

光センサを用いたレーザープロジェクタの走査計測に基づく位置・姿勢推定

北嶋 友喜^{*1} 岩井 大輔^{*1} 佐藤 宏介^{*1}

Abstract – 我々は手持ちプロジェクタを用いた実物体に対する情報の重畳表示を目的として、レーザープロジェクタと光センサの受光タイミングに基づく対象の位置姿勢推定を提案する。提案手法を用いることで、小型の装置で、環境計測のためのパターン光の投影になしに投影対象の位置姿勢を推定できると考えられる。本稿では、提案手法の実装と4種類のアプリケーションの試作を行ったことを報告する。

Keywords : Laser projector, Photodiode, Projection mapping, Light pen, Magic lens

1 はじめに

複合現実感において、ユーザが手持ちのプロジェクタを実物体の方向へ向けることで、物体に関連付けられたアノテーション等の情報を閲覧するシステムの応用が期待されている。この手持ちプロジェクタ応用において、手の移動により投影像が動く状況においても、対象の位置に投影像を正確に位置合わせすることは重要である。

従来のプロジェクタと投影対象間の位置姿勢を推定する手法は、ビジョンベースとセンサベースに大別される。前者の例として、Raskerらは移動できるプロジェクタ-カメラシステム（以下、プロカム）を用いて対象の位置姿勢を推定する手法を提案した [1]。この手法を含むプロカムを用いる手法は、模様や形状の特徴がある対象に対して追加の機器なしに位置合わせできる利点があるが、特徴がない場合は位置合わせに失敗する点や、プロカム間のキャリブレーション誤差が含まれるため、高精度な位置合わせには限界がある。

後者の例では磁気式や光学式があり、磁気式の手法 [2] では、環境中に発生させた三軸方向の磁界を受信機で検出することで、位置姿勢を各受信機ごとに高精度に計測できるが、環境に金属物や鉄筋構造の壁等が介在する場合、計測精度が低下する。また光学式では様々な発光デバイス（プロジェクタ [3] やレーザー [4]）から照射された特殊なパターン光を、対象に埋め込まれた光センサで受光し、位置計測を行う手法が複数提案されている。しかし、この手法では、映像投射用のプロジェクタとは別に発光デバイスが必要になってしまう。

杉本らは、映像提示装置を計測・制御・通信に用いる概念として Display-Based Computing を提唱しており、その中で単一のディスプレイと複数の光センサ

を用いて、映像提示と位置計測の両方を同時に行う手法を提案している [5]。具体的には、光センサの領域のみに指標画像を提示し、センサの動きに画像を追従させることで、連続的にセンサ位置と方向を推定を可能にした。しかし、この手法は指標画像の初期位置の決定のために、画面全体から各センサ位置の探索が必要となるため、一度トラッキングに失敗した場合は初期位置決定に時間がかかり、情報提示する上での制約ができてしまう。

そこで本研究では手持ちプロジェクタから実物体への情報の重畳表示を目的として、レーザープロジェクタからラスタスキャン投影される光線を光センサで受光するタイミングによるセンサ位置推定と、それに基づくセンサ埋込み対象の位置姿勢推定手法を提案する。本研究では走査式のレーザープロジェクタを使用するため、光学系にレンズを含まない。そのため装置自体を小型にでき、かつ投影対象への焦点合わせが不要である。また、提案する手法の特徴として計測のためのパターン光なしに、連続的に対象を追跡できる利点がある。本手法のアプローチに最も近い手法として Sutherland らの Sketchpad [6] で用いられているようなライトペンがあり、CRT の画面走査をペン先に埋め込まれた光センサで検出することで、ペン先位置を推定している。しかし、提案手法ではディスプレイの平面に拘束されず検出範囲が広く、壁や物体に埋め込まれた光センサを投影によって検出できるため、より広い応用が期待できる点で異なる。

2 提案手法

2.1 基本原理

提案手法では、MEMS ミラー方式のレーザープロジェクタと光センサ（フォトダイオード）の使用を想定し、レーザー光の走査とセンサの受光のタイミングに基づいてセンサ位置を推定する。また、投影対象に複数のセ

