装着位置の評価を実施した. 評価項目として、視界の広さ (field of view), 作業領域の見易さ (handling space), 動作中における安定性 (stability) をあげ、下記のように

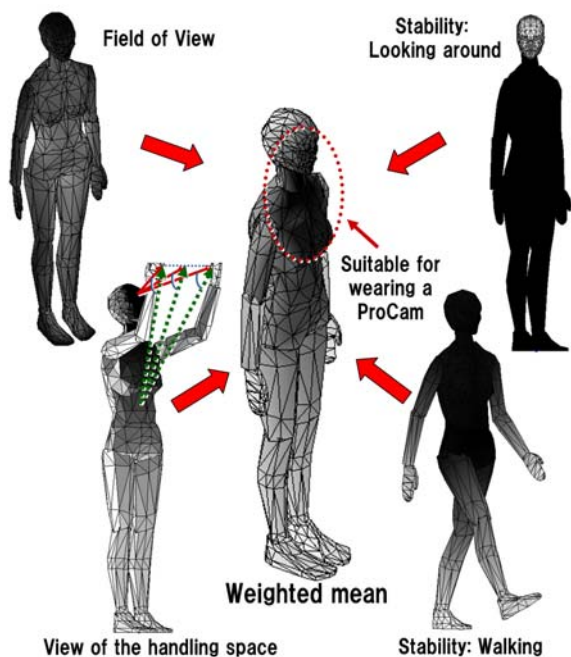


図 2: シミュレーションによる ProCam システムの装着位置の評価結果. 暗い方が評価が高い.

にそれらの加重平均 E を総合的な評価結果とした.

$$E = w_{fov} \bar{E}_{fov} + w_{hs} \bar{E}_{hs} + w_{stb} \left(\frac{\bar{E}_{walk} + \bar{E}_{look}}{2} \right)$$

ここで, w_{fov} , w_{hs} , w_{stb} は各評価項目の重みである. 本稿では, 作業領域の見易さ, 安定性を重視し, $w_{fov} = 0.1$, $w_{hs} = 0.5$, $w_{stb} = 0.4$ とした.

視界の広さ \bar{E}_{fov} は, 理想的な全方向カメラを体の各部位に装着した場合の自己隠蔽 (self-occlusion) の割合の小ささにより評価した (図 2 左上). 作業領域の見易さの評価では, 両腕を図 2 左下のような状態にして上下させた時に, 両手先を結ぶ直線が通る領域を典型的な作業領域として設定した. その領域中の各サンプル点をユーザ視点で見た場合の視線方向を示す単位ベクトルと, 体の部位から見た (投影した) 場合の視線方向 (投影方向) を示す単位ベクトルとの内積の大きさを評価値 \bar{E}_{hs} とした. 動作中の安定性については, 歩行動作 (図 2 右下) と首を回転させての見回し動作 (図 2 右上) における各部位の変位量の少なさにより評価した (\bar{E}_{walk} , \bar{E}_{look}).

図 2 中央に示すように, 本シミュレーションによる評価では, 上半身の前側上部がもっとも ProCam システムの装着位置として適しているという結果が得られた. 評価項目やその重みの設定により多少結果が変動する場合も考えられるが, 本研究では, この評価結果に沿って BOWL ProCam を設計している.

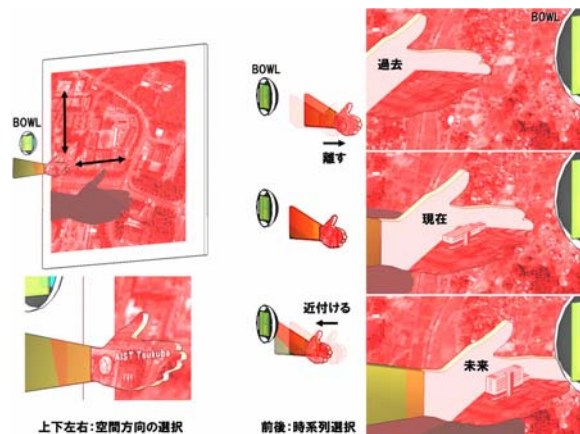


図 3: 本稿で提案する手前と奥の投影面を用いたインタラクション技法の典型例の概略.

