

2次元コード用電子透かしの多目的最適化による設計

Digital Watermark Design for Two-dimensional Codes Using Multi-objective Optimization

竹下 真悟 *¹

Shingo Takeshita

前原 武 *¹

Takeru Maehara

松岡 淳一 *¹

Junichi Matsuoka

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

Authentication using a two-dimensional (2D) code has been widespread in train and airplane boarding passes, e-commerce and so on. Because 2D code can be easily duplicated, inappropriate use of copied 2D code is concerned. Therefore this study proposes a method for designing a digital watermark that detects replication of 2D code displayed on a smartphone screen. The proposed method designs an effective watermarking scheme for various smartphone models using multi-objective optimization including optical simulation. Experimental results showed that the proposed method can design a watermarking scheme with the same performance as the previous work whereas it does not require using actual smartphones during long time optimization.

1. はじめに

航空機の搭乗券やイベントの入場券など、認証の手段としての2次元コードの利用が進んでいる。特に近年、携帯電話の画面に2次元コードを表示し認証を行う場面が増加している。ペーパーレス化によって利便性の向上が図れるものの、2次元コードは複製が容易であり、この対策が必要とされている[1, 2]。本研究で対象とする複製は、図1に示すように、ある携帯電話に表示された2次元コードを別の携帯電話のカメラで撮影する行為とする。図のような手軽な撮影行為であっても2次元コードの複製は可能である。

先行研究[1, 2]では、2次元コードに半脆弱な電子透かしを埋め込むことで、上記の複製を検知する方式を提案している。正規の2次元コード（原本）からは透かしが抽出できるが、複製を行うことで透かしが破壊されるため複製されたコードからは透かしが抽出されず、原本と複製の識別が可能となる。この方式では、進化型多目的最適化を用いることで2次元コード用の半脆弱な電子透かしの自動設計を実現している。しかし、最適化の最中に、携帯電話の実機を用いて解候補の評価を行うため、多数の実機を長時間連続で使用しなければならなかった。

このため、本研究では、多目的最適化による電子透かし設計を行う際に、シミュレーションにより解候補の評価を行う方式を提案する。提案方式では、携帯電話スクリーンやカメラの光学伝達関数（Optical Transfer Function: OTF）、スクリーンとカメラの干渉、およびノイズを、最適化を行う前に取得する。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撮影や複製を仮想的に行い、透かしの抽出率を算出する。これにより、携帯電話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、必要な実機の台数も、実験に用いる機種種の総数に関わらず、各機種2台のみを用意すればよい。実験により、実機を最適化の最中に用いる従来手法と提案手法とが同等の性能の電子透かしを設計できることを示す。

2. 関連研究

最適化による電子透かしの設計は広く研究されている。Vahediらは離散ウェーブレット変換（Discrete Wavelet Transformation: DWT）[3]を用いてカラー画像を対象として電子透かしを埋め込む方式を提案した[4]。Mingzhiらは、DWTと離散コサイン変換により得られる周波数帯に対して電子透かしを埋め込む際の強度を、遺伝的アルゴリズムを用いて自動的に決定する方式を提案した[5]。

また、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が広く行われている。Farrellらは、デジタルカメラの設計および性能評価を目的としたシミュレータを提案した[6]。この方式では、撮影対象のシーンの光源やレンズに入射する光子、センサーの色に対する応答などを厳密にモデル化する。Farrellらは提案したシミュレータをImage System Evaluation Toolbox (ISET)としてライブラリ化している。Chenらは、ISETシミュレータを拡張することで、より厳密なシミュレータの構築を行った[7]。この方式ではセンサーに入射する光の混線により生じる影響を再現している。

3. 提案手法

3.1 基本アイデア

本研究では、以下のアイデアに基づく電子透かし設計方式を提案する。

多目的最適化問題として定式化

半脆弱性を実現するための要件は、液晶や有機EL（Organic Electroluminescence）などのディスプレイに依存する可能性がある。提案方式は、多様な携帯電話で共通して利用できる電子透かしを設計するため、機種毎の半脆弱性を目的関数とする多目的最適化を行うことで透かしを設計する。これにより、機種に依存せずに有効な透かしを設計しつつ、各機種で有効な透かしに関する知見を得ることが可能となる。

