

# 認識対象に適した符号化開口形状の設計と評価

河本 悠<sup>1</sup> 日浦 慎作<sup>1,a)</sup> 宮崎 大輔<sup>1</sup> 古川 亮<sup>1</sup> 馬場 雅志<sup>1</sup>

受付日 2015年6月23日, 採録日 2015年11月5日

**概要:** 非合焦画像からぼけを取り除くために符号化開口が有効であることが知られている。しかし、その開口形状の設計に関する研究は十分に行われていない。そこで本論文では実用的な設計法とその詳細な実装を示すことを目的とし、特に最適化に用いる遺伝的アルゴリズムの性能を大きく左右する交叉法の比較と評価を行う。また、ぼけ除去画像を認識に用いる場合、その画像の良し悪しは画質（視覚的品質）ではなくその後の認識率により評価されるべきである。そこで本論文では、PSNRを基準とした画質評価と、その画像を認識した際の認識率との関係を示す。

**キーワード:** 符号化開口, ぼけ除去, 遺伝的アルゴリズム, バーコード認識

## Design and Evaluation of the Shape of Coded Aperture for the Recognition of Specific Patterns

YU KAWAMOTO<sup>1</sup> SHINSAKU HIURA<sup>1,a)</sup> DAISUKE MIYAZAKI<sup>1</sup> RYO FURUKAWA<sup>1</sup> MASASHI BABA<sup>1</sup>

Received: June 23, 2015, Accepted: November 5, 2015

**Abstract:** Although coded aperture is known as an efficient technique to remove the optical blur from the defocused image, studies on designing the shape of the aperture have not been well explored yet. Therefore in this paper, we will show a practical method with detailed implementation of the optimization of the coded apertures. Especially, crossover process which strongly affects to the performance of genetic algorithm is intensively evaluated and compared with the other methods. In the context of object recognition, the performance of the deblurring should be evaluated by not the visual quality but the resultant recognition rates. Therefore we will show the relationships between PSNR-based image quality criterion and actual recognition rates through experiment.

**Keywords:** coded aperture, blur removal, genetic algorithm, barcode recognition

### 1. はじめに

非合焦画像は合焦画像に比べ高空間周波数成分の情報が失われているため、ぼけ除去により復元した画像はノイズやリングなどの影響を受けやすい。そこで近年、光学系に工夫を施すことでぼけによる情報の損失を抑制する手法に関する研究が活発に行われている [1]。中でも符号化開口は、レンズ絞り形状を構造化することでぼけによる情報損失を抑制することができる手法として広く研究が行われ、ぼけ量からシーンの奥行きを求めたり、撮影後にぼけ

を取り除く処理の高精度化が可能であることが示されている [2], [3]。しかし、このための絞り形状の設計に関する研究は十分に行われているとはいえない。

絞りは光を透過または遮断するデバイスであり、その透過率  $\rho$  は  $0 \leq \rho \leq 1$  の範囲に制約されることなどから、最適な絞り形状は自明ではなく、符号化理論や逆フーリエ変換などにより解析的に求めることは容易ではない。そのため絞り形状の設計では、適切に設計した評価関数に遺伝的アルゴリズム (GA) などの数値最適化法を組み合わせることで、探索的に設計する方法が用いられることが多い。たとえば Zhou ら [5] は自然画像に適した開口形状を設計するために、復元画像の PSNR を最大にする開口形状を GA により探索する手法を提案した。しかしこの論文では主に

<sup>1</sup> 広島市立大学  
Hiroshima City University, Hiroshima 731–3194, Japan  
a) hiura@hiroshima-cu.ac.jp

評価関数の設計について論じられており、GAの実装の良否については論じられていない。また、設計された符号化開口形状は自然画像一般に用いることを目的とした汎用的な形状のみであり、被写体が特定の対象に限定されている場合、それ専用の符号化開口を設計することの効果の評価されていない。

以上のような状況から、符号化開口は産業界を含めた広い分野での利用が期待されていながら、その開口形状をどのようにして設計すればよいのかについて十分明らかにされていないといえる。そこで本論文では、符号化開口形状を設計するためのアルゴリズムの詳細なレシピを示すとともに、特にGAの実装において重要となる交叉アルゴリズムの違いによる収束性の比較評価を行う。さらに符号化開口の具体的な設計課題としてバーコードをとりあげ、限定された被写体のために特別に設計された符号化開口がどの程度、認識率の向上に寄与するのかについても調べる。

原画像からのぼけ除去は、いわゆる失敗写真の救済のような消費者ニーズのほかに、製造・検査、物流・販売の自動化・省力化・高速化など、いわゆる機械の目としての利活用が期待されている。このとき求められるのは、復元された画像の視覚的品質ではなく、計測や認識など後の処理の性能を向上させることである。そこで本論文ではバーコード認識を課題とし、その認識率を向上させるための符号化開口の評価方法についても考察する。符号化開口の形状を最適化する際の評価関数に直接、復元画像の認識率を用いることは計算量が大きすぎ、現実的ではない。そこで我々は、提案した評価関数が認識率に対して下界のような性質を持つことを実験的に示す。またさらに、バーコードや印刷文字のような二値からなる対象を被写体としたときに、単一の画像から奥行きを推定する手法もあわせて提案する。

## 2. 関連研究

通常のカメラはレンズやピンホールにより平面上に形成された像を撮像素子によりとらえ、そのまま画像として出力する。それに対し符号化開口を用いた撮像法では、撮像素子から出力された画像に対し復元処理を施すことで被写体の像を得る。符号化開口はまずX線天文学分野においてその有用性が提唱された[6], [7]。この分野ではレンズや単一のピンホールの代わりに多数の穴を持つ符号化開口マスクを用いた撮像系が用いられるが、その理由として、X線は可視光とは異なり屈折させることが難しいことがあげられる。これらの分野ではさらに、最適な符号化開口マスクの形状についても、均一冗長アレイ (uniformly redundant array: URA) [6] やその拡張である MURA (modified URA) [8] など、数理的に設計された多数の符号化開口が提案された。しかし、これらの符号は奥行きによる点拡がり関数の大き

さ変化が考慮されておらず\*1、また矩形内の符号であるために円形の開口形状を持つレンズの絞り部分に装着するには適しているとはいえない。符号化開口マスクと撮像素子のみからなる同様の撮像系を可視光領域における撮像に利用し、原画像の復元だけでなくシーンの3次元形状も求めようとする研究も行われたが[9]、レンズを用いた撮像系に比べ著しく画質が劣り、また撮像素子の大きさの制約からきわめて近距離の被写体にしか適用できないという問題があった。