4 手前と奥の投影面を用いたインタラクション

焦点深度が深く画角が広いというレーザプロジェクタの特徴を活かしたインタラクション技法として, 図 3,4 に示すように, ユーザの手に代表される手前の投影面, 及び机や壁などの奥の投影面の双方を効果的に利用したものが考えられる. これらの例では, 手を上下左右に動かして壁面に表示されている投影像を遮りすくい取るような感覚でコンテンツを選択し, 前後に動かすことで, 選択部分のさらなる情報を引き出して閲覧している.

一般に, 液晶や DMD などを用いた従来型のライトバルブ式プロジェクタではその光学的特性から, 手前の投影面 (手) と奥の投影面 (壁面) のそれぞれに視覚情報を結像させることは困難である. レーザプロジェクタを用いることで, その問題は軽減されるため, 本インタラクション技法は BOWL ProCam に適したものであるといえる. ただし, どのプロジェクタを用いたとしても, どこに手前の投影面があり, どこに奥の投影面があるかを把握できなければ, 図 3,4 のようにコンテンツを選択したり手の上の視覚情報のみを変化させることはできない. そのため, 投影面の検出手法が重要な役割を果たす.

4.1 関連研究: 掌インタフェース

掌に視覚情報を投影するインタラクション技法を採用したインタフェースとして, 例えば, 天井に固定設置された ProCam システムによって, 通路の床と掌に視覚情報を呈示する石井らの研究例がある [11]. この例では, 雨による波紋が床面に表現

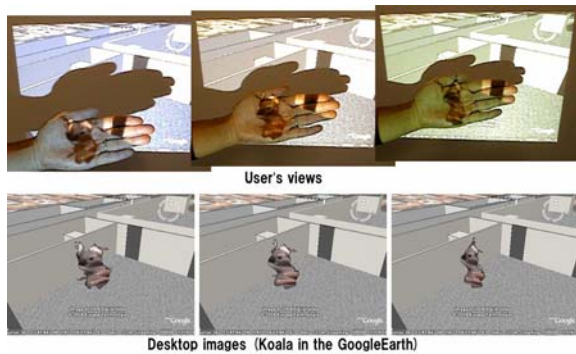


図 4: 手前と奥の投影面を用いたインタラクションの実例. 掌にコアラの CG を載せ, 前後に動かすことで CG を回転させている様子.

され, 通行人に手を差し伸べることを促している. 実際に手を差し伸べると掌にその通路付近の広告などが降り注いでくる. この例の場合, 投影距離をある程度長く設定できるため, 従来型のライトバルブ式プロジェクタでも, 焦点深度を深くすることができる.

装着型 ProCam システムにおいて掌を投影面として用いた例として, 山本・佐藤の研究例 [29] がある. この例では, 赤外線を投光して得られた反射光を赤外線カメラで観測して手領域の切り出し, 得られた手領域に対してリモコンの操作パネルなどを呈示している. ユーザの手のみを投影対象としているため, 焦点深度の問題は回避することができる. なお, どちらの研究例も積極的に投影像自体を画像処理のための観測対象としては用いていない.

4.2 手前側投影面の検出と投影コンテンツの選択

手前と奥の投影面を用いた BOWL ProCam 特有のインタラクション技法の実現に向け, 本稿では特に, 投影されるデスクトップ画像とその投影像を撮影した入力画像とを用いたアクティブステレオ法に基づく手前の面の検出処理について報告する. なお, 現時点ではレーザプロジェクタの開発が完了していないため, DMD プロジェクタを用いてコンセプト検証システム (図 5) を構築した. 手法の検討に際しては, プロジェクタと掌の距離を約 35-55cm 程度, 奥側投影面との距離を約 65cm とし, なるべくどちらの投影像にも焦点が合うようにした. また, 今回, 奥側投影面としては平面を仮定した.

