

複数プロジェクタを利用した情報の計測・提示システムと その応用

坂上 文彦^{1,a)} 佐藤 淳^{1,b)}

概要：従来、プロジェクタとカメラを利用したビジョンシステムでは、カメラから得られた情報をプロジェクタにフィードバックすることにより、シーンに適応した投影が行われていた。これに対し我々は、複数のプロジェクタ間に生じる視差情報を利用することにより、カメラによる撮影を介さずに距離の計測・提示を同時に実現する方法を提案している。この方法は、システム実行時にはカメラでの撮影や計算機上での計算を一切行うことなく処理を実現することが可能である。そのため、従来のプロジェクタカメラシステムにて発生する処理の遅延や誤対応問題を原理的に取り除くことが可能である。本稿では、これまでに我々が提案してきたシステムの特性についてまとめるとともに、このシステムの適用可能範囲について議論を行う。

キーワード：コード化プロジェクション，マルチプロジェクタシステム，形状強調，拡張現実感

1. はじめに

近年、現実世界にコンピュータ上で合成した画像を重畳提示する、拡張現実 (AR: Augmented Reality) を実現するための研究が多くなされている [2], [4]。このような拡張現実感を実現する方法は、使用する装置によって 2 種類に大別できる。一方の方法ではヘッドマウントディスプレイやヘッドアップディスプレイを利用してユーザに情報提示が行われる [11]。この方法では、何もない中空に対してでも任意の情報を提示可能である反面、正確な情報提示を行うためにはユーザの正確な視点位置が必用になるなどの制約も存在する。もう一つの方法では、プロジェクタを用いて現実世界に直接的に情報を重畳提示する [4], [10]。この方法では、スクリーンとなる物体が必用であるため、何もない空間に対して情報提示を行うことはできないが、実空間に対して直接的に情報を付加可能であるため、ユーザにより高い現実感を与えることができる。本研究では、このようなプロジェクタを利用したシステムを用いてユーザに情報提示を行うことを考える。

プロジェクタを用いた拡張現実の技術として、対象物体に仮想的な反射特性を付加する方法が提案されている [10]。

この方法では、石膏等で構成された対象物体に任意の反射特性を与える事が可能であり、また、シーンの仮想的な照明環境を自在に変動させることも可能である。一方、対象に情報を付加するのではなく、対象の特徴をより強調して提示する方法も提案されている。天野ら [12] は、プロジェクタの投影により、対象物体の彩度や色の特性を強調する方法を提案している。この方法では対象シーンをカメラで観測し、その解析結果を投影画像に反映させることにより、強調提示を実現している。これにより、対象物体とプロジェクタの位置関係や、対象の反射特性が変動するようなシーンにおいても適切な投影を行うことができる。

しかし、シーンに合わせて投影パターンを変化させる場合、シーンをカメラやレンジセンサ等により観測する必用がある。またそれだけでなく、得られたデータを計算機等で解析し、これにあわせて投影パターンを生成しなければならない。そのため、シーンの観測からパターンの投影までには必ず遅延が発生する。そのため、動的なシーンを対象とする場合には、遅延による位置ずれ等の問題が発生する。

これに対して我々は、複数台のプロジェクタから異なるパターンを同時に投影することにより、一切の遅延を発生させることなく、シーンに適応した投影を行うコード化プロジェクションを提案している [6], [9], [13]。このコード化プロジェクションでは、異なるプロジェクタから投影された光が対象物体上で合成されることを利用して情報提示を

¹ 名古屋工業大学
Nagoya Institute of Technology, Gokiso-cho, Showa-ku,
Nagoya 466-8555, Japan

a) sakaue@nitech.ac.jp

b) junsato@nitech.ac.jp

行う。これにより、カメラ等の観測機器を用いることなくシーンに合わせた情報を提示することを実現している。このシステムは、3次元復元に用いられるステレオカメラシステムのように、非常に単純な理論に基づいて構成されている。しかし、それゆえに頑健なシステムを構成することが可能であり、また、その応用範囲も広い。本稿では、このコード化プロジェクションの基本原則を示すとともに、これまでに我々が提案したいくつかのシステムの特徴を述べる。

1.1 複数のプロジェクタを利用したシステム

我々が提案するコード化プロジェクションは、複数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により実現される。近年では、このように複数のプロジェクタからの投影を利用した様々なシステムが提案されている。代表的な例としては、複数のプロジェクタを利用して大画面表示を実現するシステムがある。このシステムで適切に画像表示を行うためには、プロジェクタ間の関係をあらかじめ校正する必要がある。岡谷ら [8] はこの校正を簡便に行う方法を提案している。また、プロジェクタ画像をつなげて大画面を実現するだけでなく、複数のプロジェクタの映像を重畳表示することにより、単一のプロジェクタを利用するよりも解像度の高い画像を表示するシステム [5] も提案されている。

