

# 3次元計測を目的としたプロジェクタ用符号化開口の 進化的設計

堀田 祐樹<sup>1</sup> 小野 智司<sup>1</sup> 川崎 洋<sup>1</sup> 木村 誠<sup>2</sup> 高根 靖雄<sup>2</sup>

**概要:** 本研究は、奥行き推定を目的としたプロジェクタ用符号化開口を自動設計する試みである。撮影画像中のボケから奥行きを推定する手法は Depth from Defocus (DfD) として知られ、DfD 用の符号化開口が提案されているが、それらはカメラへの適用を想定したものであり、プロジェクタは想定されていない。DfD に望ましい空間周波数特性を与える開口形状は自明ではないため、探索により求める必要がある。そこで本研究では、遺伝的アルゴリズム (GA) を用いた符号化開口の設計手法を提案する。提案手法では、プロジェクタを用いた奥行き推定のシミュレーションに基づく評価関数を定義する。実験により、提案手法の符号化開口が奥行き計測の安定度向上に有効であることを示す。

**キーワード:** アクティブ 3 次元計測, 符号化開口, Depth from Defocus, 遺伝的アルゴリズム

## Coded Aperture Optimization for 3D Measurement from Projector's Defocus

YUKI HORITA<sup>1</sup> SATOSHI ONO<sup>1</sup> HIROSHI KAWASAKI<sup>1</sup> MAKOTO KIMURA<sup>2</sup> YASUO TAKANE<sup>2</sup>

**Abstract:** This paper proposes a method to design a coded aperture, which is installed in a projector for active depth measurement. Techniques to estimate depth from the degree of image blur are known as Depth from Defocus (DfD), and some coded apertures for DfD have been proposed. However, such coded apertures are designed for cameras and not guaranteed to work properly for the projector. Since the aperture pattern having spatial frequency characteristics suitable for DfD is not obvious, it is necessary to determine by the search. Therefore, in this paper, we propose a method to create a coded aperture using Genetic Algorithm (GA). In particular, we define an evaluation function based on depth estimation simulation. Experiments have shown that obtained pattern by GA is better than other patterns.

**Keywords:** Active 3D measurement, Coded Aperture, Depth from Defocus, Genetic Algorithm

### 1. はじめに

近年, Computational Photography の分野において符号化開口に関する知見が深まっている [1]. 符号化開口はボケ像の形状 (PSF) を制御することで, 全焦点画像の復元や Depth from Defocus (DfD) などのような画像撮影後

の処理の安定度を向上させる. Zhou らは, 画像のノイズレベルに応じたボケ復元用の符号化開口を提案した [2]. 自然画像の事前分布にノイズを仮定し, その事前分布に対して最適な Weiner フィルタを適用できるような開口形状を遺伝的アルゴリズムにより求めている. Levin らは, PSF の空間周波数特性にゼロ交差を持たせることで, 奥行き推定にロバストな符号化開口を提案した [3]. この研究では, 奥行きの違いによるボケの周波数特性の変化が大きくなるような開口形状をランダムサーチにより求めている.

符号化開口をカメラに用いる研究は多いが, 符号化開口

<sup>1</sup> 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  
Department of Information Science and Biomedical Engineering, Graduate School on Science and Engineering, Kagoshima University

<sup>2</sup> 株式会社 サムスン日本研究所  
Samsung R&D Institute Japan Co.LTD.

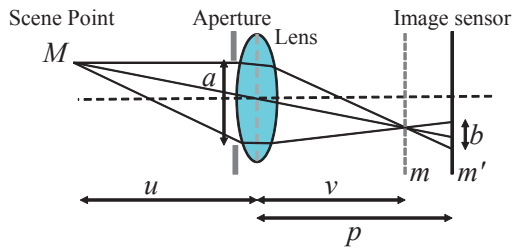


図 1 レンズカメラの撮像モデル

をプロジェクタに応用した研究は少ない [4]. 川崎らはプロジェクタに符号化開口を用いた逆畳み込みに基づく DfD 手法を提案した [5]. しかしこの手法では、奥行きボケ復元のためのカメラ用符号化開口 [2] を用いたため、奥行き推定の精度と安定度に改善の余地があると考えられる。

