

多目的遺伝的アルゴリズムを用いた 2次元コードのモジュールパターン最適化

Module Pattern Optimization on Two-Dimensional Code by Multi-Objective Genetic Algorithm

小野 智司*¹ 田尻 昌之*¹ 谷山 大介*¹ 中山 茂*¹
Satoshi Ono Masayuki Tajiri Daisuke Taniyama Shigeru Nakayama

*¹鹿児島大学 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 module pattern optimization method for two-dimensional (2D) barcodes based on bi-objective optimization. Although several decoration methods by superposing an image on the 2D code have been proposed to enhance visual attractiveness of the code, the robustness against stains of the decorated code is deteriorated. The proposed method arranges module patterns of 2D code to maximize both machine-readability and similarity between the module pattern and a given objective image.

1. はじめに

2次元コード [JIS 99] は元来、生産や物流、販売などの場面で物品の管理に用いられてきた。近年、携帯電話の多くにカメラと2次元コードの復号ソフトウェアが標準的に搭載されるようになり、2次元コードが、アナログ媒体からネットワーク上の資源へのショートカットとして広く利用されている [Rohs 04]。Web ページの URL やメールアドレスが埋め込まれた2次元コードは、広告やパンフレット、看板、名刺など、様々な媒体で広く用いられている。一方で、2次元コードの普及によりその視覚的誘因性が低下していることや、埋め込まれた情報の種類を復号前に知ることができないなどの問題がある。

近年、視覚的誘因性の向上、内包データの識別、オリジナリティの演出を目的として、2次元コードを装飾する方式が提案されている [若原 10, 藤田 11, Ono 10, 小野 12]。これらの方式は、イラスト等を重畳する方式とモジュール (2次元コードを構成する最小の矩形) パターンを編集する方式の2つのアプローチに大別される。前者は、2次元コードが持つ誤り訂正能力を用いて2次元コードシンボル上に写真やイラストを組み込む方式である [Ono 10, 小野 12]。コード上にイラストが重畳された2次元コードは、既に市販化やサービスの提供も進んでおり、実際に商品等で目にすることも多い。このアプローチにより作成される装飾2次元コードは、高い視覚的誘因性を持つ一方で、誤り訂正能力を使用しているために通常の2次元コードよりも汚れや欠損に対する耐性が低い。後者のアプローチは、2次元コードにおける埋め草コード語と呼ばれる余剰部を利用している [若原 10, 藤田 11]。2次元コードを構成する白黒のモジュールパターンの組み合わせによりイラスト等を表現するものであり、誤り訂正能力を利用せずに済む利点がある。ただし、後者の方式は、イラストの解像度が2次元コードの解像度に依存することや、イラスト等を組み込める領域が埋め草コード語領域のみに限られる点に問題がある。

さらに、両者に共通する問題として、2次元コードを装飾することで本来の2次元コードの外観から乖離してしまい、利用者に2次元コードとして認識されないことがある。通常の2

次元コードでは含まれないような位置検出パターンを発見する妨げとなるパターンを含むこともあり、符号として成立した2次元コードであっても検知できない可能性がある。すなわち、2次元コードを装飾する場合であっても、2次元コードらしさを維持することは重要である。

本研究では、あらかじめ定義したイラストに類似する2次元コードのモジュールパターンを試行錯誤的に生成することで、2次元コードの視覚的誘因性と機械可読性の双方を最適化する方式を提案する。本方式では、生成した2次元コードのモジュールパターンと与えられたイラストとの類似性を第1目的関数、機械可読性の観点からのモジュールパターンの品質を第2目的関数として定義することで、上記の問題を2目的の最適化問題として定式化する。また、本方式は、多目的遺伝的アルゴリズムを用いることで多様なパレート解を探索し、視覚的誘因性と機械可読性のトレードオフ上で好ましいバランスを持つ解を利用者に選択させることができる。本研究では、QR (Quick Response) コードを対象としてシステムを実装し、その有効性を検討した。

