

光学シミュレーションと進化型多目的最適化に基づく 2次元コード真贋判定用電子透かしの設計

竹下 真悟^{1,a)} 前原 武¹ 神薗 誠¹ 小野 智司^{1,b)}

受付日 2018年2月1日, 再受付日 2018年3月24日,
採録日 2018年4月17日

概要: 2次元コードは近年, オンライン決済や航空券の搭乗券など認証に利用される機会が増えている. 一方で, カメラなどで撮影を行うことで容易に複製されてしまうため, 悪用が懸念されている. このため, スマートフォンのカメラで複製された2次元コードに半脆弱な電子透かしを用いて検知する手法が提案されている. 上記の従来手法は, 半脆弱な電子透かしを最適化によって設計するが, 最適化の最中に実際の機器を用いて電子透かしの評価を行うため, 検証を行う機種数を n とした場合に, 各機種 $2n$ 台ずつ, 合計で $2n^2$ 台の実機が必要であった. 本論文では, 上記の手法において実機を用いた電子透かしの評価を, 光学シミュレーションで代替する手法を提案する. 提案手法では, 対応する機種の総数によらず, 必要な実機の台数は各機種 2 台, 合計で $2n$ 台のみでよい. また, 事前のキャリブレーションの際にのみ実機を必要とし, 最適化を行う際は実機が不要であり, 処理の並列化が可能となる. さらに, 従来手法では, 機種数 n と同じ数の目的関数を必要としていたが, 提案手法はロバスト最適化の概念を導入し, 機種数によらず 2 目的の最適化問題として定式化する. 実験により, 提案手法が従来手法と同等の品質の電子透かしを, より短時間で設計できることを示す.

キーワード: 半脆弱な電子透かし, 進化型多目的最適化, 光学シミュレーション, 2次元コード, 複製検知, 離散ウェーブレット変換, スマートフォン

Digital Watermark Design for Replication Detection of Two-dimensional Barcodes Based on Optical Simulation and Evolutionary Multi-objective Optimization

SHINGO TAKESHITA^{1,a)} TAKERU MAEHARA¹ MAKOTO KAMIZONO¹ SATOSHI ONO^{1,b)}

Received: February 1, 2018, Revised: March 24, 2018,
Accepted: April 17, 2018

Abstract: In recent years, opportunities to use two-dimensional (2D) code for authentication such as online payment and airplane boarding pass have been increasing. However, because it is easily duplicated by photographing, it is concerned that duplicated 2D code are used illegally or improperly. For this reason, a method of detecting 2D codes duplicated by smartphone cameras using a semi-fragile digital watermark has been proposed. Because this method optimizes a watermarking scheme with evaluating semi-fragileness using actual smartphone devices, it requires $2n^2$ devices if the number of models to be verified is n . Therefore, this paper proposes a watermark design method using optical simulation. In the proposed method, the evaluation processes with actual devices in the previous work are altered into optical simulation. The proposed method requires using actual smartphone devices only for calibration and does not need them during optimization, resulting in allowing parallel processing for optimization. In addition, the number of devices required for optimization is reduced from $2n^2$ to $2n$. Furthermore, by introducing a concept of robust optimization, the proposed method models the watermark design problem as bi-objective optimization regardless the number of smartphone models, whereas the previous method requires n objective functions. Experimental results have shown that the proposed method reduced the processing time for designing a watermarking scheme for 2D codes while keeping appropriateness of semi-fragileness of the designed watermarking scheme.

Keywords: semi-fragile digital watermark, evolutionary multi-objective optimization, optical simulation, 2D-code, detect replication, discrete wavelet transformation, smartphone

1. まえがき

近年、航空機の搭乗券やイベントの入場券、オンライン決済など、認証における2次元コードの利用が拡大している。またスマートフォンの普及にともない、スマートフォンの画面に2次元コードを表示し、2次元コードリーダにかざす形で利用する形態は、ペーパーレス化が図れるとともに利便性の良さから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複製が可能である。図1のようなスマートフォンのカメラを用いた撮影でも容易に複製が可能である。このような複製は、2次元コードによる決済が普及することで、より深刻な問題を引き起こすことが懸念される。

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3種類に分類される。本論文では、特定の処理を受けた場合、すなわち、デコーダによる1回の撮影に対しては頑健であるが、スマートフォンのカメラによる複製を含む2回以上の撮影により破壊される電子透かしを半脆弱な電子透かしと呼び、脆弱な電子透かしと区別する。

著者らは半脆弱な電子透かしを2次元コードに埋め込むことで、上記のような不正な複製を検知する手法を提案した[1]。この手法において、正規の2次元コードからは透かしが抽出されるが、複製を行うことで電子透かしが破壊されるため、複製された2次元コードからは透かしが抽出されず、真贋判定が可能となる。このような半脆弱な電子透かしを実現するために、この手法では進化型多目的最適化を用いて2次元コード用の半脆弱な電子透かしを自動的に設計する。しかし、最適化の最中に、スマートフォンの実機を用いて解候補の評価を行うため、長時間連続で実機を使用する必要があった。また、 n 機種種のスマートフォンの間で行われるすべての複製を検知する電子透かしを設計する場合は、 $2n^2$ 台の実機を必要とする点にも問題があった。

本研究では、進化型多目的最適化による電子透かしの設

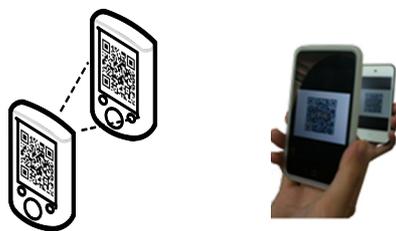


図1 スマートフォンのカメラを用いた不正な複製

Fig. 1 Improper replication of 2D codes using smartphones.

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, Kagoshima 890-0065, Japan

a) sc113035@ibe.kagoshima-u.ac.jp

b) ono@ibe.kagoshima-u.ac.jp

計を行う際に、シミュレーションで解候補の評価を行う手法を提案する*1。提案手法は、最適化を行う前のキャリブレーションの段階で、スマートフォンのスクリーンとカメラの組合せにおける光学伝達関数、および干渉によって生じるパターン、カメラのノイズを取得する。最適化の最中に解候補を評価する際は、キャリブレーションにより取得した要素を用いることで、デコーダによる撮影やスマートフォンのカメラによる複製を仮想的に行い、解候補である透かしの半脆弱性を評価する。これにより、スマートフォンの実機は事前のシミュレーション構築の際にのみ必要となり最適化の最中は実機が不要となり、処理の並列化が可能となる。また、複数のスマートフォンに共通して利用できる透かしを設計する場合に必要な実機の台数も、対象とする機種種の総数にかかわらず、各機種2台のみ、合計で $2n$ 台用意すればよい。さらに、従来手法では透かし設計問題を n 目的の多目的最適化問題として定式化していたが、提案手法ではロバスト最適化[3]、[4]の概念を導入することで、機種数によらず2目的の最適化問題としてモデル化する。実験により実機を用いて評価を行う場合と同等の性能を持つ透かしを提案手法によって設計できることを示す。

2. 関連研究

2.1 光学シミュレーション

近年、デジタルカメラによる撮影をシミュレーションにより再現する研究は広く行われている。Farrellらは、撮影対象のシーンの光源やレンズに入射する光子、センサの色に対する応答などを厳密にモデル化するシミュレータを提案している[5]。提案された方式はデジタルカメラの設計および性能評価が目的である。Chenらは、Farrellらのシミュレータを拡張し、センサに入射する光の混線により生じる影響を再現するなどして、より厳密なシミュレータの構築を行った[6]。

