

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

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^{††}

[†] 鹿児島大学大学院理工学研究科情報生体システム工学専攻 〒 899-0065 鹿児島県鹿児島市郡元 1-21-40

[†] 株式会社サムスン横浜研究所 〒 230-0027 神奈川県横浜市鶴見区菅沢町 2-7

E-mail: [†]{sc109063,sc109065,sc110080,ono,kawasaki}@ibe.kagoshima-u.ac.jp,

^{††}{m.kimura,y.takane}@samsung.com

あらまし 本論文では、プロジェクタに構造化開口を利用した構造化光によるアクティブ 3 次元計測を実現する手法を提案する。現在の一般的なエリアベースのアクティブ計測法は三角測量に基づいており、なんらかの方法で投影パターンと観測画像の間の対応関係を推定・獲得する必要がある。そのような方法では投影パターンを細密に観測する必要があるため、カメラとパターン両者のフォーカスが合っていることが陰なる前提条件となる。この条件は、計測できるデプスの範囲を制限するなど、実用上の大きな制約であった。そこで我々は符号化開口をつけた光源を用いて、上記問題を解消する手法を提案する。これは、構造化光を用いた 3 次元復元において、投影パターンが距離に応じてボケる現象を利用した Depth from Defocus(DfD) 手法の一種と言える。ボケを積極的に利用することで、通常のアクティブ計測に比べて広いデプス範囲を計測できる可能性がある。さらに、符号化開口を用いることで、従来の DfD より曖昧さの少ない復元が実現できる。また、一般に DfD は光源とカメラ間のベースラインが不要なため、コンパクトなシステムを構築できる可能性がある。本論文では、実機を用いた実験により、符号化開口プロジェクタを利用した DfD による三次元形状復元を示す。

キーワード アクティブ 3 次元計測, 構造化光, 符号化開口

1. はじめに

現在の一般的な、プロジェクタ・カメラシステムに代表されるエリアベースのアクティブ計測法は、Gray code [1] のような特殊なパターンを用いるなど、なんらかの方法で投影パターンと観測画像の間の対応関係を推定・獲得し、その対応関係を用いて、三角測量に基づく計算によりデプスを推定する。そのような方法では投影パターンを細密に観測する必要があり、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陰なる前提条件となる。一方で、現実にはカメラの被写界深度に比べてプロジェクタの被写界深度は極端に浅い傾向がある。これは、カメラはレンズや撮像素子サイズを選択、露光時間などの自由度によって被写界深度を深くすることが比較的容易であるのに対し、プロジェクタはそのような自由度が少ないためである。このため、事実上、プロジェクタの被写界深度がシステムの計測可能なレンジの制約となっていた^(注1)。この問題を解決するには、ボケにくい特殊な光源(例: レーザ光源)を用いて 2 次元パターンを走査していたり、特殊なマイクロレンズ等を用いて光学的にボケにくいパターン投影をするような方法などが考えられる。しかし、前者の方法は安全上の問題

があり(例えば、人体計測などには不適である)、後者は例えば Kinect などにおいて実現されているが [2]、用途に応じて独自に構築することは難しい。

一方、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デプスを推定する Depth from Defocus(DfD) 手法がある [3]。この研究では、投影光のボケと、それを撮影したカメラ側のボケの両方を数理的にモデル化し、それによってリアルタイム距離計測を実現した。この手法はボケを前提としているため、前述のような被写界深度の制約が少ない。そこで、我々はカメラとプロジェクタの被写界深度の違いに着目し、撮像系(カメラ)のボケではなく、投影パターンのボケからデプスを推定する手法を提案する。ただし、投影パターンとしては符号化開口を付けた点光源群を用いる。符号化開口によりボケの曖昧さを減らし、精度の向上が期待できる。提案手法は、構造化光によるアクティブ 3 次元計測において、光源パターンのボケを利用してデプスを推定する DfD 手法と言える。

提案手法はボケを積極的に利用するため、プロジェクタの被写界深度の浅さはむしろメリットとなり、通常のアクティブ計測に比べて広いデプス範囲を計測できる可能性がある。提案手法の貢献は以下の通りである。

- ボケを利用するため、計測レンジを従来より広げることができる

(注1) : ただし、ポイントやラインベースのアクティブ計測の場合は制約とはならない

- ベースラインが不要な DfD 手法であるため、コンパクトな装置を実現できる可能性がある
- 符号化開口を利用することで通常の DfD よりも精度が高められる
- パターンマッチではなく、逆畳込み手法に基づく手法のため、仮に隣り合うパターン同士がボケて重なり合っても構わない。これは実用上のメリットがある。

