

## マルチプロジェクタによる3次元空間の強調提示

中村 遼<sup>†1</sup> 坂上文彦<sup>†1</sup> 佐藤 淳<sup>†1</sup>

本稿では、複数のプロジェクタからの投影光を利用して、特定の3次元空間を強調して提示する方法を提案する。この方法では、プロジェクタから特定のパターンを投影することにより、カメラでの画像取得や、計算機上での3次元復元処理等を一切介することなく、3次元空間の強調提示を実現する。これにより、一切の時間遅延を生じさせることなく空間の強調提示が可能となる。本稿ではこのような空間強調を行うための投影パターンを計算する方法を示す。また、これにより得られた投影パターンを用いて実際に3次元空間の強調を行った結果により提案法の有効性を示す。さらに、シミュレーション環境上で提案法を評価した結果を示す。

### Emphasizing 3D Structure Visually using Coded Projection from Multiple Projectors

RYO NAKAMURA,<sup>†1</sup> FUMIHIKO SAKAUE<sup>†1</sup> and JUN SATO<sup>†1</sup>

In this paper, we propose a method for emphasizing 3D structure of the scene visually by using patterned light of multiple projectors. The proposed method enables us to emphasize specific 3D structure of the scene without capturing image of the scene and without estimating 3D structure of the scene. As a result, the 3D structure can be emphasized visually without any delay of computation. In this paper, we propose a method for generating the pattern of projector light which enables us to emphasize 3D structure of the scene efficiently.

#### 1. はじめに

近年プロジェクタとカメラを用いたプロジェクタカメラシステムの研究が盛んに行われて

いる<sup>1)–5)</sup>。このシステムでは、カメラから得られる情報をプロジェクタにフィードバックすることにより、プロジェクタ単体と比べて、より柔軟な情報提示が可能なシステムを構成することができる。

さらに、近年、プロジェクタを使った新しい技術として、コード化プロジェクションを用いた距離情報の提示方法が稲垣ら<sup>6)</sup>によって提案されている。この方法では、特殊なパターンを2台のプロジェクタから対象物体に投影することで、3次元情報の色情報による強調提示を実現している。図1はコード化プロジェクションを用いて距離情報提示を行った結果であり、対象物体が距離に応じて異なる色で彩色されていることが分かる。

このシステムでは、カメラでの撮影やコンピュータでの計算を一切介することなく情報提示が行われる。そのため、3次元距離計測や提示情報の生成などによる情報のタイムラグが発生しない。また、プロジェクタからの投影光により物体に対して直接情報提示を行うので、情報提示の位置のずれがないといった利点がある。そのため、自動車に搭載し、前方の自動車との距離を提示したり、道路に投影することで道路表面の凹凸を強調する<sup>6)</sup>といった様々な応用が期待できる。

しかし、従来のコード化プロジェクションでは、基本的には距離に応じて投影色を変化させるといった、単純な情報提示しか実現できていない。そのため、特定の物体や特定領域のみの強調を行うなどの柔軟な情報提示は実現できない。そこで本研究では、稲垣らのコード化プロジェクションを拡張し、新たに特定領域の強調提示を行う方法を提案する。

この特定領域強調提示では、ある特定領域のみをプロジェクタの投影光を用いて着色し、強調して提示することを実現する。例えば、図2のように、中心に配置された立方体を強調する場合、その周辺の円形領域のみに赤色の投影を行い、立方体の強調を実現する。また、これらの強調提示は、従来のコード化プロジェクションと同様に特定パターンの投影のみにより実現し、カメラでの撮影やコンピュータ上での処理を一切必要としない。このため、提案法による3次元空間の強調では、計算処理や情報提示の遅れが一切生じない。本稿ではこの特定領域強調提示を行うための投影パターンの作成法を提案する。また、実際の環境下で、提案法により作成されたパターンの投影により特定領域強調提示を行った結果を示す。

