

複数投影パターンの重ね合わせにより複数深度に異なる情報を提示するためのパターン最適化手法

平尾 勇人¹ 日浦 慎作² 古川 亮² 川崎 洋¹

概要: 近年, 拡張現実 (AR) や複合現実 (MR) といった空間的な情報提示を行うデバイスや手法が注目を集めている。しかし HMD や 3 次元ディスプレイといったデバイスは未だに実験的な要素が強く, 普及率は低いものとなっている。そこで我々は, 広く普及しているプロジェクタを用いて, AR や MR で利用可能な新しい情報提示デバイスを提案する。一般にプロジェクタの投影画像は空間的に不変なため, 投影対象の位置が変わっても投影パターンは変化しない。しかし 2 台のプロジェクタを用いることで, 投影対象の位置によって異なる投影パターンを投影する手法が近年提案されている。ところが, プロジェクタが 2 台の場合, 3 つ以上の深さに対して異なる画像を作成することは原理上困難であった。本研究では人間の視覚特性に着目することで, 2 台のプロジェクタを用いて, 3 つ以上の投影面に対して同時に異なる情報を提示する手法を提案する。この実現のため, 投影像として文字や記号を対象とすることで, 投影像そのものが変形しても人の視認性が変わらないことを利用する。さらに, 輪郭に敏感であるという人間の視覚特性を利用することで視認性の向上を目指した。上記により, パターン生成の自由度が増したため, 投影パターンを生成するための最適化には, 遺伝的アルゴリズムを使用した。実験により提案手法の有効性を検証した。

YUTO HIRAO¹ SHINSAKU HIURA² RYO FURUKAWA² HIROSHI KAWASAKI¹

1. はじめに

近年, 拡張現実 (AR) や複合現実 (MR) といった空間的な情報提示を行う手法が注目されている。しかし HMD や 3 次元ディスプレイといったデバイスは未だに実験的な要素が強く, 普及率は低いものとなっている。一方で, 任意形状にパターンを投影するプロジェクションマッピング技術に注目を集めている。プロジェクションマッピング技術では, 広く普及しているビデオプロジェクタを用いて建造物や人間などを対象に画像を投影し, もとの対象とは異なる映像情報を付加することで様々な視覚効果を実現することができるため, AR や MR で広く利用されている。しかし, 一般にプロジェクタの投影画像は空間的に不変のものであり, 投影対象の位置が変わっても投影パターンは変化しないため, 投影される映像には制約があった。もし, プロジェクタを用いて異なる投影面に対して異なる情報を提示することができれば, 新しい AR や MR の情報提示デバ

イスとして利用できる可能性がある。

先行研究において, 蛭川や石原らは 2 つのプロジェクタを用いて 2 つの深さで複雑な表面を持つ任意形状の 2 物体に対して像を変化させることに成功した [1], [2]。これは, 異なる 2 つの深さにおいて各プロジェクタからピクセルの色を合成・打ち消しあうパターンを投影することで, 2 つの深さで異なる映像を投影するものであった。ただし蛭川らの手法では, プロジェクタの台数と同じ深さでの投影だけを実証しており, 実際の環境において, 投影面が 3 つ 4 つと多くなる場合には, プロジェクタ 2 台では対応できないと考えられる。さらに単純に台数を増やすと, コントラストが大きく低下するという問題もある。もし 2 台のプロジェクタで 3 つ以上の投影面で異なる像を投影することができれば, モノづくりの現場において, 目視で部材を設置する位置を確認しながら作業を進めるなどの AR・MR デバイスとして使用できるなど, これまでにない利用方法が考えられる。

これを実現するため, 本研究では投影する画像に対して視覚特性を利用した手法を用いて投影画像生成の最適化を遺伝的アルゴリズムを用いて行うことで, 2 台のプロジェクタからの投影画像を投影面上で合成することで 3 つ以上

¹ 九州大学大学院システム情報科学研究院 情報知能工学部門
819-0395 福岡市西区大学元岡 774

² 広島市立大学大学院情報科学研究科知能工学専攻 731-3194 広島県広島市安佐南区大塚東 3 丁目 4-1

の投影面で異なる像を投影する手法を提案する。具体的には文字や記号といったパターンを投影画像とし、これらが厳密に再現されることを目的とするのではなく、「視認される」ことを目的とすることで、パターン生成に大きな自由度を与えることで、提案手法の実現を目指す。さらに、人の視覚特性として、エッジに敏感であることと、逆に高周波なランダムパターンの場合それが単一色に見えてしまうこと等を利用したパターン生成を目指す。これらのパターンの自由度や人の視覚特性を少ないパラメータでモデル化することが困難であったため、今回は遺伝的アルゴリズムにより、最適パターンを探索を行った。

