

白黒2階調の補助線を用いた幾何歪みに頑健な2次元コードとその復号方式の提案

鞍津輪 一希^{1,a)} 上鶴 晃平¹ 久富 あすか¹ 川崎 洋² 小野 智司^{1,b)}

受付日 2018年11月19日, 再受付日 2019年1月8日,
採録日 2019年3月28日

概要: 生産, 物流, 販売等の分野において広く用いられている2次元コードは, 平面や一般的な曲面状に印刷されることを想定しており, 不均一で局所的な歪みが生じると一般的なデコーダでは復号が困難となる. 本研究では, 複雑な幾何歪みに対する頑健性を高めるために, あらかじめ格子状の補助線を付与した2次元コードを提案する. 本2次元コードに付与する補助線は, 照明条件等への頑健性や印刷等の利便性を高めるために白黒2値画像により構成するものとし, また, 幾何歪みへの頑健性を高めるために, 互いに類似しないパターンを持つことが望ましい. 上記の条件を持つ補助線パターンを設計するために, 本研究では確率モデル遺伝的アルゴリズムを用いて, 4種類の補助線パターンを設計する. また, 本研究では, 上記の補助線入り2次元コードの復号方式を提案する. 複数の補助線を安定的に識別するために全層畳み込みネットワークを用いて補助線の検出および識別を行い, 個々の補助線IDを識別する問題をマルコフ確率場として定式化して確率伝播法によりIDを付与する. これにより, 自己遮蔽が生じるほど複雑な幾何歪みが生じた場合であっても, 上記の2次元コードの復号を行うことが可能となる. コンピュータグラフィクスを用いたシミュレーションおよび実撮影環境下で評価実験を行い, 提案方式が不均一に歪んだ2次元コードを復号できることを示す.

キーワード: 2次元コード, 幾何歪み補正, 全層畳み込みネットワーク, マルコフ確率場, 確率モデル遺伝的アルゴリズム

A 2D Code with Black and White Auxiliary Lines Robust against Geometric Distortion and Its Decoding Method

KAZUKI KURATSUWA^{1,a)} KOHEI KAMIZURU¹ ASUKA HISATOMI¹ HIROSHI KAWASAKI²
SATOSHI ONO^{1,b)}

Received: November 19, 2018, Revised: January 8, 2019,
Accepted: March 28, 2019

Abstract: Two-dimensional (2D) codes are widely used for various fields such as production, logistics, and marketing thanks to their larger capacity than one-dimensional barcodes. However, they are subject to distortion when printed on non-rigid materials, such as papers and clothes. Although general 2D code decoders correct uniform distortion such as perspective distortion, it is difficult to correct non-uniform and irregular distortion of the 2D code itself. This paper proposes a 2D code involving monochrome auxiliary lines, which is robust against non-uniform, local distortion. The auxiliary lines given to the 2D code are composed of black and white image patterns to enhance robustness to lighting conditions and to enhance convenience such as easy printing, and should have patterns that are not similar to each other to enhance the robustness against geometric distortion. This study, therefore, utilizes a probabilistic model-building genetic algorithm to design four line patterns that satisfy the above conditions. In addition, this study also proposes a decoding method for the above 2D code with auxiliary lines. The proposed decoding method detects the lines using fully convolutional network, and then identifies the lines by formulating as Markov random field and solving it using belief propagation. Experimental results with both computer graphics simulation and actual photography environment have shown that the proposed method can decode 2D codes even when they involve self-occlusion caused by complex geometric distortion.

Keywords: two-dimensional code, geometric distortion, fully convolutional network, Markov random field, probabilistic model-building genetic algorithm

1. はじめに

2次元コードは、1次元のバーコードに比べ、多くの情報を格納できることから生産、物流、販売等の分野において広く普及している。近年では、電子決済、航空券、チケット等、より身近なところで利用されている。2次元コードは平面な媒体に印刷されることを想定しており、撮影角度等によって生じる線形的な歪みに対しては、一般的なデコーダの射影変換等の単純な歪み補正を用いることで復号が可能である。しかし2次元コードはレシート紙や航空券等の歪みが生じやすい媒体に印刷されることも多く、扱いに不慣れな利用者は、2次元コードが印刷されたレシートや航空券を歪みの生じやすいポケット等に入れたり、読み取る際に指が当たる等して歪みが生じたまま読み込みを行う場合がある。そのような状況で、印刷媒体の歪みが2次元コード上にまたがっている場合は復号が困難となる。

QRコードにおける位置検出パターンやアライメントパターンに代表されるように、2次元コードは一般に、射影変換による歪みや緩やかな幾何歪みが生じた場合であっても復号を行えるような機能パターンを含む。アライメントパターンは7型以上のQRコードであれば 3×3 以上の格子状に配置されるが、6型以下のQRコード^{*1}の場合は、位置検出パターンと合わせて四隅に1カ所ずつのみパターンを持つ。このため、コード全体が均一に歪んでいる場合は復号を行えるものの、複雑な歪みが生じると補正を行うことは困難である。また、大域的に滑らかな歪みを画像処理によって補正する技術[1]が提案されているものの、不均一かつ局所的な歪みの補正は困難である。

以上のような背景のもと、著者らは2次元コードに補助線を付与することで複雑な幾何歪みに頑健な2次元コードを提案した[2], [3]。複数の色で着色された補助線を用いることで、局所的な情報のみから補助線のIDを認識し、周囲のモジュールの2次元コード内の位置を同定できる点に特徴があった。また、印刷等の利便性を高めるために、単色の補助線を付与した2次元コードの提案も行った[4], [5]。しかし、補助線の種類が単一であるために局所的な情報のみからモジュールの位置を同定することが難しく、歪みによって生じる自己遮蔽^{*2}に対して脆弱であるという欠点があった。また、単色補助線の認識を行えるように、モジュールの境界領域を平滑化しているために、灰色等の中間的な

階調値を含んでおり、感熱印刷が困難であった。

このため、本研究では、2次元コードに白黒2階調かつ複数パターンの補助線を付与することで、複雑に歪んだ場合であっても復号が可能な2次元コードと、その復号方式を提案する。提案する2次元コードは、ベースとなる2次元コードと互換性を持ち、歪んでいない場合は一般的なデコーダで読み取ることができる。また、局所的な歪みや遮蔽領域が生じた場合は、提案する復号方式により、補助線の認識を行うことで、2次元コードを構成する白黒のモジュールの位置を推定することができ、復号が可能となる。付与する補助線は単色で白黒2階調のみで構成されるため、レシート等の感熱印刷でも利用が可能である。

本研究で提案する2次元コードは、水平垂直方向にそれぞれ2種類、合計4種類の補助線を2次元コードに付与する。これにより、局所的な情報、すなわち、連続する3本の補助線パターンのみから2次元コード全体における位置を知ることができ、モジュール位置の同定を行えるため、1種類の補助線のみを用いる場合と比較して遮蔽に対する頑健性が向上する。これらの補助線パターンは、ブラックボックス最適化手法の1つである確率モデル遺伝的アルゴリズム (Probabilistic Model-Building Genetic Algorithm: PMBGA) [6], [7] を用いて設計する。

また、本研究で提案する復号方式は、補助線を安定的に検出および識別するため、画像認識に広く使われる機械学習のモデルである全層畳み込みネットワーク (Fully Convolutional Network: FCN) [8] を用いて行う。また、検出した補助線のIDの識別は、マルコフ確率場として定式化し、確率伝播法 (Belief Propagation: BP) [10], [11], [24]^{*3}により解くことで行う。これにより、自己遮蔽を生じさせるような激しい幾何歪みを含む2次元コードであっても復号を行うことができる。

本研究の貢献は以下のとおりである。

- カラーを利用しない白黒2階調の補助線が付与された2次元コードを提案する。先行研究[3], [4]と比較して、レシート等の感熱印刷でも利用可能である。
- 歪みに頑健な白黒2階調の補助線入りの2次元コードを提案する。先行研究[4], [5]と比較して、縦横2種類合計4種類の補助線を利用するため、局所的な情報から補助線の認識を行い、モジュールの同定を行える。PMBGAを利用することで、互いに類似しないパターンを持つ補助線を設計する。
- FCNにより補助線を認識し、復号を行う方式を提案

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

² 九州大学大学院システム情報科学研究院情報知能工学部門
Graduate School and Faculty of Information Science and Electrical Engineering, Kyushu University, Fukuoka 819-0395, Japan

a) sc113017@ibe.kagoshima-u.ac.jp

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

^{*1} 型番が6のQRコードは、誤り訂正レベルがHの場合、英数字であれば84字までの情報を埋め込むことができる。このため、型番が6以下のQRコードであっても一般的な用途に対して十分な容量を備えており、広く利用されている。