^{*1}大阪大学大学院基礎工学研究科

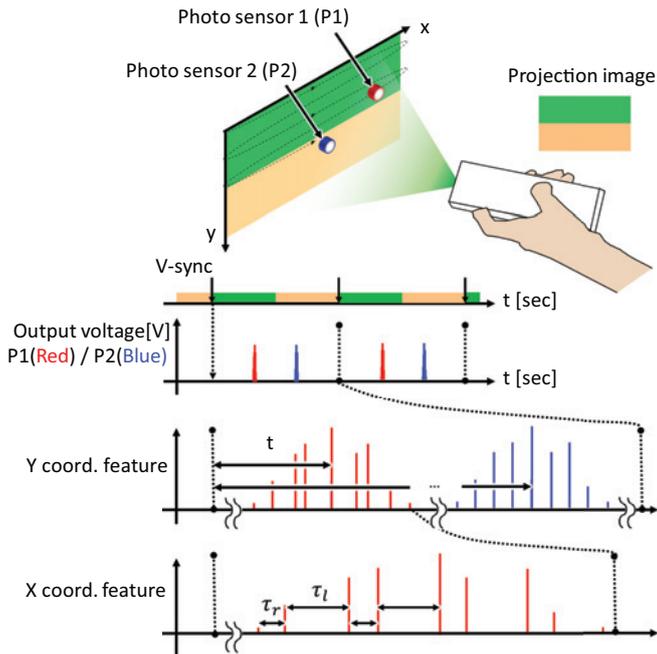


図1 レーザプロジェクタを用いた投影と、投影走査を受光した光センサの出力波形、提案手法で用いる各軸の特徴量 (t, τ_l, τ_r)

Fig.1 Feature values of x and y coordinate (t, τ_l, τ_r), and the relationship between photodiode output and projection image

ンサを埋め込み、それぞれの位置を推定することで、対象の位置姿勢を推定する。レーザ光の走査情報は、具体的にはプロジェクタ内の基板から出力されている信号を元に、毎時刻におけるレーザが照射される画素を計測する。本研究で使用する MEMS ミラー方式のレーザプロジェクタは、各フレームで単一画素への照射を左右に往復しながら上から下へ高速に動かすことで画面全体を走査するため、ある時刻におけるレーザ光の照射画素はフレームの走査開始からの時間によって決定される。提案手法では時刻 t におけるレーザ光の照射画素 (x, y) を計測するため、ミラー駆動信号の垂直同期信号の立ち上がり時刻 t_s と、レーザプロジェクタの走査カーブ $(x, y) = f(t - t_s)$ を用いる。

2.2 実装

レーザプロジェクタ内の動作特性計測のため、プロジェクタの分解と動作解析を行い、垂直同期信号の信号源 (S1) とカーブ関数 $f(t)$ を取得した。前述の通り $f(t)$ が既知であれば、垂直同期信号からのずれ時刻のみでレーザの照射画素を推定可能だが、本研究で使用するレーザプロジェクタモジュール (Sony, CXN0103) においては、各フレームで走査開始位置が画面右上 $(x, y) = (0, 0)$ と左上 $(x, y) = (\text{width}, 0)$ にランダムに変化する特徴があるため、追加で取得した走査方向判別用 (右又は左向き) の信号 (S2) を推定に利用し、かつ 1 フレームの投影光の走査の間に、投影光が複数