一方、複数のプロジェクタからの投影を制御することにより、空間中の任意の平面に対して重点的に投影を行う、合焦投影法が提案されている。Levoyら [3] は複数のプロジェクタと鏡を利用して特定平面に投影を行い、任意の平面を選択的に照明する方法を提案している。Mukaigawa [7] らは、亀甲多面鏡を用いることにより、さらに多数のプロジェクタを仮想的に利用する方法を提案している。

このような合焦投影がプロジェクタの合焦面を仮想的に制御して表示を行うのに対し、我々が提案するコード化プロジェクションは、2台のプロジェクタ間の視差を利用して投影を行う。これにより、単に特定平面へ注目した投影を行うだけでなく、距離や高さに応じて投影パターンを変動させるといった、より柔軟な実現する。

2. コード化プロジェクションの原理

まず、コード化プロジェクションの基本原則について述べる。コード化プロジェクションでは、プロジェクタ間の視差を利用して情報提示を行う。カメラシステムにおける視差を利用した最も代表的例としては、ステレオカメラを用いた3次元距離計測が挙げられる [1]。これは、カメラと対象の距離に応じて2台のカメラ間における視差が変動することを利用したものである。我々はカメラではなくプロジェクタを利用しているが、プロジェクタとカメラは投影、撮像と役割は異なるものの、基本的には同一の光学系

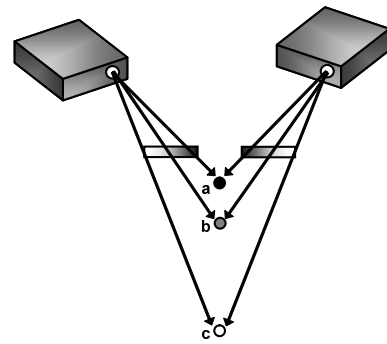


図 1 パターン投影による視差の可視化

Fig. 1 Visualization of disparities between two projectors using coded pattern projection.

を持つため、プロジェクタ間においても、距離に応じた視差の変動が発生する。そのため、適切なパターンを投影すれば、視差を可視化することが可能である。

いま、図1に示すように2台のプロジェクタが配置されており、それぞれのプロジェクタから、方向の異なる線形に変動するグラデーションパターンが投影された場合を考える。このような場合、物体表面で観測される輝度は、2台のプロジェクタからの投影光の和により決定される。まず点 (a) では画像中の輝度値の低い、黒色部分どうしの和となるため、観測輝度は低く、黒色となる。同様に、点 (b) での観測輝度は画像中の輝度が中程の部分の和となるため、灰色になる。さらに、点 (c) での観測輝度は、輝度値が高い部分どうしの和となるため、白色になる。

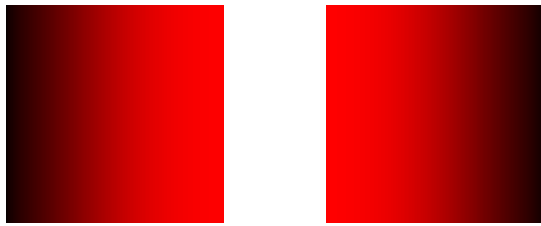
このように、観測される輝度は2台のプロジェクタからの距離に応じて変動する。これは、3次元位置に依存して投影画像中の対応点位置が変動する、すなわち2台のプロジェクタ間の視差が変動することを表している。したがって、この例に示したように、方向の異なるグラデーションパターンを2台のプロジェクタから投影することにより、2台のプロジェクタ間の視差を輝度情報に変換することができる。また、投影パターンを変化させれば、視差の変動をより明確に表現することも可能となる。

3. 距離強調提示への適用

3.1 距離強調の基本原則

まず、コード化プロジェクションを用いてプロジェクタからの距離情報を強調する方法を示す。前節で述べたとおり、2台のプロジェクタから方向の異なるグラデーションパターンを投影した場合、プロジェクタからの距離に応じて観測される輝度が変化する。しかし、単純な輝度変動のみでは距離情報をユーザに分かりやすく強調することは難しい。そこで、より明確に距離情報を提示するために、色情報を利用した距離情報提示を考える。

いま、2台の固定されたプロジェクタがシーン中に存在し、それぞれのプロジェクタから投影を行う場合を考える。



(a) Image for left projector (b) Image for right projector

図 2 投影パターン

Fig. 2 Patterns projected from projectors.