#### 2. コード化プロジェクションによる3次元空間強調提示

##### 2.1 グラデーションパターン投影による距離情報強調提示

まず、本研究の基となるコード化プロジェクションについて説明する。一般的に、プロジェクタは画像などの2次元情報を2次元の平面スクリーンに投影するものである。その

<sup>†1</sup> 名古屋工業大学大学院 情報工学専攻

Department of Computer Science, Nagoya Institute of Technology

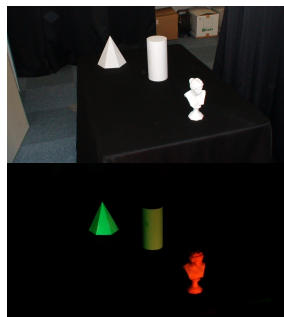


図 1 コード化プロジェクションによる  
距離情報強調提示  
Fig.1 Coded projection

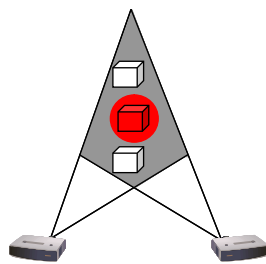


図 2 特定領域強調提示  
Fig.2 Particular area emphasis

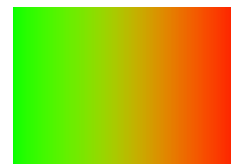


図 3 線形投影パターン  
Fig.3 Linear projection pattern

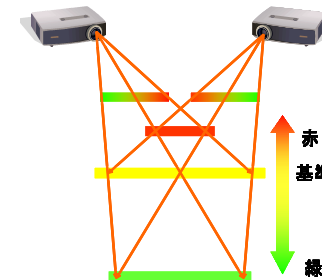


図 4 コード化プロジェクション  
Fig.4 Coded projection

ため、3 次元的情報を提示することは出来ない。したがって、通常の投影方法を用いた場合、面的な情報の提示しか行うことができなかった。一方、コード化プロジェクションでは 2 台のプロジェクタから特殊なパターンを同時に投影することで、3 次元情報を計測することなく、対象物体に距離情報を提示することを実現している。本節では、このコード化プロジェクションの概要について述べる。

まず、コード化プロジェクションで投影する画像について述べる。コード化プロジェクションでは、2 台のプロジェクタから図 3 のようなグラデーション画像の投影を行う。この画像は、縦方向には輝度が変化せず、横方向については R(赤), G(緑), B(青) の輝度が以下の式を満たすように変化している。

$$\begin{cases} R = \frac{x}{W} \times 255 \\ G = 255 - \frac{x}{W} \times 255 \\ B = 0 \end{cases} \quad (0 \leq x \leq W) \quad (1)$$

ここで  $x$  は横ピクセルの座標、また  $W$  は画像の横幅である。さらに各輝度は 8 ビットで量子化 (0~255 の 256 段階) されているものとする。

図 4 に示すように、式 (1) に基づくグラデーション画像を一方のプロジェクタから投影し、この画像と左右対称な画像をもう一方のプロジェクタから投影する。このように投影を行うと、これらの画像は 3 次元空間で図 4 のように合成されて観測される。

このとき、2 枚の画像がちょうど重なる位置では、R(赤) と G(緑) の輝度が等しくなるた

め、反射光として黄色が観測される。また、これよりもプロジェクタに近い位置では、輝度 R の値が G より大きくなるので観測色は赤色に近づく。一方、プロジェクタから遠い位置では、輝度 R の値が G より小さくなるので観測色は緑色に近づく。このように、コード化プロジェクションでは、プロジェクタからの距離の違いが観測される色の違いとして現れ、これにより、距離情報の強調提示が実現される。

## 2.2 基準平面の校正

投影画像が完全に重なり、黄色となる平面は基準平面と呼ばれる。この基準平面はコード化プロジェクションにおいて非常に重要であり、提示される距離情報は基準平面に従って決定される。この基準平面の校正は、基準平面とすべき平面上にスクリーンを設置し、このスクリーンとの平面射影変換を計算することにより行われる。

スクリーンとプロジェクタ画像平面間の平面射影変換を求めることによりスクリーン上の任意の位置に任意の画像を投影できる。これを利用してスクリーン上でグラデーションパターンが完全に重なるように投影を行えば、図 5 に示すように、スクリーン上で黄色が観測される。これにより、プロジェクタ間の校正が行え、また校正に用いたスクリーンが基準平面として定義される。

この基準平面の与え方を変化させることにより、コード化プロジェクションでは様々な方向に対して 3 次元情報の強調提示を実現できる。基準平面をプロジェクタ平面に対して平行になるよう設定した場合、図 6(a) に示すように奥行情報の強調提示が可能となる。また、基準平面を床面に対して平行にした場合、図 6(b) に示すように高さ情報の強調提示が可能となる。

このシステムは、3 次元上の物体に対して直接投影を行うため、位置のズレがなく情報

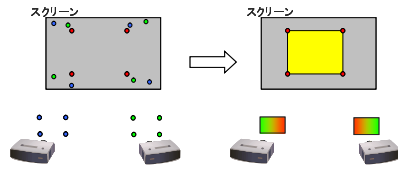
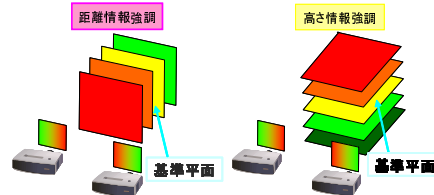