符号化開口マスクを単独で用いるのではなくレンズの絞り部分に装着することで、非合焦時の点拡がり関数の特性を最適化する考え方は日浦ら[2], [10]によって提唱された。これにより、レンズやピンホールの代替としての符号化開口でなく、ぼけ像から原画像を復元する deblurring や、ぼけを手がかりにシーンの3次元形状を計測する depth from defocus の性能を改善するために符号化開口が有用であることが示された。ただしこの研究では低照度下での撮像は考慮されていなかったために、複数のピンホールを組み合わせた開口率の低い符号化開口が用いられた。これに対し、より開口率の高い開口形状は Levin ら[3]と Veeraraghavan ら[11]によって同時期に示された。一般に符号化開口の零点(点拡がり関数の空間周波数特性においてゲインが0である点)は奥行きを推定する手がかりとなるため、距離計測では符号化開口が適度に零点を持つほうが良い[1]。そこで Levin ら[3]は日浦ら[2]の開口と同様に、適度に零点を含む開口形状を用いることで、単一の画像からシーンの奥行きと原画像を復元する手法を示した。しかし一方で、零点は原画像復元処理を不良設定化するという問題がある。そこで Veeraraghavan ら[11]は反対に、なるだけ零点を持たないように設計した広帯域な開口形状を用いることで原画像を高品質に復元する手法を示した。さらに Zhou ら[12]は2種類の符号化開口を切り替えることでシーンの奥行きと原画像を復元する手法を示したが、この場合では双方の符号化開口の零点が重ならないように開口形状を設計することで距離計測と原画像復元を両立させている。前述した日浦らの手法でも、多重フォーカスカメラと呼ばれる特殊なカメラにより合焦距離の異なる複数の画像を同時に撮影することができるため、単一の符号化開口を用いても、それぞれの画像に対応する点拡がり関数の大きさが相違するために零点の配置が互いにずれることが期待できることが示されている[2]。

このように、符号化開口を用いた距離計測および原画像復元では、零点の配置を含む点拡がり関数のゲイン特性の設計が重要であることが示されてきた。さらに、符号化開口の実用性という観点では、以下にあげるような点を考慮する必要が生じることが多い。

\*1 天文学分野では被写体はつねに無限遠に位置すると仮定できる。

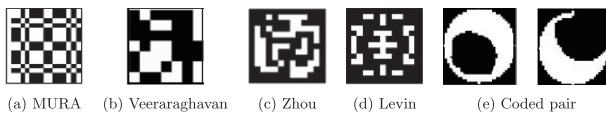


図 1 様々な符号化開口 [1]

Fig. 1 Various coded apertures [1].

**透過率** 符号化開口の各点の透過率  $\rho$  は  $0 \leq \rho \leq 1$  の範囲である必要があるが、各点に透過率を正確に設定しつつ、光の直進性に影響を及ぼさないマスクを製造することが容易でないことから、実際には透過率は 0 か 1 の二値であるほうが望ましい。

**外形** 絞りを取り除いたレンズの開口形状は円形であることから、符号化開口の外形は円形に近い形状であることが望ましい。

**島の有無** 光の直進性に影響を及ぼさないマスクを製造するために、不透明な薄板を切り抜いて符号化開口を製作する方法があるが、この場合、すべての不透明部分が互いに接続した図形であり、不透明部分の島がないことが望ましい。

従来研究で示されてきた符号化開口形状 (図 1) には、以上のような条件を満たさないものもみられる。MURA に代表される多くの数理的に導出された開口形状は外形が矩形であるものが多く、また、島を持たないように設計することは容易ではない。そこで図 1 に示したそのほかの符号化開口はいずれも、GA に代表される数値最適化法に評価関数を組み合わせることで、探索的に良好な符号化開口を得ている。しかし前章で述べたように、これらの論文は良好な符号化開口を得るためのアルゴリズムの詳細なレシピとしては不十分であり、特に探索法の観点では十分な検討と評価がなされていない。また評価関数の設計としても、特定の問題に特化することでどの程度の性能改善を図ることができるのかなどについての考察がなされていない。そのため、各応用において専用の符号化開口を設計すべきか、それとも既存の汎用的な符号化開口を用いるだけでも良いのかどうかを判断する基準がなく、実際に、既存研究の符号化開口の図形をそのまま使用した研究も多く見られる [13], [14], [15], [16]。

符号化開口はぼけ除去の高性能化に広く用いられているが、タスクによっては復元した画像をそのまま人が鑑賞するのではなく、文字認識や品質検査などさらなる画像処理の入力として用いられる場合も考えられる。パターン認識に符号化開口を組み合わせた研究として、Iwamura ら [16] は入力画像にぼけ除去処理を施してから認識するのではなく、ぼけ画像のままテンプレート画像と照合する手法を示した。この論文でも符号化開口の形状としてはぼけ除去と同様に、なるだけ原画像の情報を損なわないようなものが望ましいとされている。しかし符号化開口の最適化によりどの程度認識性能が変化するのかについては考察されてい

ない。

以上のような背景から、本論文では符号化開口の設計を効率的で容易なものとするために、以下の点について検討を行う。

**最適化アルゴリズムの検討** 符号化開口を設計するための開口形状の評価関数だけでなく、その最適化アルゴリズムの詳細についても検討し明示する。また特にそのなかで、最適化性能に大きな影響のある交叉法について数値実験を行い、有意に優れた交叉法を示す。

**限定的な対象に対する最適化の効果** 設計課題として 1 次元バーコードを設定し、これに対し特に最適化を行った符号化開口がどの程度の性能向上を果たすことができるのかについて示す。

**評価関数と認識率の関係** それぞれの符号化開口を用いて撮影・ぼけ除去を行った画像に対する認識率を求めることで、復元画像のノイズが小さくなるように設計した評価関数と復元画像の認識率の関係を明らかにする。

### 3. ぼけの発生と除去

本論文では、符号化開口を装着するレンズは収差のない理想レンズであると仮定し、またレンズによる結像は幾何光学的に扱う。このとき、被写体が合焦距離から離れるにつれてぼけた画像が得られ、この画像  $f(x, y)$  は一般にぼけカーネル  $k(x, y)$  と原画像  $f_0(x, y)$  の畳み込みに観測ノイズ  $n(x, y)$  を加えたものとして次式のように表される [1]。

$$f(x, y) = k(x, y) * f_0(x, y) + n(x, y) \quad (1)$$

また、ぼけカーネルの形状は絞りの開口形状  $a(x, y)$  ( $0 \leq a(x, y) \leq 1$ ) と相似な図形となり [3]、

$$k(x, y) = \frac{1}{m^2} a\left(\frac{x}{m}, \frac{y}{m}\right) \quad (2)$$

のように拡大率  $m$  を用いて表すことができる。拡大率  $m$  は合焦点と撮像面の位置関係により決まり、合焦点が撮像面の前にある場合には、ぼけカーネルの形状は絞り形状を上下および左右に反転した図形となる。円形開口とは異なり符号化開口は非対称な形状をとり得るため、この反転の有無を区別して取り扱う必要があるが、これは拡大率  $m$  を負の値に拡張することで自然に取り扱うことができる。

