

複雑な幾何歪みに頑健な二次元コードと 信頼度伝搬法を用いた復号法

上鶴 晃平^{1,a)} 中村 法矢^{1,b)} 川崎 洋^{1,c)} 小野 智司^{1,d)}

概要: 二次元コードは、従来の一次元バーコードよりも多くの情報を含有できることから、生産、物流、販売等の分野において広く用いられている。二次元コードは平面や一様な局面上に印刷されることを想定しており、一般的なデコーダは非均一な凹凸状の形状上に印刷された二次元コードを復号することは困難である。本研究では QR コードに格子状の補助線を付与した二次元コードを用いることで、非均一で局所的な歪みを含む二次元コードの復号方法を提案する。モジュールの領域取得に必要な補助線交点の ID 認識をマルコフ確率場としてモデル化し、信頼度伝搬法を用いた最適化を行う。

キーワード: 二次元コード, 信頼度伝搬法, 歪み補正, 線検出

Belief-Propagation-Based Robust Decoding for Two-dimensional Barcodes to Overcome Complex Distortion

KOHEI KAMIZURU^{1,a)} KAZUYA NAKAMURA^{1,b)} HIROSHI KAWASAKI^{1,c)} SATOSHI ONO^{1,d)}

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 that is robust against non-uniform, local distortion. This paper also proposes a decode method for the 2D code, which models auxiliary line recognition as Markov random field, and solves it using belief propagation.

Keywords: 2Dcode, Belief-Propagation, distortion recognition, line detection

1. はじめに

二次元コードは、従来の一次元バーコードよりも多くの情報を含有できることから、生産、物流、販売等の分野において広く用いられている。また、発見が容易となるよう位置検出パターンを備え、汚損や欠損が生じた際に訂正や

補完を行う機能を備える。

二次元コードは平面や一様な曲面上に印刷されることを想定しており、一般的なデコーダは単純な歪みのみを補正する機能を備える。このため二次元コードは、斜め方向から撮影を行った場合や円柱形状の物体に印刷された場合でも復号できる。一方、非均一な凹凸の形状上に印刷された二次元コードを復号することは困難である。航空機の搭乗券に印刷された QR コードを復号する際は、デコーダに搭乗券を押し付けるなどの手段により、搭乗券のしわを伸ばす必要がある。二次元コードの多くは歪みを補正するためにいくつかの機能モジュールパターンをもつため、射影変

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, 1-21-40, Korimoto, Kagoshima 890-0065, Japan

a) sc111015@ibe.kagoshima-u.ac.jp

b) k3420880@kadai.jp

c) kawasaki@ibe.kagoshima-u.ac.jp

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

*1 QR コードは株式会社デンソーウェーブの登録商標である。



図 1 QR コードの一般的な復号方式

換や湾曲した歪みのような均一な歪みに対応している。しかし、しわのある布のような不均一な歪みを補正することは困難である。

Kamizuru らは局所的な歪みを含む二次元コードの復号方式を提案している [1]。この方式では、QR コードに格子状のカラー補助線を付加した二次元コードとその復号方式を提案している。カラー補助線の交点をデブルーイン系列の色パターンと信頼度伝搬法により認識し、各モジュールの明暗を取得することでオリジナルの QR コードの復元、復号を行った。しかし、カラー補助線を用いるため主に二つの問題がある。一つは印刷コストである。もう一つは色校正である。着色された補助線は撮影時の照明光や印刷時において影響を受けやすい。

本研究では、上記の先行研究における二次元コードに付与する補助線をカラーから白黒二値に変更する。補助線の検出後に、信頼度伝搬法を用いて交点の認識を行うことで、歪みやオクルージョンに対して頑健な復号方式を提案する。