2. 関連研究

エリアベースのアクティブ 3 次元計測はこれまで広く研究され、商品化されたものも数多い [4], [5]. それらの研究では、装置の単純さとコストの観点から構造化光とカメラを用いた計測手法が主流である。構造化光の基本的なアイデアは、光源からパターン光を照射し、物体表面で反射された光をカメラで観測し、投影パターンと観測パターンの対応関係による三角測量で形状を復元する手法である [6]. この時、効率化のために光源としてライン光源や面光源が多く用いられるが、その場合、パターンの対応関係に曖昧さが生じる。その曖昧さを解消するためにこれまで数多くの研究が行われてきた。例えば、三角関数パターンを用いる手法や [7], [8], Gray code パターンを用いる手法 [1], グリッドパターンを用いる手法 [9], [10] などが良く知られている。このように、三角測量に基づく手法については、投影パターンと観測画像の間の対応関係を推定・獲得することが研究の主眼になっていた。つまり、これら全ての手法について、カメラとパターン両者のフォーカスが合っていることが陰なる前提条件であり、計測レンジについては深く検討されていなかった。計測レンジの拡張をする方法としては、光源やレンズ光学系の工夫 [5] も考えられるが、本手法はそれらとは異なる「ボケを積極的に利用する」という逆のアプローチからの提案であり、特殊な光源・レンズ設計を用いないで済む点と、三角測量のためのベースラインが不要な点がメリットと言える。

ボケからの形状復元 (DfD) は、一般的にはカメラのボケに基づく手法として知られており、条件さえ揃えば 1 枚の画像からデプスを推定可能である [11]. しかしながら、DfD を良好に行うためには、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、現実に適用でき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 [12]. 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無くても計測可能であった。Nayar らの研究はデプスを求めること自体が目的ではなく、実際には、撮影画像からの合成 (Refocusing) をする際の参照用に DfD の結果を用いていた。そのため、輝点は粗く配置されており、輝点同士の距離は十分離れていた。我々の提案手法では、投影光学系に符号化開口を用いることで、デプスの精度を改善し、輝点の空間密度も改善する。

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 [13]~[16]. 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、画像のボケ具体からデプス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グラマブルな符号化開口を入れたシステムを提案した [17]. 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をする場合)。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、良好な結果を得た。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たが、我々の研究では、投影結果の被写界深度の拡張ではなく、3D 計測レンジの深度の拡張を目的としている。

3. 概要

3.1 システム構成

提案手法のシステムは、図 1, 2 に示すような、レンズ、LED 光源、CCD カメラ、および符号化開口から構成される。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 3 のように設計すると、撮影像が歪まないようにできるというメリットがある [12]. しかし、ハーフミラーを用いると光量が大幅に減少することや、精密な製造プロセスが必要になるという問題もある。ハーフミラーを用いない場合、視差が発生するが、今回作成したシステムのように十分近接させることでその影響を小さくすることができる。本論文では、それらの問題を考慮して、カメラとレンズを十分近接させただけの簡易な設定を用いた。

また、使用する光源・光学系としては、既存のビデオプロジェクタを用いることが考えられるが、既存のビデオプロジェクタを分解して、符号化開口を導入することは容易ではない。このため、今回は LED をアレイ状に並べてそれ自体をパターンとして用いたシステムを試作した。

3.2 符号化開口の形状

通常のカircularレンズ開口でボケが生じると高周波成分が大きく完全に失われる。そのため、ボケた結果に逆畳込み処理を適用しても安定した情報の復元は難しい。そこで符号化開口では、ボケた結果に何らかの高周波成分が残るように特殊な形状を開口に設定する [13]. DfD 用に検討された符号化開口には Levin らの研究 [16] があるが、この開口形状 (図 4(a)) では合焦距離の前後で起きる反

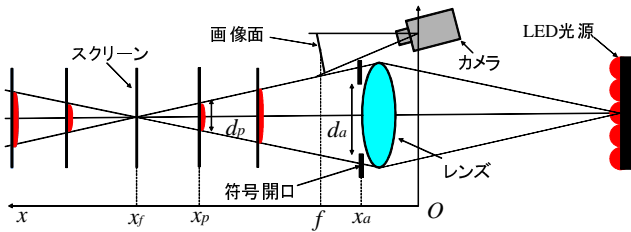


図 1 光学系の模式図

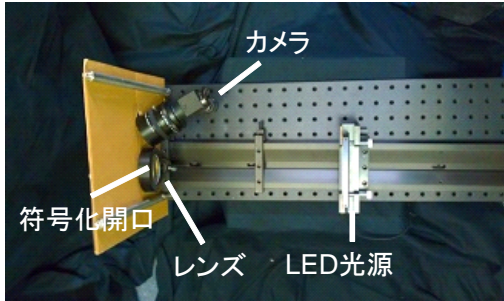


図 2 実際に作成した光学系の様子

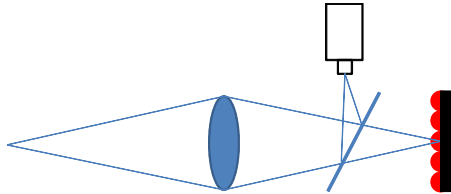


図 3 ハーフミラーを用いた設計例

転に対して曖昧さが残ると考えられる．そのため，本研究で用いる開口形状は，Zhou らの研究 [18] でボケ復元に検討された広帯域絞りの形状から選択した．したがって，DfD に最適化している訳ではないため本手法に最適なパターン生成は今後のテーマの一つである．なお，広帯域絞りの最適形状はシステムのノイズによって異なるため，本論文では実際に複数の形状をテストし，もっとも良好な結果が得られた $\sigma = 0.001$ の形状 (図 4(b)) を用いた．