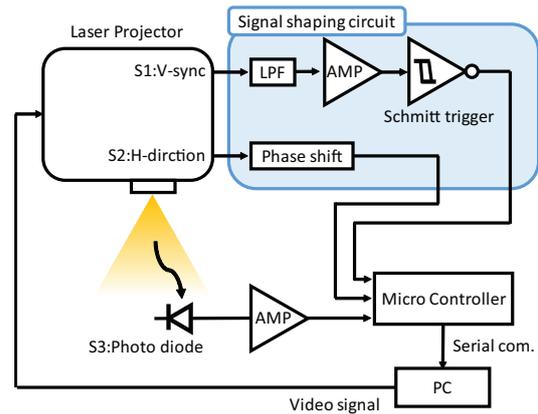


図2 システムの概要とデータフロー
Fig.2 System overview and data flow

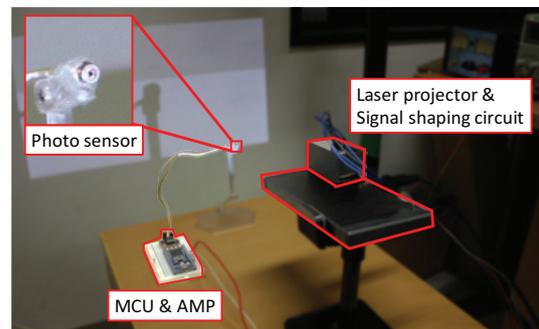


図3 システム実装図, 最小構成
Fig.3 Minimum system configuration

回連続して光センサに照射されることを仮定し、センサ位置を推定した。

実装上の問題を考慮した提案手法の概略図を図1に示す。番号 i のセンサ座標 (x_i, y_i) は、それぞれの軸で別々の特徴量から計算する。x 座標の特徴量には、レーザの走査がセンサ上を通過する際の、センサ位置の左側 ($x \leq x_i$) の往復にかかる時間と右側 ($x > x_i$) の往復にかかる時間の比 ($r_i = \tau_l / \tau_r$) を用いる。一方、y 座標の特徴量には、垂直同期信号を基準としたパルス群重心の時刻 t_i を用いる。ここで、x 軸の動きを示す余弦波の振幅、周波数、位相、振動中心をそれぞれ A, f, ϕ, d で表し、y 軸方向の速さと時刻のオフセットをそれぞれ k, p で表すと、カーブ関数は $f(t) = (A \cos(2\pi f t + \phi) + d, k(t - p))$ と表現される。また、このときセンサ座標は以下のように計算される。

$$(x_i, y_i) = \left(A \cos\left(\frac{\pi}{1+r}\right) + d, k(t - p) \right) \quad (1)$$

なお、カーブ関数のそれぞれのパラメータは、光センサとオシロスコープを用いて事前に計測した。

図2に提案手法における回路のブロック図を示す。プロジェクタから取得される信号 (S1, S2) は、それぞれ信号整形用の回路を通りマイコン (mbed LPC1768, 96MHz, 32ビットタイマ内蔵) のGPIOに接続される。具体的には S1 はノイズ除去のための低周波通過フィルタを通して増幅した後、シュミットトリガICを

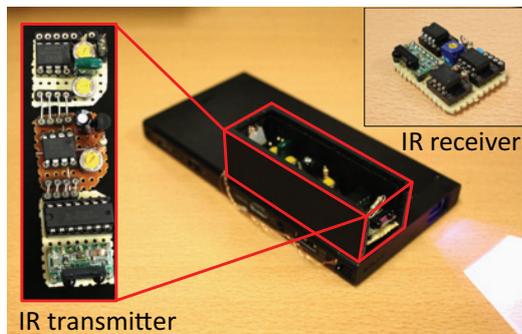
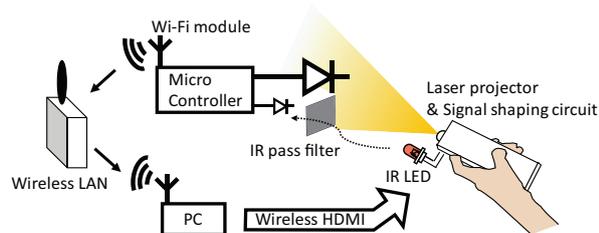


図4 無線通信型システム

Fig.4 Wireless system, Top: overview, Bottom: implementation

通して揺らぎのない立ち上がり信号とした。また S_2 は、レーザの出力信号に対して位相が 90 度進んでいたため、位相シフト回路によりレーザの出力タイミングと位相を合わせた。対象に埋め込まれた高速 Si フォトダイオード（浜松ホトニクス，S5971）の出力信号（ S_3 ）は非反転増幅を行いマイコンに接続した。マイコンでは接続された信号の立ち上がり時刻の差を、内臓のタイマで計測し、シリアル通信で PC に送信する。なお、波形整形回路の低周波通過フィルタ・位相シフト・増幅回路には HiFi オペアンプ（テキサスインスツルメンツ，OPA2134A）を用いた。図3に実装したシステムを示す。