カメラのセンサノイズをモデル化する研究が広く行われている。センサノイズはフォトン・エレクトロンショットノイズや暗電流ショットノイズ、読み出しノイズ、固定化パターンノイズに分類できることが知られている[7]。上記ノイズはポアソン分布や正規分布に従って発生すると仮定されるため、対象とするカメラの撮影画像から分散推定することで、近似ができる。Healeyらは複数回撮影を行うことでノイズの分散を求める方式を提案している[8]。

2.2 半脆弱な電子透かし

半脆弱な透かしは頑健な透かしと脆弱な透かしの両方の特性をあわせ持つ透かしで、著作権保護や特定の攻撃の検出に用いられる。半脆弱な透かしは特定の処理、たとえ

*1 本研究の途中経過報告にあたる文献[2]とは、目的関数の定義、および、評価実験において実機を用いた最適化を行う従来手法[1]と比較を行う点が異なる。

ば、JPEG 圧縮などの非可逆圧縮などには頑健性を示す一方で、ぼかしや、トリミング、low-pass フィルタなどの攻撃に対しては脆弱で壊れやすい特徴を持つ。Wu らは不正に改竄された領域を検出可能かつ、JPEG 圧縮を許容する透かしの方法を提案している [9]。Maeno らは JPEG の非可逆圧縮を許容しつつ、オブジェクトクロッピングを含む様々な画像攻撃を検出する手法を提案した [10]。

2.3 電子透かしの進化型最適化による設計

最適化による電子透かしの設計に関する研究が広く行われている。Vahedi らはカラー画像を対象とし、電子透かしの離散ウェーブレット変換 (Discrete Wavelet Transformation: DWT) を用いて埋め込む方法を提案している [11]。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の埋め込む際の強度を自動的に決定する方法を提案している [12]。

2.4 進化型多目的最適化

複数の目的関数を有する多目的最適化問題は以下のように定義される。

$$\begin{aligned} \text{maximize } F(v) &= (f_1(v), f_2(v), \dots, f_m(v)) \\ v &\in \Omega \end{aligned} \quad (1)$$

ここで Ω は設計変数空間を表し、 v は設計変数空間上の 1 点、すなわち解候補に相当する。最適化の対象である $F(v)$ は、 m 個の目的関数 f_i からなる。式 (1) の f_i どうしがトレードオフの関係性にある場合、特定の目的関数の値が向上すると他の目的関数の値が悪くなってしまう。よって、多目的最適化では単一の最良解を求めることは困難であり、他の解より特定の目的関数において評価が上回っている非劣解の集合を求めることになる。

2.5 半脆弱な電子透かしの進化型最適化による設計

2.2 節の半脆弱な電子透かしの設計を、2.3 節と同様に、進化型最適化を用いた手法で行う研究が行われている。小野 らは印刷された 2 次元コードに対し、複写機を用いた複製の検出が可能な電子透かしの設計手法を提案した [13]。複写機の中間色の表現が斜めの成分を多く用いる特徴に着目し、電子透かしの DWT によって得られた高周波の斜め成分に埋め込むことで真贋判定が可能な透かしの設計を行った。上記の複製はデジタル画像を複写機でコピーするようなデジタル-アナログ変換を含むものである。同様にデジタル-アナログ変換を含む研究として、スマートフォンのスクリーンに表示した 2 次元コードを他のスマートフォンで撮影して複製したことを電子透かしを用いて検出する手法が前原らによって提案されている [1]。スクリーンに表示した透かし入りの画像をカメラで撮影を行った場合、撮影

画像に生じる変化はスクリーンとカメラの組合せごとに異なるため、組合せごとの特性に応じた電子透かしを設計する必要がある。著者らは複製を検知する対象となる機種別の組合せごとに実機を用意し、解候補となる電子透かしをスクリーンに表示し撮影を行うことで半脆弱性を評価した。

3. 提案手法

3.1 基本アイデア

本研究は以下の基本アイデアに基づき、電子透かしの設計を行う。

アイデア 1: 光学シミュレータによる解候補の評価

先行研究のように実際の機種を用いて解の評価を行う場合、複数のスマートフォンで利用できる透かしの設計では対応する機種数を n とすると、 $2n^2$ 台のスマートフォンの実機が必要となる。また有機 EL 方式のスクリーンでは、長時間の最適化によりスクリーンに残像が発生してしまう問題があった。

このため、提案手法では最適化における解候補の評価に光学シミュレーションを用いる。シミュレータを用いて 2 次元コードの撮影を再現し、再現した画像から透かしの半脆弱性を算出する。本研究における半脆弱な透かしは画像の高周波成分に対して埋め込まれるため、シミュレータは撮影によって画像の高周波成分に影響を与える現象の再現を重視する。なお、本手法において、シミュレータに含まれるパラメータを決定するために事前に撮影などを行う処理を校正と呼ぶ。

シミュレーションの導入により、利用するスマートフォンの実機に関する様々な制限を緩和することが可能となる。まず、必要な実機の台数を機種あたり $2n$ 台から 2 台に、合計は $2n^2$ 台から $2n$ 台に削減することができる。また、最適化の際には実機が不要となるため、上記の残像の問題を回避できる。さらに、最適化の最中に利用する必要がないことに加えて、校正を同時に行う必要もなく、機種ごとに異なる時期に異なる場所で校正を行ってもよい点も、実用上は利点となる。

アイデア 2: 多目的最適化問題として定式化

複数のスマートフォンで利用できる透かしを設計する場合、スマートフォンのスクリーンとカメラの組合せによって、半脆弱性を実現するための透かし埋め込みスキームがトレードオフの関係性にあることが予想される。このため提案手法では多目的最適化問題として定義し最適化を行う。これにより、複数のモデルの組合せにおいても有効な電子透かしを設計することができる。

提案手法では、透かし入り 2 次元コードを表示する機種とカメラにより複製を行う機種との組合せをすべて考慮して半脆弱な透かしの設計を行う。この場合、機種数を n とする場合に複製を行う機種別の組合せの総数が n^2 となり、機種別の組合せごとに目的関数を設ける場合 [14] は、目的関数

の総数が3を超える多数目的最適化問題となってしまう、良好な非劣解集合の発見が困難となる。このため、提案手法では、多目的最適化によりロバスト最適化を実現する方式 [3], [4] を参考に、各組合せにおける半脆弱性を評価した結果の平均を第1目的関数、その標準偏差を第2目的関数とする。これにより、対象とする機種の種類にかかわらず目的関数を2個に抑えることができ、目的関数の総数の増加による非劣解集合の収束性低下 [15] を避け、良好な半脆弱性を持った透かし埋め込みスキームの発見が期待できる。

3.2 定式化

本研究における、半脆弱な電子透かしの設計問題の定義を示す。設計変数について 3.2.1 項で述べ、目的関数について 3.2.2 項で述べる。

3.2.1 設計変数

提案手法は、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。提案手法は周波数解析方式として Haar 関数を基底とする2段階の DWT を用いる。図 2 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。本手法では、前原ら [1] の手法を参考に2色のみからなる2次元コードに対して平滑化およびダイナミックレンジの縮小の前処理を行うことで中間階調を持つ領域を生み出す。加えて、カバー画像となる2次元コードを、輝度値に応じて暗モジュール領域 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、領域ごとに異なる周波数帯に透かしを埋め込む。図 3 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。提案手法では得られた周波数帯の埋め

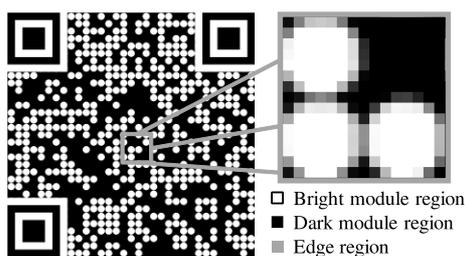


図 2 2次元コードの領域
Fig. 2 Cover 2D code image regions.

