

映像への不可視な画素位置情報埋め込みによる動的プロジェクションマッピング

三木 明穂¹ 平木 剛史^{1,2} 岩井 大輔^{1,3} 川原 圭博² 佐藤 宏介¹

概要: 本研究では、映像への不可視な画素位置情報埋め込みによって、カメラ計測が不要な動的プロジェクションマッピングを実現する手法を提案する。ここでは、空間分割型可視光通信を用いて位置情報を画素単位で映像に埋め込み、これを高速 DLP プロジェクタを用いて投影する。これを用いて、リアルタイムで投影対象の位置・姿勢推定を行い、映像の幾何補正を実現する。本システムを用いると、単一のプロジェクタのみから映像の投影と位置・姿勢推定を行うことができるため、カメラ計測とこれに必要なプロジェクタ-カメラ間の座標位置合わせが不要となり、システムの容易な設置が可能となる。本論文では、提案システムを実装した上で、投影対象の平行移動時における位置・姿勢推定精度の評価を行い、約 20 fps での動的プロジェクションマッピングが実現できていることを確認した。

1. はじめに

近年、現実空間とバーチャル空間を融合した形でユーザーに提示する技術である複合現実感 (Mixed Reality: MR) が、エンタテインメントや製品設計など様々な分野で注目を集めている。この実現に向けて、Microsoft の HoloLens に代表されるビデオシーラー型ヘッドマウントディスプレイなどが用いられており、近年では整備士訓練用ツールとして活用が検討されるなど [1], 産業界における応用も進んでいる。

この MR を実現する他の代表的な技術として、立体物の表面に映像を位置合わせして投影するプロジェクションマッピングが挙げられる。しかし、従来主流となっていたプロジェクションマッピングでは、動的に位置や形が変化する物体に対してマッピングを行うことができず、その表現には限界があった。そのため近年では、動的に動く物体に対して映像を重畳表示することが可能な、動的プロジェクションマッピングが注目されている。この動的プロジェクションマッピングの実現には、投影対象の位置・姿勢推定とそれに伴う投影映像の幾何補正を逐次実施する必要がある。

対象物体の位置・姿勢推定技術としてこれまで、高速プロジェクション技術を用いた手法 [2], [3] や、深度カメラによるプロジェクタ-カメラシステムを用いた手法 [4], [5]

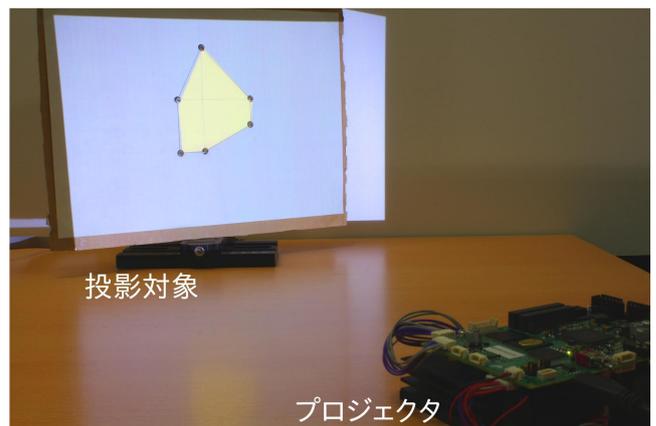


図 1 提案システムを用いてプロジェクションマッピングを行っている様子

が提案されてきた。しかしこれらビジョンベースの手法は、投影対象を抽出するための模様や形状に制限があったり、カメラ-プロジェクタ間のキャリブレーション誤差が含まれたりしてしまうという欠点があった。Kitajima ら [6] は、レーザ走査プロジェクタと光センサを用いた位置・姿勢推定手法を提案している。しかしこの手法では、一般に普及していない特殊な方式のプロジェクタであるレーザ走査プロジェクタが必要であった。

そこで本研究では、空間分割型可視光通信 (Pixel-level Visible Light Communication: PVLC) [7] を用いることで、カメラ計測が不要な動的プロジェクションマッピングを実現する手法を提案する。空間分割型可視光通信は、高速な DLP プロジェクタを用いることで、映像に対し不可

