

空間光位相変調器を用いた投影画素均一再配置

寺井 晴香^{*1} 岩井 大輔^{*1*2} 佐藤 宏介^{*1}

Spatially Uniform Projected Pixels Using a Phase-Only Spatial Light Modulator

Haruka Terai^{*1}, Daisuke Iwai^{*1*2} and Kosuke Sato^{*1}

Abstract — 身の周りの実物に映像を投影することで、現実空間とサイバー空間とを継ぎ目なく融合するプロジェクションマッピングでは、非平面や正対していない面も投影対象となる。この際、投影画素の入射角が一定とならず、その結果、対象面上で空間的な投影画素密度が不均一となる。この問題に対し、空間光位相変調器を用いて、レーザプロジェクタからの投影画素を対象面上で配置し直すことで、単一プロジェクタでの投影画素密度の均一化を行う手法を提案する。我々はこれまでの研究で、位相変調を行うための光学システムを構築し、空間光位相変調器へ入力する位相画像の作成方法を提案してきている。本稿では、様々な形状の対象面上における均一画素配置を求める手法を中心に報告する。

Keywords : プロジェクションマッピング、空間光位相変調器 (PSLM)、画素密度均一化

1 はじめに

プロジェクションマッピングは、身の周りの実物にコンピュータで生成した映像を投影することで、その物体の見た目（色、質感など）を変える技術である。現在、エンタテインメント分野で利用されることの多い技術だが、近年では医療 [1] やデザイン支援 [2] など、様々な分野で利用や研究が進められている。

プロジェクションマッピングでは非平面や正対していない面が主要な投影対象となるが、この際、投影面上の画素密度が均一でなくなるという問題がある。この問題によって、提示したい所望の見える対象表面で再現できなくなるため、これまで様々な解決法が提案されてきている。例えば、複数台のプロジェクタを分散配置し、投影面上の各点に対して最も高精細に投影できるプロジェクタを選択して投影を行う技術の研究が進められてきている [3, 4, 5]。複数台のプロジェクタを用いる場合、それらを制御するコンピュータも同時に複数台必要になるため、費用や設置の手間がかかってしまう。一方、単一のプロジェクタでこの問題を解決する手法については、これまで十分な検討がなされてきたとはいえない。

そこで、本研究では、単一のプロジェクタで非平面の投影面上に画素を均一配置する方法を提案する。本稿では特に、均一な画素配置の導出について報告する。

2 投影画素再配置システム

我々はこれまでの研究で、レーザプロジェクタの投射方向を画素毎に制御することで、対象面上の画素密度を変調可能なシステムの研究を進めてきている。ここではまず、投影画素の照射方向を制御する原理について述べたあと (2.1)、それを実現するためのシステム構成を紹介する (2.2)。そして、照射方向を画素毎に割り当てる手法について説明し (2.3)、映像情報メディア学会誌 [7] で行った投射方向変調の原理検証結果を示す (2.4)。

2.1 空間光位相変調器 (PSLM)

空間光位相変調器 (Phase-only spatial light modulator, PSLM) は、光波の振幅は変化させないままで、位相のみを空間的に変調させることができるデバイスである。本研究では、LCOS (Liquid crystal on silicon) モジュールを持つ反射型 PSLM を使用する。

まず、位相画像と呼ばれるデバイス制御用の二次元グレースケール画像を PSLM に入力する。すると、これに基づき LCOS モジュールに制御電圧が加えられ、図 1 の LCOS モジュール左半分のように、液晶分子が回転する。このように液晶分子が倒れることで、液晶の屈折率が変化し、液晶を通過する光の光路長が変化するため、光の位相遅延が生じる。この際、通常は位相のみの変調にはならないが、液晶分子の配向方向と LCOS モジュールへの入射光の偏光方向とを一致させることで、入射光の振幅は変化させないまま、位相のみを変調させることができる。このように、PSLM を用いて光の位相の空間分布を制御することで、光の波面形状を空間的に制御し、画素を投影面上に再配置することができる。