実験では2つのプロジェクタから投影画像を投影することで実際に3つ以上の投影面を用いて情報提示を行う文字の画像と記号の画像の2つの画像に関して異なる位置で異なるパターンが投影できることを確認した。

2. 関連研究

プロジェクタを用いた多層投影面への投影の研究は多く行われている。複数プロジェクタを用いた異なる深さへの投影の研究として、中村らによるコード化プロジェクションを用いた研究がある。この研究では、コード化された画像を複数のプロジェクタで投影することで空間的情報を色で表現している [5]。

Nagano らは光の混合性を利用して多数のプロジェクタからの独立した投影像を目的の表面上に投影することで、異なる方向から様々な像が投影されるディスプレイを実現している。また、プロジェクタを用いて本来の解像度以上の鮮明な像を投影させる研究も行われている [6]。

Barnum らはディスプレイを水滴で表現し、カメラとプロジェクタの同期を行うことでプロジェクタの光線が異なる深さの水滴に投影される多層ディスプレイの表示を可能としている [7]。

Chen と Schikore は複数のプロジェクタを用いて互いの投影面を校正することで高解像度な投影をする研究を行っている [8], [9]。Godin らは、人間は視野の中心に注目するという視覚的特性を利用して、低解像度の像が投影されている中で視野の中心に高解像度の投影像を重ねることで鮮明な投影像の合成を行う研究を行っている [10]。

さらに、プロジェクタを用いた被写界深度の拡張を目的とした研究も行われている。Bimber らは、異なる焦点面を持つプロジェクタを複数用いることによって被写界深度の拡張を行っている [11]。また、Nagase らは複数の鏡を用いることで異なる焦点面のプロジェクタを複数使用することと同じ効果を得て被写界深度の拡張を行うことを実現している [12]。

近年、Scarzanella 氏と石原氏は複数のプロジェクタから平面に対して単純なパターンを投影し、プロジェクタの距離に応じて投影像が変化するシステムを提案してい

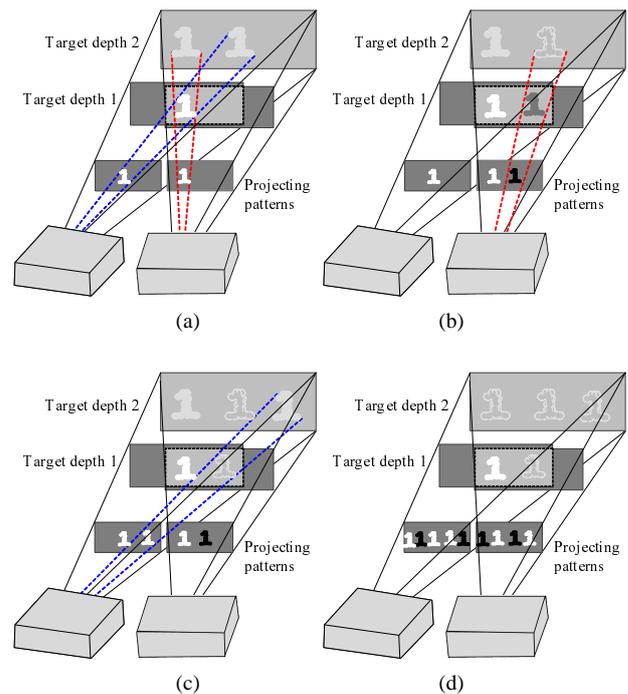


図 1: 複数パターン投影原理

る [1], [2]。さらに蛭川らは、2つのプロジェクタを用いて、2つの位置に設置された2つの異なる任意形状の物体に対して異なる映像を投影することに成功している [3]。

3. 提案手法の概要

3.1 原理

本システムは、2つのプロジェクタの投影光を重ね合わせることで複数の平面で異なる画像の同時投影を実現する。図1を用いてその原理を簡単に説明する。図1(a)で示すように2台のプロジェクタで投影するパターンは投影面1で干渉して目標画像が投影される。しかし、そのパターンは、投影面2にも投影されてしまうため投影面2の再現性を大幅に低下させることになる。そこで、図1(b)で示すように、これを打ち消し合うパターンを投影する。これを、図1(c)(d)のように次々と繰り返すことで、投影面1および投影面2の双方に目標画像の投影が実現される。

3.2 アルゴリズム概要

アルゴリズムの概要を図2に示す。一番最初にプロジェクタからグレーコード投影を行うことでオブジェクトとプロジェクタ間のピクセル単位での位置関係となるホモグラフィ行列を最初に求めておく。これは図3に示すように、各プロジェクタで投影するパターンを作成するために投影光がオブジェクトのどの位置に来るか知る必要があるためである。本研究ではグレーコード投影を行うことで対応関係を求めた。グレーコード投影によって図4(a), (b), (d), (e)のような縞模様のパターンを複数投影し、図4(c), (f)のような縦横それぞれのマップ画像(図5)を作ること

