

多重スクリーンへの個別情報提示のための輝度勾配を考慮した4次元光線空間の生成

石原 葵[†] 久保 尋之[†] 船富 卓哉[†] 向川 康博[†][†]奈良先端科学技術大学院大学

Generating 4D Light Field Considering Luminance Gradient for Individual Image Projection onto Layered Multi-Screens

Aoi ISHIHARA[†], Hiroyuki KUBO[†], Takuya FUNATOMI[†], Yasuhiro MUKAIGAWA[†][†]Nara Institute of Science and Technology

〈あらまし〉 本研究では、複数のプロジェクタを用いて4次元光線空間を生成する手法を提案し、これにより異なる距離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個別に表示する新たな情報提示方法を実現する。複数のプロジェクタを設置して光線を投射するとき、各スクリーンには異なるプロジェクタから発せられた複数の光線が到達するが、その組み合わせはプロジェクタとスクリーンとの位置関係に応じて異なる。そこで、我々は各スクリーンに表示したい目標画像の輝度勾配を保つことを制約条件にして、各プロジェクタから投影する画像を決定する。これにより、従来法と比較してコントラストを高く保った場合でもアーティファクトの少ない画像を投影可能となる。提案手法の有用性を確かめるためシミュレーション及び実環境実験を行い、その結果を示す。

キーワード：4次元光線空間, 複数プロジェクタ, 多重スクリーン, 個別情報表示

<Summary> In this paper, we propose a novel method to generate the 4D light field, which enables to project different images onto layered multiple screens with projector array. When the light rays emitted from the projectors pass through the layered screens, each layer has unique combination of light rays depending on its relative position to the projectors. As a result, it is possible to display the images individually onto each screen by projecting appropriate images from the projector array. In this research, by minimizing the difference between target images and projected images in gradient domain, we are able to display the images more accurately compared with previous works according to the simulated experiments. Furthermore, to validate the effectiveness of our research, we also describe some real-world experiments.

Keywords: 4D light field, multi-projector, layered multiple screen, individual image projection

1. はじめに

近年のコンピュータの進歩にともなう計測・保存技術の向上により、情報は高次元化し、その量も膨大となった。あらゆる分野で情報の高次元化や情報量の増加が進む一方、視覚情報との接点はディスプレイや映画館のスクリーンのような固定された2次元平面上での表示が主流である。この制約は実世界を形成する3次元物体や高次元な情報表現に必ずしも適してはいない¹⁾。

そこで、これらの問題を解決するために新しい表示方法やデバイスの研究がされてきた。光線空間ディスプレイによる3次元画像の表示や、Tangible User Interface (TUI) の概念に基づいた3次元物体の知覚と3次元物体の内部表示に関する研究、ディスプレイと透過型スクリーンを用いた重畳提示

による効率的な情報表示などがある。

本研究では、複数のプロジェクタを用いて4次元光線空間を生成し、これによって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提示する、新たな情報提示手法の提案を目的とする(図1)。ここで、異なる距離に配置された複数のスクリーンを多重スクリーン、各スクリーンに表示したい画像を目標画像と呼ぶ。スクリーンの位置に応じて異なる画像を表示することができれば、複数の情報を重畳表示できるため情報の効率的な伝達などが可能となる。また、TUIのように3次元物体のスライス画像を表示することで、ユーザが空間的な広がりを感じながら3次元物体の内部を観察することができる。本研究は従来研究と異なり、センサを用いないことが特徴で、時間遅れがなく、高いインタラクティブ性を有する。後述する本手法を用いることで、例

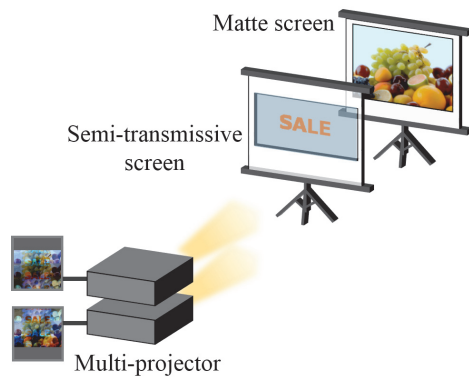


図1 複数プロジェクタを用いた多重スクリーンへの個別情報提示の概念図

Fig. 1 Abstract of individual image projection onto layered multi-screens by multi-projector

例えば商材写真と宣伝文句を別々に投影する(図1)といった柔軟な表示が可能である。これにより、閲覧者がスクリーンの位置を変えることによって表示される映像が異なる、新たなデジタルサイネージ用デバイスへの応用が期待される。さらに、透過型スクリーンによる複数の層構造をもつ3次元物体に対するプロジェクションマッピングなど、新たなインタラクティブメディアとしての役割を担うことができると考えられる。

2. 関連研究

多視点から異なる画像が見えるように空間・角度的な光線の分布を定式化した光線空間という概念が1990年代に提案されている^{2),3)}。このような光線空間を再現するディスプレイは、これまで多数のプロジェクタを用いて実現されてきた。

SteeleとJaynesは、 5×4 のプロジェクタアレイを用いてこのプロトタイプを構築した⁴⁾。空間解像度と角度分解能はトレードオフの関係にあり、ある視点から見た画像の解像度はプロジェクタの台数である 5×4 で非常に粗い。WojciechとPfisterは、それぞれ16台のカメラとプロジェクタ、そして縦方向に指向性があるレンチキュラーレンズを用いて光線空間ディスプレイを構築した⁵⁾。16視点から取得した映像をもとにリアルタイムで画像をアライメントし、16台のプロジェクタからレンチキュラーレンズに対して投影することで、空間解像度が 1024×768 、水平方向16視差の提示を実現した。Agócsらは、ホログラフィックスクリーンを64台のXGAのプロジェクタアレイから発せられた光線を通して見ることで、水平方向45度の範囲で視点位置に応じて非常に滑らかに画像が変化する光線空間ディスプレイを実現した⁶⁾。Naganoらは、110度の視野角を持った3次元ディスプレイとして、実寸大で人物の顔を提示するシステムを構築した⁷⁾。水平方向の視差については72台のプロジェクタを円弧上に並べ、中央に置かれたレンチキュラースクリーンへ投影することで表現している。垂直方向の視差についてはMicrosoft Kinectによってユーザの頭部位置を求め、それに合わせた画

