焦点ぼけを含む撮影画像からの電子透かし抽出を可能とする 符号化開口の設計

中居 謙太郎^{1,a)} 前原 武¹ 園田 聡葵² 三鴨 道弘¹ 川崎 洋¹ 長原 一² 小野 智司¹

概要:近年,医療品や食料品の製品ラベル等でバーコードおよび二次元コードが幅広く用いられている. それらのバーコードや二次元コードに電子透かしを埋め込むことは,偽装を検知する良い手段となりうる. しかし,撮影画像に焦点ぼけが生じると,電子透かしの情報が失われるため,電子透かしの抽出が行えない.そこで,本研究では符号化開口を利用することで焦点ぼけを含む撮影画像から電子透かしの抽出を行 う手法を提案する.本研究では,遺伝的アルゴリズムを用いたシミュレーションにより,電子透かし抽出 に対して有効な符号化開口を設計方式を提案する.設計された符号化開口を用いて実機撮影環境下におけ る符号化撮像の有効性を確認する.

キーワード:符号化開口,電子透かし,遺伝的アルゴリズム,シミュレーション,被写界深度拡張

Study on Coded Aperture Design for Digital Watermark Extraction from Defocused Images

Kentaro Nakai^{1,a)} Takeru Maehara¹ Toshiki Sonoda² Michihiro Mikamo¹ Hiroshi Kawasaki¹ Hajime Nagahara² Satoshi Ono¹

Abstract: In recent years, barcodes and two-dimensional (2D) codes have been widely used on labels for medical products and food products. Embedding digital watermarks in these barcodes or 2D codes can be a good means of detecting their falsification. However, in general, it is difficult to extract watermark from defocused images because defocus blur destroys the watermark components. Therefore, this paper proposes a coded aperture design method for watermark extraction from blurred images. The proposed method designs appropriate coded aperture patterns with a Genetic Algorithm (GA) and simple optical simulation, and evaluates the designed aperture in the actual environment.

Keywords: coded aperture, digital watermark, genetic algorithm, simulation, extended depth of field

1. はじめに

現在,バーコードによる物体の認証が幅広く用いられている.代表的な例として,お店で顧客が商品の購入を行う際の,バーコードによる商品の認証が挙げられる.ま

た, 医療現場において患者の腕や医薬品にバーコードを 貼り, 施術前に照合を行うことで医療ミスを防止してい る. 二次元コードは, 高いデータ容量と早い認証(Quick Responce:QR)が特徴とされるバーコードであり, より多 くのデータが求められる場面で1次元バーコードの代わり に使用されている[1], [2]. 近年, 上記のようなバーコード を用いた物体認証の場面において, 認証を素早く行うだけ ではなく, 偽装された医療品や食料品を検出する技術が求 められている.

物体の認証を行う手段として, Radio Frequency Identifi-

鹿児島大学大学院 理工学研究科 Graduate School of Science and Engineering, Kagoshima University, 1-21-40, Korimoto, Kagoshima, 890-0065, Japan

² 九州大学大学院 システム情報科学研究院 Graduate School of Information Science and Electrical Engineering, Kyushu University,744, Motooka, Nishi-ku, Fukuoka 819–0395, Japan

^{a)} sc111043@ibe.kagoshima-u.ac.jp



図 1: 非接触ハンドヘルド型バーコードリーダ. **Fig. 1** Handheld, non-contact barcode reader.

cation (RFID)も存在するが,セキュリティに関する問題点 が報告されている [3], [4]. 最近では, Physical Unclonable Function と呼ばれる, IC チップが持つわずかな個体差を承 認に利用する技術が実用化されているが [5], [6], IC チッ プが非常に高価であるため安価な商品の認証には適さない.

