

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

石原 葵^{1,a)} 久保 尋之¹ 船富 卓哉¹ 向川 康博¹

概要：本稿では、複数のプロジェクタを用いて4次元光線空間を生成し、異なる奥行きに配置された複数のスクリーンにそれぞれ異なる画像を同時に投影できる情報提示方法を提案する。各奥行きに異なる画像を投影するための光線空間を計算によって求めると、解となる光線強度が負の値になってしまう場合がある。しかし、実際に負の光を作りだし、プロジェクタで投影することはできない。そこで、我々は実際にプロジェクタが投影できる光線空間で実現できるように人間にとって知覚されにくい範囲で画像調整を行い、異なる距離に配置された多重スクリーンへの異なる画像の同時投影を実現する。

1. はじめに

プロジェクタは大画面表示デバイスとして広く用いられる。最近ではプレゼンテーションのためだけでなくプロジェクションマッピングなど用途の幅も広がっており、通常の平面スクリーンだけでなく立体物や透明スクリーンなど投影対象も様々である。それと同時に視点位置によって異なる投影像を映し出す表示デバイスの研究も盛んに行われている。視点位置・角度によって見え方が異なる光の集合を光線空間と呼ぶ。

Jonesら[1]は、対象である人間を実際に180度以上の方向からカメラで撮影、記録し、複数のプロジェクタを使ってそれらを投影することで、視点位置によって見え方が異なるディスプレイを提案した。Jurikら[2]は、記録した光線空間を複数のプロジェクタで投影する光線空間ディスプレイを実現した。これらは計測に基づいた光線空間を投影している。

それに対して、本研究では図1に示すように、異なる奥行きに配置された複数のスクリーンにそれぞれ異なる画像を提示するシステムの実現を目的として、光線空間の生成を試みる。ここで、プロジェクタの投影方向に沿って異なる位置に配置されたスクリーンの集合を多重スクリーンと呼び、各層のスクリーンにそれぞれ異なる画像情報を提示することを多重スクリーンへの個別情報提示と呼ぶ。前方のスクリーンは一部の光を透過する透過型スクリーンを用いることで、全てのスクリーンに一方向から光を当てることができる。最近、Scarzanellaら[3]によって、複数のプ

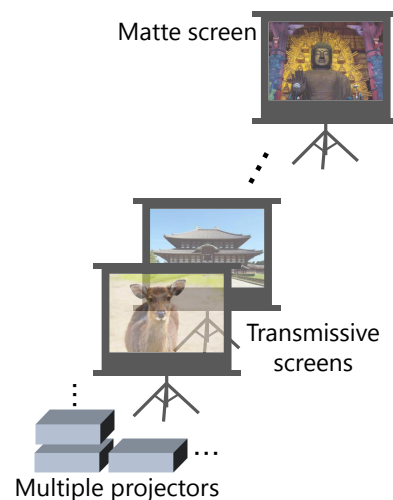


図1 多重スクリーンへの個別情報提示のコンセプト

ロジェクタを用いてスクリーンの距離に応じて異なる投影像を映し出すシステムが提案された。しかし、この手法では各プロジェクタで投影すべき画像を計算によって求めるが、計算結果が負の値を含む場合にはプロジェクタで実現することはできないため、所望の光線空間を生成できることは保証されない。そこで、我々は提示したい画像を適切に調整することにより、プロジェクタで再現可能な光線空間で多重スクリーンへの個別情報提示の実現を試みる。これにより、プロジェクタを単なる大画面表示デバイスではなく、4次元光線空間を生成する装置と捉え、プロジェクタを奥行き方向にも情報を持たせた、新たな情報提示の方法を提案することを目指す。数値実験およびプロトタイプシステムによる実機実験により有効性を検証する。