¹ 大阪大学

² 東京大学

³ 国立研究開発法人科学技術振興機構, さきがけ

視な情報を画素単位で埋め込むことが可能な技術である。ここでプロジェクションマッピングの投影対象に受光センサを配置することで、プロジェクタからの投影光を受光し、この受信情報を用いて位置・姿勢推定を行う。そのため、投影対象を観測するためのカメラは不要であり、従ってプロジェクタ-カメラ間の位置合わせも不要であるため、システムの設置は簡便である。

本論文では、提案システムを実現するため、光信号を受信するための受光センサと増幅回路を実装した。また、投影対象物体の位置姿勢を精度良く推定できるようにセンサ埋め込み位置を決定する手法と、PVLCを用いた映像と情報の動的な更新を実現するためのソフトウェア開発を行った。加えて、開発したシステムに対して、投影対象の平行移動時における位置・姿勢推定精度の評価を行うことで、動的プロジェクションマッピングシステムとして機能しているかどうかを確認した。

2. 関連研究

2.1 プロジェクションマッピング

プロジェクタを用いた投影型 MR は、複数の利用者が、機器を装着せずに、現実空間とバーチャル空間が重畳された同一の空間を、同時に視認することができる点で有用である。この投影型 MR の代表的な技術に、プロジェクションマッピングがある。プロジェクションマッピングとは、平面のスクリーンだけでなく、立体的な物体の表面に対しても、映像をマッピングして投影する技術である。これにより、投影対象の表面の色など見た目を変化させたり、付加情報を物体位置に合わせて重畳表示することが可能となる。この特長を活かして、これまでエンタテインメント [8] や医療 [9] など幅広い分野での利用が進められてきた。

近年では、より表現の幅を広げるものとして、動いている投影対象に対して映像投影を行う、動的なプロジェクションマッピングが注目されている。動的なプロジェクションマッピングでは、投影対象が移動するため、投影対象に対して常に適切な位置に映像を投影する必要がある。そのため映像の投影対象に対する位置合わせは、投影対象の移動に追従できるようにリアルタイムで実行する必要がある。

対象物体の位置・姿勢をその移動に追従して推定し、動的にプロジェクションマッピングを行う技術として、これまで高速ビジョン技術とプロジェクション技術を組み合わせた手法 [2], [10] や、深度カメラによるプロジェクタ-カメラシステムを用いた手法 [4], [5] が提案されてきた。しかし、これらの手法はプロジェクタ-カメラ間の位置合わせが必要であり、またそのキャリブレーション誤差が精度に影響していた。Kagami ら [3] は、高速 DLP プロジェクタを使用して、ごく短時間のみトラッキング用のパターン画像を投影し、ハードウェア処理によって幾何補正を実行することで、プロジェクタ-カメラ間の位置合わせが不要な高

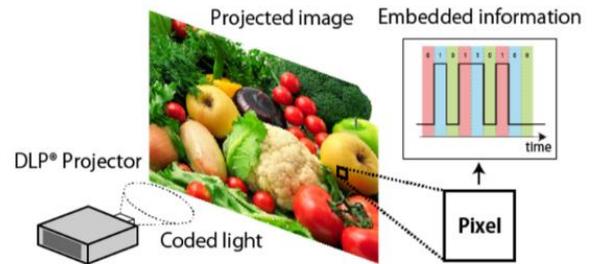


図 2 空間分割可視光通信 (PVLC) の概念図

速プロジェクションマッピング手法を提案している。しかし、ハードウェア処理で実現されるのはホモグラフィ変換のみであるため、投影対象の形状が平面のみという制約が存在した。

2.2 プロジェクタ投影光の受信による位置・姿勢計測

複数枚の画像で構成される特殊パターンをプロジェクタで投影し、この投影光をセンサで受信することで物体の位置・姿勢を計測する研究が提案されている。ここで投影対象となるのは二値画像として構成されたコードパターンであり、主にグレイコード [11], [12], [13], [14] や M 系列パターン [15] の画像が用いられる。この投影光をセンサで受信し、デコード処理を行うことで位置・姿勢の計測を実現している。しかし、これらのシステムではプロジェクタを情報通信装置のみとして使用しているため、映像提示装置としての側面が失われてしまっていた。