ここで、畳み込み演算はフーリエ変換により積に写されることを利用すると、

$$F(\omega_x, \omega_y) = K(\omega_x, \omega_y) \cdot F_0(\omega_x, \omega_y) + N(\omega_x, \omega_y) \quad (3)$$

のように表すことができる。ここで  $F(\omega_x, \omega_y)$ ,  $K(\omega_x, \omega_y)$ ,  $F_0(\omega_x, \omega_y)$ ,  $N(\omega_x, \omega_y)$  はそれぞれ  $f(x, y)$ ,  $k(x, y)$ ,  $f_0(x, y)$ ,  $n(x, y)$  の 2 次元フーリエ変換であり、以下では空間周波数  $(\omega_x, \omega_y)$  は省略して記述することとする。

#### 3.1 ぼけの除去

ぼけを含む画像から原画像を復元するための最も単純な



手法は、以下のように入力画像をぼけカーネルのフーリエ変換  $K$  によって除する方法である。

$$\hat{F}_0 = \frac{F}{K} = F_0 + \frac{N}{K} \quad (4)$$

これを逆フィルタと呼び、推定原画像  $\hat{F}_0$  を逆フーリエ変換することでぼけ除去画像  $\hat{f}_0$  を復元することができる。しかしこの方法では、 $K$  の値がきわめて小さい場合に  $\frac{N}{K}$  が大きな値を持ち、復元画像のノイズが増加する。そこで代わりに次式のウィナーフィルタ [4] がよく用いられる [5]。

$$\hat{F}_0 = \frac{F \cdot \bar{K}}{|K|^2 + |C|^2} \quad (5)$$

ここで、 $\bar{K}$  は  $K$  の複素共役、 $|C|^2$  は原画像に対する SN 比であり、 $|C|^2 = 0$  のとき式 (5) は逆フィルタと等価となる。この方法では、 $K$  に 0 もしくは非常に小さい値が含まれると、その値に対応する空間周波数ではノイズが強調される代わりにゲインが抑制され、やはり推定原画像は真の原画像から乖離していく。そこで符号化開口法では  $K$  の特性、すなわちぼけカーネルの空間周波数特性を決定づけるレンズの開口形状  $a(x, y)$  を最適化することにより原画像復元の精度を改善する。

原画像をより高精度に復元するためには、全変動 (total variation) などにに基づく正則化項の導入 [17] や原画像に関するより高度な事前確率を利用 [3] するなどの研究も行われている。しかしこれらは主に原画像に関する先見的知識に関するものであるため、開口形状とは比較的独立性が高く、またこれらを勘案すると開口形状の良否を単独で論じることが困難となるため、この論文ではウィナーフィルタによる復元を前提に検討を行う。

### 3.2 奥行き推定

式 (5) を用いてぼけを含む画像から原画像を復元するためには、ぼけカーネル  $k(x, y)$  が既知でなければならない。ボケカーネルは式 (2) に示すように既知の開口形状  $a(x, y)$  と相似であるが、その拡大率  $m$  はカメラから被写体までの距離によって変化する。よって、原画像を復元するためには被写体までの奥行きをあらかじめ、または同時に推定する必要がある。

一般に、単一の画像だけからでは、得られた画像に含まれるぼけがレンズにより生じたものであるのか、それともそもそも物体上のテクスチャがぼけたような模様であるのかを区別することが困難である。そこで Hiura ら [10] は、異なる距離に合焦した複数枚の画像を同時に撮影する装置 (多重フォーカスカメラ) に符号化開口を組み合わせ、それらの画像のフーリエ変換を互いに除することでテクスチャの種類に起因する成分を除去し、被写体までの奥行きを求めた。また Zhou らは開口形状を変化させて撮影した複数の画像から原画像と被写体までの奥行きを同時推定

している [12]。しかしこれらの方法では、異なる撮影パラメータに基づく複数の画像を同時に撮影できる特殊な機器が必要であったり、順次撮影によるため動的な対象に適用することができないなどの問題がある。それらに対し、Veeraraghavan ら [11] や Levin ら [3] は、原画像に関する統計的性質を用いることで、符号化開口を備えたレンズにより撮影した 1 枚の画像から被写体までの距離推定とぼけ除去を行っている。具体的には、Veeraraghavan らは原画像の輝度ヒストグラムの尖度に関する仮定を、また Levin らはエッジ強度ヒストグラムに関するモデルを用いて奥行き推定を行っている。しかしこれらの手法は必ずしも安定ではなく、Levin らは人手による補助が必要であったことを報告している。これらに対し、本研究では符号化開口の具体的な設計課題としてバーコードを選んでいるため、距離の推定に関してもこの対象が持つ特徴を利用することとする。認識対象以外の部分の距離の推定は行えないが、そのような部分はそもそも認識の必要がなく、ぼけを除去する必要もない。

JAN コードや QR コードなどの 1 次元・2 次元バーコードは紙面などの基材部の色とインク色の 2 値のみで構成されている。したがって、バーコード部の輝度のヒストグラムには 2 つのピークが現れるが、これがレンズなどによってぼかされると中間的な輝度を持つ画素が増加し、2 つのピークは次第に区別がつかなくなっていく。そこで我々はこれら 2 つのピークの分離度をクラス内分散  $\omega_b$  とクラス間分散  $\omega_w$  から計算される分離度  $S$  によって求めることとする。この方法は判別分析法または大津の方法 [19] と呼ばれ、一般的には画像を二値化するときのしきい値決定に用いられる。この計算過程で求められる分離度は二値画像らしさであると考えられ、画像がぼかされるに従って小さくなる (図 2)。そこで奥行きを求めるためには、様々な拡大率  $m$  で原画像を復元し、そのうち最も分離度  $S$  が大きくなったときに正しい奥行きと原画像が推定されていることとした。しかし、誤った拡大率でぼけ除去を施したとき、特定の空間周波数成分が過剰に増幅されることで、本来の画素値が取りうるべき範囲 (8bit 画像であれば 0 から 255 であるが、照明条件や対象の反射率が決まっている場合は、合焦時の基材部・インク部の輝度値の範囲) を逸脱することがある。通常の場合、これらの輝度が得られたときにはそれぞれの値を 0 または 255 にクリッピングする処理が行われるが、このようなときは画素値 0 と 255 の出現頻度が大きくなり、分離度  $S$  が不当に高くなってしまふ。そのためここではクリッピング前の値を用い、輝度範囲外の画素数の割合により分離度  $S$  を修正した修正分離度  $S_m$  を用いて距離推定を行う [18]。