¹ 奈良先端科学技術大学院大学

^{a)} isihara.aoi.hv5@is.naist.jp

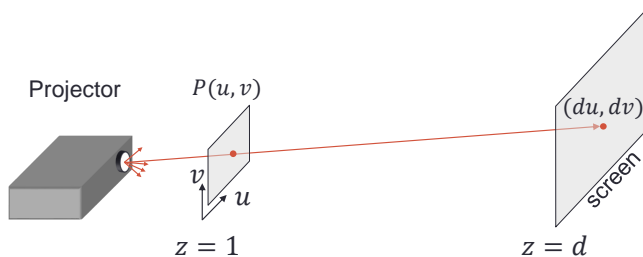


図 2 一台のプロジェクタによる通常の投影

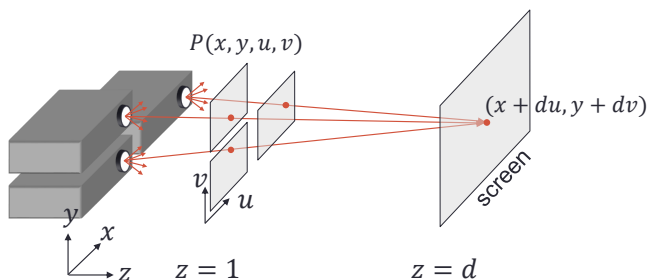


図 3 複数プロジェクタにより生成される4次元光線空間

2. 多重スクリーンへの個別情報提示

2.1 4次元光線空間

1台のプロジェクタで空間に光線を投影すると、図2に示すように、光源から出た光がレンズを通して (u, v) 方向に広がり、スクリーン上で反射して投影像が映し出される。このとき、スクリーンの位置 z が変化しても、プロジェクタからの距離 d に応じて投影像の大きさが変化するだけで、プロジェクタのフォーカスの問題を無視すれば、投影される画像 $P(u, v)$ のパターンに変化は起こらない。

一方、複数のプロジェクタを用いると図3のように光線空間を表現することができる。3次元空間中 (x, y, z) に置かれた複数のプロジェクタから (u, v) 方向に発せられる光線は5次元の plenoptic function[4], $P(x, y, z, u, v)$ によって表わされる。空間中を伝播する光の強度は一定に保たれると仮定すると4つのパラメータで表現でき [5], 複数のプロジェクタで4次元光線空間 $P(x, y, u, v)$ を生成することができる。 $z = d$ にスクリーンを配置すると、プロジェクタから発せられた光線 $P(x, y, u, v)$ がスクリーン上の点 $(x + du, y + dv)$ に到達する。スクリーン上の各点における照度は複数のプロジェクタから発せられた光線の総和によって表現され、距離 d に応じて光線の組み合わせは固有の組み合わせをもつ。そのため、1台のプロジェクタを用いた場合と異なり、スクリーンに映し出されるパターンを変化させることができる。この性質を利用して、本来、提示したかった情報を任意の距離にあるスクリーン上に個別に提示する。

2.2 4次元光線空間の生成

先述のとおり、各スクリーンに映し出されるパターンは、

複数プロジェクタで投影した光線の総和として計算することができる。多重スクリーンへの個別情報提示を実現するためには、各スクリーンに映し出すべきパターンが与えられたとき、各プロジェクタからどのようなパターンを投影すればよいかを求める問題となる。ここでは、プロジェクタの位置関係は図3のように与えられているものと仮定して、各プロジェクタの投影画像を生成する手法について述べる。ある奥行き $z = d$ のスクリーン上に提示する情報である目標画像の画素 (a, b) の輝度値 $I_d(a, b)$ は、位置 (x, y) に置かれた k 台の各プロジェクタから発せられる光線 $P_{(x,y)}(u, v)$ の和として、以下のとおり定式化される。

$$I_d(a, b) = \sum_{(x,y)} P_{(x,y)}(u, v) \quad (1)$$

ここで、

$$\begin{cases} a = x + du \\ b = y + dv \end{cases}$$

である。目標画像の注目画素にどの光線が到達するのかを表わす行列 A を用いると線形システムとして表すことができる。

$$\mathbf{I} = \mathbf{A}\mathbf{P} \quad (2)$$

ただし、

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_1 \\ \mathbf{I}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{I}_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{11} & \cdots & \mathbf{A}_{1k} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{A}_{d1} & \cdots & \mathbf{A}_{dk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{P}_1 \\ \mathbf{P}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{P}_k \end{bmatrix} \quad (3)$$