2台のプロジェクタは互いに同一のカメラパラメータを持ち、また、プロジェクタ画像平面が同一平面上に存在するように配置されているものとする。各プロジェクタから投影される画像は左上を原点 $(0,0)$ 、右下を $(1,1)$ であるものとする。このとき、2台のプロジェクタからそれぞれ以下で表されるパターン R_1, R_2 を投影する。

$$R_1 = R_{\max}(x_1 - 0.5) \quad (0.5 \leq x_1 \leq 1) \quad (1)$$

$$R_2 = R_{\max}(0.5 - x_2) \quad (0 \leq x_2 \leq 0.5) \quad (2)$$

ここで、 R_1, R_2 はそれぞれ第1、第2プロジェクタ画像の座標 x_1, x_2 における照度を表し、 R_{\max} はプロジェクタから投影可能な最大照度である。この式にしたがって投影パターンを生成した場合、第1プロジェクタからは右から左へ照度が線形に減衰するグラデーションパターンが投影され、第2プロジェクタからは逆向きのグラデーションパターンが投影されることになる。図2にRチャンネルを上式にしたがって生成した投影パターンの例を示す。

このようなパターンが点 X に同時に投影された場合、その点で観測される輝度 I は以下ようになる。

$$I = R_{\max}(x_1 - x_2) \quad (3)$$

$$= R_{\max}d \quad (4)$$

ここで、 $d = (x_1 - x_2)$ であり、 d は2台のプロジェクタ間の視差を表している。また、 $1/d$ がプロジェクタから X への距離となる。このように、観測色はプロジェクタと対象の距離によって変動する。すなわち、パターンの投影のみにより距離情報を色情報へと変換することができる。図3に図2に示したパターンを投影した場合の距離と色の関係を示す。この場合、観測される色はプロジェクタに近い位置ほど赤くなり、プロジェクタから遠ざかるにつれて黒に近づいていく。ここでは、Rチャンネルにおける観測輝度のみを対象として議論を行っているが、他のチャンネルに対しても同様のパターンを表示させることにより、任意色での投影が可能となる。

3.2 基準平面を用いた校正

本節では、より一般的なプロジェクタ配置で提案法を利用する方法を示す。ここではシーン中に平面物体を配置し、これを利用して校正を行う方法を示す。以降では、校

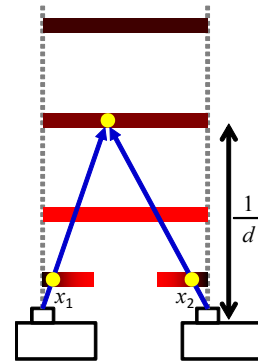


図 3 パターン投影による距離情報の強調

Fig. 3 Distance visualization by using coded projection.

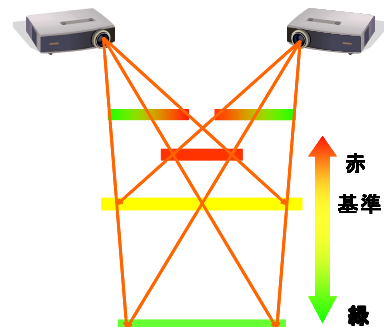


図 4 基準平面からの距離を用いた距離計測

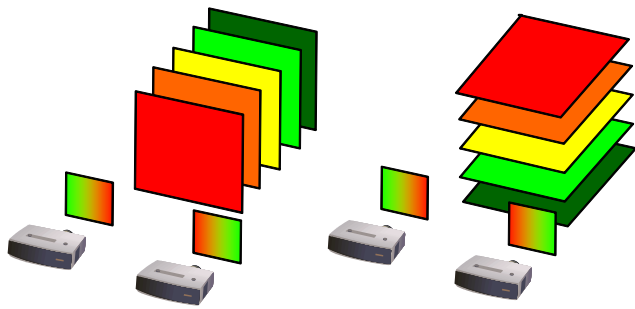
Fig. 4 Distance measurement from basis plane

正に用いる平面を基準平面と呼ぶ

この校正では、各プロジェクタの画像平面と基準平面との平面射影変換を計算する。これにより、全てのプロジェクタから基準平面上に任意のパターンを投影することが可能となる。このとき、それぞれのプロジェクタから方向が異なるグラデーションを投影し、基準平面上で重畳させる。このような場合、基準平面からの距離が変化すると、図4に示したとおり重ね合わさる画素値が変化し、観測される色が変わる。これにより、観測色により基準平面からの距離が表現されることになる。この例の場合、基準平面上では黄色が観測され、プロジェクタとの距離が狭くなると観測色が赤に近づく。また、プロジェクタからの距離が離れると、観測色が緑に近づく。