2. QRコードにおける符号化

QRコードにおける符号化領域は、リードソロモン (Reed-Solomon: RS) 符号 [Reed 90] で符号化された文字列等により構成される。QRコードは、数字モード、英数字モード、漢字モード等のモードを切り替えながら情報を符号化し、ビット列の最後に終端指示子、埋め草ビットおよび埋め草コード語を付加する。生成されたビット列をいくつかのRSブロックに分割し、各RSブロックごとに誤り訂正コード語を生成する。各RSブロックは、図1(b)に例示するように、QRコードの符号化領域に分散して配置される。その後、8つのマスクパターンとの排他的論理和をとり、QRコードの機械可読性の観点から4つの特徴に基づく評価を行い、もっとも評価が高いマスクパターンを採用し、モジュールパターンを生成する。

3. 提案する方式

3.1 基本方針

視覚的誘因性と機械可読性の双方に基づいて最適化を行うため、提案する方式は Elitist Non-Dominated Sorting Genetic

連絡先: 小野 智司, 鹿児島大学 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, ono@ibe.kagoshima-u.ac.jp

表 1: 機械可読性の観点による QR コードの品質評価ルール [JIS 99]

特徴	評価条件	失点係数
同色の行・列の隣接モジュール	モジュール数 = $(5 + i)$	N_1
同色のモジュールブロック	ブロックサイズ = 2×2	N_2
行・列における 1:1:3:1:1 比率のパターン	1:1:3:1:1 比率パターンの前後に 4 つ以上の 白色モジュールパターン	N_3
全体に対する暗色モジュールの割合	$50 \pm (5 \times k) \% \ 50 \pm (5 \times (k + 1)) \%$	N_4

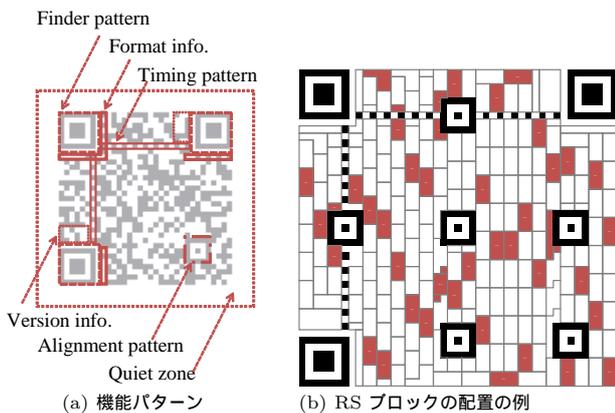


図 1: QR コード

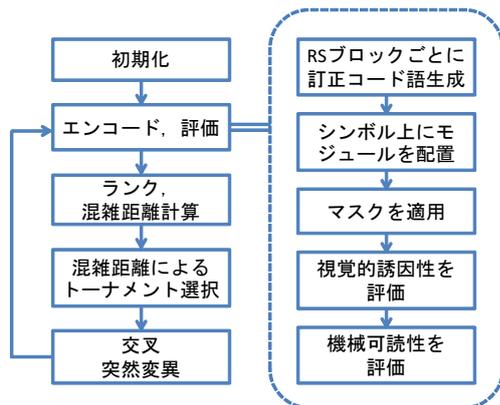


図 2: 処理手順

Algorithm (NSGA-II) [Deb 02] を用いて探索を行う。NSGA-II は、混雑距離や高速非優越ソートを導入した多目的遺伝的アルゴリズムであり、目的関数の個数が比較的少ない場合は十分に良好なパレート解集合を発見できる。生成した 2 次元コードのモジュールパターンと与えられたイラストとの類似性を第 1 目的関数、機械可読性の観点からのモジュールパターンの品質を第 2 目的関数とすることで、視覚的誘因性と機械可読性のトレードオフ上で良好なパレート解集合を探索する。

3.2 構成と処理手順

提案する方式の処理手順を図 2 に示す。本方式は NSGA-II のアルゴリズムに準じている。解候補の評価を行う際に設計変数である埋め草コード語および入力された文字列をもとに QR コードのモジュールパターンを決定し、評価を行う。