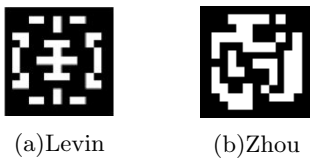


図 4 符号化開口

4. 投影パターンのボケからの形状復元

提案手法は，符号化開口をつけた光源を用いて，計測対象物体上で観測された投影パターンのボケ具合を利用して，DfD により形状を求める手法である．提案手法は大きく 2 つのステップからなる．一つは，デプスによるボケ具合をパラメタライズするキャリブレーションステップであり，もう一つは，ターゲット物体にパターンを投影し実際に形状復元するステップである．なお，前

者のキャリブレーションは，計測システムで一度だけ行えば良い．以下ではそれぞれの処理について説明する．ただし，カメラの内部パラメータは既存アルゴリズムによりキャリブレーション済みとする (例えば，OpenCV に実装されている Zhang の手法など) を利用することができる [19], [20]) ．

4.1 ボケのキャリブレーション

通常のアクティブ計測法では，パターンはほとんどボケてないか，ボケていても点や線の明度ピーク検出などで対処しうる程度の微小なガウシアンカーネルによるボケを仮定している．一方，本手法では，パターンのボケ具合を積極的に利用して形状復元するため，もっと大きなボケを想定しており，そのボケ具合をキャリブレーションする必要がある．

ところで，レンズは本来は合焦位置で使用するものであり，合焦位置で歪曲収差や球面収差などの収差が小さくなるように光学設計されている．このため，ボケが目立つような非合焦位置では，収差も顕著となる．そこで，ボケを正確にキャリブレーションするためには，このような歪みも同時にキャリブレーションする必要がある．しかし，これは容易ではないため，本論文では歪みの少ない画像の中心部分のみを計測に使用するものとし，キャリブレーションするパラメータはボケの大きさ (スケール) とノイズの 2 つとする．

ボケのスケールは，原理的にはプロジェクタおよびカメラの正確なキャリブレーションが既知であれば計算することができるが，現実にはそこまで高精度なキャリブレーション推定は容易ではない．また，プロジェクタとカメラ双方の複数要因によるノイズをモデル化して推定することも容易ではない．そこで本手法では，これらパラメータをモデルを想定して推定するのではなく，複数の既知デプスにおいて実際に観測したボケ画像から，それぞれのデプスにおけるパラメータを獲得するアプローチを取った．この方法は必要なパラメータ数が多くなるものの，現実に即したパラメータが直接得られ，カメラとプロジェクタの間の外部キャリブレーションも不要となる．

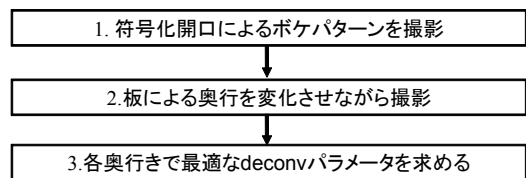


図 5 キャリブレーションアルゴリズム

実際のパラメータ推定のアルゴリズムを，図 5 に示す．点光源群のパターンを符号化開口を用いて平面に投射し，

平面の奥行きを徐々に変えながら複数の画像を撮影する。光源が点光源のため、ここで観測されるボケパターンは点広がり関数 (PSF) そのものである。そこで、観測されたボケパターンのサイズを計測することでスケールとすることができる。ノイズパラメータを撮像画像から直接推定することは困難なため、本論文ではノイズパラメータを変化させながら実際に逆畳み込みを試し、復元画像が最も光源パターン (ボケの無い点光源パターン) に近かったパラメータを正解パラメータとして採用した。なお、ここで用いたパターン類似度は次節で述べるものと同一である。また、本論文では逆畳み込みアルゴリズムとして Wiener フィルタを用いた。一般に、高性能な逆畳み込みとしては Richardson-Lucy アルゴリズム [21], [22] のような繰り返し手法が知られるが、そのような方法ではカーネルが多少違っていても同じような結果に収束し、逆にデプス推定の精度低下につながるためである。