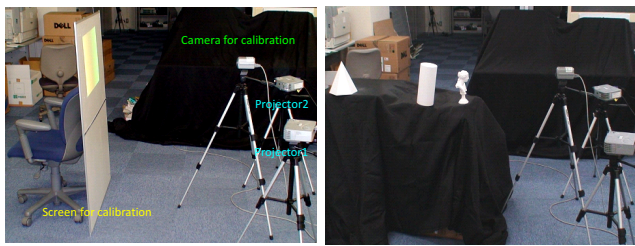
3.3 任意奥行き方向の強調

基準平面を用いて校正を行う場合、基準平面の向きを変更することにより、カメラからの奥行き方向だけでなく、高さ方向など任意方向の奥行きを色情報により提示することができる。図5(a)では、プロジェクタ画像平面に対して平行に基準平面を設置して校正を行っている。このような場合、プロジェクタからみて奥行き方向への位置変動が色によって提示される。一方、図5(b)では地面に対して平行になるように基準平面を配置している。そのため、この場合には奥行きではなく高さ方向が色により提示される。



(a) 奥行き方向の提示 (b) 高さ方向の提示
図 5 基準平面の向きにしたがった奥行き方向提示

Fig. 5 Depth visualization depends on direction of basis plane.



(a) Scene for calibration (b) Target objects



(c) Depth emphasis result

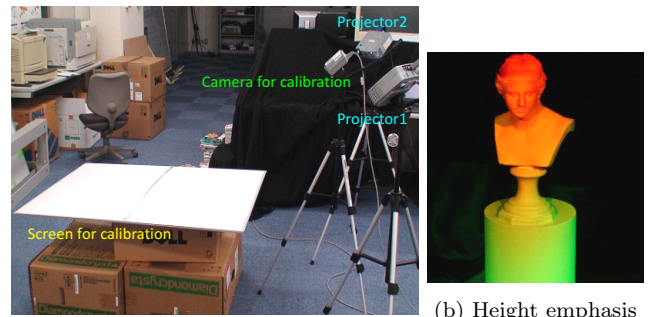
図 6 奥行き情報の提示結果

Fig. 6 Depth information emphasis by using coded projection from multiple projectors.

このように、基準平面の設置方向を変更することにより、カメラからの奥行きだけでなく、高さ方向など任意方向を提示することが可能になる。これにより、プロジェクタの投影可能範囲であれば、プロジェクタの方向を変動させることなく、平面射影変換による変換を計算するだけで任意方向の奥行き提示を実現できる。

3.4 距離情報の提示実験

提案した方法を用いて、距離情報を提示する実験を行った。この実験では、図 6(a) に示すように基準平面とプロジェクタを配置して校正を行った。なお、シーン中に存在するカメラは校正時のみに使用したものであり、提案法の適用に際しては使用していない。投影パターンには、赤から緑へと変化するパターンを使用し、近距離では赤色が、遠距離では緑色が観測されるようにした。対象物体として図 6(b) に示す彫像、円柱、錐体を配置した。これらの物体に対して提案法を適用し、見えの変化を観測した。図 6(c)



(a) Scene for calibration (b) Height emphasis result

図 7 高さ情報の提示結果

Fig. 7 Height emphasis by using coded projection.

に提案法により奥行き情報を提示した結果を示す。

結果を見ると、手前の物体から順に赤、橙、緑と色が変化していることが確認できる。また、各物体表面には様々な法線方向が存在しているが、どの点についても概ね同系統の色が観測できていることが確認できる。中央に配置された円柱については、端の部分で異なる系統の色が観測されているが、これは attached shadow や cast shadow の影響により片側のプロジェクタからしか投影が行えなかったためと考えられる。

3.5 高さ情報の提示実験

次に、提案法を用いて高さ情報の提示を行った結果を示す。システムの校正は図 7(a) に示したように地面に対して平行な平面を用いて行った。投影パターンには、高所から低所への移動により赤から緑へと変動するものを用いた。なお、先の実験と同様に校正シーン中のカメラは校正時にしか使用していない。このように校正されたシステムを用いて高さの提示を行った。対象には胸像を用いた。図 7(b) にその結果を示す。

結果を見ると、対象物体の上部ほど赤色で着色されており、下部ほど緑色により着色されていることがわかる。このことから、基準平面の方向を変化させることにより距離情報だけでなく、高さ情報についても提示可能であることが確認できた。

4. 領域強調提への適用

4.1 コード化プロジェクションによる特定領域の強調提示

本節では、コード化プロジェクションの応用例の 1 つとして、特定領域のみを強調提示する方法を示す。まず、本節で述べる特定領域の強調提示について説明する。この方法では、図 8 に示すように、あらかじめ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。これにより、中央部分に配置された物体を、周辺領域に配置された物体よりも強調して提示することができる。ここで、このよう

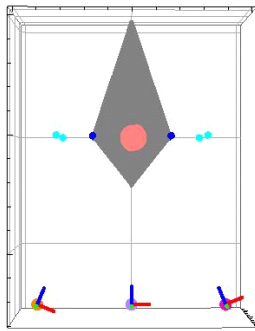


図 8 強調領域

Fig. 8 Emphasized area.