である。行列 A は画素 $I_d(a, b)$ が光線 $P_{(x,y)}(u, v)$ によって照らされている場合は対応する要素が1, そうでなければ0の値を持つ行列で、プロジェクタとスクリーンの幾何学的関係から求めることができるため既知である。この線形システムを解くことでプロジェクタの投影画像 \mathbf{P} を求めることができる。

3. プロジェクタで生成可能な光線空間

3.1 光線強度の非負制約

式(2)の線形システムを解くと、多くの場合で負の値が解に含まれる。これは、プロジェクタから負の強度を持つ光線を投影することが必要になることを意味する。しかし、実際に負の強度をもつ光を作り出すことはできない。そこで、解に負の値が含まれないように非負制約をつけた最小二乗法によりプロジェクタの投影画像 \mathbf{P} を求める。

$$\tilde{\mathbf{P}} = \underset{\mathbf{P}}{\operatorname{argmin}} \|\mathbf{A}\mathbf{P} - \mathbf{I}\|_2^2 \quad \text{subject to } \tilde{\mathbf{P}} \geq 0. \quad (4)$$

3.2 画像調整

実際にプロジェクタから投影できるように非負制約を付

けて解を求めると、負の値は含まれなくなるものの、残差 $\|A\hat{P} - I\|$ が大きくなってしまい、スクリーン上には目標画像とは異なるものが映し出されてしまう。画像の全体的な明るさを変えることは、厳密には提示する情報の内容自体を変えてしまっているということに相当する。しかし、画像の輝度値で表現された明るさを表示デバイスで見たとき、その物理的な明るさは様々な要因で変化する。例えば、プロジェクタの強度やスクリーンの反射特性、環境光、また、観測側である人間の目の特性やカメラの絞り値、レンズの特性に応じて、実際に見えるものの明るさや色は異なる。つまり、画像の全体的な明るさを変えることは提示したい情報の内容を変化させていることにはならないと我々は考える。このとき、数値的には同じ大きさの残差でも、人間が見て違和感の大きい差と小さい差とが存在し、数値的残差が小さいからといって、必ずしもよい投影結果になっているとは限らない。人間の知覚特性の数理モデルが明らかであればこの問題に対応することも考えられるが、現段階ではこれも現実的ではない。そこで、我々は人間の知覚において影響が少ないと考えられる範囲において目標画像 I を調整し、正の強度のみを用いた場合にでも比較的残差が小さくなるような光線空間を解として選ぶことを考える。塚本ら [6] は、複数プロジェクタで投影する際の色補正に着目し、“見え方”の観点から目標画像の明るさを適切にスケールリングすることで複数台のプロジェクタの重なりによる領域間の明るさのばらつきを抑えられる効果がある [7] ことを示している。これに基づき、調整の比較的単純な方法として、目標画像 I の全体的な明るさを調整することで、プロジェクタで生成できる光線空間のみで本システムを実現することを考える。こうして調整された目標画像 I' を新たな入力として式 (4) のシステムに与え、光線空間を生成する。