2. 研究分野の概要

2.1 一般的な QR コードの復号方式

QR コードのデコーダは軽度の幾何学的な歪みであれば射影変換等の画像処理によって歪みを補正し、復号することが可能である。QR コードを復号する場合、デコーダは撮影画像内から 3 箇所的位置検出パターンの検出をし、それをもとにしてサンプリング点を決定する。図 1 に例を示す。位置検出パターンをもとに作成されたグリッドラインの交点をサンプリング点として利用する。各サンプリング点の座標の明暗を取得することで QR コードの復号を行う。しかし、QR コード上に歪みが含まれている場合、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てしまい、モジュールの明暗を正しく取得できなくなる。このため、歪みを含む二次元コードの復号は困難となる。

2.2 信頼度伝搬法

信頼度伝搬法 (Belief Propagation : BP) [2, 3] はベイジアンネットワークやマルコフ確率場 (Markov Random Field : MRF) などのグラフィカルモデル上で作用するメッセージ伝達のアルゴリズムであり、コンピュータビジョン

やパターン認識への応用だけでなく、機械学習、データマイニング、通信理論など非常に広範囲に用いられている。このアルゴリズムは、すでに観測されているノードの状態をもとに、観測されていないノードの周辺分布をそれぞれ計算する。グラフィカルモデルでは各確率変数をノードによって表し、ノードの間を結ぶエッジはそれらの確率変数の間に直接の相互作用があることを表す。エッジに向きを与え確率変数間の関係を定義する有向グラフと、向きの無い無向グラフの二つがある。MRF は無向グラフであり、最適なラベル割り当ては以下の式を最大化することによって得られる。

$$p(x) = \frac{1}{Z} \exp(-E(x)) \quad (1)$$

$$Z = \sum_{x_1} \cdots \sum_{x_N} \exp(-E(x)) \quad (2)$$

信頼度伝搬法は、ステレオ視における視差計算や画像領域分割などに応用されている。ステレオ視における視差計算や画像領域分割に代表される多くのビジョンの問題はマルコフ確率場によって定式化される。この問題は一般に NP 困難であることが知られているが、信頼度伝搬法によって準最適解を得ることができる。このとき、ステレオ視における視差計算や 3 個以上の領域分割を行う場合には、一般に画素をノードとしたグラフに対する多値ラベル割り当て問題を解くことになる。

最大確率を与える探索手法である Max-product BP [4] について説明する。Max-product BP は L 次元メッセージを繰り返し更新する。それぞれのノードは隣接ノードにメッセージを送る。メッセージは最初水平方向に送られ、それから縦方向に送られる。

t 回目のノード p からノード q へのメッセージは次のように定義される。

$$m_{p \rightarrow q}^t(l_q) = \min_{l_p \in L} (V_{pq}(l_p, l_q) + H_{p \rightarrow q}^{t-1}(l_p)) \quad (3)$$

$$H_{p \rightarrow q}^{t-1}(l_p) = d_p(l_p) + \sum_{\{s,p\} \in N \setminus \{q,p\}} m_{s \rightarrow p}^{t-1}(l_p) \quad (4)$$

N はノードの集合、 L はラベルの集合である。メッセージはグラフがループを含まない場合には有限回の繰り返し計算の後収束する。一方、ループを含むグラフの場合には、信頼度伝搬法によって大域的な最適解が得られる保証はないものの多くの場合に最適解に近い解が得られることが知られている [5]。 T 回の反復においてメッセージを更新した後、以下の b_p により最小値ラベルが選択される。

$$b_p(l_p) = d_p(l_p) + \sum_{\{s,p\} \in N} m_{s \rightarrow p}^T(l_p) \quad (5)$$

メッセージ伝搬の様子を図 2 に示す。ノード p からノード q, r, s, t それぞれに発生するメッセージ (青矢印) はその時の隣接ノード以外からのメッセージ (赤矢印) とデータ

