

焦点距離の異なる複数パターンを投影可能なプロジェクタ による Depth from Defocus 手法

益山 仁^{1,a)} 川崎 洋^{1,b)} 古川 亮^{2,c)}

概要 :

プロジェクタを用いた3次元アクティブ計測法は、投影パターンのフォーカスが対象物体上で合っていることが前提条件のため、計測できる奥行き範囲がプロジェクタの被写界深度に依存するという実用上の大きな制約がある。この問題を解決するため、観測画像中のボケから奥行き値を推定する Depth from Defocus(DfD) 手法を拡張し、複数の焦点位置でフォーカスの合うプロジェクタを提案する。具体的には、焦点距離の異なる複数パターンを投影可能なプロジェクタを用いる。これにより、プロジェクタの通常の被写界深度の数倍の範囲で形状復元できる。さらに、DfD に基づく手法のため、光源とカメラ間のベースラインが不要であり、コンパクトかつオクルージョンの発生しないシステムを構築できる。本手法の効果を検証するために、シミュレーション及び実機を用いた実験を行い、物体の奥行き推定を行った。

キーワード : Depth from Defocus(DfD), ハーフミラー, プロジェクタ・カメラ同軸光学系

1. はじめに

3次元形状を計測するための代表的な方法である、プロジェクタおよびカメラを用いたエリアベースのアクティブ計測法では、一意な対応付けを得るため、特殊なパターンを投影する。こうして得られた、投影パターンとカメラにより観測した画像との間の対応関係を用いて、三角測量の原理に基づく計算により画像から奥行き値を推定する。このため、この方法では投影パターンがカメラで正確に撮影される必要があり、カメラとパターン両者のフォーカスが計測対象に合っていることが暗黙の前提条件となっている。

一方、パターン投影なしに画像間のマッチングなどを用いるパッシブな3次元計測法も数多く存在するが、その中の1つに単眼カメラによる観測画像中のボケから奥行き値を推定する Depth from Defocus(DfD) 手法がある [5]。この DfD 手法に対して、アクティブにパターン光を投影することで、光源パターンのボケを利用して奥行きを推定する手法が提案されている [13]。この手法は、投影パターンとして符号化開口を付けた点光源群を用いることで、計測

対象物に投影されるパターン像のボケを撮影・解析することで奥行き値を推定する。この手法では、パターンのボケ量から奥行き値を推定するので、ボケが大きくなりすぎると計測が行えなくなるという問題がある。

そこで本研究では、合焦距離の異なる複数の投影パターンを用意し、対象物に投影されるパターンおよび、ボケ量の双方を評価することで、前記課題を解消する新たな DfD 手法を提案する。本手法では、投影するパターン（図形の描かれた透明板）を光源とレンズの間に複数配置した際に生じる、各パターンの合焦距離の違いを利用し、投影されたパターンとそのボケ具合を識別することで、パターンの投影されている地点の奥行き値を推定する。この方法の利点としては、パターンのボケを前提としている手法のため、プロジェクタと計測対象との間に障害物があっても、3次元形状計測が可能であるという点が挙げられる。これは、比較的大きいアパーチャを用いることによりパターンが障害物を回りこんで投影されるためである。また、プロジェクタの被写界深度の浅さを考慮する必要がなくなるため、通常のアクティブ計測に比べて広い奥行き範囲を計測できる。本論文では、基本理論を説明し、実験により実際に提案手法により奥行き値が計測可能であることを示す。

2. 関連研究

ボケからの形状復元 (DfD) は、一般的にはカメラのボケ

¹ 鹿児島大学 理工学研究科 情報生体システム
Faculty of Engineering, Kagoshima University

² 広島市立大学 情報科学研究科 知能工学専攻
Faculty of Information Sciences, Hiroshima City University

a) sc109064@ibe.kagoshima-u.ac.jp

b) kawasaki@ibe.kagoshima-u.ac.jp

c) ryo-f@hiroshima-cu.ac.jp

に基づく手法として知られており、条件さえ揃えば1枚の画像から奥行き値を推定することが可能である [6]。しかし、DfD で良い結果を得るためには、計測対象に高周波なテクスチャが存在することが前提となるため、現実に適用出来るシーンは限定的である。Nayar らは、光源のボケに基づく DfD を提案した [5]。これは、点群パターンを投影し、その投影結果のボケから DfD を行うものであり、計測対象にテクスチャがなくても計測可能である。Nayar らの研究は、奥行き値を求めること自体が目的ではなく、撮影画像からの合成 (Refocusing) をする際の参照用に DfD の結果を用いている。その目的のために、輝点は疎に配置されており、輝点同士の距離は十分離れており、形状計測に直接用いることは困難である。

Zhang らは、プロジェクタのレンズによる投影像のボケを解析し、投影面の奥行き情報を計測できる手法を提案した [8]。これは、ハーフミラーを用いてプロジェクタとカメラを同軸上に設置することで、奥行き情報の計測に対して良好な結果を得られることを示した。Zhang らの手法では、同軸プロジェクタカメラシステムを用いることにより、欠損している部分なくカメラの画素すべてにおいて奥行き値を計算することができる。しかし、シーン全体で照明パターンをずらしながら 24 枚の画像を用いて復元を行うため、手間がかかるほか、動物体の撮影ができないという問題がある。

御厨らは、焦点位置を調整することができる共焦点顕微鏡、及び焦点位置調整方法を提案した [9]。共焦点顕微鏡の基本的な技術は、光源側のピンホール出た光が顕微鏡対物レンズを通り、計測対象の1点に集光し、その反射光が対物レンズを通りビームスプリッター (ダイクロイックミラー) によって検出器で光を検知することによって共焦点画像を生成する。御厨らの手法は、高速回転のマルチピンホール・ディスクによって、約 1000 本のレーザービームで観察領域を同時にスキャン (マルチビームスキャン) し、秒 2000 コマという高速性を実現した。さらに、多数のピンホールが渦巻状に配置された回転円板 (ディスク) を使用し、マルチビームスキャンにより共焦点画像を得ることができる。この方法は、正確に 3 次元形状を計測できるものの、計測には微細加工が必要な装置を要する。