本稿で述べる手前の面の検出処理の流れを以下

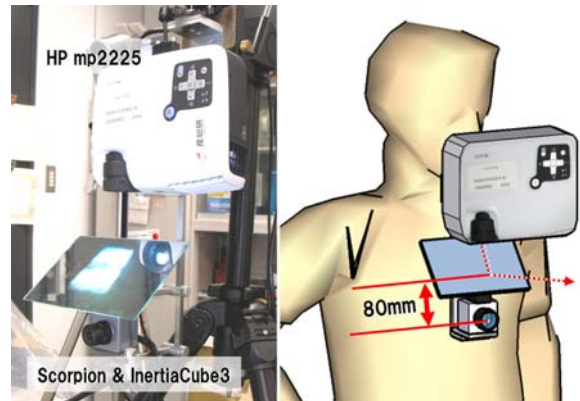


図 5: ライトバルブ式プロジェクタ (DMD) を用いたコンセプト検証システム. 魚眼レンズを装着した Point Gray Research 社 Scorpion, HP 社 mp2225, InterSense 社 InertiaCube3 により構成されている.

に示す.

- Step 1 魚眼カメラからの入力画像を透視射影像に変換 (図 7)
- Step 2 投影像の撮影領域のみを平行化 (rectification, 図 8 左下)
- Step 3 デスクトップ画像中の特徴点の抽出 (図 8 右上)
- Step 4 正規化相互相関によるステレオマッチング (図 8 右下)
- Step 5 手前の面の奥行き推定 (図 8 右下)

4.2.1 画像変換

図 6 に等距離射影 (equidistance projection) 方式の魚眼カメラの撮像系とプロジェクタの投影系との関係を示す. まず, 魚眼画像から透視射影画像への変換を行う. 画像中心から画素 x_c までの距離 l は像高と呼ばれ, 等距離射影方式では $l = f_w \theta$, 透視射影では $l = f_w \tan(\theta)$ となる. 変換結果の一例を図 7 に示す. なお今回は, 魚眼画像の外周に対する円フィッティングによる簡易なパラメトリック補正のみを行ったため, 十分に補正ができているとは言えない.

次に, 投影像の撮影された領域のみの平行化 (rectification) 画像を, アスペクト比, 解像度, 原点がデスクトップ画像 (図 8 左上) に合うようにして生成する. 図 8 左下は, 図 7 右の中央付近に撮像されている投影像を平行化した結果である.

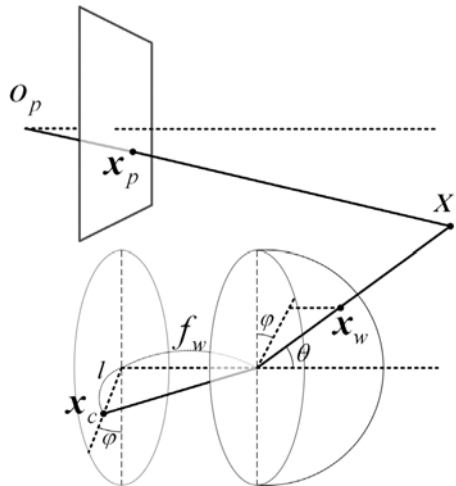


図 6: BOWL ProCam の撮像系と投影系.



図 7: 魚眼カメラからの入力画像（左）と透視射影変換した結果（右）.

4.2.2 投影像を用いたステレオマッチング

前段で得られた平行化画像とデスクトップ画像を用いてステレオマッチングを行う。平行化画像は、デスクトップ画像と投影面のテクスチャ（手相など）とを合成したような特徴を持ち、さらに投影面の反射特性や法線方向などによる影響も受けている。そこで本手法ではまず、2次元的に十分な特徴を持つ点のみをデスクトップ画像から抽出する。ここでは Harris オペレータを用いて特徴点を検出する。図 8 右上は、デスクトップ画像（図 8 左上）から得られた特徴点を示したものである。

選ばれた特徴点は、正規化相互相関を用いたステレオマッチングにより対応付けを行う。厳密には、特徴点に含まれる輝度勾配と逆位相のテクスチャが投影面上に偶然存在すると、この方法では探索に失敗する。本手法では、デスクトップ画像には通常多くの特徴点が含まれていること、また、投影像を打ち消すほどのテクスチャを多く含む投影像はこのインタラクション技法には向かないため使われないことを仮定しており、その仮定の範囲内であれば正常に機能することが期待される。