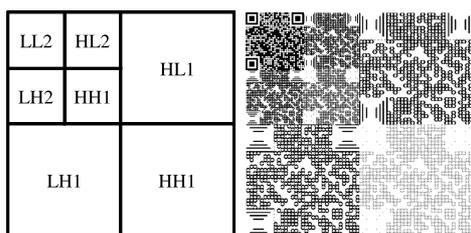


図 3 DWT で得られる周波数帯
Fig. 3 Frequency subbands obtained by DWT.

込み強度を、カバー画像の領域ごとに決定する。設計変数の個数は画像領域と周波数帯の組合せの合計 21 個となる。図 2 に示したカバー 2 次元コード画像は、多様な方向の周波数成分を含むよう、円形のモジュール形状に変更する。

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 \mathbf{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。提案手法では $v_{r,b}$ の値が 0.5 を上回る場合にのみ、該当領域の DWT 係数に強度 $L_{r,b}$ を加算することで透かしの埋め込みを行う。

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

$v_{r,b}$ 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とった場合に、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。

3.2.2 目的関数

提案手法はスマートフォンのスクリーンとカメラの組合せごとに半脆弱性を評価する。たとえば、2 機種スマートフォンによって複製された2次元コードを検出できる透かしを設計する場合、表示側と撮影側の機種は4通りとなる。

本研究では非優越ソートを用いる進化型多目的最適化アルゴリズムである NSGA-II [16] を用いる。NSGA-II は一般的な世代ベースのメタヒューリスティックな手法と同様に、解候補の生成と評価を繰り返すアルゴリズムであり、多目的最適化を行うため、単一の最適解ではなく非劣解集合を得ることができる。非劣解集合を解析することで、目的関数と設計変数の関係性などの知見が得られる可能性があり、提案手法では、各機種の特性と半脆弱性を実現するための透かしの特性とに関する知見の発見が期待される。しかし、NSGA-II は2目的または3目的の場合は良好な非劣解集合が得られるが、4目的以上の多数目的最適化問題において十分な探索性能が発揮できないことが示されている [17]。

このため、本手法では、多目的最適化によりロバスト最適化を行う方式 [3] を参考に、半脆弱な電子透かしの設計問題を2目的の多目的最適化問題として定義する。すなわち、ある埋め込みスキーム（解候補） \mathbf{v} に基づいて作成された透かしに対して、複製を行う際に2次元コードの表示に用いる機種 i と、撮影により複製を行う機種 j との組合せにおける透かしの半脆弱性の評価値を f_{ij} とし、 f_{ij} の平均値 $F_{ave}(\mathbf{v})$ と標準偏差 $F_{sd}(\mathbf{v})$ とを目的関数とする。

$$\begin{aligned} \text{maximize } F_{ave}(\mathbf{v}) &= \frac{1}{m^2} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m f_{ij}(\mathbf{v}) \\ \text{minimize } F_{sd}(\mathbf{v}) &= \sqrt{\frac{1}{m^2} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m (f_{ij}(\mathbf{v}) - F_{ave}(\mathbf{v}))^2} \end{aligned} \quad (3)$$

複製を行う際に2次元コードの表示に用いる機種と撮影により複製を行う機種との組合せにおける半脆弱性 f_{ij} は、機種 i に表示された原本の2次元コードからの透かしの抽出量と、機種 i に表示された2次元コードを機種 j のカメラによって撮影(複写)し、機種 j に表示された複写2次元コードから透かしを抽出した量との差分とする。

$$f_{ij}(\mathbf{v}) = BCR(W, W_i^{vld}) - BCR(W, W_j^{rpl}) - P(Y_i^{vld}) \quad (4)$$

ここで、 W は透かしの原画像を示しており、 W_i^{vld} 、 W_j^{rpl} は、機種 i に表示された原本の撮影画像 Y_i^{vld} および機種 j に表示された複製の撮影画像 Y_j^{rpl} から抽出された透かし画像を指す。抽出率の差分が大きいくほど、本物の透かしはデコーダのカメラを用いた撮影に頑健であり、スマートフォンのカメラを用いた複製に脆弱であることを意味する。BCR は下記の式で算出する。

$$BCR(W, W') = 1 - \frac{\sum_{w=1}^{w_W} \sum_{h=1}^{h_W} (W_{w,h} \oplus W'_{w,h})}{w_W h_W} \quad (5)$$

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。 $w_W \times h_W$ は透かし画像のサイズを表し、 \oplus は排他的論理和である。透かし画像を構成する明暗画素の総数が同数であると仮定すると、透かしを含まない画像におけるBCRの期待値は0.5となる。BCRの最大値は1.0であるため、後述するペナルティ関数 P を除外して考えると、最良の半脆弱性を有する透かし埋め込みスキームの f_{ij} の期待値は0.5となる。

また、提案手法の目的関数には、以下の式で定義されるペナルティ関数 P を導入する。

$$P(Y^{vld}) = ECR(Y^{vld}) \times P_{max} \quad (6)$$

ここで ECR は、カバー画像の2次元コードの復号を行う際に必要となるエラー訂正機能使用率 (error correction ratio: ECR) を表す ($0 \leq ECR(Y^{vld}) \leq 1$)。 ECR をペナルティとして導入することで、透かしの埋め込みによってカバー画像側の2次元コードの復号が困難になった際に、評価を下げるができる。また、 P_{max} はペナルティの最大値 (定数) を表す。

3.3 処理手順

提案手法による透かし設計の手順を図4に示す。提案手法はNSGA-IIを用いて透かし埋め込みスキームを設計する。

これは、解候補の評価の方式を除き、先行研究の手法と同様である[1]。先行研究では、図5に示すように、スマートフォン実機のスクリーンに解候補の透かしを埋め込んだ2次元コードを表示し、デコーダによる撮影やスマートフォンのカメラによる複製を行い、解候補の評価を行っていた。提案手法では、上記の実機を用いた処理を光学シミュレーションによって代替し、解候補の評価を行う点が先行研究と異なる。

提案手法における解候補の評価、すなわち式(4)による f_{ij} の計算は、以下の手順で行う。まず、注目する解候補(透かしの埋め込み方式) \mathbf{v} に基づき、透かし W を埋め込んだ2次元コードの画像(原本 Y) を生成する。次に、 Y を機種 i のスクリーン上に表示し、デコーダのカメラで撮影する処理を仮想的に行い、 Y^{vld} を得る。同様に、透かし入り2次元コードの複製を仮想的に生成する。すなわち、 Y を機種 i の画面に表示し、機種 j のカメラにより撮影する処理を仮

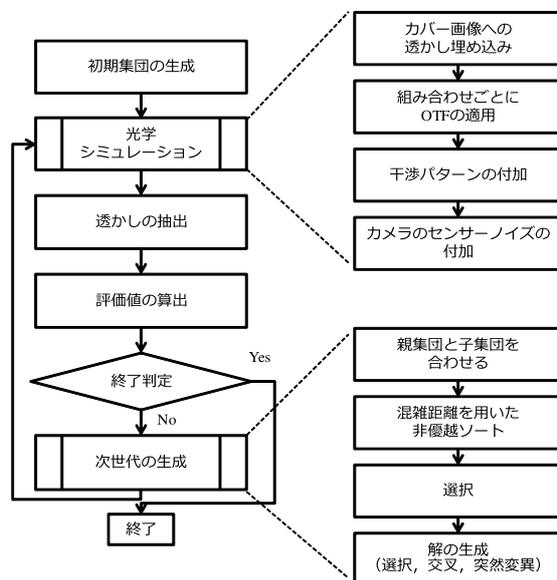


図4 提案手法の処理手順

Fig. 4 Process flow of the proposed method.