最近、Computational Photography 分野において符号化開口に関する知見が深まっている [2], [4], [6], [7]。通常のカメラでは円形である開口形状を特殊な形状にすることで、後の画像処理でボケを除去したり、画像のボケ具合から奥行き値推定をしたりすることが可能となる。しかしながら、過去に符号化開口をプロジェクタに応用した研究は少ない。Grosse らはデータプロジェクタにプロプラマブルな符号化開口を入れたシステムを提案している [1]。この研究では投影エリア全体に対してプロジェクタのフォーカスを光学的に合わせる事が不可能な状況を想定している。

これは物体の上に仮想テクスチャを投影するような AR システムではよくある条件である (例: 壁と室内にある物体など、広いレンジにデータ投影する場合)。Grosse らは、焦点外エリアでのボケが最小になるように、符号化開口形状の動的な調整とその形状を考慮した前処理を適用し、良好な結果を得ている。このように、Grosse らは符号化開口によってプロジェクタの被写界深度を拡張している。一方で、堀田らは投影光学系に符号化開口を用いることで、奥行き値を高精度に計測する手法を提案した [12]。提案手法は、プロジェクタのデフォーカスを利用する点で上記手法と共通するが、複数の焦点を利用する光学系を利用する点で異なっている。

3. システム

本研究の提案するシステムは、レンズ、プロジェクタ、CCD カメラ、及びパターンから構成される。提案するシステムを構成している器具の配置に関しては、3.1 節で説明する。本手法は、DfD 手法を用いて焦点距離の異なる位置にパターンを投影する必要がある。そのために必要なパターン配置に関しては、3.2 節で説明する。

3.1 光学系の構成

提案システムは、図 1 に示す通りである。提案手法は、DfD に基づく手法のため、投影光学系にハーフミラーを用いて図 1(a) のように設計を行う。図 1(b) は、実際に構築した実験環境である。ハーフミラーを用いることで光量が大幅に減少することや、光軸合わせなどに精度が要求されるという問題もあるが、焦点距離の異なる複数パターンを投影させた際に、距離に応じて撮影像が歪まないというメリットから、これを用いることとした [3]。

また、使用する光源・光学系としては、市販のビデオプロジェクタを光源として用いるため、投影レンズの前面にディフューザーを配置する。これにより、ビデオプロジェクタから照射された光は、ディフューザーを通して点光源と同等となり配置したそれぞれのパターンが照射される (図 1(a))。

カメラと光源の配置は、ハーフミラーを通して撮影可能な環境を構築する。まず、光源の光軸をカメラの光軸に合わせて配置する。さらに、ハーフミラーの光源方向の後ろ側には、光源側から入射された光をスクリーン側へ反射させる性質の他に、光源の反対側の面からも光を取り入れてカメラ側に反射させる性質を有するので、取得するデータへの外乱を抑える目的で暗幕を配置する。実際のシステムの様子を図 1(b) に示す。

3.2 パターンの配置

透明板にパターンを描いた複数の板を、光源とレンズの間に配置した際には、図 2 に示す光学系により、異なる距

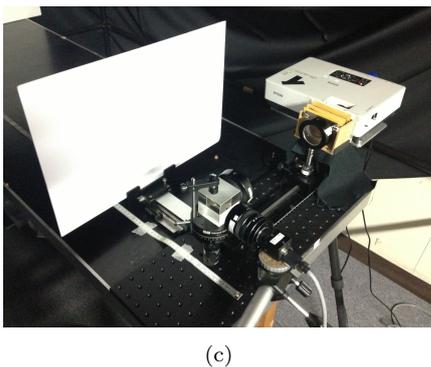
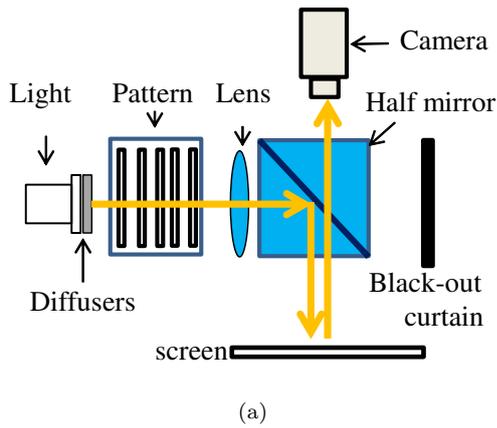


図 1 ハーフミラー使用：(a) 光軸の様子，(b) 実験環境

離でパターン像が結ばれる。提案手法は、このパターン像のボケを評価し、結像した位置を特定することで奥行き推定を行う。

パターンの配置と合焦位置との関係は、レンズから最も遠い位置に配置しているパターン（赤枠のパターン）は最もレンズから近い部分で像を結ぶ。図 2 をで示した例では、レンズから近い順に赤枠のパターン、青枠のパターン、オレンジ枠のパターンの順にそれぞれのパターンが像を結ぶことになる。計測システムを構成する際には、予定された計測範囲の広さ及び精度に応じて、パターンの配置および枚数を決定する。

