The 32nd Annual Conference of the Japanese Society for Artificial Intelligence, 2018

2次元コード用電子透かしと符号化開口の共進化的同時設計に関する基礎検討

A Preliminary Study on Coevolutionary Simultaneous Design of Digital Watermark for Two-dimensional Codes and Coded Aperture

竹下 真悟 *1 Shingo Takeshita　濱崎 弘樹 *1 Hiroki Hamasaki　前原 武 *1 Takeru Maehara　中居 謙太郎 *1 Kentaro Nakai　園田 聡葵 *2 Toshiki Sonoda　三鴨 道弘 *1 Michihiro Mikamo
川崎 洋 *2 Hiroshi Kawasaki　長原 一 *3 Hajime Nagahara　小野 智司 *1 Satoshi Ono

*1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 of Science and Engineering, Kagoshima University

*2九州大学大学院 システム情報科学研究院 情報知能工学専攻
Department of Advanced Information Technology, Graduate School of Information Science and Electrical Engineering, Kyushu University

*3大阪大学データビリティフロンティア機構
Institute for Datability Science, Osaka University

In recent years, authentication using two-dimensional codes has become widespread. However, it is easy to duplicate two-dimensional code, and inappropriate duplication of 2D codes is apprehended. Therefore, a method of detecting duplication by embedding a digital watermark in a two-dimensional code has been proposed. However, when the watermark is embedded in high-frequency components of a cover image, the watermark components may be lost due to photographing. A coded aperture is a technique that maintains frequency components included in the captured image. In this research, we propose a simultaneous design method of a digital watermark and a coded aperture, which allows extracting watermark with wide photographing depth range and rotation. Experimental results show that the proposed aperture could extract watermarks from blurred images regardless of with or without deconvolution.

1. はじめに

近年，航空機の搭乗券やオンライン決済の認証手段として2次元コードが普及している．特に，2次元コードをスマートフォンの画面に表示して認証を行う手法は，利便性と共にペーパレス化が図れるため一般的になっている．しかしながら，2次元コードは悪意ある複製や偽造によって，容易に複製が可能という問題がある．図1のようなスマートフォンのカメラを用いた撮影を用いた撮影でも複製が可能である．このような複製は2次元コードを用いた決済が普及するなかで，より深刻な問題を引き起こすことが懸念される．本研究では図1のように，スマートフォンの画面に表示した2次元コードをほかのスマートフォンのカメラで撮影する行為を不正な複製とする．

一方，電子透かしは著作権の保護，画像の修正や変更を検出するために広く用いられている．電子透かしは頑健，脆弱，半脆弱の大きく3つに分類することができ，半脆弱な電子透かしは特定の処理を受けた場合にのみ破壊される特徴がある [Rey 02]．2次元コードに半脆弱な電子透かしを埋め込むことで，上記のような複製を検知する手法が提案されている [前原 15]．正規の2次元コードからは透かしを抽出できるが，複製が行われた2次元コードでは透かしが破壊されるため透かしが抽出されず，真贋判定が可能である．上記方式の電子透かしは離散ウェーブレット変換（DWT）[Vahedi 12] を用いて画像の高周波成分に透かしを埋め込む方式である．しかし，原本の電子透かしの抽出の撮影において焦点ボケが発生すると画像の高周波成分を失うこととなり安定的に抽出を行えない問題がある．

連絡先: 竹下真悟，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，〒 890-0065 鹿児島市郡元 1-21-40，sc113035@ibe.kagoshima-u.ac.jp

図 1: スマートフォンのカメラを用いた不正な複製

また近年，画像処理によって画像を生成することを前提とした撮影手法のコンピュテーショナルフォトグラフィ技術が注目されている．その代表的な技術の一つである符号化開口は，カメラの絞りの形状を2次元のマスクパターンに変更する技術で，撮影画像に含まれる周波数成分を制御する特徴を持つ．

本研究では，抽出における問題の解決策として抽出用カメラに符号化開口を用いる．先行研究では特定の電子透かしに対して有効な符号化開口の進化的設計を単一進化の条件で行った [濱崎 17]．しかし，この手法では解析を容易にするために単純な透かしを用いていた．複数の条件で安定的な電子透かしの抽出を行うための最適な電子透かしと符号化開口の組み合わせは未知である．このため，本研究では電子透かしの設計と符号化開口の設計を進化型最適化を用いて同時に行う方式を提案する．電子透かしと符号化開口を同時に設計することで，広い撮影距離や撮影角度で透かしの抽出が行えることが期待される．実験により，従来のシステムに比べ安定的な透かしの抽出を行えるような電子透かし及び符号開口の設計が行われたことを示す．