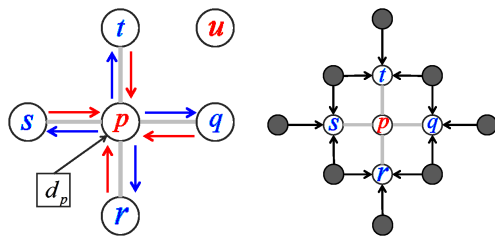


図 2 メッセージ伝搬

コスト d_p により求められる。エッジで繋がっているノード u とのメッセージのやり取りは行われない。例えば、ノード p から隣接ノード q へのメッセージ計算の際にはノード s, t, r からノード p へのメッセージとノード q のデータコスト d_p が必要である。ノード p へのメッセージを求めるにはノード p の隣接ノードの隣接ノード（黒丸）からのメッセージが必要である。

2.3 関連研究

2.3.1 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などの画像処理によって補正する方式や緩やかに歪曲した QR コードのエッジからモジュールの位置を推定する方式が提案されている [6–11]. Ohbuchi らは 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を提案した。また、二次元コードが波打つように歪んだ状態でも読み取りが可能なカラーバーコードも提案されている [12]. しかし、これらは幾何学的な画像変換で補正不可能な歪みやオクルージョンへは対応していない。

2.3.2 複雑な歪みに関する復号方式

先行研究 [1] では格子状のカラー補助線を付与した二次元コード (図 3) を使用し、複雑な歪みやオクルージョンがある場合でも復号が可能となっている。カラー補助線は縦線と横線それぞれデブルーイン系列 [13, 14] に基づいた色パターンで構成されている。横線は青 (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。縦線は赤 (R) と黄色 (Y) から構成され、Y-R-R-R-Y-R-Y-Y の周期的なパターンを持つ。デブルーイン系列により少ない色パターンで補助線 ID の推定を可能とする。付与される補助線は各モジュールの中心点への影響を避けており、既存のデコーダによる可読性を保つ。メッセージ伝搬を用いた信頼度伝搬法を用いて、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り当てを行う。

しかし、補助線として着色されたものを使用しているためいくつかの問題点を抱えている。一つ目はコストの問題である。補助線の ID 割り当てに各補助線の色情報を用いているため、印刷コストが高くなってしまふ。また、現在普及しているバーコードリーダーは白黒二値のスカナが

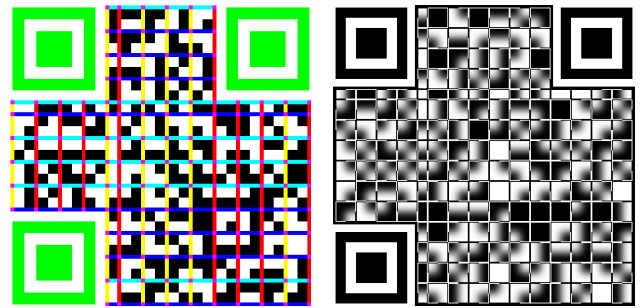


図 3 カラー補助線入り二次元コード [1] 図 4 白黒補助線入り二次元コード

多いため、製品化する際にソフトウェアの変更だけでなくハードウェアの変更も必要となる。二つ目は撮影環境の問題である。補助線の色を取得する必要があるため、撮影環境によっては補助線の検出が困難となる。更に、補助線の色を正しく取得するために事前に撮影するカメラと印刷するプリンタ 2 つの色校正を行う必要もある。

3. 提案手法

3.1 基本アイデア

本研究で提案する二次元コードの復号方式における基本的なアイデアを以下に示す。

本研究では、一般的な QR コードと互換性を持ち、白黒補助線を付加した二次元コードを用いる。二次元コードにあらかじめ付加された補助線を検出し、補助線によりモジュールの位置を特定することで各モジュールの明暗情報の取得を行う。重畳される補助線は各モジュールの中心点への影響を避けており、本研究で提案する二次元コードは既存の QR コードデコーダによる可読性を保つ。

復号を行う際は、信頼度伝搬法を用いた交点の ID 認識を行う。交点はそれぞれ縦線 ID と横線 ID をもつ。信頼度伝搬法はメッセージ伝播により推定される交点の ID を最適化する。