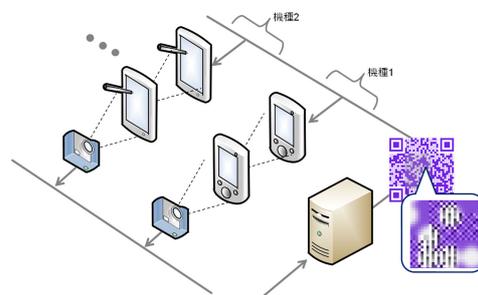


図5 解候補の評価におけるスマートフォンの利用(従来手法では実機を使用して撮影を行い、提案手法ではシミュレーションにより撮影を再現)

Fig. 5 Usage of actual smartphone devices for solution evaluation. The proposed method performs optical simulation to capture watermarked 2D code images, whereas previous method uses the actual devices.

想的に行い、複製された2次元コードを得る。複製された2次元コードを機種 j に表示し、デコーダのカメラで撮影する処理を仮想的に行い、 Y^{rpl} を得る。その後、 \mathbf{v} の透かし埋め込み強度に基づいて、 Y^{vld} および Y^{rpl} から透かし W^{vld} および W^{rpl} を抽出し、式 (4) より目的関数の値を算出する。上記の仮想的な撮影処理については、3.4 節で述べる。

3.4 シミュレーションによる撮影

3.4.1 概要

提案手法は、実機を用いて撮影を行う代わりにシミュレーションを行うことで、スマートフォンのスクリーンに表示された透かし入り2次元コードをデコーダで撮影した画像、および、スマートフォンのカメラで撮影（複製）された画像を再現する。提案手法では画像の高周波成分に対して透かしを埋め込むため、構築するシミュレーションは画像の高周波成分に影響を与える現象の再現を重視する。このため、カメラの光学伝達関数 (Optical Transfer Function: OTF)、カメラとスクリーンの干渉パターン、および、カメラのセンサノイズを、原画像に適用することで撮影画像の再現を行う。提案手法では、これら3要素を最適化に先立って校正処理として計測しておくことが必要となる。

提案手法における撮影のシミュレーションの処理手順を図 6 に示し、各処理を以下に示す。

- Step 1: (OTF の適用) 対象とするカメラのボケを再現するために、カメラの点広がり関数をカーネルとして撮影対象画像に対して畳み込みを行う。
- Step 2: (干渉パターンの付加) 対象画像の色ごとに求めた干渉パターンを対象画像に足し合わせる。
- Step 3: (カメラのセンサノイズの付加) 対象画像におけるカメラのセンサノイズを対象画像に足し合わせる。

以上のような撮影画像のシミュレーションは以下のように表すことができる。

$$S(B) = P(B) + I(B) + N(B) \quad (7)$$

ここで B は原本画像、 $S(B)$ は推定画像を示している。 $P(B)$ はカメラの OTF を適用した画像、 $I(B)$ は干渉パターン、 $N(B)$ はカメラのセンサノイズを示す。対象画像に上記の処理を行うことで透かし評価を目的とした撮影シ

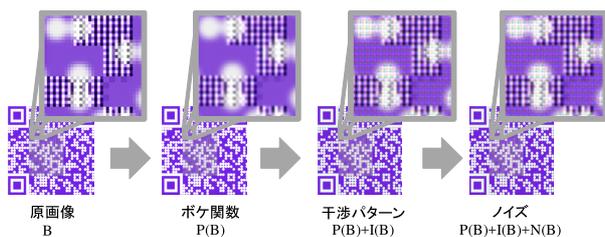


図 6 シミュレーションの流れ

Fig. 6 Process flow of the proposed optical simulation.

ミュレーションを行う。

3.4.2 ボケ関数

一般に、撮影によるボケは高周波成分を低周波に変化させてしまうため、透かしに対する影響が大きい。このため、本シミュレータでは、撮影によるボケを点広がり関数 (Point Spread Function: PSF) で表現する。対象となるスマートフォンのスクリーンに1画素のみ白色を表示し、ほかの画素に黒色を表示することで点光源と見なす。これをカメラで撮影することで PSF を取得できる。PSF はスクリーンとカメラの組合せごとに取得する。

3.4.3 干渉パターン

スマートフォンのスクリーンをデジタルカメラで撮影することにより周期的なパターン (干渉パターン) が発生する。このパターンは高周波であるため透かしの抽出に強い影響を与えることから、本シミュレーションにおいて考慮する必要がある。干渉パターンは色に依存するため、干渉パターン \mathcal{I} を以下のように色 col の干渉パターン $\mathcal{I}^{(col)}$ の集合として表し、原画像 B に含まれる色 col の領域ごとに $\mathcal{I}^{(col)}$ を適用する。

$$\mathcal{I}(B) = \{\mathcal{I}^{(col_1)}(B), \mathcal{I}^{(col_2)}(B), \dots, \mathcal{I}^{(col_{N_c})}(B)\} \quad (8)$$

ここで、 N_c は対象画像 B に含まれる色の総数である。

以下に色 col に対する干渉パターン $\mathcal{I}^{(col)}(B)$ の取得手順を示す。

- Step 1: (パターンの撮影) 取得したいパターンの色 col を対象のスクリーン全体に表示し、撮影を行うことで撮影画像 p を得る。
- Step 2: (平均画像作成) Step 1 で得られた撮影画像 p より、RGB チャンネルごとに平均輝度値 p_c を求める。
- Step 3: (パターンの取得) 撮影画像の各画素と p_c の差分を求めることで RGB チャンネルごとの干渉パターンを得る。

3.4.4 センサノイズ

カメラのセンサノイズは高周波なノイズであり、透かしの抽出に影響を与えるため、本シミュレータにおいて考慮する必要がある。センサノイズはフォトン・エレクトロンショットノイズや暗電流ショットノイズ、読み出しノイズ、固定化パターンノイズに分類できることが知られている [7]。上記ノイズはポアソン分布や正規分布に従って発生すると仮定されるため、対象とするカメラの撮影画像から分散推定することで、近似ができる。

提案手法は文献 [8] と同様の方式を用いてセンサノイズを推定し、再現を行う。座標 (w, h) における輝度値の期待値 $D(w, h)$ を以下のように表す。

$$D(w, h) = \{K(w, h)I(w, h) + N_{DC}(w, h)\} A + N(w, h) \quad (9)$$

ここで、 $K(w, h)$ は固定化パターンノイズ、 $I(w, h)$ は原画像 B の座標 (w, h) における輝度値、 $N_{DC}(w, h)$ は暗電流ショットノイズ、 A はゲイン、 $N(w, h)$ はフォトン・エレクトロンショットノイズ、読み出しノイズ、量子化ノイズを成分とするノイズを示す。 $N(w, h)$ は、平均 0、分散 σ_N^2 の正規分布に従うとすると $K(w, h)$ 、 $N_{DC}(w, h)$ 、 A 、 σ_N^2 を推定することで $D(w, h)$ を推定することが可能となる。