Kitajima ら [6] は、レーザ走査プロジェクタと、投影対象に埋め込まれた光センサの受光タイミングに基づく、ライトペンの原理を用いた投影対象の位置姿勢推定手法を実現した。これにより、パターン光の個別の投影なしに、投影映像のみを用いた投影対象の位置・姿勢推定が可能となった。この手法にはさらに、使用装置が小型で焦点合わせも不要であるため、連続的に対象を追跡できるという利点もある。しかし、計測の原理上必要となる、レーザ走査型プロジェクタは、アイセーフの観点から映像の高輝度化が困難であるため、応用範囲が限定的であった。

2.3 空間分割型可視光通信

人間に知覚されず高速に位置を推定する手法として、DMD (Digital Micromirror Device) を空間変調素子とする DLP プロジェクタから投影する映像を高速に明滅させることで、映像の画素単位で可視光通信 (VLC) を実現する、空間分割可視光通信 (Pixel-level Visible Light Communication: PVLC) [7] が提案されている。PVLC の概念図を図 2 に示す。PVLC では、可視光通信によって情報を送信することができるため、画素位置に関する位置情報以外にも任意のデータを画素ごとに埋め込むことが可能である。

この特長を用いることで、映像に埋め込んだ情報によるロボットの位置推定に加えて、その駆動制御も実現した研究も提案されている [16].

2.4 本研究の位置づけ

本研究では、動的なプロジェクションマッピングを実現するための手法として、PVLC を用いた画素位置情報埋め込みと、受光センサを用いた光信号受信による投影対象の位置・姿勢推定を用いる。この手法の利点には、一般的に使用され、また高輝度化も容易な DLP プロジェクタを使用すること、また、単一のプロジェクタのみから映像の投影と位置・姿勢推定を行うことができるため、カメラ計測とこれに必要なプロジェクタ-カメラ間の位置合わせが不要となり、システムの設置が簡便であることが挙げられる。

3. 提案手法

本研究では、PVLC を用いて画素単位で位置情報が埋め込まれた映像を投影し、投影対象物体に埋め込まれた受光センサによって光信号を受信、そのそれぞれで画素位置情報を取得する。そして得られた二次元センサ位置と、プロジェクタの内部パラメータ、投影対象のセンサ配置位置を用いて PnP (Perspective-n-Point) 問題を解くことで、投影対象のプロジェクタに対する位置・姿勢推定を行う。ここで得られた位置・姿勢情報を用いて、投影映像の幾何補正をリアルタイムで処理することで、動的なプロジェクションマッピングを実現する。PVLC を用いることで、投影空間における投影対象の位置情報を、プロジェクタの映像解像度と同じ解像度で埋め込むことが可能になる。また、光通信を用いているので、低遅延での画素位置情報の送信も実現できる。

提案システムの概念図を図 3 に示す。PVLC を用いて画素位置情報が埋め込まれた映像を、PC で生成し、DLP プロジェクタに転送、投影する。投影対象物体に埋め込まれた光センサによって受光された信号は、マイコンによってデコードされ、複数のセンサの画素位置に関する位置情報

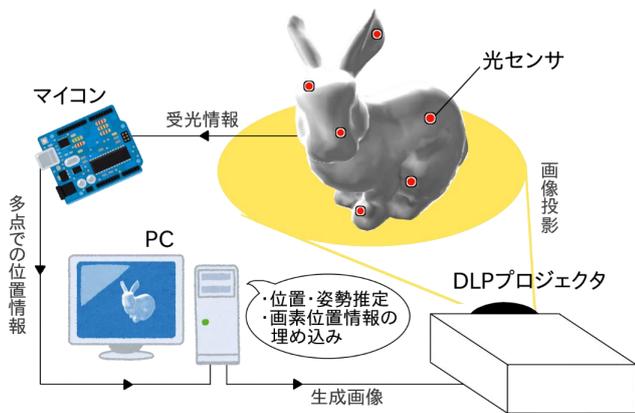


図 3 提案システムの概要

が取得される。この情報はシリアル通信で PC に送信され、これを用いて PnP 問題を解くことで、投影対象の位置・姿勢推定を行う。これを用いて、映像の幾何補正を行った上で情報の埋め込まれた投影映像をリアルタイムで生成し、この更新された PVLC 画像が再び DLP プロジェクタに転送され、投影される。

