

電子チケットで使用される2次元コードの 不正な複製を検知する方式の提案

— 進化計算を用いた半脆弱な電子透かしの設計 —

Copy Detection of Two-Dimensional Code on Electronic Ticket — Semi-Fragile Watermarking by Evolutionary Computation —

小野 智司*¹
Satoshi Ono

前原 武*¹
Takeru Maehara

宮本 龍二*¹
Ryuji Miyamoto

谷山 大介*¹
Daisuke Taniyama

坂口 裕一*¹
Hirokazu Sakaguchi

池田 亮*¹
Ryo Ikeda

中山 茂*¹
Shigeru Nakayama

*¹鹿兒島大学 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

This paper proposes a method for generating semi-fragile watermark for colored two-dimensional (2D) barcodes printed on a paper ticket and used for quick verification of items such as airplane boarding passes and coupons. In order to distinguish invalid copies from original 2D barcodes, the adequate semi-fragility is necessary. Additionally, it is important to find various promising sets of 2D code color and watermarking parameters for enhancing design flexibility. Therefore, this paper proposes an algorithm named Neighborhood- and Crowding-based Self-Adaptive Differential Evolution (NCjDE) for multi-optima problems.

1. はじめに

国際航空運送協会 (International Air Transport Association) は 2007 年, 2 次元バーコードを利用した自動チェックインの使用規格を決定した。これは, 磁気テープ付の搭乗券を廃止することで, 経費の抑制と産業廃棄物の排出量削減を図ったものであり, 特に携帯電話を利用することでペーパーレス化を促進するものである。上記のような航空機の搭乗券に限らず, 列車の搭乗券, イベントの入場券など, 認証の手段としての 2 次元コードの普及が進んでいる (図 1)。金銭的価値を持つ 2 次元コードの利用が拡大している昨今, 2 次元コードの複製を検知する技術の実現は急務である。

著者らは, 2 次元コードに半脆弱な電子透かしを埋め込むことで, 複写機による複製を検出する方式を提案している [小野 11]。電子透かしは一般的に, 頑健な透かしと脆弱な透かしに大別され, 頑健な透かしは著作権の保護に, 脆弱な透かしは画像に対する攻撃や改竄の検知に利用される。印刷される画像を対象とし, 複製などのある一定の変化で埋め込み情報が失われる半脆弱な透かしの研究は少ない [Rey 02, Song 01]。半脆弱な電子透かしを利用することで, コンビニエンスストアなどに設置された複写機によるカジュアルなコピーを検出することができる。店舗に設置された複写機などの身近な機器を用いた手軽なコピーを防止できることだけでも十分にニーズがあり, 特に中国などでニーズが強い。一方で, 色数の少ない印刷機では中間色の表現が複写機に類似してしまうなどの理由により, 2 次元コードを印刷する機器によって, 半脆弱な透かしのパラメータや 2 次元コードの色の調整が必要となることがわかった。

本研究では, 透かしを埋め込む対象となる 2 次元コードの

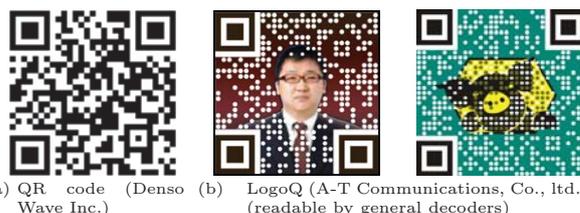


図 1: 2 次元コードの例

色や半脆弱な透かしのパラメータを最適化により求める方式を提案する。複製検知に適した 2 次元コードの色等は, 最適な 1 色だけではなく, デザイン上の自由度を高める観点から, 利用可能な多様な色を発見することが重要である。よって, 本研究では, 有望な複数の準最適解を同時に発見できる適応型ニッチング差分進化法 (Neighborhood- and Crowding-based Self-Adaptive Differential Evolution: NCjDE) を提案し, 上記の問題に適用する。提案する方式では, 実機を用いて解候補の評価を行うため, 事前の制御パラメータの調整を行うことは困難である。このため, NCjDE では一定の確率でランダムに制御パラメータを変えることで, 制御パラメータの調整を不要とする。高い。2 社の複写機を用いた実験により, 実際に複製を検知可能な透かし入り 2 次元コードを生成できることを確認する。