3.2 白黒補助線入り二次元コード

本研究で使用する二次元コードを図 4 に示す。本研究では白黒二値の補助線を付加した二次元コードを用いる。補助線は縦方向と横方向にそれぞれ 2 モジュール間隔で配置する。ただし、モジュール数の関係上縦方向と横方向にそれぞれ 1 個所ずつ 1 モジュール間隔で補助線が配置される個所が存在する。また、補助線の存在するモジュール間のエッジと補助線の存在しないモジュール間のエッジとの区別を容易にするために、補助線で区切られた各ブロックにガウシアンぼかしを施す。ガウシアンぼかしはモジュールのサイズを S_m とすると、ぼかし半径 $\frac{4}{5}S_m$ のガウシアンぼかしを 3 回適用する。付与される補助線は各モジュールの中心点への影響を避けており、既存のデコーダによる可読性を保つ。

3.3 処理手順

提案する方式の処理手順について図 7 および以下に示す。先行研究から改良した点は (2), (3) である。

(1) 二次元コードの検出

撮影画像内から二次元コードを検出する。二次元コード検出には Star 検出器を用いる。Star 検出器は Center Surround Extremas (CenSurE) [15] から派生した特徴点検出器である。CenSurE 検出器はグレースケール画像に対して回転やスケール変化に不変であり、簡素化された 2 階層の Center-surround フィルタを用いることで差分処理を行い、極値を検出する。Star 検出器では大小の星形範囲の符号をそれぞれ変えて重ねたフィルタを使用している (図 6a)。このフィルタは格子状に符号化されている二次元コード領域間で多くの特徴点を検出する。Star 検出器により特徴検出した画像を図 6 (b) に示す。二次元コード領域に特徴点が多く検出されていることがわかる。

(2) 補助線検出とコーナー識別

検出された二次元コードのグレイ画像を二値化し、エッジ検出を行うことで補助線の検出を行う。補助線領域の最大輪郭を抽出し、最大輪郭のコーナーの検出・識別を行う。識別されたコーナーの位置座標は信頼度伝搬法のデータコスト設計時に使用する。詳細を 3.4 節に示す。

(3) 信頼度伝搬法を用いた交点の ID 認識

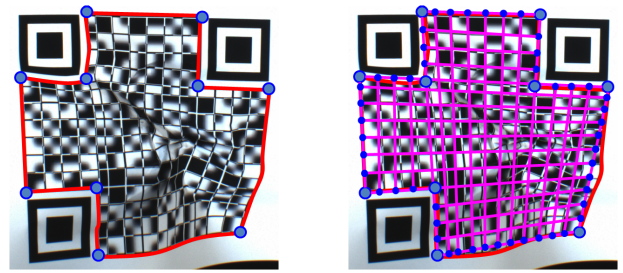
各交点の縦線 ID と横線 ID を信頼度伝搬法により推定する。詳細を 3.5 節に示す。

(4) モジュールの領域・明暗の取得

検出された補助線とその交点をもとに二次元コードの復元を行う。検出された各交点を 1 つずつ確認し、注目する交点とその近傍 3 点を確認する。このとき、4 点のうち 1 点のみ欠損している場合は、取得済みの 3 点を用いた平行四辺形を作成し、平行四辺形の頂点を未取得の交点座標とすることで補間を行う。交点を取得したのち、縦横に隣接する 2×2 個の交点で矩形を作成し、適切なモジュール数に分割することで、各モジュールの領域を取得する。各矩形内のモジュールの明暗を輝度値から判定することで、全モジュールの値を取得し、二次元コードを復元する。復元した二次元コードを既存の QR コードのデコーダで復号する。

3.4 補助線検出とコーナー識別

補助線検出について説明する。検出された二次元コードのグレースケール画像を二値化し、得られた連結最大領域を補助線領域として取得する。補助線領域に対して Local Binary Pattern (LBP) を用いてエッジ検出を行う。LBP は 3×3 の画素領域で特徴計算を行うため、画像の局所的な特徴を抽出することができ、照明の変化の影響を受けに