図5 プロジェクタとスクリーンの校正  
Fig. 5 Calibration of projectors and screen



(a) 距離情報強調 (b) 高さ情報強調

図6 基準平面の取り方による強調提示の変化

Fig. 6 Emphasis of depth and height using coded projection

提示が行える．また従来の距離計測に基づく情報提示法と異なり，カメラでの撮影，コンピュータでの処理という過程を必要とせず，画像の投影のみでの情報提示が完結する．これにより距離計測と提示を光を照射した瞬間に行うことができ，時間のズレがなく，光速での3次元情報提示が可能となっている．

### 3. 拡張コード化プロジェクションによる特定領域強調提示

#### 3.1 コード化プロジェクションによる特定領域の強調提示

前節で述べたコード化プロジェクションを用いることにより，色による距離情報の強調提示が可能となる．しかし，この方法では距離や深さ情報に応じて色を線形に変動させるなど単純な情報提示しか実現できていない．そのため，距離以外の情報，例えば3次元空間中のある特定領域に存在する物のみを着色して強調するなど柔軟な情報提示は不可能であった．そこで本研究では，コード化プロジェクションを拡張することにより，特定の領域に存在する物体のみを強調して提示する特定領域強調提示法を提案する．

図7に示すように，本手法では，複数台のプロジェクタの投影光が重なる積空間に対して，強調したい領域と色を与える．この例では，中央部分を赤色で，それ以外の領域はグレーで着色するように設定している．ここで与える3次元の着色パターンを目標着色と呼ぶ．そして，その目標着色を行うための最適投影パターンを導出する．導出されたパターンを投影することで，指定した強調領域内に存在する物体は指定した色で強調提示され，その他の領域では，強調されないという選択的な強調提示が実現できる．

このような特定領域強調領域を実現するために，本手法では2台以上のプロジェクタを利用してパターン光の投影を行う．また，各プロジェクタに対して領域強調のための最適パターンを導出する方法を提案する．この方法により導出されるパターンは，従来のコード化

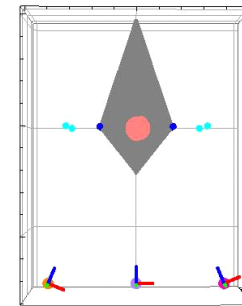


図7 強調領域  
Fig. 7 Emphasis area

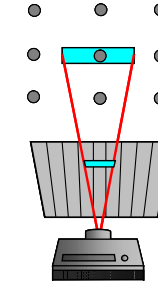


図8 ビルボードモデルの投影  
Fig. 8 Billboard model

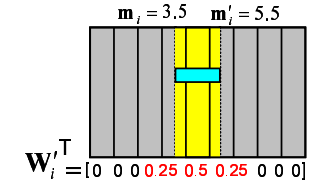


図9 ビルボードモデルの重み  
Fig. 9 Weight of billboard model

プロジェクションで利用されるような単純なグラデーションパターンではなく，輝度が非線形に変化したパターンとなる．以降では投影パターン導出法について述べる．

#### 3.2 ビルボードモデルを用いた空間表現

まず，3次元空間のモデル化について説明する．3次元空間を表現する方法としてはボックス集合を用いる方法などがあるが，本提案法では，図8に示すようなビルボードの集合を用いて3次元空間を表現する．このビルボードは空間のZ軸（奥行き方向）に対して垂直に立てられているものとする．このような各ビルボードに対して投影を行い，任意のビルボードを任意の色で着色することにより，領域の強調を実現することを考える．

なお，以降の議論では議論の簡単化のために，プロジェクタから投影される画素は縦方向に全て同じ輝度を持つものとする．したがって，プロジェクタは1次元の画像平面から2次元空間に対して投影を行うものとして議論を進めるが，この議論は容易に2次元画像から3次元空間への投影に拡張が可能である．

いま，各プロジェクタが校正済みであり，投影行列により対象空間とプロジェクタ画像平面が対応づけられているとする．このとき，各ビルボードをプロジェクタ画像面に投影すると，それぞれのビルボードモデルに対応するプロジェクタの画素が分かる．投影されるビルボードは幅を持っているため，図8に示すように，複数の画素に渡って投影されたり，また，単一の画素のみに投影される場合などが考えられる．

このとき，プロジェクタの各画素より発せられる光の量が一定であるとすると，図8で示されるようなプロジェクタの近傍のビルボードは，複数の画素により照らされるため，多く

の光を受けることになる。逆に考えると、ビルボードを一定の光量で照らそうとする場合、各画素より発するべき光は小さくなる。一方、遠方のビルボードを照らそうとする場合、ビルボードと対応づけられる画素数は少なくなるため、各画素より発するべき光は大きくなる。これは距離による光の拡散を表しており、ビルボードモデルを用いて空間表現を行うことにより、光の拡散による減衰を容易に表現することが可能となる。