2. 提案する方式

2.1 構成と処理手順

本研究で提案する NCjDE のアルゴリズムを図 2 に示す。NCjDE は, ニッチング差分進化法 (Neighborhood- and Crowding-based Differential Evolution: NCDE) [Qu 12] に適応型差分進化法 (Self-Adaptive Differential Evolution: jDE) [Brest 06] を組み合わせた方式である。NCDE は, DE

連絡先: 小野 智司, 鹿兒島大学 理工学研究科 情報生体システム工学専攻, 〒 890-0065 鹿兒島市郡元 1-21-40, ono@ibe.kagoshima-u.ac.jp

Step 1	Initialize population by random.
Step 2	For each individual i , do step 2 through 8.
Step 3	Find the most similar m neighbors to i in decision variable space to form a subpopulation $sp_{i,g}$ (neighborhood mutation).
Step 4	Pick a base vector $x_{b,g}$ and vectors $x_{r1,g}$ and $x_{r2,g}$ for a difference vector from $sp_{i,g}$.
Step 5	Generate a mutant vector $v_{i,g}$ from the vectors selected in step 4.
Step 6	Make a trial vector $u_{i,g}$ by mixing the $x_{i,g}$ and $v_{i,g}$ by crossover.
Step 7	Find the most similar individual and replace it with $u_{i,g}$ if $u_{i,g}$ has better fitness value than the most similar one (crowding).
Step 8	Randomly change scale factor and crossover rate with the probability of τ_1 and τ_2 respectively (self-adapting parameters).
Step 9	Stop if a termination criterion is satisfied. Otherwise, go back to step 2.

図 2: 提案する NCjDE のアルゴリズム

における突然変異と交叉を近傍個体同士で行うこと、および、生存選択を最近傍個体と比較して行うことの 2 点により、探索空間内の複数の有望な最適解および準最適解を発見することができる。また、jDE は、DE の主要な制御パラメータであるスケールファクタと交叉率を各個体毎に設け、一定確率でランダムに変化させることで、それらの事前の調整を不要としている。NCDE と jDE の組み合わせはお互いに悪影響を及ぼすことがなく、NCjDE は両者の利点を活かした探索を行うことができる [小野 13]。なお、NCjDE では jDE と同様、スケールファクタおよび交叉率の上限、下限、変更確率など、設定可能なパラメータが増えるものの、上限 (下限) に十分大きな (小さな) 値を設定し、変更確率を 0.1 程度に設定することで、問題に応じた調整が不要であることを確認済みである。

解候補の評価を行う際の機器の構成および処理手順を図 4 に示す。本方式では、探索により得られたパラメータの組み合わせに従って透かし入り 2 次元コードを生成し、印刷を行う。また、印刷した 2 次元コードを複写機で複製し、2 次元コードの原本と複製を用意する。原本と複製をスキャナで読み取り、透かしの抽出を行うことで、透かしの抽出率を算出し、原本からの抽出率と複製からの抽出率の差分を高めるよう探索を行う。

2.2 設計変数および透かし埋め込み手順

提案する方式で用いる半脆弱な電子透かしは、離散ウェーブレット変換 (Discrete Wavelet Transformation: DWT) を利用するものである [Kundur 97]。通常の DWT を用いる電子透かしは、画像の縦、横、斜め方向の高周波成分に電子透かしの埋め込む。これに対して、本研究で用いる半脆弱な透かし [小野 11] は、画像の斜め方向の高周波成分として電子透かしの埋め込む。複写機は中間色を斑状または斜線のパターンの組み合わせで表現するため、複製は斜め方向の高周波成分を大量に含む。半脆弱な透かしは複製により大量の高周波成分に埋もれてしまうため、原本と複製の判別が可能となる。前処理として行う階調値調整と平滑化の前処理もまた、複写機による透かしの破壊を助長する。

透かしの埋め込み手順を図 3 および以下に示す。

Step I (前処理): 透かしの埋め込み対象となる 2 次元コー

ド画像に対してガウシアンフィルタを適用し平滑化を行う。このとき、平滑化を行う領域は透かしを埋め込む領域のみとする。次に、透かしの埋め込む領域の階調値の範囲を狭めるよう調整する。最も高い階調値 (通常は 255) が $DR_H(\%)$ 低下するよう、また、最も低い階調値 (通常は 0) が $DR_L(\%)$ 上昇するように調整を行う。