像の投影を行っている。

また、SawadaとKakeyaは、CIVI:Coarse Integral Volumetric Imagingディスプレイで空中に3次元画像を映し出し、そこに挿入されたアクリル板に交差する3次元物体の断面画像を表示した⁸⁾。CIVIディスプレイ⁹⁾は、ディスプレイパネルを複数重ねたものと凸レンズアレイを組み合わせたもので光線空間を再現することにより、視点位置に応じて変化する3次元像を空間中に映し出す。アクリル板の位置・姿勢は6自由度のモーションセンサで計測している。

以上の試みはいずれも、実在のシーンについて光線空間を取得し、それを再現するディスプレイの研究と位置付けることができる。これに対して本研究では奥行き異なる複数のスクリーンにそれぞれ異なる画像を投影することを目的とした光線空間ディスプレイの実現を試みる。この場合、実在する光線空間とは異なり、情報提示に必要な光線空間を生成しなければならない。またそれが理論上構成できたとしても、必ずしも実現可能なものになるとは限らない。本論文ではそのような問題の取り扱いに主眼を置く。関連研究として、ボリュームデータ提示を目的とした研究としては他にも、従来の2次元ディスプレイに対してインタラクティブ性を追加することにより、実物体の空間性とユーザの直感的な感覚を利用したTUIの概念に基づいた提示を実現する研究がある^{10),11)}。

Cassinelliらは、時間方向にも情報をもつ画像を奥行き方向に変形可能なスクリーンに対してプロジェクタで投影し、断面画像を表示した¹²⁾。スクリーンの形状をセンサで検出することにより、時間方向にボリュームをもった情報を提示している。時空間情報を特定の方法で視覚化し、スクリーンを動かしながら探索を可能とするVSD: Volume Slicing Displayがある^{1),13)}。VSDは軽量のスクリーンとプロジェクタを組み合わせ、センサで検出したスクリーンの位置・姿勢に応じて、任意の断面画像を表示する。ユーザはスクリーンを空間内で自由に移動させ、傾けることができる。映し出される画像はスクリーンの動きに応じて変化するため、違和感なく物体の3次元形状を感じながら、物体の任意断面像を観察することができる。

TUIの概念に基づく3次元表現に関する研究では、センサでユーザの動きを計測し、それに応じて高次元情報を2次元に縮退させてプロジェクタから投影している。そのため、ユーザの動きの計測と解析にわずかながらもレイテンシが生じ、2層以上の情報を同時に表示することは想定していない。

一方で、近年、プロジェクタの台数や配置方法を工夫することで同時に2層以上の画像を表示することを試みた研究も報告されている。Scarzanellaらは、2台のプロジェクタを用いて、プロジェクタからの距離が異なる2層のスクリーンにそれぞれ異なる情報を同時に提示する手法を提案した¹⁴⁾。センサを用いたユーザの計測を必要としないため、遅延なしに奥行き異なる複数のスクリーンにそれぞれ異なる画像を提示することができるといえる。

しかし、実際のプロジェクタは負の光量を発生させられず、また発生できる正の光量の上限がある。そのため、2層以上のスクリーンに異なる画像を同時に提示するためには、画像の輝度値のスケーリングによってダイナミックレンジを全体的に縮小せざるを得ず、結果的に表示される画像のコントラストは低下しがちであった。このことは、視認性の悪化を招き、情報提示の観点からは好ましくないと考えられる。これらに対して、本研究では提示される情報のコントラストの低下を抑えつつ、情報をプロジェクタによって生成できる範囲に収める手法について提案する。

3. 多重スクリーンへの個別情報提示

3.1 4次元光線空間と各スクリーンの投影画像との関係

1台のプロジェクタで光線を発生させるとき、その光線は、プロジェクタから単位長離れた位置につくる平面 $z = 1$ 上を通過する点 (u, v) を用いて、 $P(u, v)$ と表すことができる。この光線は距離 d につくる平面 $z = d$ において点 (du, dv) を通過し、そのような光線は一意に定められる (図2)。つまり、1つしか発生させることができない。

一方、複数のプロジェクタを用いると図3に示すように、発生させることのできる光線の自由度は格段に向上する。プロジェクタは $z = 0$ の平面上に設置するものとする、ある点 (x, y) に設置したプロジェクタから平面 $z = 1$ 上の点 (u, v) に向かって発生した光線は、4次元の光線空間 $P(x, y, u, v)$ で表される^{2), 15)}。ただし、空間中を伝播する光の強度は減衰しないものと仮定する。この光線は平面 $z = d$ において点 $(x + du, y + dv)$ を通過するが、図からも明らかなように、平面 $z = d$ 上の点 $(x + du, y + dv)$ を通過する光線は、任意の位置のプロジェクタから発生可能である。

ここで、各平面に透過型スクリーンを設置するものとし、光線はスクリーンによって遮蔽されることはないものと仮定すると、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その点に到達する光線強度の総和となり、スクリーンの位置に応じてどのプロジェクタのどの光線が到達するのか、その組み合わせには違いが生じる。この性質を利用すると、スクリーンを設置する距離に応じて投影されるパターンを変化させ、異なる情報を個別に提示することが可能となる。ただし、プロジェクタは設置の際に相互に干渉することなく、また絞りは無限小であるような理想的な環境を前提とする。実際には、プロジェクタを設置する際の筐体同士の接触や被写界深度などにより振る舞いが異なる場合もある。これに対し、本研究ではプロジェクタ同士を重ねて設置することで干渉をなくし、またすべてのプロジェクタの被写界深度内への投影を扱うことで、これらの問題を生じない範囲で議論するものとする。