シミュレータを用いた解候補評価

解候補の評価を行う際に、同一機種間における複製に加えて、異機種間でも複製を行う場合、従来手法[1, 2]では機種数を n とすると $2n^2$ 台の実機が必要となる。特に、有機EL方式のスクリーンでは、長時間の最適化の間に残像が発生してしまう問題がある。

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

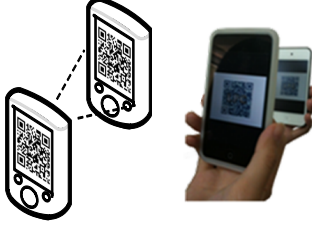


図 1: 携帯電話を用いた複製の例



図 2: DWT によって得られる周波数帯

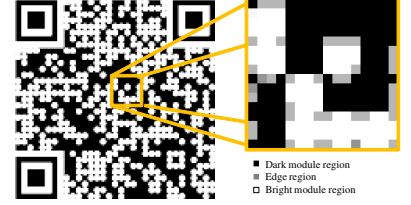


図 3: ホスト画像の領域

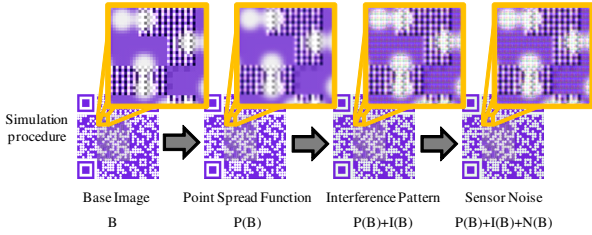


図 4: 撮影シミュレーションの処理手順と画像の例

このため、提案手法では、最適化における解候補の評価の際に、光学シミュレーションにより透かし入り 2 次元コードの撮影および複製を行い、透かしの半脆弱性を算出する。半脆弱な透かしは主に画像の高周波成分に埋め込まれるため、提案方式のシミュレータで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。

3.2 定式化

3.2.1 設計変数

提案方式では、透かしの埋め込みに用いる周波数帯の選択と、その埋め込み強度を同時に最適化する。また、図 3 に示すように、ホスト画像を輝度値に基づい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、ホスト画像の領域毎に透かしの埋め込むスキームを決定する。また、提案方式では埋め込み対象画像に 2 段階の DWT を適用する。図 2 に得られる 7 つの周波数帯を示す。得られた周波数帯の埋め込み強度を、ホスト画像の領域毎で決定する。提案方式における設計変数は合計で 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、画像領域の選択と透かしの埋め込む周波数帯、埋め込み強度の調整を同時に行うため 0 から 1 までの実数値をとる。提案方式では設計変数 $v_{r,b}$ が 0.5 を上回る場合にのみ、当該領域に

$$L_{r,b} = 2 \times (v_{r,b} - 0.5) \times L_{max} \quad (1)$$

の強度で透かしの埋め込む。これは初期集団生成や突然変異など、ランダムな値を設計変数として割り当てる際に、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。ここで L_{max} は透かしの埋め込む際の最大強度を示す。

3.2.2 目的関数

提案方式では、対象となる機器の組み合わせに対してそれぞれ目的関数を設け、それらを同時に最適化する。例えば、2 機種に対応する透かしを設計する場合、複製のプロセスにおいて表示側と撮影側の機種の組み合わせは 4 通りとなり、4 目的の多目的最適化を行うこととなる。

個々の目的関数は、原本と複製の間での透かしの抽出率の差分であり、最大化問題とする。透かしの抽出率は、bit correct ratio (BCR) により表すものとし、目的関数を以下の式のよ

うに定義する。

$$f_k(i) = BCR(W, W^{vld}) - BCR(W, W^{rpl}) - P(Y^{vld}) \quad (2)$$

ここで W^{vld} , W^{rpl} は、携帯電話に表示された原本および複製の撮影画像 Y^{vld} , Y^{rpl} から抽出された透かし画像を指す。BCR は下記の式で算出する。

$$BCR(W, W') = 1 - \frac{\sum_{w=1}^w \sum_{h=1}^h (W_{w,h} \oplus W'_{w,h})}{wWhw} \quad (3)$$