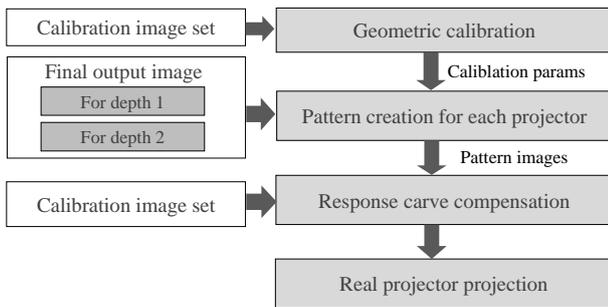


図 2: アルゴリズム概要

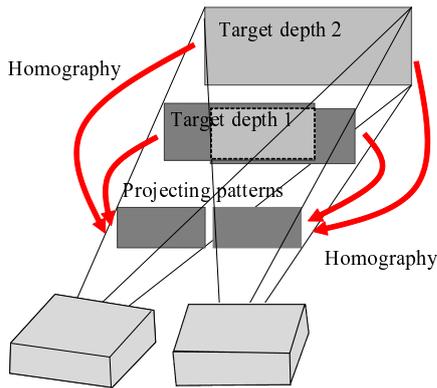


図 3: ホモグラフィによる投影像変換

で対応が得られる。

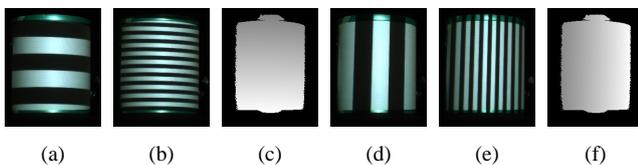


図 4: グレーコード投影



図 5: グレーコード画像

次に図 6 のような遺伝的アルゴリズムを用いてパターンの生成を行う。遺伝的アルゴリズムは図 6 の通り、6 つのステップに分かれている。最初にランダムにドットが打たれた図 7 のような背景画像を生成する。次に投影したい文字画像とその輪郭領域のマップを図 8 のように生成する。この輪郭領域のみにもう一度背景画像と同様にランダムなドットを描画する。この方法により、輪郭部分のみ密度が高いランダムなドット背景である図 10 を作成できる。次に図 10 の画像に自由度となる画像の回転や、平行移動、拡

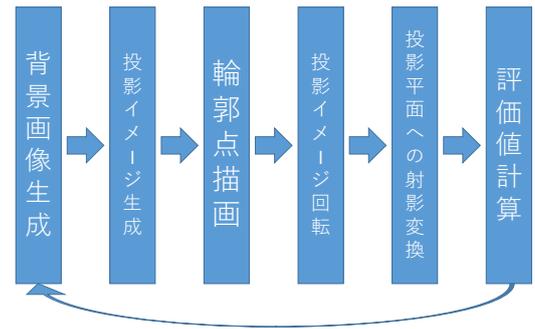


図 6: GA アルゴリズム

大縮小などのアフィン変換を加える。これらの変換によりプロジェクタ投影画像図 9 (f) が得られる。次にこの投影画像から射影逆変換を行う。射影逆変換を行うことで、投影面領域に実際投影されるであろうパターンを得ることができる。2 台のプロジェクタの投影画像から射影逆変換を行い、2 枚の画像を得た後、その 2 枚の画像を重ねて描画した投影領域のシュミレーション画像となる図 11 を作成する。この図 11 で投影領域の輪郭部分のランダムドットの密度の高さを評価値とする。

GA では、自由度となる画像の回転や、平行移動、拡大縮小などのアフィン変換によって様々な異なる 100 個のシュミレーション画像を生成し、その中で最も評価値が高いものを保存しておく。この最も評価値の高い画像と新たに生成した 99 個の画像を加えた 100 個の画像の中で最も評価値の高い画像を発見する手続きを繰り返す。このようにして評価値を更新することで最適化を行っている。

4. 視覚特性に基づく投影パターン生成手法

2 台のプロジェクタを用いて 3 つ以上の投影面に対して異なるパターンを投影する場合、先行研究の手法では変数がオーバーコンストレイントとなるため、そのままでは高い再現性を得られる投影パターンを生成することが難しい [1], [3]。そこで我々は、投影目標を文字や記号に限定することで、これら目標画像に対してある程度の変形を加えても、これら文字列の視認性が変わらない人間の視覚特性を利用して、より大きな自由度でパターンを生成することを試みた。投影画像の変形には、パラメータ数をあまり増やすこと無く、大きな変形を実現するため、画像の回転や平行移動、拡大縮小などの自由度を持つアフィン変換を使用した。さらに、より視認性の高い結果が得られるように、人間の視覚特性に基づいた、輪郭強調などのアルゴリズムをパターン生成の際に追加した。このような相互に依存する複数のパラメータを同時に最適化することは容易ではないため、本論文では遺伝的アルゴリズムを用いた。