ここで、プロジェクトから光を投光した際に、画素  $j$  がビルボード  $i$  に対して与える影響の大きさを考える。ビルボード  $i$  の両端点を  $X_i, X'_i (X_i < X'_i)$  とし、その投影により得られるプロジェクト上の両端点を  $m_i, m'_i (m_i < m'_i)$  とする。このとき、画素  $j$  がビルボード  $i$  に与える影響  $W_{ij}$  を以下のように定義する。

$$W_{ij} = \begin{cases} \frac{(j+1)-m_i}{m'_i-m_i} & \text{if } (j \leq m_i \leq j+1) \wedge (j+1 \leq m'_i) \\ \frac{1-m_i}{m'_i-m_i} & \text{if } (m_i \leq j \wedge j+1 \leq m'_i) \\ \frac{1}{m'_i-m_i} & \text{if } (j \leq m_i \wedge m'_i \leq j+1) \\ \frac{m'_i-j}{m'_i-m_i} & \text{if } (m_i \leq j) \wedge (j \leq m'_i \leq j+1) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

このように定義した  $W_{ij}$  は投影されたビルボード全体に対して画素  $j$  が占める割合を表している例えば、図9に示したようにビルボードが投影されたとすると、各画素の重みは、図中下部に示された値となる。

ここで、 $W_{ij}$  を用いて各画素がビルボード  $i$  に与える影響を表すベクトル  $W_i$  を次のように定義する。

$$W_i = \left[ W_{i1} \quad \dots \quad W_{ij} \quad \dots \quad W_{iN} \right]^T \quad (3)$$

ただし、 $N$  はプロジェクトの水平方向の画素数である。プロジェクトの  $N$  個の画素から投影するパターンを  $N$  次元ベクトル  $Y$  で表すことにすると、ビルボード  $i$  の輝度値  $I_i$  は以下の式で表される。

$$I_i = W_i^T Y \quad (4)$$

このように定義される重みベクトル  $W_i$  を用いて最適投影パターンを導出する。

### 3.3 ビルボードモデルを用いた最適投影パターンの導出

前節で定義した  $W_i$  を用いてプロジェクトからの投影パターンを導出することを考える。いま、全てのビルボードについて対応関係  $W_i$  が決定されているシーンを考える。ビルボー

ドの数を  $M$  としたとき、ビルボードに着色したい輝度により成る  $M$  次元ベクトル  $I$  を用いて目標とする空間の着色を表す。このとき、プロジェクトの投影パターンを  $Y$  とすると  $Y$  と  $I$  の関係は以下のように表される。

$$\begin{bmatrix} W_1^T \\ W_2^T \\ \vdots \\ W_M^T \end{bmatrix} Y = I \quad (5)$$

この式を満たす投影パターン  $Y$  を求めることにより、目標の着色を行う。ただし、プロジェクトの画素数  $N$  に対してビルボードの数  $M$  が大きい場合、この式を全て満たす  $Y$  は存在しない。そのため最小2乗法により最も妥当な  $Y$  を計算する。 $[W_1, \dots, W_M]^T = L$  としたとき、最小2乗解  $\hat{Y}$  は  $L$  の擬似逆行列  $L^+ (= L(L^T L)^{-1})$  を用いて以下のように計算される。

$$\hat{Y} = L^+ I \quad (6)$$

このように求められた  $\hat{Y}$  により、 $I$  で表現した3次元空間の着色を行うことができる。カラー画像を投影する場合も、各チャンネルについて同様の処理を行うことにより、任意の画像を投影できる。

次に複数のプロジェクトからパターン光を投影する場合について考える。プロジェクト  $k$  の対応関係を  $W_i^k$ 、投影パターンを  $Y^k$  とすると式(5)より、 $Y^k$  と  $I$  の関係は以下のように表される。ただし、 $K$  はプロジェクトの台数である。

$$\begin{bmatrix} W_1^{1T} & W_1^{2T} & \dots & W_1^{KT} \\ W_2^{1T} & W_2^{2T} & \dots & W_2^{KT} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ W_M^{1T} & W_M^{2T} & \dots & W_M^{KT} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y^1 \\ Y^2 \\ \vdots \\ Y^K \end{bmatrix} = I \quad (7)$$

このように得られた式(7)から最小2乗法を用いて  $Y^k (k=1, \dots, K)$  を計算することにより、各プロジェクトについての最適投影パターンを導出できる。

### 3.4 正と負の光の表現

前節の方法を用いて投影パターンを導出する場合、導出されたパターン中に負の輝度が含まれることがある。これは、パターン導出の際に輝度に対して何の制約も設けていないため