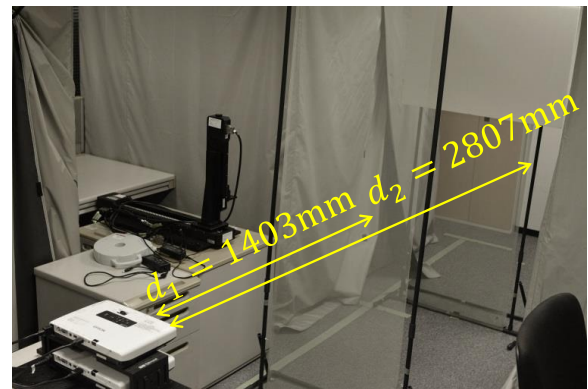
4. 実験

4.1 実験装置

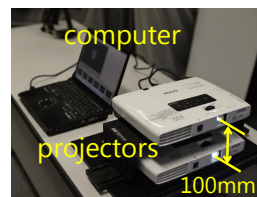
本研究では、図 4 に示すように、2 台のプロジェクタ (EPSON EB1771-W) と 2 層のスクリーンからなるシステムを構築した。プロジェクタは 100[mm] 離して積み重ねて配置する。本実験に用いたプロジェクタの解像度は 1280×800 であるが、計算においてはプロジェクタの解像度を 200×200 とする。スクリーンの 1 層目には光が部分的に透過するよう網戸に用いられる網を、2 層目には白色の板を用いた。

4.2 画像調整を用いない場合

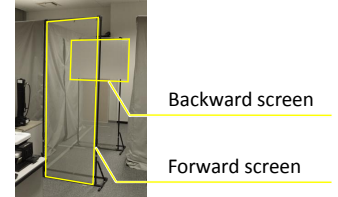
まず、画像調整を用いずに実験を行った結果を示す。図 5(c)(e) に示すように、距離 d_1 にある 1 層目のスクリーンに「SALE」とテキストが書かれた画像 (200×100)、距離 d_2 にある 2 層目のスクリーンにフルーツが撮影された画



(a) プロジェクタと多重スクリーンの位置関係



(b) 2台のプロジェクタ



(c) 2層のスクリーン

図 4 実験環境

像 (200×150) が目標画像である。図 5(a) と (b) がそれぞれ計算によって求められた下側のプロジェクタと上側のプロジェクタの投影画像 \hat{P} である。プロジェクタから投影して距離 d_1 で提示された結果が図 5(d)、距離 d_2 で提示された結果が (f) である。これを見てみると、「SALE」の背景部分にテクスチャが表れており、フルーツの右下部分にも目標画像に無いテクスチャが表れている。また、フルーツの下から 3 分の 1 の位置で明暗の境界が確認できる。目標画像と投影結果の誤差を見てみると図 5 に示すように誤差が局所的に大きく発生しており、これが目標画像にはなかったテクスチャを知覚させた原因だと考えられる。よって、目標画像を多重スクリーン上に提示することができたとは言えない。実環境で投影した様子を図 6 に示す。図 6(b)(c) は 1 層目と 2 層目のスクリーンの情報提示部分の拡大図である。これより、各層のスクリーンにそれぞれ図 5(d) と (f) の結果と同様のものがそれぞれ同時に映し出されていることが確認できる。

4.3 画像調整を用いる場合

次に、目標画像の画像調整を加えて実験を行った。画像編集ソフトウェア GIMP2.8 により、図 5(e) に示す距離 d_2 のスクリーンに提示したい目標画像の全体的な明るさを調整する。全体的な明るさの変化が投影結果にどう影響するかを見るため、図 7(a)(b)(c)(d) に示すように、平均輝度値 $\mu = 126.3, 167.5, 189.2, 211.2$ の 4 段階の明るさの画像を用意する。 d_1 のスクリーンに投影する目標画像は 4.2 節の実験と同じ画像 (図 5(c)、平均輝度値 $\mu = 244.6$) を用いる。画像調整により得られた新たな目標画像 I'_2 との組み合わせ $I' = [I_1 I'_2]^T$ を式 (4) に与え、プロジェクタからの投影



図 5 画像調整を用いなかった場合の結果



(a) 2層の多重スクリーン



(b) 距離 d_1 の投影結果 (c) 距離 d_2 の投影結果

図 6 プロトタイプシステムによる多重スクリーンへの投影結果



図 7 画像調整を用いた場合の結果

画像をそれぞれ求める。図 7(e)(f)(g)(h) がそれぞれの組み合わせによって得られた投影結果である。画像を調整することによって、投影結果が変化していることがわかる。図 7 の投影結果と目標画像 I' の RMSE を比較した結果を表 1 に示す。 d_1 と d_2 の目標画像の平均輝度値の差が大きいほど RMSE が大きくなり、投影結果も劣化している。つまり、目標画像間の平均輝度値の差が大きいほど負の強度を持つ光線が必要になるが、作り出すことができないため誤差が大きくなったと考えられる。元々の目標画像 I と投影結果について、正規化相互相関 (NCC) を用いて比較を行った結果を表 2 に示す。画素の輝度値がどれくらい目標画像

