

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 小野 智司^{1,b)}

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、カメラ等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次元コードを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、 $2n^2$ 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にて代替する手法を提案する。提案手法では、対応する機種数の総数によらず、必要な実機の台数は各機種2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。

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 Satoshi Ono^{1,b)}

1. まえがき

近年、航空機の搭乗券やイベントの入場券、オンライン決済等、認証における2次元コードの利用が拡大している。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。

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の自動的に設計している。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 機種間のスマートフォンで行われる全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計を行う際に、シミュレーションにて解候補の評価を行う手法を提案する。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、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る。また、対象とする機種数の総数に関わら

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

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

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

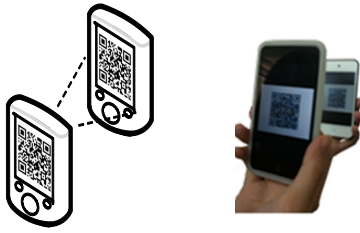


図1 スマートフォンのカメラを用いた不正な複製

ず、各機種2台のみ用意すればよい。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 [2], [3], の概念を導入し、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の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 [4]。カメラのセンサノイズをモデル化する研究も行われており、センサノイズは 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法を提案している [5]。

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併せ持つ透かしである。半脆弱な透かしは非可逆圧縮などには頑健性を示す一方で、ぼかしや、トリミング等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 [6]。

2.3 進化的多目的最適化

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。

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

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。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解の集合である、非劣解を求めることになる。

3. 提案手法

3.1 基本アイデア

提案手法の基本アイデアを以下に示す。

アイデア 1: 光学シミュレータによる解候補の評価

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、実機が $2n^2$ 台必要となる。

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。

アイデア 2: 多目的最適化問題として定式化

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。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 [2], [3] 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。

3.2 設計変数

提案方式は、透かしの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を同時に実行する。図2に透かしの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つの領域に分割する。図3にカバー画像に対して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。次元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。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。

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

また、 L_{max} は透かしの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。

3.3 目的関数

提案方式はスマートフォンのスクリーンとカメラの組

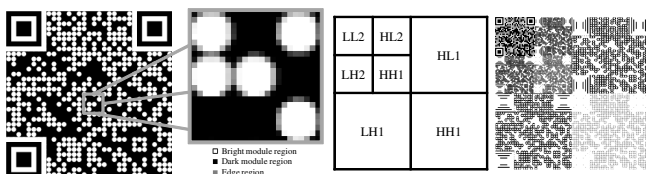


図2 2次元コードの領域

図3 DWTで得る周波数帯

み合わせごとに半脆弱性を評価する。例えば、2機種種の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種の組み合わせは4通りとなる。

本方式では、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。

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

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、*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(複製)し、*j*に表示された複製から透かしを抽出した量との差分とする。

$$f_i(\mathbf{v}) = BCR(W, W^{vld}) - BCR(W, W^{rpl}) - P(Y^{vld}) \quad (4)$$

ここで W^{vld} , W^{rpl} は、機種*i*に表示された原本の撮影画像 Y^{vld} および機種*j*に表示された複製の撮影画像 Y^{rpl} から抽出された透かし画像を指す。透かしの抽出率は、画素単位の一一致率(Bit Correct Ratio: BCR)により表し、BCRは下記の式で算出する。

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

$W_{w,h}$, $W'_{w,h}$ 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) 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。

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の導入で、透かしの埋め込みによる2次元コードの復号への影響を考慮する。また、 P_{max} はペナルティの最大値を表す。

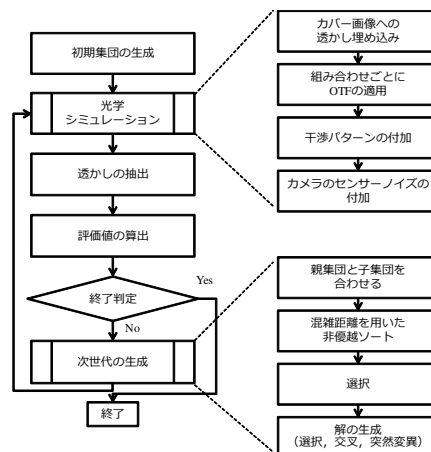


図4 提案手法の処理手順

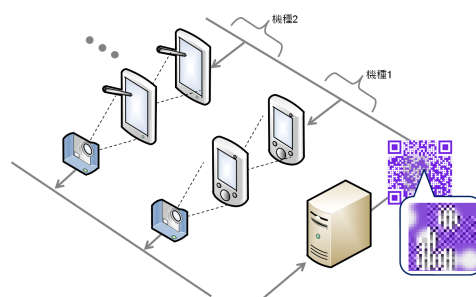


図5 解候補の評価におけるスマートフォンの利用(従来手法では実機を使用して撮影を行い、提案手法ではシミュレーションにより撮影を再現)

