

複数プロジェクタの同時投影により複数の任意形状に異なるパターンを表現するプロジェクションマッピング

蛭川 琢斗¹ Marco Visentini Scarzanella¹ 古川 亮² 日浦 慎作² 川崎 洋¹

概要: 近年、任意形状にパターンを投影するプロジェクションマッピングが注目されている。特に、拡張現実 (AR) や複合現実 (MR) の実現には必須の技術と考えられている。しかし、プロジェクタからの投影は空間的に不変であり、対象の位置が変わっても変化しないため、AR や MR での利用に制約があった。そこで、本研究では、複数のプロジェクタを用いて空間中にライトフィールドを構築することで、複雑な自由形状を持った複数の対象に対して、同時に異なる映像投影手法を提案する。また、エポレータ制約を用いることで、計算に必要な変数を大幅に削減し、計算量の多い複雑な最適化を実現する手法を開発した。これにより、解に制約を付けた計算が可能となり、解の輝度値をプロジェクタで再現可能な範囲に抑えることで、最終的な投影像のダイナミックレンジの拡大が可能となる。

1. はじめに

拡張現実 (AR) や複合現実 (MR) においてプロジェクタを用いて空間的な情報を効率的に表現する効果をもたらすシステムが開発されている。特にプロジェクション・マッピングでは、建造物や人間などを対象に画像を投影し、もとの対象とは異なる映像情報を付加することで様々な視覚効果を実現することができる。しかし、プロジェクタからの投影パターンは同一光線上にあり、空間的に不変であるため、対象の位置が変わっても変化しない。その為 AR や MR での利用に制約があった。もし、異なるパターンを同時に異なる深さに投影することができれば、プロジェクタを用いた AR や MR の適用の可能性が大幅に広がることになる。

先行研究において、Scarzanella や石原らは複数のプロジェクタを用いて、平面物体を対象として、異なる深さへ異なる画像を同時投影を行う手法を提案した [1], [2]。もし平面に限らず、複数の自由な形状に対して、同様に異なるパターンを投影できれば、これまでにない利用方法が考えられる。例えば、図 1 に示すように、異なる 2 箇所に異なる物体を置くことで、それぞれに全く異なる像の投影ができる。これは、平面の場合と同様に、互いの位置で各プ

ロジェクタからピクセルの色を合成・打ち消しあうパターンを投影しているためである。このような投影が実現できれば、モノづくりの現場において、目視で部材を設置する位置を確認しながら作業を進めることができる。本研究では、このように、複数の自由形状を持った対象に対して、異なる位置毎に同時に異なる映像投影を実現する手法を提案する。

また、Scarzanella らの手法では、全ての画素に対する制約式を一つの行列にまとめて数値計算する手法であったため、計算コストが高く、追加の制約を加えることが容易ではなかった。そこで本論文ではエポレータ制約を用いることで、エポレータ線ごとに制約式を独立に構築する手法を提案する。こうすることで計算に必要な変数を大幅に削減でき、計算量の多い複雑な最適化を実現することができる。これにより、解に制約を付けた計算が可能となり、解の輝度値をプロジェクタで再現可能な範囲に抑えることで、最終的な投影像のダイナミックレンジの拡大が可能となる。

実験では実際に複雑な形状をもった物体を用いて、異なる位置で異なるパターンが投影できることを確認した。また、異なる位置に、異なる物体を設置する場合でも、異なるパターンが投影されることを確認した。

2. 関連研究

プロジェクタを用いた多層ディスプレイの開発の研究は多く行われている。複数プロジェクタを用いた異なる深さへの投影の研究として、中村らによるコード化プロジェクションを用いた研究がある。この研究では、コード化され

¹ 鹿児島大学学術研究院理工学域工学系情報生体システム工学専攻
Department of Information and Biomedical Engineering, Kagoshima University, 1-21-40, Kohrimoto, Kagoshima, 890-0065 Japan

² 広島市立大学大学院情報科学研究科
Graduate School of Information Sciences, Hiroshima City University, 3-4-1, Otsuka Higashi, Asaminami-ku, Hiroshima, 731-3194 Japan