次に、 K 台のプロジェクタを用いて4次元光線空間を生成し、 L 枚のスクリーンに異なる画像を表示させることを考える。 K 台のプロジェクタで l 番目のスクリーンのつくる平

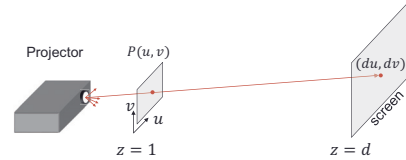


図2 一台のプロジェクタによる通常の投影
Fig. 2 Usual projection with a single projector

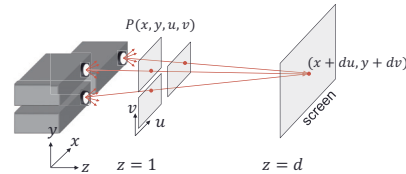


図3 複数プロジェクタにより生成される4次元光線空間
Fig. 3 4D light field generated by multi-projector

面に映し出された像の輝度分布 (以降、投影画像と呼ぶ) を $I_l(w, h)$ とおくと、投影画像は k 台目のプロジェクタから発せられる光線空間 $P_k(u, v)$ を用いて式 (1) で表される。

$$I_l(w, h) = \sum_{u, v} \sum_k A_{l,k}(w, h, u, v) p_k(u, v) \quad (1)$$

ただし、 $p_k(u, v)$ は光線 $P_k(u, v)$ の光量、 $A_{l,k}(w, h, u, v)$ は、 k 番目のプロジェクタから発生した光線 $P_k(u, v)$ が l 番目のスクリーンにおける位置 (w, h) に与える寄与の大きさを表す関数である。つまり、光線 $P_k(u, v)$ が l 番目のスクリーンにおける位置 (w, h) に到達するなら $A_{l,k}(w, h, u, v) = 1$ 、そうでなければ $A_{l,k}(w, h, u, v) = 0$ となる。なお、光線とスクリーンの解像度は必ずしも1対1の関係にないので、サブピクセル単位で寄与を考慮する場合には $A_{l,k}(w, h, u, v)$ の成分は小数値になる。また、スクリーンへの入射角や反射率が異なる場合にも同様に小数値によって表される。いずれもプロジェクタとスクリーンとの関係をあらかじめキャリブレーションしておくことによって、 $A_{l,k}(w, h, u, v)$ は容易に求めることができる。なお、本稿では簡単のためプロジェクタのガンマ特性は $\gamma = 1$ として説明する。すなわち、プロジェクタに入力する画素の輝度値と生成される光線の光量とは線形の関係にあり、光量 $p_k(u, v)$ は画素の輝度値と同一視できるものとする。ただし、実際のプロジェクタではそれらは必ずしも線形関係になっているわけではないが、後述するキャリブレーションにより線形関係に変換することが可能である。なお、Scarzanella らの論文¹⁴⁾ に述べられているように、スクリーンが平坦で、プロジェクタの投影が透視投影とみなせる理想的な環境の場合、1台のプロジェクタがつくる光線空間の断面はホモグラフィ変換で表現されるため、 $A_{l,k}(w, h, u, v)$ は本質的にホモグラフィ変換と等価である。

式 (1) から、 $I_l(w, h)$, $l \in [1, L]$ と $p_k(u, v)$, $k \in [1, K]$ との間には、次の関係が成り立つ。

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{1,1} & A_{1,2} & \cdots & A_{1,K} \\ A_{2,1} & A_{2,2} & \cdots & A_{2,K} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{L,1} & A_{L,2} & \cdots & A_{L,K} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \vdots \\ p_K \end{bmatrix} \quad (2)$$

なお、 $I_l(w, h)$ を 1 次元の列ベクトル I_l と表記した。

最終的に、これらをまとめた次式で目標画像と光線空間との関係を表すことができる。

$$I = Ap \quad (3)$$

3.2 各スクリーンに画像を個別情報提示するための光線空間の算出

3.2.1 輝度差の最小化による手法

いま、各スクリーンに個別表示したい目標画像を改めて I_l とおくと、式 (3) を満たす光線空間 p を求め、複数のプロジェクタからこれを投影することによって、各スクリーンへ目標画像を個別に表示できる。このとき、式 (3) を解くために、目標画像 I と投影される画像 Ap との輝度差を最小化するように、次式のとおき誤差関数を設計してその最小二乗解を求める。

$$\hat{p} = \underset{p}{\operatorname{argmin}} \|I - Ap\|^2 \quad (4)$$

ただし、式 (3) の解には負の値が含まれることがある。実際のプロジェクタからは負の強度をもつ光線を生成することはできないため、計算によって所望の画像を個別表示するための光線空間が求められたとしても、実際のプロジェクタの組み合わせでは実現不可能であることを意味する。この問題を解決するために、Scarzanella ら¹⁴⁾は式 (4) の結果にスケールリングとオフセットを加えることで、プロジェクタが投影可能なレンジに値の正規化を施した。しかし、この手法では投影される画像のコントラストが低減することが課題として述べられている。

そこで、本研究の予備実験として、実際にプロジェクタから投影できるように式 (4) に対して非負制約を付けて次式のとおき定式化し、解を求めた。

$$\hat{p} = \underset{p}{\operatorname{argmin}} \|I - Ap\|^2 \quad \text{s.t. } p \geq 0 \quad (5)$$

図 4 (a) には各スクリーンに投影したい目標画像、(b) には求めた光線空間によって投影される投影画像のシミュレーション結果を示す。なお、プロジェクタの位置や解像度、スクリーンなどの実験環境は 4 章で後述する環境と同一である。また、本シミュレーション実験ではスクリーンは拡散反射面を仮定し、また後方のスクリーンに前方のスクリーンは影響を与えない (影を落とさない) ものとした。さらに、実験環境にはプロジェクタ以外の光源は設置せず、環境光などの影響は考慮しないものとした。