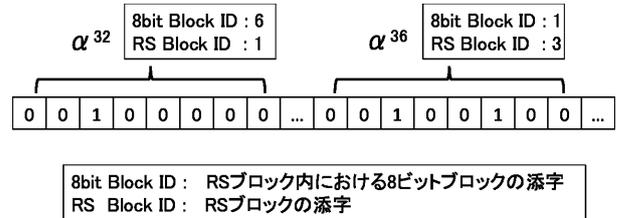


図 3: 遺伝子型

3.3 設計変数

本方式では、QR コードシンボル内の埋め草コード語を個体の遺伝子型として定義する。このため、QR コードに埋め込む文字列および型番の容量から、遺伝子長が決定する。図 3 に染色体の例を示す。8 つの遺伝子を 1 つの区画は、ブロック内の 8 ビットブロックに対応する。

データコード語と訂正コード語から作られる RS 符号および、すべての RS 符号から構成される QR コードシンボルを個体の表現型として定義する。データコード語と埋め草コード語は終端ビットにより分離されるため、デコードした際には通常の QR コードと同様に、あらかじめ入力した文字列のみがデコード結果として得られる。

3.4 目的関数

生成された QR コードの適応度を、与えられたイラストとの類似度、および、機械可読性の観点でのモジュールパターン品質の 2 つの指標について評価する。

3.4.1 第 1 目的関数

第 1 目的関数、すなわち、与えられた目標画像と QR コードのモジュールパターンとの一致度をハミング距離により計算する。QR コードシンボル中の、 i 番目の RS ブロック内に含まれる N 個の埋め草コード語からなるベクトルを $x_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iN})$ とする。QR コードシンボル内に含まれる M 個のブロックと、イラスト画像（注目する QR コードの型番に応じてダウンサンプリングされ、2 値化されているものとする）との類似度を評価するための関数 f_1 を、以下のように定義する。

$$f_1(x_1, x_2, \dots, x_M) = 1 - \frac{1}{8KL} \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L d(B_{k,l}, B'_{k,l}) \quad (1)$$

$$B_{k,l} = \begin{cases} x_{k,l} & (B_{k,l} \in \text{埋め草コード語}) \\ F_k(x_{k,1}, x_{k,2}, \dots, x_{k,N}) & (B_{k,l} \in \text{訂正コード語}) \end{cases} \quad (2)$$

K は前景領域が含まれる RS ブロックの総数であり、 L_k は、RS ブロック k において、イラスト画像の前景領域を含むブ

ロックの集合に含まれる埋め草コード語の総数である。また、生成された QR コードモジュールおよびイラストにおける、RS ブロック k 内のブロック l をそれぞれ $B_{k,l}, B'_{k,l}$ とし、それらのハミング距離を $d(B_{k,l}, B'_{k,l})$ とする。 $B_{k,l}$ は埋め草コード語または訂正コード語の 8 ビットブロックパターンである。 F_k は、RS 符号の生成行列 G の標準形における、 k 列目と x_k との内積により算出する。

3.4.2 第 2 目的関数

第 2 目的関数は、QR コードの機械可読性を表す指標に基づく QR コードの品質とする [JIS 99]。上記指標を算出するための 4 つのルールを表 1 に示す。表 1 の 4 つのルールは、QR コードの符号化において、最適なマスクパターンを選択する際の指標として用いられる。本方式でもこれらのルールを利用することにより、機械可読性を高めた QR コードを生成することができる。例えば 3 番目のルールは、QR コードの発見を助ける位置検出パターンとの判別が困難なモジュールパターンが QR コード内部に生成しないようにするためのものである。一般的な QR コードを生成する際の条件とは異なり、各指標についての失点 N_1, N_2, \dots, N_4 は固定値とし、それぞれの値を 3, 3, 40, 10 とする。

第 2 目的関数 $f_2(x_1, x_2, \dots, x_M)$ は、 x_1, x_2, \dots, x_M により生成されたモジュールパターンに含まれる上記各ルールの違反件数 y_i に基づいて以下の式で算出する。

$$f_2(x_1, x_2, \dots, x_M) = 1 - \frac{1}{P_{max}} \sum_i N_i y_i \quad (3)$$

なお、 P_{max} は、失点が最大となる値であり、シンボル内のデータコード語領域がすべて暗色モジュールの際の失点とする。

4. 実行例

4.1 条件

提案する方式を用いて視覚的誘因性と機械可読性を両立した QR コードの生成を試みた。図 4 に入力として与えたイラストを示す。2 種類のイラスト I_1, I_2 を用いて実験を行った。QR コードに埋め込む文字列は“kagoshima”とし、QR コードの型番は 10 とした。誤り訂正レベルは、 I_1 を用いる際は M, I_2 を用いる際は L とした。NSGA-II のパラメータは以下のように設定した。世代数の上限を 5,000 世代、個体数を 100 個体、交叉方法として一様交叉を用い、交叉率を 50% とした。突然変異方法として単一遺伝子座突然変異を用い、突然変異率を 5% とした。