まず、 $N_{DC}(w, h)A$ は、無光源環境下 ($I(w, h) = 0$) で複数枚の画像を撮影することで推定が可能である。

次に、 $K(w, h)$ の推定は、 n_1 種類の異なる撮影対象をそれぞれ n_2 枚撮影することで行う。 n_1 種類の撮影対象に対して、 n_2 枚の画像より平均画像を求めることで $\{K(w, h)I(w, h)_i + N_{DC}(w, h)\}A$ の推定が可能となり、あらかじめ求めた $N_{DC}A$ を減算することで、 $K(w, h)$ は撮影対象に対する撮影画像の傾きとして表すことができる。このため、 n_1 から外れ値を除去したサンプル点 n'_1 を用いて、以下のように推定を行う。

$$\hat{K}(w, h) = \frac{1}{n'_1} \sum_{i=1}^{n'_1(w, h)} \frac{e_i(w, h)}{\bar{e}_i(w, h)} \quad (10)$$

ここで、 $e_i(w, h)$ は平均画像、 $\bar{e}_i(w, h)$ は平均化フィルタを適用して得られた画像を示す。

最後に、 A および σ_N^2 の推定手順を以下に示す。 $N(w, h)$ に含まれるノイズ成分のうち読み込みノイズと量子化ノイズを成分とするノイズ $N_C(w, h)$ の分散を σ_C^2 とすると、 σ_N^2 は以下のように表すことができる。

$$\sigma_N^2 = A\mu + \sigma_C^2 \quad (11)$$

ここで、 μ は $D(w, h)$ を構成する要素のうち、撮影条件および撮影対象が同一であれば一定となる成分を示す。 A および σ_N^2 を推定するため、 n_P 組の対となる画像 $D_1(w, h)$ 、 $D_2(w, h)$ を輝度値を変えながらスマートフォンに表示して撮影を繰り返す、以下の計算を行う。

$$\hat{\mu} = \frac{1}{2M} \sum_w \sum_h D_1(w, h) + \frac{1}{2M} \sum_w \sum_h D_2(w, h) \quad (12)$$

$$\hat{\sigma}_n^2 = \frac{1}{2(M-1)} \sum_w \sum_h (D_\delta(w, h) - \hat{\mu}_\delta) \quad (13)$$

ここで、 M は撮影画像の総画素数、 $D_\delta(w, h)$ は D_1 と D_2 の差分画像、 $\hat{\sigma}$ は D_σ の平均輝度値を表す。得られた n_P 組の $\hat{\mu}$ および $\hat{\sigma}_N^2$ に対して直線当てはめを行うことで A を推定する。

4. 評価実験

4.1 実験手法

提案する手法の有用性を示すために、2 機種種のスマートフォンによる複製を検知できる半脆弱な透かしの設計を試みた。

実験に用いたスマートフォンを以下に示す。

- D_1 : SHARP AQUOS PHONE ZETA SH-06E (4.8 インチ IGZO 画面 (1,920 × 1,080 画素), 1,300 万画素カメラ)

- D_2 : Galaxy J SC-02F (5.0 インチ AMOLED 画面 (1,920 × 1,080 画素), 1,300 万画素カメラ)

透かしの抽出に用いたカメラは以下のとおりである。

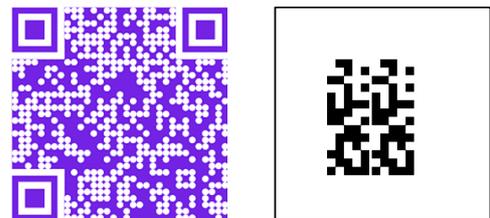
- CCD カメラ: Pointgrey FLEA3 FL3-U3-88S2C-C, 4,092 × 2,160 pixels

- レンズ: FUJIFILM DV3.4 × 3.8SA-1

本実験では、同一機種種のスマートフォンを 2 台用いて行う複製に加え、異機種間での複製 (たとえば、 D_1 のスクリーンに表示された透かし入り 2 次元コードを D_2 のカメラで撮影 (D_1-D_2)) についても検知できる透かしの設計を試みる。これにより、本実験で考慮するスマートフォンの組合せは 4 通りとなる。図 7 に本実験で用いたカバー 2 次元コードおよび透かし画像を示す。カバー 2 次元コードの型番は 4、誤り訂正レベルは H であり、2 次元コードの最大容量は英数字で 50 字となる。本実験では 22 文字の英数字を埋め込むこととした。カバー 2 次元コードの解像度は 256 × 256 とした。本実験では、図 7(b) に示す矩形モジュールからなる 2 次元コードを透かし画像として、図 7(a) に示すカバー 2 次元コードの中央やや左上の位置に埋め込むこととした。カバー 2 次元コードの円形モジュールの一辺のサイズを 7 または 8 画素、透かし画像の 2 次元コードを構成する矩形モジュールのサイズを 10 画素とした。これにより、1 組の透かし入り 2 次元コード画像の中に、両モジュールの間にずれが生じ、様々なパターンの組合せが含まれることとなる。

シミュレータにおけるパラメータは以下のように設定した。 n_1 、 n_2 、および N_c はそれぞれ 66、5、および 4 とした。 D_1 、 D_2 の撮影は、階調値を 0 から 250 まで 10 刻みで変更しながら撮影を行い、合計 26 組の画像を用いた ($n_P = 26$)。

最適化に用いたアルゴリズムは NSGA-II、交叉は blend crossover (BLX- α) [18]、突然変異は Uniform Mutation を用いた。また、先行研究 [1] を参考に、 α は 0.5 とし、突然



(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

Fig. 7 The cover 2D code image and the watermark image used in this study.

変異率は 0.05 とした。個体数は 100 とし、終了条件は世代数が 200 世代に達したときとした。また、 L_{max} は 192, P_{max} は 2 に設定した。

4.2 実験結果

4.2.1 シミュレータによる BCR 値の予測

提案するシミュレータによる BCR 値の予測の正確さの評価を行った。LH1, HL1, HH1 の 3 周波数帯にランダムな強度で透かしを埋め込んだ 2 次元コードを 130 通り作成し、実機を介して透かしを抽出する場合と、本シミュレータにより予測を行う場合とを比較した。図 8 に本シミュレータによる BCR の予測値と実測値との相関図を示す。BCR の予測値が 0.6 から 0.7 のあたりで誤差が大きくなるものの、相関係数は 0.972 であり、本シミュレータにより BCR の値を予測できることが分かる。

また、図 9 に、実撮影画像と本シミュレータによる予測画像、および、それらから透かしを抽出した結果を示す。図 9 より、明モジュール領域において干渉パターンが実撮影画像より高い、一部の暗モジュール領域において実撮影画像よりも透かしが多く抽出されているなどの違いはあるものの、おおむね類似する画像を再現できていることが分かる。

4.2.2 提案手法によって設計された透かし埋め込みスキーム

提案手法を用いて半脆弱な透かしの設計を行った結果

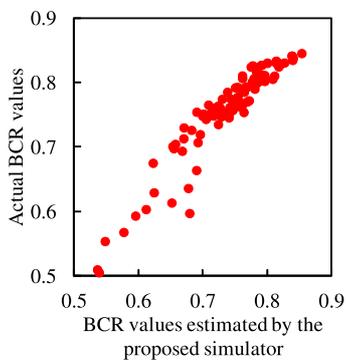


図 8 提案するシミュレータによる BCR 値の予測結果

Fig. 8 Estimation results of BCR values by the proposed simulator.

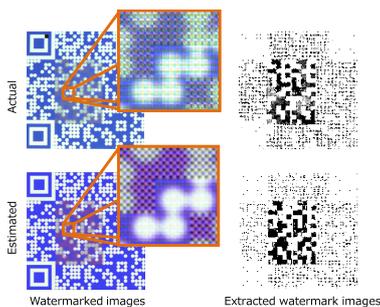


図 9 提案するシミュレータにより再現された画像の例

Fig. 9 Example images estimated by the proposed simulator.