図 4 非負制約を用いたテキスト × 果実のシミュレーション結果 (上段:スクリーン 1, 下段:スクリーン 2)

Fig. 4 Simulated result of text × fruits with non-negative constraint (top row: screen1, bottom row: screen2)

非負制約により解に負の値は含まれなくなるものの、残差が大きく、各スクリーンには他のスクリーンの画像が映り込む、いわゆるクロストークが発生している結果となった。特に、図 4(b) 上段の画像に、下段の画像が写り込んでいることがわかる。したがって、目標画像の内容にも依存するが、任意の目標画像を多重スクリーンに個別表示することは、複数のプロジェクタの組み合わせでは実現できないことが明らかになった。

3.2.2 輝度勾配差の最小化による手法

前述のように、実際のプロジェクタから投影可能にするために式 (4) の解を正規化する操作はコントラストの低下を招き、また、正規化を避けるために式 (4) に非負制約を科して解いたとしても、クロストークによる見た目の違和感が大きくなる結果となる。

そこで、本研究では式 (4) のように目標画像の輝度値を最小化するのではなく、画像の輝度勾配のみを保存するように問題を緩和し、目標画像の明るさを調整しつつ光線空間を求める方法を提案する。輝度値ではなくその勾配を制約することで、投影画像の輝度に対して全体的なオフセットの違いを許容することに相当すると考えられ、このことにより、クロストークの発生を低減させることができると期待される。ただし、本手法で投影される画像は、本来の目標画像と全く同じ輝度値とはならないため、例えば繊細な色合いの再現が重要となる絵画や医用画像の提示には適しているとはいえない。

まず、画像の輝度勾配を得るために式 (3) の両辺を w と h で偏微分して次の連立方程式を得る。

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial w} I &= \frac{\partial}{\partial w} Ap \\ \frac{\partial}{\partial h} I &= \frac{\partial}{\partial h} Ap \end{aligned} \quad (6)$$

この連立方程式を行列の形式に直すと、式 (3) と同様に次の線形式で表すことができる。

$$I' = A'p \quad (7)$$

ただし、 I' と A' はそれぞれ、

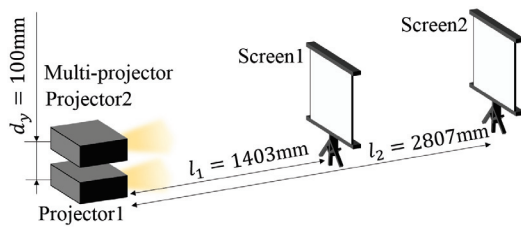


図5 シミュレーション環境
Fig. 5 Simulation environment

$$I' = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial w} I \\ \frac{\partial}{\partial h} I \end{bmatrix}, A' = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial w} A \\ \frac{\partial}{\partial h} A \end{bmatrix} \quad (8)$$

とおいた。したがって、所望の目標画像 I が与えられたとき、求める光線空間 p は次を解くことで求められる。

$$p_o = \operatorname{argmin}_p \|I' - A'p\|^2 \quad (9)$$

ただし、式 (6) は微分方程式でその解 (式 (9)) には定数項が残されているため、一般解は

$$\hat{p} = p_o + C1 \quad (10)$$

と表される。なお、 1 はすべての要素が 1 の列ベクトルである。次に、式 (9) の解には負の値や極端に大きい値が含まれるため、そのままでは実際のプロジェクタで投影することはできない。そこで、 $\hat{p}$ に含まれる値が、プロジェクタで生成可能な輝度に収まるようにオフセット C を与える。実際にプロジェクタが投影可能な輝度の範囲は、8bit 画像に対応するプロジェクタであれば $[0, 255]$ であるため、負の値をもつ画素数を n_{neg} 、255 より大きな値をもつ画素数を n_{ovr} とし、その和 $n = n_{neg} + n_{ovr}$ が最小となるオフセットを全探索により決定する。以上で求められた $\hat{p}$ を各プロジェクタから投影することで、各スクリーンに画像を映し出すことが可能となる。

4. シミュレーション実験

提案手法の有効性を検証するため、まずシミュレーションにより多重スクリーンへの個別情報提示を試みる。

4.1 想定する実験環境

シミュレーションでは、図 5 に示すような、空間解像度が 200×200 画素の 2 台のプロジェクタを y 方向に $d_y = 100[\text{mm}]$ ずらして配置する実験環境を想定する。ここで、光軸が平行になるよう配置するものとし、プロジェクタの仕様は後述する実環境実験で用いるプロジェクタ (EPSON EB-1771W) に合わせて設定する。ただし、このプロジェクタの空間解像度は 1280×800 画素、 x, y 方向の画角はそれぞれ $50.11^\circ, 32.61^\circ$ であるが、今回はそのうちの 200×200 画素を用いるため、実質的な画角は $\theta_w = 7.83^\circ$ 、 y 方向の画角 $\theta_h = 8.15^\circ$ となる。



(a) 目標画像 (b) 投影結果
図6 提案手法を用いて求めた“テキスト×果実”の投影結果 (各上段が Screen1, 各下段が Screen2)

Fig. 6 Projected results of “Text×fruits” using our method (top row: screen1, bottom row: screen2)

目標画像を表示するスクリーンはプロジェクタのレンズから距離 $l_1 = 1403[\text{mm}]$ 、 $l_2 = 2807[\text{mm}]$ 離れた位置に配置する。このとき、各プロジェクタの光軸とスクリーン平面は垂直の関係にある。このようにプロジェクタとスクリーンを配置すると、スクリーン 1 上での重複投影領域は 200×100 画素、スクリーン 2 上での重複投影領域は 200×150 画素になる。本研究では、入力として与える目標画像は各奥行きスクリーン上での重複投影領域と同じ空間解像度とする。