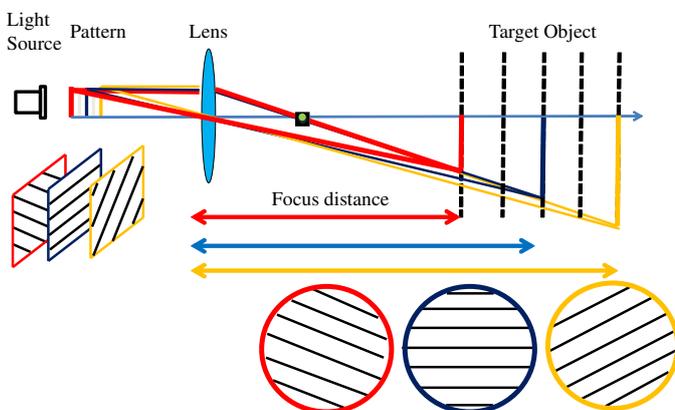


図 2 奥行き値の推定方法

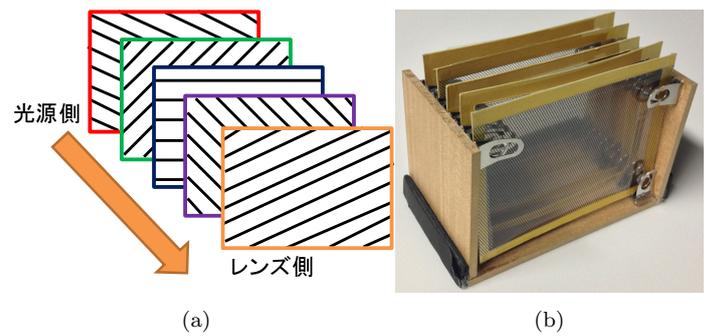


図 3 パターン器具：(a) パターンの順番，(b) 実際に作成したパターン

4. 形状復元手法

4.1 投影パターンの形状

投影するパターンの形状は、図 3 に示すようなライン状のパターンに対して、角度を変化させて作成した合計 5 種類のパターンとした。パターンは、図 1 に示すように、光源とレンズの間に配置する。そのため、レンズとハーフミラーの大きさに合わせて、パターンのサイズは横 90mm、縦 70mm とした。レンズからのそれぞれのパターンの位置に関しては、図 3(a) に示す通りである。このとき、隣接するパターンは、角度の差が大きくなるように配置している。提案手法は DfD を採用しているため、ボケる際に同じ方向で角度が付いているパターンを隣り合わせにしまうと、ボケが重なった際に判別が困難になるため、意図的に角度方向が異なるパターンを隣り合わせにしている。

パターンの作成は、OHP への印刷が可能なレーザープリンターを用いて、フィルムにそれぞれのパターンを印刷した。印刷された各パターンの OHP フィルムは、図 3(b) のように、OHP フィルムが歪まないよう固定した。加えて、それぞれのパターンの間隔は全て 5mm で固定した。

次に、それぞれのパターンの関連性に関して説明する。用意した 5 種類のパターンはお互いに角度が近すぎないように作成した。縦線を 0 度として考え、 ± 45 度のパターン (2 種類)、 ± 22.5 度のパターン (2 種類)、縦線に対して垂直な 90 度のパターン (1 種類) の合計 5 種類である。また、ラインの間隔については、高周波数のパターンのほうが検出しやすい利点があるものの、ライン数を増やしたり、ライン幅を太くすると、複数パターンを投影する際に、光量のロスが大きくなるというデメリットもある。さらに本システムでは、ハーフミラーによる光量のロスが発生するためパターンを投影した際に輝度を十分に確保するように、ある程度疎なパターンとした。

4.2 投影パターンからの形状復元

提案手法において、カメラにより撮影した画像から、合焦しているパターンを検出することで、その位置の奥行き値を推定する。4.2.1 節で投影パターンの検出手法について

説明し、パターン検出方法について 4.2.2 節で説明する。

4.2.1 投影パターンの検出手法

本研究で用いるパターンの検出には、位相限定相関法 (Phase-Only Correlation: POC), および回転不変位相限定相関 (Rotation Invariant Phase Only Correlation: RIPOC) を用いた。

POC は、画像の位相成分に着目した画像マッチング手法であり、そのマッチング精度がきわめて高く、さまざまな分野で応用されている [10]。POC では 2 つの画像信号から 1 つの位相限定相関 (POC 関数) を計算し、2 つの画像が一致するところでピークを持つ。POC 関数のピークの高さが 2 つの画像間の類似度を表し、POC 関数のピーク座標が 2 つの画像間の平行移動量に相当する。

POC は平行移動しか扱えないのに対して、RIPOC は、入力画像が回転している状態であっても正しく相関をとることができ、相関結果から回転角度を推定することができる [11]。図 4 は、2 つの画像における RIPOC の計算の流れを表す。まず、2 つの画像に対してフーリエ変換を行い位相情報と振幅情報に分離する。位相情報と振幅情報のうち、RIPOC で使用する情報は、位相情報の方である。位相情報に対し極座標変換の処理を行う。極座標変換を行うことが、POC と RIPOC の違いである。極座標変換の処理を加えた画像同士を合成し、逆フーリエ変換を行うことで、位相限定画像を生成する。最後に得られた位相限定画像に対し、位相限定相関を行う。

4.2.2 RIPOC に基づくパターンの検出

本節では、RIPOC に基づくパターンの検出手法およびその性能について説明する。RIPOC の計算に用いる画像は、実験で撮影した実データ画像と投影パターン画像である。RIPOC の計算は、実データ画像からある特定の領域を切り出した画像と用意したテンプレート画像を用いて計算を行う。ライン特徴の割合が RIPOC の計算に用いる画像サイズに対して少ないと、POC 関数のピークが出にくい性質がある。そのため計算に用いる画像 (実データ画像とパターン画像) サイズは、実験によって得られた画像中のパターンの間隔を考慮して決定する。

まず、撮影画像から指定した計算範囲の画像を抽出する。計算範囲の画像から、パターン画像のサイズと同じサイズの画像を切り出して、それぞれのパターン画像と RIPOC の計算を行う。探索方向は x 軸に対して 30 ピクセル単位でシフトさせ、y 軸に対しては 1 ピクセル単位でシフトさせながら計算を行う。

4.2.3 RIPOC による奥行き値推定

4.2.1 節で述べた方法で、RIPOC による奥行き値推定を行う。撮影画像からパターン画像と同じサイズの画像を取り出し、パターン画像と RIPOC の計算を行い、それぞれの結果を用いて奥行き値推定を行う。奥行き値は、RIPOC による計算結果から、回転角度が得られるため、これを用