3.1 プロジェクションマッピングにおいて満たすべき整合性

MR システムにおいて満たすべき整合性として、光学的整合性 (陰影ずれなし)・幾何学的整合性 (位置ずれなし)・時間的整合性 (時間遅れなし) の三つがある [17]. 光学的整合性については、プロジェクションマッピングでは、現実空間の実物体に映像を投影するので、問題は発生しない。次に幾何学的整合性について、従来のようにカメラを用いて投影対象を観測する場合、その投影対象が移動すると、幾何学的整合性の維持にはカメラとプロジェクタの位置合わせ処理が必須となる。この処理を動的に行い、かつ高い精度を保つことは困難である。しかし本研究では、図 3 のように、プロジェクタという単一の光学系から映像の投影と実物体の位置姿勢推定を同時に行うことで、これらの幾何学的整合性を原理上一致させることができる。時間的整合性に関しては、映像の投影と物体の移動についての時間遅れが問題となるが、本研究では可視光通信の一種である PVLC を用いるため、原理上プロジェクタのビデオレートで動作させることが可能である。

3.2 PVLC を用いた情報埋め込みと映像の動的更新

本研究では、DMD 制御と同期して、R, G, B の三色の LED 光源制御が可能な DLP プロジェクタによって PVLC を用いた映像投影を行う。このプロジェクタでは、R, G, B 各色での二値画像の投影制御が可能となる。ここで、動的なプロジェクションマッピングを実現するためには、PVLC における映像と埋め込み情報をリアルタイムに更新可能なシステムとして開発する必要がある。

使用する DLP プロジェクタは、最大 4,225 Hz で二値パターンを投影することができる。この時投影されるパターンの色は、そのタイミングで点灯している光源によって決定される。PVLC において、投影されるパターン列は、同

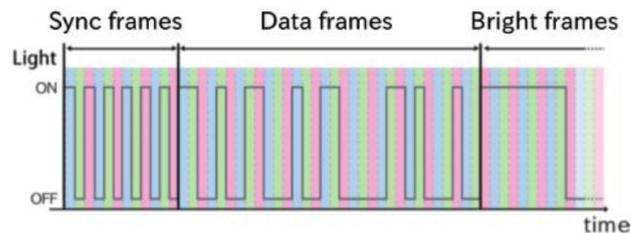


図 4 PVLC における投影画像のバイナリフレームの構成

24bit色深度画像								
深度(bit)	7	6	5	4	3	2	1	0
G	G3	G2	G1	G0	x3	x2	x1	x0
R	R3	R2	R1	R0	x7	x6	x5	x4
B	B3	B2	B1	B0	SYNC	SYNCx	x9	x8

深度(bit)	7	6	5	4	3	2	1	0
G	G3	G2	G1	G0	y4	y3	y2	y1
R	R3	R2	R1	R0	y8	y7	y6	y5
B	B3	B2	B1	B0	SYNC	SYNCY	y10	y9

図 5 色深度のビット数と映像・情報の対応関係: G0-G3, R0-R3, B0-B3 はそれぞれ GBR の色深度. x0-x9, y1-y10 はそれぞれ x 座標の 0-9bit 目と, y 座標の 1-10bit 目. SYNCx, SYNCY は投影画像の持つ画素位置情報が x 座標値か y 座標値か識別するための情報である.