Step II (DWT の適用): 前処理を行った画像 (解像度を $I_h \times I_h$ 画素とする) を RGB 要素に分割する。各要素毎に DWT を適用し、低周波成分 (LL)、垂直方向高周波成分 (LH)、水平方向高周波成分 (HL)、対角方向高周波成分 (HH) を得る。

Step III (透かしの埋め込み): HH 成分の階調値に L_p または L_n を加算することで透かし画像を埋め込む。ここで L_p および L_n は、それぞれ 2 次元コード画像の明および暗モジュールにおける透かしの埋め込み強度である。

Step IV (逆 DWT の適用): 逆変換を行い、RGB 成分を合成することで透かし入り 2 次元コード画像を得る。

設計変数の一覧を表 1 に示す。上記の過程で用いられる 5 個のパラメータ、および、2 次元コードの色を表す 3 パラメータの合計 8 パラメータが本問題における設計変数となる。

2.3 目的関数

本問題における目的関数は、原本と複製の間での透かしの抽出率の差分である。すなわち、解候補 x の適応度 $f(x)$ は以下のように定義できる。

$$f(x) = \frac{1}{N_M} \sum_{m=1}^{N_M} \{WDR(w_{valid}) - WDR(w_{replicated})\} \quad (1)$$

ここで、 N_M は実際に用いる複写機の台数、 w_{valid} および $w_{replicated}$ はそれぞれ、原本および複製から抽出された透かし画像、WDR は透かしの抽出率を示す。なお、原本または複製のいずれかにおいて、QR コードの復号に失敗する際は、ペナルティとして適応度の値を 0 とする。

3. 評価実験

3.1 条件

提案する方式を用いて 4 色インクジェットプリンタ (Canon PIXUS MP610) で印刷可能な、半脆弱な電子透かし入り 2 次元コードの生成を試みた。複写機は、Sharp MX4500DS および Xerox C4300MP を用い、透かしの抽出にはフラットベッドスキャナ (Canon LiDE 500F, 600F) を用いた。NCjDE のパラメータは、集団サイズを 140 にした。提案する NCjDE による実験に加え、比較対象として jDE による探索を行った。パラメータは表 2 のように設定した。

実験に用いた 2 次元コードおよび透かし画像を図 5 に示す。2 次元コードの解像度は 256×256 画素とし、サイズは $18 \times 18(mm)$ となるように 361(dpi) の解像度で印刷した。透かしの抽出する際は、 $2,048 \times 2,048$ 画素となるように 2,889(dpi) でスキャンを行った。

3.2 実験結果

図 6 に集団内の最良個体の適応度と全個体の平均適応度の推移、および、全個体間の平均距離によって定義される集団の多様性の推移を示す。jDE は世代が進むにつれて集団の多様性が急速に低下しているのに対し、NCjDE は集団の多様性を十分に維持できていることがわかる。また、図 7 に最終世