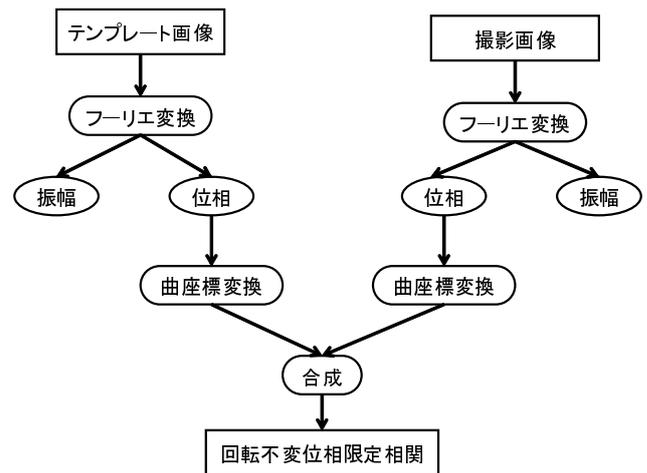


図 4 回転不変位相限定相関の計算の流れ

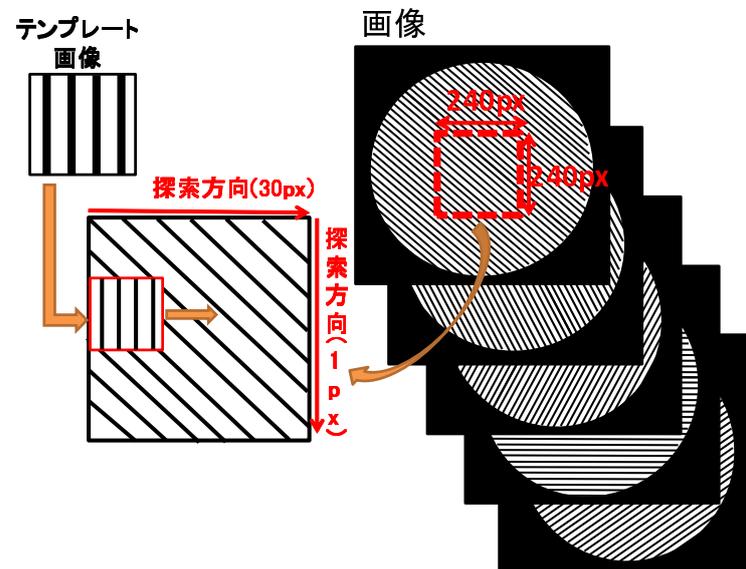


図 5 POC による対応付計算の模式図

いて推定できる。

図 5 の模式図を使用して説明する。画像から切りだされた 240 ピクセルの正方形画像において、x 軸を 120 ピクセルに固定し、y 軸に対して 1 ピクセルずつスライドさせて RIPOC を計算させる。図 5 のテンプレート画像とその画像に対して 0 度、45 度回転させた比較画像とで RIPOC を計算させて得られるグラフが、図 6 である。テンプレート画像に対して 0 度の比較画像を用いたとき、45 度回転された比較画像を用いたときでは、RIPOC 値の鋭いピークの現れる位置が移動することを表している。ただし、実際にはレンズによる拡大縮小が起きるため、ライン間隔が異なってしまい、実際の実験においては高いピークが出なくなることが起こる。このため、安定した計測を実現するためには、それぞれの間隔を事前にキャリブレーションで得ておき、それぞれのカーネルで計算する必要がある。

4.2.4 ハーフミラーによる反射の影響の除去

光源から照射された光は、以下の手順でカメラを用いて

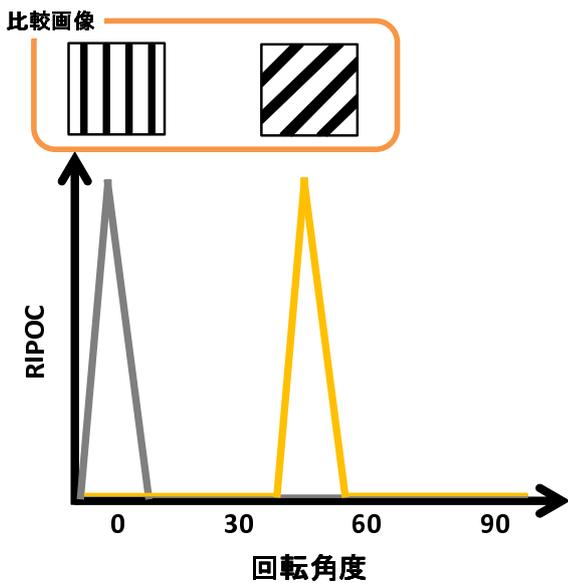


図 6 テンプレート画像との RIPOC の計算結果の模式図

撮影する。

- (1) 作成したパターンプレート、レンズ、ハーフミラーの順で通過しスクリーンにパターンを投影する (図 7 左)。
- (2) スクリーンに投影されたパターンを再度、ハーフミラーを通過してカメラで撮影を行う (図 7 右)。

本手法ではハーフミラーを使用することにより、視差のない画像を取得することが可能になる。しかし、輝度が強すぎる場合、パターンとレンズを通過した光が、ハーフミラーを通過した際に、カメラ側にプロジェクタの光が反射してしまう。そこで、構築したシステム上でスクリーンに暗幕を使用して隠すことで背景画像を撮影し補正する。この背景画像は、光源からの光を直接ハーフミラーがカメラ側に反射させた時の画像となる。そこで、撮影画像から、背景画像を差し引くことで光源から直接入射している光を取り除いた画像を得ることが出来る。

例として、光源に市販のビデオプロジェクターを使用して撮影した画像例を示す。図 8(a) は、カメラで撮影したそのままの画像である。図 8(b) は、図 1 で構築したシステム上でスクリーンに暗幕を使用して隠すことで得られた背景画像である。図 8(c) は、(a) の画像から (b) の画像を使用することにより背景差分を行い、光源から直接入射している光を取り除いた画像となる。以後、実験によって得られた撮影画像は、すべて背景差分によって得られた (c) の画像に対して提案手法を適用するものとする。