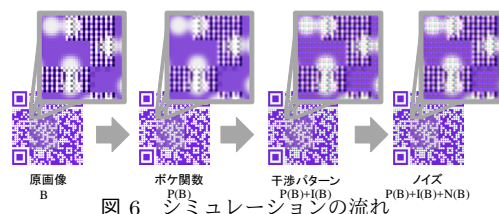


図6 シミュレーションの流れ

3.4 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。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、実機を用いて、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行う。

3.5 シミュレーションによる撮影

3.5.1 概要

提案手法は、シミュレーションを行うことで撮影(複製)された画像を再現する。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、カメラのセンサーノイズを、原画像に適用することで撮影画像の再現を行う。

提案方式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加算する。

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。

3.5.2 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。

3.5.3 干渉パターン

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。干渉パターンは色に依存するため、干渉パターン I を以下のように色 col の干渉パターン $I^{(col)}$ の集合として表し、対象画像 B に含まれる色 col の領域毎に $I^{(col)}$ を適用する。

$$I(B) = (I_1(B), I_2(B), \dots, I_{N_c}(B)) \quad (8)$$

N_c は対象画像 B に含まれる色の総数である。色 col に対する干渉パターン $I^{(col)(B)}$ 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) 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。

3.5.4 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が



(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

ら分散推定することで、近似ができる。

提案方式は [5] 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 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。

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

本実験で考慮するスマートフォンの組み合わせは 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。最適化に用いたアルゴリズムは NSGA-II、交叉は blend crossover (BLX- α) [8]、突然変異は Uniform Mutation を用いた。 α は 0.5 とし、突然変異率は 0.05 とした。個体数は 100 とし、世代数の上限を 200 世代とした。また、 L_{max} は 192、 P_{max} は 2 に設定した。

4.2 実験結果

4.2.1 提案手法によって設計された透かし埋込みスキーム
 提案手法を用いて半脆弱な透かしの設計を行った結果得

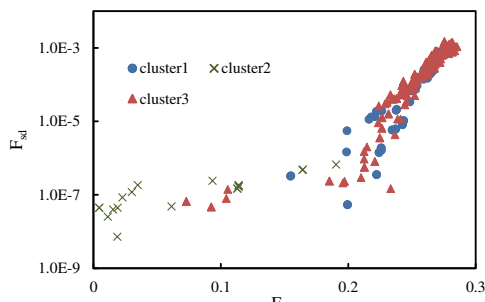


図 8 非劣解集合へのクラスタリング結果

られた 5 試行分の非劣解を，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結果を図 8 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ことがわかる．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 9 に各クラスターの重心にもっとも近い解を示す．クラスター 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み合わせに依存しない透かしが設計されている．クラスター 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わかる．クラスター 3 は標準偏差の値が非常に低くなっているが設計変数に共通性は低く，透かしが弱く埋め込まれ，原本からも複製からも抽出されないことで標準偏差を下げるような解が選択されていることが分かった．

4.2.2 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，[9] で用いられた機種を用意し，[9] で設計された透かし埋込みスキーム v_{prev} と比較を行うこととした*1．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，異機種間での複製を考慮しなかった．クラスター 1, 2, 3 から選択された解（図 9 に示す解）をそれぞれ v_{prop1} , v_{prop2} および v_{prop3} とし，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 10 に示す．また，図 11 に，複製された 2 次元コードから透かしの抽出を行った結果を示す． 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，クラスター 3 の解を除外すると，クラスター 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

*1 なお，[9] は透かしの埋込みスキームと抽出アルゴリズムと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，[9] において透かしの埋込みスキームのみを最適化により設計した手法 ([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込みスキームを比較対象とした．