4.1 人間の視覚特性について

デビット・マーによると、「輪郭が形状を描き出す威力と鮮明さは、疑いのないものである。重要な点は、このように非常に多くの輪郭から、我々は3次元形状に関する情報を得ることが可能であり、また実際そのようにして得ているという事実がある」としている [4]。これより輪郭が形状を認知するのにとても大きな役割を果たしていることがわかる。我々は輪郭に多くの点を打つことで人間の視覚特性として形状を認知しやすくする効果を狙って投影画像を生成した。また、高周波なドットパターンは単一色の灰色に視認されるため、この特性も利用する。

4.2 視覚特性に基づく視認性の高いパターンへの設計

4.2.1 文字や記号を用いた投影画像の生成

まず、人間の視覚特性に基づき、視認しやすい情報提示画像を生成する。高周波なドットパターンは単一色の灰色に視認されるため、ランダムなドット背景を作成する。作成される画像は図7のとおりである。黒背景の画像に半径2ピクセルの白い円をランダムに配置している。

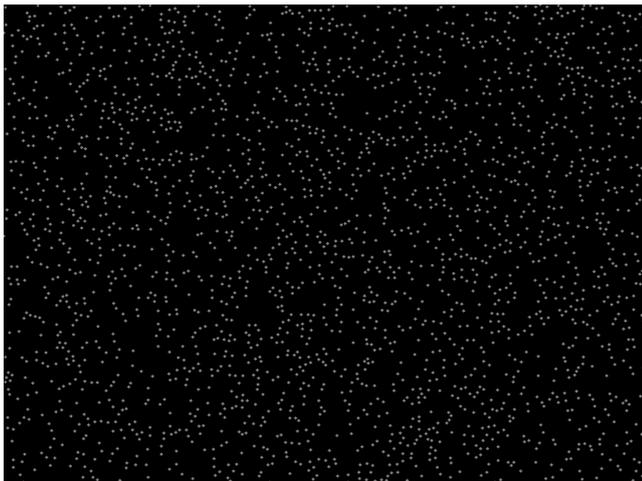


図7: 背景画像

次に投影面に表示したい画像のマップを作成する。ここでは図8のようなグリッドや文字列を描画した例を示す。図において赤色の部分が投影面で人間が認知するための文字領域となる。また次の点の描画のステップにおいて、描画領域の輪郭部分が必要となるため、輪郭部分をモーフォロジカル・フィルタにより作成する。図では緑色で示された部分である。

4.2.2 アフィン変換による目標パターンの変形

パターンを生成にあたり、2台のプロジェクタ投影のみで、複数の奥行きに異なるパターンを提示するのでは、オーバーコンストリントとなり実現が困難となるため、投影目標パターンにも自由度を与えることでこれを解くことを目指す。具体的には、画像の回転や平行移動、拡大縮小などのアフィン変換を加える。図9(a)から(e)に、各奥行き



図8: 描画画像例

におけるアフィン変換を適用した例を示す。このような微小な幾何変換を加えても、人の視認性には全く変化の無いことが分かる。これらの各奥行きの目標画像を一つに重ね合わせた、実際に観測される画像を再現したものが図9(f)である。複数の異なる奥行きの目標画像が一つに重ね合わされるため、視認性が低下していることが分かる。

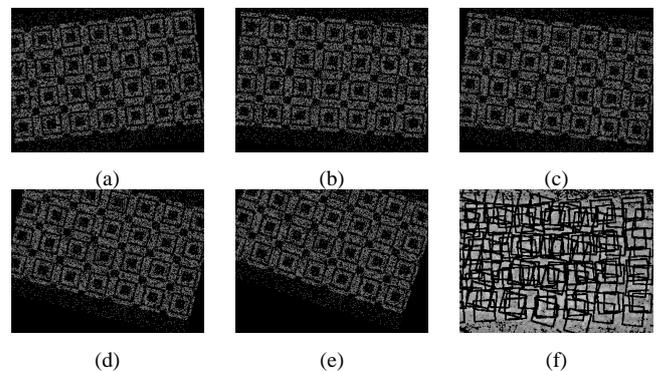


図9: 回転画像

4.2.3 点の描画による輪郭の強調

前記重ね合わせ画像の視認性低下を抑えるため、人間の視覚特性を利用する。具体的には視認性の向上のため、文字や記号の輪郭部分を強調する。このために、先の図8の画像の輪郭部分（緑色の部分）に背景と同様のランダムな点を追加する。この方法により描画領域の輪郭部分の点の密度が背景よりも高くなり、輪郭が強調されるため、人間の視覚特性として形状を認知しやすくする効果が得られる。