4.2 逆畳み込みによるデプス推定

形状復元は、対象物体にパターンを投影し、その投影パターンのボケ具合を観測して光源からの距離を推定する。実際のアルゴリズムとして、過去にはボケの大きさ自体からデプス推定する手法が提案されている [12]。しかし、そのような直接的なアプローチではパターン同士が離れていることが前提となっており、パターン同士が近接していたり、ボケが大きくなると、複数のボケパターンが重なり合ってしまう、計測できなくなる。

そこで我々は、前節のキャリブレーションで得られた各デプスにおけるボケ、ノイズパラメータを用いて画像全体を逆畳み込みし、復元パターンが光源パターン (今回は点光源) に最も近いパラメータのデプスを推定結果として採用するものとした。もしも観測された隣接パターン同士のボケが重なっていても、正しいパラメータで逆畳み込みされた場合にはそれらは明確に分離され、各点光源のデプスを安定して推定することが可能となる。

復元されたパターンとオリジナル光源パターンとの類似度の計算方法としては、輝度の差の総和や正規化相関等を用いることが考えられる。しかし、実際には逆畳み込み処理により完全にオリジナル画像が復元されるわけではないため、解が不安定になりやすい。そこで、本論文では点光源を用いていることを利用して、復元パターンの「点光源らしさ」を類似度とした。具体的には、次式を用いた。

$$e = \sum_{i \in C} \text{sgn}(v_i > \frac{v_{\text{peak}}}{2}) \quad (1)$$

これは局所パターン中の最も明るい画素を基準とし、その半分の明るさを持つ局所領域の大きさが小さいほど集中度が高い (点光源らしい) とした式である。別の方法として、点光源らしさが高まると局所ピークの明度値が高くなることを利用することも考えられる。本論文では、

両方を用いて実験し、いずれもほぼ同様の結果であることが確認できている。

ここで、前節のキャリブレーションは離散的にしか行えないという問題がある。詳細なデプスを求めるには、その間のパラメータを推定する必要がある。本論文では、ノイズパラメータは局所的に線形補間を行い、スケールは、図 1 より計算される式 (2) を用いる。

$$s = c \left| 1 - \frac{x_f}{x_p} \right|, \quad (2)$$

ここでパラメータ $c = f d_a / (x_f - x_a)$ はキャリブレーションにより求まる定数である。以上に基づく実際のアルゴリズムを図 6 に示す。

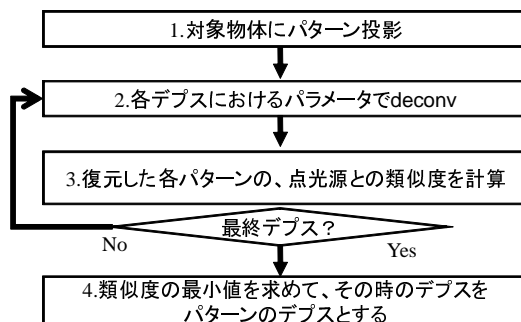


図 6 復元アルゴリズム

ところで、提案手法では逆畳み込みの試行と類似度の計算を全てのカーネルについて行うため、非常に重い処理となる。そこで本論文では、計算量を減らすために、最初は荒いデプスで行い、次に正解近くのデプスで再度デプスの解像度を上げて行う処理とした。具体的には、実験では 10mm 刻みで荒い推定を行い、その後に 1mm 刻みで推定を行った。ただし、逆畳み込み処理と類似度の処理はカーネル毎に独立であり、並列処理が可能である。したがって、GPGPU による高速化なども考えられる。これらの高速化、効率化は今後の課題である。

5. 考察

本手法の現在の問題点を述べる。

(1) プロジェクタの投影光のボケ像と物体表面テクスチャの反射率の積が観測されるため、物体のテクスチャの影響を受ける

(2) ボケが奥行きが違う対象をまたいで投影された場合、ボケのパターンに大きな歪みを生むため、オクルージョンバウンダリに対して脆弱である。

(1) については、プロジェクタからの投影光がある場合とない場合の 2 枚を撮ることができれば、対応が可能である。(2) は本手法に限らず、エリアベースのアクティブ計測法全体の問題であり、現状で解決は難しいと思われる。これらの課題の解消は今後の課題である。

6. 実験

提案手法の有効性を確認するために実機を試作し、実験を行った。カメラ、光源、符号化開口および対象物体の構成を図7に示す。レンズは焦点距離150mm、直径50mmのアクロマティックレンズ1枚を用いた。カメラは1280×960解像度のPoint Grey社のCCDカメラを用いた。光源は波長635nmの赤色LEDを18×12個並べたものを用いた。本実験における解像度は非常に低いが、本手法の有効性を検証するには十分と考えられる。符号化開口のサイズは縦35mm×横35mmとし、レンズと光源間の距離は300mm、レンズとレンズ開口は距離は密着させたため、ほぼ0とみなせる。カメラの露光時間は明るさに応じて133msecと75msecの2通りとし、絞りの値は4で固定とした。対象物体としては、板、箱、直径66mmのソフトテニスボールを用いて平面と曲面の計測を試みた。