(a) 最大輪郭抽出とコーナー検出 (b) 各ノードの推定位置

図 5 輪郭抽出, コーナー推定, 各ノード位置推定



(a) Star 検出器フィルタ



(b) 特徴検出実行例

図 6 Star 検出器のフィルタと特徴検出実行例

くい。検出されたエッジ画像に対して、指向性の強いカーネルを用いてオープニングとクロージングを施し、縦線と横線を検出する。信頼度伝搬法のデータコスト設計時に使用するため、補助線領域の最大輪郭を抽出し、最大輪郭のコーナーを検出する。検出したコーナーの識別は画像中心とコーナーとの角度計算を行い、右下のコーナーから時計回りに識別する。識別されたコーナーの位置座標は信頼度伝搬法のデータコスト設計時に使用する。検出した最大輪郭とコーナーの例を図 5(a) に示す。

3.5 信頼度伝搬法を用いた交点の ID 認識

提案手法では交点の ID 認識問題をラベル割り当て問題としてモデル化する。MRF とは同時確率分布を用いたグラフィカルモデルの一つである。検出された補助線の縦線と横線の交点をノードとし、ノード番号およびラベルを縦線 ID と横線 ID のペアで定義する。二つのノードを結ぶ補助線を一つのエッジとする。

エネルギー関数 $E(\mathbf{x})$ は以下のように表す。

$$E(\mathbf{x}) = \sum_{p \in \mathcal{N}} d_p(l_p) + \sum_{\{p,q\} \in \mathcal{E}} V_{pq}(l_p, l_q) \quad (6)$$

\mathcal{N} はノードの集合, \mathcal{E} はエッジの集合である。 p, q をノード番号, ノード p に割り当てられたラベルを l_p とする。また, l_p は縦線 ID と横線 ID のペア $(l_{p,h}, l_{p,v})$ で構成される。ラベル L の総数はノードの総数に等しい。各ノード p は観測座標 (x_p, y_p) を持つ。

データコスト $d_p(l_p)$ は観測データと割り当てられたラベルの矛盾により定義する。

$$d_p(l_p) = \frac{1}{2} \left(\frac{|x^e(l_p) - x_p|}{x_{max} - x_{min}} + \frac{|y^e(l_p) - y_p|}{y_{max} - y_{min}} \right) \quad (7)$$

$(x^e(l_p), y^e(l_p))$ はラベル l_p の推定位置である。識別されたコーナー情報をもとに隣接するコーナーの間隔を計算し、モジュール数だけ分割することで境界のラベル推定位置を求める。境界の推定ラベルの対象関係にあるもの同士をそれぞれ直線で結び (図 5(b)), その交点を各ラベル推定位置とする。以上のようにしてコーナーおよび輪郭から推定された各ノードの位置 $(x^e(l_p), y^e(l_p))$ をもとに、データコストを計算する。

平滑化コスト $V_{pq}(l_p, l_q)$ は隣接するノード間の矛盾により定義する。式 (8) は水平方向のエッジ間の平滑化コストである。

$$V_{pq}(l_p, l_q) = |l_{p,v} - l_{q,v} + \alpha| + |l_{p,h} - l_{q,h}| + O(l_{p,v}, l_{q,v}) + P(p, q) \quad (8)$$

α は $x_q > x_p$ の場合 -1 を $x_q < x_p$ の場合 1 をとる。 $O(l_{p,v}, l_{q,v})$ はラベルの逆転を抑えるペナルティ関数である。 $x_q > x_p$ と仮定した際、 $l_{p,v} > l_{q,v}$ の場合に任意定数 β を、そうでない場合に 0 をとる。 $P(p, q)$ は補助線の間隔に基づくペナルティ関数である。 $l_{p,v}$ と $l_{q,v}$ が連続 ($l_{p,v} - l_{q,v} = 1$) である場合に、二つのノード間の間隔が推定された補助線間隔より小さければ γ を、そうでない場合に 0 をとる。 $V_{pq}(l_p, l_q)$ は垂直方向についても同様に考えることができる。