^{*1}大阪大学 大学院基礎工学研究科

^{*2}PRESTO, JST

^{*1}Osaka University

^{*2}PRESTO, JST

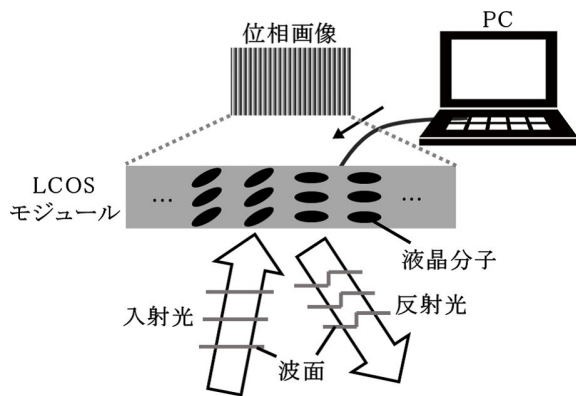


図1 PSLM の動作原理
Fig.1 PSLM

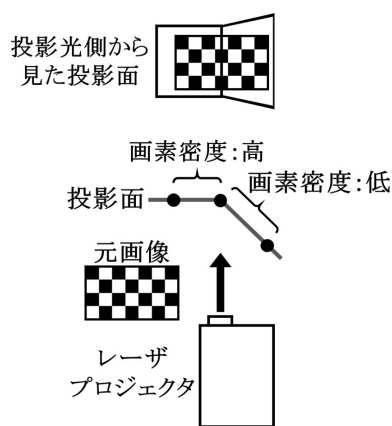


図2 システム概要図 (通常の投影)
Fig.2 System overview diagram
(normal projection)

2.2 提案システム

通常の投影と提案システムを用いた投影の概要図を図2、3に示す。本提案システムの光学系は、偏光ビームスプリッタ (PBS)、直線偏光板、レーザープロジェクタ、PSLM から構成される。PBS は、PSLM で変調された光のみを選択的に投影するために用いている。直線偏光板は、LCOS モジュールの液晶分子の配向方向と同じ方向の直線偏光となるよう配置しており、これにより、光の位相のみが変調されるようにしている。レーザープロジェクタはフォーカスフリーであり、投影面上で画素が重複しないという特徴がある。これにより、投影画素ごとに位相変調させることが可能になる。図4に、構築した原理検証システムを示す。

2.3 位相画像の作成

位相画像は、各画素の投射方向を制御するために PSLM へ入力する画像である。本稿で使用する PSLM では、位相画像の輝度値 0 から 255 (8bit 表現) が位相遅延量 0 から 2π に対応する。各投影画素を所望の 3次元位置へと投射するため、予め位相遅延量 (位相

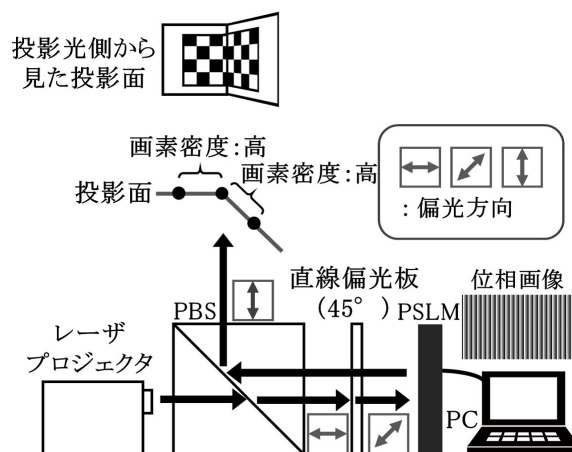


図3 システム概要図
(提案システムを用いた投影)
Fig.3 System overview diagram
(projection when using proposed system)