このため,より安価で偽装の検知が可能なタグを実現す る代替技術の実現が期待されており,電子透かしはその有 力な一手段として期待されている.例えば,商品に貼られ た2次元コードから電子透かしが抽出されなかった場合, その商品は改ざんまたは偽装されている可能性があること を示唆する.電子透かしは画像,映像,音声などの著作権 保護や改ざんの検知の用途で広く用いられており,計算機 やネットワークの高速化,コンテンツのデジタル化に伴い 複製,改ざん,再配布等が容易になった現代で重要な役割 を果たしている [7],[8].電子透かしは,実空間利用型と周 波数空間利用型に大別され,脆弱な電子透かしは高周波成 分に埋め込まれることが多い[9].特に,人間は高い視覚認 知特性を持つため,画像を対象とした脆弱な電子透かしは 高い周波数帯が利用される.

一般に、バーコードを復号するリーダは、据え置き型や ハンドヘルド型がある.従来はバーコードリーダに復号対 象のバーコードを押し付けて復号することが多かったが、 近年は、作業者の労力軽減や時間効率の向上といった観点 から図1のような非接触の状態でバーコードを復元でき るリーダが増えている.しかしながら、電子透かし入りの バーコードから透かしの抽出を行う際は、高周波成分に埋 め込まれた透かしがぼけにより破壊されないように焦点 を正確に合わせる必要がある.言い換えれば、焦点が多少 ずれてぼけが生じてしまうと、電子透かしの成分が容易に 破壊されてしまう.非接触による簡便で迅速な復号を行う ためには、合焦ぼけによる透かしの損失を抑制する必要が ある.

このため、本論文では、画像を対象とした電子透かしの ぼけに対する脆弱性を緩和するため、電子透かしの抽出へ 符号化開口の応用を試みる.上記のような符号化開口を利 用することで、焦点ぼけを伴う場合であっても電子透かし を埋め込んだ周波数の情報が維持され、焦点ぼけを含む画 像から透かしを抽出できることが期待される.一般に符号 化開口は、撮影時の特定の周波数帯の損失の防止を目的と する技術であるが、後処理としてデコンボリューションな どの画像処理を前提とすることが多い.これに対して本研 究では、デコンボリューションを後処理として実行せずに、 符号化開口を用いて撮影を行った画像から直接透かしの抽 出を試みる.これにより、デコンボリューションなどの後 処理だけでは復元が難しい複雑な透かし情報の損失を抑制 するだけでなく、バーコードの迅速な認証を損ねることな く偽造品のチェックを行うことを可能とする.

上記のような符号化開口を実現するために,本研究では, より広い被写界深度で電子透かしの抽出を可能とする符号 化開口を設計する方式を提案する.提案する方式は,遺伝 的アルゴリズム (Genetic Algorithm: GA) [10] を用い,多 数の開口パターンの生成とカメラ撮影のシミュレーション により電子透かしの抽出率の評価を繰り返すことで,電子 透かしの抽出に適した符号化開口の設計を可能とする.加 えて,提案手法で設計された符号化開口の実機における有 効性を検証する.実験により,焦点ぼけ除去を目的とした 符号化開口と比較して,提案手法により設計した符号化開 口が,焦点ぼけを含む撮影画像からの透かしの抽出により 効果的であることを確認する.

本研究の貢献を以下に示す.

- 符号化開口を電子透かしの抽出に応用した例は,著者 らの知る限り存在しない.本論文では符号化開口の新 たな用途として電子透かしの抽出への応用を試みる.
- 提案手法は後処理としてデコンボリューションを行う 必要がない.したがって、復元が難しい複雑な透かし 情報を維持し続けることが可能となる.
- デコンボリューションを行わないことで、処理時間を 大きく削減できるため、バーコードの迅速な認証を損 ねることがない。

2. 関連研究

2.1 電子透かし

近年のネットワークや計算機の普及により,デジタルな 著作物の著作権を守ることは重要な課題である.また,画 像や映像などの証拠能力が重視されており,それらの改ざ んを検知する技術も必要とされている.電子透かしは,そ れらの用途に広く利用されており,用途によって頑健な透 かしと脆弱な透かしに大別される.