$$S_m = \frac{n - n_0}{n} S \quad (6)$$

ここで  $n$  は全画素数であり、 $n_0$  は輝度値が範囲外となっ

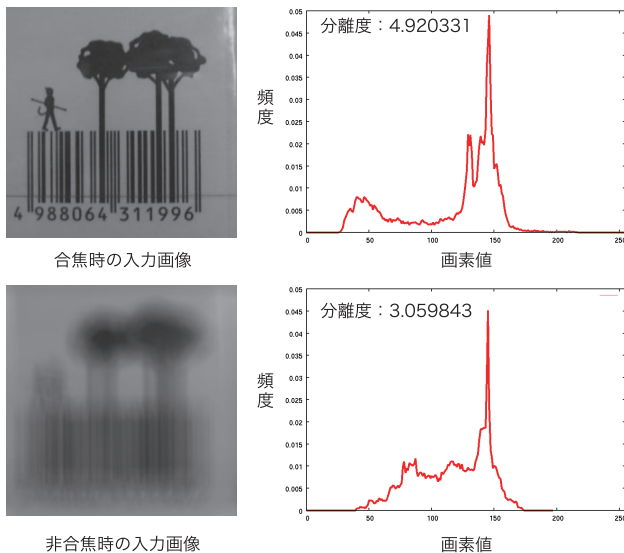


図 2 合焦時と非合焦時の入力画像の輝度ヒストグラムと分離度  
 Fig. 2 Histgrams and degrees of separation of focused and de-focused images.

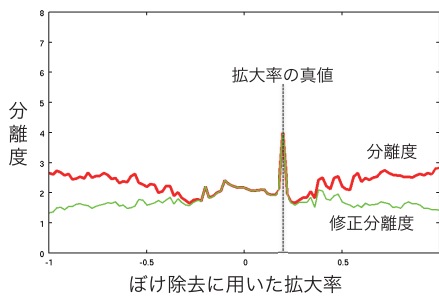


図 3 ぼけ除去に用いた拡大率  $m$  と分離度・修正分離度の関係  
 Fig. 3 Relationships between magnification ratio  $m$  used for the deblurring and degree of separation.

た画素数である。この式を用いることにより、二値の反射率を持つ被写体については 1 枚の画像のみから安定的にぼけ除去を行うことができる (図 3)。

#### 4. 認識対象に適した絞り形状の設計

ここではまず、ぼけ除去に適した絞り形状を求めるための評価関数の設計について述べ、次にこの評価関数に基づき良好な解を GA により探索する手法について述べる。

##### 4.1 評価関数の設計

3.1 節で述べたように、本論文ではウィナーフィルタを用いて原画像からぼけ除去を行う。このとき、式 (5) における安定化項  $|C|^2$  の設定が復元品質に大きな影響を及ぼす。この値には空間周波数に依存しない定数が用いられることも多いが、本来は原画像  $F_0$  に対する SN 比  $|C|^2 = |\sigma/F_0|^2$  を用いたときに最良の結果が得られる。しかし一般に原画像  $F_0$  は未知であるため、Zhou らは自然画像に広くみられ

る  $1/f$  則\*2をかわりに用いている [5]。そこで我々は、この項に特定の対象のパワースペクトル分布を適用し、その対象に最も適した開口形状を設計する。

撮影対象の平均的なパワースペクトル分布を  $B$  とすると、最適な安定化項は  $|C|^2 = \sigma^2/B$  となる。また、ぼけ除去処理によって生じるノイズ量  $R$  は  $R = |\hat{F}_0 - F_0|^2$  により求められる。これらに式 (5) を適用すると、ぼけカーネル  $K$  が与えられたときのノイズ量に基づく評価関数  $R$  は次式のように導出される。

$$R(K, \sigma) = \sum_{\zeta} \frac{\sigma^2}{K_{\zeta}^2 + \sigma^2/B_{\zeta}} = \sum_{\zeta} \frac{\sigma^2 B_{\zeta}}{K_{\zeta}^2 B_{\zeta} + \sigma^2} \quad (7)$$

ここで  $\zeta$  は空間周波数である。このノイズ量  $R$  が小さくなるように  $K$  の最適化を行うと、画像  $B$  の値が大きい (情報を多く持つ) 空間周波数における  $|K|^2$  がより優先的に大きくなるよう、つまり  $B$  の特徴的な部分が残されるような  $K$  が求められる。また逆に  $B$  の値が小さな空間周波数では最適化の重みが相対的に小さいため  $K$  の値が大きくなりにくいだが、この空間周波数は原画像上でもパワースペクトルが小さいと仮定できる領域であることから、ウィナーフィルタの安定化項がより強く働くことでノイズの発生が抑制される。

##### 4.2 最適化アルゴリズム

符号化開口の形状を  $N$  個の画素により表し、それぞれの画素の遮蔽と開口をそれぞれ 0 か 1 で表現したとき、その組み合わせは  $2^N$  通りとなり、全探索により最良の形状を得ることは困難である。そこで本研究では遺伝的アルゴリズム (GA) により最適化を行う。GA では遺伝子の設計や突然変異・淘汰の方法とともに、交叉の方法がその性能に大きな影響を及ぼす。

従来研究 [5] における交叉では、2 つの個体間で同じ位置の画素どうしを一定確率で入れ替える一様交叉が用いられていた (図 4(a))。しかし、一様交叉は画素の並びを考慮しない交叉法であり、画素の隣接関係が容易に破壊されるために親個体の特性が子に伝わりにくいと考えられる。そこで要素の並びを考慮した交叉法として、ランダムに 1 点を決定し、その前後の遺伝子を組み替える 1 点交叉も広く用いられている (図 4(b))。しかし開口形状は 2 次元画像であるのに対し遺伝子は 1 次元であるために、たとえば開口形状をラスタスキャン的に遺伝子上に配置した場合、この方法では開口形状の上または下半分を入れ替えるような効果しか持たない。そこで我々は、図 4(c) に示すような 2 次元 1 点交叉を提案する。この方法では開口形状中の

\*2 パワースペクトル分布が空間周波数に反比例するという経験的な法則。

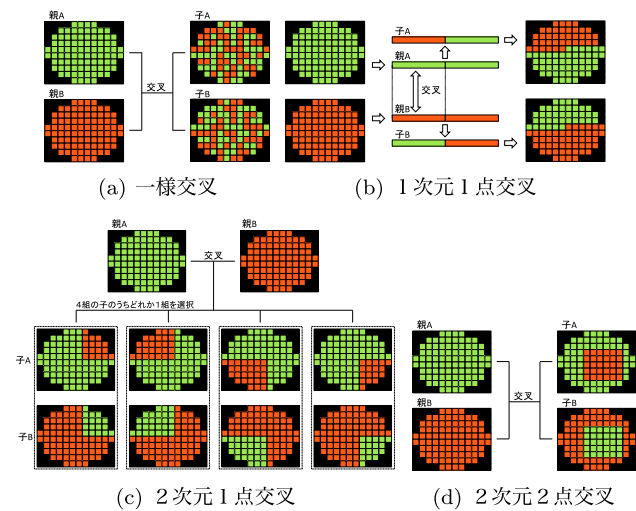


図 4 GA の交叉法のモデル

Fig. 4 Models of the crossover of genetic algorithm.