なお、今回はレンズを1枚しか用いていないため、投影像の周辺部分に大きな収差が現れた。そのため、実験では収差があまり顕著に現れない中心部分のみを用いて実験を行った。一般に、周辺部の収差は適正な光学設計に基づく複数レンズを用いればほぼ解消可能とされており、そのような光学系の構築も今後の本研究の重要な課題の一つである。

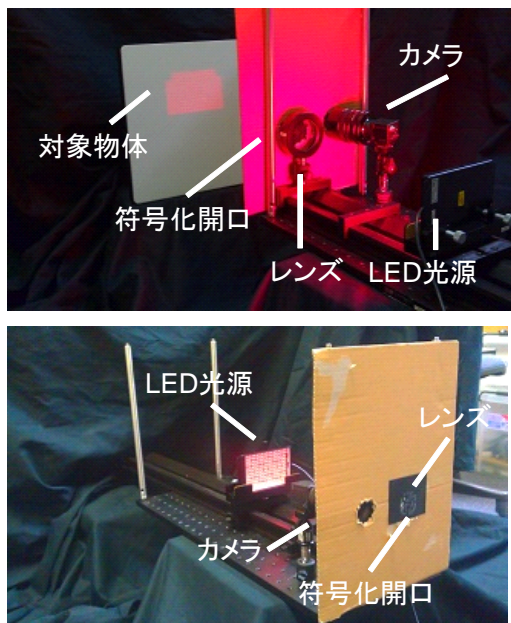
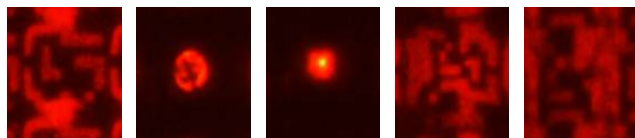


図7 実験装置

6.1 キャリブレーションによるパラメータ推定

キャリブレーションにより、デプスの変化によるボケのスケールパラメータを推定した。符号化開口によるボケパターンをスクリーン平面上に投影し、この平面のデプスを250-350mmの範囲で10mm刻みで変えて撮影した。結果の一部を図8に示す。正しく符号化開口パター



(a) 250mm (b) 280mm (c) 300mm (d) 330mm (e) 350mm
図8 各距離でスクリーンに投影されたパターン

ンが観測されていることが分かる。これらの画像から推定したスケールパラメータが図9である。図9では、合焦距離の前後で起きるボケの形状の反転を負の値として表した。合焦距離付近において、ボケのスケールが式2とは異なる値となった。これは、投影した光源が完全な点光源ではなく、大きさを持っていたためと考えられる。このずれが以下の実験において、復元精度に影響を及ぼしたものと考えられる。

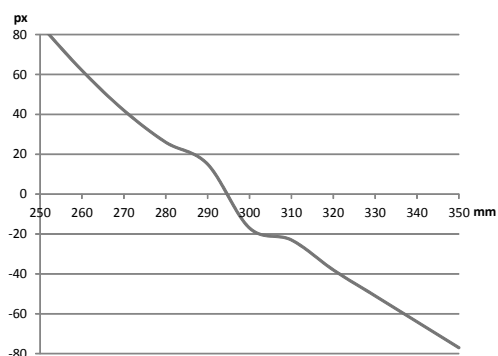


図9 各距離ごとのボケのスケール

6.2 平面推定による精度評価

精度確認の実験として平面のデプス推定を行った。図10に、装置と平面の位置関係を示す。LED光源からスクリーンへ赤色可視光を照射すると、スクリーン平面上に符号化開口の模様が投影されるため、これをカメラで撮影しデプス推定を行う。実験では、プロジェクタに符号化開口を用いた提案手法による計測に加え、比較のためにカメラに符号化開口を用いたデプス計測も行った。

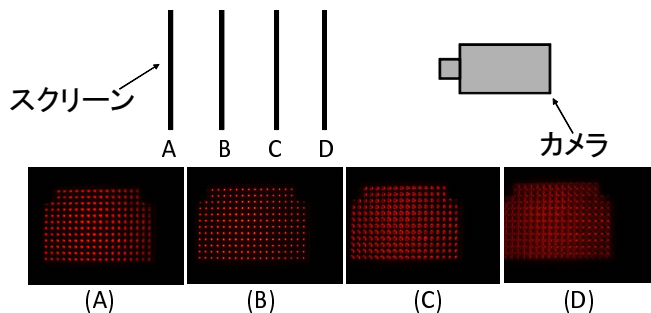


図10 平面板撮影の構成

まず最初に、プロジェクタに符号化開口を用いた結果

を表1に示す. このデータではプロジェクタの合焦距離は290mmとした. この結果では, スクリーン平面に符号化開口のボケが投影された画像と, これを複数のデプスのパラメータで逆畳込みした画像をそれぞれ示している. 正しいデプスのパラメータで逆畳込みした結果では, シャープな点光源が復元されていることが分かる. また, 逆畳込みの結果から式(1)による評価値でデプス推定した結果を図11に示す. 図より, 正しい位置に形状復元できていることが確認できる. 注目すべき点として, デプス250mmや350mmのようにパターン同士が分離できないほど大きく重なってボケている画像であっても, 提案手法によって正しくデプス推定が出来る点が挙げられる.