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。 $h_W \times w_W$ 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、以下の式で定義されるペナルティ関数 P を導入する。

$$P(Y^{vld}) = ECR(Y^{vld}) \times P_{max} \quad (4)$$

ここで ECR は、原本の撮影画像においてホスト画像の 2 次元コードの復号を行う際に使用するエラー訂正機能使用率 (error correction ratio : ECR) を表す ($0 \leq ECR(Y^{vld}) \leq 1$)。

3.3 処理手順

提案方式は [1, 2] の方式に従い、図 2 に示すように 2 段階の DWT により得られた周波数帯に透かしの埋め込む。埋め込む周波数帯と領域の組み合わせの選択、および、埋め込み強度の決定は、最適化により行う。多様な携帯電話で共通して利用できる電子透かし設計のために NSGA-II を用いる。解候補の評価には 3.4 節で述べるシミュレータを用いる。

3.4 透かし評価シミュレーション

3.4.1 概要

提案方式では、実機を用いて撮影を行うかわりにシミュレーションを行うことで、透かし入り 2 次元コードの原本を撮影した画像および複製された画像を生成する。提案方式の透かしは画像の高周波成分に対して透かしの埋め込むため、画像の高周波成分に影響を与える現象を表現する必要がある。提案方式では、カメラの OTF、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計測し、原画像に適用することでシミュレーションを行う。シミュレーションの全体像を図 4 および以下に示す。

- 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:** (カメラのセンサーノイズの付加) 対象画像におけるカメラのセンサー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。

$$S(B) = P(B) + I(B) + N(B) \quad (5)$$

ここで B は原本画像, $S(B)$ は推定画像を示しており, $P(B)$ はカメラの光学伝達関数を適用した画像, $I(B)$ は干渉パターン, $N(B)$ はカメラのセンサーノイズを示す。上記手順で対象画像に処理を行うことで透かし評価を目的とした撮影シミュレーションを行う。

3.4.2 カメラの光学伝達関数

提案手法では、撮影によるボケを点広がり関数 (Point Spread Function: PSF) で表す。対象となるスマートフォンのディスプレイの1ピクセルのみに色を表示し、点光源とみなす。そして複製を行うスマートフォンのカメラでディスプレイを撮影することで PSF を取得する。これをシミュレータを構築するうえで必要なカメラとディスプレイの組み合わせすべてで行う。PSF P はカメラとディスプレイの組み合わせごとによって異なる。

3.4.3 干渉パターン

ディスプレイをカメラにより撮影することで周期的なパターン (干渉パターン) が発生することがこれまでの実験により確認されている。このパターンは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。提案方式では干渉パターンを事前に撮影画像から取得する。干渉パターンはディスプレイに表示する色に依存して異なるため、色ごとにパターンの取得を行う。よって求めるべき干渉パターン I を

$$\sum_{col \in B}^{N_c} I_{screen}^{(col)}(B) \quad (6)$$

として表す。 B は対象画像, col は対象画像 B に含まれる色, N_c は対象画像 B に含まれる色数である。以下に干渉パターンの取得手順を示す。

- Step 1:** (パターンの撮影) 取得したいパターンの色のみを対象のディスプレイに表示し、撮影を行うことで撮影画像 I を得る。
- Step 2:** (平均画像作成) Step 1 で得られた撮影画像 I より各チャンネルごとに平均輝度値 I_c を求める。
- Step 3:** (パターンの取得) 撮影画像の各画素と I_c の差分を求めることで表示するパターンを得る。

3.4.4 カメラのセンサーノイズ

カメラのセンサーにより生じるノイズは高周波なノイズであり透かしに影響を与えられ考えられる。センサーによって生じるノイズはフォトン・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 [8]。一般的に上記ノイズはそれぞれ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分散を求めることができれば表現することができる。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おり [9]、提案方式でも同様の方式を用いてセンサーノイズを表す。カメラのセンサーノイズを表すパターン $N(B)$ は、座標 (a, b) における輝度値の期待値 $D(a, b)$ から構成される。

$$D(a, b) = (K(a, b)I(a, b) + N_{DC}(a, b) + N_S(a, b) + N_R(a, b))A + N_Q(a, b) \quad (7)$$