な 3 次元の着色パターンを目標着色と呼ぶ。本節では、この目標着色を行うための最適投影パターンを導出する方法を示す。この方法により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。

4.2 ビルボードモデルを用いた空間表現

特定領域の強調提示は、プロジェクタ投影パターンの重ねあわせにより実現される。ここではまず、最適パターンの導出方法について述べる前に、目標着色を定義するための 3 次元空間のモデル化について説明する。3 次元空間の表現方法としては、ボクセル集合を用いる方法などがあるが、提案法では、図 9 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潔化のために、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。これにより、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、各プロジェクタの投影行列が校正済みであり、各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 9 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、図 9 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

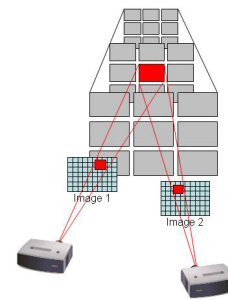


図 9 ビルボードモデルを用いた空間表現と投影

Fig. 9 The billboard space and its projection to projector images.

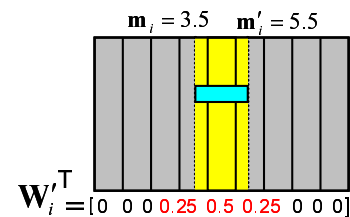


図 10 ビルボードモデルの重み

Fig. 10 Weight for each billboards.

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、容易に光の拡散による減衰を表現することが可能となっている。

ここで、プロジェクタ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 W_{ij} とする。この 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 10 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。

$$W_i = [W_{i1} \ \dots \ W_{ij} \ \dots \ W_{iN}]^T \quad (5)$$

この W_i を用いると、プロジェクタから投影するパターンを Y とするとき、ビルボード i の輝度値 I_i は以下の式で表される。

$$I_i = W_i^T Y \quad (6)$$

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、各要素がビルボードに着色したい輝度をもつ 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、プロジェクタの投影パターンを Y とすると Y と I の

関係は以下のように表される。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{W}_1^T \\ \mathbf{W}_2^T \\ \vdots \\ \mathbf{W}_M^T \end{bmatrix} \mathbf{Y} = \mathbf{I} \quad (7)$$

この式を満たす投影パターン \mathbf{Y} を求めることにより、目的の着色を行う。ただし、 N に対して M が大きい場合、この式を全て満たす \mathbf{Y} は存在しない。そのため最小 2 乗法により最も妥当な \mathbf{Y} を計算する。 $[\mathbf{W}_1 \dots \mathbf{W}_M]^T = \mathbf{L}$ としたとき、最小 2 乗解 $\hat{\mathbf{Y}}$ は \mathbf{L} の擬似逆行列 $\mathbf{L}^+ (= \mathbf{L}(\mathbf{L}^T \mathbf{L})^{-1})$ を用いて以下のように計算される。

$$\hat{\mathbf{Y}} = \mathbf{L}^+ \mathbf{I} \quad (8)$$

このように求められた $\hat{\mathbf{Y}}$ により、 \mathbf{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。

4.3 円柱領域強調

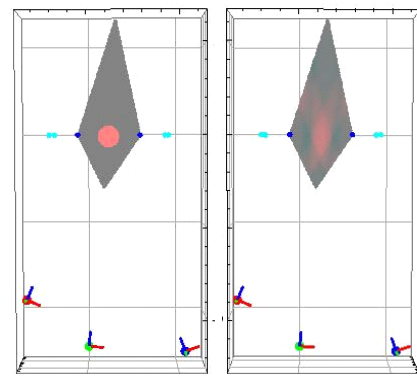
前節で述べた特定領域協調投影を用いて、中心が円形に強調される目標着色を設定し、パターンの導出・投影を行った結果を示す。図 11(a) に目標着色を、提案手法を用いて導出されたパターンを図 12 に示す。また、導出されたパターンを投影することにより得られた 3 次元着色結果を再現したものを図 11(b) に示す。さらに、導出されたパターンをプロジェクタから投影し、白色物体を用いて、観察した結果を図 13 に示す。

まず、図 11(b) に示された投影結果を見ると、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 13 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、これ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、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、目的とした領域の強調提示が行えることが確認できた。

5. 3次元形状強調

5.1 ランダムパターン投影による 3次元形状強調

最後に、コード化プロジェクションを用いて 3 次元形状強調を行う方法を示す。これまでに示した方法では、距離の変動や領域の変動など、シーン中の大域的な変動を強調してきた。しかし、実シーンへの応用を考えると、より細かな変動の強調が必用になることも多い。例えば、工業部品の製品検査などにおいては、部品上の細かな凹凸や、設計図との差異を検出する必用がある。このような変動は非常に微細なものであるため、前節で示した方法ではこれら



(a) 目標着色 (b) 投影結果

図 11 目標着色領域と投影結果

Fig. 11 Objective color pattern (a) and synthesized 3D pattern (b).