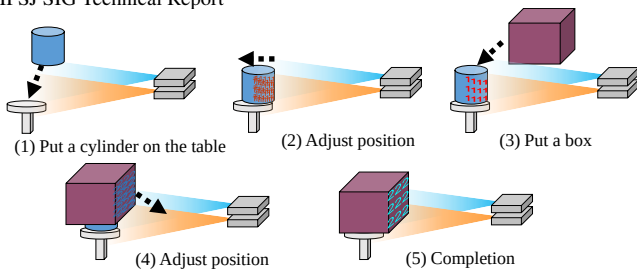


図 1: 2つのプロジェクターによる任意形状への同時投影

た画像を複数のプロジェクターで投影することで空間的情報を色で表現している [3]. Nagano らは光の混合性を利用して多数のプロジェクターからの独立した投影像を目的の表面上に投影することで、異なる方向から様々な像が投影されるディスプレイを実現している [4]. Barnum らはディスプレイを水滴で表現し、カメラとプロジェクターの同期を行うことでプロジェクターの光線が異なる深さの水滴に投影される多層ディスプレイの表示を可能としている [5].

また、プロジェクターを用いて本来の解像度以上の鮮明な像を投影させる研究も行われている。Chen と Schikore は複数のプロジェクターを用いて互いの投影面を校正することで高解像度な投影をする研究を行っている [6], [7]. Godin らは、人間は視野の中心に注目するという視覚的特性を利用して、低解像度の像が投影されている中で視野の中心に高解像度の投影像を重ねることで鮮明な投影像の合成を行う研究を行っている [8].

さらに、プロジェクターを用いた被写界深度の拡張を目的とした研究も行われている。Bimber らは、異なる焦点面を持つプロジェクターを複数用いることによって被写界深度の拡張を行っている [9]. また、Nagase らは複数の鏡を用いることで異なる焦点面のプロジェクターを複数使用することと同じ効果を得て被写界深度の拡張を行うことを実現している [10].

3. システム概要

本システムは、2つのプロジェクターの投影光を重ね合わせることで複数の自由形状物体に異なる画像の同時投影を実現する。システムの概要を図2に示す。図2(c)のようにプロジェクター1, 2で投影するパターンは深さ1で干渉して目標画像の図2(a)が投影される。そしてマネキンが深さ1から深さ2に移動する際にパターンは図2(a)ではなくなり、マネキンが深さ2に到達する際にプロジェクターの投影像は再び干渉しあい、図2(b)が投影される。

アルゴリズムの概要を図3に示す。プロジェクターからグレーコード投影を行うことでオブジェクトとプロジェクター間のピクセル単位での位置関係を求め、エピソード制約に基づいた定式化およびパターンの最適化を行う。最後にプロジェクター同士の輝度関係を補正を行い、最終的なパターンを作成する。