図 8 右下はステレオマッチングの結果の一例であり、対応付けにより得られた視差を黒線及び灰色の線で示している。黒色は手の存在する距離に

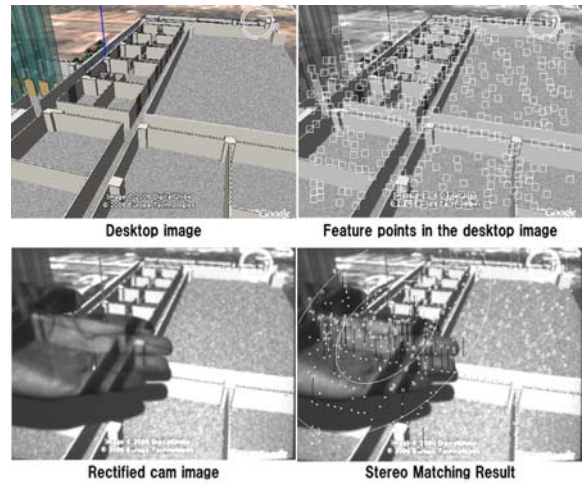


図 8: 投影像撮像部分の平行化と特徴点の対応付け.

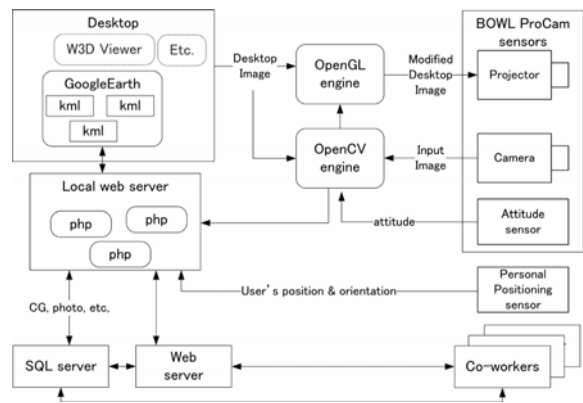


図 9: BOWL ProCam とその周辺を含んだシステム構成図.

対応する視差を、灰色はそれ以外の視差を表現している。奥側投影面上の特徴点の視差はほぼ 0 画素となっていることもこの図からわかる。楕円は手の距離と一致する視差を持つ特徴点の平行化画像中での座標値の分散を示し、中心が平均値、内側の楕円が 0.5σ 、外側が 1σ となっている。このように、手前側投影面と奥側投影面上の特徴点が視差（距離）により分離できるとともに、手前側投影面の存在範囲も得ることができる。

5 実装及び実験結果

まず本システム全体について概説する。図 9 は、BOWL ProCam（コンセプト検証システム）とその周辺を含んだシステム構成図である。特徴としてはまず、スクリーンダンプにより得られたデスクトップ画像を OpenGL でテクスチャとしてポリ

ゴンに貼り付けてプロジェクタで投影している。これにより、さまざまな幾何補正をしながら任意のアプリを投影できるという利点を持つ。また、本研究の主な目的が遠隔協調作業支援であるため、ウェブサービスベースのネットワークシステムと接続されており、コンテンツ共有や作業者同士の通信も想定したものとなっている。

本実験では、作業者が主に地図アプリ（Google Earth を使用 [3]）上で下記の4通りのシナリオに沿ったインタラクションを実施した。

- (a) 共同作業者のうちの一人のアイコンを選び通話をはじめめる例。
- (b) 3階フロアを取り除き1階フロアを確認する虫眼鏡メタファを用いた例。
- (c) SQL に蓄積された位置情報つき写真を選び、拡大された写真内の文字領域候補をさらに選んでOCRに入力する例 [18].
- (d) 位置情報付きで SQL に蓄積されている他のユーザのウェアラブルシステムにより獲得されたCGモデル [17] を選び回転させて閲覧する例。