1点をランダムに決定し、その点を原点としたときの第1象限から第4象限までのいずれかを選び入れ替える。さらに比較対象として、開口形状中の2点をランダムに決定し、それら2点で決定される矩形内を入れ替える2次元2点交叉 [20] も実装し、それらの性能を比較した。

### 4.3 制約条件の導入

2章で述べたように、符号化開口には透過率や外形、島の有無など実用性の観点で必要とされる制約が課されることがある。そこでここでは、これらの制約条件をアルゴリズムに導入する方法について述べる。

前節で述べたように、本論文ではGAを利用しており、これにより自然に満たされる制約条件がある。まず絞りの外形については、円の内部の画素のみを遺伝子として表現することにより円形とすることができる。また透過率についても、各画素を0または1のいずれかに初期化することで条件を満たすことができる。

開口面積と島の有無については、評価関数を修正することで対応する。符号化開口では一般に、開口部の面積が小さいほど高周波成分が保たれやすい。しかし実際には、センサへ到達する光量が低下するために入力画像のS/N比が低下する。これに対処するためには、入射光量に対するセンサのノイズ特性を正確に求める必要があるが、一般にこれは簡単ではない [21]。そこでここでは、開口率が一定の値に近い符号化開口を設計することとする。具体的には、目標開口率を0.5としたとき、以下の関数により評価値  $R$  を面積と島の個数により補正する。

$$\hat{R} = \left( 1 + \alpha \sqrt{1 + \cos\left(2\pi \frac{n_t}{N}\right)} \right) R + \frac{n_l}{N} \quad (8)$$

ここで  $n_t$  は開口形状のうち透過率が1である画素の個数であり、全画素数  $N$  の半分が光を透過するとき式 (8) の平方根の内部が0となる。このとき開口率によるペナル

ティは発生しないが、開口率が0.5から離れると、もとの評価値  $R$  に対して乗法的にペナルティがかかる。また第2項は島の数に関する補正項であり、ラベリング処理によって求めた開口形状の不透明部分の領域数（連結領域の数）を  $n_l$  としたとき、この個数が増えると評価値に対し加法的にペナルティが加えられる。評価値  $R$  は最適化が進むに従って値が小さくなっていくため、最適化の初期段階では第2項の効果が相対的に小さいことにより個体の多様性が保たれ、終盤では島の数が減少するように最適化が進む。

## 5. 実験

### 5.1 符号化開口の最適化

実験では、符号化開口画像の一辺の長さを13画素、不透明領域として設定した周辺部を除いた最適化対象の画素数  $N$  を113画素とした。またGAのパラメータとして、親の個体数を400個、交叉回数を4,000、突然変異率（画素値をランダムに反転させる確率）を0.05とした。淘汰法として、まず評価値の高い順に100個の個体をそのまま残し、さらに個体の多様性を維持するために、残りの個体から300個体をルーレットトーナメント法 [22], [23], [24] により選択する。ルーレット選択とは個体の適合度に比例してその個体を選択されやすくする手法であり、本論文では評価値の逆数を適合度とした。またトーナメント選択とは、選び出された一定数の個体の中から最も適合度の高い個体を次世代に残す方法であり、実験ではトーナメントサイズを16とした。

評価関数におけるパラメータとしては、式 (7) におけるノイズ量を  $\sigma = 0.001$ 、目標開口率に対するペナルティの重みを  $\alpha = 2$  とした。また撮影対象の先見の知識  $B$  はM系列乱数により生成した複数の縦縞をフーリエ変換したものを用いた。被写体はカメラからの距離によってその見かけの大きさが変化するため、特定の拡大率のバーコードを用いて最適化すると、別の拡大率で撮影したときにその情報が十分に保持できないおそれがある。そこでここでは、実際のバーコードよりもパワースペクトル分布が広い帯域にわたって平坦なM系列乱数を用いて縞模様を生成した。さらに特定のM系列乱数を用いることによるパワースペクトル分布の偏りを避けるため、5種類のM系列乱数のパワースペクトルの平均を用いた。

2次元1点交叉を用いたときの、最適化の過程における全個体の評価値の最大値（緑線）・最小値（青線）と平均値（赤線）の推移を図5に示す。このグラフにより、おおよそ80世代の最適化を行うことでほぼ収束していることが分かる。またその間の個体のうち、第0, 20, 40, 60, 80世代で最も評価値の高かった個体（最良個体）の開口形状を図6に示す。初期個体ではバーコードの縦縞に対し方向性のないパターンが生成されているが、終盤では横方向の空間周波数を保持する開口形状へと最適化が進んでいるこ



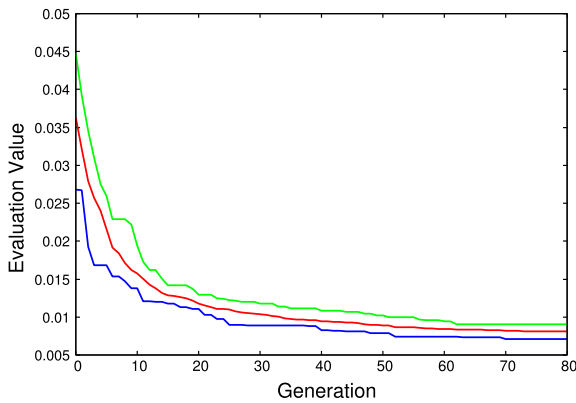


図 5 2次元1点交叉を用いたときの評価値  $\hat{R}$  の変化

Fig. 5 Trends of evaluation value  $\hat{R}$  during the optimization.



(a) 0世代 (b) 20世代 (c) 40世代 (d) 60世代 (e) 80世代

図 6 最適化過程における開口形状

Fig. 6 Generated apertures during the optimization.

とが分かる。

### 5.2 交叉法の評価

ここでは先に述べた4種類の交叉法について、より評価値の高い最良個体を得るために、どの方法が有意に優れた手法であるのかについて調べる。アルゴリズムおよびパラメータは前節で示したとおりであるが、交叉法による最適化性能の違いを比べるため、交叉アルゴリズムのみを入れ替え、それぞれの交叉法に対し最適化を300回試行した。それぞれの試行で得られた最良個体の評価値の平均と分散を図7に示す。比較のため5.1節の実験に対応した実験結果(図7(a))に加え、バーコードを横縞状としたときの実験結果(図7(b))、2次元バーコード(QRコード)を先見的知識として用いた実験結果(図7(c))、ナンバープレートの一連番号の字形(0から9の数字)を先見的知識として用いた実験結果(図7(d))もあわせて示した。2次元バーコードに対する最適化では埋め込むデータの内容やデータ長を変えて生成した5種類のQRコードのパワースペクトルの平均を、またナンバープレートに対する最適化では規格で定められた0から9の字形を10種類の拡大率で拡大縮小したもののパワースペクトルの平均を最適化における先見的知識として用いた。