なお、本実験環境においてはプロジェクタとスクリーンとの関係は幾何学的に容易に対応付けることができる。 $A_{l,k}(w, h, u, v)$ はこの幾何学的関係から計算によって導いた。また本環境ではプロジェクタのつくる光線とスクリーンの画素との関係は 1 対 1 になることから、 $A_{l,k}(w, h, u, v)$ の要素は 1 または 0 で与えられる。

また、本研究では最小自乗法によって式 (4) 及び式 (9) を解くが、行列 A' のサイズは (目標画像の画素数) $\times$ (プロジェクタの画素数) であり、本実験環境では $50,000 \times 80,000$ と非常に大きい。そこで Matlab のスパース行列ソルバ (LSQR) を使い計算を効率化したところ、計算時間は約 5 分、メモリ使用量は約 150MB であった。なお、CPU は Intel Xeon E7-8870 2.4GHz を用いた。なお、本実験での処理はすべてシングルプロセスで実行したため、将来的には並列化による計算処理時間の向上が見込まれる。

4.2 投影結果

まず、各スクリーンに表示したい目標画像として“テキスト×果実”の画像を用いて、本手法によって求めた光線空間を 2 つのスクリーンに投影した結果を図 6 に示す。上段にはスクリーン 1 への投影画像、下段にはスクリーン 2 への投影画像を示している。目標画像 (a) と比較すると、投影画像 (b) は若干全体的に暗くなっているものの、クロストークの発生などアーティファクトも最小限に抑えられている。また、この光線空間を算出するために用いたオフセット C と、負の値をもつ画素数を n_{neg} 、255 より大きな値をもつ画素数を n_{ovr} との関係を図 7 に示す。この実験においては、オフセットは

$C = 139$ を用いた. なお, 図 8 に各プロジェクタから投影した画像を示す. この画像が式 (9) で求めた $\hat{p}$ に相当する.

このとき, 図 6 から画像が全体的に暗くなっているように見受けられたため, オフセットの値はより大きい値にした方が適切であった可能性もある. また, 目標画像 (a) 下段の果実の画像は, 背景部分の輝度がほぼ最大値 (255) をとっており, 本手法で再現を図るときには, 少しの誤差でも n_{ovr} にカウントされやすくなる. したがって白飛びを避けるために全体的に暗めな投影画像になったとも推察される. しかし, スクリーン 1 に表示される “SALE” の文字も, スクリーン 2 に表示される果物の画像も, いずれも十分読み取ることができ, 各目標画像が本来もつコンテキストそのものは失われていないことがわかる. また, 図 9 に “川 × トラ”, 及び “建物 × クジャク” を目標画像として用いた場合の結果を示す. どちら

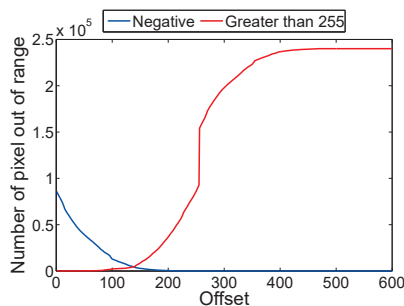


図 7 オフセットと範囲外の値をもつ画素数の関係

Fig. 7 Relation between offset value and the number of our-of-range pixels



(a) プロジェクタ 1 (b) プロジェクタ 2

図 8 プロジェクタの投影画像 $\hat{p}$

Fig. 8 Images projected from projectors $\hat{p}$

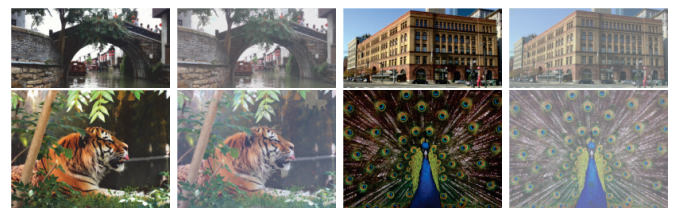
も目標画像と全体的な明るさに差異が出たものの, 目立ったアーティファクトもなく, 良好な結果となった. なお, 式 (9) を Matlab の LSQR ソルバで解いた際の相対残差 (relative residual) $E_r = \|I' - A'p\|/\|I'\|$ は, “テキスト × 果実” の場合で 1.02×10^{-3} , “川 × トラ” の場合で 0.66×10^{-3} , “建物 × クジャク” の場合で 1.25×10^{-3} (いずれも R, G, B の平均値) であった.

4.3 精度評価

従来手法との比較によって提案手法の有効性を検証するために, 精度評価を実施する. なお, 色合いによるばらつきを抑えるため, グレースケール画像を用いて評価した.

まず, 図 10 (a) には目標画像, (b) には式 (5) (非負制約付きの輝度差最小化) に基づき求めた光線空間を用いて各スクリーンに投影された画像を示す. 目標画像に対して投影画像の誤差が大きく, 画像の構造的な類似度を表す Structural Similarity Index (SSIM)¹⁶⁾ は図 10 (e) に示す提案手法よりも低い結果となった. このことは, 3.2.1 項の結果とも一致する.