であるが、通常のプロジェクタからはこのような負のパターンを投影することはできない。そのため、負の値については0に置き換えたのち投影を行う必要がある。これを回避するために、パターン導出にあたり、輝度が非負となるように制約を設けてパターン推定を行う方法<sup>7)</sup>も考えられるが、このような方法はパターン導出に一定の計算量が必要となり、また、導出されるパターンについてもある程度自由度が制約されるという問題がある。

そこで、本研究では空間全体の明るさを調節することにより、擬似的に負の輝度を表現する方法を考える。いま、シーン全体がプロジェクタからの光により一定の中間的な明るさで照らされている場合を考える。このとき図10に示すように、プロジェクタのある画素からシーン全体の光よりも強い光を投光すると、その光に照らされる領域は全体より明るくなり、正の明るさが表現できる。一方、全体より弱い光を照射すると、その光に照らされる領域は全体と比べて低い明るさを持ち、この結果、擬似的に負の明るさを表現することが可能となる。そこで本研究ではプロジェクタの最大輝度の半分以上をプロジェクタ光量の擬似的なゼロレベルと考え、正と負のプロジェクタ光を考えることで適切なパターン光を生成する。このような方法による擬似的な負の光の表現は、シーン全体のコントラストが低下するなどの問題も存在するが、領域強調にあたってはこれは大きな問題とはならない。これは、色による領域強調を考えた場合、それ以外の領域に対して白色光を投影しても物体そのものの明るさは変化するものの、観測色自体はほとんど変化しないためである。

以上により、マルチプロジェクタシステムを用いて特定領域の強調提示を実現することができる。以降では、実環境およびシミュレーション環境での実験結果を示すことにより、提案法の有効性を示す。

## 4. 実験

### 4.1 実環境実験

まず、実環境上で実験を行った結果を示す。今回の実験では図11(a)に示すように、3台のプロジェクタを配置して投影を行った。使用したプロジェクタの解像度は640×480であった。まず3台のプロジェクタそれぞれについて校正を行い、投影行列を導出した。これにより求められた投影行列をもとに提案法を用いて目標着色に対する最適投影パターンを導出した。そして、導出されたパターンをプロジェクタから投影し、図11(b)の白色物体を移動させながら観測を行い、特定領域強調提示が行われていることを確認した。

### 4.2 円柱領域強調

まず、中心が円形に強調される様な目標着色を設定し、パターンの導出・投影を行った。

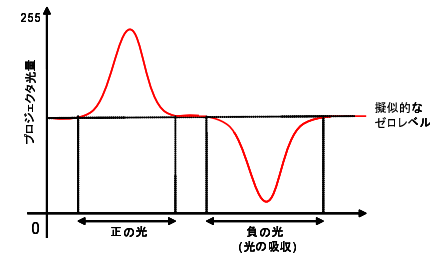


図10 擬似的な負の光の表現

Fig. 10 Representation of pseud negative intensity

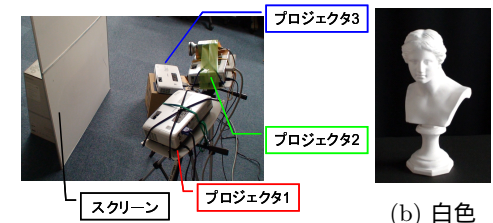


図11 プロジェクタの配置と評価に使用した白色物体  
Fig. 11 Projectors and white object

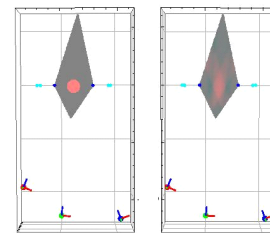


図12 目標着色領域と投影結果  
Fig. 12 Coloring of purpose image and result image



プロジェクタ1 プロジェクタ2 プロジェクタ3

図13 導出された投影パターン  
Fig. 13 Projected patterns

図12(a)に目標着色を示し、図13に提案手法を用いて導出されたパターンを示す。また、導出されたパターンを投影した結果を図12(b)に示す。さらに、導出されたパターンをプロジェクタから投影し、白色物体を用いて、観察した実物体による実験結果を図14に示す。なお、白色物体は図14(a)に示す9個の異なる位置に移動し、それぞれの位置で撮影を行った。

まず、図12(b)に示された投影結果の断面図を見ると、目標着色と比べてやや後方に強調領域が引きのばされているものの、概ね妥当な投影が行われていることがわかる。また、図14の強調結果を見ると強調したい領域である中心部分に白色物体を配置した場合、この物体が赤色に着色されていることが確認できる。さらに、その他の領域では着色が行われず、