頑健な透かしは JPEG や MPEG などの画像・映像圧縮 やクロッピング,トリミング,回転などの画像処理(電子 透かしの観点からはこれらは攻撃とみなされる)に対して 頑健であり,破壊されないことが必要とされる.一方,脆 弱な透かしは,画像処理ソフトウェアによる画像の合成や JPEG 圧縮などが行われた場合に,透かしが破壊されるか 性質が変化することによって,改ざんの検知を可能とする.

以上のように電子透かしは広く研究されているが,再撮 影に対して耐性を持つ電子透かしの研究は少ない.

2.2 符号化開口

一方,近年,コンピュータによる撮像後の画像処理を前 提として撮影を行う技術であるコンピュテーショナルフォ トグラフィ(Computational Photography: CP)の研究が 盛んに行われており,2次元状のパターンを開口として持つ 符号化開口[11],[12],[13],[14],[15],[16],時間軸上で符号 化されたパターンで多重露光を行う符号化露光[16],[17], マイクロレンズアレイを用いて光線の方向を取得するライ トフィールドカメラ[18] などが注目されている.ライト フィールドカメラはバーコードの復号にも応用されてお り,バーコードの復号が可能なダイナミックレンジを広げ る手法[19]が提案されているが,本研究では電子透かしの 復号を目的としている点と,被写界深度拡張を目的として いる点が異なる.

符号化開口とは、カメラの絞り部分を二次元のマスク パターンで符号化することで、撮像系のぼけ関数(Point Spread Function: PSF)を制御する技術である.レンズに よる焦点ぼけは PSF によって表現され、PSF はカメラの 絞り形状の他にもレンズに依存することが知られている. 一般的な円形開口の場合、焦点ぼけが生じると画像の高周 波成分が大きく失われることに加え、PSF の分布に多くの ゼロ交差を含む.このため、全焦点画像の復元などの撮影 後の画像処理には適していない.これに対して符号化開口 は、PSF の形状やその周波数特性を制御(符号化)すること で、情報の損失を防ぐことができ用途やシーンに合わせて 様々なパターンが提案されている[11],[12],[13],[14],[15].

符号化開口の研究分野の観点から本研究を見ると、本研 究は電子透かしの抽出という新しい用途である点,およ び,デコンボリューション等の後処理を行わない点に特徴 がある.

3. 提案手法

3.1 概要

本研究の目的は,符号化開口を用いることで,ぼけた撮 影画像からでも透かしの抽出を可能にすることにある.上 記について検討を行うため,本研究では,電子透かし入り 画像の撮影に適した符号化開口をGAを用いて設計する方 式を提案する.なお,本手法自体はカバー画像に関して本 質的な制限はないものの,本稿では2次元コードに埋め込 まれた電子透かしの抽出 [20] に限定して検証を行う.

難しい点は,一定のぼけに対して有効な符号化開口の設計を行っても,他の撮影距離(カメラから被写体までの距離)では透かしの抽出に有効でない可能性が高い点にある. これは,撮影距離が変化した場合に,撮影対象となる透かし入り2次元コードの解像度の変化と,合焦点から離れることによるぼけの強さの変化とが連動しないためである. 例えば,図2に示すように,撮影距離50mmに設定された合焦距離から徐々に撮影距離が伸びていく状況を考える.



図 2: 符号化開口を利用した電子透かし抽出の難しさ.

 $\label{eq:Fig.2} {\bf Fig. 2} \quad {\rm The \ difficulty \ of \ watermark \ extraction \ using \ coded \ aperture.}$

この場合,透かし入り2次元コードの解像度は低下してい くためにより高い周波数成分を含む符号化開口が必要とな る.一方で,合焦距離から離れていくためにぼけが強くな り,PSFは拡大されていくので低い周波数成分を含みやす くなる.つまり,撮影距離が離れていくにつれて,2次元 コードは高周波に推移していくが,PSFは低周波に推移し ていく.上記にある撮影対象とPSFにおける周波数の推 移のギャップを考えると,いずれの撮影距離において透か しの抽出に適した符号化開口を設計することは難しい.