期フレーム部, データフレーム部, 輝度調整フレーム部の三部分に分けられている (図 4). この内, 同期フレームは, 情報列の始まりを示すための画面全体で一様な点滅パターンである. データフレームは画素ごとに異なる埋め込み情報 (ここでは画素位置情報) を点滅パターンによって表す. その後, 人がデータフレームによる画像の乱れを知覚しないよう, 輝度調整フレームで投影時間により各色の輝度が調節される. このようにして, 人間の目に知覚できない情報を画像に埋め込むことができる. 本研究においては, 24 bit 色深度画像を二枚用いて, 図 5 のように各画素の R, G, B 値それぞれ 8 bit の上位 4 bit に輝度情報, 下位 4 bit に x, y 各 10 bit の画素位置情報やその他の情報を格納している. この生成画像を HDMI 経由でプロジェクタへ送信するが, この際, それぞれのビット深度の二値画像に対応して LED の光源制御を行うことで, PVLC によって情報が埋め込まれた画像をプロジェクタから投影することができる. 投影対象のセンサはこの投影光の高速な点滅を光信号として受信し, マイコンでこれをデコードすることで各センサの画素位置情報を取得することができる.

3.3 投影対象物体におけるセンサ設置位置決定

Kitajima ら [6] は, レーザ走査プロジェクタと投影対象に配置した受光センサによる姿勢推定を行う中で, 投影対象物体のセンサの数と配置を計算する手法を提案している. この手法について, 必要な受光センサ数を減らすためのアルゴリズムの改良を行った.

Kitajima らの手法において, 光センサの個数と配置は, 投影対象モデルの重心から半径 1 m 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決定する. 以下に処理のフローを示す.

(1) センサ数 n を, 事前に計算されたセンサ数の範囲の中

からランダムに決定

- (2) センサ配置 p_i をモデルの頂点から選択, 解候補に追加
- (3) 一定距離離れた位置から投影した際に, 6 個以上の光センサが受光するかを検証し, 当てはまらなかったものを解候補から除外
- (4) 1-3 のステップを 10 万回程度繰り返す
- (5) 解候補の中から, n が最小であるセンサ配置を採用

手順 3 においてセンサ受光数を 6 以上となっているのは, PnP 問題について投影対象の姿勢自由度は 6 であり, 6 点が既知となれば線型方程式を解く問題に帰着できるからである. そのため手順 3 では, 生成された解候補が, どの角度から投影しても位置・姿勢推定が可能であるように配置されているかどうかを検証する目的で, 常に 6 つ以上の光センサが投影光を受光するかの判別を, レンダリングソフトウェアを用いた CG シミュレーションにより行っている (図 6). 具体的には, 解候補のセンサ配置に, スポット光源を埋め込み, モデルを包むように配置された球面に光を照射することで, モデル自身による光の遮蔽を考慮したセルフシャドウマップを作成している. セルフシャドウマップは, 球面上における直接光の照射の有無を示す白黒画像のことで, CG でスポット光の照射をした後, 球面をキューブマップ化することで生成される. キューブマップ化では, モデル重心位置から六方向 ($x+, x-, y+, y-, z+, z-$) を撮影し, モデル周囲の環境を 6 枚の正方形画像で表現している. この一連の手法は, Precomputed Shadow Fields [18] による 3D モデルの自己遮蔽計算を簡素化したものである. ここで, 配置するスポット光源の広がり角度のパラメータは, 使用する光センサの指向性に合わせて 80 度となっている.

本研究では, Kitajima らの手法に三つの改良を行うことで, 必要な受光センサ数を低減させた. まず, モデルの回転を制限し, キューブマップにおける上面と底面 (図 6(c),