表1 プロジェクタに符号化開口を設置した場合の各距離でのスクリーンの様子と復元結果

フィルター 入力画像	depth 250mm	depth 290mm	depth 350mm
depth 250mm			
depth 290mm			
depth 350mm			

逆畳込み処理結果

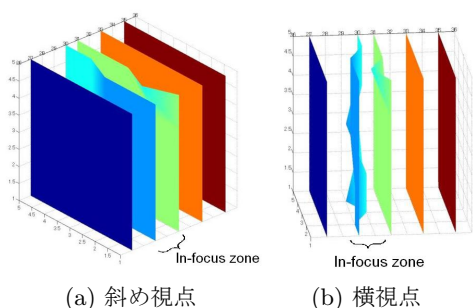


図11 平面板の復元結果

次に, 図12に示すように, カメラに符号化開口を用いた逆畳込み結果を表2に示す. カメラの合焦距離は190mmとした. スクリーン上に投影されたパターンは符号化開口を用いていないため, 単純なガウシアンパターンである. これを符号化開口カメラで撮影すると, 表に示すようなパターンが観測される. プロジェクタの時と同様に複数デプスでパラメータをキャリブレーションし,

それぞれで逆畳込みした結果が示されている. これらの結果では, 表1と異なり, 正しいデプスのパラメータで逆畳込みした結果においても, シャープな点光源は復元されていない. これは, 距離の変化に伴いプロジェクタのパターンも同時にボケるため, カメラの符号化開口で逆畳込みしても, ボケた画像しか再現されず, デプス推定に曖昧さが残るためである. また, こうして得られた複数の逆畳込み画像から, 式(1)による評価値を用いてデプス推定した結果を, 図13に示す. 図より, プロジェクタの場合に比べて精度が悪いことが分かる.



図12 カメラに構造化開口を挿入して用いたレンズ

表2 カメラに符号化開口を設置した場合の各距離でのスクリーンの様子と復元結果

フィルター 入力画像	depth 250mm	depth 290mm	depth 350mm
depth 250mm			
depth 290mm			
depth 350mm			

逆畳込み処理結果

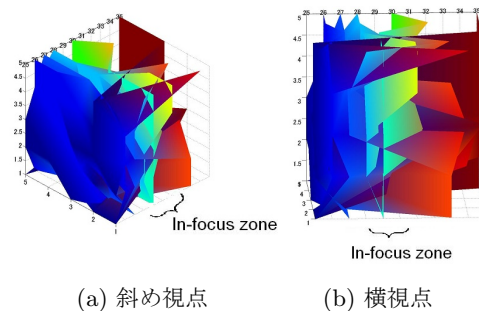


図13 平面板の復元結果

上記の平面推定の実験から, 誤差の平均と標準偏差を

計算した結果を図 14 に示す。プロジェクタに符号化開口を用いた方が、平均誤差および偏差から、高い精度で復元が実現できていることが分かる。一方で、プロジェクタの合焦距離近くにおいては投影結果がボケないことから、精度が低下する様子が見て取れる。この時には、カメラに符号化開口を用いた場合の精度が比較的良好ことも分かる。このケースでは、シャープな投影パターンをカメラの符号化開口で観測しているために、カメラの DfD がうまく働いたものと考えられる。これら双方の利点を用いることができれば、全体として高精度な計測を実現できる可能性があり、今後の課題として考えられる。

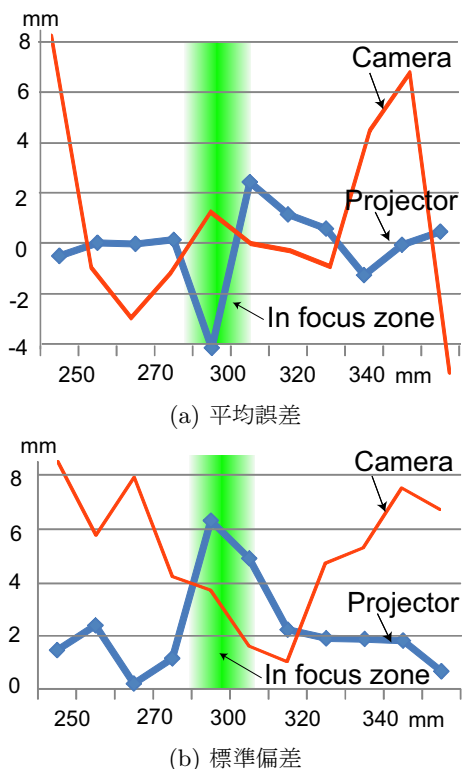


図 14 各距離によるデプス推定結果の平均と標準偏差 (プロジェクタの合焦距離 290mm, カメラの合焦距離 190mm).