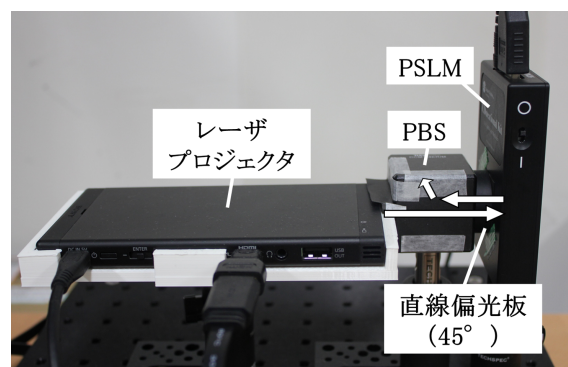


図4 システム構成
Fig.4 Configuration of system

画像の画素値と対応)と投射方向との対応を取得 (校正) し、コンテンツ投影時にはそれを参照することとする。

校正では、位相遅延は PSLM の隣り合う画素同士に位相差がある場合に生じるため、一定の勾配で画素値が空間的に変化するパターンを位相画像として PSLM に入力する。そして、レーザープロジェクタから疎なドットパターンを投影し、各ドットの光線の 3次元空間での直線の方程式を求める。この処理を位相画像の勾配を変えながら実施して、位相遅延量と投射方向との対応を取得する。ドット投影していないプロジェクタ画素の投射方向については、対応が求まっている近傍画素から直線の方程式の各パラメータを補間して求める。

上記の校正処理によって、PSLM で変調される各画素について、位相画像パターンと変調後の投影光が通る直線との関係が求められる。この関係を利用することで、配置したい画素の座標から、その画素に対応する箇所の位相画像パターンが求められる。位相画像生

成の際は、波面形状を空間的に滑らかにするため、画像全体で画素値が滑らかな C^1 連続となるように補正する。

上述の較正処理では、投影される画素の三次元位置を取得することが必要となる。プロジェクタ投影と撮影を行い、三次元位置を取得する手順は以下のようになる。

1. チェッカーパターン撮影を行い、内部パラメタを求める
2. ArUco マーカを印字した平面へグレイコード投影を行い、固定カメラで撮影する
3. ホモグラフィ変換により、投影画素中の代表点を、撮影画像における座標から ArUco マーカを基準とする投影面上の二次元座標へ変換する
4. 1 で求めた内部パラメタを用いて、位置姿勢推定を行う
5. 4 の結果を用いて、投影画素中の代表点を、ArUco マーカを基準とする座標からカメラを基準とする三次元座標へ変換する

2.4 投影画素再配置の原理検証

提案システムを用いて投影画素を再配置できるかどうかを確認する原理検証実験を行った。投影対象として、図5に示す中央でくの字に折れたスクリーンを用意し、投影画素再配置を行うことで、投影面上の画素密度を均一化した。なおスクリーンは、プロジェクタ側から見て左の面が、投影光の光軸に対し垂直になるよう配置しており、右の面は光軸に対して斜めに配置している。各投影画素の目標投射方向は、左右方向のみ変更するよう手動で設定した。図5に示す投影結果より、右面上の投影像が水平方向に伸びていたが、提案手法によって画素が再配置可能であることを確認できた。

3 投影画素均一配置の決定手法

2章で述べたシステムを用いて、投影画素を対象面上で空間的に均一になるよう再配置する。均一画素再配置の手順として、以下のプロセスを採っている。

1. 投影対象面の位置・形状を取得する
2. 投影対象面上における画素均一配置を求める
3. 2章に基づき、均一配置を実現するよう位相画像パターンを求める
4. 3の位相画像を PSLM に入力し投影を行う

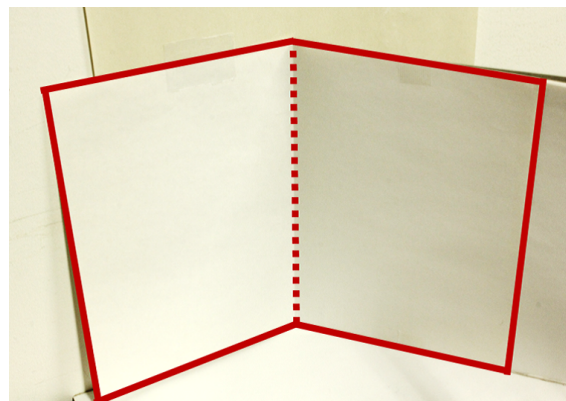


図5 投影スクリーン
Fig.5 Projection screen

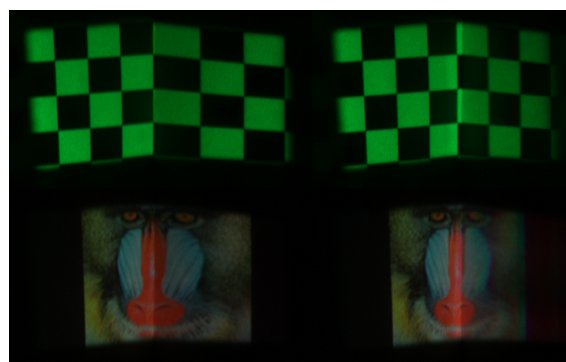


図6 投影結果（左：再配置前、右：再配置後）
Fig.6 Projection result
(left: before modulation,
right: after modulation)