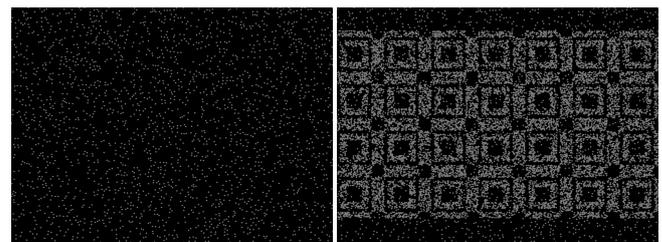


図10: 点の描画による輪郭強調

4.3 遺伝的アルゴリズムによる最適化

前記ステップでできた投影目標画像から射影逆変換を行った図 11 が、プロジェクタで実際に投影するパターンとなる。できるだけ視認性の高いパターンを最適化により求める必要がある。本論文では、次に説明する遺伝的アルゴリズムを用いて最適化を行う。遺伝的アルゴリズムとは生物進化における遺伝の仕組みをソフトウェア的に模倣することで最適化問題における最適解を探索する手法である。GA を用いると、コスト関数が複雑であったり、パラメータ数が多くて大域解が得られにくい場合等にメタヒューリスティックを用いて準最適解を得ることができる。

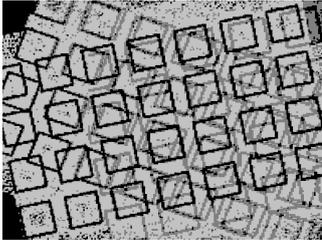


図 11: 射影逆変換画像

4.3.1 視覚特性に基づく評価値の定義

提案手法では、各深度における縦、横、回転角度の移動、および輪郭強調を行った投影画像を生成し、その視認性向上を目標とする。人の視覚特性をモデル化することは困難なため、本研究では経験に基づく評価値設定を行った。具体的には、視認性向上の要因である輪郭の強さを一つの正の評価値とした。一方で、視認性低下の要因である、画像上における穴を負の評価値とし、これを重み付きで足したものを評価値として用いる。画像上における穴の検出方法としては、画像全体を小さなブロック単位に分割してその中の領域が全て黒色の場合穴として検出した。図 12 において、青色の場所が穴として検出された場所であり、水色の部分が負の評価値として計算された場所となる。

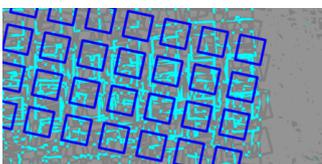


図 12: 評価用画像

4.3.2 初期世代の作成

各深度における縦、横、回転角度のランダムな移動値を持つ、100 個の個体を作成する。これらのパラメータは、平行移動は縦・横それぞれ ± 20 ピクセル、回転は ± 20 度の自由度を持ち、それぞれの変数は 1 つめの深さにおける縦の移動度、2 つ目の深さにおける縦の移動度...1 つ目の深さにおける縦の移動度...と連続させて連なった形にしておく。この 256 次元ベクトルを遺伝子として用いた。

4.3.3 次世代の生成手法

以下に述べる交叉と突然変異によって次世代の個体を 100 個作成する。これを前記の評価値を用いて反復的に試行する。

100 個の個体の中で最も評価値が高いものを選び、これの遺伝子情報をエリート遺伝子として保存しておく。先程導出された評価値を基準とした確率を用いた選択方法によって 100 個の個体の中から 2 つの個体を選択する。つまり評価値が高いものほど選択されやすいという仕組みになっている。次に選ばれた 2 個体の遺伝子の切断点をランダムに決定する。切断点から後ろにある遺伝子情報を交換する。これにより新しい個体が 2 個生成されることとなる。突然変異の確率は 5% としているので、今回突然変異を行うかどうかの判定を最初に行う。突然変異を行う場合、遺伝子の値を全てランダムに再決定する。

この遺伝的アルゴリズムを適用することにより、アルゴリズム実行前の初期画像である図 13(a) とアルゴリズムを 100 回繰り返した後の図 13(b) を比較してみると、投影画像の視認性が上がっていることが視覚的に確認できる。また遺伝的アルゴリズムでの評価値の推移を示したものが図 14 である。これにより適切にアルゴリズムが働き最適化が行われていることがわかる。