図 10 にシナリオ (a)-(c)、図 4 上にシナリオ (d) におけるユーザ視点映像を示す。

デスクトップ画像および平行化画像はともに 512×384 画素の解像度とした。Harris オペレータのブロックサイズは 13×13 画素、正規化相関のブロックサイズは 19×19 画素であった。また、平行化画像も厳密には平行化できていないため、ステレオマッチングの走査線には左右1画素ずつの幅を持たせた。一般的なオフィス環境で実験を行い、天井の蛍光灯及び付近のデスクライトが環境光として存在した。

まず、手前側投影面の検出についてであるが、4シナリオ中において、手を含む10画像と手を含まない4画像による実験の結果、手（手前側投影面）の誤検出、未検出とも見られなかった。次に、手が検出された10画像に対して、投影コンテンツの選択についての誤差評価を実施した。ここでは、検出された手の重心の座標とユーザが選択したかったコンテンツの中心座標との距離を画像の対角線の距離で割ったものを誤差とした。その結果、平均6.6%、標準偏差3.7%の誤差であった（図 11）。

さらに、図 12 に示すように、手前側投影面の奥行きが異なる場合についても、正しく投影面を検出できることが確認できた。



図 10: 3通りのシナリオにおけるユーザ視点映像。上から (a)(b)(c) の順。

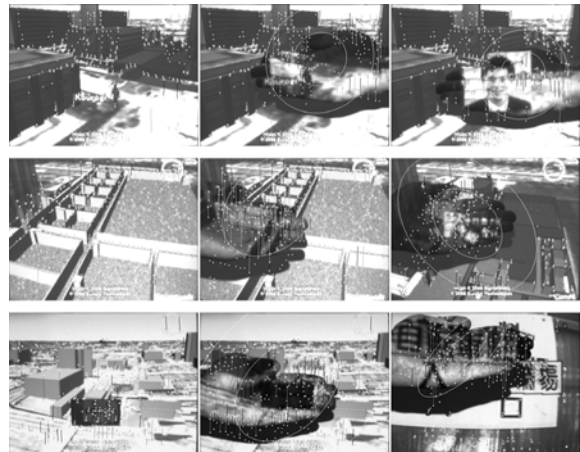


図 11: 3通りのシナリオにおける手前側投影面の検出結果。上から (a)(b)(c) の順。

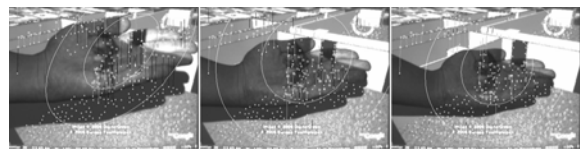


図 12: シナリオ (d) において奥行きを変化させたときの検出結果。中央が基準となる奥行き。左はそれよりも前に、右はより奥に手を動かしたときの様子。

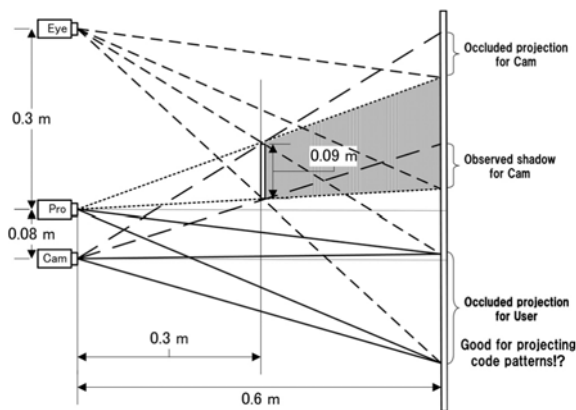


図 13: ユーザにとっての投影像の隠れ領域。

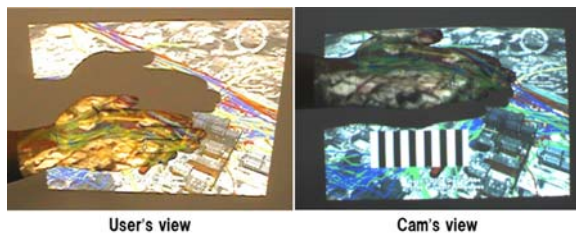


図 14: 隠れ領域にパターン光を呈示した例。

5.1 考察：投影像の隠れと影

ユーザからは観測できないが、カメラからは観測できる領域が投影像中に存在する。図 13 はその一例を模式的に示したものである。そのような領域に、例えば、図 14 右のようにパターン光を投影しても、ユーザからは観測することはできない（図 14 右）ため、ユーザが気づかない間にキャリブレーションや 3 次元形状取得などを実行することができる。また、奥側投影面上に存在する手前側投影面のキャストシャドウ [14] も両投影面の関係を知る上で重要な情報源であり、今後の検討が必要である。