4.2 実行結果

最終世代におけるランク 1 および 2 の解の目的関数空間における分布を図 5 および図 6 に示す。また、パレート解の例を図 7 および図 8 に示す。図 7 および図 8 より、提案する方式によって視覚的誘因性と機械可読性のトレードオフ上で多様なパレート解が得られていることがわかる。

一方で、図 7 および図 8 から、目標となるイラストにおける水平方向のエッジは比較的再現されやすいものの、垂直方向のエッジが表現されにくいことがわかる。これは、ブロックを構成する 8 モジュールが縦 4 モジュール、横 2 モジュールを基本としていること、および、視覚的誘因性を評価する際に、前景領域を含むブロックのみを対象としているためである。前景領域に加えて隣接する背景領域を含むよう視覚的誘因性の評価の対象となるブロックを増やすことで改善が可能であると考える。



(a) I_1 (b) I_2

図 4: 実験に用いたイラスト

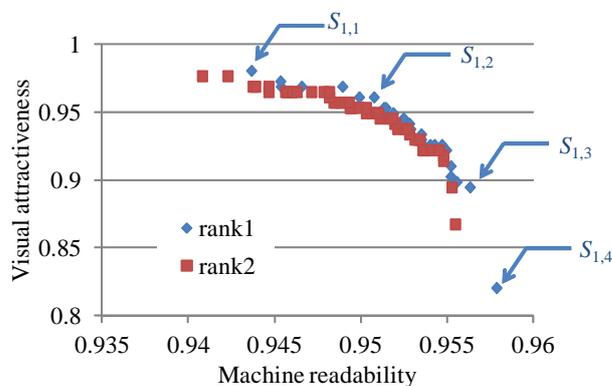


図 5: 得られたパレート解分布 (I_1)

4.3 考察

提案する方式によって得られた結果に後処理を行い、着色を行うことで視覚的誘因性を高めた例を図 9 及び図 10 に示す。図 7 および図 8 ではイラストの形が明確でなかった場合も、着色によりイラストの形状を明確化でき、機械可読性をある程度重視する場合でも視覚的誘因性を維持できることがわかる。ただし、図 9(b) からわかるように、機械可読性を重視する場合、すなわち一般的な QR コードと同様にみえるモジュールパターンの場合は、着色のみでは十分にイラストを表現することは難しい。なお、2 値化した際に暗色となる程度に十分に濃い色であれば、一般的なデコーダによる復号を妨げることはない。

また、本方式を用いることで、埋め草コード語領域だけでなく、訂正コード語領域のモジュールパターンの制御も行うことができる。しかし、訂正コード語領域における視覚的誘因性の評価関数は、埋め草コード語を含むデータコード語を媒介変数とする訂正コード語の多変数関数となり、変数間に依存関係が生じる。このため、訂正コード語領域のさらなる制御を行うためには、訂正コード語からデータコード語を得るようなオペレータの設計が必要となる。

5. おわりに

視覚的誘因性と機械可読性の双方を最適化する 2 次元コード生成方式を提案した。本方式は 2 目的の最適化問題としてモジュールパターン決定問題を定式化し、NSGA-II によって視覚的誘因性と機械可読性のトレードオフ上のパレート解集合を得るものである。

今後、誤り訂正コード語領域のモジュールパターン制御について検討を行う予定である。また、デザイナーが装飾 2 次元コードをデザインする際の支援ツールとして実装を行う。