6.3 自由形状物体の計測

形状計測実験として、より自由な形状の物体を対象とし、デプス推定を行った。まず最初に、図 15(a) に示す、2 枚の板を用いて段差を作った形状を計測した。図 15(b) は段差状に重ねた 2 枚の板に提案手法でパターン投影したものである。2 枚の板は片方をレンズから約 270mm 離れた場所、もう片方をレンズから約 300mm 離れた場所に設置して段差を作成している。復元結果は図 15(c) である。それぞれの位置に段差が正しく形状復元できていることが分かる。

次に、平板を斜めに配置した形状を計測した (図 16(a)). 図 16(b) はこれに提案手法でパターン投影したものである。平板が一番手前がレンズから約 260mm で、最も遠い位置が約 290mm 離れた場所に設置してあ

る。復元結果が図 16(c) である。1mm 単位で復元した結果、斜めの平面形状が正しく復元できていることが分かる。

最後に、図 17(a) に示す、曲面物体であるボールの形状復元を行った。図 17(b) はボールに提案手法でパターン投影したものである。ボールの中心はレンズから約 270mm 離れた場所にある。復元結果が図 17(c) である。この実験結果では、ボールの中心部分の微細な形状変化が正しく復元できているが、物体の左端部分は正しく形状復元できなかった。この原因として、カメラをレンズの右横に設置して撮影したため、物体の左側部分の歪曲収差が大きくなり、デプス推定が正しく行われなかったものと考えられる。これは、ハーフミラーの利用やレンズ光学系の設計などの改善で解消できると考えられるが、今後の課題である。

7. 結 論

通常のアクティブ 3 次元計測はパターンがボケていないことを前提にしているのに対して、本論文では、わざとパターンをボケさせることで、広いレンジで 3 次元計測可能な方法を提案した。提案手法は、プロジェクタに符号化開口を用い、DfD 手法により形状計測する手法である。実際の計測では、デプスごとに用意されるカーネルで実際に逆畳込みを行い、結果が最も投影パターン (点光源群) に近いカーネルのデプスを正解のデプスであるとした。提案手法の特徴として、ボケたパターン同士が重なり合ってもデプス推定が行えることがある。実際にパターンを投影し形状復元を行ったところ、1mm 精度での形状復元が出来ることが確認できた。今後の課題としては、処理の高速化やプロジェクタの合焦位置での精度低下の解消、光学系の改善などが挙げられる。

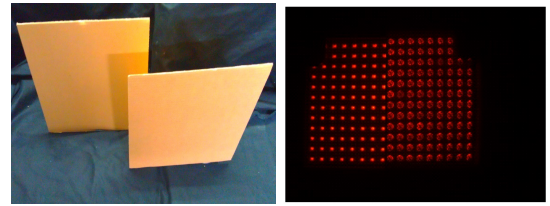
謝 辞

本研究の一部は、総務省 SCOPE(101710002) および内閣府 NEXT プログラム (LR030) の助成を受けて実施されたものである。

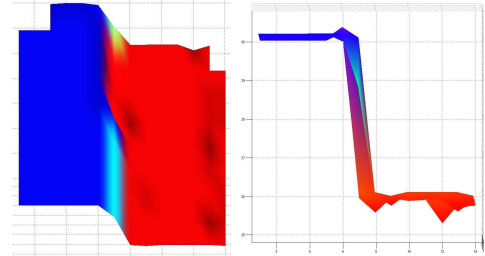
文 献

- [1] K. Sato and S. Inokuchi, "Range-imaging system utilizing nematic liquid crystal mask," Proc. Int. Conf. on Computer Vision, pp. 657-661, 1987.
- [2] Primesense, "United States Patent Application US 2010/0118123," 2010j.
- [3] S. Nayar, M. Watanabe and M. Noguchi, "Real-Time Focus Range Sensor," IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, vol. 18, no. 12, pp. 1186-1198, Dec 1996.
- [4] Mesa Imaging AG., "SwissRanger SR-4000," 2011. <http://www.swissranger.ch/index.php>.
- [5] Microsoft, "Xbox 360 Kinect," 2010. <http://www.xbox.com/en-US/kinect>.
- [6] J. Batlle, E. M. Mouaddib and J. Salvi, "Recent progress in coded structured light as a technique to solve the correspondence problem: a survey," Pattern