そこで、本研究は複数の撮影距離における透かしの抽出 率を最大化するような最適化について試みる.単一の符号 化開口のパターンに複数の周波数成分を含み、合焦距離か らのずれ具合に応じて適切な周波数帯が現れるようなパ ターンを実現することができれば透かしを抽出できる被写 界深度を拡大できると考える.

3.2 処理手順

提案する方式の処理手順を図3に示す.提案する方式の 基本的な処理手順はGAに基づく最適化であり,解候補 (個体)を評価する際にシミュレーションを行う.まず初期 化の段階で多数の解候補(開口パターン)をランダムに生 成する.以後,シミュレーションによる解候補の評価と, シミュレーションによって得られる解候補の評価値(適応 度)に基づく新たな解候補の生成とを繰り返すことで最適 化を行う.シミュレーションの詳細については3.4節に, GAにおける解候補の表現および目的関数についてはそれ ぞれ3.5節および3.6節に示す.





3.3 撮影対象とする電子透かし

本研究では、2次元コードをカバー画像とし、Haar を基 底関数とする離散ウェーブレット変換(Discrete Wavelet Transformation:DWT)を用いて高周波成分に埋め込まれ た電子透かし [20], [21], [22] を対象とする.先行研究 [20] では、カバー画像にDWT を適用することにより得られる 画像の垂直方向(LH),水平方向(HL),対角方向(HH) の組み合わせに電子透かしを埋め込む.図4に、カバー画 像と透かし画像および垂直方向の第1および第2高周波成 分(LH1およびLH2)に透かしを埋め込んだ際の透かし入 り画像を示す.

3.4 電子透かしの撮影及び抽出シミュレーション

一般的に,撮影画像 Y' は以下の式によって表現される.

$$Y' = Y \otimes PSF + N \tag{1}$$

ここで, Y, Y' は原画像および疑似撮影画像を示し, ⊗ は 畳み込み積分を示す. N はノイズを表し,本研究では輝度





(a) カバー画像 (b) 透かし画像 (c) 透かし入りカバー画像

図 4: カバー画像と透かし画像および透かし入り画像.





図 5: 設計変数 Fig. 5 Design variables in GA.

値のガウシアンノイズを付与する. *PSF* はぼけカーネル を表す.理想的な環境下であれば符号化絞りの形状自体を 撮影画像に生じる *PSF* として用いることができるが,実 際には光学系由来の歪みなどによって完全に対応しない.

このため本論文では、シミュレーションのモデルを以下 のように定義する.

$$Y' = D(PSF) \otimes Y + N \tag{2}$$

 $D(\cdot)$ は光学系によって生じる,符号化絞り形状と PSF の 非線形な応答を表し,本研究では Free Form Deformation (FFD)によって表現する.本研究では,事前に校正を行 うことで $D(\cdot)$ を得るものとし,能動絞りカメラに 3×3 の 格子状のパターンを投影して,符号化開口の歪み量を取得 する. N のノイズレベルは $\sigma = 0.0002$ とする.

3.5 設計変数

本論文では,先行研究[11]と同様に開口形状を11×11の 2次元パターンとする.図5で示すように光の遮断,透過 をそれぞれ0,1で表すことで,符号化開口の設計を11×11 次元の組み合わせ最適化問題として表現する.シミュレー ションにより実環境を再現することの困難さや,適応度に ノイズが付与される点が最適化を困難にしている.

3.6 目的関数

本研究の目的関数は,撮影画像からの電子透かしの抽出率 とする.電子透かしの抽出率を Bit Correct Ratio (BCR) により表現し,目的関数を以下のように定義する.

$$f(I) = \frac{1}{|D|} \sum_{d \in D} BCR(W, W_d^{cap})$$
(3)

ここで, I は解候補, W は透かし画像の原本, $W^{cap}(d)$ は 距離 d で撮影された画像 $Y^{cap}(d)$ から抽出した透かし画像 である. 複数の撮影距離で透かし抽出を行い, その抽出率 の平均を目的関数とすることで, 広範囲で透かしを抽出で きる符号化開口の実現を目指す.