次に, Scarzanella らの手法¹⁴⁾ (c) と提案手法 (e) を比較する. ここで, この 2 つの手法の違いは主に 2 つである. 1 つは最小化する式 (式 (4) と式 (9)), もう 1 つは求められた光線空間 $\hat{p}$ の調整方法である. Scarzanella らは求められたパ



(a-1) 目標画像 (a-2) 投影結果 (b-1) 目標画像 (b-2) 投影結果

図 9 提案手法を用いて求めた “川 × トラ”, 及び “建物 × クジャク” の投影結果 (各上段が Screen1, 各下段が Screen2)

Fig. 9 Projected results of “River×Tiger, and “Building×Peafowl” acquired by our method (top row: screen1, bottom row: screen2)



(a) 目標画像

(b) 非負制約
(SSIM:0.845,0.841)

(c) 従来手法¹⁴⁾
(SSIM:0.947, 0.7232)

(d) Offset のみ
(SSIM:0.888, 0.780)

(e) 提案法
(SSIM:0.957, 0.875)

図 10 シミュレーションによる評価実験 (上段:スクリーン 1, 下段:スクリーン 2, 数値は目標画像との SSIM を上段, 下段の順に記載)

Fig. 10 Evaluation of simulated experiment (top row: screen1, bottom row: screen2, numbers show SSIM between target images and screen1, screen2 respectively)

表 1 SSIM による比較
Table 1 Comparison of SSIM

	手法	スクリーン 1	スクリーン 2
テキスト × 果実	従来法 ¹⁴⁾	0.947	0.723
	提案法	0.957	0.875
川 × トラ	従来法	0.510	0.531
	提案法	0.749	0.727
建物 × クジャク	従来法	0.598	0.440
	提案法	0.808	0.574

ターンがプロジェクタで投影できるものとするために、 p にスケーリングとオフセットを施していた。これに対し提案手法では、コントラストの低下を抑えるため、スケーリングを行わず、オフセットの付加のみを行った。この観点からは、提案手法における調整は Scarzanella らの手法¹⁴⁾を改良したものと捉えることもできる。(c) に示す Scarzanella らの手法¹⁴⁾と (e) に示す提案法とを比較すると、提案する手法ではコントラストの低下やアーティファクトの発生が抑えられ、SSIM の値も良好であることがわかる。

さらに、提案手法における定式化 (式 (9)) の効果を評価するため、Scarzanella らの手法¹⁴⁾の考え方をもとにして、光線空間 $\hat{p}$ の調整においてスケーリングを行わず、提案手法と同じ方式、すなわち $n = n_{neg} + n_{ovr}$ を最小化することで求めた最適なオフセットを施す手法 (d) も比較する。図 10(d) に示す最適なオフセットを施す手法と図 10(e) に示す提案法とを比較したところ、この場合も提案する手法が良好な結果を得られることがわかった。したがって、単にオフセットだけで光線空間を調整するよりも、式 (9) に示すとおり輝度勾配を保つことの有効性を示すことができた。

最後に、従来法¹⁴⁾と提案法を 3 通りの目標画像に対して適用し、精度評価として SSIM を算出した結果を表 1 に示す。

いずれの目標画像に対しても提案手法が良好な結果を得ており、本手法の有効性が改めて示された。なお、本研究では SSIM の算出にはすべて MATLAB の実装を用いている。

4.4 考察

以上を踏まえての結果を考察する。Scarzanella らの手法¹⁴⁾では、求められたパターンがプロジェクタで投影できるものとするために、式 (4) の解 $\hat{p}$ に対してスケーリングとオフセットによる正規化を施していた。しかし、この正規化後の解が正規化前の式 (4) を満たしておらず、コントラストが低下してしまう。また、最適なオフセットを施す手法の結果にクロストークによるアーティファクトが発生した理由として、プロジェクタで投影できない強度の光線が少なからず解に含まれていたことが考えられる。

一方で本手法では、式 (9) の解 $\hat{p}_o$ に対してオフセット C を加算しているが、式 (6) は微分方程式であるため、 $\hat{p} = \hat{p}_o + C\mathbf{1}$ は依然として式 (6) を満たすことが保証されている。もちろん、図 7 から明らかなように、プロジェクタで投影できない強度の光線も若干ながら解に含まれているため、実

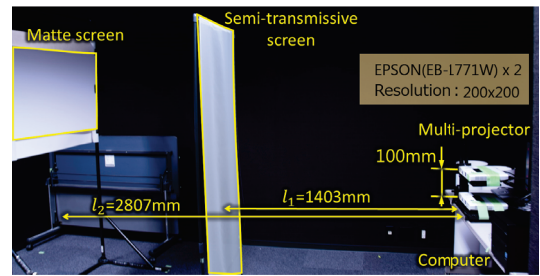


図 11 実環境実験の機器構成
Fig. 11 Setup of the real-world experiments

際に投影されている画像が厳密に式 (6) を満たしているわけではないが、結果的にその影響は限定的であったといえる。

また、目標画像のダイナミックレンジが広く、高輝度画素と低輝度画素が相当数存在する場合には、式 (9) の解 $\hat{p}_o$ に負の値や大きな正の値が含まれやすくなる。その場合、 $\hat{p}_o$ に加算するオフセット C を最適に設定したとしても、図 7 に示すプロジェクタで投影できない範囲外の値をもつ画素の数を十分に減らすことは難しく、結果としてアーティファクトが露呈してしまうと考えられる。本手法の限界として、このような場合が挙げられる。

5. 実環境実験

実環境においてシミュレーションと同様の結果が得られることを確認するため実験を行った。図 11 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。実験は暗室で行い、シミュレーション実験と同様にプロジェクタ以外の光源は設置しない。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、シミュレーション環境に揃えるため入力画像の解像度を 200×200 とする。同時に 2 層のスクリーンに同時に異なる目標画像が表示されることを確認するために、前面のスクリーンとしてダイオ化成社製防虫網ダイオクラウンネット (グレー) を用いる。本製品の経密度、緯密度はともに 24 本/インチである。なお、本製品は光学特性のスペックは公開されていないものの、透過型スクリーンとしての利用実績¹⁷⁾が報告されている。また、後方のスクリーンには大判印刷に使われるキヤノン社製厚口コート紙 (LFM-CPA00S) を用いた。