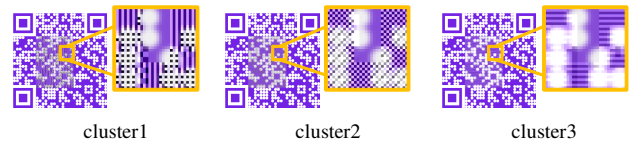


図 9 提案手法で設計された透かし

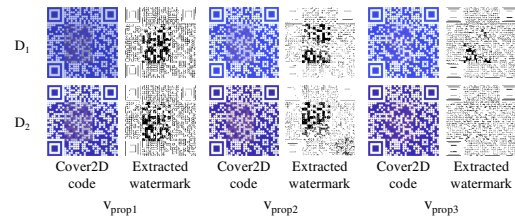


図 10 提案手法の原本撮影画像の透かし抽出結果

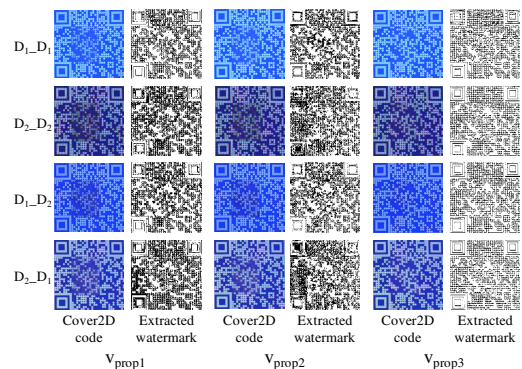


図 11 提案手法の複製撮影画像の透かし抽出結果

能を持つ透かしを設計できることが分かった．

4.2.3 目的関数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 [10] と比較することで示す．図 12 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 13 に [10] の手法を用いて設計した適応度経過を示す．なお，[10] の手法は 4 目的最適化を行っているが，本手法との比較を行いやすいため，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わかる．これに対して，[10] 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 [11] 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わかる．

4.3 考察

4.2.1 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．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．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した場合につれて，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．

表 1 クラスタごとの目的関数値と設計変数の値

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

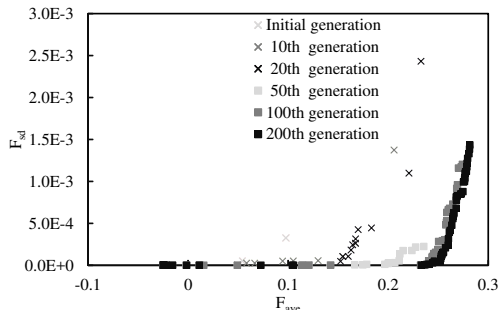


図 12 提案手法の適応度変化

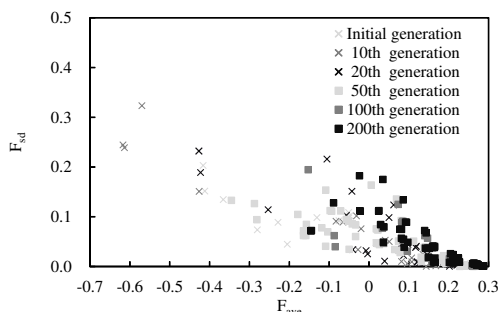


図 13 従来手法の適応度変化

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方式を提案した。光学シミュレーションを導入することで、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、機種毎の半脆弱性の評価値の平均値と標準偏差と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、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さらなる短縮と、より多くの機種を用いた際の検証が重要な課題である。

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, 信学論 D, 98(5):835-846 (2015).
- [2] Shimoyama, K., Oyama, A. and Fujii, K.: A new efficient and useful robust optimization approach-design for multi-objective six sigma, Congress on Evolutionary

Computation, 1:950-957 (2005).

- [3] Ono, S., Yoshitake, Y. and Nakayama, S.: Robust optimization using multi-objective particle swarm optimization, Artificial Life and Robotics, 14(2):174 (2009).
- [4] Farrell, J., Xiao, F. and etal: A simulation tool for evaluating digital camera image quality, Electronic Imaging 2004, pp. 124-131 (2003).
- [5] Healey, G. and Kondepudy, R.: Radiometric CCD camera calibration and noise estimation, Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 16(3):267-276 (1994).
- [6] 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. Australasian workshop on Grid computing and e-research, 44:75-80 (2005).
- [7] Nakamura, J.: Image sensors and signal processing for digital still cameras, CRC press (2016).
- [8] Eshelman, L. J.: Chapter real-coded genetic algorithms and interval-schemata, Foundations of genetic algorithms, Vol. 2, pp. 187-202 (1993).
- [9] 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, 46:991-1007 (2016).
- [10] 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, Int'l Conf. Software Engineering, Artificial Intelligence, Networking and Parallel/Distributed Computing, pp. 201-214 (2017).
- [11] 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 (2001).