

歪んだ2次元コード復号のための 組合せ最適化における修復操作の改良

瀧田 悠樹^{1,a)} 若松 健斗^{1,b)} 新川 翔貴^{1,c)} 鞍津輪 一希^{1,d)} 比良 祥子^{1,e)} 小野 智司^{1,f)}

概要: 2次元コードは、従来の1次元コードと比較して多くの情報を格納できることから、生産や物流等の幅広い分野において活用されている。しかし、均一でない複雑な幾何歪みを含む2次元コードを復号することは困難である。このため、先行研究ではソーベルフィルタで検出したエッジに対して組合せ最適化を行うことで、検出したエッジが2次元コード内のどの位置に存在するかを推定し復号を可能とした。本研究ではエッジ検出手法の変更や最適化手法、デコード時に使用するグリッド線の生成手法の改良を行い、復号精度向上や処理時間短縮を試みる。

Improving Repair Operators in Combinatorial Optimization for Distorted 2D Code Decoding

Abstract: Compared to conventional 1D codes, 2D codes can store more information and are used in a wide range of fields such as production and logistics. However, it is difficult to decode 2D codes that contain complex geometric distortions that are not uniform. In a previous work, combinatorial optimization was performed on edges detected by a Sobel filter to estimate the location of the detected edges in the 2D code, thereby enabling decoding. In this work, we attempt to improve decoding accuracy and shorten processing time by modifying the edge detection method, optimization method, and grid line generation method used in decoding.

1. はじめに

2次元コードは、従来の1次元コードよりも多くの情報を格納できることから生産、物流、販売等の幅広い分野において活用されている。近年は2次元コードをスマートフォン等のモニタに表示することも多いが、レシートや航空機の搭乗券のように紙に印刷されて使用される場合も多い。

一般的な2次元コードのデコーダは、2次元コードが平面状であることを仮定している。2次元コードを復号する際はまず、2次元コードの3隅にある位置検出パターンを検出する。次に、検出した位置検出パターンをもとに図1に示すようなサンプリンググリッドを設定する。このサンプリンググリッドの交点をサンプリング点とし、サンプリ

ング点の画素の明暗を取得することで、2次元コードの復号を行う。また、2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、2次元コードを復号するソフトウェアやアプリケーションの多くは射影変換などの機能を備えていることから、2次元コードを斜めから撮影した場合や、円柱形状に印刷された場合においても復号が可能である。しかし、2次元コードが紙や布に印刷され、図2に示すように、それらが激しく変形することで2次元コードが不均一に歪んでしまう場合は、復号が困難になる。

このため Shinkawa ら [1] は、紙に印刷した2次元コードが歪んだ場合を想定して、幾何歪みに頑健な2次元コードの復号方式を提案した。この方式は、撮影画像内の2次元コードを構成するモジュールのエッジをソーベルフィルタを用いて検出し、その後、各エッジが歪んでいない2次元コード内においてどの位置にあるか、相対的な位置(以下ID)を認識することで歪みのない2次元コードを復元する。上記の手法では、全エッジのIDを推定する問題を組み合わせ最適化問題として定式化している。しかし、2次

¹ 鹿児島大学
Korimoto, Kagoshima, Kagoshima 8900065, Japan
a) k4872729@kadai.jp
b) k0418962@kadai.jp
c) k2062424@kadai.jp
d) 07312316u@gmail.com
e) k4916167@kadai.jp
f) ono@ibe.kagoshima-u.ac.jp



図 1: サンプルンググリッド

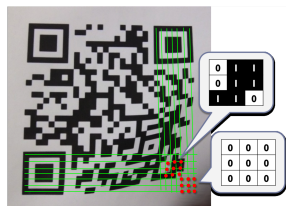


図 2: 失敗例

元コード内で同色のモジュールが連続する箇所にはエッジが存在しないために歪みを認識することが困難となる。また、歪みが激しいために自己遮蔽が生じてしまい、視認できない領域が存在する場合、遮蔽領域付近に存在するエッジに誤った ID を割り当ててしまい、復号が困難となる。