ここで $I(a, b)$ は B の座標 (a, b) における輝度値を示す。また, $K(a, b)$ および N_{DC} , $N_S(a, b)$, $N_R(a, b)$, $N_Q(a, b)$, A はそれぞれ固定化パターンノイズ, 暗電流ショットノイズ, 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, ゲインを示す。提案方式では上記の各ノイズ成分を個別に、取得した。

4. 評価実験

4.1 実験方法

提案する手法を用いて、各携帯電話端末に共通して半脆弱な特性を示す電子透かしの設計を試みた。実験に用いた携帯電話は、以下の2機種である。

- D_1 : SHARP AQUOS PHONE ZETA SH-06E (ディスプレイ: 4.8 インチ IGZO, 1,920 × 1,080 画素, カメラ: 1,300 万画素)
- D_2 : Galaxy S6 SC-04E (ディスプレイ: 5.0 インチ Full HD Super AMOLED, 1,920 × 1,080 画素, カメラ: 1,300 万画素)

透かしの抽出に用いたカメラは、以下の通りである。

- CCD カメラ: Pointgrey FLEA3 FL3-U3-88S2C-C, 4,092 × 2,160 画素
- レンズ: FUJIFILM DV3.4x3.8SA-1

本稿の実験では、異機種間での複製 (例えば, 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 ($D_1 - D_2$)) についても考慮した上で最適化を行うこととした。これにより、目的関数の数は4つとなる。図5に実験に用いたホスト 2 次元コードおよび埋め込む透かし画像を示す。また最大の埋め込み強度 L_{max} は 192, P_{max} は 2 に設定した。

4.2 設計された解

提案する方式によって得られたパレート解集合を図6に示す。4つの目的関数を表すために、X,Y,Z 軸と色の濃さを用いており、それぞれ D_1-D_1 と D_2-D_2 , D_1-D_2 および D_2-D_1 の組み合わせを示している。図6の上部に各目的関数で 0.25 程度の値を持つ解が生成されたことがわかる。

図7に提案する方式で決定された設計変数および設計された透かし入り 2 次元コードを示す。提案方式により設計された透かし埋め込みスキームでは3領域全ての HH1 成分に透かしを埋め込み, LH1 成分の暗モジュール領域と明モジュール領域に, HL1 成分の暗モジュール領域とエッジ領域に, HH2 成分のエッジ領域に, それぞれ透かしを埋め込むスキームである。

提案手法の多目的最適化を用いて設計した透かしと、単目的最適化を用いて D_1-D_1 用に設計した透かしとを、それぞれシミュレータを用いて推定した結果を図8に示す。図には4つの組み合わせのうち同一機種同士で複製を行った2通りの結果を示す。単目的最適化で設計された解は最適化の対象としない組み合わせでは半脆弱性が低下するが、提案手法では2機種の組み合わせ全てにおいて BCR が 0.75 程度の高い抽出率を達成できた。

次に、提案手法において、シミュレータによりどの程度正確に撮影画像を推定できたかを確認した。図9に、同一機種同士で複製を行った際の、実撮影画像およびシミュレータによる推定画像を示す。本研究で構築したシミュレータは、撮影によって生じる劣化を完全には再現していないものの、抽出結果画像および BCR とともに類似した結果が得られた。