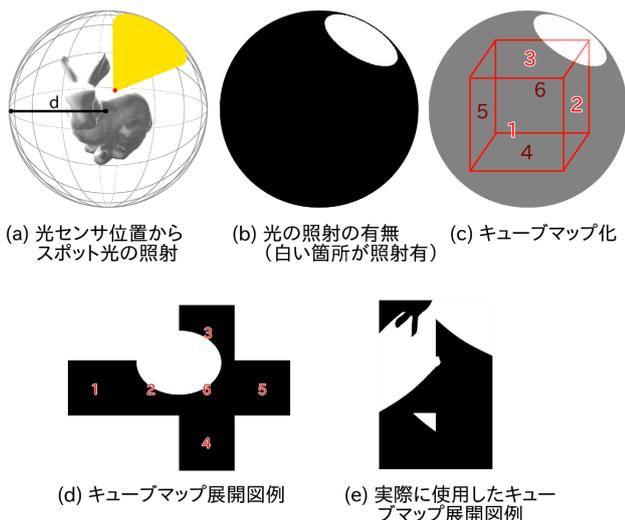


図 6 ライティングを用いた解候補の検証

(d)における3と4の面)からの投影は行わないと仮定して、判別から除外した。次に、モデル上の指定した座標値の頂点に、あらかじめセンサを配置した上で配置の探索を行う機能を追加した。これにより見通しの良いと思われる頂点を初期配置として指定することで、必要な受光センサ数が少ない解の探索可能性を向上させた。最後に、上記手法で決定されたセンサ配置から、センサをひとつずつ取り除き、再度解条件を満たすことの検証を行い、満たしていた場合は除去する機能を追加した。これにより、より効率的なセンサ配置の探索を実現した。

4. 実装

DLP プロジェクタには、DLP LightCrafter 4500 (Texas Instruments) を使用し、また投影対象の光センサに Si PIN フォトダイオード (S5971, 浜松ホトニクス) を使用した。また、これらに加えてマイクロコンピュータ (mbed NXP LPC1768), PC (XPS 13 9380, DELL) を使用して、システムを構成した。各プログラムの開発は C++ によって行い、開発環境に Visual Studio 2019 を使用した。

ソフトウェアにおいては、PnP 問題を解くことで得られた位置・姿勢情報を用いて、画像に幾何補正を行い、この画像に対し画素位置情報を埋め込み、投影画像をリアルタイムで生成するプログラムを作成した。また、この画像を HDMI 経由で DLP プロジェクタへ送信し、それぞれのビット深度の二値画像に対応して LED の光源制御を行うことで、PVLC を用いた映像投影が可能なシステムを構築した。提案システムを用いて、実際にプロジェクションマッピングが実現されている様子を図 7 に示す。現在の実装においては、映像と埋め込み情報の動的更新は約 20 fps で実現されており、動的なプロジェクションマッピングが実現可能であることが確認できた。