5. 実験

取得する画像は、図 7 に示す実験環境で行う。本実験での撮影は、精度検証を行う目的で、図 7 内の自動ステージ上に配置したスクリーンを移動させながら画像を取得する。スクリーンの稼動範囲は、ハーフミラーから 280mm～

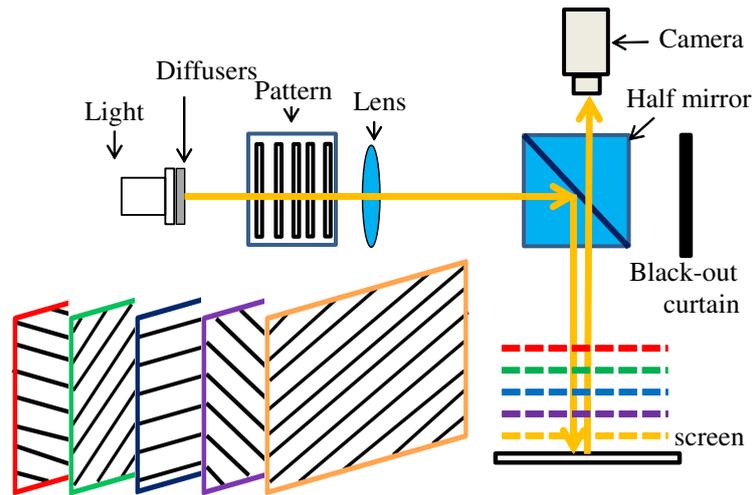


図 7 実験環境の模式図

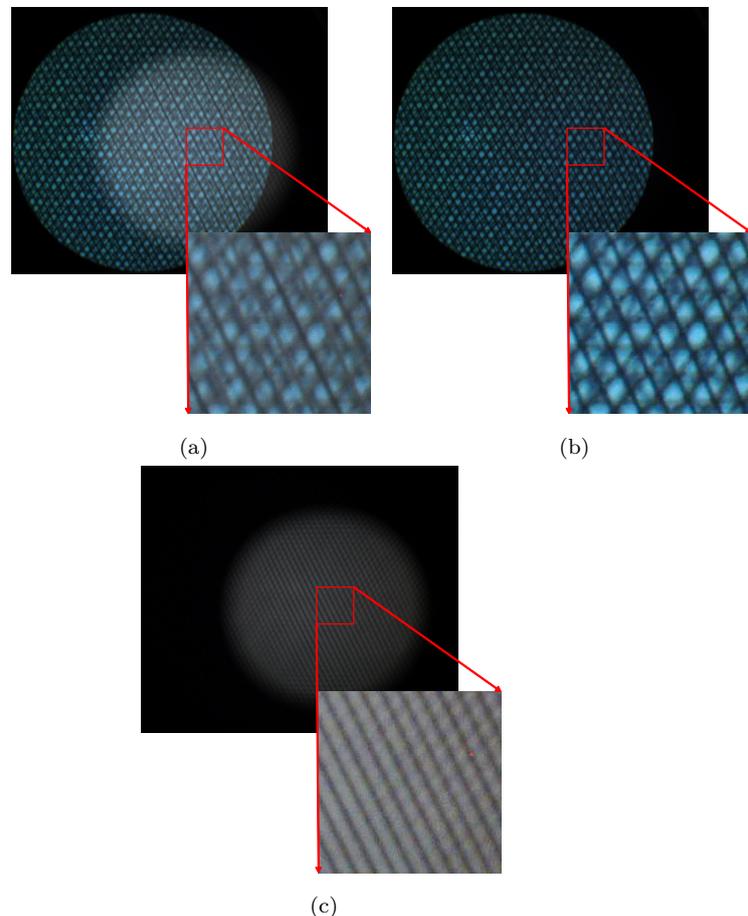


図 8 背景差分処理の結果：(a) 撮影画像，(b) 背景画像，(c) 背景差分画像

420mm までとし、撮影間隔は 2.5mm とする。よって、取得する画像総数は 57 枚となる。自動ステージを使用するため、2.5mm 以上の刻み幅で撮影することが可能であるが、提案手法で見込まれる認識可能な分解能は、5つのパターンにおける合焦距である 5 段階に、そのボケ具合による補正を加えたものである。

実験では外乱を避ける目的で暗室と暗幕を利用する (9)。

これは、光源から対象物の間に、ディフューザー、パターン板、ハーフミラーがあり、光量のロスが大きく、環境光による外乱が無視できないからである。また、撮影を行う環境は、カメラレンズの絞りを小さく絞り、撮影時に自動ステージを稼働させる範囲内でカメラレンズに由来するボケが生じないようにした。ただし、1つの奥行きごとにピントの調整を行うことが最も外乱が少ないため、カメラの性能については今後考慮していく必要があると考える。

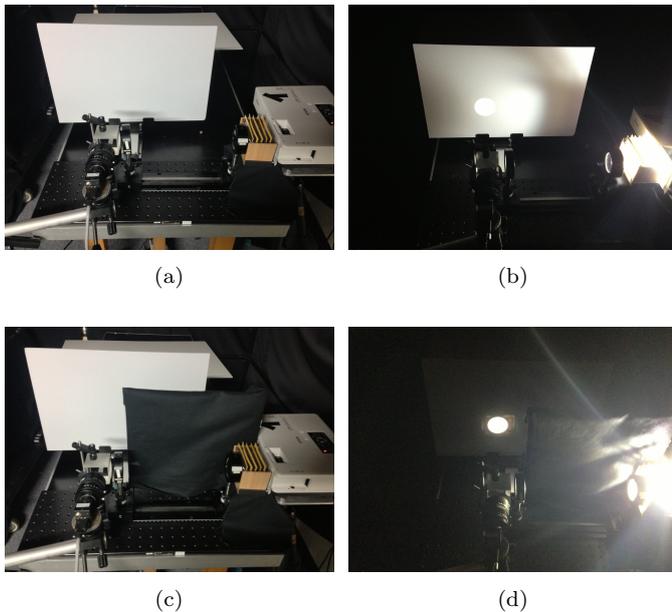


図9 遮蔽物なし実験環境：(a) 暗幕未使用 [遮蔽物なし], (b) 撮影風景 [遮蔽物なし] (c) 暗幕使用 [遮蔽物あり], (d) 撮影風景 [遮蔽物あり]