2.3 ワイヤレス化

実環境を想定した手持ちプロジェクタによる情報表示においては、投影対象とプロジェクタが遠隔であるため、PC-マイコン-プロジェクタ間の通信は、無線であることが好ましい。そこで、提案手法に必要な3つの信号（プロジェクタ内部信号，時間差信号，映像信号）のそれぞれを無線化した（図4上段）。プロジェクタの内部信号については、水平方向信号（ S_2 ）を搬送波とする振幅変調により垂直同期信号（ S_1 ）を赤外線通信で伝送した。具体的には、両信号の論理和を取った信号を赤外線通信モジュール（ローム，RPM851A，IrDA方式）で送り、受信側では信号自身を水平方向信号として、信号に低域通過フィルタを通した信号を垂直同期信号として推定に利用した。また、赤外線通信モジュールにはプロジェクタから発せられる赤外線との干渉を防ぐため、可視光カットフィルタを配置した。製作した赤外線通信による無線送信機、受信機を図4下段に示す。時間差信号は Wi-Fi モジュール

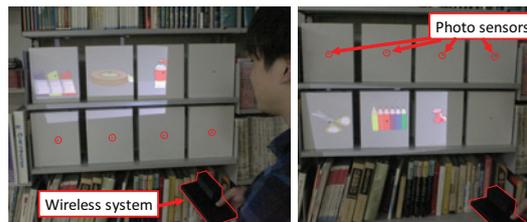


図5 倉庫管理を想定した箱内の物品画像の提示
Fig.5 Warehouse management, displaying a image of a product inside box



図6 ライトペンシステム 投影結果

Fig.6 Lightpen system, projection result

（ESPRESSIF，ESP-WROOM-02）を経由して UDP で PC に送信し、映像信号はワイヤレス HDMI（ロジテック，LDE-WHDI202TR）を用いて伝送した。

3 アプリケーション

提案手法の応用として、実環境へ情報を付加するシステム、ライトペン、マジックレンズ、動的プロジェクションマッピングシステムを実装した。本節ではそれぞれのシステムの詳細について示す。

3.1 実環境への情報付加

実物体に関連付けられた情報を提示するシステムの例として、倉庫管理 [3] の効率向上を目的とした、箱内部の商品情報を提示するシステムを実装した（図5）。箱に埋め込まれた光センサから位置を計測し、箱に関連付けられたアイコンや商品画像を重畳表示する。

3.2 ライトペン

ライトペン [6] では、ペン先に埋め込まれた光センサの位置を推定し、手書き入力として利用する。しかし、CRT によるライトペンと異なり、投影ではユーザの手やペン自身が投影光を遮蔽することが考えられ、ユーザがペンを投影面に当てる状況でペン先位置を推定する事は難しい。そこで、プロジェクタの目前に置かれたビームスプリッタにより投影光を映像提示用と位置推定用の2つに分離し、後者の光をペン先で受光する構成とした。カーソルとして投影画像のポインティングや、画面へのお絵かきが可能な他、ペンに配置されたスイッチにより、ペンの色や種類を変更でき

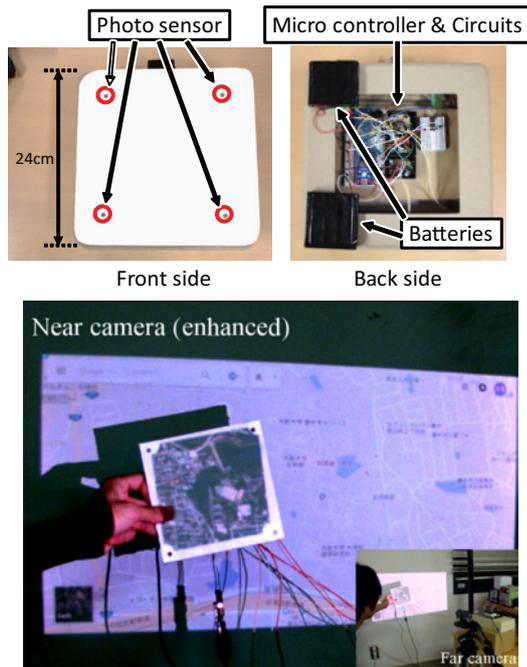


図7 マジックレンズシステム 上部：実装図，下部：投影結果
Fig.7 Magiclens system, Top: implementation, Bottom: projection result

る。図6に投影像にお絵かきを行った例を示す。

3.3 マジックレンズ

マジックレンズ [7] は、板の外の領域と板領域に異なる映像を投影することで、異なる二層の情報を提示できる。具体的には、正方形の板に取り付けられた4つの光センサの位置から平面の位置姿勢を推定し、投影を行う。図7に、航空写真と地図を閲覧できるシステムの例を示す。