に近いだけではなく、全体的にどの程度似ているかを評価するため NCC を用いる。RMSE が大きかった投影結果では本来とは異なるテクスチャが表れたため小さく、RMSE が小さかった投影結果では平均輝度値は異なるがそれ以外はほぼ再現できているため大きな値になっている。全体的な印象として本来の目標画像と近い。このように、画像調整によりプロジェクタで再現できる光線空間で多重スクリーンへの個別情報提示を実現できることを確かめた。

表 1 RMSE

| 平均輝度値 | 126.3 | 167.5 | 189.2 | 211.2 |
|-------|--------|--------|-------|-------|
| RMSE | 29.896 | 19.175 | 7.17 | 0.156 |

表 2 NCC

| 平均輝度値 | 126.3 | 167.5 | 189.2 | 211.2 |
|--------------|-------|-------|-------|-------|
| NCC(d_1) | 0.943 | 0.948 | 0.992 | 1.000 |
| NCC(d_2) | 0.965 | 0.982 | 0.995 | 1.000 |

5. おわりに

本稿では、複数のプロジェクタを用いて 4 次元光線空間を生成し、多重スクリーンへ個別に情報を提示する手法について述べた。画像調整を行うことでプロジェクタで再現可能な光線空間で実現できることを示した。また、実環境で投影することでシミュレーションとほぼ同様の見え方を再現できることを確かめた。

画像調整は目標画像の組み合わせやスクリーンの層数、位置関係に依存する。また、プロジェクタで再現できるように画像の全体的な明るさを調整することにより、コントラストが低下するという問題も発生する。現段階では画像編集ソフトを用いた画像の全体的な明るさの調整に留まっているが、今後の課題として、コントラストも考慮した評価関数を定義し、明るさの調整を最適化に盛り込むなどして解決していきたい。また、人間の視覚特性を考慮した新たな画像調整手法についても検討していきたいと考えている。

参考文献

- [1] Andrew Jones, Jonas Unger, Koki Nagano, Jay Busch, Xueming Yu, Hsuan-Yueh Peng, Oleg Alexander, Mark Bolas and Paul Debevec. "An Autostereoscopic Projector Array for Interactive Digital Humans". In *SIGGRAPH 2015, ACM Press*, 2015.
- [2] Joel Jurik, Andrew Jones, Mark Bolas and Paul Debevec. "Prototyping a Light Field Display Involving Direct Observation of a Video Projector Array". In *IEEE PROCAMS 2011*.
- [3] Marco Visentini-Scarzanella, Takuto Hirukawa, Hiroshi Kawasaki, Ryo Furukawa and Shinsaku Hiura. "Simultaneous independent projections at multiple depths using a multi-projector system", *The 18th Meeting on Image Recognition and Understanding (MIRU)*, 2015.

- [4] Edward H. Adelson and James R. Bergen. "The Plenoptic Function and the Elements of Early Vision", *Computational Models of Visual Processing*, M. Landy and J. A. Movshon (eds), Cambridge, MA: MIT Press, 1991, pp. 3-20.
- [5] Steven J. Gortler, Radek Grzeszczuk, Richard Szeliski and Michael F. Cohen. "The Lumigraph", In *Proc. SIGGRAPH*, 1996, pp. 43-54.
- [6] 塚本潤, 岩井大輔, 加嶋健司, "分散最適化にもとづく協調型映像投影システムによる投影色補正", *日本バーチャリアリティ学会論文誌*, vol.20, No.2, pp.143-150, 2015.
- [7] D. Wang, I. Sato, T. Okabe and Y. Sato. "Radiometric compensation in a projector-camera system based on the properties of human vision system", In *Proceedings of IEEE International Workshop on Projector-Camera Systems*, 2005.