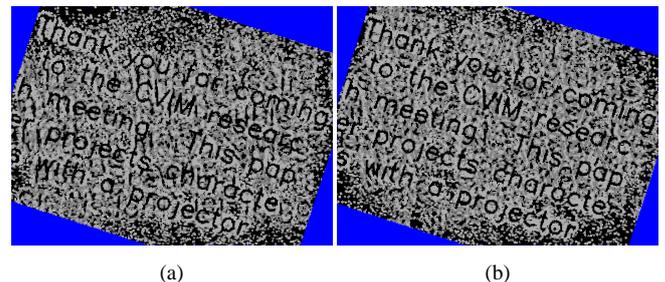


図 13: 遺伝的アルゴリズム使用前後での変化



図 14: 遺伝的アルゴリズムの評価値推移

5. 実験

5.1 文字画像の投影

実験風景の様子を図 15 に示す。2 台の EPSON の LCD プロジェクタを縦置きに配置し、POINTGRAY のカメラを配置する。実験では図のようなグレーコード画像を投影することでキャリブレーションを行っている。



図 15: 実験風景

図 16: 投影面画像

図 5 のようなグレーコード画像から、遺伝的アルゴリズムを用いた提案手法により図 17 のような 2 つのプロジェクトタからの投影画像が得られる。

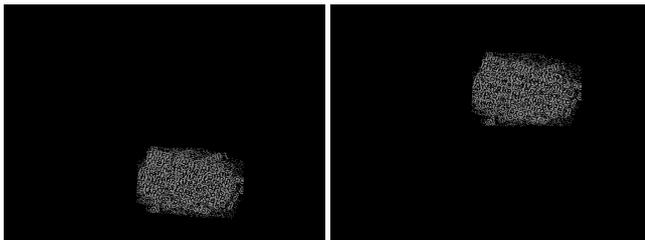


図 17: 2 枚の投影画像

これを図 16 のような投影面に投影する。

5.2 文字画像の投影

一つ目の図 18 には「Turn right at the corner and enter the second intersection in the store where I left」という文字、二つ目の図 19 には「Thank you for coming to the CVIM research meeting . This paper projects characters with a projector」という文字、3 つめの図 20 には「When I find myself in times of trouble Mother Mary comes to me Speaking words of wisdom, let it be」という文字を描画しており、その文字が確認できる。これにより 3 つ以上の異なる平面に対して異なる深さで異なる投影像が投影されていることが分かる。

5.3 グリッドの投影

文字画像の投影と同じプロジェクトタの構成で 3 つ以上の投影面に対して異なるグリッドが投影されるかどうかの実験を行った。グレーコードから得られた各プロジェクトタの投影画像は図 21 のようになるこのパターン画像をそれぞれのプロジェクトタから対象である平面に投影することで図