^{*2} 2次元コードが激しく歪んだ場合に、2次元コード自身の一部が折れ曲がることで他の一部のモジュールが視認できない状況を本論文では自己遮蔽と呼ぶ。

^{*3} BPは、信念伝播法、信頼度伝播法とも訳される。

する．これにより補助線が複雑に歪んでしまった場合であっても，高精度で補助線の抽出が可能となる．

以下，2章では関連研究について述べ，3章では，提案する補助線入り2次元コードとその設計方法，および，提案する復号方式について説明する．4章では評価実験を行い，提案する方式の有効性について検証する．

2. 研究分野の概要

2.1 2次元コードの一般的な復号

2.1.1 一般的な復号手順

本節では，2次元コードの代表例としてQRコードに着目し，その復号手順について概説する．一般的なQRコードの復号方式は，まず，QRコードの四隅のうち3カ所に配置されている位置検出パターンのそれぞれ中心3点を検出し，図1に示すように，これらの点を結んだ直線に平行な格子パターン（サンプリンググリッド）を求める．次に，サンプリンググリッドの各交点をサンプリング点とし，各サンプリング点の座標の明暗を取得することでQRコードの符号情報を取得する．符号情報はリードソロモン符号により符号化されているため，これを復号することでQRコードに埋め込まれた情報を取得できる．以上のように，QRコードは位置検出パターンを利用することでアフィン変換で表現される歪みに対して頑健であり，また，アライメントパターンを参照することで射影変換に対しても頑健となる．しかし，図2に示すように，QRコード上に非線形な歪みが存在する場合，実際のモジュールの位置とサンプリング点に差異が生じ，モジュールの明暗を正しく取得できず，復号が困難になる．

2.1.2 均一な歪みに関する復号方式

軽度の幾何学的な歪みを射影変換等の画像処理によって補正する方式が提案されている [12], [13], [14], [15], [16].

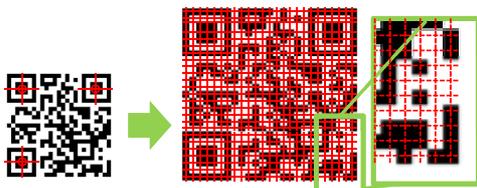


図1 QRコードにおけるサンプリンググリッドの例

Fig. 1 Example of a sampling grid for QR code decoding.

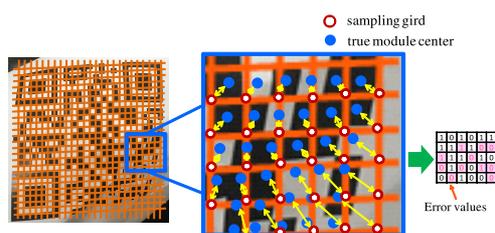


図2 QRコードにおけるサンプリングの失敗の例

Fig. 2 Failure example of module value sampling.

また，QRコードのエッジからモジュール位置を推定することで，QRコードが緩やかに歪曲している場合でも読み取りが可能な復号方式も提案されている [13], [17].

2.2 複雑な歪みに関する復号方式

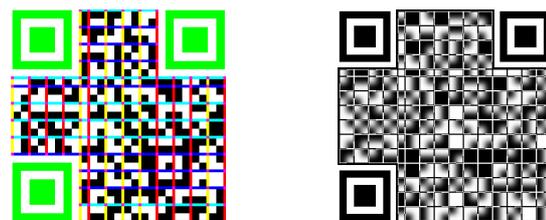
2.2.1 カラー補助線を利用する方式

先行研究 [2], [3] では，着色された格子状の補助線を付与した2次元コード（図3(a)）が提案され，複雑な歪みや自己遮蔽領域がある場合でも復号が可能であることが確認されている．上記の着色された補助線はダブルイン系列 [18], [19] に基づいた色パターンで構成されている．たとえば，水平方向の補助線は青（B）とシアン（C）から構成され，C-B-B-B-C-B-C-Cの周期的なパターンを持つ．これにより，連続する3本の局所的な補助線の色情報のみから3本の補助線のIDを取得することができる．補助線IDを知ることによって，補助線の周囲にある2次元コードのモジュールが，2次元コード内のどの位置に存在するモジュールであるかを知ることができ，サンプリンググリッドを作成できなくともモジュールの値を取得することが可能となる．

また，文献 [2] では，動的計画法によるマッチング（Dynamic Programming Matching：DPM）により一部の補助線が欠損した際にも補助線のIDの推定を行う方法を提案している．文献 [3] では，補助線IDの推定をメッセージ伝搬を用いたBPを用いて，色情報を用いたコスト関数を最適化することで縦線と横線の交点にラベル割当てを行う方法を提案している．しかし，上記の2次元コードは，着色された補助線を使用するため，カラーチャンネル間でクロストークが発生するような照明環境下で使用することが困難であり，また，多色印刷を行うことが必要となるといった問題がある．

2.2.2 単色補助線を利用する方式

上記の着色された補助線を用いる方式の問題点を解決するために，図3(b)に示すような，単色の補助線を用いる2次元コードが提案されている [4], [5]. この2次元コードは，補助線を付与する領域の階調値を反転することで補助線を形成し，また，補助線が存在しない領域のモジュールの境界を平滑化することで，補助線の検出を容易にしてい



(a) 2D code using colored auxiliary lines [2], [3]

(b) 2D code using monochrome auxiliary lines [4], [5]

図3 先行研究で提案された補助線入り2次元コード

Fig. 3 2D codes with auxiliary lines proposed in previous work.

る。中村らは、図 3(b) に示す 2 次元コードにおいて、マルチエージェントシミュレーションにより補助線の検出と認識を行い、復号を行う方式を提案している。また、上鶴らは、上記の 2 次元コードにおける補助線を、局所 2 値パターン (Local Binary Pattern : LBP) [9] と指向性の強いモルフォロジ処理を用いることで検出し、BP を用いて補助線 ID の認識を行う方式を提案した。

上記の 2 次元コードは、単色印刷で印刷を行えるものの、デブルーイン系列による局所的な補助線の情報が利用できないために自己遮蔽に対して脆弱となってしまう。また、単色で印刷できるものの、中間階調を滑らかに表現する必要があるため、感熱印刷のような白黒 2 階調の印刷で利用することが難しい。

3. 提案方式

3.1 基本アイデア

本研究で提案する歪みに頑健な 2 次元コードとその復号方式は、以下の基本アイデアに基づいている。

1. 白黒 2 色のみからなる 4 種類の補助線を付与

2 次元コードが歪んだ際にもモジュール位置を同定できるように、白黒 2 色で構成された補助線を、2 次元コードに付与する。特に本研究では、先行研究 [4], [5] で用いた補助線とは異なり、水平垂直各方向に 2 種類ずつ、合計 4 種類の補助線を利用する。すなわち、デブルーイン系列 [18], [19] に従って異なる補助線を配置することで、着色された補助線を用いる方式 [3] と同様に、局所的な情報のみから補助線 ID を識別することができる。これにより、単一種類の補助線を利用する場合と比較して、2 次元コードが激しく歪み、自己遮蔽が生じた場合であっても、モジュール位置の同定を行うことが可能となる。

2. 互いに類似しないパターンを持つ補助線を組合せ最適化により設計

上記の 1. を実現するために、2 次元コードの限られた領域内で、互いに類似せず、かつ、2 次元コードモジュールとも類似しない 4 種類の補助線のパターンを設計する必要がある。このため、本研究では、4 種類の補助線を構成する白黒 2 色によるパターンを設計する問題を組合せ最適化問題として定式化し、PMBGA を用いることで、上記 4 種類の補助線の設計を行う。通常の遺伝的アルゴリズムよりも探索性能に優れた PMBGA を利用することにより、より識別されやすい補助線の設計を試みる。

3. 全層畳み込みネットワーク (Fully Convolutional Networks : FCN) [8] を用いた補助線検出

白黒 2 値の補助線を利用する先行研究 [4], [5] では、補助線を安定的に検出する技術の実現に課題を残していた。このため、本研究では、画像の領域分割で高い性能

を示す FCN を用いて補助線の検出を行う。学習に必要な訓練データは、コンピュータグラフィクス (CG) により大量に生成することが可能である。FCN を利用することで、高精度、高解像度で、かつ、安定的に補助線領域を検出することが可能となる。

4. マルコフ確率場 (Markov Random Field : MRF) を用いた補助線 ID 認識と、それによるモジュール位置同定

本研究では、水平垂直各方向で 2 種類の補助線を用いるため、カラー補助線を用いる先行研究 [3] と同様に、補助線の ID を認識する問題を MRF として定式化する。これを BP により解くことで補助線に ID を付与する。補助線 ID が付与されることで、補助線の周囲のモジュールの位置の同定、すなわち、当該モジュールの 2 次元コード内における位置を得ることができ、単一種類の補助線のみを用いる方式 [5] と比較して、補助線の種類に基づくコストを設定することが可能となるため、より安定的に補助線 ID を識別することが可能となる。また、水平方向と垂直方向の補助線 ID の推定を個別に行う必要がある DPM [2] と比較すると、BP を適用することで、互いの推定過程を参照しながら水平および垂直方向の補助線 ID を同時に推定できる点に特徴がある。