提案手法による奥行き値の推定を行い、その検出精度を検証する。図10は、撮影間隔を2.5mmと設定し撮影範囲である280mm~420mmの間で、それぞれのパターンにおける合焦距離の撮影データから背景画像を差分した画像である。ここでは、提案手法の結果が顕著に現れるそれぞれのパターンが最もはっきり投影されている部分(合焦距離)の画像のみを示した。計算に用いる画像のサイズは、縦横60ピクセルであり、テンプレート画像は図11に示す。テンプレート画像が5種類している理由は、実際に投影されているパターンが距離に応じてラインの間隔や太さが異なっているため、それぞれの角度に応じたテンプレート画像が必要であったためである。パターン検出の際に使用する画像の範囲は、レンズ中心部分の縦横240ピクセルの正方形の範囲とする(図5)。

この入力画像に対して、4.2.3節で述べた方法により検出したパターンを図13に示す。また、パターン4が投影されている画像を使用してRIPOCを計算させた結果を図12に示す。

図13では、検出したパターンの種類に応じて、そのパターンに色を割り当てることで、検出位置および検出され

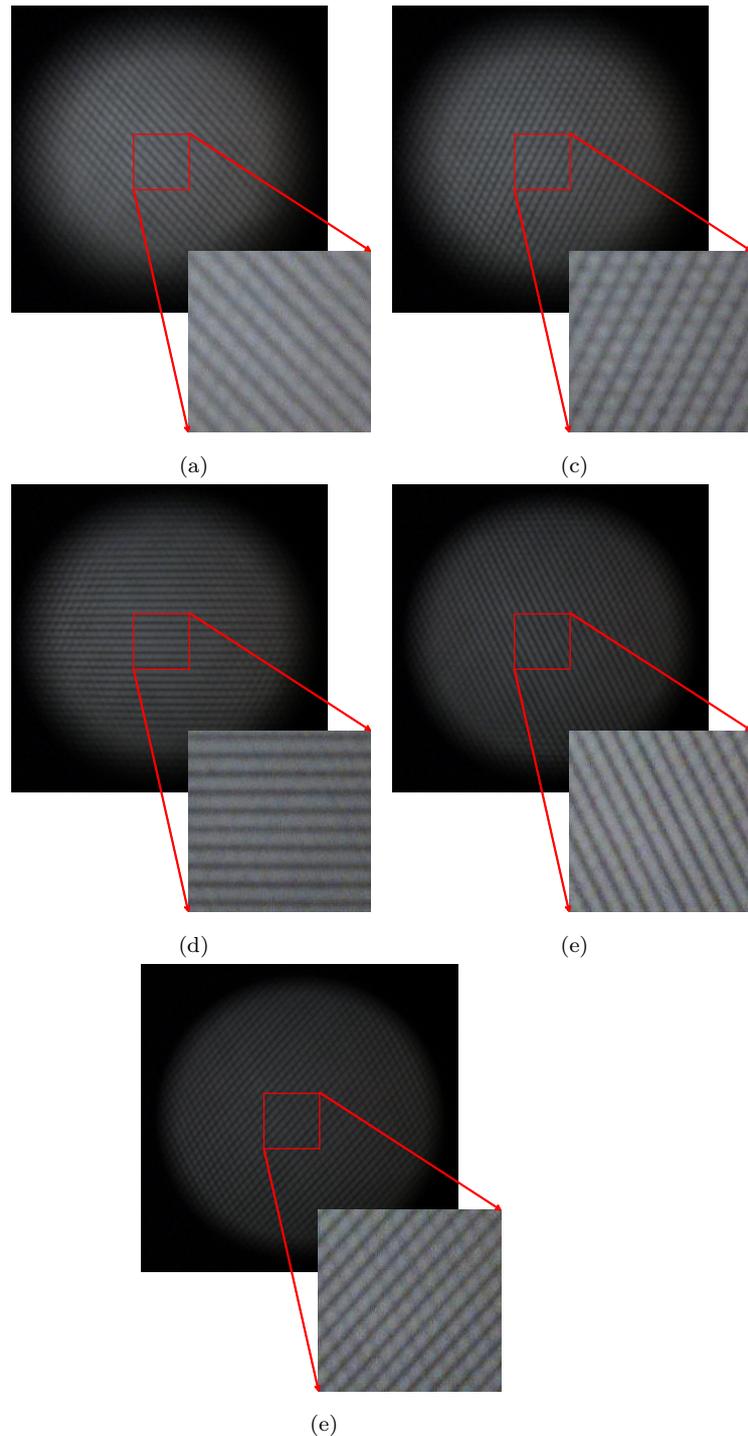


図10 取得画像：(a) 290.0mm, (b) 307.5mm, (c) 330.0mm, (d)362.5mm, (e) 387.5mm

たパターンを強調している。強調の方法は、図14に示すように、入力画像の各領域において、各パターンとのRIPOCによる相関値を計算し、予め定めた閾値(0.12)以上の値を示した領域の中心に、各パターンに対応する色で半径2ピクセルの円を描画する。色とパターンの対応関係は、図14の上部に示す。計算に使用した計算機は、Intel(R) Core(TM)2 Quad CPU Q6700 2.66GHz, windows 7 professional 32bit, コア数4スレッドである。計算範囲の画像1枚あたりのパッチの総数は1920枚のため、RIPOCの計