3.4 プロジェクションマッピング

プロジェクションマッピングでは、3Dプリンタで印刷したスタンフォードバニーのモデルに複数の光センサを埋め込み実現する。光センサの個数と配置は、モデル重心から半径1mの球上からモデルを観測した場合に、どの地点からでも最低6つの光センサでプロジェクタ光を受光できることを条件として、モンテカルロ法により埋め込むセンサ数の最小化を行った。図8の上段に、最適化の結果得られた光センサの配置を示す。また下段左側に、モデルに赤緑の市松模様を投影した結果を示す。また、下段右側のようにライトペンと組み合わせて使用することでモデルへのお絵かきも行える。

4 まとめと今後の展望

本研究では手持ちプロジェクタによる実環境への情報の重畳表示を目的として、レーザープロジェクタからラスタスキャン照射される投影光の光センサにおける受光タイミングに基づく、位置推定手法を提案した。提案手法を実装し、応用として実環境への情報表示、

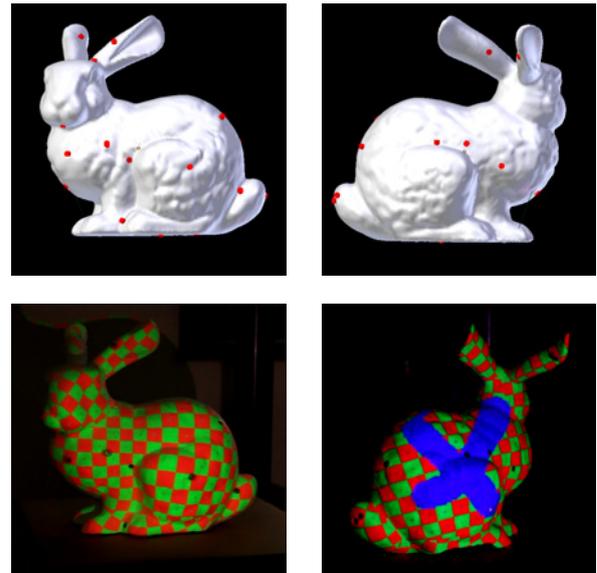


図8 プロジェクションマッピングの結果，上段：埋め込まれた光センサの配置図，下段左：バニーに投影を行った結果，下段右：ライトペンと組み合わせたシステム
Fig.8 Top: the placement of photo sensors embedded to bunny model, Bottom left: projection result, Bottom right, the combination with lightpen

ライトペン、マジックレンズ、動的项目ジェクションマッピングを実装した。今後の展望として、既存手法とした提案手法の精度評価実験と、複数台プロジェクタの位置姿勢推定機能の実装を予定している。提案手法を用いる場合、単一の光センサが複数台のプロジェクタの投影範囲にある場合でも、異なるタイミングで投影光を受光するため、それぞれのプロジェクタの位置姿勢を同時に推定できる。そのため、3Dモデルへの全周囲からのプロジェクションマッピングや、マルチプロジェクタの実時間でのキャリブレーションができ、幅広い応用が期待される。

参考文献

- [1] R. Raskar *et al.*: “iLamps: Geometrically aware and self-configuring projectors”, *Jour. ACM Trans. on Graph.*, **22**, 3, pp. 809–818 (2003).
- [2] Polhemus, Inc.: “LIBERTY”.
- [3] R. Raskar *et al.*: “RFID lamps: Interacting with a self-describing world via photosensing wireless tags and projectors”, *Jour. ACM Trans. on Graph.*, **23**, 3, pp. 406–415 (2004).
- [4] A. Cassinelli, S. Perrin, M. Ishikawa: “Smart laser-scanner for 3d human-machine interface”, *Proc. CHI*, pp. 1138–1139 (2005).
- [5] M. Sugimoto *et al.*: “A display-based tracking system: Display-based computing for measurement systems”, *Proc. ICAT-EGVE*, pp. 31–38 (2007).
- [6] I. E. Sutherland: “Sketchpad: A man-machine graphical communication system”, *Proc. SJCC, AFIPS*, pp. 329–346 (1963).
- [7] D. Barievi *et al.*: “A hand-held ar magic lens with user-perspective rendering”, *Proc. SIGGRAPH*, pp. 197–206 (2012).