そこで本研究では、遺伝的アルゴリズム (GA) [6] を用いたプロジェクタ用符号化開口の設計手法を提案する. 具体的には、シミュレーションによる開口形状の適応度の計算方法を定義する. 符号化開口の形状を川崎らの 3 次元計測手法に最適化することで奥行き計測の精度の改善を試みる. また奥行き計測の際に用いる復元画像の評価関数を定義することで、より安定した計測の実現を試みる. 実験により、奥行き計測の安定度が向上することを示す。

## 2. 関連技術

### 2.1 Depth from Defocus

レンズカメラによる撮影では被写界深度があるため、焦点位置から離れた奥行きは画像中でボケを生じる. 図 1 にレンズカメラの光学モデルを示す. 図 1 において、レンズの焦点距離を  $f$ 、開口径を  $a$ 、レンズから撮像素子までの距離を  $p$  で示している. 式 (1) に示すガウスの結像公式より、距離  $u$  の対称物体上の点  $M$  は、 $v$  の位置  $m$  に集光する.

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{u} + \frac{1}{v} \quad (1)$$

ここで、 $v = p$  の場合は、焦点の合った画像が得られるが、 $p$  と  $v$  が一致しない場合、式 (2) で表される様に、 $M$  にある対象は画像上では  $m'$  を中心とした大きさ  $b$  の円として射影される.

$$b(p) = \frac{a}{v} |v - p| \quad (2)$$

上式のように、ボケの大きさはカメラから対象までの奥行きに依存するため、ボケ量を解析することで逆に対象の奥行きを推定することができる. これは Depth from Defocus (DfD) と呼ばれ、実時間計測が可能な手法の一つとして近年も盛んに研究が行われている [3, 7-9].

### 2.2 符号化開口

レンズによる奥行きボケは点拡がり関数 (Point Spread Function : PSF) で表され、一般に、その PSF はカメラの

レンズや絞り形状により決定されることが知られている. 通常の円形開口の場合、合焦ボケが生じると高周波成分が大きく失われる. また、PSF の周波数分布に多くのゼロ交差を持つため、安定した情報の復元は難しい. そこで、開口形状を工夫し、PSF の形状やその周波数特性を制御 (符号化) することで、情報の損失を防ぐ手法が提案されてきた. 一般的に、開口部に光を部分的に遮断するマスクを設置することで撮像を符号化する. このマスクパターンが符号化開口と呼ばれ、様々な用途の符号化開口が提案されている [2, 3, 10-13].

## 3. 提案手法

この章では、先行研究 [5] の奥行き計測手法と本論文で提案する符号化開口の設計手法について述べる. 3.1 節ではまず計測装置の構成について説明し、次に 3.2 節で逆畳み込みを用いて奥行きを推定する方法を述べる. さらに 3.3 節では奥行きを推定する際の復元画像の評価方法について述べ、最後に 3.4 節で開口形状の設計手法を示す。

### 3.1 装置の構成

先行研究 [5] の計測装置は、レンズ、ハーフミラー、LED 光源、CCD カメラ、および符号化開口から構成される. ハーフミラーを用いて撮影光学系と投影光学系を同軸にすることで、撮像の歪みを抑制できる [8]. 計測装置の光学系を図 2 に、実際に試作した計測装置を図 3 に示す. 図 2 において、 $x_p$  はカメラからスクリーンまでの距離を、 $x_f$  はプロジェクタの合焦距離を、 $f$  はカメラの焦点距離を、 $x_a$  はカメラからレンズまでの距離を、 $d_p$  はボケの物理的な大きさを、 $d_a$  は開口径を表す. 光源としては既存のビデオプロジェクタを用いることも可能であるが、物理的な配置の自由度を高めるため、LED をアレイ状に並べ、格子点状のパターンを投影する装置を試作して用いる. 以降、逆畳み込みによる奥行きボケ復元画像に格子点状に配置された各パターンを復元パターンと呼ぶ。