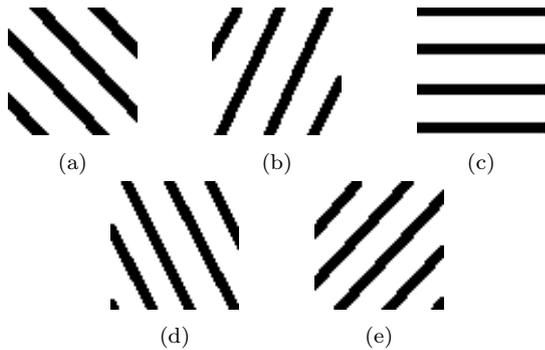


図 11 使用しているテンプレート画像: (a) Pattern1, (b) Pattern2, (c) Pattern3, (d)Pattern4, (e) Pattern5

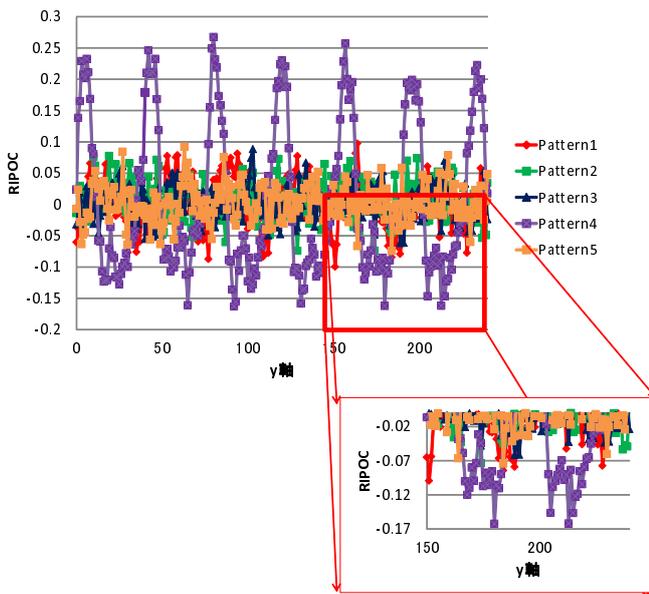


図 12 合焦距離が Pattern4 の画像に対する各テンプレート画像との RIPOC 計算結果

算総数は 9800 回であり、その計算時間は約 5 分であった。

図 13 に示した結果から、画像の中心領域において目的のパターンが検出できていることがわかる。これにより、提案手法はパターンの合焦する位置における奥行き値を推定できる能力があることが確認できた。一方で、パターンが検出できなかった箇所としては、図 13(a)290.0mm の左下部分が挙げられる。これは、レンズの端の部分で収差が発生し、投影されているパターンがノイズやボケによって消えているため、特徴的なパターンが投影されていないことにより検出されていないと考えられる。また、図 13(b)307.5mm の画像においては、レンズ中心の部分でも誤検出はあるが、左端や右端のほうに集中して誤検出が発生していることも確認でき、これもまたレンズ収差による投影パターンが正しく投影されていないことが原因であると考えられる。

また、距離に応じて光量の減少は見られたものの、投影されているパターンを検出できないほどの影響はなかった。結果として、レンズ中心部分は比較的安定に検出を行うことができているが、レンズ端に近いほど誤検出が多く

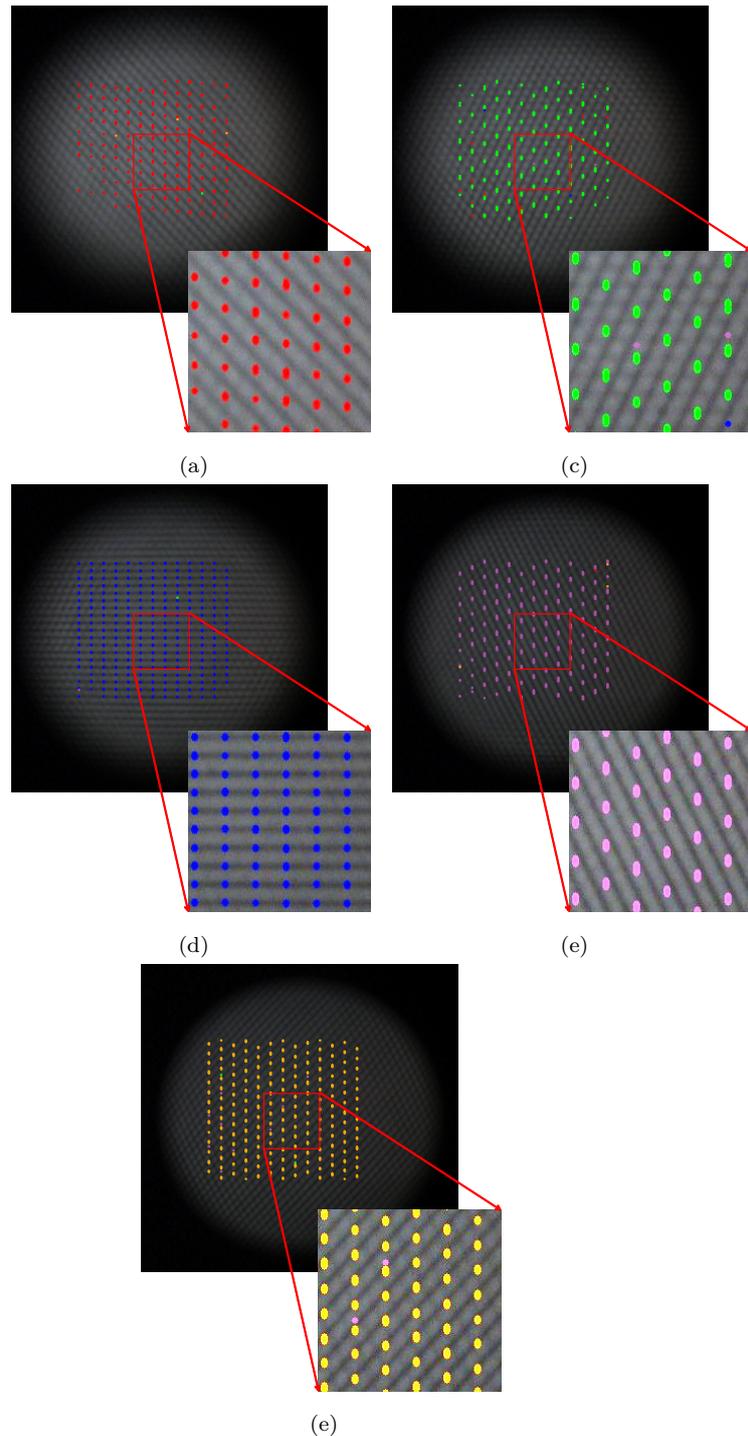


図 13 撮影画像に対する RIPOC によるパターンマッチングの結果: (a) 290.0mm, (b) 307.5mm, (c) 330.0mm, (d)362.5mm, (e) 387.5mm