3.2 提案方式の全体像

本研究で提案する方式の全体像を図 4 に示す。提案する方式は、補助線設計方式 (3.4 節)、補助線検出器学習方式 (3.5 節)、および、2 次元コード復号方式 (3.6 節) の 3 種類の方式から構成され、事前に 2 次元コードに付与する補助線の設計、および、補助線の検出器の学習を行う設計・学習段階と、実際に歪んだ 2 次元コードの復号を行う運用段階からなる。2 次元コード復元方式は、設計・学習段階で学習された補助線検出器を用いて補助線の検出を行い、検出された補助線の ID の認識とモジュール位置の同定を行い、歪みのない 2 次元コードを復元した後に復号を行う。

なお、補助線設計方式は、QR コードやデータマトリクス等の 2 次元コードの種類それぞれに対して 1 度のみ実行すればよく、また、補助線検出器学習方式は、モジュール数や機能パターンを定義する型番ごとに 1 度のみ実行すればよい。すなわち、同一種類の 2 次元コードに対しては同一補助線組が共通して有効であり、また、同一型番の 2 次元コードに対しては、同一の補助線検出器が利用できる*4。

3.3 補助線入り 2 次元コード

本研究で用いる補助線入り 2 次元コードを図 5 に示す。

*4 ある型番の 2 次元コードに対して学習を行った補助線検出器の、他の型番の 2 次元コードに対する有効性は未知であり、これを明らかにすることは本研究の今後の課題である。

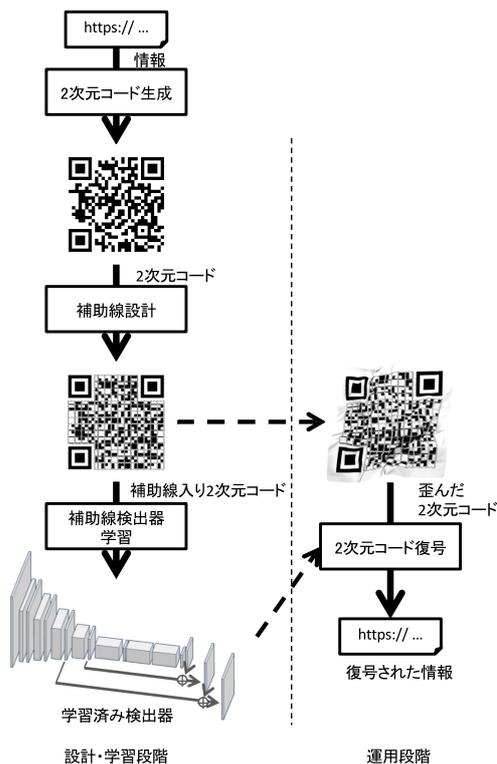


図 4 提案する方式の全体像
Fig. 4 Overview of the proposed method.

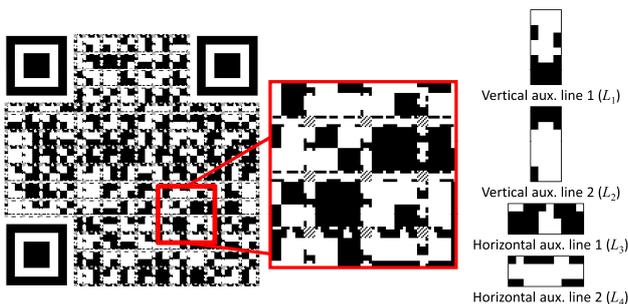


図 5 本方式で用いる補助線入り 2次元コード
Fig. 5 The proposed 2D code involving auxiliary lines.

本研究では白黒 2 階調のパターンからなる補助線を付加した 2次元コードを提案する。補助線は水平、垂直方向にそれぞれ任意の間隔で配置が可能であり、本論文では 2 モジュール間隔で配置する。ただし、一辺のモジュール数が奇数となる場合は、水平、垂直方向にそれぞれ 1 カ所ずつ、1 モジュール間隔で補助線が配置される箇所が存在する。本研究で提案する 2次元コードの補助線は、垂直方向の 2 種類の補助線 L_1, L_2 および水平方向の 2 種類の補助線 L_3, L_4 の合計 4 種類の補助線を設けることとする。各方向における補助線の配置は、先行研究 [2], [3] と同様に、隣接する平行な補助線 8 本を 1 周期とするデブルーイン系列に基づいて付与する。これにより、自己遮蔽等が生じた場合であっても、3 本の補助線のパターンの組合せのみから補助線の ID を推定することが可能となる。補助線の幅は、2次元コードを構成する 1 モジュールの一辺の 40%と

する。また、各補助線は幅 4 画素、長さ 10 画素のパターンを、長さ方向に繰り返し配置することで構成される。すなわち、モジュールの一辺が 10 画素となる 2次元コード画像に、幅 4 画素の補助線を埋め込むこととなる。一般的な 2次元コードのデコーダは、モジュールの中心に位置する画素をサンプリングすることから、提案する 2次元コードは上記のような補助線を含んでいるものの、従来のデコーダにより復号が可能である。なお、補助線の交点には、高周波の斜め成分のパターンを付与する。

3.4 確率モデル遺伝的アルゴリズムを用いた補助線の設計

補助線パターンを生成する問題は対称性を有するため、大域的に多峰性の適応度景観を持つ。このため、本研究では、2次元コードに付与する白黒 2 階調の補助線のパターンを、PMBGA を用いて設計する。PMBGA は、解候補を直接探索するかわりに、良好な解候補の分布を表現する確率分布を最適化する遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm: GA) である。PMBGA は選択圧が高く高速に準最適な解に収束することから、本問題に好適である。

3.4.1 個体表現

本研究では、白黒 2 階調の補助線を、 4×10 画素のパターンの繰り返しにより表現する。また、垂直、水平各方向に 2 種類ずつの補助線 L_k ($k = 1, \dots, 4$) を表現するため、上記 4×10 画素のパターンを合計 4 種類生成する (図 7)。補助線設計問題は、4 種類の補助線の各画素の値 (2 値) を決定する問題となり、 $N_D = 160$ 次元の設計変数 $\mathbf{x} = \{x_1, \dots, x_{N_D}\}$ を持つ。PMBGA の個体 j の染色体 $\mathbf{x}_{j,i} = \{x_{j,1}, \dots, x_{j,N_D}\}$ の長さも 160 となる*5。

本研究で用いる PMBGA では、各設計変数 x_i に対して、パラメータ θ_i を持つ確率分布 $p(x_i|\theta_i)$ を個別に設ける。この確率分布はベルヌーイ分布に従うこととし、 $p(x_i = 1) = \theta_i$, $p(x_i = 0) = 1 - \theta_i$ となる。 $x_{j,i}$ の値が 0 の場合は白、1 の場合は黒の画素を該当する位置に配置することで補助線 L_k を表現する。

3.4.2 目的関数

本方式における目的関数は以下の式で定義される。

$$F(\mathbf{x}) = \alpha f_1(\mathbf{x}) + (1 - \alpha) f_2(\mathbf{x}) - P(\mathbf{x}) \quad (1)$$

$f_1(\cdot)$ は補助線どうしの距離 (非類似性) に関する関数であり $f_2(\cdot)$ は補助線と 2次元コードのモジュール領域との距離に関する関数である。 α は上記 2 つの要素のバランスをとるパラメータである。本問題は最大化問題である。 $P(\mathbf{x})$ は 3.4.3 項で述べる制約条件を満たさない場合に課せられるペナルティ関数である。

補助線間の距離 $f_1(\cdot)$ は、補助線に画像変換を施し、様々

*5 本論文では、 x_i と表記する場合は i 番目の設計変数であることを示し、 $x_{j,i}$ と表記する場合は、個体 j の遺伝子 i であることを示す。

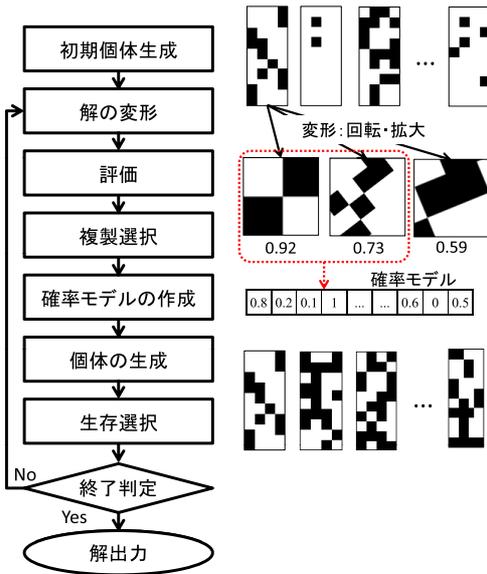


図 6 補助線設計の処理手順
Fig. 6 Process flow of auxiliary line design.