### 3.2 奥行き推定の概要

川崎ら [5] の手法では、対象物体にパターンを投影し、その投影パターンのボケ像を観測することで奥行きを推定する. ここで観測されるボケ像の形状、すなわち PSF の形状は開口形状と相似となる. 次に、画像全体に対し奥行きごとに用意したスケールの PSF で逆畳み込みを施し、各復元パターンが最も投影パターンの合焦画像 (つまり点光源) に類似する際の奥行きを推定結果として採用する. 仮に投影パターンのボケが大きく、隣接パターン同士のボケが重なったような場合であっても、正しい奥行きのスケールで逆畳み込みされた場合にそれらは明確に分離され、各投影パターンの奥行きを安定して推定することができる. 以上の手順で各投影パターンの奥行きを獲得することで対

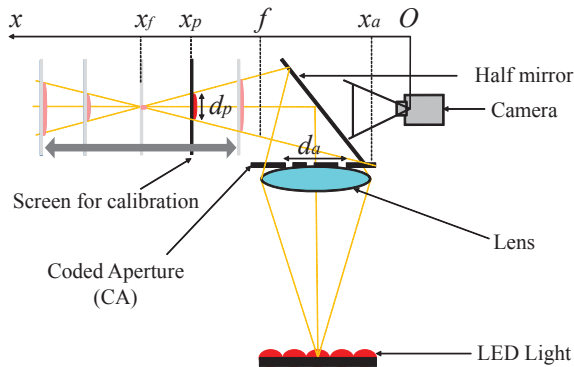
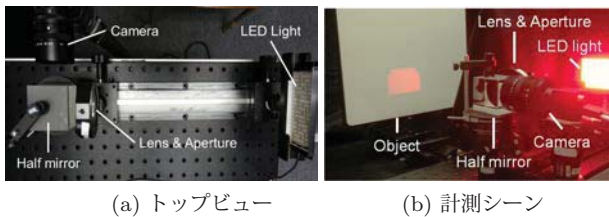


図 2 光学系の模式図



(a) トップビュー (b) 計測シーン

図 3 実験装置

象物体の形状を復元する。

### 3.3 Dfd 推定のための類似度関数

奥行き推定において、復元パターンと合焦画像の類似度の定義は、精度と安定度に大きく影響を及ぼす。先行研究 [5] では復元パターンの類似度関数に一つの基準だけを用いていたのに対し、本論文では二つの基準を用いる。一つ目の評価基準として式 (3) に示す輝度ヒストグラムの尖度を用いる。

$$Sim(\vec{P}) = \sum_{i \in \vec{P}} \frac{(P_i - \bar{P})^4}{nV^2} - 3 \quad (3)$$

$\vec{P} = \{P_{1,2}, \dots, P_i, \dots\}$  は復元パターン、 $P_i$  は  $\vec{P}$  に含まれる画素  $i$  の輝度、 $\bar{P}$  は輝度の平均値、 $n$  は  $\vec{P}$  に含まれる総画素数、 $V$  は輝度ヒストグラムの分散を表す。復元画像中の点光源らしさが高まると輝度ヒストグラムの尖度の値が高くなるため、 $Sim(\vec{P})$  が高い値であるほど復元画像が投影パターンの合焦画像に類似する。尖度による評価は復元パターンの歪みに頑健であるが、収差により逆畳み込みの処理が不安定になるため偶に失敗することがある。このため、二つ目の基準として空間的な情報が考慮される正規化相互相関 (NCC) を用いる。これら二つの基準は段階的に使い、まず、尖度による類似度の最大値 (ピーク) から奥行きを推定し、もし局所的なピークが複数ある場合は、それらの中から NCC による類似度が最大となる奥行きを選択する。

### 3.4 開口形状の最適化

本論文で提案する GA を用いた符号化開口の設計手法で

は、奥行き推定の過程のシミュレーションに基づいて開口形状を評価する。先行研究 [2, 3] では、PSF の周波数分布を開口形状の評価の指標としていたのに対し、本論文では奥行きを安定的に差別化できるかという点を評価の指標とし、評価関数を式 (4) のように定義する。

$$F(x) = \min_d \left\{ Sim(\vec{P}_{d,d}) - \max_{d' \neq d} Sim(\vec{P}_{d,d'}) \right\}, \quad (4)$$