BCR は下記の式で算出する.

$$BCR(W, W') = 1 - \frac{\sum_{w=1}^{w_W} \sum_{h=1}^{h_W} \left(W_{w,h} \oplus W'_{w,h} \right)}{w_W h_W}$$
(4)

ここで、 $W_{w,h}$, $W'_{w,h}$ は、埋め込んだ透かし画像および抽出した透かし画像の (w,h) 座標に位置する画素の値である. $h_W \times w_W$ は透かし画像のサイズを表し、 \oplus は排他的論理和である.

一般的に絞りを設置すると光量が低下する.そこで,撮 影画像の信号対雑音比 (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形状を生成するよう制約を 設ける.すなわち,開口セルの割合が 50%未満の個体は, 制約を満たすまで全ての遺伝子をランダムに再度設計を 行う.

GA の世代交代モデルとして Simple GA (SGA) を用い る. SGA には初期収束問題があるため,適応度シェアリン グ [23] により解の多様性の維持を図る. すなわち,解候補 *I* の近傍に他の解候補が存在し,かつ,*I* が近傍内で最良 の解候補でない場合は*I* の適応度を下げる.

 $f_{sh}(I) = \begin{cases} \frac{1}{|S_{I_{sim}}| - T_{S_{sim}} + 1} & \text{if } I \text{ is not the best} \\ \text{and } |S_{I_{sim}}| > T_{S_{sim}} \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases}$ (5)

ここで, $S_{I_{sim}}$ はIの近傍の解候補からなる集合であり, T_{sh} は近傍を表す半径を示す. $|S_{I_{sim}}|$ は $S_{I_{sim}}$ に含まれる 解候補の総数を表し, $T_{S_{sim}}$ は近傍内に存在を許される解 候補の個数を規定するパラメータである.

3.7 能動絞りカメラ

能動絞りカメラは絞りの交換に一切の物理的な操作が必 要なく,画像をカメラにアップロードするだけの電子的な 操作のみで行えるため,効率的な実機実験が可能となる. また,異なる絞り形状を用いて撮影を行う場合であっても, 使用する絞り形状以外の条件を全く同じに揃えることが できる.本論文で使用する能動絞りカメラは,反射型液晶 ディスプレイ素子 (Liquid Crystal on Silicon: LCoS)を絞 りとして用いる.透過型液晶ディスプレイ (Liquid Crystal Display: LCD)を用いる方式と比較すると,LCD では透 過する液晶素子間に駆動回路があるために生じてしまう光 の回折の影響を緩和できる利点がある.

本研究で実際に構築した環境を図6に示す. 能動絞りカメ ラのイメージセンサには Point Grey の CCD センサ (1/3" CCD, 1384×1036pixels, 30 fps), 主レンズには TAMRON 8mm F/1.8 C マウントレンズをそれぞれ用いた. 撮影対象 である電子透かし入り 2 次元コードは,携帯電話 (SHARP ISW16SH :720 × 1200 pixels S-CG Silicon LCD 4.6 inch) に表示し, 偏光の影響を受けない角度で携帯電話を設置し 実験を行った.



図 6: 実機評価実験の様子. Fig. 6 Experimental environment.

4. 評価実験

4.1 実験の概要

提案する手法を用いて,電子透かし抽出用の符号化開口 の設計を試みた.次に,設計された符号化開口の有効性を 実機環境で評価した.設計された符号化開口と,一般的な 円形絞り開口,ぼけ除去用に設計された Zhou 開口 [11] の 3 種類の開口で実機評価による比較を行った.このとき, 円形開口と Zhou 開口に関してはぼけ除去を行った後に透 かし抽出を行う場合と,ぼけ除去を行わずに透かし抽出を 行う場合との性能差についても検討を行った.