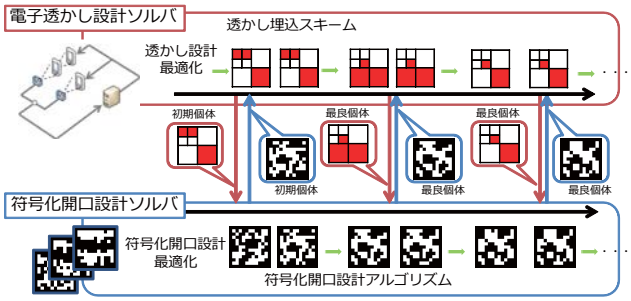


図 2: 提案する共進化的同時設計方式

2. 関連研究

電子透かしはデジタルデータに対し秘匿情報を埋め込む技術であり，著作権保護，画像の修正や改ざん検出などに広く利用されている．Vahedi らはカラー画像を対象とし遺伝的アルゴリズム（GA）を用いて，DWT を用いて得られた周波数帯への埋め込む強度を自動的に設計する方式を提案した [Vahedi 12]．Mingzhi らは，遺伝的アルゴリズムを用いて，DWT と離散コサイン変換により得られる周波数帯に対し電子透かしを埋め込む際の強度を自動的に決定する方式を提案している [Mingzhi 13]．

符号化開口はカメラの絞りを 2 次元のマスクパターンで符号化する技術であり，ボケ除去，超解像，全焦点画像生成等に利用されている．Zhou らはボケ除去用の符号化開口を GA を用いて設計する方式を提案した [Zhou 09]．符号化開口を用いた手法は逆畳み込み演算を後処理として含んでいる．Zhou らの手法は，深さごとに推定されたカーネルでの 1 回の逆畳み込み演算で動作する．しかしこれらの方法は不安定であり，人手による援助が必要となることがある [Zhou 09]．

3. 提案手法

本研究は電子透かしと符号化開口の同時設計手法を提案する．本章では提案する方式の詳細について述べる．

3.1 協調型共進化アルゴリズム

本方式は電子透かし設計問題および符号化開口設計問題の同時最適化を実現するために協調型共進化アルゴリズムを用いる．図 2 に本方式の模式図を示す．本方式では各ソルバで設計された部分解をそれぞれのソルバに伝達し，伝達された解を用いて最適化を行う．すなわち，電子透かし設計ソルバは，符号化開口設計ソルバにより設計された符号化開口を用いて電子透かしの評価を行い，符号化開口設計ソルバでは，電子透かし設計ソルバにより設計された電子透かしを用いて符号化開口の評価を行う．

3.2 電子透かしの設計

提案手法の電子透かしと符号化開口の設計の処理手順を図 3 に示す．提案手法は GA に基づいており，解候補を評価する際はシミュレーションにより透かしの抽出性能を評価する．シミュレーションに撮影を再現し，解候補の評価値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．GA における解候補の表現および目的関数については 3.2 節に，シミュレーションの詳細については 3.4 節に示す．

提案方式の電子透かしの設計は，[前原 15] の方式を参考に透かしを埋め込む領域ごとの周波数帯の選択と，埋め込み強度の調整とを同時に実行する．図 4 に透かしを埋め込む対象となる 2 次元コードの例を示す．提案方式は周波数解析方式とし