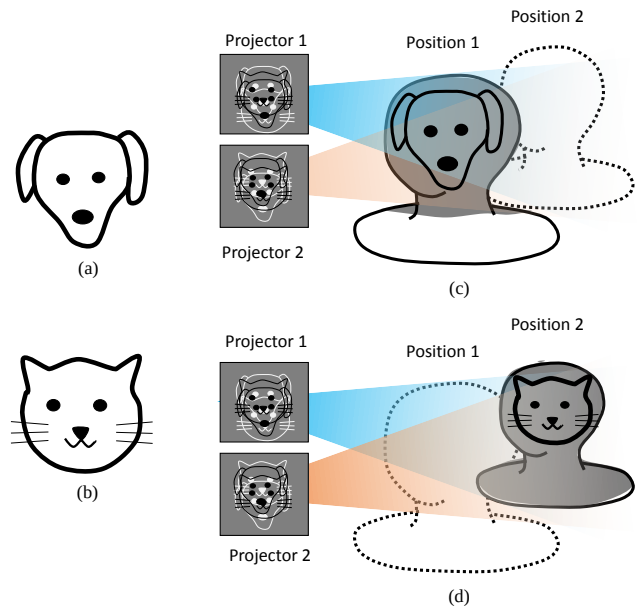


図 2: システム概要

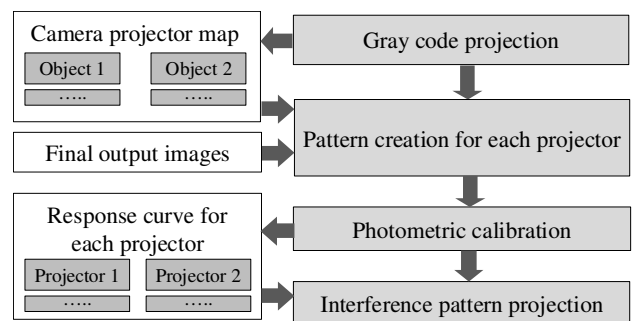


図 3: システム構成

4. 提案手法

4.1 任意形状とプロジェクター画像との対応点の獲得

各プロジェクターで投影するパターンを作成するために投影パターンの各ピクセルを出射した光がオブジェクトのどの位置を投影しているかを正確に知る必要がある。本研究ではグレーコード投影を行うことでこの対応関係を求める。グレーコード投影によって図4(a), (b), (d), (e)のような縞模様のパターンを複数投影し、図4(c), (f)のような縦横それぞれのマップ画像（輝度値が座標）を作られる。このマップ画像の画素値に、プロジェクター上の対応点の x と y 座標の値が格納されている。

重ね合わせにより複数画像を投影するための投影パターンを計算する際には、投影ピクセルと物体上の点との対応関係をこのマップから得る。こうすることで、平面に制約されない、自由形状表面に対しても、投影パターン計算が可能となる。

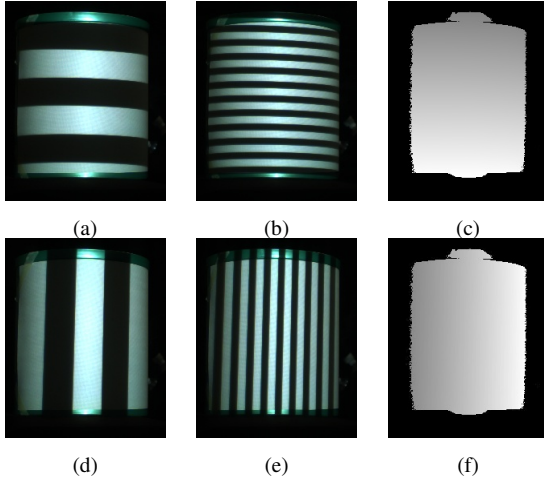


図 4: グレーコード投影

4.2 エピポーラ制約に基づいたパターン生成

Scarzanella らの手法では、全てのパターン情報を一つの行列にまとめて解いていたため、連立方程式の規模が大きくなり、計算量コストも大きかった [1]. ところで、プロジェクタが 2 台の場合には、干渉しあうパターンはエピポーラ線上に限定されるため、エピポーラ線ごとの定式化が可能であり、複数の独立した小さな問題に分割できる. 本システムの投影の様子を模した図を図 5 に示す. プロジェクタ投影面 P_1, P_2 がオブジェクト D_1, D_2 を投影するとき、 P_1 でのピクセル値 $p_{1,1}$ が与える深さ間での光の干渉の影響はエピポーラ平面 V の範囲内に留まる. P_1 での $p_{1,1}$ と干渉する P_2 の $p_{2,1}$ はそれぞれエピポーラ平面に沿ったエピポーラ線 s_1, s_2 が作られる. よって、最適化されたピクセル対応を得るためには、 s_1 に沿ったエピポーラ平面とオブジェクトを交差する t_1, t_2 から、同様に交差する s_2 上の対応ピクセル $p_{2,2}$ を探索する. この作業を反復して行うことにより s_1, s_2 でのピクセル間の計算を行うためのリストが得られる. 最適化のために定式化を行うと以下の式になる.

$$\tilde{\mathbf{i}} = \tilde{\mathbf{A}}\tilde{\mathbf{p}}, \quad (1)$$

$\tilde{\mathbf{i}}$ と $\tilde{\mathbf{p}}$ は前述のエピポーラ幾何に基づいて得られたピクセル間の対応関係行列 $\tilde{\mathbf{A}}$ によって成り立つ投影画像と投影パターンである. また、この式を更に明確に示すと以下の式となる.

$$\begin{cases} \tilde{\mathbf{i}}_1 = \sum_{k=1}^N \tilde{\mathbf{A}}_{1,k} \tilde{\mathbf{p}}_k \\ \tilde{\mathbf{i}}_2 = \sum_{k=1}^N \tilde{\mathbf{A}}_{2,k} \tilde{\mathbf{p}}_k \\ \vdots \\ \tilde{\mathbf{i}}_M = \sum_{k=1}^N \tilde{\mathbf{A}}_{M,k} \tilde{\mathbf{p}}_k \end{cases}, \quad (2)$$