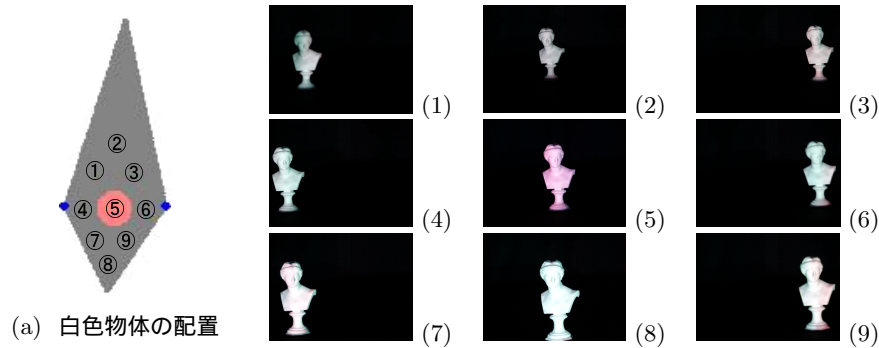


図 14 特定領域強調提示結果  
Fig. 14 Results of coded projection

白色のまま観測されていることが確認できる．これにより，目標とした領域の強調提示が行えることが確認できた．

#### 4.3 擬似的な負の光の表現に関する評価

次に，シミュレーション環境を用いて本手法の評価を行った結果を示す．今回は精度評価の指標として，目標着色の観測点の輝度と，投影結果の観測点の輝度の RMS (Root Means Square) 誤差を用いた． $I_i$  を目標着色の観測点  $i$  における輝度値， $I'_i$  を投影結果の輝度値， $M$  を観測点数としたとき RMS 誤差  $E$  は，式 (8) により計算される．

$$E = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M (I_i - I'_i)^2}{M}} \quad (8)$$

この  $E$  を用いてそれぞれの実験結果を評価した．

まず，3.4 節で述べた擬似的な負の光の表現の効果について評価を行った．プロジェクタはシーン中に 3 台配置し，それぞれのプロジェクタの解像度 (画像幅) は 64 とした．

この実験では，目標とする着色の輝度範囲を変化させ，その影響を調べた．今回プロジェクタからの投影可能輝度は 0 ~ 1 の範囲であるものとして実験を行った．そのため，プロジェクタを 3 台使用する場合には合成輝度値の最大値は 3 となる．今回はその範囲内で輝度の範囲を (i) 0.5 ~ 1，(ii) 0 ~ 1 の 2 パターンに設定し，それぞれの場合の評価を行った．

図 15 にそれぞれの輝度範囲での，目標着色画像と投影結果を示す．また，生成投影パターンを縦軸に輝度値，横軸にピクセルを与えてグラフの形式で示したものを図 16 に示す．このグラフでは赤色の点はパターンの R の輝度，緑色が G の輝度，青色が B の輝度を表し

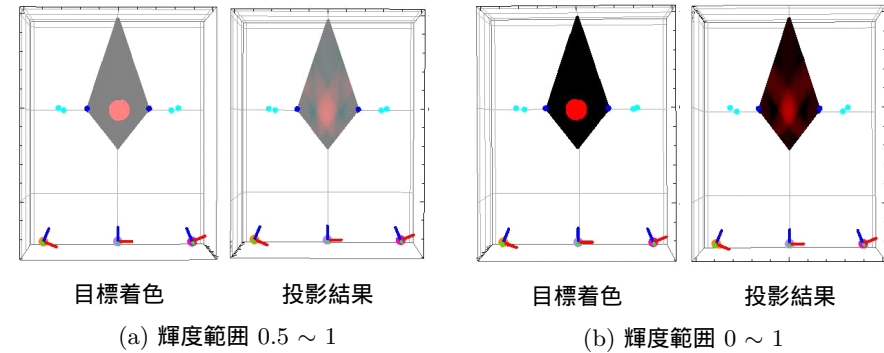


図 15 各輝度範囲での目標着色と投影結果  
Fig. 15 Coloring of purpose image and result image

ている．

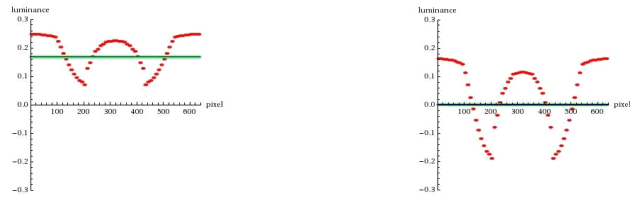
まず (i) の結果に着目すると，各プロジェクタで生成された投影パターンの輝度値はすべて 0 ~ 1 の範囲にあり，投影結果も目標領域が強調提示されていることがわかる．また，RMS については  $E = 25.6$  と十分小さくなっている．

次に (ii) の結果に着目すると，生成された投影パターンの輝度値が 0 以下になってしまうため，0 に置換された後投影された点が発生している．そのため，最適なパターンを投影できず，投影した結果も目標のものよりも精度が悪くなっている．RMS の値についても  $E = 63.6$  となり，(i) のパターンに比べて悪くなっている．