$\vec{P}_{d1,d2}$  は奥行き  $d1$  における投影パターンを奥行き  $d2$  におけるカーネルで逆畳み込みした画像、 $Sim()$  は合焦した投影パターンとの類似度関数 (式 (3)) を示す。適応度の計算の具体的な手順を以下に示す。

1. 疑似投影距離を 250mm, 270mm, 300mm, 330mm, 350mm に設定し、それぞれの場合に下記の 2 から 5 を繰り返す。
2. 事前の校正 [5] で取得したカーネルサイズを用い、点光源を仮定して、疑似投影画像を作成する。
3. 設定したノイズレベルによりノイズを疑似投影画像に付加する。なお、疑似投影において収差はないと仮定する。
4. 疑似投影画像を 250mm~350mm の各距離のカーネルサイズを用いて逆畳み込みする。
5. 上記各距離で得られた復元画像について、類似度を計算する。なお、収差がないので逆畳み込みの処理が不安定にならないため、類似度の計算には式 (3) の尖度のみを用いる。正しい奥行きの類似度と誤った奥行きの類似度の最大値との差を、その投影距離における評価とする。
6. 5 段階の疑似投影距離における評価のうち、最悪値 (最小値) を適応度とする。

本論文では、開口形状を  $11 \times 11$  の 2 次元パターンとし、光の遮断、透過をそれぞれ 0, 1 で表した組み合わせ最適化問題とする。式 (4) を最大化するパターンを GA により探索することで、最適な開口形状を求める。GA の世代交代モデルには SimpleGA を用いた。この SimpleGA には初期収束問題があるため、シェアリング法 [14] によって解の多様性の維持を図る。シミュレーションにおけるノイズレベルは  $\sigma = 0.00002$  とし、逆畳み込みには Wiener フィルタを用いる。一般的に絞りを設置すると光量が低下する。そこで、撮影画像の SN 比維持の観点から、開口面積の半分以上は光を透過する絞りを生成するよう制約を設ける。

## 4. 評価実験

### 4.1 GA による符号化開口の最適化

開口形状を評価するためのシミュレータを実装し、式 (4) の評価関数を最大化する開口形状を GA で求めた。GA で使用したパラメータを表 1 に、開口形状とその適応度の遷移を図 4 に示す。評価関数にノイズの要素を含むので、同じ個体であっても適応度は計算する度に異なる値となり、その変動が図 4 に示すように適応度の遷移に表れた。GA による探索の結果、180 度回転に対し非対称で周辺部が開



個体数	100
世代数	1,000
交叉法	2点交叉 (2D)
交叉率	0.97
突然変異法	ビット反転
突然変異率	0.01

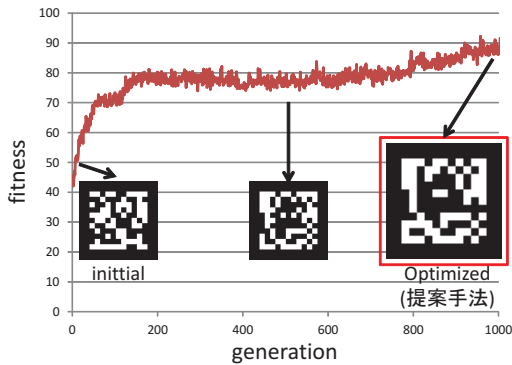


図 4 開口形状とその適応度の遷移

いた開口形状が得られた。異なる初期集団での探索を複数回行ったところ、適応度の値と開口形状の傾向は類似しているものの、毎回異なる解に収束した。この原因として、問題の解空間が超多峰性であることが考えられるが、詳細な解析は今後の課題である。

#### 4.2 生成された符号化開口の評価

提案手法により得られた符号化開口を検証するため、試作した実験装置を用いて平面板の奥行きを計測した。光源、カメラ、符号化開口及び対象物体で構成される実験環境を図3に示す。提案手法により求めた符号化開口を用いた計測に加え、比較のために既知の符号化開口を用いた計測も行った。本実験では、プロジェクタの合焦距離は300mmとし、5×5のパターンを対象に奥行きを推定した。誤差の平均と標準偏差を計算した結果を図6に、平面板の復元結果の例を図7に示す。図6、図7より、提案手法の符号化開口を用いることで合焦距離付近の計測に改善が見られた。