M は投影画像のピクセルの総数で、 N は投影パターンの

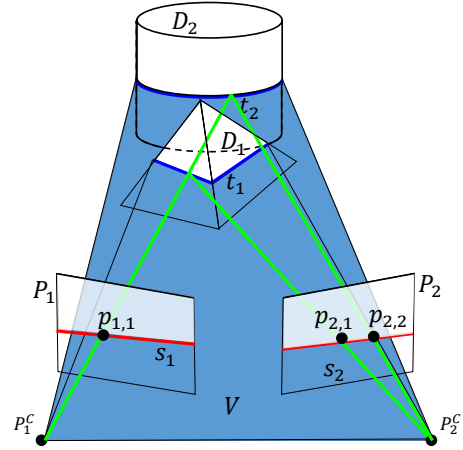


図 5: プロジェクタ間のエピポーラ関係

ピクセルの総数である. これらの明示的な式から、以下の制約付きの最適化計算を行うことで投影パターンは生成される.

$$\tilde{\mathbf{p}}_i^* = \min_{\tilde{\mathbf{p}}_i} \sum_{k=1}^N (\tilde{\mathbf{i}}_j - \tilde{\mathbf{A}}_{j,k} \tilde{\mathbf{p}}_k)^2 \mid \tilde{\mathbf{p}}_k \in [a, b], \quad (3)$$

ここで、 a と b の値をプロジェクタで投影可能な値の範囲、例えば $0 \sim 255$ にすることで、最適化計算後の値（通常はマイナス値から 255 を超える値にまで広がる）が、最初から投影可能な値の範囲に押さえ込まれるため、再スケーリング処理が不要となり、最終的なダイナミックレンジを改善することができる.

4.3 プロジェクタの輝度曲線の校正

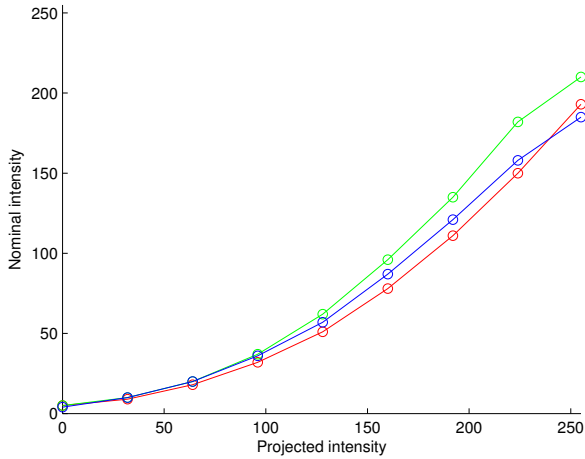
プロジェクタの輝度曲線は、一般的には線形でないことが知られている. また、各プロジェクタにおいて種類の違いや経年劣化等によって輝度曲線は全く異なるものとなる. 従って、提案手法ではプロジェクタ間の輝度曲線の差を無くするための校正が必要となる.

輝度曲線の校正のために、各プロジェクタから図 6(c) のような輝度値が 0 から 255 へ線形的に推移する画像を投影する. 各プロジェクタの輝度値の RGB 値の推移を表した図 6(a),(b) から、プロジェクタの輝度曲線が異なることが分かる. よって、 $f(v) = \alpha x^\gamma$ という式で近似される輝度曲線を線形化する校正を行う. なお、ここでの v は輝度値で、 α, γ は近似曲線のパラメータとなる.