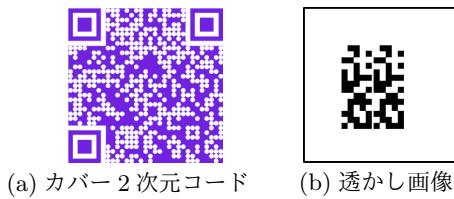


図 5: 用いた 2 次元コードと透かし画像

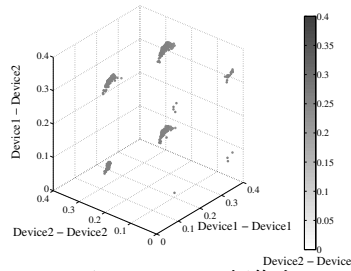


図 6: パレート解集合

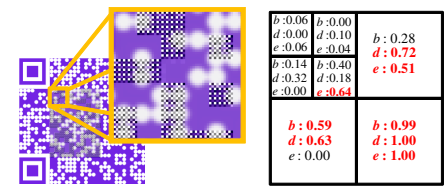


図 7: 設計された電子透かし

		Multi objective optimization		Single objective optimization	
		Device1	Device2	Device1	Device2
Genuine	Extraction Image				
	BCR	0.777	0.740	0.753	0.673
Replicated	Extraction Image				
	BCR	0.504	0.483	0.484	0.471

図 8: 多目的最適化と単目的最適化比較

		Simulation image		Actual shooting	
		Device1	Device2	Device1	Device2
Genuine	Extraction Image				
	BCR	0.777	0.740	0.715	0.733
Replicated	Extraction Image				
	BCR	0.504	0.483	0.445	0.441

図 9: 実機撮影画像と推定画像の比較

最後に、実機環境においてどの程度安定して真贋判定を行えるかを検討する。図 10 に、提案手法によって設計された透かし入り 2 次元コードから、透かしを調整する位置をわずかに変えながら 1,000 回ずつ透かし抽出を行った際の BCR の度数分布を示す。図 10 から原本で最悪の BCR 値が 0.69、複製で最良の BCR 値が 0.54 であり、そのマージンが 0.15 であることから、設計された透かしは安定した透かしの抽出を行うことができ、原本と複製の間に閾値を設けて容易に識別を行えることがわかる。

5. まとめ

2 次元コードの不正な複製を検知することを目的とした半脆弱な電子透かしを、光学シミュレーションと進化型多目的最適化アルゴリズムを用いることで自動設計する方式を提案した。提案手法では、端末を最適化前にごく短時間のみ撮影に用いることで有効な透かしを設計できることを確認した。一方で、NSGA-II では目的関数の増加に伴い、パレートランキングが適切に働かなくなることが懸念される。今後、より多くの組み合わせで使える電子透かしをシミュレータによって設計する方法を検討する。

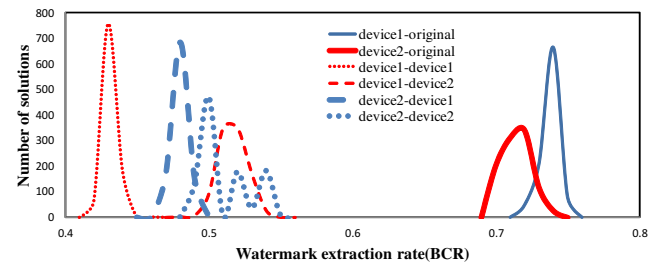


図 10: 原本と複製の透かし抽出率の分布

参考文献

- [1] 前原, 中居, 池田, 谷口, 小野. 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.
- [2] Satoshi Ono, Takeru Maehara, and Kazunari Minami. 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, 2016.
- [3] D. Kundur and D. Hatzinakos. A robust digital image watermarking method using wavelet-based fusion. *Proc. Int'l Conf. Image Processing*, Vol. 1, pp. 544–547, 1997.
- [4] E. Vahedi, R.A. Zoroofi, and M. Shiva. 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.
- [5] C. Mingzhi, L. Yan, Z. Yajian, and L. Min. A combined dwt and dct watermarking scheme optimized using genetic algorithm. *J.multimedia*, Vol. 8, No. 3, pp. 299–305, 2013.
- [6] J.E. Farrell, F. Xiao, and etal. A simulation tool for evaluating digital camera image quality. In *Electronic Imaging 2004*, pp. 124–131, 2003.
- [7] J. Chen, K. Venkataraman, and etal. Digital camera imaging system simulation. *IEEE Trans on Electron Devices*, Vol. 56, No. 11, pp. 2496–2505, 2009.
- [8] J. Nakamura. *Image sensors and signal processing for digital still cameras*. CRC press, 2016.
- [9] G.E. Healey and R. Kondepudy. Radiometric ccd camera calibration and noise estimation. *IEEE Trans Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 16, No. 3, pp. 267–276, 1994.