得られた 5 試行分の非劣解を図 10 に示す。第 1 目的関数 F_{ave} を最大化し、第 2 目的関数 F_{sd} を最小化する問題であるため、図 10 に示す目的関数空間において、右下に位置する解ほどより望ましい解となる。5 回の試行に共通して目的関数空間上では類似した非劣解集合が得られた。図 10 に示す非劣解集合に、設計変数に着目した k-means 法を適用し、3 つのクラスターへ分割した*2。クラスタリングを行った結果を図 11 に示す。目的関数空間上で類似する非劣解であっても、設計変数空間上では異なるクラスターに分かれるような解集合が得られたことが分かる。

表 1 にクラスターごとの設計変数の平均値を示す。また、図 12 に各クラスターの重心に最も近い解を示す。図 12 の拡大図により、カバー 2 次元コードの各領域で、異なる周波

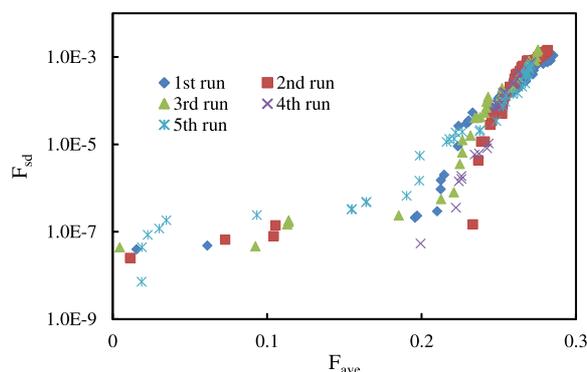


図 10 5 試行分の最終世代の非劣解集合

Fig. 10 The non-dominated solution set obtained by five independent runs.

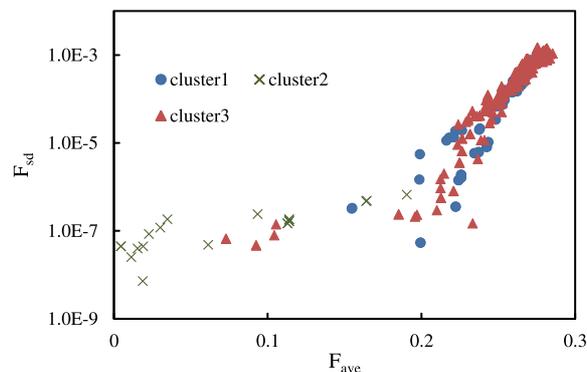


図 11 非劣解集合へのクラスタリング結果

Fig. 11 A clustering result of the non-dominated solutions.

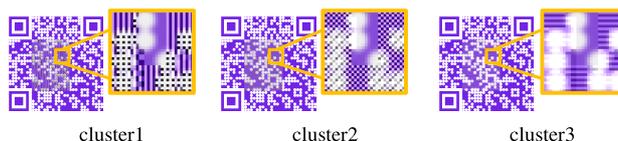


図 12 提案手法で設計された透かし

Fig. 12 Watermarking schemes designed by the proposed method.

*2 4 個以上のクラスターに分割した場合に設計変数の平均値が類似したクラスターが複数に分かれたため、本実験では 3 つのクラスターへ分割することとした。

表 1 クラスタごとの目的関数値と設計変数の値

Table 1 Objective function values and variable values for clusters.

Cluster	Objective function		Semi-fragileness for device combination				Averaged values of variables for frequency subbands and cover image regions														
							LH1			HL1			HH1			HL2			HH2		
	F_{ave}	F_{sd}	$f_{D_1D_1}$	$f_{D_2D_2}$	$f_{D_1D_2}$	$f_{D_2D_1}$	D	B	E	D	B	E	D	B	E	D	B	E	D	B	E
1	0.25	2.01×10^{-4}	0.28	0.24	0.25	0.24	0.11	0.75	0.31	0.87	0.09	0.98	0.29	0.89	0.42	0.26	0.12	0.74	0.05	0.47	0.75
2	0.25	4.05×10^{-4}	0.27	0.23	0.26	0.23	0.19	0.63	0.16	0.18	0.19	0.57	0.95	0.91	0.87	0.09	0.15	0.24	0.12	0.43	0.67
3	-0.02	6.54×10^{-8}	-0.02	-0.01	-0.02	-0.02	0.39	0.53	0.31	0.31	0.17	0.49	0.49	0.38	0.17	0.14	0.30	0.36	0.24	0.38	0.35

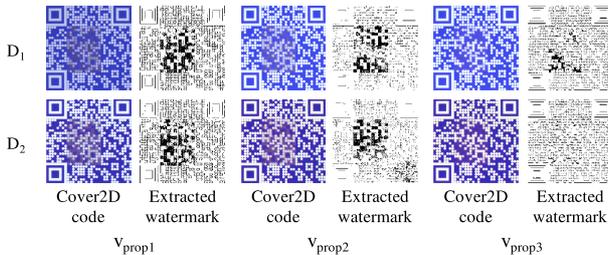


図 13 提案手法の原本撮影画像の透かし抽出結果

Fig. 13 Watermark extraction results from original 2D code images by the proposed method.

数帯に透かしが埋め込まれていることが確認できる. 図 12 および表 1 から, クラスタ 1 は様々な周波数帯を利用しつつ, 複製に用いる機器の組合せに依存しない全般的に高い半脆弱性を示す透かしが設計されていることが分かる. クラスタ 2 は HH1 成分を主としており, D_1 を用いた複製の検出に特に有効な透かしを設計していることが分かる. クラスタ 3 に含まれる非劣解は, 透かしを埋め込む周波数帯の共通性が低く, 設計変数の平均値が全体的に低かった.

4.2.3 実機を用いる従来手法との比較

次に, 実機を用いて設計を行う手法 [1] との比較を行った. 先行研究 [1] の評価実験で用いられた機種を利用することができなかったため, 文献 [19] で用いられた機種を用意し, 文献 [19] で設計された透かし埋め込みスキーム v_{prev} と比較を行うこととした*3. なお, v_{prev} が設計された際は, 実機の台数が不足していたために, 異機種間での複製を考慮していなかった.

提案手法によって発見された非劣解のうち, クラスタ 1, 2, 3 から選択された解 (図 12 に示す解) をそれぞれ v_{prop1} , v_{prop2} および v_{prop3} とする. v_{prop1} , v_{prop2} , v_{prop3} , および, v_{prev} に対して, 実機 D_1 , D_2 を用いた事後評価を行い, 透かしの半脆弱性を検証した. 選択された解を用いて透かしを埋め込んだ 2 次元コード (原本) を撮影した結果, および, 原本から透かしの抽出を行った結果を 図 13 に示す. また, 図 14 に, 複製された 2 次元コー

*3 なお, 文献 [19] は透かしの埋め込みスキームと抽出アルゴリズムを共進化型最適化により同時に設計する手法を提案した論文であるが, 本研究は実機を用いた評価をシミュレーションにより代替する点に主眼を置いているため, 文献 [19] において透かしの埋め込みスキームのみを最適化により設計した手法 (文献 [1] で提案されている手法に相当する) により設計された透かし埋め込みスキームを比較対象とした.