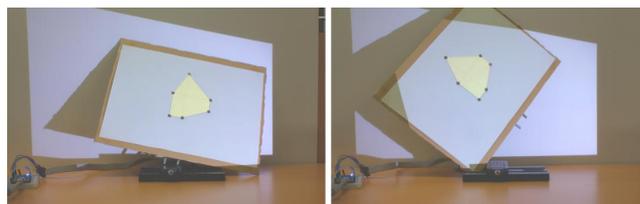


図 7 プロジェクションマッピングが実現されている様子

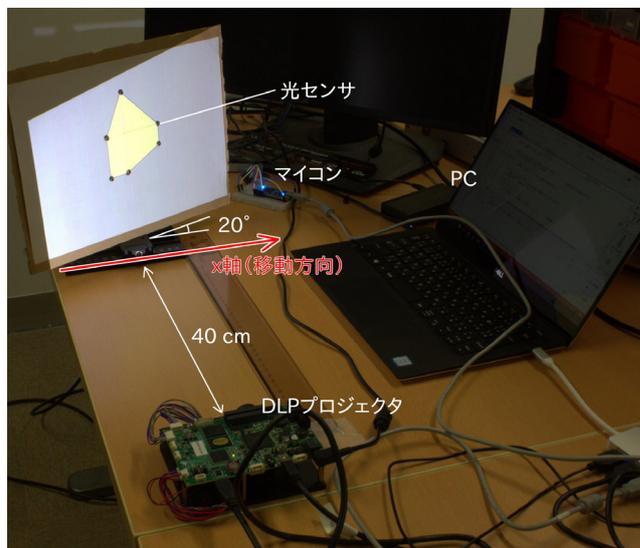


図 8 x 軸方向平行移動値精度推定実験の様子

5. 実験

提案システムにおいて、動的プロジェクションマッピングが実現できているかを確認するため、投影対象の移動に対する位置・姿勢推定の精度について評価実験を行った。

実験においては、投影対象物体をプロジェクタ座標系における x 軸方向に平行移動した際の位置・姿勢推定精度について評価することとした。実験環境を図 8 に示す。DLP プロジェクタとスライドステージ (XR25-RC2/M, THORLABS) を 40 cm 離して平行に設置し、スライドステージ上に x 軸に対して 20° の角度で設置した、光センサを埋め込んだ投影面に投影した。投影対象を x 軸方向に 0 cm から 13cm まで 1 cm ずつ動かし、それに伴う x 軸方向での移動距離の推定を行った。

実験結果を図 9 に示す。全 14 点による最小二乗法を用いた近似直線は $y = 1.00x - 7.49$ であった。この近似直線の傾きは 1.0 に十分近いことから、提案手法を用いることで精度よく対象物体の位置・姿勢が推定されていることが示された。

6. おわりに

本論文では、映像への不可視な情報埋め込みによるカメラ計測が不要な動的プロジェクションマッピングを実現する手法を提案した。PVLC を用いて画素位置情報を画像に

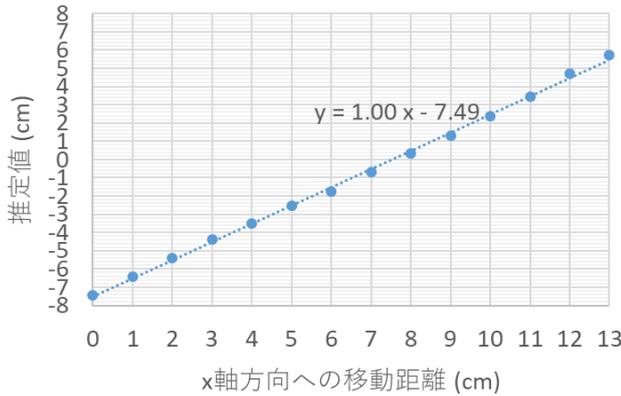


図9 x軸方向平行移動値精度推定実験結果

埋め込み、リアルタイムで投影対象の位置・姿勢推定を行うことでこれを実現した。また、完成したシステムについて、投影対象の移動に対する位置・姿勢推定の精度を評価し、精度よく推定されていることを確認した。

今後、様々な照明環境・姿勢条件下でモデル推定制度の評価を行い、動的プロジェクションマッピングにおける有用性を明らかにしていきたいと考えている。また、本研究でPVLCを用いて画像に埋め込んだ情報は、画素位置情報のみであった。しかし、PVLCを用いた情報埋め込みでは、画素位置情報以外の情報、例えばロボットの駆動制御情報なども埋め込むことができる。よって、マッピング対象の駆動制御とその動作を伴うプロジェクションマッピングについても検討していきたいと考えている。

謝辞 本研究は、JST ERATO 川原万有情報網プロジェクト (JPMJER1501), JSPS 科研費 JP15H05925, JP19J00101 の助成を受けた。