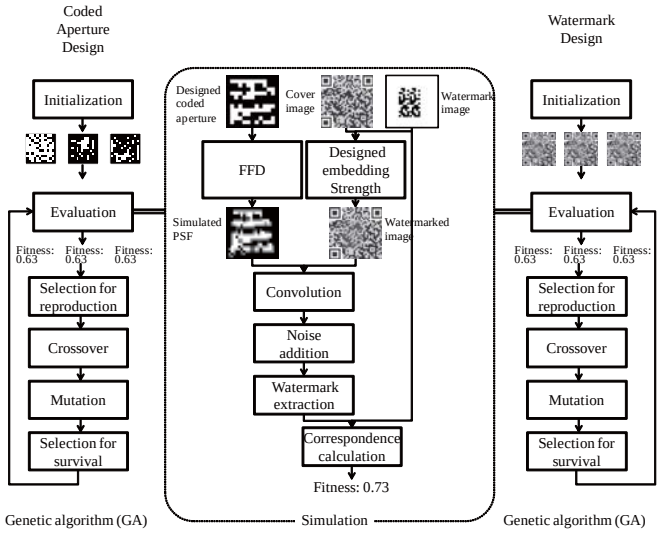


図 3: 提案する方式の処理手順

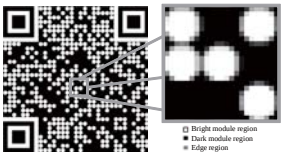


図 4: 2 次元コードの領域

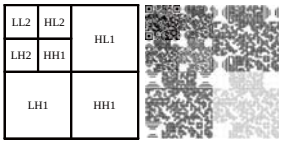


図 5: DWT で得る周波数帯

て Haar 関数を基底とする 2 段階の DWT を用いる．また，カバー画像となる 2 次元コードの輝度値に応じ，暗モジュール領域 D，明モジュール領域 B，および，エッジ領域 E の 3 つの領域に分割し，領域毎に異なる周波数帯に透かしを埋め込むこととする．図 5 にカバー画像に対して 2 段階の DWT を適用することで得られる 7 つの周波数帯 {HH1, HL1, LH1, HH2, HL2, LH2, LL2} を示す．提案方式では得られた周波数帯の埋め込み強度を，カバー画像の領域毎に決定する．設計変数の個数は画像領域と周波数帯の組み合わせの合計 21 個となる．

画像領域 r，周波数帯 b に対応する設計変数は $v_{r,b}$ と表し，0 から 1 までの実数値をとる．解候補 $\boldsymbol{v}$ は，$v_{r,b}$ を各要素として持つ 21 次元のベクトルとして表現される．提案方式では $v_{r,b}$ の値が 0.5 を上回る場合にのみ，該当領域に強度 $L_{r,b}$ で透かしの埋め込みを行う．

$$L_{r,b} = \begin{cases} 2 \times (v_{r,b} - 0.5) \times L_{max} & \text{if } v_{r,b} > 0.5 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \tag{1}$$

$v_{r,b}$ が 0.5 を下回る場合は透かしを埋め込まない．また，L_{max} は透かしを埋め込む際の最大強度を示している．透かしの埋め込みの有無を判断する閾値を 0.5 とする理由は，設計変数が初期集団生成や突然変異などでランダムな値を取った場合に，透かし埋め込みの有無を 50 %の確率で決定するためである．

本研究の目的関数は，撮影画像からの透かしの抽出率とする．透かしの抽出率を画素単位の一致率（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．

$$f(I) = \sum_{d \in S_d} \sum_{a \in S_a} \mathrm{BCR}(W, W_{d,a}^{\mathrm{cap}}) \tag{2}$$

ここで，I は解候補，W は透かし画像の原本，$W_{d,a}^{cap}$ は a 度回転された透かし入り 2 次元コードを距離 d で撮影した画像

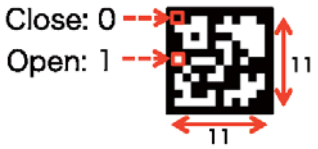


図 6: 符号化開口設計における設計変数

(a) カバー 2 次元コード　(b) 透かし画像

図 7: 実験に用いた 2 次元コードと透かし画像

$Y_{d,a}^{cap}$ から抽出した透かし画像である．BCR は下記の式で算出する．

$$\mathrm{BCR}(W, W') = 1 - \frac{\sum_{w=1}^{w_W} \sum_{h=1}^{h_W} \left(W_{w,h} \oplus W'_{w,h}\right)}{w_W h_W} \quad (3)$$

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．w_W，h_W は透かし画像の幅および高さ（画素数）を表し，$\oplus$ は排他的論理和である．

3.3 符号化開口の設計

符号化開口の設計は [濱崎 17] を参考に行う．開口形状を 11×11 の 2 次元パターンとする．図 6 に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．符号化開口設計の目的関数は 3.2 節と同様である．