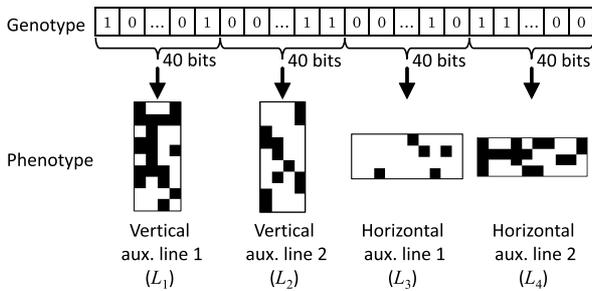


図 7 補助線を設計する PMBGA における個体表現
Fig. 7 Chromosome representation for auxiliary line design.

な条件下での非類似性をもとに算出する。

$$f_1(\mathbf{x}) = \frac{\sum_{i=1}^{4-1} \sum_{j=i+1}^4 \sum_{k=1}^{N_{trans}} SAD_{\mathcal{R}_{t_k(L_i) \cap L_j}}(t_k(L_i), L_j)}{4C_2 \times N_{trans}} \quad (2)$$

ここで、 L_i は候補補 \mathbf{x} の表現型である補助線パターン画像を指し^{*6}、 $t_k(\cdot)$ は回転、拡大縮小、平行移動の組合せからなる画像変換である。 $SAD(\cdot)$ は画素値の差分の絶対値の和に基づく距離を返す関数である^{*7}。

$$SAD_{\mathcal{R}}(I_1, I_2) = \frac{1}{|\mathcal{R}| \times N_G} \sum_{b \in \mathcal{R}} |I_1(b) - I_2(b)| \quad (3)$$

ここで、 $I_a(b)$ は画像 I_a における画素 b の輝度値を表し、 \mathcal{R} は画像間の距離を算出する対象画像領域を表す。また、 N_G は画像の階調数を表す。 $f_1(\cdot)$ において、補助線パターンに画像変換を適用するため、 $t_k(L_i)$ と L_j は重複しない領域を持つこととなる。このため、 $SAD(\cdot)$ を計算する際

^{*6} L_i, L_j は \mathbf{x} の関数であることから、より正確には $L_i(\mathbf{x}), L_j(\mathbf{x})$ と記述すべきであるが、式 (2) 全体の理解の容易さを優先して単に L_i, L_j と表記する。

^{*7} L_i, L_j は白黒 2 値からなる画像であるが、 $t_k(\cdot)$ によるアンチエイリアシングを行った場合にも対応できるように SAD を用いる。

は、2 本の補助線画像が重複する領域 $\mathcal{R}_{t_k(L_i) \cap L_j}$ 内の画素についてのみ考慮する。 N_{trans} は補助線に対して変換を行い、比較を行う回数である。

補助線と 2 次元コードのモジュール領域との距離 $f_2(\cdot)$ は、以下の式で定義する。

$$f_2(\mathbf{x}) = \frac{\sum_{m=1}^{N_{bg}} \sum_{n=1}^{N_{trans}} SAD_{t_n(L_m)}(t_n(L_m), Q_m)}{N_{bg} \times N_{trans}} \quad (4)$$

ここで、 Q_m は補助線を埋め込む対象となる 2 次元コード内からランダムに選択された領域の画像である。2 次元コード内の補助線が存在しない領域と補助線パターンとの非類似性を最大化するために、 N_{bg} カ所の領域をランダムに選択して補助線パターンと比較する。 Q_m は $t_n(L_m)$ を内包する十分な大きさを持つ画像領域とし、 $f_2(\cdot)$ において $SAD(\cdot)$ を計算する際は、 $t_n(L_m)$ の領域 $\mathcal{R}_{t_n(L_m)}$ 内の画素に対してのみ計算を行う。

3.4.3 制約条件

本研究では、補助線検出器が検出および識別をより容易に行える補助線を生成するために、以下の 3 つの制約条件 g_1, g_2, g_3 を課し、違反する個体に対してはペナルティ $P(\mathbf{x})$ を目的関数から減じる。

$$P(\mathbf{x}) = \sum_{k=1}^3 \gamma_k g_k(\mathbf{x}) \quad (5)$$

(1) 制約 g_1 ：補助線領域におけるの黒色の画素の割合が 6 割以上となること。

$$g_1(\mathbf{x}) = \begin{cases} 0 & \text{if } \sum_{x_i \in \mathbf{x}} x_i \geq 0.6 \times N_D \\ 0.1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

(2) 制約 g_2 ：補助線の境界部分が白黒双方の画素を含むこと。

$$g_2(\mathbf{x}) = \begin{cases} 0 & \text{if } \forall \mathcal{B}_j \in \mathbf{x} (1 \leq \sum_{x_i \in \mathcal{B}_j} x_i \leq 9) \\ 0.1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

ここで、 \mathcal{B}_j は補助線の境界領域、すなわち、4 画素幅の補助線における両端の 1 画素幅の領域 (1×10 画素の領域) を指す ($j = 1, \dots, 8$)。

(3) 制約 g_3 ：任意の画素の周囲に同色の画素が存在すること。

$$g_3(\mathbf{x}) = |\{x_i | x_i \in \mathbf{x} \wedge \neg(\exists x_j \in \mathcal{N}(x_i) (x_i = x_j))\}| \quad (8)$$

ここで、 $\mathcal{N}(x_i)$ は、 x_i に該当する画素の近傍の画素に該当する変数の集合を指す。 $g_3(\cdot)$ は、近傍に同色の画素が存在しない画素の総数を返す。

なお、 γ_k は g_k に関するペナルティの重みである。

3.4.4 処理手順

補助線パターン設計の処理手順を図 6 に示す。PMBGA は、確率分布に従った解候補群のサンプリング、有望な解候補群の選択。および、選択された解候補群に基づく確率分布パラメータの更新の繰り返しにより最適化を行う。パラメータ θ_i の更新は、良好な解候補における変数 x_i の値の平均値を θ_i に代入することで行う。

$$\theta_i = \frac{1}{N_S} \sum_j x_{j,i} \quad (9)$$

ここで、 $x_{j,i}$ は個体 j の i 番目の遺伝子（設計変数 i に相当）を表し、 N_S はサンプル数（個体数）を表す。

なお、PMBGA において、 θ_i が 0 または 1 に収束することによって、個体集団内の多様性が失われる。このため、本研究ではリスタート戦略を組み合わせる。個体の進化が停滞した場合、すなわち、全個体の 8 割の個体が同一の染色体を持つ場合、すべての θ_i を 0.5 とする。次に個体がサンプリングされる際に、初期集団生成時と同様にランダムに個体を生成することとなり、再度大域的な探索が行われる。あらかじめ定められた世代数の処理を繰り返した時点で、それまでに得られた最良の解を出力し、アルゴリズムを終了する。

3.5 全層畳み込みネットワークによる補助線検出器の学習

3.5.1 全層畳み込みネットワーク

FCN は、畳み込みニューラルネットワーク (Convolutional Neural Network: CNN) における全結合層を除外したアーキテクチャを持ち、任意の画像サイズを対象として意味論的領域分割 (Semantic segmentation) を行うことができる [8]。いくつかの層をバイパスするスキップ結合 [20] により正確で詳細な領域分割が行えるほか、移動窓ベースの手法 [21] と比較して、より大域的な情報を利用することができる、より効率的に学習や推論が行える等の特徴がある。

提案する 2 次元コード復号方式で利用する FCN の構成は、文献 [8] と同様の構造である。通常の CNN における最終層の全結合層を畳み込み層に変更し、スキップ結合を付加することで、上位と下位の特徴マップを結合する形をとる。

3.5.2 シミュレーションによる学習データの作成

FCN は教師有り学習を行うため、教師信号付きの訓練データが必要となる。本研究では、CG を用いて、以下の手順で訓練データを作成する。まず、折り紙シミュレータを用いて紙特有のしわや歪みを含む 3 次元データを生成する。次に、作成した 3 次元形状に補助線入 2 次元コードの画像をテクスチャとして貼り付けることで歪んだ 2 次元コードを生成する。このようにして作成された歪んだ 2 次元コードを仮想的に撮影することで、図 8 (a) に示すような訓練用の 2 次元コード画像を取得する。このとき、3 次

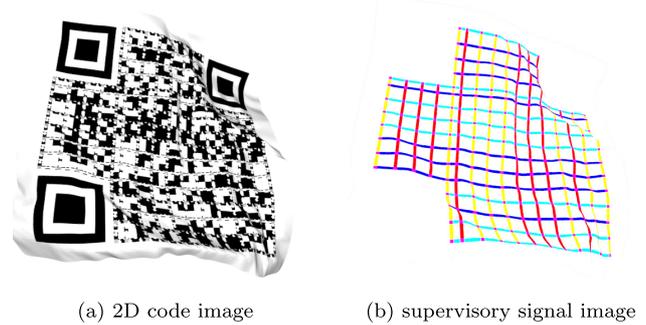


図 8 訓練用画像の例

Fig. 8 Example images used for training.