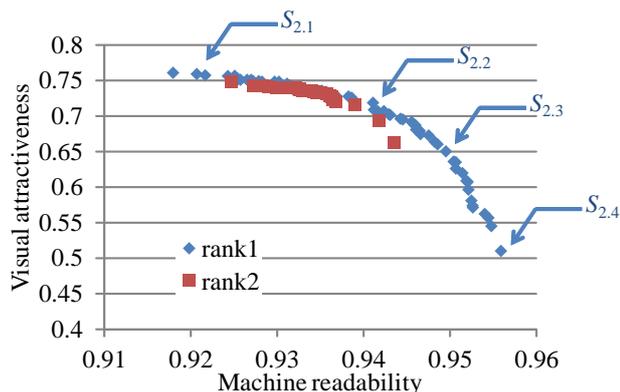


図 6: 得られたパレート解分布 (I_2)

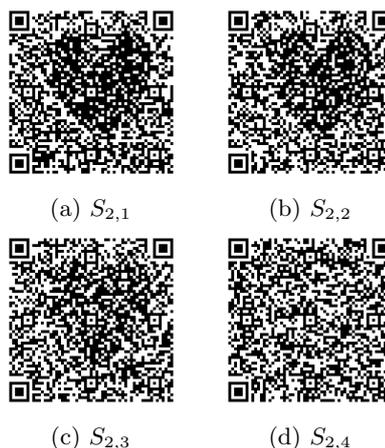


図 8: 実行例 (I_2)

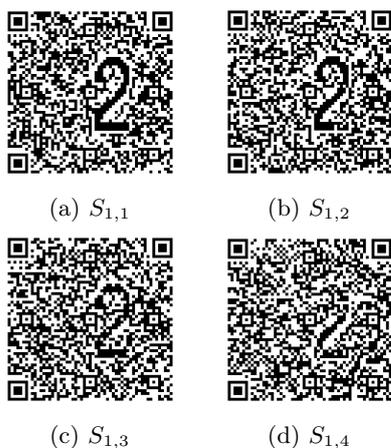


図 7: 実行例 (I_1)

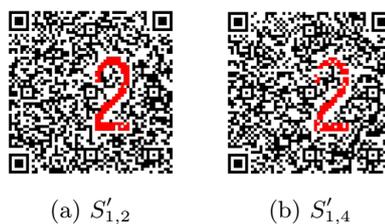


図 9: 後処理の例 (I_1)

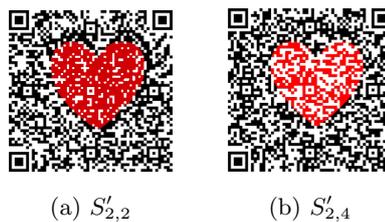


図 10: 後処理の例 (I_2)

参考文献

[Deb 02] Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., and Meyarivan, T.: A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II, *Evolutionary Computation, IEEE Transactions on*, Vol. 6, No. 2, pp. 182–197 (2002)

[藤田 11] 藤田 和謙, 栗林 稔, 森井 昌克: QR コードへの画像埋め込みに関する検討と提案, 電子情報通信学会技術研究報告. ICM, 情報通信マネジメント, 第 110 巻, pp. 39–44 (2011)

[JIS 99] JIS X 0510:1999 – 二次元コードシンボル – QR コード – 基本仕様 (1999)

[Ono 10] Ono, S. and Nakayama, S.: Fusion of Interactive and Non-Interactive Evolutionary Computation for Two-Dimensional Barcode Decoration, in *Proceedings of the 2010 IEEE World Congress on Computational Intelligence (WCCI 2010)*, pp. 2570–2577 (2010)

[小野 12] 小野 智司, 中山 茂: ユーザシステム協調型進化計算を用いた 2 次元コード装飾, 情報処理学会論文誌 数理モデル化と応用, Vol. 5, No. 3, pp. 14–25 (2012)

[Reed 90] Reed, I. S. and Solomon, G.: Polynomial Codes Over Certain Finite Fields, *SIAM Journal of Applied Mathematics*, Vol. 8, pp. 300–304 (1990)

[Rohs 04] Rohs, M.: Real-World Interaction with Camera Phones, in *Proceedings of 2nd International Symposium on Ubiquitous Computing Systems 2004*, pp. 74–89 (2004)

[若原 10] 若原 俊彦, 山元 規靖, 越智 祐樹: QR コードの画像情報多重化法の一検討, 電子情報通信学会技術研究報告, ライフインテリジェンスとオフィス情報システム, 第 110 巻, pp. 41–45 (2010)