- Recognition, vol. 31, no. 7, pp. 963–982, 1998.
- [7] D. C. Ghiglia and M. D. Pritt, “Two-Dimensional Phase Unwrapping: Theory, Algorithms, And Software,” Wiley-interscience, 1998.
- [8] H. Zhao, W. Chen and Y. Tan, “Phase-unwrapping algorithm for the measurement of three-dimensional object shapes,” Applied Optics, vol. 33, no. 20, pp. 4497–4500, 1994.
- [9] A. O. Ulusoy, F. Calakli and G. Taubin, “One-shot scanning using de bruijn spaced grids,” The 7th IEEE Conf. 3DIM, 2009.
- [10] R. Sagawa, H. Kawasaki, R. Furukawa and S. Kiyota, “Dense one-shot 3d reconstruction by detecting continuous regions with parallel line projection,” ICCV, 2011.
- [11] A. Pentland, “A new sense for depth of field,” PAMI, vol. 9, no. 4, pp. 423–430, 1987.
- [12] F. Moreno-Noguer, P. N. Belhumeur and S. K. Nayar, “Active Refocusing of Images and Videos,” ACM Trans. on Graphics (also Proc. of ACM SIGGRAPH), Aug 2007.
- [13] 長原一, “チュートリアルシリーズ：符号化撮像,” 情報処理学会研究報告, 第 CVIM-171 巻, pp. 1–9, 2010.
- [14] R. Raskar, A. Agrawal and J. Tumblin, “Coded exposure photography: Motion deblurring using fluttered shutter,” SIGGRAPH, 2006.
- [15] H. Nagahara, S. Kuthirummal, C. Zhou, and S. K. Nayar, “Flexible depth of field photography,” ECCV, 2008.
- [16] A. Levin, R. Fergus, F. Durand and W. T. Freeman, “Image and depth from a conventional camera with a coded aperture,” SIGGRAPH, 2007.
- [17] M. Grosse and O. Bimber, “Coded aperture projection,” SIGGRAPH, 2008.
- [18] C. Zhou and S. K. Nayar, “What are Good Apertures for Defocus Deblurring?,” IEEE International Conference on Computational Photography, Apr 2009.
- [19] Z. Zhang, “A flexible new technique for camera calibration,” Technical Report MSR-TR-98-71, 12 1998.
- [20] G. Bradski and A. Kaehler, “Learning OpenCV: Computer Vision with the OpenCV Library,” O’Reilly Media, Oct. 2008.
- [21] L. B. Lucy, “An iterative technique for the rectification of observed distributions,” Astronomical Journal, vol. 79, no. 6, pp. 745–754, 1974.
- [22] H. W. Richardson, “Bayesian-based iterative method of image restoration,” Journal of Optical Society of America, pp. 55–59, 1972.

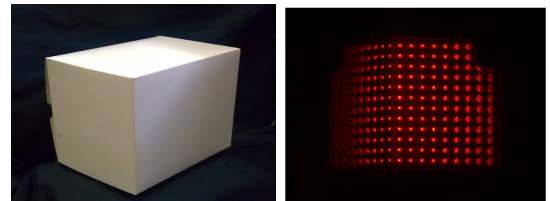


(a) 対象物体 (b) 符号化開口パターン投影画像

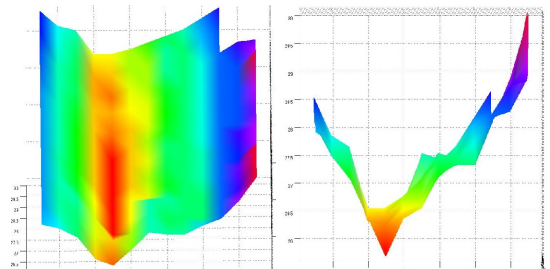


(c) 復元結果

図 15 段差状のボード

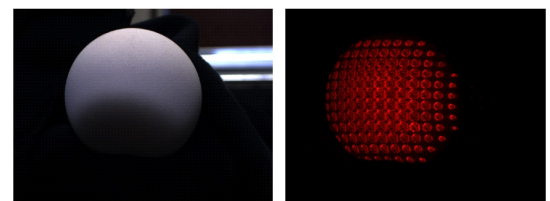


(a) 対象物体 (b) 符号化開口パターン投影画像

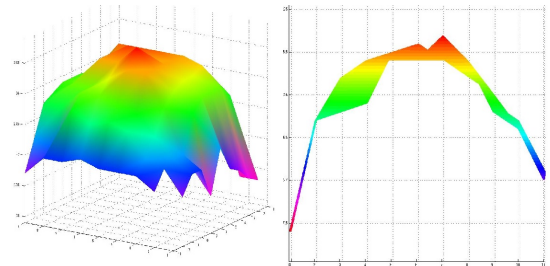


(c) 復元結果

図 16 箱



(a) 対象物体 (b) 符号化開口パターン投影画像



(c) 復元結果

図 17 ソフトテニスボール (直径 60mm)