4.2 符号化開口形状の最適化

第 3.1 節で述べた通り、単一の撮影距離から透かし抽出 率の最大化を行っても他の撮影距離からの透かし抽出には 有効でない可能性が高いことから、複数の撮影距離からの 透かし抽出率の最大化を行った.合焦距離をレンズ前面か ら 50mm に設定し撮影距離 70mm と 80mm および 90mm の 3 箇所における透かしの抽出率の平均を最大化する符号 化開口を GA で設計することで、透かし抽出における被写 界深度拡大を試みた.GA における交叉および突然変異は それぞれ 2 次元の 2 点交叉 [24] およびビット反転を用い た.個体数、世代数の上限、交叉率、突然変異率はそれぞ れ、100、600、0.97、0.01 とした.シミュレーションにお ける撮影ノイズの強度は $\sigma = 0.0002$ とした.

図7に集団内の最良解の適応度および3箇所の撮影距離 における透かし抽出率の推移を示す.ごく短期間の変化に 着目した際に,評価値が改悪方向に変化することがあるよ うに見えるが,これはシミュレーションにノイズの要素を 含むため,同じ解候補でも適応度は計算するたびに変化す ることが原因である.図7より,シミュレーションにおけ る透かしの抽出率が,70mm,80mm.90mm いずれの撮 影距離においても0.7を超える良好な解が作成されている ことがわかる.





4.3 実機評価における開口の評価

4.2 節で得られた符号化開口を実機環境にての性能評価 を行うために,能動絞りカメラを用いて透かしの抽出を試 みた.提案手法で生成された符号化開口は,4.2 で得られ た最適解を用いることとし,円形開口,および Zhou 開口 と比較を行った.また,それらの開口を用いて撮影し後に デコンボリューションを行うことで焦点ぼけの除去を行 う方式 (Circ_d, Zhou_d) との比較も行った.なお,デコンボ リューションフィルタとしてリチャードソン・ルーシー法 を利用する [25], [26].上記の手法と比較を行うことで,提 案手法により設計された透かし抽出に特化した符号化開口 と,ぼけ除去の符号化開口を透かし抽出に応用する方式と の比較を行った.

図 8 に合焦距離である 50mm から 60mm 離した 110mm までの各撮影距離における透かし抽出率の変化を示す.図 8 より,4.2 節で設計した開口形状は撮影距離 94mm まで 透かし抽出率 0.65 以上を保っている.一方で,円形開口や Zhou の開口による撮影画像からの透かし抽出は,デコン ボリューションによるぼけ除去を行った場合においても, 撮影距離 80mm 付近で BCR が 0.55 以下まで減少してい る.図9に撮影距離 90mm における実験結果を示す.図9 より,提案開口は撮影画像に焦点ぼけが発生した場合にお いても透かし情報である垂直方向高周波成分が維持されて いることが確認できる.

図 10 に撮影距離 80mm および 90mm における電子透か しの空間周波数成分 (a) と提案開口 (b) および Zhou 開口 (c)を使って得られる PSF のパワースペクトル,それらの パワースペクトルを1次元 (垂直方向高周波) に落とし込 んだグラフ (d) を示す.ここで図 10(a) および (d) より, 透かし情報は垂直方向高周波に2つのピークを持つことが わかる.提案開口で撮影した PSF は撮影距離 80mm およ び 90mm いずれにおいても透かし情報のピーク付近におい てゼロ交差を持たないことから、透かし情報が維持された ことの裏付けとなる.一方で、Zhou らが提案した開口で 撮影した PSF は, 撮影距離 80mm において透かし情報の ピーク付近にゼロ交差を含んでいるため、透かし情報が破 壊されてしまう.しかし,撮影距離 90mm では透かし情報 のピークと Zhou らの開口のゼロ交差地点の間にずれが生 じたため、撮影距離80mmよりも透かし抽出率が上昇した と考えられる.