6 おわりに

本稿では、頭部を拘束しない新しいウェアラブル AR インタフェース、BOWL ProCam (BODY-Worn Laser Projector Camera) を提案した。その装着位置の評価をシミュレーションにより実施し、胸部が適していることがわかった。また、手前と奥の投影面を用いた BOWL ProCam に適したインタラクション技法を提案すると共に、ライトバルブ式プロジェクタを用いたコンセプト実証システムを用いて正規化相関によりある程度ロバストにデスクトップ画像と入力画像の特徴点のマッチングが実現できることを確認した。さらに、Google

Earth などの汎用的なアプリの操作や他の作業との通信が可能なネットワークシステムを構築した。

今後は、より動的な環境、つまり、奥側投影面が急激に変化したり平面ではない場合などについての検討が必要であるが、そのほかにも、グレーコード化パターンを用いた魚眼画像の補正手法 [28] の導入や、全体の処理の高速化なども課題としてあげられる。また、投影面に対しての適応的な映像の補正 [6] についても検討していきたい。最終的には、レーザープロジェクタを搭載した試作システムを完成させ、本稿で提案した新しいインタラクション技法に関するユーザスタディを実施する計画である。

謝辞 レーザープロジェクタは、産総研先進製造プロセス研究部門明渡氏らのグループで開発中のものである。また、装着部位のシミュレーションは Bristol 大 Walterio Mayol 氏の協力を得た。ここに、深く感謝の意を表します。

参考文献

- [1] *AR Interaction*, <http://itri.aist.go.jp/rwig/ari/>.
- [2] *Nancy h-anim humanoid under Matlab*, http://www.robots.ox.ac.uk/~wmayol/3D/nancy_matlab.html.
- [3] 産総研一般公開”歩行者ナビを体験しよう”, <http://www.rwig-ari.org/aist-openhouse2006/>.
- [4] J. AKEDO, M. LEBEDEV, H. SATO, and J. PARK. High-speed optical microscanner driven with resonance of lam waves using $Pb(Zr,Ti)O_3$ thick films formed by aerosol deposition. *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol. 44, No. 9B, pp. 7072–7077, 2005.
- [5] 安藤英由樹, 雨宮智浩, 前田太郎. AR における注釈表示のためのウェアラブル・スキャニング・レーザー・プロジェクター. 日本 VR 学会論文誌, Vol. 10, No. 2, pp. 191–200, 2005.
- [6] M. Ashdown, T. Okabe, I. Sato, and Y. Sato. Robust content-dependent photometric projector compensation. In *Proc. IEEE Int. Workshop on Projector-Camera Systems (ProCams)*, 2006.
- [7] S. R. Fussell, L. D. Setlock, E. M. Parker, and J. Yang. Assessing the value of a cursor pointing device for remote collaboration on physical tasks. In *Proc. CHI 2003*, pp. 788–789, 2003.
- [8] H. Hua, A. Girardot, C. Gao, and J. Rolland. Engineering of head-mounted projective displays. *Applied Optics*, Vol. 39, No. 22, pp. 3814–3824, 2000.
- [9] M. Inami, N. Kawakami, D. Sekiguchi, Y. Yanagida, T. Maeda, and S. Tachi. Visuo-haptic display using head-mounted projector. In *Proc. IEEE VR 2000*, pp. 233–240.
- [10] 井口征士, 佐藤宏介. 三次元画像計測. 昭晃堂, 1990.