元形状にテクスチャを貼る位置やスケールを変更することで、単一の 3 次元形状から多数の歪んだ 2 次元コードを生成することが可能となる。さらに、照明条件の変化に頑健な補助線検出器を生成するため、照明条件を変化させて撮影を行う。

教師信号画像 (図 8 (b)) は、学習器に補助線の所在を画素単位で教示するための画像であり、3 次元データに貼付するテクスチャを変更することで生成できる。すなわち、4 種類の補助線領域に着色を行った画像を用意し、これをテクスチャとして 2 次元コードと同じ座標、サイズ、角度で貼り付け、同じ視点から撮影を行うことで生成することができる。

3.5.3 補助線検出器の学習

提案方式で利用する FCN は、VGG16 [22] の最終層を畳み込み層に置き換えたアーキテクチャを持つ。補助線検出は一般の画像認識と比較して容易なタスクであり、画像認識用ニューラルネットワークの入力に近い層に、補助線検出に寄与するフィルタを備えている可能性が高いことから、VGG16 の学習済みモデルを初期状態として利用する。学習を行う際は、3.5.2 項で述べた教師信号付き訓練画像を用い、クロスエントロピー損失関数を Adam を用いて最適化することで学習を行う。

3.6 歪んだ 2 次元コードの復号

3.6.1 処理手順

Step 1: 2 次元コードの検出

撮影画像内から 2 次元コードを検出する。本研究で対象とする 2 次元コードは複雑に歪んでいることから、位置検出パターンの認識が困難となることがある。このため、位置検出パターンを検出するかわりに、Center Surround Extremas (CenSurE) 特徴検出器 [23] を用いて 2 次元コードを検出する。CenSurE 検出器は大小の星形範囲の符号をそれぞれ符号を変えて重ね合わせたフィルタを利用して特徴点を検出する検出器である。回転やスケール変化に不変であり、2 次元コードのモ

ジュールを検出することができるため、検出された特徴点が密集する領域を2次元コード領域と見なすことができる [3].

Step 2: 補助線の検出

3.5 節で述べた方式により構築した補助線検出器を用いて、補助線の検出を行う。すなわち、各画素が、4種類の補助線 L_k ($k = 1, \dots, 4$) のいずれか、補助線の交点、または、その他の領域 (モジュール等) の6種類のいずれかに該当するかを判別する。

Step 3: 補助線 ID の推定

BP を用いることで、補助線の ID の推定を行う。詳細を 3.6.2 項に示す。

Step 4: 各モジュールの領域および明暗の取得, 復号

検出された補助線とその交点をもとに2次元コードの復元を行う。画像から検出に失敗した交点は、他の交点から線形的に補間することで位置を推定する [3]. 補助線に囲まれた領域を分割することでモジュールの領域を取得する。モジュールの周囲の補助線 ID より、当該モジュールが2次元コード内のどの位置に存在するモジュールであるかを判別することができる。また、各モジュールの明暗を輝度値から判定する。以上より、歪みのない2次元コードを復元することができ、2次元コードに埋め込まれた情報の復号も可能となる。

3.6.2 確率伝播法による補助線 ID の推定

提案する復号方式では、モジュールの領域取得に必要な補助線 ID の認識を、MRF としてモデル化し、BP により解く。その詳細を以下に示す。

補助線の縦線と横線の交点をノードとし、2つのノードを結ぶ補助線をエッジとする。 p, q をノード番号、ノード p における縦線 ID と横線 ID のペア $(l_{p,h}, l_{p,v})$ をラベル l_p とする。ここで、縦線 ID および横線 ID は、それぞれ、2次元コードの左側および上側から何番目の補助線であるかを表す整数である。

MRF において一般に、エネルギー関数 $E(\mathbf{y})$ は以下のように表される。

$$E(\mathbf{y}) = \sum_{p \in \mathcal{V}} d_p(l_p) + \sum_{\{p,q\} \in \mathcal{E}} V_{pq}(l_p, l_q) \quad (10)$$

\mathcal{V} はノードの集合、 \mathcal{E} はエッジの集合である。本問題では、 $\mathbf{y} = \{l_1, \dots, l_N\}$ は割り当てられるラベル組の候補となる*8。 \mathbf{y} の事後確率 $p(\mathbf{y})$ は $p(\mathbf{y}) = \frac{1}{Z} e^{-E(\mathbf{y})}$ となる (Z は正規化定数)。ラベルの総数 N_L はノードの総数 $|\mathcal{V}|$ に等しい。ノード p は座標 (x_p, y_p) および p を形成する縦線、横線の線種ラベル情報を観測データとして持つ*9。

データコスト $d_p(l_p)$ は、観測データと割当てラベルの矛

*8 式 (2) の L_i と同様、本来は $l_p(\mathbf{y})$ と表記すべきであるが、式 (10) の理解の容易さを優先して単に l_p と表記する。

*9 本節においてのみ、 x_p は、3.4 節の設計変数 x_i とは異なり、ノード p の x 座標を表すこととする。

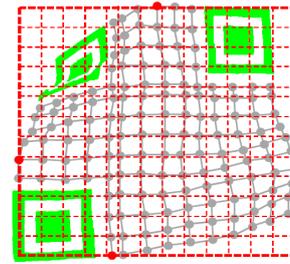


図 9 ノードの推定位置 $(x^e(l_p), y^e(l_p))$

Fig. 9 Estimated node positions $(x^e(l_p), y^e(l_p))$.

盾により以下のように定義する。

$$d_p(l_p) = \frac{1}{4} \left\{ \frac{|x^e(l_p) - x_p|}{x_{max} - x_{min}} + \frac{|y^e(l_p) - y_p|}{y_{max} - y_{min}} + \delta(c_{p,h}^{obs}, c(l_{p,h})) + \delta(c_{p,v}^{obs}, c(l_{p,v})) \right\} \quad (11)$$

ここで $(x^e(l_p), y^e(l_p))$ は推定されたラベル l_p の座標であり、 $c_{p,h}^{obs}, c_{p,v}^{obs}$ は交点 p を形成する縦線と横線それぞれの観測された線種 (L_1, \dots, L_4) である。また、 $x_{max} = \max_{p \in \mathcal{V}} x_p, x_{min} = \min_{p \in \mathcal{V}} x_p, y_{max} = \max_{p \in \mathcal{V}} y_p, y_{min} = \min_{p \in \mathcal{V}} y_p$ とする。 $(x^e(l_p), y^e(l_p))$ は、図 9 に示すような、 $(x_{min}, y_{min}), (x_{min}, y_{max}), (x_{max}, y_{max}), (x_{max}, y_{min})$ を頂点とする矩形において、歪みがない場合のノード p の座標を示しており、上記の矩形を線形分割することで推定される。 $c(l_{p,h}), c(l_{p,v})$ は $l_{p,h}, l_{p,v}$ に割り当てられた正しい線種である。 $\delta(\cdot)$ は2つの線種が合致する場合に0を返し、合致しない場合に1を返す。式 (11) 右辺の中括弧内では、第1項、第2項が座標の差に基づくコストを表しており、第3項、第4項が補助線の種類の差に基づくコストを表している。

不連続コスト $V_{pq}(l_p, l_q)$ は、隣接するノード間の矛盾により定義する。ここでは水平方向で隣接するノード p, q について考えることとする。

$$V_{pq}(l_p, l_q) = |l_{p,h} - l_{q,h}| + \delta(c_h(l_p), c_h(l_q)) + \Delta_L(l_{p,v}, l_{q,v}) + \Delta_P(l_{p,v}, l_{q,v}) \quad (12)$$

第1項は、ラベル l_p と l_q が同一補助線上にあるかを評価しており、適切なラベルが割り当てられている場合は第1項は0になる。第2項は、ラベル l_p と l_q の補助線の線種が一致するかを評価する。第3項はラベル l_p と l_q が連続であるかどうか、第4項はラベル l_p と l_q の間隔が適切かを表している。 $\Delta_L(l_{p,v}, l_{q,v})$ は、ラベル l_p と l_q との連続性を示す関数であり、以下のように定義する。

$$\Delta_L(l_{p,v}, l_{q,v}) = \begin{cases} 0 & \text{if } |l_{p,v} - l_{q,v}| = 1 \\ |l_{p,v} - l_{q,v} - 1| & \text{otherwise} \end{cases} \quad (13)$$