4. 実験

4.1 実験設定

画像の撮影は産業用カメラ (Lynx acA1300-30gc, Fujinon DF6HA-1B, 解像度 $1,278 \times 958$) で行った。撮影した二次元コードは A4 サイズのものを使用した。撮影時は 2 方向から照明を照射するものとした。

4.2 実験結果

本方式を用いて複雑に歪んだ二次元コードの復号を試みた結果を図 8, 9 に示す。(a) は撮影画像を表し, (b) は撮影画像から Star 検出器による特徴検出により得られた二次元コード検出結果である。(c), (d) は LBP により得られたエッジを指向性の強いオープニングとクローズングを施し, 縦線と横線に分けた結果である。歪みの大きな領域では検出に失敗した補助線があるものの, 歪みの小さな領域では補助線を明瞭に検出されていることがわかる。(e), (f) は信頼度伝搬法による交点のラベル割り当て結果を示す。信頼度伝搬法の最適化により歪みがある場合でも正しい ID が割り当てられていることがわかる。(g) は各交点に割り当てられたラベルによってモジュール領域を推定した結果である。(i) の赤色に着色された領域は復元に失敗したモジュールを表す。(i) より, 歪みを含む領域は誤りを多く含むことがわかる。

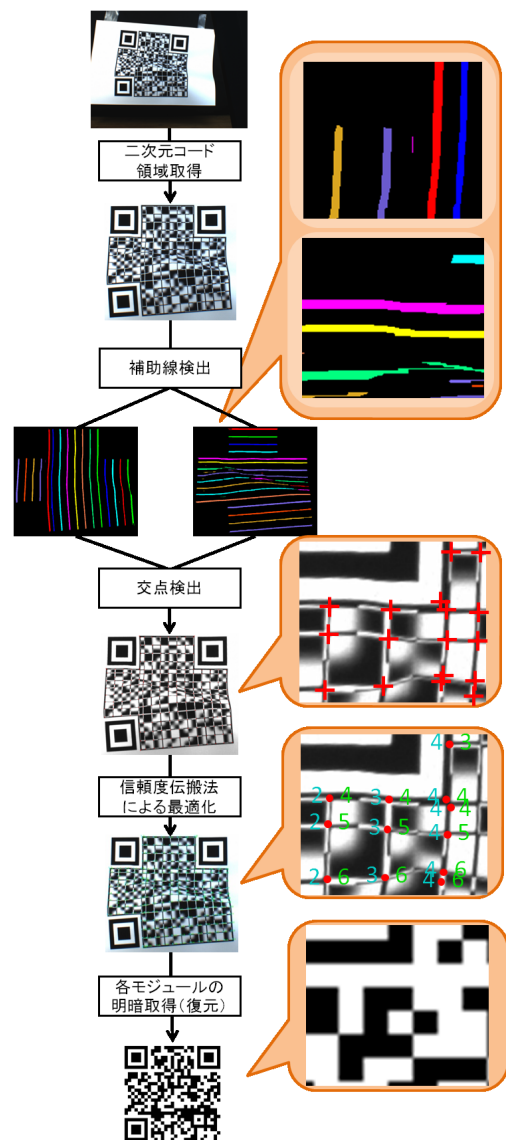


図 7 処理手順

5. まとめ

本研究では局所的な歪みやオクルージョンに頑健な白黒二値の補助線を用いた二次元コードの復号方式を提案した。提案手法では交点の ID 認識を信頼度伝搬法を用い, モジュールの位置を推定する。実験結果から, 局所的な歪みがある場合でも正しく復号を行えることを確認した。今後, コスト関数の改善を行い, 補助線を用いない復号方式について検討を行う。