- [11] 石井陽子, 小林稔, 中山彰, 細田真道. 情報との出会いを演出する手の平表示インタフェース. 信学技報, MVE-2005-42, 2005.
- [12] T. Karitsuka and K. Sato. A wearable mixed reality with an on-board projector. In *Proc. ISMAR 2003*, pp. 321–322.
- [13] R. Kijima, K. Haza, Y. Tada, and T. Ojika. Distributed display approach using PHMD with infrared camera. In *Proc. IEEE VR*, pp. 33–40, 2002.
- [14] 蔵田武志, 酒田信親, 興梠正克, 大隈隆史, 大田友一. Bowl procam による手前と奥の投影面を用いたインタラクション. 日本バーチャルリアリティ学会第 11 回大会, 1C2-2, 2006.
- [15] 蔵田武志, ウォルテリオマヨール. ウェアラブルビジュアルインタフェースのためのコンピュータビジョン. PRMU2005-144 及び HIP2005-114, pp. 43-50/2006-CVIM0152-7, pp. 45–52, 2006.
- [16] 蔵田武志, 酒田信親, 葛岡英明, 興梠正克, 大隈隆史, 西村拓一. 遠隔協調作業のためのウェアラブル・タンジブルインタフェース. SICE 第 69 回パターン計測部会研究会, pp. 11–18, 2006.
- [17] T. Kurata, J. Fujiki, M. Kouroggi, and K. Sakaue. A fast and robust approach to recovering structure and motion from live video frames. In *Proc. CVPR2000*, Vol. 2, pp. 528–535, 2000.
- [18] T. Kurata, T. Kato, M. Kouroggi, J. Keechul, and K. Endo. A functionally-distributed hand tracking method for wearable visual interfaces and its applications. In *Proc. MVA*, pp. 84–89, 2002.
- [19] T. Kurata, N. Sakata, M. Kouroggi, H. Kuzuoka, and M. Billinghurst. Remote collaboration using a shoulder-worn active camera/laser. In *Proc. ISWC*, pp. 62–69, 2004.
- [20] S. Mann. Telepointer: Hands-free completely self contained wearable visual augmented reality without headwear and without any infrastructure reliance. In *Proc. ISWC*, pp. 177–178, 2000.
- [21] W. Mayol and T. Kurata. Computer vision for wearable visual interface. Tutorial at ISWC, 2005.
- [22] W.W. Mayol, B. Tordoff, and D.W. Murray. Designing a miniature wearable visual robot. In *Proc. ICRA*, pp. 3725–3730, 2002.
- [23] R. Raskar, P. Beardsley, J. van Baar, Y. Wang, P.H. Dietz, J. Lee, D. Leigh, and T. Willwacher. RFIG Lamps: Interacting with a self-describing world via photosensing wireless tags and projectors. *ACM Transactions on Graphics (TOG) SIGGRAPH*, Vol. 23, No. 3, pp. 406–415, 2004.
- [24] 酒田信親, 蔵田武志, 興梠正克, 葛岡英明, マークビリングハースト. 肩載せアクティブカメラ・レーザによる遠隔協調作業. 日本 VR 学会論文誌, Vol. 10, No. 3, pp. 333–341, 2005.
- [25] N. Sakata, T. Kurata, T. Kato, M. Kouroggi, and H. Kuzuoka. WACL: Supporting telecommunications using wearable active camera with laser pointer. In *ISWC 2003*, pp. 53–56, 2003.
- [26] N. Sakata, T. Kurata, and H. Kuzuoka. Visual assist with a laser pointer and wearable display for remote collaboration. In *CollabTech*, pp. 66–71, 2003.
- [27] T. Starner, S. Mann, B. Rhodes, J. Levine, J. Healey, D. Kirsch, W. R. Picard, and A. Pentland. Augmented reality through wearable computing. *Presence*, Vol. 6, No. 4, pp. 386–398, 1997.
- [28] 高辻誠也 † 佐川立昌 † 越後富夫 † 八木康史 †. グレイコードパターンを利用したレンズ歪みの補正手法. 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU), 2005.
- [29] 山本豪志朗, 佐藤宏介. 掌への光投影を利用した身体インタフェース. 平成 17 年度情報処理学会関西支部大会ビジュアルインフォメーション研究会, A-05, 2005.