#### 4.3 自由形状物体の計測

提案手法により得られた符号化開口で3次元計測できることを確認するため、より自由な形状の物体を対象とし、奥行きを推定した。撮影対象物体は、

- テクスチャのある箱の形状 (図8(a))
- 表面に細かい凹凸のある円柱の形状 (図9(a))
- 滑らかな曲面物体である蛇の置物の形状 (図10(a))

の3個とした。箱の形状は、レンズに最も近い部分の距離が約320mm、最も遠い位置が約340mmの位置に設置した。テクスチャとして、淡い赤と黄で描画された横縞模様を用いた。撮影結果を図8(b)に、復元結果を図8(c)に示す。

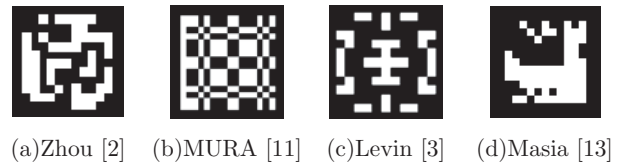
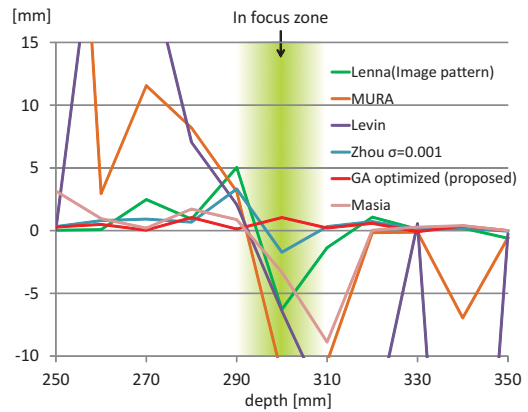
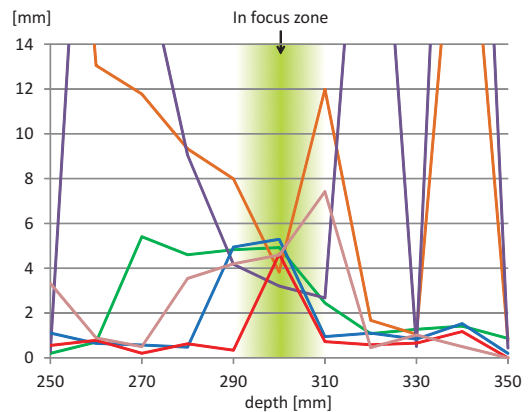


図 5 比較に使用した符号化開口

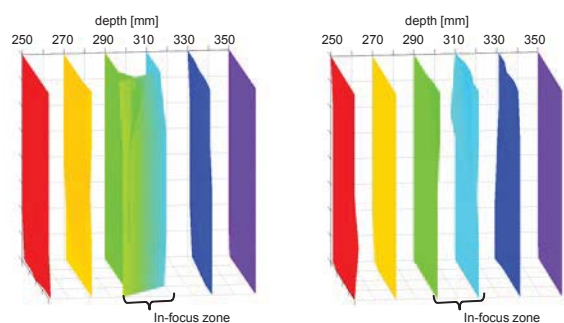


(a) 平均誤差



(b) 標準偏差

図 6 各距離における奥行き推定結果の平均と標準偏差 (プロジェクタの合焦距離 300mm)



(a) Zhou [2] (b) Proposed

図 7 複数の奥行きにおける平面の復元結果

す。斜めの平面形状になり、箱の形状が復元できていることが分かる。円柱の形状は、レンズから最も近い部分の距離が320mm、最も遠い位置が約340mmの位置に設置した。撮影結果を図9(b)に、復元結果を図9(c)に示す。円

柱の曲面の形状が復元できていることが分かる。蛇の置物の形状は、レンズから最も近い部分の距離が 320mm、最も遠い位置が約 340mm の位置に設置した。撮影結果を図 10(b) に、復元結果を図 10(c) に示す。対称物体の滑らかな曲面の形状が復元できていることが分かる。