すなわち、 $l_{p,v}$ および $l_{q,v}$ が連続している縦線 ID を持つ場

合は0を返し、それ以外の場合は $|l_{p,v} - l_{q,v} - 1|$ の値をコストとして返す。 $\Delta_P(\cdot)$ は画像上の距離に基づいたコストであり、以下のように定義する。

$$\Delta_P(l_{p,v}, l_{q,v}) = \begin{cases} 0 & \text{if } |l_{p,v} - l_{q,v}| = 1 \\ & \wedge \frac{|x_p - x_q|}{x_{max} - x_{min}} < \bar{x}^e \\ |x_p - x_q| & \text{otherwise} \end{cases} \quad (14)$$

すなわち、もし p と q が連続したラベルを割り当てられ、座標間隔が推定された間隔 \bar{x}^e 以下であれば $\Delta_P(\cdot)$ は0を返し、それ以外の場合はコストを課す。

提案方式では、以上のように定義された問題を、Loopy BP [24] を用いて解く。すなわち、以下のように定義されるノード p から q へのメッセージ $m_{p \rightarrow q}$ の伝播を繰り返すことで、式 (10) で示されるエネルギー関数が最小となるラベル組 \mathbf{y} を求める。

$$m_{p \rightarrow q}^t = \min_{l_p \in \mathcal{L}} (V_{pq}(l_p, l_q) + H_{p \rightarrow q}^{t-1}(l_p))$$

$$H_{p \rightarrow q}^{t-1} = d_p(l_p) + \sum_{s \in \mathcal{M}(p) \setminus q} m_{s \rightarrow p}^{t-1}(l_p)$$

ここで、 t は BP のステップ数、 \mathcal{L} は全ラベル集合、 $\mathcal{M}(p)$ はノード p と隣接関係にあるノードの集合を表す。

4. 評価実験

提案する2次元コードおよび復号方式の有効性を検証するため、CGを用いた仮想環境および実撮影環境の双方において実験を行った。まず、3.4節で述べた補助線設計方式を用いて、4種類の補助線が埋め込まれた2次元コードを作成した(4.1節)。ベースとなる2次元コードとして、株式会社デンソーウェーブによって開発されたQRコードを用いることとした[25]。次に、生成した補助線入り2次元コードの歪みに対する頑健性を、先行研究で提案されたカラー補助線を用いる2次元コード[3]と比較した(4.2節)。このとき、2種類の2次元コードに対して同様に歪みを付与するために、仮想環境で実験を行った。最後に、提案方

式の有効性を実撮影環境下で検証した(4.3節)。

4.1 補助線入2次元コードの設計

3.4節で述べたPMBGAを用いた補助線設計方式により、2次元コードに埋め込む4種類の補助線の生成を試みた。世代数、個体数、子個体数をそれぞれ300、200、200とした。複製選択にはトーナメント選択を用い、トーナメントサイズを2とした。その他のパラメータは、 $\alpha = 0.7$ 、 $N_{trans} = 500$ 、 $N_{bg} = 500$ 、 $(\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3) = (0.1, 0.1, 0.01)$ とした。 $t_k(\cdot)$ による画像変換の範囲は、回転角度を最大45度、スケールを0.8倍から2.0倍、オフセット量を最大20画素とした。

集団中の最良個体の適応度の推移を図10に示す。図より、いったん集団が収束した場合であっても、リスタートを行うことによりわずかではあるが解の性能が改善していることが分かる。得られた最終世代における最良解をもとに作成した補助線入2次元コードを図5に示す。垂直方向の補助線 L_1, L_2 は、凹字型の塊の方向と、モジュール領域との境界における線に違いがみられる。水平方向の補助線に着目すると、 L_3 は幅の太い破線をなし、 L_4 は細い破

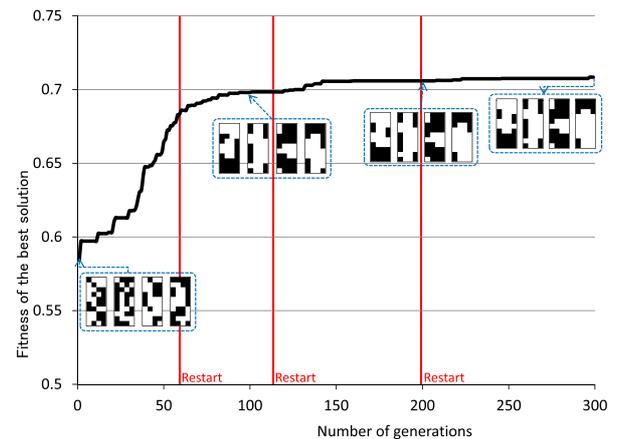


図10 PMBGAを用いた補助線設計における最良解の適応度の推移
Fig. 10 Fitness transitions of the best solution in auxiliary line design using PMBGA.

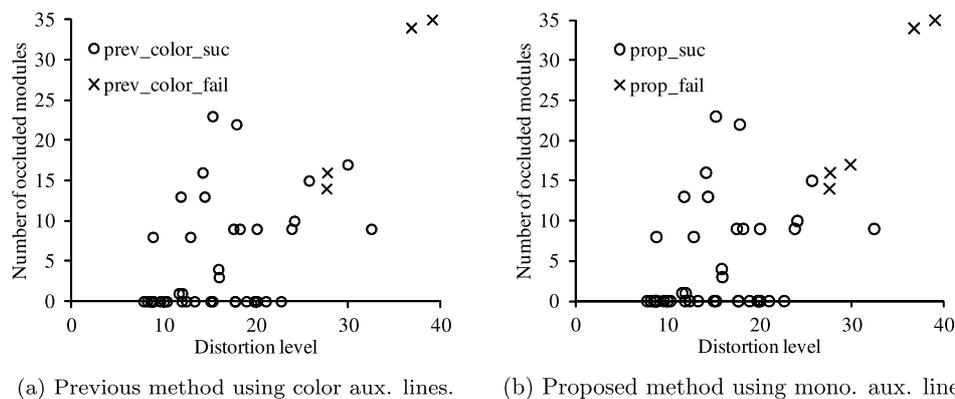
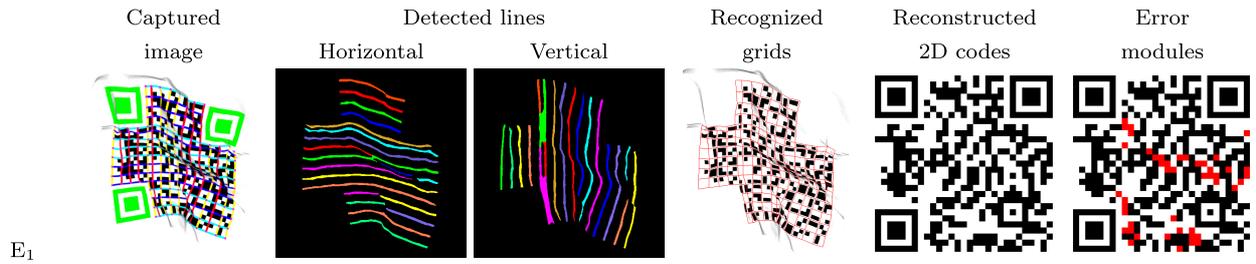
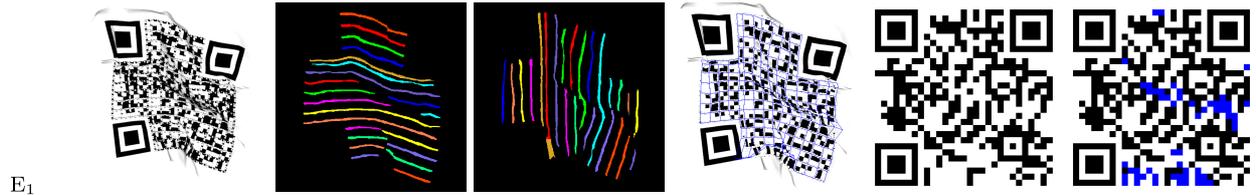


図11 従来方式[3]との比較(歪み量および自己遮蔽量と復号成否の関係)

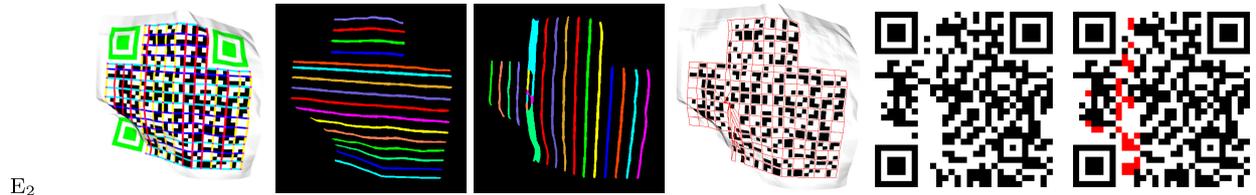
Fig. 11 Comparison with the previous work [3].