なる傾向が得られた。この対策として、より収差の少ない光学系を構築する必要がある。

6. 結論

本論文では、焦点距離の異なる複数パターンを投影可能なプロジェクタによる Depth from Defocus 手法を提案した。提案手法では、レンズから異なる距離にパターンを配置することによる焦点距離の違いを利用して、それぞれの

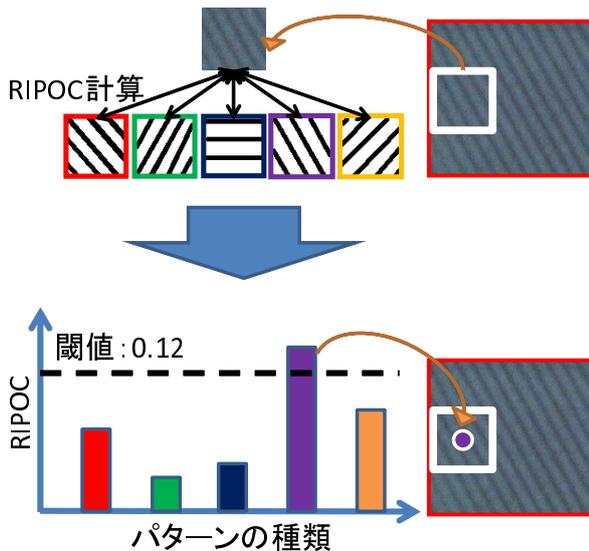


図 14 可視化の方法

投影された異なるパターンから奥行き値の推定を行うことができた。提案システムは光源パターンのボケを利用して奥行き推定する DfD 手法に基づくため、従来の手法で用いられるビデオプロジェクタによる三角測量方に比べて、被写界深度に対する制限を軽減できる可能性があると考えられる。さらに、異なる焦点距離にパターンを投影する方法は、焦点距離の短いレンズを使用しているため、従来のビデオプロジェクタでは投影不可能であった、プロジェクタにオブジェクトが近い状況下においても奥行き値の推定を行うことが出来る。今後は、ボケに基づく奥行き補正を実装する必要がある。

7. 謝辞

本研究の一部は、内閣府・最先端・次世代研究開発支援プログラム (LR030)、および総務省戦略的情報通信研究開発制度 (SCOPE) ICT イノベーション創出型研究開発 (101710002) の助成を受けて実施されたものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- [1] Grosse, M. and Bimber, O.: Coded aperture projection, *SIGGRAPH Posters*, p. 60 (2008).
- [2] Levin, A., Fergus, R., Durand, F. and Freeman, W. T.: Image and depth from a conventional camera with a coded aperture, *ACM SIGGRAPH 2007 papers*, SIGGRAPH '07, New York, NY, USA, ACM, (online), DOI: 10.1145/1275808.1276464 (2007).
- [3] Moreno-Noguer, F., Belhumeur, P. N. and Nayar, S. K.: Active refocusing of images and videos, *ACM Trans. Graph.*, Vol. 26, No. 3 (online), DOI: 10.1145/1276377.1276461 (2007).
- [4] Nagahara, H., Kuthirummal, S., Zhou, C., and Nayar, S. K.: Flexible Depth of Field Photography, *ECCV* (2008).
- [5] Nayar, S., Watanabe, M. and Noguchi, M.: Real-Time

- Focus Range Sensor, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 18, No. 12, pp. 1186–1198 (1996).
- [6] Pentland, A.: A New Sense for Depth of Field, *PAMI*, Vol. 9, No. 4, pp. 423–430 (1987).
- [7] Raskar, R., Agrawal, A. and Tumblin, J.: Coded Exposure Photography: Motion Deblurring using Fluttered Shutter, *SIGGRAPH*, pp. 795–804 (2006).
- [8] Zhang, L. and Nayar, S. K.: Projection Defocus Analysis for Scene Capture and Image Display, *ACM Trans. on Graphics (also Proc. of ACM SIGGRAPH)* (2006).
- [9] 御厨健太, 吉田隆司, 景 虹之: 共焦点顕微鏡, 特開 2006-235420 (2006).
- [10] 孝次小林, 寛 中島, 孝文青木: 位相限定相関法の原理とその応用, 画像ラボ, Vol. 8, pp. 23–26 (オンライン), 入手先 (<http://ci.nii.ac.jp/naid/40005023842/>) (1997).
- [11] 瑞木萩原, 政征川又: 位相限定相関を用いた画像のサブピクセル精度の位置ずれ検出, 電子情報通信学会技術研究報告. DSP, デジタル信号処理, Vol. 101, pp. 79–86 (オンライン), 入手先 (<http://ci.nii.ac.jp/naid/110003280448/>) (2001).
- [12] 堀田祐樹, 小野智司, 川崎 洋, 木村 誠, 高根靖雄: 符号化開口を用いたプロジェクタ・カメラシステムによるボケを利用した 3 次元計測手法, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J96-D, No. 8, pp. 1823–1833 (2013).
- [13] 堀田祐樹, 松ヶ野祐紀, 森永寛紀, 小野智司, 川崎 洋, 木村 誠, 高根靖雄: プロジェクタに符号化開口を利用した構造化光による 3 次元計測手法, 第 15 回画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2012), pp. – (2012).