#### 4.4 考察

提案手法に限らず多くの符号化開口の最適化問題における適応度は、その開口形状の空間周波数特性によって決定される。これは、画像撮影後の処理の安定化を目的とした符号化開口は、その処理に望ましい空間周波数特性を持つように設計されるためである。ボケの復元に用いられる Wiener フィルタは空間周波数領域における処理であり、分母に光学伝達関数 (PSF のフーリエ変換) の絶対値を持つため、ボケ復元用の符号化開口はゼロ交差を避けた広帯域な空間周波数特性であることが望ましい。一方、DfD 用の符号化開口は奥行きの違いを安定に差別化するためにゼロ交差を持つ空間周波数特性であることが望ましい。先行研究 [2, 3, 10] では、開口形状をフーリエ変換した周波数分布に基づく評価関数が定義されている。提案手法では、フーリエ変換は行わないものの評価関数であるシミュレーションの中に Wiener フィルタが含まれるため、適応度は空間周波数特性の影響を受けると考える。

このため、設計変数である空間領域と適応度に大きく影響を及ぼす空間周波数領域の違いに着目して、2つの検証を行った。まず最初に、ランダムに生成した2つの個体間で、空間領域における距離と空間周波数領域における距離をそれぞれ算出し、相関関係があるか確かめた。本論文では、2つの個体  $x = (x_1 \cdots x_n)$  と  $y = (y_1 \cdots y_n)$  の間の空間領域における距離を式 (5) のように定義する。

$$R_{spatial}(x, y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i \oplus y_i) \quad (5)$$

同様に、空間周波数領域における距離を式 (6) のように定義する。

$$R_{freq}(X, Y) = \frac{1}{n} \sum_{\xi} |X_{\xi} - Y_{\xi}| \quad (6)$$

$X$  は個体  $x$  が表す開口形状のフーリエ変換、 $\xi$  は周波数を表す。図 11 に示すように、2つの距離の間に相関関係がないことが分かる。この無相関が、超多峰性な解空間をもたらしていると考えられる。次に、4.1 節で得られた符号化開口 (図 4) を基準にして、ランダムに生成した個体との適応度の差と2つの距離を算出した。その結果を図 12 に示す。図 12 より、空間周波数領域においては適応度が線形に変化しており、解空間が勾配を持っていることが分かる。また、空間領域では局所的起伏を伴うものの探索空間全域で大域的な傾向があり、GA などの確率的アルゴリズムでも十分良好な解の発見が期待できる問題であることが確認できた。

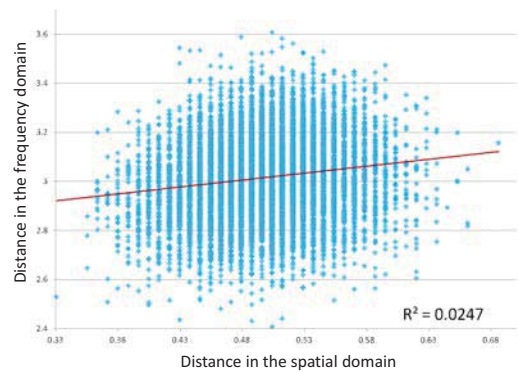


図 11 個体間の空間領域における距離と空間周波数領域における距離の相関関係

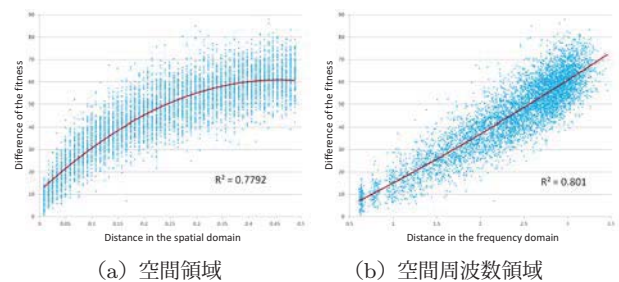


図 12 個体間の距離と適応度の差の相関関係

## 5. まとめ

本論文では、プロジェクタのボケを利用した3次元計測のための符号化開口の設計手法を提案した。本手法により得られた符号化開口を用いることで、既存の符号化開口に比べて奥行き推定の精度が向上することを実験により示した。今後の課題としては、符号化開口の高解像度化や最適化アルゴリズムの改良などが挙げられる。