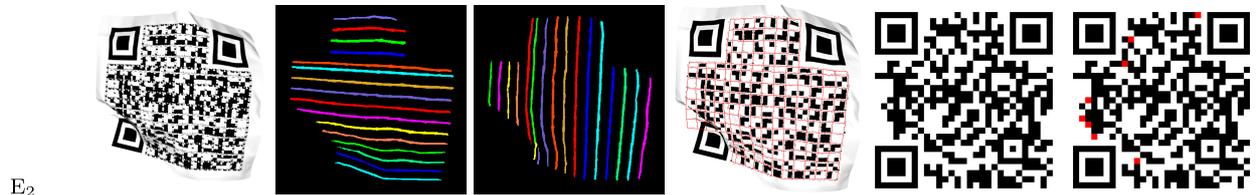
(a) Result of the previous method using colored auxiliary lines [3] on E_1 .



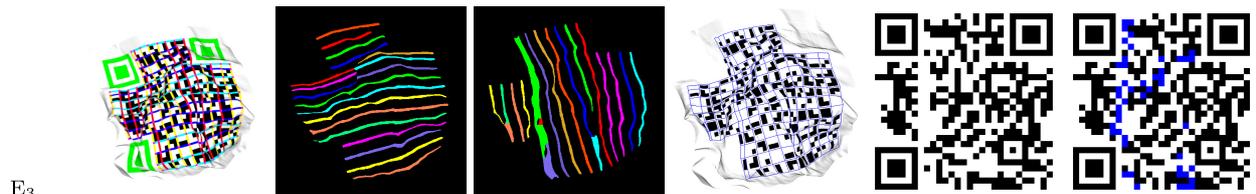
(b) Result of the proposed method using monochrome auxiliary lines on E_1 .



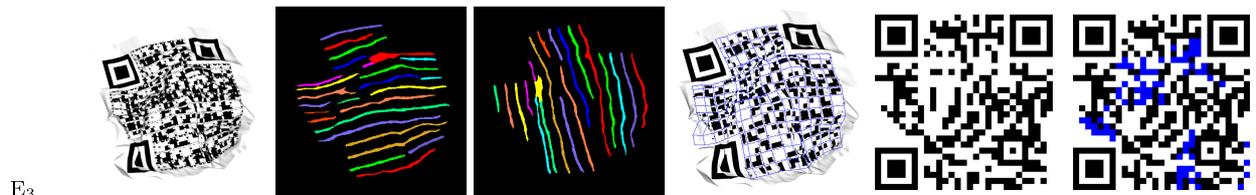
(c) Result of the previous method using colored auxiliary lines [3] on E_2 .



(d) Result of the proposed method using monochrome auxiliary lines on E_2 .



(e) Result of the previous method using colored auxiliary lines [3] on E_3 .



(f) Result of the proposed method using monochrome auxiliary lines on E_3 .

図 12 従来方式 [3] と提案手法との比較 (補助線検出結果)

Fig. 12 Comparison with the previous work [3].

線 2 本をなすため、より違いが顕著である。なお、これらのパターンに含まれる不規則さや非対称性は、認識に有効な特徴を構成していると考えられる。以後の実験では図 5 に示す補助線を 2 次元コードに付与して実験を行う。

4.2 先行研究との比較

4.1 節で設計した 2 次元コードの歪みに対する頑健性を検証するために、カラー補助線を用いる従来方式 [3] との比較を行った。3.5.2 項で述べた訓練データの作成と同様に、CG を用いることで、比較を行う 2 種類の補助線入 2 次元コードに同等の歪みを与えることとした。なお、ベースとなる QR コードは、 29×29 個のモジュールより構成される型番 3 のコードを用いることとした。また、提案方式で生成した 2 次元コードは、学習時とは異なるモジュールパターンを持つ 2 次元コードに補助線を付与することとした。本実験で用いた補助線検出器は、事前学習済みの FCN を用い、 544×544 画素の歪んだ訓練用 2 次元コード画像 7,106 枚を用いて再学習を行った。本実験で用いる 2 次元コードの解像度は、クワイエットゾーン (2 次元コードの周囲の余白部分) を除いて 290×290 画素となる。 544×544 画素の画像はクワイエットゾーンを含んでおり、4 画素幅の補助線は、訓練用および検証用 2 次元コードの画像では、6 から 7 画素程度に拡大されることとなった (歪みがない場合)。再学習におけるエポック数、バッチサイズはそれぞれ 50, 8 とした。

本実験では、様々な歪み方を持つ 48 組の 2 次元コードを作成し、それぞれ提案方式と従来方式とで復号を試みた。実験結果を図 11 に示す。図 11 は、48 組の 2 次元コードの復号の可否を、以下のように定義する歪みの量と自己遮蔽量を軸とする空間にプロットした結果である。

歪み量 2 次元コード上に 3×3 のグリッド状の参照点を描画し、撮影画像において参照点が歪みにより移動したときの平均 2 乗誤差平方根 (RMSE)。

自己遮蔽量 2 次元コードを構成するモジュールのうち、撮影画像において、歪みによって視認できないモジュールの個数。なお、モジュールの中心部 (一辺の長さがモジュール幅の 30% となる矩形領域) が視認できない場合に、当該モジュールが視認できないものとみなした。

図 11 より、白黒 2 値の補助線を用いる提案方式は、カラー補助線を用いる従来方式とほぼ同様に、歪んだ 2 次元コードを復号できることが分かる。双方とも自己遮蔽量が 30 程度までの 2 次元コードであればほぼ復号が可能であり、検証を行った 46 個のコードのうち、従来方式は 42 個、提案方式は 41 個のコードを復号することができた。

46 個のうち 3 個の代表的なコードにおける実験結果を図 12 に示す。図 12 に示す例のうち、 E_3 のみ、従来方式が復号を行えたが提案方式で復号を行えなかった 2 次元



図 13 提案手法で実撮影画像の復号を行った例

Fig. 13 Example outputs of decoding actually captured images.

コードであり、他の例はすべて従来方式および提案方式の双方とも復号に成功した。図 12 (a) および (b) に示す E_1 では、歪みが激しい領域では提案方式において補助線を一部検出できておらず、従来方式よりも少々多いエラーが発生していることが分かる。図 12 (c) および (d) に示す E_2 では、従来方式において垂直補助線の認識に失敗して同定に失敗したモジュールが多数出現している。これに対して提案方式では、垂直補助線を正しく識別し、より正確に復号を行っていることが分かる。提案方式では復号を行えなかった E_3 (図 12 (e) および (f)) を見ると、QR コードの下側や左側の境界領域や、中央左上の自己遮蔽領域付近において補助線の検出を行えていない箇所があり、QR コードが持つエラー訂正能力を上回る数のモジュールで読み取り誤りが発生したために復号を行えなかったことが分かる。

4.3 実撮影画像を用いた実験

最後に、提案する 2 次元コードを紙に印刷し、複雑な歪みを与えた場合に復号が可能であるかを検証する。レシート等に印刷されることを想定し、一辺のサイズが 40 mm となるよう印刷を行った。

復号を試みた 2 次元コード E_1^* , E_2^* , E_3^* とその復号の過程を図 13 に示す。提案方式を用いて復号を試みたところ、 E_1^* および E_2^* は正しく復号を行うことができた。 E_1^* および E_2^* は直線に近い形状の自己遮蔽領域を含み、その周囲で読み取りに失敗したモジュールがみられるが、自己遮蔽領域付近まで補助線を正しく認識しており、少数のエ

*1 Side view は 2 次元コードの歪み具合を示す画像であり、復号には使用していない。

ラーモジュールは QR コードのエラー訂正機能により補われて復号に成功している。

一方、 E_3 は 2 次元コード右半面に激しい歪みや「く」の字状の自己遮蔽領域を含み、自己遮蔽領域およびその右側の補助線の検出と認識に失敗していることが分かる。このため、 E_3 は正しく復号を行うことができなかった。実際の使用例を考慮すると、接触型のデコーダを利用する場合は、紙に印刷された 2 次元コードをデコーダに押しつけることで、図 13 に示す例よりも歪みは抑えられると考える。一方で、非接触型のデコーダを利用する場合等、紙を抑えることが難しい用途では、カメラを複数台用意することで自己遮蔽領域の発生を抑えることも可能である [3]。