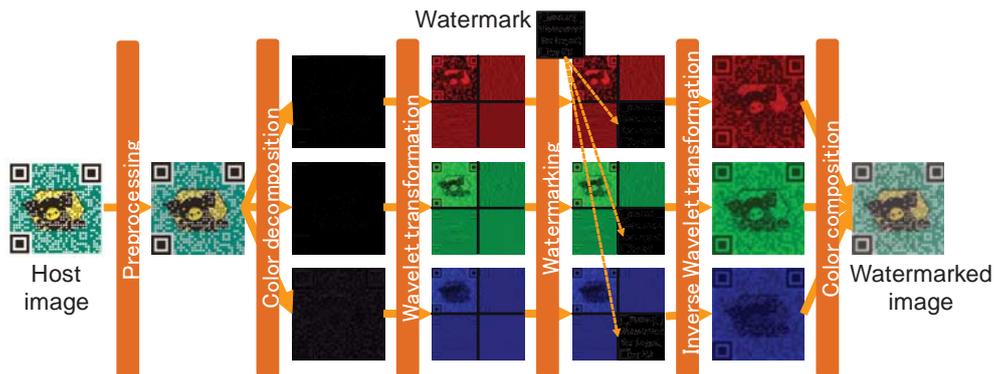


図 3: 透かしの埋め込み手順

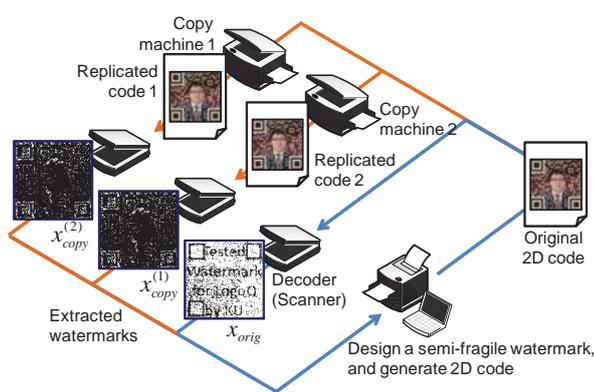


図 4: 提案する透かし設計方式の処理手順

表 1: 透かし入り 2 次元コード生成問題における設計変数

Variable	Type	Range
Color components	R	Integer [0, 255]
	G	Integer [0, 255]
	B	Integer [0, 255]
Dynamic range reduction level (DR_U, DR_L)	upper	Real [0, 0.2]
	lower	Real [0, 0.3]
Watermarking level (L_p, L_n)	positive	Integer [0, 128]
	negative	Integer [0, 128]
Gaussian filter strength	Real	[0.01, 3]

代における全個体の画像を示す。jDE は明度が低い緑色を中心とした色が多いのに対して、NCjDE はより多様な色を持つ個体が残っていることがわかる。

NCjDE により発見した最良解を図 8 に示す。図 8(a), (b) より、原本の画像には透かし画像のパターンが細かい対角方向の高周波パターンとして表現されていることがわかる。しかし、MX4500DS を用いた複製 (図 8(d), (e)) では、斜線状のパターンにより中間的な階調が表現されており、上記のパターンが視認できない。C4300MP を用いた複製 (図 8(g), (h)) では、うっすらと原本に類似したパターンがみえるが、原本とは異なり規則的な高周波パターンを維持できていないことがわかる。



(a) Base 2D code (b) Watermark
図 5: 実験に使用した QR コードと透かし画像

表 2: NCjDE のパラメータ設定

Parameter	value
Population size N	140
Crossover way	Binomial
Subpopulation size m	10
Probability to chance scale factor τ_1	0.1
Probability to chance crossover rate τ_2	0.1
Scale factor range	[0.1, 1.0]
Crossover rate range	[0.0, 1.0]

4. おわりに

電子チケット等で用いられる認証目的の 2 次元コードにおいて、不正な複製を検知する方式を提案した。本方式は、半脆弱な電子透かし入りの 2 次元コードを生成する問題を最適化問題として定式化する。多様な有望な解を探索空間に含むことから、本研究では複数の有望な解を良好に発見でき、かつ、制御パラメータが少ない点に特徴を持つ適応的のニッチング差分進化法 NCjDE を提案した。

店舗に設置された 2 種類の複写機を用いて実験を行い、不正な複製を検知できる半脆弱な電子透かし入りの 2 次元コードを設計できることを確認した。

謝辞

本研究は、独立行政法人 科学技術振興機構 研究成果展開事業 研究成果最適展開支援プログラム (育成研究)「半脆弱な電子透かしを用いた 2 次元コードの不正な複製の検知」による。また、本研究を推進するにあたって、株式会社デンソーウェーブおよび A・T コミュニケーションズ株式会社に協力頂いた。ここに記して謝意を表する。