図 18: 実験画像 1

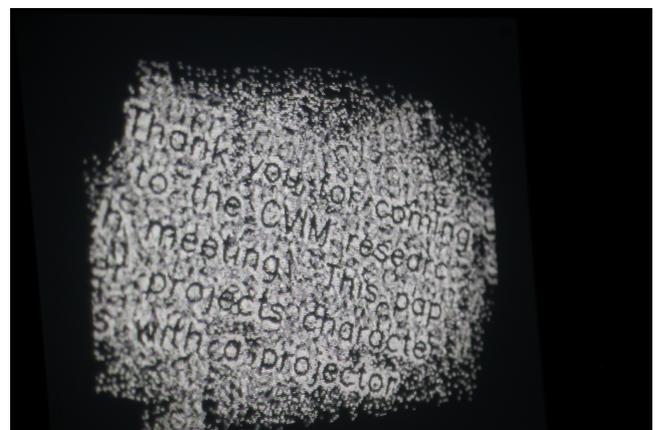


図 19: 実験画像 2

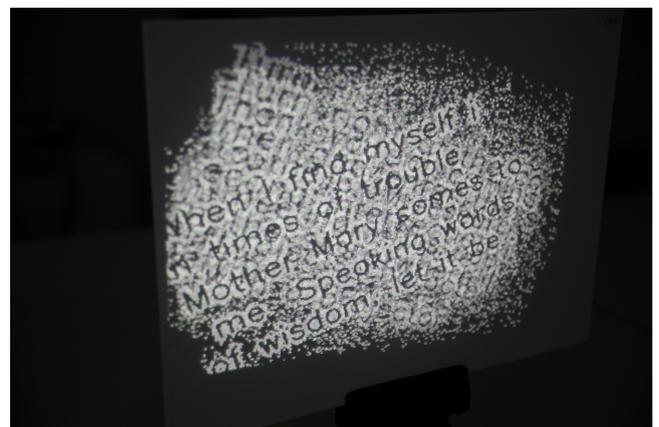


図 20: 実験画像 3

22, 23, 24 のような投影結果が得られる。画像より、3 つ以上の平面に対して異なる深さで異なる投影像が投影されていることが確認できる。

5.4 提案手法の評価

提案手法の目的として大きく以下の 2 つがある。

- (1) ある定められた奥行き位置で、文字や記号が表示されていると判断できるパターンの投影。これが実現でき

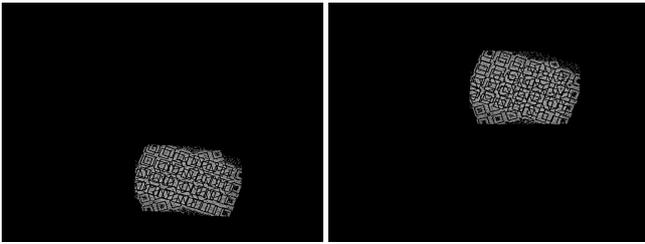


図 21: 2 枚の投影画像

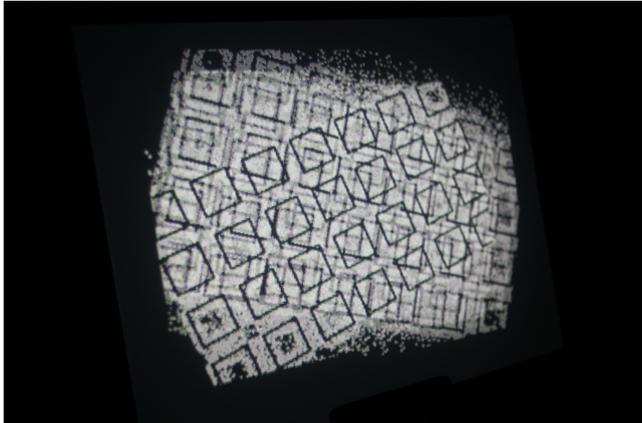


図 22: 実験画像 1

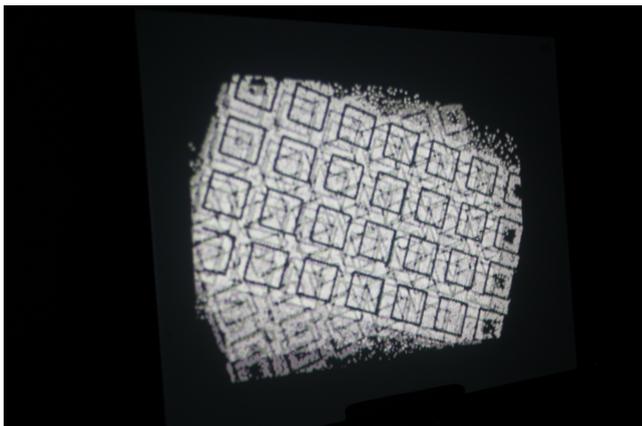


図 23: 実験画像 2

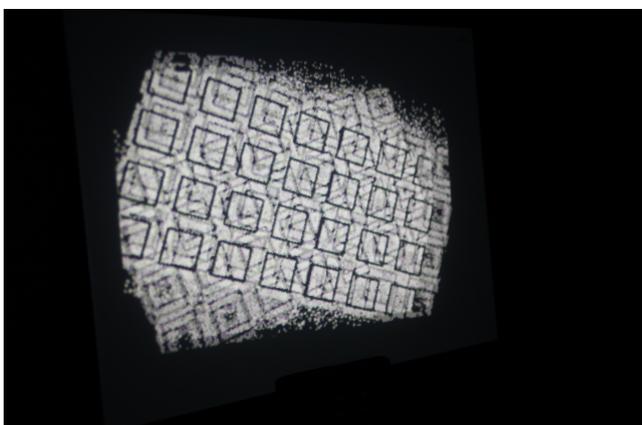


図 24: 実験画像 3

れば、モノづくりの現場において、物体の位置決めなどに利用できる。

(2) ある定められた奥行き位置で、表示されている文字や記号を正しく識別することができる。これが実現されると、奥行きごとに異なる情報提示が可能であり幅広い利用が見込める。

実機を用いて、上記目的の達成度合いを 10 名の被験者実験により評価した。評価実験には図 15 で用いたプロジェクタと同一の 2 台のプロジェクタを用いた。実験の手順として、最初に被験者に対しては、プロジェクタから投影面までの距離を変えることで投影像が変化することを説明し、今回の評価実験では 3 つの奥行きに対して投影像ができることも同時に説明した。そして、被験者には記号や文字が読み取れる位置にオブジェクトを移動してもらい、その時のオブジェクトの位置と、読み取れたアルファベットを全て回答してもらった。図 25 が測定位置を計測した様子である。このように文字が読み取れた位置に目印としてシールをつけておき、実験後に位置を計測し評価した。