参考文献

- [1] JAL プレスリリース: JAL、マイクロソフトの最新ホログラフィック コンピューター「Microsoft HoloLens」の業務活用プロトタイプを開発, <http://press.jal.co.jp/ja/release/201604/002643.html?Fa=1>.
- [2] Narita, G., Watanabe, Y. and Ishikawa, M.: Dynamic Projection Mapping Onto Deforming Non-Rigid Surface Using Deformable Dot Cluster Marker, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 23, No. 3, pp. 1235–1248 (2017).
- [3] Kagami, S. and Hashimoto, K.: Animated Stickies: Fast Video Projection Mapping onto a Markerless Plane through a Direct Closed-Loop Alignment, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 25, No. 11, pp. 3094–3104 (2019).
- [4] Tsuboi, K., Oyamada, Y., Sugimoto, M. and Saito, H.: 3D object surface tracking using partial shape templates trained from a depth camera for spatial augmented reality environments, *Proceedings of the 14th Australasian User Interface Conference*, Australian Computer Society, Inc., pp. 125–126 (2013).
- [5] 小林大祐, 小泉 諒, 橋本直己: 深度カメラを用いた実時間姿勢追跡に基づく動的な空間型 AR の実現, *電子情報通信学会論文誌 D*, Vol. 99, No. 3, pp. 264–272 (2016).
- [6] Kitajima, Y., Iwai, D. and Sato, K.: Simultaneous Projection and Positioning of Laser Projector Pixels, *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 23, No. 11, pp. 2419–2429 (2017).
- [7] 北村匡彦, 苗村 健: DMD を用いた空間分割可視光通信: メタメディア情報を埋め込んだ映像投影, *日本バーチャリアリティ学会論文誌*, Vol. 12, No. 3, pp. 381–388 (2007).
- [8] 北田大樹, 和田孝志, 白井暁彦: RFID とプロジェクションマッピングを活用した科学館向けエンタテインメント VR システム, *エンタテインメントコンピューティング 2012* (2012).
- [9] Nishino, H., Hatano, E., Seo, S., Nitta, T., Saito, T., Nakamura, M., Hattori, K., Takatani, M., Fuji, H., Taura, K. and Uemoto, S.: Real-time navigation for liver surgery using projection mapping with indocyanine green fluorescence: development of the novel medical imaging projection system, *Annals of Surgery*, Vol. 267, No. 6, pp. 1134–1140 (2018).
- [10] Okumura, K., Oku, H. and Ishikawa, M.: Active projection AR using high-speed optical axis control and appearance estimation algorithm, *Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Multimedia and Expo*, pp. 1–6 (2013).
- [11] Raskar, R., Beardsley, P., van Baar, J., Wang, Y., Dietz, P., Lee, J., Leigh, D. and Willwacher, T.: RFIG lamps: interacting with a self-describing world via photosensing wireless tags and projectors, *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 23, No. 3, pp. 406–415 (2004).
- [12] Lee, J. C., Hudson, S. E., Summet, J. W. and Dietz, P. H.: Moveable Interactive Projected Displays Using Projector Based Tracking, *Proceedings of the 18th annual ACM symposium on User interface software and technology*, pp. 63–72 (2005).
- [13] Raskar, R., Nii, H., Dedecker, B., Hashimoto, Y., Summet, J., Moore, D., Zhao, Y., Westhues, J., Dietz, P., Barnwell, J. et al.: Prakash: lighting aware motion capture using photosensing markers and multiplexed illuminators, *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 26, No. 3, p. 36 (2007).
- [14] Fan, M., Liu, Q., Tang, H. and Chiu, P.: HiFi: Hide and Find Digital Content Associated with Physical Objects via Coded Light, *Proceedings of the 15th Workshop on Mobile Computing Systems and Applications*, pp. 1–6 (2014).
- [15] Xiao, R., Harrison, C., Willis, K. D., Poupyrev, I. and Hudson, S. E.: Lumitrack: Low Cost, High Precision, High Speed Tracking with Projected m-Sequences, *Proceedings of the 26th annual ACM symposium on User interface software and technology*, pp. 3–12 (2013).
- [16] Hiraki, T., Fukushima, S., Kawahara, Y. and Naemura, T.: Phygital Field: An Integrated Field with Physical Robots and Digital Images Using Projection-Based Localization and Control Method, *SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration*, Vol. 11, No. 4, pp. 302–311 (2018).
- [17] 神原誠之: 拡張現実感 (AR): 1. 基礎 1: 拡張現実感 (Augmented Reality: AR) 概論, *情報処理*, Vol. 51, No. 4, pp. 367–372 (2010).
- [18] Zhou, K., Hu, Y., Lin, S., Guo, B. and Shum, H.-Y.: Precomputed Shadow Fields for Dynamic Scenes, *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 24, No. 3, pp. 1196–1201 (2005).