この結果から，輝度範囲を変化させ，擬似的な負の光を表現することにより，特定領域強調がうまく行えることが確認できた．

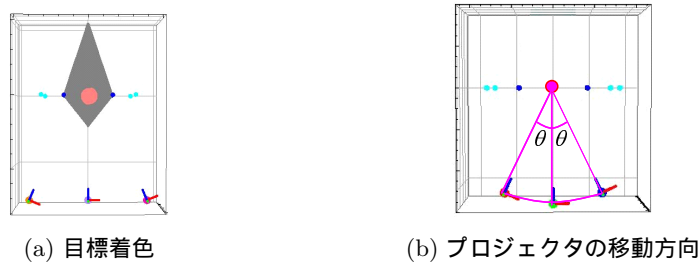
#### 4.4 プロジェクタ配置の変化による評価

次に，プロジェクタの配置が，強調提示結果に与える影響について評価した．この実験では 3 台のプロジェクタを使用し，各プロジェクタの配置を変更しながら強調提示結果を評価した．目標着色は，先の実験と同様に基準平面を中心に円形に着色を行う図 17(a) に示すものを用いた．ここで 3 台のプロジェクタは，図 17(b) に示すように，スクリーン中心から一定の距離に配置し，プロジェクタの光軸同士がなす角  $\theta$  を  $5^\circ \sim 45^\circ$  の間で  $5^\circ$  ずつ変化するようにプロジェクタを移動させ，その影響を調べた．図 18 に  $5^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 45^\circ$  の角度でプロジェクタを配置したときの投影結果を示す．また図 19 にそれぞれの角度における RMS 誤差を示す．



(a) 輝度範囲 0.5 ~ 1 (b) 輝度範囲 0 ~ 1

図 16 投影パターンの輝度グラフ  
Fig. 16 Projected image



(a) 目標着色 (b) プロジェクタの移動方向

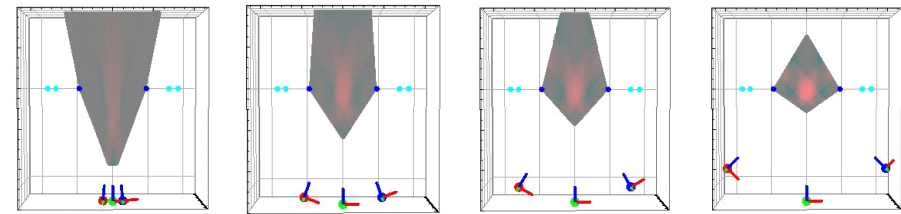
図 17 目標着色とプロジェクタの移動方向  
Fig. 17 Purpose coloring and angle of projector

まず RMS 誤差に着目すると、図 19 より、角度が大きくなるほど平均輝度誤差が小さくなっていることが確認できる。これは図 18 からわかるように、角度が小さい時は各プロジェクタの投影範囲が、ほとんど等しくなってしまう、強調提示がうまく行えないためと考えられる。しかし角度が大きくなるにつれて、各プロジェクタが異なる投影領域を持つようになるため、強調提示の精度が向上していく。よって、プロジェクタの配置は、より角度が大きくなるように配置した方が精度が良い結果が得られると考えられる。

ただし、投影結果からも分かるとおり、この角度が大きくなるにつれ各プロジェクタの投影可能範囲の積領域が小さくなるという問題もある。そのため、実際のシーンで提案法を使用するには、目的に応じて適切にプロジェクタの配置を設定する必要がある。

#### 4.5 プロジェクタ台数の変化による評価

次に、プロジェクタの台数が、強調提示結果に与える影響について評価を行った。ここでは、2~7 台のプロジェクタを用いて実験を行った。目標着色は、基準平面を中心に円形



(a) 5° (b) 20° (c) 30° (d) 45°

図 18 配置角度の変化による投影結果  
Fig. 18 Results under different environments

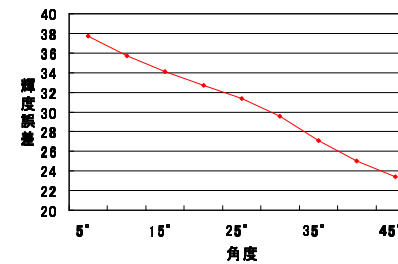


図 19 角度の変化による投影誤差  
Fig. 19 Relation between error and angle

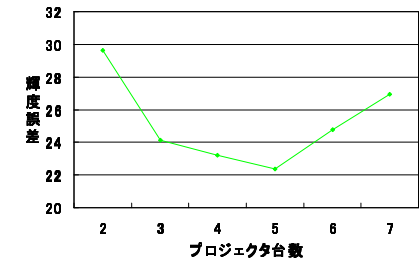


図 20 プロジェクタ台数の変化による投影誤差  
Fig. 20 Relation between error and number of projectors