なお、同じ輝度値の画像をプロジェクタから投影しても、プロジェクタの個体差によりスクリーン上で観測される明るさは異なる。さらに、プロジェクタは非線形な応答特性を持つため、プロジェクタに入力する輝度値とプロジェクタが出力する光量とは非線形になり、複数の光線を重ね合わせたときに、線形な関係が成り立たなくなる恐れがある。これらの問題を解決するため、各プロジェクタから投影する光線空間をそれぞれのプロジェクタに合わせて校正を行う。具体的には、各プロジェクタから輝度値を 0 から 255 まで 1 段階ずつ変化させながら、その都度、カメラでスクリーンを測定



(a) テキスト × 果実 (b) 川 × トラ (c) 建物 × クジャク
 図 12 実環境での投影結果 (上段:スクリーン 1, 下段:スクリーン 2)

Fig. 12 Projected results of the real-world experiments (top row: screen1, bottom row: screen2)

し、プロジェクタの入力輝度値とスクリーン上で観測される明るさとの関係を記録する。さらに、この関係をルックアップテーブルにまとめ、輝度値を参照することで、プロジェクタへの入力輝度値とスクリーンの明るさを線形にするキャリブレーションが可能である。なお、カメラは Point Grey 社の Grasshopper3 カラー (GS3-U3-28S5C-C) を使用した。

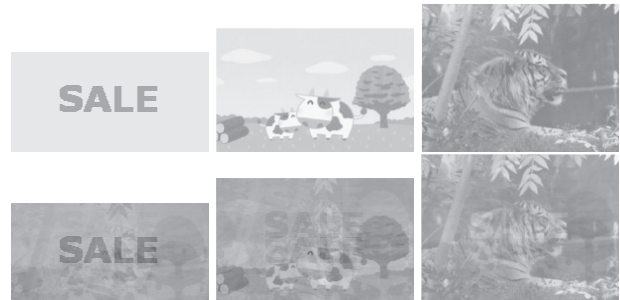
本手法によって得られた光線空間を実環境で 2 台のプロジェクタから投影した結果を図 12 に示す。概ねシミュレーションでの投影結果 (図 6, 図 9(a), (b)) と同じ結果が得られたといえる。

スクリーン 1 の投影結果において白い波のような線が縦に 2 本見受けられた。これは、スクリーン表面で鏡面反射を起こしており、スクリーンとして用いた網が弛んでいたためであり、また網は一部の光を透過するため、全体的に暗くなっている。

また、目標画像として図 9(a-1), (b-1) に示す“川 × トラ”、“建物 × クジャク”を用いた場合は、シミュレーション実験での投影結果 (図 9(a-2), (b-2)) と比較して実環境での投影結果 (図 12(b), (c)) は、川や建物の画像の細部が若干損なわれる結果となった。その理由として、本実験では前面のスクリーンとして網を用いているため、網の穴部の影響や、網目に届いた光が乱反射して近接の網目に影響を与え、全体的に像が滲んでいることなどが考えられる。

6. 3 層のスクリーンへの個別情報提示

前章で述べた実験環境は、2 台のプロジェクタを使って、2 枚の目標画像を個別にスクリーンへ表示するといったものだったが、理論上、本手法はより多い目標画像を設定することも可能である。そこで、2 台のプロジェクタを使って、3 枚の目標画像を個別のスクリーンへ投影する実験をシミュレーションにより行う。スクリーンは距離 $l_1 = 1043[\text{mm}]$, $l_2 = 1871[\text{mm}]$ 及び $l_3 = 2807[\text{mm}]$ だけ離れた位置に 3 つ配置する。その他の実験環境は図 5 と同様である。なお、プロジェクタの数より投影するスクリーンの数が多くなった場合、式 (7) による制約はより強くなるため、制約を満たす光線空間 $\hat{p}$ を求めることは難しくなり、残差によるアーティファ



(a) スクリーン 1 (b) スクリーン 2 (c) スクリーン 3
 (SSIM:0.744) (SSIM:0.745) (SSIM:0.894)

図 13 3 枚の異なる目標画像を 3 層のスクリーンに投影した結果 (上段:目標画像, 下段:投影結果)

Fig. 13 Results of projected three different images onto three layered screens (top row: target images, bottom row: projected results)

クトが発生することが予想される。

シミュレーションによる実験結果を図 13 に示す。各スクリーンへの投影結果には、それぞれの目標画像が表示されているものの、他のスクリーンへの目標画像が映り込む結果となった。このことから、本実験環境では 3 層以上のスクリーンへの投影には課題が残ることがわかった。

7. 結論と今後の課題

本研究では、複数のプロジェクタを用いて 4 次元光線空間を生成し、多重スクリーンへの個別情報を提示するために光線空間を生成する新たな手法を提案した。複数のプロジェクタによって投影する画像とスクリーンに表示される画像との関係を明らかにし、それを元にプロジェクタによって生成する光線空間を計算によって求めようとしたところ、誤差が十分に小さくなるような解は見つけることができなかった。そのため、輝度勾配を用いた新たな誤差関数を設計し、適切なオフセットを用いて投影する光線空間を算出したところ、従来法と比較して投影結果が改善されることをシミュレーション実験によって確認した。さらに、シミュレーション結果を検証するために実環境実験を行い、シミュレーションと同様の結果が得られた。今後の課題として、CT や MRI などのボリュームデータをシームレスに表示するために、3 層以上のスクリーンへの投影結果の向上が挙げられる。そのためには、使用するプロジェクタの台数を増加させることも考えられるが、投影装置の大きさや費用の面から必ずしも好ましいとはいえないため、ミラーやレンズなどの光学系を追加することによる解決法の確立が課題である。また、本実験では目標画像はあくまで静止画であったが、動画への拡張も課題である。その場合、動画の各フレームに対して別々のオフセットを与えると時間連続性が失われるため、シーケンス全体から最適なオフセットを求める方法や、オフセットを時間的に滑らかに遷移させる方法などが考えられる。さらに、実環境実験における投影画像の評価に加え、目標画像と投影画像との誤差関数として人間の知覚に即した例えば $L^*a^*b^*$ 空間による色

差を用いる方法などを検討することも今後の課題である。

(2016 年 5 月 20 日 再受付)