5. おわりに

複雑な幾何歪みに対して頑健な 2 次元コードを実現するため、2 次元コードに付与する白黒 2 階調の補助線を PMBGA により設計する方式を提案した。また、FCN により補助線を検出し、BP により補助線 ID を付与することで、自己遮蔽領域を含む場合であっても復号を行える方式を提案した。実験により、設計された 2 次元コードおよびその復号方式は、白黒 2 階調のパターンからなる補助線を用いているにもかかわらず、カラー補助線を用いる 2 次元コードと同程度の復号性能を持つことを確認した。また、実際に紙に印刷された 2 次元コードが歪んだ場合にも、自己遮蔽領域が小さい場合は、復号を行えることを確認した。

補助線設計段階、および、FCN の学習段階で、より激しい歪みやノイズを再現した CG シミュレーションを行うことで、提案する復号方式の頑健性を高めることは今後の重要な課題である。

謝辞 本研究の一部は科学研究費補助金 (16K12490) の支援により実施された。

参考文献

- [1] Chhabra, M., Yadav, G. and Reel, S.: Bit error rate based first read rate analysis of low parameter grade 2D barcodes, *Proc. World Congress on Information and Communication Technologies* (2011).
- [2] Ono, S., Kawakami, Y., Kawasaki, H. and Fujita, S.: A two-dimensional barcode with robust decoding against distortion and occlusion for automatic recognition of garbage bags, *Int'l Conf. Pattern Recognition*, pp.2879–2884 (2014).
- [3] Kamizuru, K., Kawakami, Y., Kawasaki, H. and Ono, S.: Belief-propagation-based robust decoding for two-dimensional barcodes to overcome distortion and occlusion and its extension to multi-view decoding, *2015 Int'l Conf. Image Processing*, pp.2359–2363 (2015).
- [4] Nakamura, K., Kamizuru, K., Kawasaki, H. and Ono, S.: Multi-agent-based two-dimensional barcode decoding robust against non-uniform geometric distortion, *Int'l J. Computer Information Systems and Industrial Management Applications*, Vol.9, pp.60–70 (2017).
- [5] Kamizuru, K., Nakamura, K., Kawasaki, H. and Ono, S.: A belief-propagation-based decoding method for two-dimensional barcodes with monochrome auxiliary lines robust against non-uniform geometric distortion, *Proc. SPIE*, Vol.10338 (2017).
- [6] Kacprzyk, J. and Pedrycz, W.: *Springer handbook of computational intelligence*, Springer (2015).
- [7] Pelikan, M., Goldberg, D.E. and Lobo, F.G.: A survey of optimization by building and using probabilistic models, *Computational Optimization and Applications*, Vol.21, No.1, pp.5–20 (2002).
- [8] Long, J., Shelhamer, E. and Darrell, T.: Fully convolutional networks for semantic segmentation, *Proc. Conf. Computer Vision and Pattern Recognition*, pp.3431–3440 (2015).
- [9] Ojala, T., Pietikäinen, M. and Harwood, D.: A comparative study of texture measures with classification based on featured distributions, *Pattern Recognition*, Vol.29, No.1, pp.51–59 (1996).
- [10] Frey, B.J. and MacKay, D.J.C.: A revolution: Belief propagation in graphs with cycles, *Advances in Neural Information Processing Systems*, pp.479–485 (1998).
- [11] Weiss, Y. and Freeman, W.T.: On the optimality of solutions of the max-product belief-propagation algorithm in arbitrary graphs, *IEEE Trans. Information Theory*, Vol.47, No.2, pp.736–744 (2001).
- [12] Biao, L.: A datamatrix-based mutant code design and recognition method research, *Int'l Conf. Image and Graphics*, pp.570–574 (2007).
- [13] Chhabra, M., Yadav, G. and Reel, S.: Bit error rate based first read rate analysis of low parameter grade 2D barcodes, *Proc. World Congress on Information and Communication Technologies* (2011).
- [14] Zhou, J., Liu, Y. and Kumar, A.: Research on distortion correction of QR code images, *Int'l Jf Computer Science and Technology*, Vol.3, No.1, pp.415–420 (2012).
- [15] Szentandrás, I., Herout, A. and Dubská, M.: Fast detection and recognition of QR codes in high-resolution images, *Proc. Spring Conf. Computer Graphics*, pp.129–136 (2013).
- [16] Thomas, A. and Paul, R.: An effective method for removing scratches and restoring low-quality QR code images, *Int'l J. for Advance Research in Engineering and Technology*, Vol.1, No.5, pp.5–9 (2013).
- [17] Ohbuchi, E., Hanaizumi, H. and Hock, L.A.: Barcode readers using the camera device in mobile phones, *Int'l Conf. Cyberworlds*, pp.260–265 (2004).
- [18] Fredricksen, H. and Kessler, I.: Lexicographic compositions and debruijn sequences, *J. Combinatorial Theory, Series A*, Vol.22, No.1, pp.17–30 (1977).
- [19] Zhang, L., Curless, B. and Seitz, S.M.: Rapid shape acquisition using color structured light and multi-pass dynamic programming, *Int'l Symp. 3D Data Processing, Visualization, and Transmission*, pp.24–36 (2002).
- [20] He, K., Zhang, X., Ren, S. and Sun, J.: Deep residual learning for image recognition, *Proc. Conf. Computer Vision and Pattern Recognition*, pp.770–778 (2016).
- [21] Sermanet, P., Eigen, D., Zhang, X., Mathieu, M., Fergus, R. and Lecun, Y.: Overfeat: Integrated recognition, localization and detection using convolutional networks, *Int'l Conf. Learning Representations* (2014).
- [22] Simonyan, K. and Zisserman, A.: Very deep convolutional networks for large-scale image recognition, *Int'l Conf. Learning Representations* (2015).
- [23] Agrawal, M., Konolige, K. and Blas, M.: Censure: Center surround extremas for realtime feature detection

and matching, *Proc. European Conf. Computer Vision*, pp.102-115 (2008).

- [24] Liang, C., Cheng, C.-C., Lai, Y.-C., Chen, L.-G. and Chen, H.H.: Hardware-efficient belief propagation, *IEEE Trans. Circuits and Systems for Video Technology*, Vol.21, No.5, pp.525-537 (2011).
- [25] 日本工業規格：二次元コードシンボル—QRコード—基本仕様, JIS X 0510:2004 (2004).



鞍津輪 一希

2018年鹿児島大学工学部情報生体システム工学科卒業。現在、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修士課程に在籍。歪みを含む2次元コードの復号に関する研究に従事。機械学習の画像処理への応用に興味を持つ。

興味を持つ。



上鶴 晃平

2015年鹿児島大学工学部情報生体システム工学科卒業, 2017年同大学大学院博士前期課程理工学研究科情報生体システム工学専攻修了。同年デンソーテクノ(株)入社。修士(工学)。在学中は2次元コードの歪み補正および

復号技術開発に関する研究に従事。最適化アルゴリズムとその応用に興味を持つ。



久富 あすか (学生会員)

2016年鹿児島工業高等専門学校専攻科電気情報システム工学専攻修了, 2018年鹿児島大学大学院博士前期課程理工学研究科情報生体システム工学専攻修了。同年同大学大学院博士後期課程理工学研究科総合理工学専攻入学。修士

(工学)。進化計算に関する研究に従事。



川崎 洋 (正会員)

1994年京都大学工学部電気電子工学科卒業。2003年東京大学工学部電子情報工学博士課程修了。博士(工学)。埼玉大学工学部情報システム, 鹿児島大学工学部情報生体システムを経て,

2017年より九州大学大学院システム情報科教授。その間, 2009年フランスINRIA国立研究所客員教授。2012年アメリカコロムビア大客員研究員。2013年フランスESIEE訪問研究員。2015年アメリカカーネギーメロン大客員研究員。2018年アメリカライス大客員研究員。主としてコンピュータ・ビジョン, アクティブ3次元計測, ITS, コンピュータ・グラフィクスに関する研究に従事。2007年ACCVベストペーパー, 2009年PSIVTベストペーパー, 2011年MIRU長尾賞, 2013年情報処理学会2012年度論文賞, 2015年インタラクシオン・ベストペーパー, 2016年日本生体医工学学会論文賞(阪本賞), 2017年画像センシングシンポジウム優秀学術賞, 2017年MIRUフロンティア賞等受賞。電子情報通信学会, VR学会, IEEE各会員。



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年および2017年人工知能学会研究会優秀賞, 2009年芸術科学会論文誌論文賞, 2010年AROBベストペーパー賞, 2012年人工知能学会全国大会優秀賞, 2013年情報処理学会山下記念研究賞, 2015年インタラクシオン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。