3.4 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．

$$Y' = Y \otimes PSF + N \quad (4)$$

ここで，Y，Y' は原画像および疑似撮影画像を示し，$\otimes$ は畳み込み積分を示す．N はノイズを表し，本研究では輝度値のガウシアンノイズを付与する．PSF はボケカーネルを表す．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．

$$Y' = D(PSF) \otimes Y + N \quad (5)$$

ここで $D(\cdot)$ 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）[Sederberg 86] 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．

4. 評価実験

4.1 透かしの埋め込み強度と符号化開口の同時設計

提案手法を用いて電子透かしと電子透かし用符号化開口の形状の設計を試みた．本研究では，複数の深度（S_d）および回転角度（S_a）の組み合わせの条件下で撮影を行い BCR の平均値を最大化することで，撮影時の距離と角度の変化に頑健な透かしと符号化開口の設計を試みる．今回の実験で（S_d,S_a）の評価の対象は $\{(70, -30), (80, -30), (90, -30), (80, 0), (70, 30), (80, 30), (90, 30)\}$．の合計 7 組とした．図 7 に実験に用いたカバー 2 次元コードおよび透かし画像を示す．最適化に用いた GA はそれぞれ [前原 15, 濱崎 17] を参考とし，透かし設計では，交叉および突然変異はそれぞれ blend crossover（BLX-α）[Eshelman 93] および Uniform Mutation 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，100，600，0.5，0.05 とした．符号化開口設計では，交叉および突然変異はそれぞれ 2 次元の 2 点交叉 [Kawasaki 13] 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．シミュレーションでは，ノイズレベル σ と透かし強度 α をそれぞれ 0.0002 および 192 に設定した．変形モデル $D(\cdot)$ は深度 80mm において生成することとした．

(a) 設計された透かし　(b) 設計された符号化開口

図 8: 提案手法で設計した解

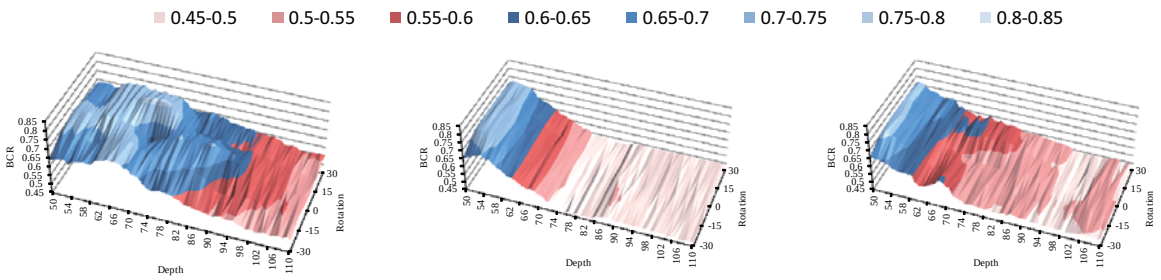
(a) Prop　(b) Circ　(c) Zhou

図 9: 提案手法と比較対象の符号化開口.

図 8 に設計された解を示す．図 8(a) に示す透かしは，カバー画像の 3 つの領域すべてで HH1 成分と HH2 成分に透かしが埋め込まれた．符号化開口は図 8(b) に示す形状が設計され，埋め込まれた透かしの成分に似た形状をしていることが確認できる．

4.2 設計された解の実機を用いた事後評価

提案手法で得られた開口形状（Prop）についての事後評価を行い，一般的な円形開口 (Circ)，ボケ除去のための符号化開口 (Zhou)[Zhou 09] と比較した．比較を行った開口の形状を図 9 に示す．このとき，Circ と Zhou に関しては，ブラインド逆畳み込み [Richardson 72] を行った後に透かし抽出を行う場合 ($\mathrm{Circ_d}$ と $\mathrm{Zhou_d}$) と比較した．上記の事後評価においては，符号化開口を用いた撮影を能動絞りカメラ [Nagahara 10] を用いて行った．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，効率的な実機環境実験が可能となる．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



(a) Prop (b) $\mathrm{Circ_d}$ (c) $\mathrm{Zhou_d}$

図 10: 提案手法と比較対象の事後評価の結果.

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.