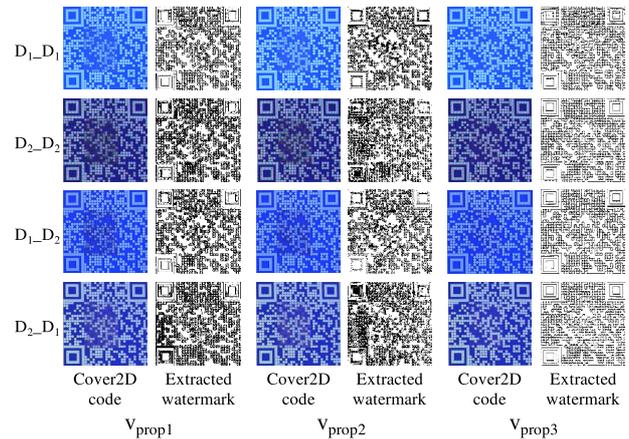


図 14 提案手法の複製撮影画像の透かし抽出結果

Fig. 14 Watermark extraction results from replicated 2D code images by the proposed method.

ドから透かしの抽出を行った結果を示す. 図 13, 図 14 の抽出結果の画像の中心部には埋め込まれた透かし画像 (図 7 (b)) を抽出した結果が示されている. 図 13 の抽出結果において, 図 7 (b) に類似する透かしパターンを視認できることから, v_{prop1} , v_{prop2} からは透かしが抽出されていることが分かる. 一方, v_{prop3} では, D_1 において一部のみ透かしが抽出されているが, D_2 においては透かしが抽出されていない. また, 図 14 のすべての組合せにおいても, 透かしが抽出されていないことが分かる. 次に, 半脆弱性の評価関数の値を確認すると, v_{prop1} , v_{prop2} および v_{prop3} の半脆弱性 ($f_{D_1D_1}$, $f_{D_2D_2}$, $f_{D_1D_2}$, $f_{D_2D_1}$) は, それぞれ, (0.26, 0.23, 0.26, 0.30), (0.19, 0.24, 0.21, 0.25), (0.07, 0.02, 0.09, 0.07) であった. 一方, v_{prev} の半脆弱性 ($f_{D_1D_1}$, $f_{D_2D_2}$) は (0.24, 0.17) であった. 以上のことから, クラスタ 3 の解を除外すると, クラスタ 1 および 2 の解 v_{prop1} および v_{prop2} は, v_{prev} と同程度かそれ以上の半脆弱性を実現しており, 提案手法が先行研究と同等以上の性能を持つ透かしを設計できることが分かった. 上記の半脆弱性の評価値は, 閾値処理による真贋判定 [1] を行えるレベルである.

4.2.4 目的関数の総数の削減による影響

最後に, 提案手法で新たに導入した目的関数の影響を, f_{DiDj} を目的関数として直接利用する方法 [14] と比較することで示す. 図 15 に提案手法を用いて透かしの設計を

行った際の適応度経過を、また、図 16 に文献 [14] の手法を用いて設計した適応度経過を示す。

なお、文献 [14] の手法は 4 目的最適化を行っているが、本手法との比較をしやすいようにするため、本手法の目的関数空間への写像をとった。提案手法は世代が進むに連れて平均値と標準偏差の値が改善され、特に、標準偏差の値が低く抑えられていることが分かる。これに対して、文献 [14] の手法は、最終世代においてもペナルティを受ける解が多いものの、多目的化 [20] により多様性を維持しており、 F_{ave} の高い良好な解を発見できていることが分かる。

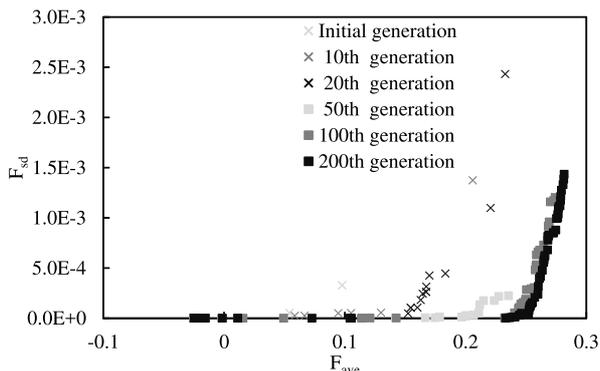


図 15 提案手法の適応度変化

Fig. 15 Fitness transition of the proposed method.

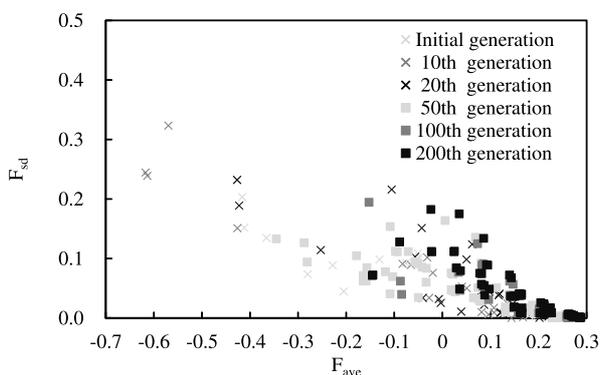


図 16 従来手法の適応度変化

Fig. 16 Fitness transition of the previous work.

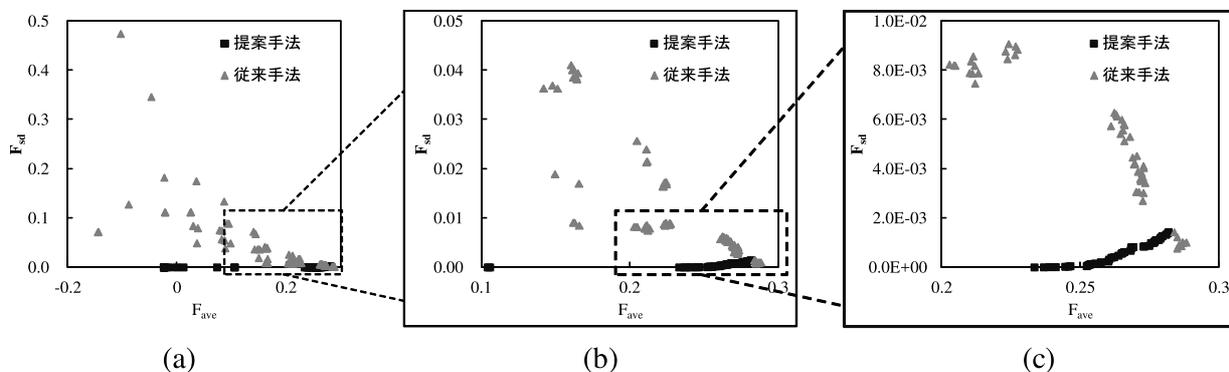


図 17 提案手法と従来手法の最終世代の非劣解集合の比較

Fig. 17 Comparison on non-dominated solution sets obtained by the previous and proposed methods.