4.4 処理時間

提案手法と Zhoud で BCR 算出までの処理時間の比較を 行った. Zhoud において, アプリケーション化を考慮した 際に,撮影距離は未知であることからデコンボリューショ ンに最適なカーネルのスケールは未知である. 加えてケラ レや口径食の影響からカーネルの形状が変化する可能性を 考慮すると,最適なカーネルを推定することは難しい. そ のため本研究ではデコンボリューションフィルタにルー シー・リチャードソン法を用いる [25][26].

提案手法および Zhou_d において各撮影距離における透か し抽出までにかかった時間を図 11 に示す.カーネルのス ケールは開口形状の解像度と同じ 11 × 11 とし,最尤推定 にかける反復試行回数を 30 とした.図 11 より提案手法は Zhou_d と比較して平均して 30 倍早く透かしの抽出率を算 出できる.これはデコンボリューションによるぼけ除去処 理を必要としないからである.2次元コードの利点である 認証の迅速さを損なう観点からデコンボリューションによ るぼけ除去画像からの透かし抽出する方式を採用すること は難しい.

5. まとめ

本研究では、ぼけを含む撮影画像から電子透かしの抽出 を可能にする符号化開口の設計手法を提案した.カメラか ら被写体までの距離が変化すると、ぼけとスケールの変化 の間で、要求される周波数帯の変化が一致しないために、



図 9: 実機環境における各手法の比較 (撮影距離 90mm). Fig. 9 Comparison result on real environment(Depth 90mm).



ワースペクトル

スペクトルを1次元 (垂直 方向高周波) に落としたグ ラフ

図 10: 電子透かしの空間周波数成分と各開口で撮影された PSF のパワースペクトラムに基づく比較. (上段)撮影距離 80mm (下段) 撮影距離 90mm

> Fig. 10 Comparison based on the spatial frequency. (Top) depth 80mm. (Bottom) depth 90mm.

ペクトル

異なる撮影距離で有効な符号化開口を設計することは難し いが,提案手法は3箇所の撮影距離で符号化開口の評価を 行うことで、深い被写界深度を実現する符号化開口パター ンの設計を可能とする.

実験により、通常の円形開口やぼけ除去用の符号化開口 では焦点ぼけにより透かし情報が消失してしまうような状



図 11: BCR 算出までにかかる処理時間の比較.

Fig. 11 Comparison of processing time for BCR calculation.

況であっても,提案方式により作成した符号化開口を用い ることで焦点ぼけを含む撮影画像から透かしを抽出できる ことを確認した.

今後,電子透かし設計問題と符号化開口形状設計問題に 対して共進化型アルゴリズムを適応させることで,より被 写界深度の深い電子透かし抽出方法を確立することを目 指す.

参考文献

- The Global Language of Business. Gs1 general specifications, 2016.
- [2] International Organization for Standardization. Information technology – Automatic identification and data capture techniques – QR Code bar code symbology specification, 2015.
- [3] Ari Juels. RFID security and privacy: A research survey. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 24, No. 2, pp. 381–394, 2006.
- [4] Mikko Lehtonen, Florian Michahelles, and Elgar Fleisch. How to detect cloned tags in a reliable way from incomplete RFID traces. In *IEEE International Conference* on *RFID*, pp. 257-264, 2009.
- [5] G Edward Suh and Srinivas Devadas. Physical unclonable functions for device authentication and secret key generation. In *Proceedings of the 44th annual Design Automation Conference*, pp. 9–14, 2007.
- [6] Leonid Bolotnyy and Gabriel Robins. Physically unclonable function-based security and privacy in rfid systems. In Fifth Annual IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications, pp. 211-220, 2007.
- [7] Vidyasagar M Potdar, Song Han, and Elizabeth Chang. A survey of digital image watermarking techniques. In 3rd IEEE International Conference on Industrial Informatics, pp. 709-716, 2005.
- [8] Abbas Cheddad, Joan Condell, Kevin Curran, and Paul Mc Kevitt. Digital image steganography: Survey and analysis of current methods. *Signal processing*, Vol. 90, No. 3, pp. 727-752, 2010.
- [9] Eugene T Lin, Christine I Podilchuk, and Edward J Delp III. Detection of image alterations using semifragile watermarks. In *Electronic Imaging*, pp. 152–163. International Society for Optics and Photonics, 2000.
- [10] David E. Goldberg. Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning. Addison Wesley, Reading, 1989.
- [11] Changyin Zhou and Shree Nayar. What are good aper-

tures for defocus deblurring? In *IEEE International* Conference on Computational Photography (ICCP), pp. 1–8. IEEE, 2009.