本研究では、自己遮蔽が生じる程に複雑に変形した 2 次元コードであっても復号を行える手法を提案する。提案手法は先行研究 [1] に対して全層畳込みネットワークの 1 つである U-net を組み込むことにより、不可視のエッジを含めた 2 次元コードを構成するグリッドの推定を行う。加えて、U-net の追加に伴い、エッジ ID の推定を行う組合せ最適化手法における目的関数や個体生成方法を改良する。評価実験により、先行研究と比較して復号精度が向上し、処理時間の短縮が可能であることを確認した。

2. 関連研究

2.1 射影変換等の単純な画像処理による歪み補正

吉田らは 2 次元コードを撮影する際の角度によって生じる歪みを補正する方式を提案している [2]。画像を走査するための走査線の傾きをもとに、射影変換を行うことで正方形の 2 次元コードの復号を可能とした。

また、飯田らはサンプルンググリッドの分割間隔を変更することで撮影角度による歪みに対処する復号方式の特許として開示した [3]。飯田らは撮影角度の影響で 2 次元コードが歪んだ場合 2 次元コードの周囲形状が台形になることに注目した。サンプルンググリッド生成後、各サンプルンググリッドの隣接する辺の長さから全体の歪みを推定し、対象辺の分割間隔を決定することで撮影角度による歪みの影響を受けることなく復号が可能となる。

2.2 包絡線を用いた復号方式

水本らは、緩やかな歪みを含む 2 次元コード画像において包絡線を作成し、2 次元コードを復号する方式の特許として開示している [4]。この方式では、二値化処理を行なった 2 次元コード画像から、図 3 に示すような 2 次元コードを囲む包絡線を作成する。作成した包絡線から 2 次元コードの基準となる頂点を算出し、頂点に基づき縦横方向に補助線を作成する。補助線をもとに格子点を設け、格子点によって 2 次元コード載せる配列を検出することが可能となる。

この方式は 2 次元コードに緩やかな歪みが存在する場合でも高速かつ正確に読み取ることが可能であるが、幾何学的な画像変換で補正が不可能な歪みや遮蔽領域のある歪みには対応していない。

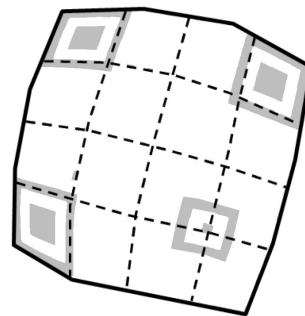


図 3: 包絡線と作成された補助線

2.3 カラー補助線を用いた復号方式

幾何学的な画像変換で補正が不可能な歪みや遮蔽領域のある歪みがある場合でも復号を可能とするために、上鶴らはあらかじめ 2 次元コードに着色された補助線を付加しておき、補助線をもとにセルの位置を推定し、2 次元コードを復号する方式を提案した [5,6]。撮影された 2 次元コード画像からこのカラー補助線を検出し、セルの位置の推定に利用している。補助線補助線の縦方向と横方向の 2 次元コード上での位置 (以下 ID と呼ぶ) を認識するために、マルコフ確率場 (Markov Random Field: MRF) として定式化し、エネルギー最小化問題を確率伝搬法 (Belief Propagation: BP) を用い交点の ID 推定を行う。

図 4 に上鶴らが用いたカラー補助線入り 2 次元コードを示す。この補助線は 2 色で 8 パターンを表現するデブルーイン系列 [7,8] に基づいて構成されている。連続する補助線 3 本を参照することで局所的に補助線の ID を推定可能とした。よって、このパターンを利用することで 2 次元コード上に遮蔽領域が存在する場合でも正しく補助線の ID を推定が可能である。

以下に、カラー補助線を用いた 2 次元コード復号方式の処理手順を示す。

(1) 補助線の検出

撮影画像から Star 検出器を用いて 2 次元コードを検出する。Star 検出器は Center Surround Extremas (CenSurE) [9] から派生した特徴点検出器である。次に、検出された 2 次元コードから補助線領域を抽出する。入力画像から白および黒のピクセルを除いた部分を補助線領域として抽出する。抽出した補助線領域を RGB 成分を用いて縦線と横線に分ける。赤成分の強い領域を縦線領域、青成分の強い領域を横線領域とし、どちらの成分も強い領域を交点領域とする。