提案手法および文献 [14] の手法によって得られた最終世代の非劣解を図 17 に示す。図 17(b) は、図 17(a) の右下の一部を拡大したグラフであり、さらに、図 17(b) の右下の一部を拡大したグラフが図 17(c) である。図より、文献 [14] の 4 目的の手法が F_{ave} および F_{sd} の両面で良好な解を生成できており、2 機種 (4 目的) を対象とした透かしであれば、文献 [14] のように、複製に用いる機種の組合せをそれぞれ目的関数とする方式でも、良好な透かしを設計できることが分かる。これに対して、提案手法は、目的関数を 2 目的に絞っているために文献 [14] と比較するとパレートフロントへの収束性で若干劣るものの、類似する性能を持つ解を発見できていることが分かる。また、機種数が増加する場合や、透かしの平均的な能力と機種への依存性との関連性についての知見を得る場合には、提案手法により目的関数を 2 目的に抑える効果が高まると考える。

4.3 考察

4.2.3 項の結果から、提案手法で従来手法 [1] と同等の透かしをシミュレーションをベースとした最適化で設計できることが分かった。最適化の最中に実機の利用が不要となったため、解候補の評価を並行的に行うことが可能となり、本実験では、最適化に要する時間が 40 時間から 8 時間へと短縮できることを確認した。今後、GPU を利用する実装へと変更することで、シミュレーションの速度はさらに向上すると考える。本実験では 2 機種のみを対象として実験を行ったが、対象とする機種数が増加するにつれて、実機に関する制約や処理速度の改善の影響は強まると考える。

また、提案手法における目的関数の総数の削減の効果については、本論文で行った 2 機種 4 目的の場合であれば、複製を行う機種ごとの半脆弱性を目的関数とする手法であっても良好な解を発見でき、提案手法はこれに近い性能を持つ解を発見できることを確認した。対象とする機種数が増加するにつれてその効果が高まると考える。

なお、現在の市場では膨大な種類のスマートフォンが販

売されているが、ディスプレイ形式は主に液晶と有機エレクトロルミネッセンスの2種類である点、また、カメラの撮像素子が相補型金属酸化膜半導体 (CMOS) が主流である点から、最適化の際に利用すべき機種数を絞ることができると考える。さらに、原本を表示する機種に応じた透かし埋め込みスキームを設計することにより*4、考慮すべき機種の組合せを絞ることが可能となる。

5. むすび

本論文では光学シミュレーションを用いて2次元コード用の半脆弱な電子透かしを設計する手法を提案した。提案する手法は、従来手法で実機を用いていた処理を光学シミュレーションにより代替することで、実機の利用に関する様々な制約を緩和することができる。また、従来手法では最適化の際に考慮する機種の数が増加するにつれて目的関数の個数が増加していたが、提案する手法は、機種ごとの半脆弱性の評価値の平均値と標準偏差を目的関数とすることで、機種数によらず2目的の最適化問題として定式化する。実験により、提案する手法が、実機を用いて設計された透かしと同等の半脆弱性を持つ電子透かしを、並列化された最適化により短い時間で設計できることを確認した。

今後、GPUの利用による処理時間の短縮と、より多くの機種を用いた際の検証が重要な課題であると考えられる。

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。

参考文献

- [1] 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.98, No.5, pp.835–846 (2015).
- [2] 竹下真悟, 前原 武, 神薗 誠, 小野智司: スマートフォンに表示される2次元コードを対象とした電子透かしのシミュレーションによる設計, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.117, No.282, pp.7–12 (2017).
- [3] Shimoyama, K., Oyama, A. and Fujii, K.: A new efficient and useful robust optimization approach—design for multi-objective six sigma, *The 2005 IEEE Congress on Evolutionary Computation*, Vol.1, pp.950–957, IEEE (2005).
- [4] Ono, S., Yoshitake, Y. and Nakayama, S.: Robust optimization using multi-objective particle swarm optimization, *Artificial Life and Robotics*, Vol.14, No.2, p.174 (2009).
- [5] Farrell, J., Xiao, F., et al.: A simulation tool for evaluating digital camera image quality, *Electronic Imaging 2004*, pp.124–131 (2003).
- [6] Chen, J., Venkataraman, K., et al.: Digital camera imaging system simulation, *IEEE Trans. Electron Devices*, Vol.56, No.11, pp.2496–2505 (2009).
- [7] Nakamura, J.: *Image sensors and signal processing for digital still cameras*, CRC press (2016).
- [8] Healey, G. and Kondepudy, R.: Radiometric CCD camera calibration and noise estimation, *IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol.16, No.3, pp.267–276 (1994).
- [9] Wu, X., Hu, J., Gu, Z. and Huang, J.: A secure semi-fragile watermarking for image authentication based on integer wavelet transform with parameters, *Proc. 2005 Australasian Workshop on Grid Computing and e-research-Volume 44*, pp.75–80, Australian Computer Society (2005).
- [10] Maeno, K., Sun, Q., Chang, S.-F. and Suto, M.: New semi-fragile image authentication watermarking techniques using random bias and nonuniform quantization, *IEEE Trans. Multimedia*, Vol.8, No.1, pp.32–45 (2006).
- [11] 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).
- [12] 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).
- [13] 小野智司, 津々見誠, 中山 茂: 電子透かしを用いたカラー二次元コードの複製検知, 電子情報通信学会論文誌 D, Vol.94, No.12, pp.1971–1974 (2011).
- [14] Takeshita, S., Maehara, T. and Ono, S.: Digital Watermark Design for Two-Dimensional Codes Displayed on Smart Phone Screen Using Multi-objective Optimization and Optical Simulation, *International Conference on Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking and Parallel/Distributed Computing*, pp.201–214, Springer (2017).
- [15] 佐藤寛之, 石淵久生: 進化型多数目的最適化の現状と課題, オペレーションズ・リサーチ: 経営の科学, Vol.62, No.3, pp.156–163 (2017).
- [16] Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S. and Meyarivan, T.: A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II, *IEEE Trans. Evolutionary Computation*, Vol.6, No.2, pp.182–197 (2002).
- [17] Khare, V., Yao, X. and Deb, K.: Performance scaling of multi-objective evolutionary algorithms, *EMO*, Vol.2632, pp.376–390, Springer (2003).
- [18] Eshelman, L.J. and Schaffer, J.D.: Real-coded genetic algorithms and interval-schemata, *Foundations of Genetic Algorithms*, Vol.2, pp.187–202 (1993).
- [19] Ono, S., Maehara, T. and Minami, K.: Coevolutionary Design of a Watermark Embedding Scheme and an Extraction Algorithm for Detecting Replicated Two-dimensional Barcodes, *Applied Soft Computing*, Vol.46, pp.991–1007 (online), DOI: 10.1016/j.asoc.2015.11.001 (2016).
- [20] Knowles, J.D., Watson, R.A. and Corne, D.W.: Reducing local optima in single-objective problems by multi-objectivization, *Evolutionary Multi-Criterion Optimization*, pp.269–283, Springer (2001).

*4 透かし入り2次元コードの表示に専用アプリを利用することで、機種に応じた半脆弱な透かしの利用が可能となる。



竹下 真悟

2017年鹿児島大学工学部情報生体システム工学科卒業。同年同大学大学院理工学研究科情報生体システム工学専攻入学。現在に至る。進化計算を用いた電子透かしの設計に関する研究に従事。進化計算とその応用に興味を

持つ。



前原 武

2014年鹿児島大学工学部情報生体システム工学科卒業。2016年同大学大学院理工学研究科情報生体システム工学専攻修了。同年株式会社VOYAGE GROUPに入社。在学中は、進化計算を用いた電子透かしの設計に関する

研究に従事。進化計算・機械学習、分散処理技術に興味を持つ。



神菌 誠

2016年鹿児島大学工学部情報生体システム工学科卒業。2018年同大学大学院理工学研究科情報生体システム工学専攻課程修了。在学中は、最適化アルゴリズムに興味を持ち、QRコードの生成や復号に関する研究に従事。



小野 智司 (正会員)

2002年筑波大学大学院工学研究科博士課程修了。2001年日本学術振興会特別研究員。2003年鹿児島大学工学部情報工学科助手。2010年同大学大学院理工学研究科情報生体システム工学専攻准教授。現在に至る。博士(工

学)。進化計算とその応用の研究に従事。2009年、2016年人工知能学会研究会優秀賞、2010年度人工知能学会全国大会優秀賞、芸術科学会論文誌論文賞、2013年情報処理学会山下記念研究賞、2015年情報処理学会シンポジウムインタラクシオン2015ベストペーパー賞等受賞。IEEE、電子情報通信学会、人工知能学会、進化計算学会等各会員。