プロジェクタ 1 プロジェクタ 2 プロジェクタ 3

図 12 導出された投影パターン

Fig. 12 Projection patterns computed from proposed method.

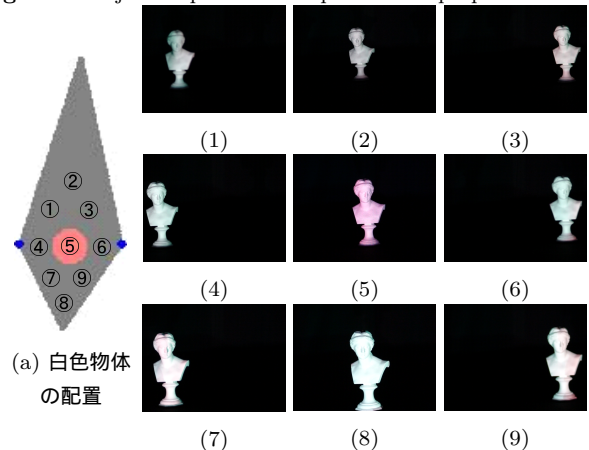
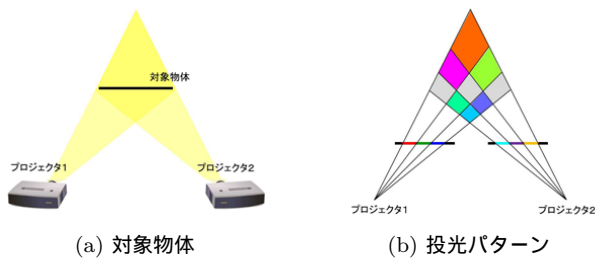


図 13 特定領域強調提示結果

Fig. 13 Results of 3D space emphasis.

を正確に検出することは難しい。本節では、このような細かな変動をより強調するための投影パターンについて検討する。

いま、シーン中に 2 台のプロジェクタが設置されており、両方のプロジェクタからの同時に投影可能な範囲を対象空間とした場合を考える。この対象空間中に対象物体を置くと、物体の表面上では 2 台のプロジェクタの投影光が合成される。光の足し合わせの原理により、この合成色は 2 つのプロジェクタ光の和となる。いま、簡単のため、各プロジェクタが 1 次元のパターンを投光するものとし、プロジェクタ 1 の投光パターンを $\mathbf{I}^1 = [\mathbf{I}_1^1, \dots, \mathbf{I}_N^1]$ 、プロジェクタ 2 の投光パターンを $\mathbf{I}^2 = [\mathbf{I}_1^2, \dots, \mathbf{I}_N^2]$ とすると、プロジェクタ 1 の i 番目の画素の光とプロジェクタ 2 の j 番目の画素の光が共に照射される点 X_{ij} が受光する光 \mathbf{I}_{ij} は以



(a) 対象物体 (b) 投光パターン

図 14 3次元形状強調

Fig. 14 Object shape emphasis

下のように表せる．

$$I_{ij} = I_i^1 + I_j^2 \quad (9)$$

このとき、 I_i^1 と I_j^2 が互いに補色の関係にある場合には、合成色 I_{ij} は白色となる．そこで、 X_{ij} が物体表面上の点であれば I_i^1 と I_j^2 が補色となり、そうでなければこれらが補色にはならないような投光パターン I^1, I^2 を考える．このとき、白色に着色される3次元形状を本稿では基本形状と呼ぶことにする．