謝 辞

本研究は JSPS 科研費 JP25240027 の助成を受けたものである。

参 考 文 献

- 1) 伊藤崇仁, Alvaro Cassinelli, 小室 孝, 石川 正俊: “タンジブルスクリーンを用いた 3 次元物体表現”, 第 7 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会論文集, pp.774-775 (2006).
- 2) S. J. Gortler, R. Grzeszczuk, R. Szeliski, M. Cohen: “The lumigraph”, Proc. of ACM SIGGRAPH 1996, pp.43-54 (1996).
- 3) M. Levoy, P. Hanrahan: “Light Field Rendering”, Proc. of ACM SIGGRAPH 1996, pp.31-42 (1996).
- 4) M. Steele, C. Jaynes: “Interactive Light Field Display From a Cluster of Projectors”, Proc. of ACM SIGGRAPH 2003 (2003).
- 5) W. Matusik, H. Pfister: “3D TV: A Scalable System for Real-Time Acquisition, Transmission, and Autostereoscopic Display of Dynamic Scenes”, ACM Trans. on Graphics, Vol.23, No.3, pp.814-824 (2004).
- 6) T. Agocs, T. Balogh, T. Forgacs, F. Bettio, E. Gobbetti, G. Zanetti, E. Bouvier: “A Large Scale Interactive Holographic Display”, Proc. of IEEE Virtual Reality Conference (VR2006), pp.311 (2006).
- 7) K. Nagano, A. Jones, J. Liu, J. Bsck, X. Yu, M. Bolas, P. Debevec: “An Autostereoscopic Pprojector Array Optimized For 3D Facial Display”, Proc. of ACM SIGGRAPH 2013 Emerging Technologies, Article No.3 (2013).
- 8) S. Sawada, H. Kaneya: “Floating Volume Viewer”, Proc. of ACM SIGGRAPH ASIA 2012 Emerging Technologies, Article No.10 (2012).
- 9) S. Sawada, H. Kakeya: “Coarse Integral Volumetric Imaging With Flat Screen and Wide Viewing Angle”, Journal of Electronic Imaging, Vol.21, No.1, 011004 (2012).
- 10) R. Carlo, W. Yao, P. Ben, I. Hiroshi, B. Assaf: “PHOXEL-SPACE: An Interface For Exploring Volumetric Data With Physical Voxels”, Proc. of Designing Interactive Systems (DIS2004), pp.289-296 (2004).
- 11) T. Nagakura, J. Oishi: “Deskrama”, Proc. of ACM SIGGRAPH 2006 Emerging Technologies, Article No.6 (2006).
- 12) A. Cassinelli, M. Ishikawa: “Khronos Projector”, Proc. of ACM SIGGRAPH 2005 Emerging Technologies, Article No.10 (2005).
- 13) A. Cassinelli, M. Ishikawa: “Volume Slicing Display”, Proc. of ACM SIGGRAPH ASIA 2009 Art Gallery & Emerging Technologies: Adaptation, pp.88 (2009).
- 14) M. Visentini-Scarzanella, T. Hirukawa, H. Kawasaki, R. Furukawa, S. Hiura: “Two Plane Volumetric Display For Simultaneous Independent Images At Multiple Depths”, Proc. of 7th Pacific Rim Symposium on Image and Video Technology (PSIVT) Workshop, pp.113-126 (2015).
- 15) E. H. Adelson, J. R. Bergen: “The Plenoptic Function and the Elements of Early Vision”, Proc. of Computational Models of Visual Processing, pp.3-20 (1991).
- 16) Z. Wang, A. C. Bovik, H. R. Sheikh, E. P. Simoncelli: “Image Quality Assessment: From Error Visibility To Structural Similarity”, IEEE Trans. on Image Processing, Vol.13, No.4, pp.600-612 (2004).
- 17) アミッドスクリーン研究室, <http://textalk.moe-nifty.com/> (2016).

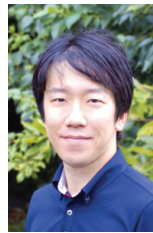
(2016 年 2 月 29 日 受付)

石 原 葵



2014 年 阿南工業高等専門学校専攻科電気・制御システム工学専攻卒業。2016 年 奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科博士前期課程修了。同年より株式会社日立製作所に勤務。

久 保 尋 之



2006 年 早稲田大学理工学部卒業。2008 年 同大学院博士前期課程修了。2011 年 同大学院博士後期課程単位取得退学。2012 年 同大学にて博士 (工学) 取得。2008 年より日本学術振興会特別研究員 (DC1)。2011 年より 1 年間早稲田大学理工学術院助手。2012 年よりキャノン株式会社。2014 年より奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科助教。現在に至る。コンピュータグラフィックスに関する研究に従事。

船 富 卓 哉



2002 年 京都大学工学部情報学科卒業。2004 年 京都大学大学院情報科学研究科修士課程修了。2006 年 日本学術振興会特別研究員 DC2。2007 年 京都大学大学院情報科学研究科博士後期課程修了。2007 年 京都大学学術情報メディアセンター助教。2014 年 Stanford University, Computer Science Department 客員助教。2015 年 奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科准教授。現在に至る。3 次元モデル, Computational photography に関する研究に従事。博士 (情報学)。ACM, IEEE, 電子情報通信学会各会員。

向 川 康 博



1997 年 筑波大学大学院博士課程工学研究科修了。同年～2002 年 岡山大学助手。2003 年～2004 年 筑波大学講師。2004 年～2014 年 大阪大学准教授。うち、2009 年～2010 年 MIT Media Lab 客員准教授。2014 年 2 月より奈良先端科学技術大学院大学教授。コンピュータビジョン, コンピュータショナルフォトグラフィの研究に従事。博士 (工学)。IEEE, 情報処理学会, 電子情報通信学会, 日本バーチャルリアリティ学会各会員。