(2) 交点の ID 認識

検出された交点に ID を割り当てていく。交点の ID 認識問題は MRF, すなわち同時確率分布のグラフィカルモデルのラベル割り当て問題として定式化することができる。MRF において検出された交点をノードとし, 二つのノードを結ぶ補助線をエッジとする。ノードのラベルは縦線 ID と横線 ID のペアとし, MRF のエネルギー関数のデータコストと不連続コストを以下のように定義する。

データコストは観測データと割り当てラベルの矛盾により定義する。観測された交点の座標とその交点に割り当てられたラベルから推定された座標の距離が大きい場合は, データコストが大きくなる。また, 交点の縦線および横線の補助線の色が交点に割り当てられたラベルから推定される色と異なる場合にもデータコストが大きくなる。

不連続コストは隣接している 2 つのノードのラベルの矛盾により定義する。同一補助線上にない場合や連続していない場合は不連続コストが大きくなる。また, ラベルの差とラベルの間隔が適切でない場合も不連続コストが大きくなる。

(3) 各セルの明暗の取得

交点の ID とその座標から各セルの明暗を判別する。まず, 割り当てられた交点の ID のもとに隣接する 4 つの交点から矩形を作成し, その矩形領域を領域内のセル数で分割することで各セルの領域を算出する。4 点のうち 1 点が欠損して 3 点のみとなっている場合は, 3 点から平行四辺形を作成するように 4 点目を補完する。次に, 算出された各セルの領域から平均輝度値を求めることで明暗を取得し, その領域が黒もしくは白のどちらのセルで構成されているかを判定する。以上の処理を検出された全ての交点において行うことで 2 次元コード全体を復元する。

(4) デコード

復元された 2 次元コードに対してデコード処理を行うことでデコード結果を取得する。

カラー補助線を用いることで局所的な歪みや遮蔽領域が存在する 2 次元コードの復号ができるようになったが, カラー画像を用いているためカラープリンタやカラーカメラが必要でありコストがかかること, 撮影時の照明環境によって補助線の検出が困難になること, 事前に色校正を行う必要があることなど様々な問題を抱えている。

2.4 白黒補助線を用いた復号方式

上記の問題を解決するために, 上鶴らはカラーではなく白黒二値の補助線を付加した 2 次元コードを用いた復号方式を提案している [10, 11]。

この方式では, あらかじめ 2 次元コードに白黒二値の補助線を付加しており (図 5), 補助線をもとにセルの位置の推

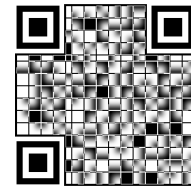
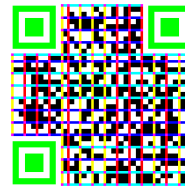


図 4: カラー補助線入りの 2 次元コード
図 5: 白黒補助線入りの 2 次元コード

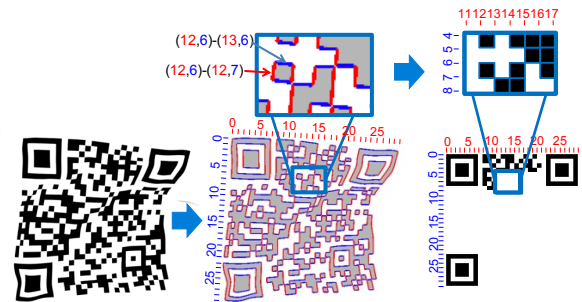


図 6: エッジの ID 推定による 2 次元コード復元

定を行うことで復号を行う。また, 補助線の検出を容易にするために, 補助線と位置検出パターン以外の 2 次元コードのセルの領域にガウシアンぼかしを掛けている。撮影された 2 次元コード画像からエッジ検出を行うことで補助線を検出する。処理手順は, カラー補助線を用いた復号方式と同様, 補助線の交点の縦方向と横方向の位置を認識するために, マルコフ確率場 (MRF) として定式化し, エネルギー最小化問題を確率伝搬法 (BP) を用い交点の ID 推定を行う。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二値パターン (Local Binary Pattern: LBP) [12] 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 [13]。

白黒二値の補助線を用いるため, カラー補助線に比べ照明の変化に影響を受けにくくなっているが, 単一パターンの補助線のためカラー補助線のような局所的な補助線の ID 認識が行えない。そのため, 遮蔽領域が存在するほど激しく歪んだ 2 次元コードの復号が困難である。