得られた値に対しt検定を行ったところ、いずれの対象についてもZhouらが用いた一様交叉[5]は他の手法に対して有意に性能が劣っていることが分かった。また2次元的な画素の配列を考慮した交叉法は、横縞状のバーコードを除き1次元1点交叉に対し有意に高性能であることが分かった。しかし、2次元1点交叉と2次元2点交叉の間に

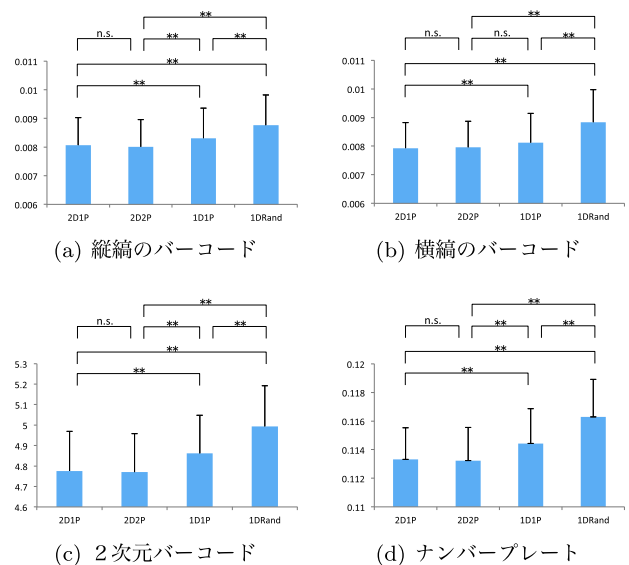


図 7 交叉アルゴリズムの比較結果. 2D1P: 2次元1点交叉(提案手法), 2D2P: 2次元2点交叉[20], 1D1P: 1次元1点交叉, 1DRand: 一様交叉[5]

Fig. 7 Comparison of crossover algorithms. (a) vertical barcode, (b) horizontal barcode, (c) 2D code, (d) numbers of Japanese car identification plate. 2D1P: 2 dimensional 1 point crossover (proposed method), 2D2P: 2 dimensional 2 points crossover [20], 1D1P: 1 dimensional 1 point crossover, 1DRand: uniform crossover [5].

は有意差がみられなかった。

横縞状のバーコードについては1次元1点交叉と2次元2点交叉との間に有意差がみられなかった。これは、1次元1点交叉は図4(b)のように領域を上下に分割し入れ替える働きを持ち、これが最終的に得られる横縞状の開口形状の最適化に対し効果的に働くためと考えられる。このことはとりもなおさず、1次元1点交叉はその最適化性能に方向性を有することを示している。しかしバーコードのようにその空間周波数の方向性が自明である被写体は限られているため、汎用的な交叉法としては1次元1点交叉は不適切であるといえる。これらのことから、一様交叉よりも画素の並びの情報を保持しやすい交叉法のほうが優れていること、このときに2次元的な画素の並びを考慮した2次元交叉法を用いるべきであるといえるが、交叉法をさらに複雑化する効果は乏しいと考えられる。

### 5.3 評価関数と認識率の関係

被写体を認識することを目的としてぼけ除去を行う場合、それに用いる符号化開口の性能は認識率により評価されるべきである。しかし、個々の符号化開口による認識率を精度よく求めるためには、様々な距離に置かれた多様な被写体に対する多数回の認識処理を行う必要があり、計算量が大きすぎるためにGAの淘汰のための評価関数として利用することは難しい。そこで我々は、前章で述べた評価

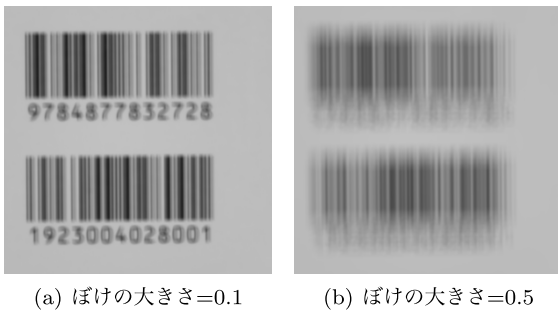


図 8 シミュレーション実験における入力画像の例

Fig. 8 Examples of input images for simulation experiment.

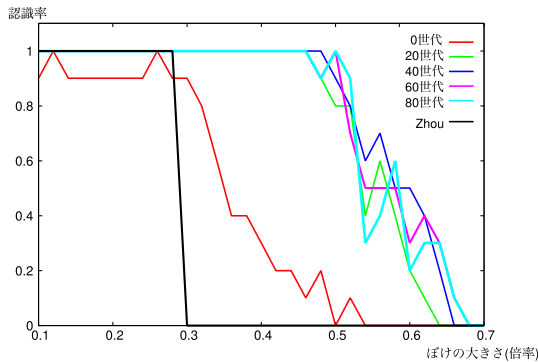


図 9 ぼけの大きさと認識率の関係

Fig. 9 The relationships between blur size and recognition rate.

関数 (式 (8)) を用いて符号化開口形状の最適化を行うことを提案しているが、ここではこの評価関数と認識率の関係をシミュレーションおよび実画像実験により調べ、評価関数の妥当性を検証した。認識率の算出には、ぼけを除去した画像に対し市販のバーコード認識ライブラリ\*3を適用することで求めた。

### 5.3.1 シミュレーション実験

ぼけのないバーコード画像を 10 種類用意し、それに対し符号化開口形状を畳み込むことでぼけた画像を生成する。このとき、ぼけの大きさによって認識率が変化するため、様々な大きさのぼけを用いて評価した。図 8 に入力画像の例を示す。これらの例で画像全体の大きさは  $512 \times 512$  [pixel] であり、これに対し図 6 に示すような開口形状を  $150 \times 150$  [pixel] に拡大して畳み込んだときのぼけの大きさを 1.0 としている。比較においてすべての符号化開口の開口率を統一しているため、透過部が中央に集まった円形開口を用いた場合は、実効的な畳み込みカーネルの大きさは符号化開口マスク全体の幅よりも小さくなる。

図 9 は、ぼけの大きさと認識率の関係を、ある 1 回の最適化の試行の各世代の最良個体について示している。また比較のため、Zhou の提案した汎用の開口形状 [5] を用いた場合の性能 (黒線) も示した。この例では初期個体 (赤線) に比べ、最適化が進むと認識率が向上していることが分かる。

\*3 カーネルコンピュータシステム株式会社 KDbarcode\_lib

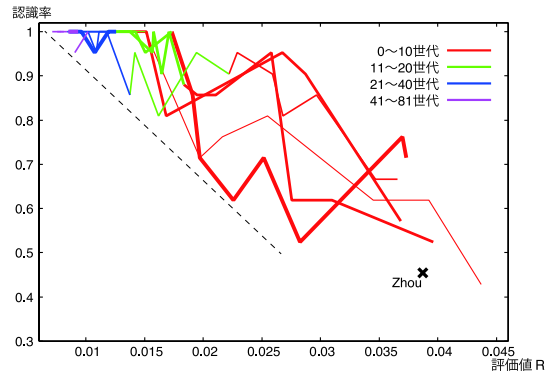


図 10 各試行における評価値と認識率の関係

Fig. 10 The relationships between the evaluation value and recognition rate.