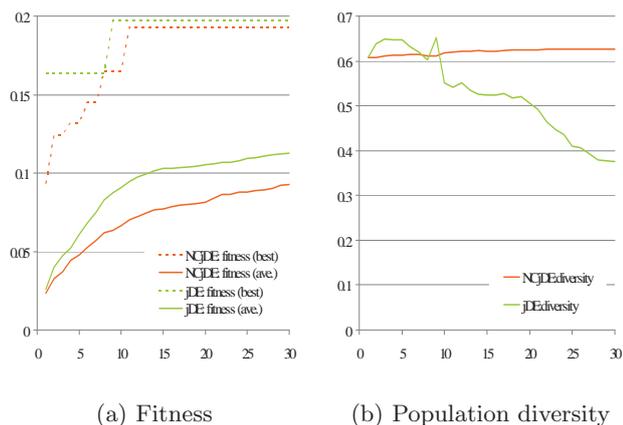


図 6: 適応度と集団内の多様性の推移

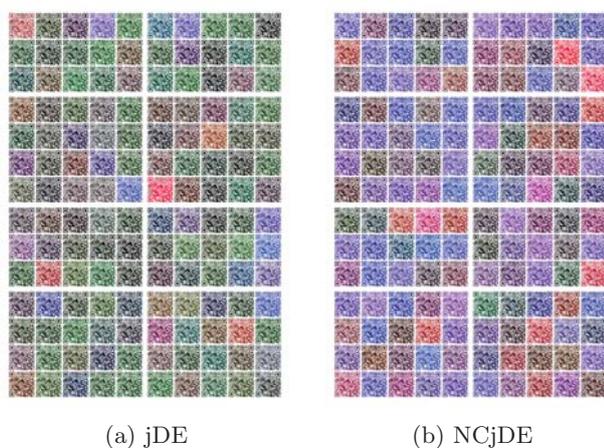


図 7: 最終世代における集団の様子

参考文献

- [Brest 06] Brest, J., Greiner, S., Boskovic, B., Mernik, M., and Zumer, V.: Self-Adapting Control Parameters in Differential Evolution: A Comparative Study on Numerical Benchmark Problems, *Evolutionary Computation, IEEE Transactions on*, Vol. 10, No. 6, pp. 646–657 (2006)
- [Kundur 97] Kundur, D. and Hatzinakos, D.: A Robust Digital Image Watermarking Method Using Wavelet-Based Fusion, in *4th IEEE Int'l Conf. Image Processing*, pp. 544–547 (1997)
- [小野 11] 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. J94-D, No. 12, pp. 1971-1974 (2011)
- [小野 13] 小野 智司, 坂口 裕一, 前原 武, 宮本 龍二, 谷山 大介, 池田 亮, 中山 茂: 適応型ニッチング差分進化法の提案と真贋判定可能な二次元コード用電子透かし設計問題への応用, 第 4 回進化計算学会研究会予稿集, pp. 90–95 (2013)
- [Qu 12] Qu, B.-Y., Suganthan, P. N., and Liang, J.-J.: Differential Evolution With Neighborhood Mutation for Multimodal Optimization, *IEEE Trans. Evolutionary Computation*, Vol. 16, No. 5, pp. 601–614 (2012)

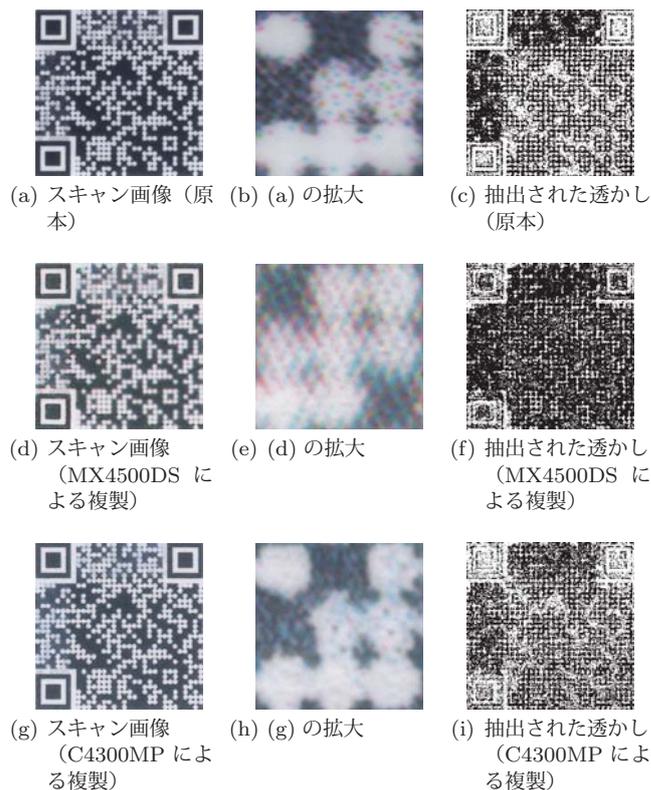


図 8: 生成された透かし入り QR コードおよび抽出した透かしの例

[Rey 02] Rey, C. and Dugelay, J.-L.: A Survey of Watermarking Algorithms for Image Authentication, *EURASIP Journal on Applied Signal Processing*, Vol. 6, pp. 613–621 (2002)

[Song 01] Song, Y., Liu, R., and Tan, T.: *Digital Watermarking for Forgery Detetion in Printed Materials*, Vol. 2195/2001, pp. 403–410, Springer Verlag (2001)