- [12] Anat Levin, Rob Fergus, Frédo Durand, and William T Freeman. Image and depth from a conventional camera with a coded aperture. ACM Transactions on Graphics (TOG), Vol. 26, No. 3, p. 70, 2007.
- [13] Changyin Zhou, Stephen Lin, and Shree Nayar. Coded aperture pairs for depth from defocus. In *IEEE 12th International Conference on Computer Vision*, pp. 325– 332, 2009.
- [14] Ashok Veeraraghavan, Ramesh Raskar, Amit Agrawal, Ankit Mohan, and Jack Tumblin. Dappled photography: Mask enhanced cameras for heterodyned light fields and coded aperture refocusing. ACM Trans. Graph., Vol. 26, No. 3, p. 69, 2007.
- [15] Stephen R Gottesman and EE Fenimore. New family of binary arrays for coded aperture imaging. *Applied* optics, Vol. 28, No. 20, pp. 4344–4352, 1989.
- [16] 長原一ほか. 符号化撮像. 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. 2010, No. 14, pp. 1–9, 2010.
- [17] Ramesh Raskar, Amit Agrawal, and Jack Tumblin. Coded exposure photography: motion deblurring using fluttered shutter. ACM Transactions on Graphics (TOG), Vol. 25, No. 3, pp. 795–804, 2006.
- [18] Ren Ng, Marc Levoy, Mathieu Brédif, Gene Duval, Mark Horowitz, and Pat Hanrahan. Light field photography with a hand-held plenoptic camera. *Computer Science Technical Report CSTR*, Vol. 2, No. 11, pp. 1–11, 2005.
- [19] S. McCloskey and B. Miller. Fast, high dynamic range light field processing for pattern recognition. In 2016 IEEE International Conference on Computational Photography (ICCP), pp. 1-10, May 2016.
- [20] 前原武、中居謙太郎、池田亮、谷口康太郎、小野智司.進 化型多目的最適化を用いた 2 次元コード真贋判定用電子 透かしの設計.電子情報通信学会論文誌 D, Vol. J98-D, No. 5, pp. 835–846, 2015.
- [21] D. Kundurf and D. Hatzinakos. Digital watermarking using multiresolution wavelet decomposition. In Acoustics, Speech and Signal Processing, 1998. Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on, Vol. 5, pp. 2969 -2972 vol.5, may 1998.
- [22] Deepa Kundur and Dimitrios Hatzinakos. Digital watermarking for telltale tamper proofing and authentication. *Proceedings of the IEEE*, Vol. 87, No. 7, pp. 1167–1180, 1999.
- [23] Jeffrey Horn, Nicholas Nafpliotis, and David E Goldberg. A niched pareto genetic algorithm for multiobjective optimization. In IEEE World Congress on Computational Intelligence., Proceedings of the First IEEE Conference on Evolutionary Computation, pp. 82–87, 1994.
- [24] Hiroshi Kawasaki, Yuki Horita, Hitoshi Masuyama, Satoshi Ono, Makoto Kimura, and Yasuo Takane. Optimized aperture for estimating depth from projector's defocus. In *Third Joint 3DIM/3DPVT Conference*, pp. 135–142, 2013.
- [25] William Hadley Richardson. Bayesian-based iterative method of image restoration. JOSA, Vol. 62, No. 1, pp. 55-59, 1972.
- [26] Leon B Lucy. An iterative technique for the rectification of observed distributions. *The astronomical journal*, Vol. 79, p. 745, 1974.