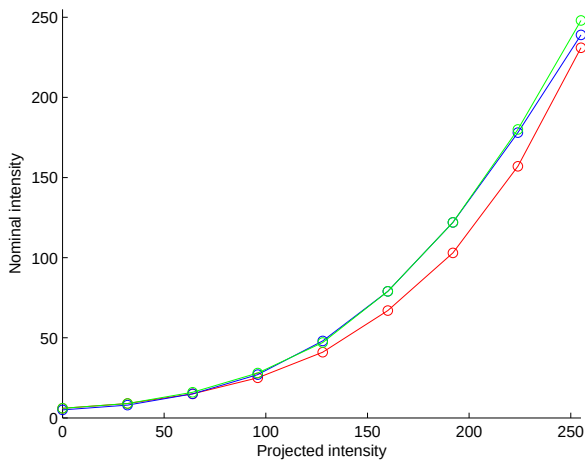
5. 実験

5.1 任意形状への投影

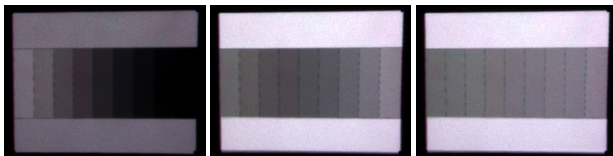
実験風景の様子を図 7 に示す. 2 台の EPSON の LCD プロジェクタを縦置きに配置し、CCD カメラを配置する. 投影画像を図 8 とし、図 9 のグレーコード画像から、図 10 のパターン画像が得られる. パターン画像をそれぞれのプロジェクタから対象物体であるマネキンに投影することで、図 11(a), (c) での片方の深さでは図 8(a) が投影され、



(a)



(b)



(c)

(d)

(e)

図 6: (a),(b) プロジェクター 1,2 の輝度曲線 (c) 輝度校正パターン (d) 輝度校正パターンを逆転させた合成画像 (e) 輝度校正後の合成画像

図 11(b), (d) でのもう片方の深さでは図 8(b) が投影されている。よって、任意形状に対して異なる深さで異なる投影像が投影されていることが分かる。

5.2 形状の異なるオブジェクトへの投影

マネキンへの投影と同じプロジェクタの構成で、形状の異なる 2 つのオブジェクトへの投影を行った。図 12(a),(b) がグレーコードから得られた各プロジェクタの投影画像となる。投影結果を図 13(a),(b) に示す。図 13(a) において 2 つの円柱に対してマンドリルの像が投影されているに対し

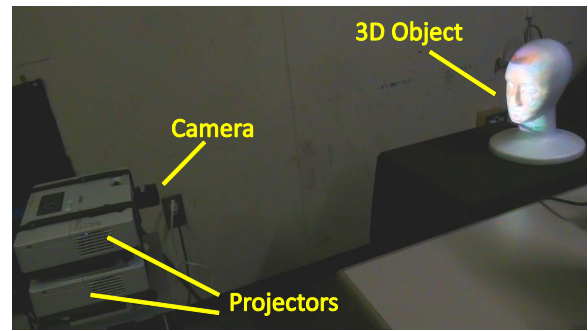


図 7: 実験風景



(a)

(b)

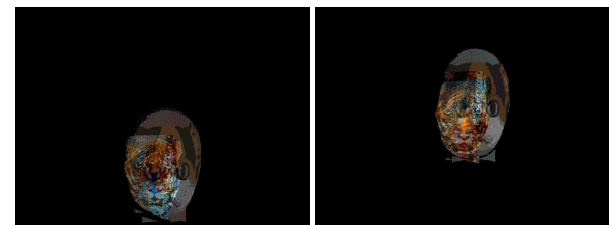
図 8: 投影画像



(a)

(b)

図 9: グレーコード画像



(a)

(b)

図 10: マネキンの投影パターン

て、図 13(b) のように箱を被せることで投影像が変化することが分かる。これにより異なるオブジェクトに対しても異なる投影像が投影されることが分かる。

5.3 半透明平面を用いた同時投影

異なる深さへの同時投影を行うため、プロジェクタの光線が届くように図 15 のような白色の金網を投影面とした。図 14(a),(b) がグレーコードから得られた各プロジェクタの投影画像となる。投影結果を図 16 に示す。各プロジェクタで投影されたパターンが半透明平面に像を投影した後、奥の平面で別の投影像へ合成されていることが分かる。これにより複数の平面に対して異なる像の同時投影を実現することができた。