次に、最適化の各試行・各世代ごとの評価値と認識率の関係を図 10 に示す。ここでは 2 次元 1 点交叉を用い、ぼけの大きさが 0-0.55 の範囲における認識率の平均を認識率とした。図 10 において、それぞれの折れ線は GA による最適化 1 試行における各世代の最良個体に対応している。線の太さはそれぞれの試行、線の色は最適化の進捗に対応しており、赤線は 0-10 世代、緑線は 11-20 世代、青線は 21-40 世代、紫線は 41-80 世代の評価値と認識率の変化を表している。またここでも、Zhou の開口形状 [5] の評価値と認識率を示した。図から、最適化が進むに従い評価値とともに認識率の改善が進んでいることが分かる。評価値と認識率の相関係数は  $-0.772$  であり、両者の間に高い相関がみられることが分かる。特に、評価値が良いにもかかわらず認識率の低い個体 (図 10 において目安として記した破線より下側の領域) が現れていないことが見て取れる。このことから、評価値は認識率に関する下界のように働き、評価値を用いて最適化を行うことで認識率の高い個体が得られることを示している。

### 5.3.2 実画像実験

最後に、特定の対象の認識に特化した符号化開口形状、および分離度に基づく奥行き推定 (3.2 節) の効果を確認するため実画像実験を行った。符号化開口は不透明な紙に印刷し、手作業により透過部分を切り抜くことにより作成した。このとき手作業による製作の誤差、および回折効果やレンズ収差による影響を避けるため、微小な点光源をぼかして撮影し、二値化することにより実際の点拡がり関数の形状を求めた。開口形状には 2 次元 1 点交叉による最適化で得た最良の個体と最悪の個体、および Zhou の汎用開口 [5] と円形開口を用い、それぞれの開口部の面積はほぼ同一である。それぞれの開口形状に対応した点拡がり関数を図 11 に示す。実験に用いたカメラは Nikon D700、レンズには Carl Zeiss Makro-Planar T\* 2/50 mm ZF.2 を用い、このレンズの後端に符号化開口を取り付けた。実験に用いた被写体の例を図 12 に示す。このようにバーコードを平



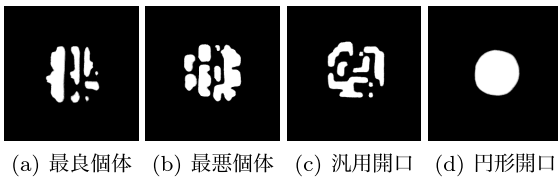


図 11 各開口形状に対応した点拡がり関数

Fig. 11 Point spread functions for corresponding aperture shapes.



図 12 実画像実験に用いたバーコード

Fig. 12 Barcodes for the real experiment.

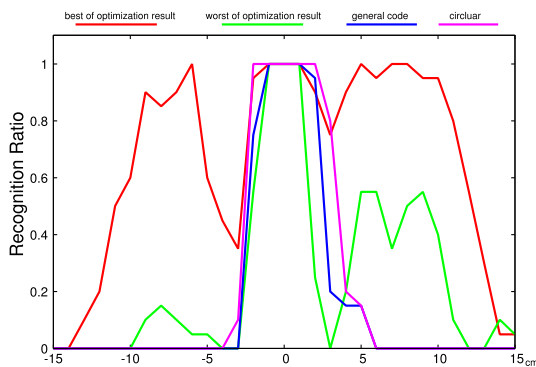


図 13 奥行き変化と認識率の関係

Fig. 13 The relationships between depth variation and recognition rate.

面上に配置し、合焦位置から  $\pm 15$  cm の範囲について 1 cm ごとに移動させ撮影を行った。実験に用いた画像は全体の大きさが  $2,048 \times 2,048$  [pixel] で、ここから  $256 \times 256$  [pixel] の小領域を切り出して処理を行う。この小領域は互いに重なり合うよう縦・横に 128 [pixel] ずつずらしながら切り出され、各小領域のぼけ除去結果は小領域の中央ほど重みが大きくなるように設定した重み付き平均により元の大きさの画像に統合される。利用したバーコード認識ライブラリは、統合された全体画像から複数のバーコード領域を自動的に認識することができる。

図 13 にそれぞれの開口形状に対する奥行き変化と認識率の関係を示す。ここで赤線は最良個体、緑線は最悪個体、青線は Zhou の汎用開口、紫線は円形開口に対応している。実画像実験においても、評価値の高い開口形状のほうがバーコードを正しく認識できる奥行きの範囲が広いことが分かった。認識が可能な奥行きの範囲を図 13 の認識率分布の標準偏差とし、その比を求めたところ、最良個体と円形開口の比が 6.39 であることから、約 6 倍の被写界深度伸長効果があるといえる。

## 6. おわりに

従来、符号化開口の設計はぼけ復元をした際の SN 比に重点をおいた設計が行われてきており、また自然画像を前提としていたため、バーコードのような人工的な図形の認識率との関係は明らかではなかった。また、被写体の種類がより強く限定される場合において、汎用性のある符号化開口に対し、専用の符号化開口を設計することの効果も不明であった。そこで本論文では、符号化開口形状を設計するためのアルゴリズムの詳細なレシピを示すとともに、特に GA の実装において重要となる交叉アルゴリズムの違いによる収束性の評価を行った。これにより、一様交叉よりも画素の配列を考慮した交叉法のほうが得られた最良個体の評価値が有意に高く、特に 2 次元的な画素の配列を考慮した交叉法を用いるべきであることが分かった。次に、符号化開口の具体的な設計課題としてバーコードをとりあげ、限定された被写体のために特に設計された符号化開口がぼけの大きさ変化に対する認識率の観点においてどの程度の性能向上を果たすのかについても調べた。符号化開口を設計する際の評価関数に直接、その符号化開口を用いた際の認識率を用いることは計算量が大きすぎるが、提案する評価関数により符号化開口を最適化することでも認識率の向上を図ることができることを実験的に示した。バーコードのような二値画像を被写体としたときに、単一の画像から奥行きを推定する手法もあわせて提案し、これらを組み合わせた実画像実験により、従来の開口形状に対して認識可能な奥行きの範囲を大幅に伸長できることを示した。今後の課題として、ぼけ除去処理や奥行き推定の高速化があげられる。また今回は目標開口率を 0.5 としたが、センサの SN 特性などにに基づく開口率の最適化も今後の課題である。

謝辞 本研究は科研費 23650090, 25240027, 15H02727 および 15H05925 の助成を受けた。

## 参考文献

- [1] 長原 一：符号化撮像，情報処理学会研究報告，Vol.2010-CVIM-171, No.14, pp.1–9 (2010).
- [2] 日浦慎作，松山隆司：構造化瞳をもつ多重フォーカス距離画像センサ，電子情報通信学会論文誌，Vol.J82-D-II, No.11, pp.1912–1920 (1999).
- [3] Levin, A., Fergus, R., Durand, F. and Freeman, W.: Image and depth from a conventional camera with a coded aperture, *ACM Trans. Graphics*, No.3 (2007).
- [4] Wiener, N.: Extrapolation, Interpolation, and Smoothing of Stationary Time Series (1949).
- [5] Zhou, C. and Nayar, S.K.: What are Good Apertures for Defocus Deblurring?, *IEEE International Conference on Computational Photography* (Apr. 2009).
- [6] Fenimore, E.E. and Cannon, T.M.: Coded aperture imaging with uniformly redundant arrays, *Applied Optics*, Vol.17, No.3, pp.337–347 (1978).
- [7] Harwit, M. and Sloane, N.J.A.: *Hadamard transform optics*, Academic Press (1979).