## 謝辞

本研究の一部は、内閣府 NEXT(LR030) の助成を受けて実施された。

## 参考文献

- [1] 長原 一: チュートリアルシリーズ: 符号化撮像, *ipsj-techL*, Vol. CVIM-171, No. 14, pp. 1-9 (2010).
- [2] Zhou, C. and Nayar, S. K.: What are Good Apertures for Defocus Deblurring?, *IEEE International Conference on Computational Photography* (2009).
- [3] 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).
- [4] Grosse, M., Wetzstein, G., Grundhöfer, A. and Bimber, O.: Coded aperture projection, *ACM Trans. Graph.*, Vol. 29, No. 3 (2010).
- [5] 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 (2013).

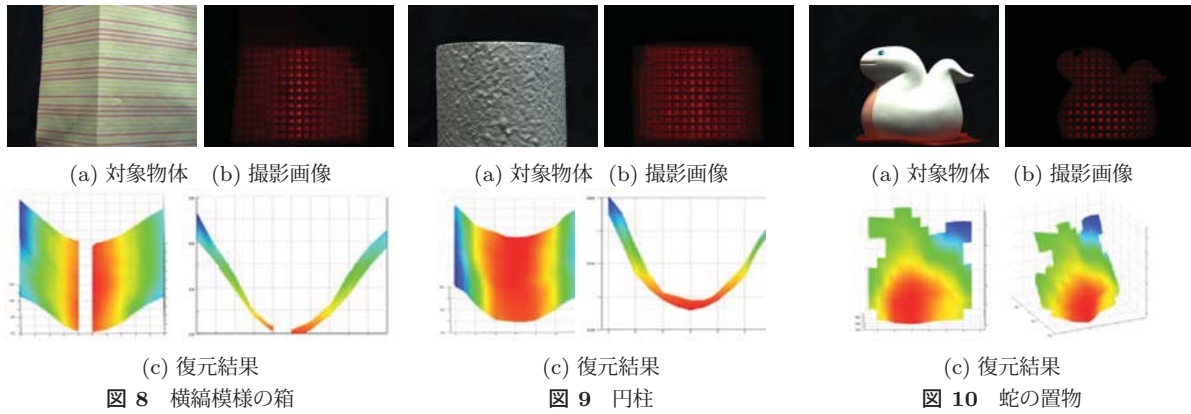


図 8 横縞模様の箱

図 9 円柱

図 10 蛇の置物

- [6] Goldberg, D. E.: *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*, Addison-Wesley (1989).
- [7] 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).
- [8] 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).
- [9] Takeda, Y., Hiura, S. and Sato, K.: Fusing Depth from Defocus and Stereo with Coded Apertures, *The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)* (2013).
- [10] Zhou, C., Lin, S. and Nayar, S. K.: Coded Aperture Pairs for Depth from Defocus, *IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV)* (2009).
- [11] Gottesman, S. R. and Fenimore, E. E.: New family of binary arrays for coded aperture imaging, *Applied Optics*, Vol. 28, No. 20, pp. 4344–4352 (1989).
- [12] Veeraraghavan, A., Raskar, R., Agrawal, A. and Tumblin, A. M.: Dappled photography: mask enhanced cameras for heterodyned light fields and coded aperture refocusing, *ACM Transactions on Graphics* (2007).
- [13] Masia, B., Presa, L., Corrales, A. and Gutierrez, D.: Perceptually Optimized Coded Apertures for Defocus Deblurring, *Computer Graphics Forum*, Vol. 31, No. 6, pp. 1867–1879 (online), DOI: 10.1111/j.1467-8659.2012.03067.x (2012).
- [14] Horn, J., Nafpliotis, N. and Goldberg, D. E.: A Niche Pareto Genetic Algorithm for Multiobjective Optimization, *In Proceedings of the First IEEE Conference on Evolutionary Computation, IEEE World Congress on Computational Intelligence*, pp. 82–87 (1994).