また，撮影対象となる 2 次元コードは偏向による影響が生じないようにスマートフォンのスクリーンに表示し，電動ステージを使用して撮影距離を調整した．合焦距離を 50mm とし，カメラのレンズから 50mm と 110mm の間の距離を 1mm の間隔で移動させながら撮影を行い，各開口による透かしの抽出率を評価した．この比較では，最適化で使用されたものとは異なる 3 つの透かし画像を使用し，平均 BCR を求めた．

図 10 に事後評価の結果を示す．提案された透かしと符号化開口の組み合わせでは，BCR が 0.6 以上の透かしを ±30 度の回転内で 85mm の深さまで抽出することができる一方で，$\mathrm{Zhou_d}$ および $\mathrm{Circ_d}$ の開口ではそれぞれ 62mm および 61mm までであった．これは被写界深度を 11 から 12mm だったものを 35mm まで拡大することに成功したことを示している．また，提案手法の組み合わせは後処理デコンボリューションを必要としないため，200.4 m s 程度で透かしの抽出を行うことができ，これはデコンボリューションを用いる手法に比べて約 30 倍速く真贋判定を実行できる利点がある．

5. まとめ

本研究では，再撮，ボケ，スケールの 3 つの要素の変化に対して頑健な電子透かしを実現することを目指し，電子透かしの埋め込み方法と透かし抽出用符号化開口の共進化による同時設計方式を提案した．実験により，通常の開口やボケ除去用の符号化開口では焦点ボケにより透かし情報が消失してしまうような状況であっても，提案方式により作成した透かしと符号化開口を用いることで焦点ボケ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，協調型共進化の解の交換方法や評価方法を変更することで，より安定的な真贋判定に寄与する透かしと符号化開口の設計を試みる．

謝辞

本研究の一部は，科学研究費補助金（課題番号：15H02758）の支援を受けて実施した．ここに記して感謝の意を表する．

参考文献

[Eshelman 93] Eshelman, L. J.: Chapter real-coded genetic algorithms and interval-schemata, Foundations of genetic algorithms, Vol. 2, pp. 187–202 (1993)

[Kawasaki 13] Kawasaki, H., Horita, Y., Masuyama, H., Ono, S., Kimura, M., and Takane, Y.: Optimized aperture for estimating depth from projector's defocus, in Int'l Conf 3D Vision-3DV, pp. 135–142 (2013)

[Mingzhi 13] Mingzhi, C., Yan, L., Yajian, Z., and Min, L.: A combined dwt and dct watermarking scheme optimized using genetic algorithm, J.multimedia, Vol. 8, No. 3, pp. 299–305 (2013)

[Nagahara 10] Nagahara, H., Zhou, C., Watanabe, T., Ishiguro, H., and Nayar, S. K.: Programmable aperture camera using LCoS, in Computer Vision–ECCV 2010, pp. 337–350, (2010)

[Rey 02] Rey, C. and Dugelay, J.-L.: A survey of watermarking algorithms for image authentication, EURASIP J. on Advances in Signal Processing, Vol. 2002, No. 6, p. 218932 (2002)

[Richardson 72] Richardson, W. H.: Bayesian-based iterative method of image restoration, JOSA, Vol. 62, No. 1, pp. 55–59 (1972)

[Sederberg 86] Sederberg, T. W. and Parry, S. R.: Free-form Deformation of Solid Geometric Models, SIGGRAPH Comput. Graph., Vol. 20, No. 4, pp. 151–160 (1986)

[Vahedi 12] Vahedi, E., Zoroofi, R., and Shiva, M.: Toward a new wavelet-based watermarking approach for color images using bio-inspired optimization principles, Digital Signal Processing, Vol. 22, No. 1, pp. 153–162 (2012)

[Zhou 09] Zhou, C. and Nayar, S.: What are good apertures for defocus deblurring?, in Int'l Conf Computational Photography (ICCP), pp. 1–8 (2009)

[前原 15] 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, 信学論 D, Vol. 98, No. 5, pp. 835–846 (2015)

[濱崎 17] 濱崎弘樹, 中居謙太郎, 竹下真悟, 前原武, 園田聡葵, 三鴨道弘, 川崎洋, 長原一, 小野智司：電子透かしの抽出を目的とした符号化開口の設計に関する実験的検討, 信学技報 (マルチメディア情報ハイディング・エンリッチメント), Vol. 117, No. 282, pp. 1–6 (2017)