実験の結果、被験者全員の平均の位置決め誤差は 3.4mm であり、標準偏差は 3.3mm であった。従って、ほとんどの被験者が高精度に正解位置の近くに位置あわせることができたと言える。また、文字画像に関するアルファベットの読み取り正解率の平均は図 18 で 95%、図 19 で 94%、図 20 で 94% であり、こちらもほとんどの被験者が正解のアルファベットを回答することができた。これにより提案手法を用いて異なる奥行きに対して視認可能な異なる情報を提示することが可能と言える。



図 25: 実験画像

6. おわりに

本研究では人の視覚特性に応じたパターンを生成することで、2 台のプロジェクタでも 3 つ以上の平面に視認可能な情報提示手法を提案した。また、パターン生の際に、GA 最適化の手法を用いることにより、実際に視認しやすい投影画像を作成することに成功した。これにより、2 台のプロジェクタを用いて、3 つ以上の平面距離に異なる映像を投影することに成功した。これは、3 次元形状の直感的な距離の把握や、プロジェクションマッピングの新たな表現技法となり得る。今後の課題として、さらなる視認性の向上や、拡張現実 (AR) や複合現実 (MR) での応用方法の提

案がある。

謝辞 本研究は JSPS 科研費 15H02779, 16H02849 および総務省 SCOPE 171507010 および MSR CORE12 の助成を受けたものです。また、研究遂行にあたり蛭川 琢斗氏には本研究の基礎について多くのアドバイスを頂いたので、ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- [1] Visentini-Scarzanella, M., Hirukawa, T., Kawasaki, H., Furukawa, R. and Hiura, S.: A Two Plane Volumetric Display for Simultaneous Independent Images at Multiple Depths, *PSIVT workshop Vision meets Graphics*, pp. 1–8 (2015).
- [2] 石原葵, 久保尋之, 船富卓哉 and 向川康博: 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, 研究報告コンピュータビジョンとイメージメディア (CVIM), Vol. 199, No. 25 (2015).
- [3] Hirukawa, T., Visentini-Scarzanella, M., Kawasaki, H., Furukawa, R. and Hiura, S.: Simultaneous independent image display technique on multiple 3D objects, *The proceeding so the 13th Asian Conference on Computer Vision (ACCV2016)* (2016).
- [4] Marr, D.: *Vision: A Computational Investigation into the Human Representation and Processing of Visual Information*, Henry Holt and Co., Inc., New York, NY, USA (1982).
- [5] Nakamura, R., Sakaue, F. and Sato, J.: Emphasizing 3D structure visually using coded projection from multiple projectors, *Computer Vision-ACCV 2010*, Springer, pp. 109–122 (2011).
- [6] Nagano, K., Jones, A., Liu, J., Busch, J., Yu, X., Bolas, M. and Debevec, P.: An Autostereoscopic Projector Array Optimized for 3D Facial Display, *ACM SIGGRAPH 2013 Emerging Technologies*, SIGGRAPH '13, pp. 3:1–3:1 (2013).
- [7] Barnum, P. C., Narasimhan, S. G. and Kanade, T.: A multi-layered display with water drops, *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, Vol. 29, No. 4, p. 76 (2010).
- [8] Chen, Y., Clark, D. W., Finkelstein, A., Housel, T. C. and Li, K.: Automatic alignment of high-resolution multi-projector display using an un-calibrated camera, *Proceedings of the conference on Visualization '00*, IEEE Computer Society Press, pp. 125–130 (2000).
- [9] Schikore, D. R., Fischer, R. A., Frank, R., Gaunt, R., Hobson, J. and Whitlock, B.: High-resolution multiprojector display walls, *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 20, No. 4, pp. 38–44 (online), DOI: 10.1109/38.851748 (2000).
- [10] Godin, G., Massicotte, P. and Borgeat, L.: High-Resolution Insets in Projector-Based Display: Principle and Techniques, *SPIE Proceedings: Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems XIII*, Vol. 6055 (2006).
- [11] Bimber, O. and Emmerling, A.: Multifocal projection: a multiprojector technique for increasing focal depth, *Visualization and Computer Graphics, IEEE Transactions on*, Vol. 12, No. 4, pp. 658–667 (online), DOI: 10.1109/TVCG.2006.75 (2006).
- [12] Nagase, M., Iwai, D. and Sato, K.: Dynamic defocus and occlusion compensation of projected imagery by model-based optimal projector selection in multi-projection environment, *Virtual Reality*, Vol. 15, No. 2-3, pp. 119–132 (2011).