参考文献

- [1] K.Kamizuru, Y.Kawakami, H.Kawasaki, and S.Ono. Belief-propagation-based robust decoding for two dimensional barcodes to overcome distortion and occlusion and its extension to multi-view decoding. In *IEEE International Conference on Image Processing(ICIP)*, 2015.
- [2] Brendan J Frey and David JC MacKay. A revolution: Belief propagation in graphs with cycles. *Advances in neural information processing systems*, pp. 479–485,

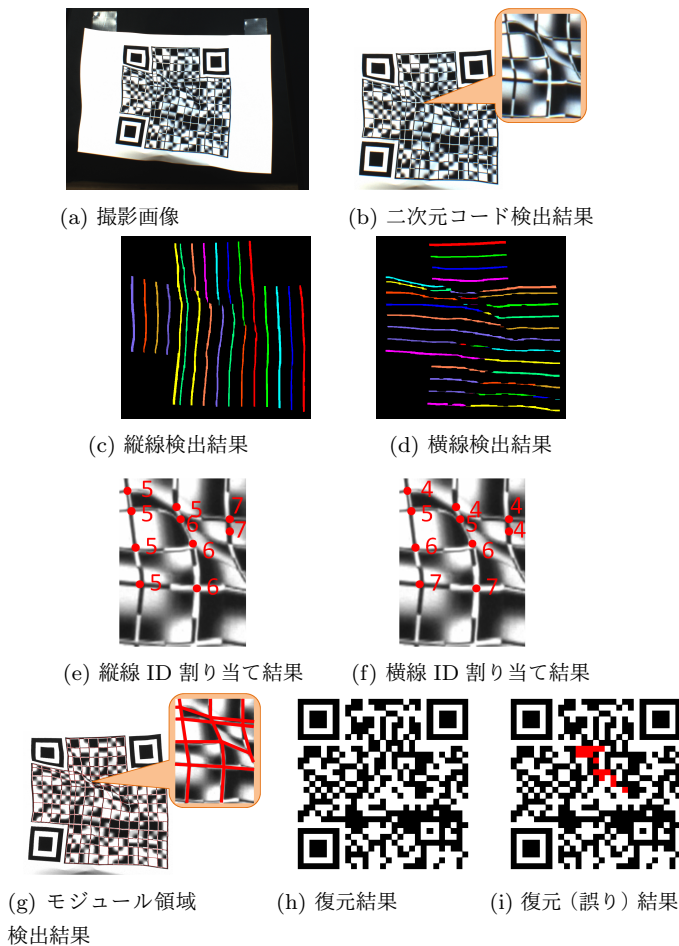


図 8 実行例 1

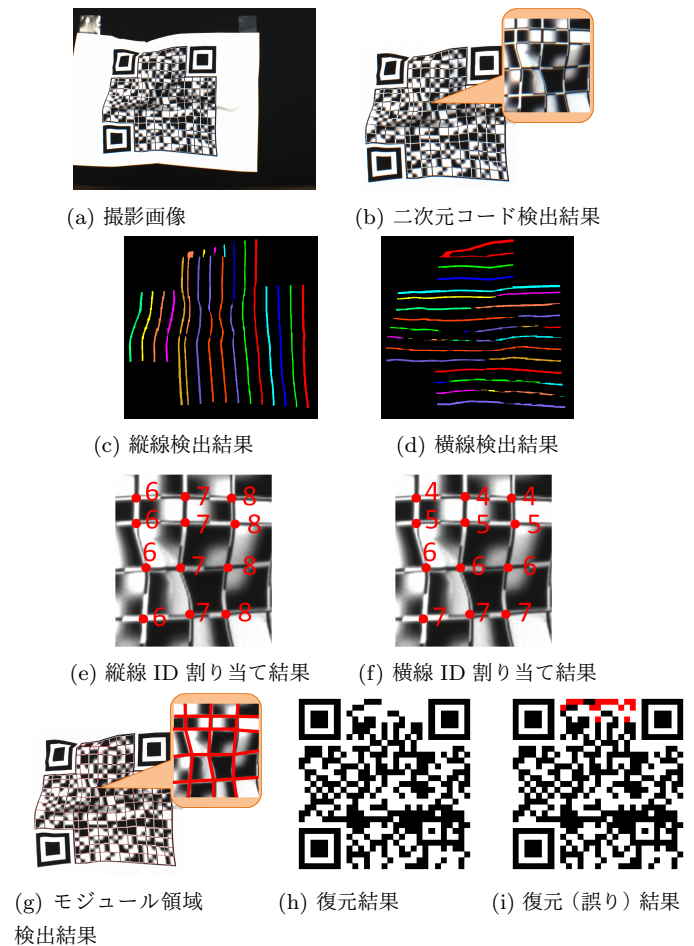


図 9 実行例 2

- 1998.
- [3] Yair Weiss and William T Freeman. On the optimality of solutions of the max-product belief-propagation algorithm in arbitrary graphs. *Information Theory, IEEE Transactions on*, Vol. 47, No. 2, pp. 736–744, 2001.
 - [4] Chia-Kai Liang, Chao-Chung Cheng, Yen-Chieh Lai, Liang-Gee Chen, and Homer H Chen. Hardware-efficient belief propagation. *Circuits and Systems for Video Technology, IEEE Transactions on*, Vol. 21, No. 5, pp. 525–537, 2011.
 - [5] Joris Mooij and Hilbert Kappen. Sufficient conditions for convergence of loopy belief propagation. *arXiv preprint arXiv:1207.1405*, 2012.
 - [6] Leng Biao. A datamatrix-based mutant code design and recognition method research. In *Fourth International Conference on Image and Graphics 2007 (ICIG 2007)*, pp. 570–574, 2007.
 - [7] Manish Chhabra, Gaurav Yadav, and Smarti Reel. Bit error rate based first read rate analysis of low parameter grade 2d barcodes. In *Proceedings of World Congress on Information and Communication Technologies (WICT 2011)*, 2011.