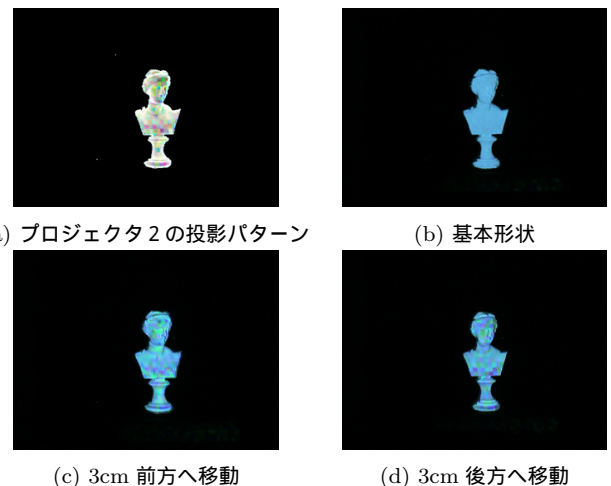
簡単のため、図 14(a) に示すように、対象物体の基本形状として平面を考え、この平面上の点は白色に着色され、この平面以外の点は白色以外の色に着色されるような投光パターンを考えることにする．図 14(b) に示すようにプロジェクタ 1 の各画素から赤、緑、青を投光し、プロジェクタ 2 の各画素からシアン、マゼンタ、黄を投光すると、3次元空間中におけるこれらの光の合成色パターンは図 14(b) に示す通りとなる．すなわち、基本形状である平面上の点では互いに補色どうしが合成されて白色となる．一方、この平面以外の点においては補色ではない光同士が合成されるため、その合成色は白色以外の色となることがわかる．従ってこの平面から逸脱した部分が存在すれば、その部分は白色以外の色に鮮明に着色され基本形状から逸脱していることが明瞭に提示される．この例では、基本形状として平面を与えたが、この基本形状は一般に任意の3次元形状を与えることができる．

提案法では、基本形状において補色となるように2台のプロジェクタの投光パターンを制御すればよいが、このような投光パターンの組み合わせは無数に存在する．また投光パターンによっては基本形状以外の部分においても合成色が白色となる場合があるが、識別能力という観点からはこのような投光パターンは好ましくない．基本形状以外の部分において合成色が白色とならないようにするためには、一方のプロジェクタから投光する光の色が全て異なっていればよい．そこで本稿では、プロジェクタ 1 から1画素ごとに全くランダムに色が異なる投光パターンを照射し、プロジェクタ 2 から、基本形状上の点においてプロジェクタ 2 の光の補色となるような投光パターンを照射する．これにより、基本形状においては白色が合成され、基本形状以



図 15 着色目標の3次元物体

Fig. 15 Target objects



(a) プロジェクタ 2 の投影パターン

(b) 基本形状

(c) 3cm 前方へ移動

(d) 3cm 後方へ移動

図 16 対象物体（女性像）への投影結果

Fig. 16 Shape emphasis results.

外の部分においては非白色が合成される．

5.2 3次元強調結果

異なる形状を持つ3次元物体を複数用意し、それぞれを基本形状としてプロジェクタによる強調提示の実験を行った．本実験では3次元物体として、図 15 に示す2種類の白色物体を用意し、投影パターンの生成を行った．またそれぞれの物体を前後に移動させたときの着色の変化を調べた．

図 16 から図 17 にそれぞれの物体における実験結果を示す．それぞれの図において、(a) に3次元物体に対するプロジェクタ 2 の投影パターンを、(b) に投影結果を、(c) に物体を前方に3cm動かしたときの投影結果を、(d) に物体を後方に3cm動かしたときの投影結果をそれぞれ示す．

図 16 から図 17 より、全ての3次元形状において、基本形状においては白色に、前後へ3cm動かしたときには非白色に3次元物体が着色されていることが確認できる．これらの結果より、提案法では、どのような3次元形状であっても基本形状からの逸脱を適切に強調可能であることが確認できる．また、3cm という短い距離の移動でも3次元物体の表面に非白色の輝度が表れたことから、提案法では高精度に3次元物体の強調提示が行えることが確認できる．本実験では提案法の基本的な動作を確認するため、プロジェクタ 1 の投光パターンは1画素単位で変更せずに10画素単位で変更した．この投光パターンを1画素単位で変