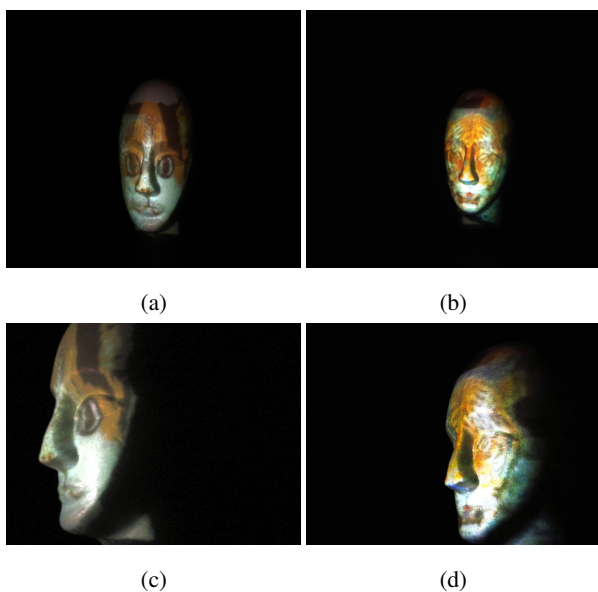


図 11: 2 つの深さのマネキンへの投影

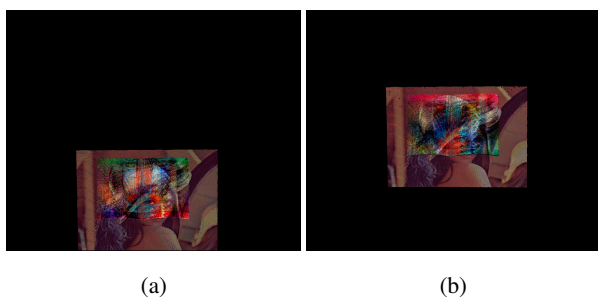


図 12: 形状の異なるオブジェクトへの投影パターン

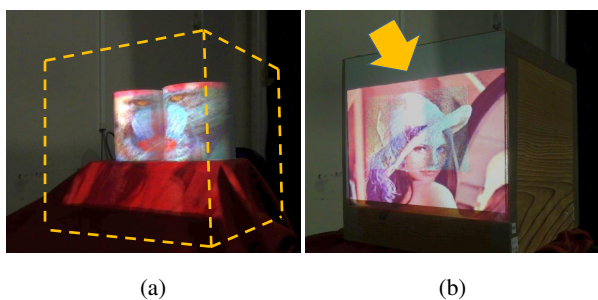


図 13: 形状の異なるオブジェクトへの投影結果

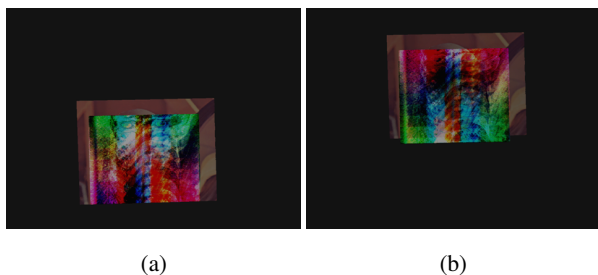


図 14: 半透明平面への投影パターン

5.4 3次元復元を用いた精度評価

本研究での異なる深さでの投影表示の精度を評価するた



図 15: 半透明平面

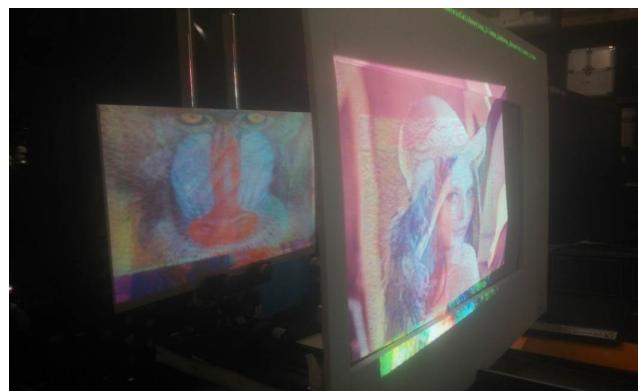


図 16: 半透明平面を用いた同時投影

めに3次元復元を用いて精度評価を用いた。評価方法として、既定の深さ位置で投影されるオブジェクトの3次元形状を正解形状の位置とし、被験者数名にオブジェクトがどの位置で投影像が変化するかを測定してもらい、その位置での形状と正解形状の再投影誤差を評価とする。図17が評価実験の様子である。図18(a), (b)が実際に投影される像である。図19が測定した形状と正解形状の3次元復元結果であり、ほとんどの被験者が正解形状の位置に合わせることができたことが分かる。また、深さごとの再投影誤差はそれぞれ1.47%, 1.26%となり、異なる深さでの投影表示の精度の良さが確認できた。