 - [8] Jiejing Zhou, Yunfei Liu, and Amit Kumar. Research on distortion correction of qr code images. *International Journal of Computer Science and Technology*, Vol. 3, No. 1, pp. 415–420, 2012.
 - [9] István Szentandrás, Adam Herout, and Markéta Dubská. Fast detection and recognition of qr codes in high-resolution images. In *Proceedings of the 28th Spring Conference on Computer Graphics, SCCG '12*, pp. 129–136, New York, NY, USA, 2013. ACM.
 - [10] Ashna Thomas and Remya Paul. An effective method for removing scratches and restoring low-quality qr code images. *INTERNATIONAL JOURNAL FOR ADVANCE RESEARCH IN ENGINEERING AND TECHNOLOGY*, Vol. 1, No. 5, pp. 5–9, 2013.
 - [11] Weibing Chen, Gaobo Yang, and Ganglin Zhang. A simple and efficient image pre-processing for qr decoder. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology*, pp. 234–238, 2012.
 - [12] C. Hohberger and J.R. Kaufman. Distortion resistant double-data correcting color transition barcode and method of generating and using same, June 6 2000. US Patent 6,070,805.
 - [13] Harold Fredricksen and Irving Kessler. Lexicographic compositions and debruijn sequences. *Journal of Combinatorial Theory, Series A*, Vol. 22, No. 1, pp. 17 – 30, 1977.
 - [14] Li Zhang, Brian Curless, and Steven M. Seitz. Rapid shape acquisition using color structured light and multi-pass dynamic programming. In *The 1st IEEE International Symposium on 3D Data Processing, Visualization, and Transmission*, pp. 24–36, 2002.
 - [15] Motilal Agrawal, Kurt Konolige, and Morten Rufus Blas. Censure: Center surround extremas for realtime feature detection and matching. In *Computer Vision–ECCV 2008*, pp. 102–115. Springer, 2008.