- [8] Gottesman, S.R. and Fenimore, E.E.: New family of binary arrays for coded aperture imaging, *Applied optics*, Vol.28, No.30, pp.4344-4352 (Oct. 1989).
- [9] 山田憲嗣, 高橋秀也, 志水英二: 符号化開口法を用いた3次元形状検出手法, *電子情報通信学会論文誌*, Vol.J80-D-II, No.11, pp.2986-2994 (1997).
- [10] Hiura, S. and Matsuyama, T.: Depth Measurement by the Multi-Focus Camera, *IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition*, pp.953-959 (1998).
- [11] Veeraraghavan, A., Agrawal, A., Raskar, R., Mohan, A. and Tumblin, J.: Dappled photography: Mask enhanced cameras for heterodyned light fields and coded aperture refocusing, *ACM Trans. Graphics*, No.3 (2007).
- [12] Zhou, C., Lin, S. and Nayar, S.: Coded Aperture Pairs for Depth from Defocus, *IEEE International Conference on Computer Vision* (2009).
- [13] Takeda, Y., Hiura, S. and Sato, K.: Fusing Depth from Defocus and Stereo with Coded Apertures, *IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition*, pp.209-216 (2013).
- [14] Takeda, Y., Hiura, S. and Sato, K.: Coded Aperture Stereo for Extension of Depth of Field and Refocusing, *Int. Conf. Computer Vision Theory and Applications*, pp.103-111 (2012).
- [15] 堀田祐樹, 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, *電子情報通信学会論文誌*, Vol.J96-D, No.8, pp.1823-1833 (2013).
- [16] Iwamura, M., Imura, M., Hiura, S. and Kise, K.: Recognition of Defocused Patterns, *IPSP Trans. Computer Vision and Applications*, Vol.6, pp.48-52 (2014).
- [17] Bioucas-Dias, J.M., Figueiredo, M.A.T. and Oliveira, J.P.: Total Variation-Based Image Deconvolution: A Majorization-Minimization Approach, *IEEE Int. Conf. Acoustics, Speech and Signal Processing*, Vol.2, pp.14-19 (2006).
- [18] 河本 悠, 日浦慎作, 浅田尚紀: 符号化開口を用いたバーコード画像のぼけ除去, *MIRU2011 画像の認識・理解シンポジウム論文集*, pp.930-935 (2011).
- [19] Otsu, N.: A threshold selection method from gray-level histograms, *IEEE Trans. Syst. Man. Cyber*, Vol.9, No.1, pp.62-66 (1979).
- [20] 堀田祐樹, 小野智司, 川崎 洋, 木村 誠, 高根靖雄: 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, 第95回数理モデル化と問題解決研究発表会, Vol.95, No.21, pp.1-6 (2013).
- [21] 高松 淳: 画像化プロセスと画像ノイズ, *情報処理学会研究報告*, Vol.2010-CVIM-174, No.17, pp.1-8 (2010).
- [22] 坂和正敏, 田中雅博: GA, 朝倉書店 (1995).
- [23] 嘉数侑昇, 三上貞芳, 皆川雅章, 川上 敬, 高取則彦, 鈴木恵二: GA ハンドブック, 森北出版 (1994).
- [24] 伊庭齊志: GA の基礎, オーム社出版局 (1994).



河本 悠

2011年広島市立大学情報科学部知能工学科卒業, 2013年広島市立大学大学院情報科学研究科博士前期課程修了, 同博士後期課程在学中. コンピュータショナルフォトグラフィに関する研究に従事. 修士 (情報工学).



日浦 慎作 (正会員)

1993年大阪大学基礎工学部制御工学科飛び級中退, 1997年同大学院博士課程短期修了. 同年京都大学リサーチアソシエイト, 1999年大阪大学大学院基礎工学研究科助手, 2003年同助教. 2010年広島市立大学大学院情報科学研究科教授. 2008~2009年マサチューセッツ工科大学メディアラボ客員准教授. 三次元空間の画像計測と反射現象・表面質感の解析, コンピュータショナルフォトグラフィ等の研究に従事. 1993年電気関係学会関西支部連合大会奨励賞, 2000年画像センシングシンポジウム優秀論文賞, 2010年情報処理学会山下記念研究賞, 2012年MIRU優秀論文賞等受賞. 電子情報通信学会, 日本バーチャルリアリティ学会各会員. 博士 (工学).



宮崎 大輔 (正会員)

2000年東京大学理学部情報科学科卒業. 2005年同大学院情報理工学系研究科コンピュータ科学専攻博士課程修了. 博士 (情報理工学). 2008年広島市立大学着任, 現在, 准教授. 物理ベースビジョンの研究に従事. 2000年VSMM優秀論文賞, 2013年VC/GCADシンポジウム優秀論文賞受賞, 2014年コニカミノルタ画像科学奨励賞受賞. 2011年MIRU出版委員長. OAI, IJCVSP編集委員. 電子情報通信学会, 画像電子学会, IEEE, ACM各会員.



古川 亮 (正会員)

1993年京都大学工学部卒業. 1997年奈良先端科学技術大学院大学博士後期課程修了. 広島市立大学情報科学部助手, 同講師を経て, 現在, 広島市立大学大学院情報科学研究科准教授. コンピュータ・ビジョン, コンピュータ・グラフィックスに関する研究に従事. 博士 (工学). 2013年IPSP Trans. CVA Outstanding Paper Award受賞. 情報処理学会, 電子情報通信学会, IEEE各会員.



馬場 雅志

1990年広島大学工学部第二類卒業.  
2004年同大学院工学研究科システム  
工学専攻博士後期課程了. 博士(工  
学). 1995年広島市立大学着任, 現  
在, 講師. CGの研究に従事. 2010年  
VC/GCADシンポジウム優秀論文賞,  
2012年画像電子学会 IEVC ワークショップ優秀論文賞受  
賞. 電子情報通信学会, 画像電子学会, 日本 VR 学会各  
会員.