2の均一配置を求めることは、平面上であれば容易であるが、非平面の場合は単純ではない。そこで我々は、以下に述べる方法に拡張した。

プロジェクタの投影光は発散光であり、個々の画素は光源からの距離に比例して拡大される。よって、プロジェクタ光源を頂点とする円錐をその照射領域であるとみなす。全ての投影画素の円錐と対象面との交差形状が同じ半径の真円になるとき、全ての投影画素が均一配置されたことになる。しかしながら、非平面上で、真円の均一配置問題を解くことは単純ではない。そこで我々は、プロジェクタに正対する仮想平面を投影対象とプロジェクタの間に設置し、その仮想平面に各画素の円錐を投影してできる楕円を最密充填する問題を解くことで、所与の目的を達成するアプローチを採用する。このとき、仮想平面上の画素の中心点と、投影面上での画素の中心点とにおける形状の対応関係を用いて、投影面上における所望の投影画素形状（真円）から、仮想平面上における必要な形状（楕円）を求めることができる。

その後、導出された仮想平面上の楕円に対し、Ellip-

soidal Bubble Packing[6] を用いて、楕円を最適配置する。この手法では、全ての画素で、ファンデルワールス力のような画素間に働く力を仮定する。すなわち、仮想平面上で一定距離内にある二つの楕円形状画素において、楕円同士が重畳しない理想距離 r を設定し、画素中心間の距離が r より小さい場合には互いに離れる方向に、 r より大きい場合には互いに近づく方向に力が働くとする。各画素に働く合力を求め、これに応じて画素を移動させる処理を繰り返し、力が平衡に達したら終了する。このようにして、仮想平面における楕円形状画素の最適配置を行うことで、投影面上で均一となるような画素配置を求める。

4 おわりに

本稿では、空間光位相変調器を用いた投影面上への均一な画素再配置手法を提案した。特に、投影面の形状を基に均一な画素配置を求める方法を中心に述べた。今後は、提案システムを用いた実験により、提案手法の有効性を検証していく予定である。

謝辞

本研究は、JST、さががけ、JPMJPR19J2 の支援を受けたものである。

参考文献

- [1] Nishino H, Hatano E, Seo S, Nitta T, Saito T, Nakamura M, Hattori K, Takatani M, Fuji H, Taura K, Uemoto S.: Real-time Navigation for Liver Surgery Using Projection Mapping With Indocyanine Green Fluorescence: Development of the Novel Medical Imaging Projection System; *Ann Surg*, 267(6), 1134-1140 (2018.Jun)
- [2] T. Takezawa, D. Iwai, K. Sato, T. Hara, Y. Takeda and K. Murase: Material Surface Reproduction and Perceptual Deformation with Projection Mapping for Car Interior Design; 2019 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR), 251-258 (2019.March)
- [3] O. Bimber, A. Emmerling: Multifocal projection: a multiprojector technique for increasing focal depth; *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, (12)4, 658-667 (2006.July-Aug)
- [4] Daniel G. Aliaga, Yu Hong Yeung, Alvin Law, Behzad Sajadi, and Aditi Majumder: Fast high-resolution appearance editing using superimposed projections; *ACM Trans. Graph*, 31(2)13, 1-13 (2012.April)
- [5] Nagase, M., Iwai, D., Sato, K.: Dynamic defocus and occlusion compensation of projected imagery by model-based optimal projector selection in multi-projection environment; *Virtual Reality*, 15, 119-132 (2011.June)
- [6] Yamakawa Soji, Shimada Kenji: High Quality Anisotropic Tetrahedral Mesh Generation Via Ellipsoidal Bubble Packing; *Proceedings of the 9th International Meshing Roundtable*, 263-274 (2000)
- [7] 寺井 晴香, 岩井 大輔, 佐藤 宏介: 空間光位相変調器を用いた投影画素の再配置による画素密度補正; *映像情報メディア学会誌*, 75(6), 820-823 (2021.November)