図 17: 精度評価実験風景

6. 結論

本研究ではグレーコード投影を用いた幾何学的キャリブ

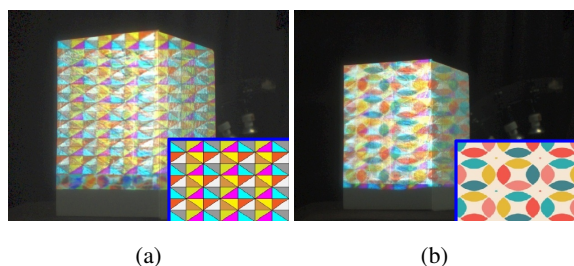


図 18: 精度評価実験の投影像

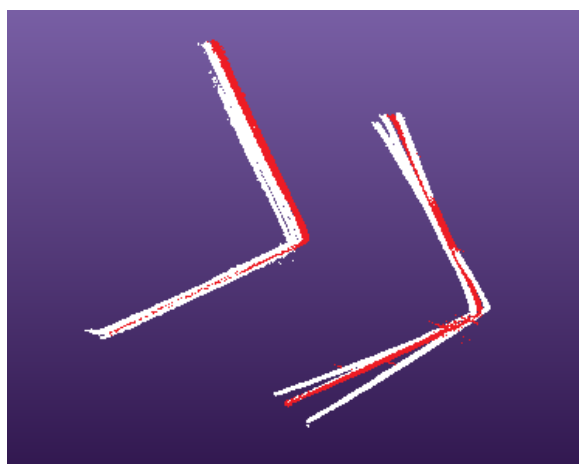


図 19: 形状復元結果

レーションとエビポラ制約に基づいた投影パターンの最適化, またプロジェクタの輝度曲線の校正を行うことにより, プロジェクタと三次元的なオブジェクトの距離に応じて, ダイナミックレンジを確保した異なる投影像が投影することを実現した. これは, 3次元形状の距離評価やプロジェクションマッピングの新しい表現技法と成り得る. 今後の課題として, より精度の高い画像合成とダイナミックレンジの拡大を実現する, 最適なパターンの推定について検討を行う予定である.

参考文献

- [1] Visentini-Scarzarella, M., Hirukawa, T., Kawasaki, H., Furukawa, R. and Hiura, S.: A Two Plane Volumetric Display for Simultaneous Independent Images at Multiple Depths, *PSIVT workshop Vision meets Graphics*, pp. 1–8 (2015).
- [2] 石原葵, 久保尋之, 舩富卓哉 and 向川康博: 画像調整法を用いた4次元光線空間生成による多重スクリーンへの個別情報提示, 研究報告コンピュータビジョンとイメージメディア (CVIM), Vol. 199, No. 25 (2015).
- [3] Nakamura, R., Sakaue, F. and Sato, J.: Emphasizing 3D structure visually using coded projection from multiple projectors, *Computer Vision–ACCV 2010*, Springer, pp. 109–122 (2011).
- [4] Nagano, K., Jones, A., Liu, J., Busch, J., Yu, X., Bolas, M. and Debevec, P.: An Autostereoscopic Projector Array Optimized for 3D Facial Display, *ACM SIGGRAPH 2013 Emerging Technologies*, SIGGRAPH '13, pp. 3:1–3:1 (2013).
- [5] Barnum, P. C., Narasimhan, S. G. and Kanade, T.: A multi-layered display with water drops, *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, Vol. 29, No. 4, p. 76 (2010).
- [6] Chen, Y., Clark, D. W., Finkelstein, A., Housel, T. C. and Li, K.: Automatic alignment of high-resolution multiprojector display using an un-calibrated camera, *Proceedings of the conference on Visualization'00*, IEEE Computer Society Press, pp. 125–130 (2000).
- [7] Schikore, D. R., Fischer, R. A., Frank, R., Gaunt, R., Hobson, J. and Whitlock, B.: High-resolution multiprojector display walls, *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 20, No. 4, pp. 38–44 (online), DOI: 10.1109/38.851748 (2000).
- [8] Godin, G., Massicotte, P. and Borgeat, L.: High-Resolution Insets in Projector-Based Display: Principle and Techniques, *SPIE Proceedings: Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems XIII*, Vol. 6055 (2006).
- [9] Bimber, O. and Emmerling, A.: Multifocal projection: a multiprojector technique for increasing focal depth, *Visualization and Computer Graphics, IEEE Transactions on*, Vol. 12, No. 4, pp. 658–667 (online), DOI: 10.1109/TVCG.2006.75 (2006).
- [10] Nagase, M., Iwai, D. and Sato, K.: Dynamic defocus and occlusion compensation of projected imagery by model-based optimal projector selection in multi-projection environment, *Virtual Reality*, Vol. 15, No. 2-3, pp. 119–132 (2011).