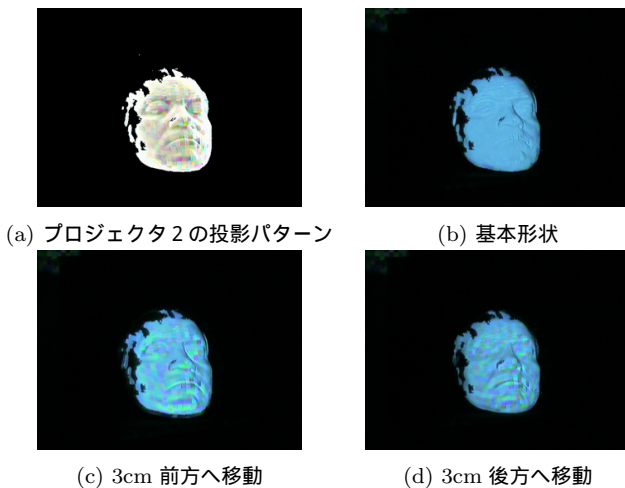


図 17 対象物体（マスク）の強調結果

Fig. 17 Shape emphasis results

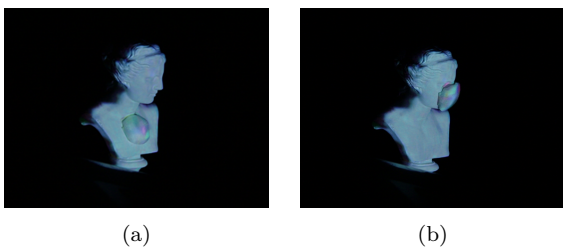


図 18 投影結果

Fig. 18 Projection results

更することにより、さらに高精度な強調提示が可能になると考えられる。

次に、基本形状に曲面物体を付け加えた対象に対して投光パターンの投光を行った。図 18(a) は胸の部分に曲面物体を加えた場合の投光結果であり、図 18(b) は顔の部分に加えた場合の結果である。これらの結果においては、基本形状以外の部分のみが非白色に着色されており、基本形状からの逸脱が強調提示できていることが確認できる。

6. まとめ

本稿では、我々がこれまでに提案してきたコード化プロジェクションの基本原理を明らかにするとともに、コード化プロジェクションのいくつかの適用例を示した。本稿にて示したコード化プロジェクションは、一度適切な投影パターンを作成してしまえば、その後はカメラによる観測、計算機を用いたパターン導出を行うことなく、シーンの 3 次元情報を強調することが可能である。この方法では、カメラ等のセンサからの入力を使用しないため、一般的なプロジェクタカメラシステムとは適用可能な範囲が異なるが、本稿にて示した距離情報強調や 3 次元形状強調など、様々な用途に使用することが可能である。また、ステレオカメラを用いた一般的な距離計測系が画像処理に伴う誤対応問題を必ず包含しているのに対し、提案法では明示的な対応点探索を必用としないため、この問題を原理的に回避

することが可能である。今後は、コード化プロジェクションの適用可能範囲についてより詳細に検討を行うとともに、新しい適用例を検討していく。また、カメラを利用したフィードバック系とうまく組み合わせることにより、より広範囲での利用を目指して検討を行う予定である。

参考文献

- [1] HARTLEY, R. I. Theory and Practice of Projective Rectification, *Int. Journal of Computer Vision*, **35**, 2 (1999), 115–127.
- [2] KAKUTA, T., OISHI, T. and IKEUCHI, K. Virtual Asukakyo: Development and Evaluation of Asuka-Kyo MR Contents, Proc. ASIAGRAPH 2008 (2008).
- [3] LEVOY, M., CHEN, B., VAISH, V., HOROWITZ, M., MCDOWALL, I. and BOLAS, M. Synthetic aperture confocal imaging, *ACM Transactions on Graphics* (2004), 825–834.
- [4] 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, *情報処理学会論文誌*, **47**, SIG10(CVIM 15) (2006), 49–58.
- [5] OKATANI, T., WADA, M. and DEGUCHI, K. Study of Image Quality of Superimposed Projection Using Multiple Projectors, *IEEE Transactions on Image Processing*, **18**, 2 (2009), 424–429.
- [6] R.NAKAMURA, F.SAKAUE, and J.SATO, Emphasizing 3D Structure Visually using Projection from Multiple Projectors, Proc. Asian Conference on Computer Vision (2010).
- [7] Y.MUKAIGAWA, S.TAGAWA, J.KIM, R.RASKAR, Y.MATSUSHITA, and Y.YAGI, Hemispherical Confocal Imaging using Turtleback Reflector, Proc. ACCV2010 (2010).
- [8] 岡谷貴之, 和田幹生, 出口光一郎マルチプロジェクタディスプレイの簡単キャリブレーション, *画像の認識理解シンポジウム予稿集* (2006).
- [9] 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予稿集 (SSII09) (2009).
- [10] 向川康博, 西山正志, 尺長健スクリーン物体への光学パターン投影による仮想光学環境の実現, *電子情報通信学会論文誌 D-II*, **J84-D-II**, 7 (2001), 1448–1455.
- [11] 中村耕治, 安藤浩, 川原伸章 ユニバーサルデザインウインドシールドディスプレイによる安全で快適な画像情報提示, *自動車技術*, **59**, 6 (2005), 49–54.
- [12] 天野敏之, 加藤博一プロジェクタカメラフィードバック系によるアビアランス強調, *電子情報通信学会論文誌*, **J92-D**, 8 (2009), 1329–1338.
- [13] 高田翔平, 坂上文彦, 佐藤淳 マルチプロジェクタによる 3 次元形状強調, *画像の認識理解シンポジウム (MIRU2012)* (2012).