に着色を行うものを用いた。投影可能範囲が変動しないよう両端の 2 台のプロジェクタを固定し、各プロジェクタ間の距離が等間隔になるようにプロジェクタの台数を増加させた。また各プロジェクタは強調領域の中心からの距離が等しくなるように配置した。図 21 にそれぞれの台数の場合のプロジェクタの配置及び投影結果を示す。また図 20 にそれぞれの台数における RMS 誤差を示す。

結果を見ると、プロジェクタの台数が 5 台以下の場合までは、プロジェクタ数の増加とともに RMS 誤差が減少していることがわかる。また、投影結果を見ても目標着色に近い結果が得られていることがわかる。これはプロジェクタ台数を増加させることにより空間の表現能力が向上した結果と考えられる。

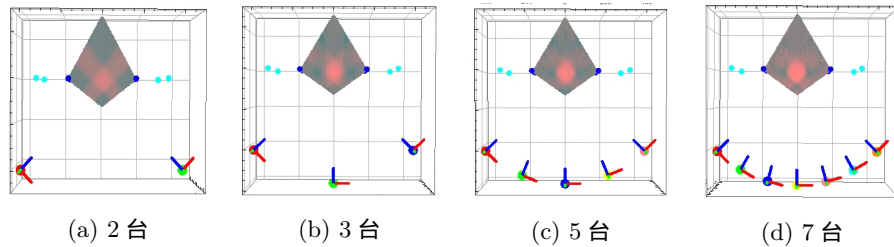


図 21 プロジェクタ台数の変化による投影結果  
Fig. 21 Results under different number of projectors

しかし、プロジェクタを 6 台、7 台配置した場合では RMS 誤差が大きくなってしまっている。これはプロジェクタ台数の増加に伴い精度が増加するという予想に反する。これは今回の実験ではプロジェクタの台数に関わらず目標着色の輝度範囲を常に 0.5~1 の範囲に設定したことに起因する。プロジェクタの台数が増加すると多数の光が合成されることになるため、1 台あたりから投影すべき輝度の値は低下する。そのため投影パターンが輝度の低い部分のみで作成されるようになり、結果として、導出されるパターンに負の値が含まれる場合が発生する。これらの輝度値は 0 に置き換えられたのち投影されるため、投影結果は大幅に悪化することになる。したがって、プロジェクタ台数を増加させた場合、適切に輝度の使用範囲を設定する必要があると考えられる。

## 5. ま と め

本研究では、マルチプロジェクタシステムを用いた、特定領域強調提示法を提案した。特に、特定領域強調提示を行うための投影パターンの作成法を提案した。また、最適投影パターンを算出するために、空間をビルボードモデルを用いて表現し、各ビルボードを任意の色で着色するパターンの導出方法を示した。また、プロジェクタ光量の間接値を擬似的な光量のゼロレベルとすることにより、擬似的に負の光を表現することが可能となり、この結果、プロジェクタの表現能力が向上することを示した。実環境実験を行うことにより、それらの方法がうまく動作することを確認した。また、シミュレーション環境を用いて評価を行い、本手法の有効性を確認した。

## 参 考 文 献

- 1) 浜田康志, 佐藤 淳: モバイルプロジェクタカメラの校正と映像生成, 画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2006), pp.471-476 (2006).
- 2) Milgram, P. and Kishino, F.: A taxonomy of mixed reality visual display, *IEICE Transactions on Information and System*, Vol.E77-D, No.12, pp.1321-1329 (1994).
- 3) 西江桂亮, 佐藤 淳: 未校正カメラと未校正プロジェクタによる 3 次元復元と仮想楽器への応用, 情報処理学会誌, Vol.47, No.SIG10, pp.49-58 (2006).
- 4) Oka, K., Sato, I., Nakanishi, Y., Sato, Y. and Koike, H.: Interaction for entertainment contents based on direct manipulation with bare hands, *Proc. IWEC*, pp. 397-404 (2002).
- 5) Sukuthankar, R., Stockton, R. and Mullin, M.: Smarter presentations: Exploiting homography in camera-projector systems, *Proc. ICCV2001*, Vol.1, pp.247-253 (2001).
- 6) 稲垣雅彦, 坂上文彦, 佐藤 淳: 車載マルチプロジェクタを用いた悪路走行支援のための路面形状強調提示, 第 15 回画像センシングシンポジウム (SSII09) 予稿集, pp. IS2-04 (2009).
- 7) 和田幹生, 岡谷貴之, 出口光一郎: 複数プロジェクタの投影像の重ね合わせによる超解像画像投影について, 第 11 回画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2008) 予稿集, pp.1668-1669 (2008).