2.5 先行研究

新川らは不均一で複雑な歪みを含む 2 次元コードの復号を可能とするため組合せ最適化を用いた 2 次元コード復号方式を提案した [1]。図 6 に示すように, モジュールを構成する各エッジが 2 次元コード内で上または左から何本目の位置にあるかを推定し, 推定されたエッジの位置から歪んだ 2 次元コードを構成する全モジュールの位置を推定し, 歪みのない 2 次元コードを復元する。

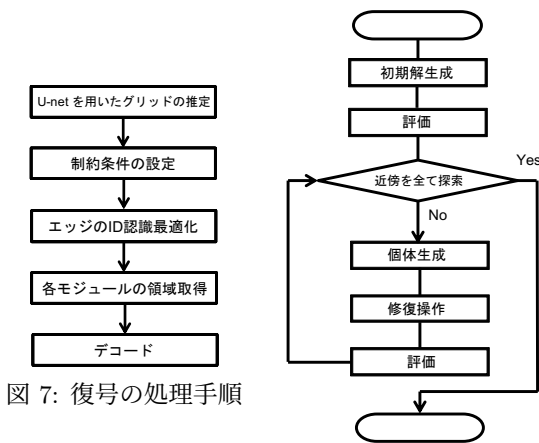


図 7: 復号の処理手順

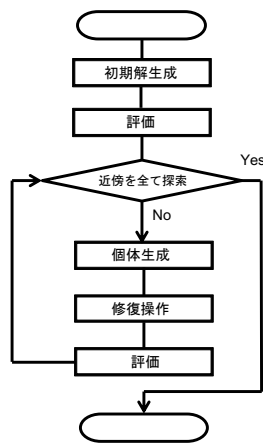


図 8: 最適化の処理手順

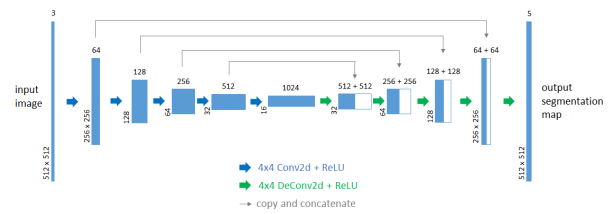


図 9: U-net のネットワークアーキテクチャ

3. 提案手法

3.1 基本アイデア

本研究では、先行研究 [1] の改良を行い、自己遮蔽を含むほどに激しい幾何歪みを含む 2 次元コードを復号する手法を提案する。

アイデア 1: U-net を利用した 2 次元コードのグリッド線の抽出

提案手法は 2 次元コードの歪みをより正確に認識するため、U-net を用いることで 2 次元コードを構成するグリッド線を推定する。先行研究では同色モジュールが連続する領域ではエッジを検出することができなかったが、提案手法は不可視のモジュール境界を含めてグリッド線の推定が可能である。

アイデア 2: グリッド線の ID 推定を行う最適化の改良

先行研究では可視のエッジに対して ID の推定を行っていたことに対して、提案手法では不可視のモジュール境界を含めたグリッド線に対して ID の推定を行う。このため、グリッド線の ID を推定する組合せ最適化において、従来とは種類の異なる局所最適解が発生する。提案手法では、上記の組合せ最適化における修復操作や目的関数の改良を行うことで、局所解への収束を抑制する。

3.2 処理手順

提案する方式の処理手順を図 7, 8 に示すとともに、以下で各処理について述べる。本手法は 2 次元コード内のグリッド線の位置 (ID と呼ぶ) を推定することにより、2 次元コードの歪みを補正する。

(1) U-net を用いたグリッド線の推定

全層畳み込みモデルの一種である U-net を用いて、2 次元コードからグリッド線領域検出を行う。検出されたエッジを水平方向と垂直方向の 2 種類に分別し、それぞれについて以下の処理を行う。詳細は 3.3 節に後述する。

(2) 制約条件の設定

2 次元コードに遮蔽領域が無いと仮定し、グリッド線の左右または上下の位置関係から、グリッド線の ID の制約条件を設定する。

(3) グリッド線の ID 認識最適化

山登り法を適用し、グリッド線の ID の認識を行う。詳細は 3.4 節で後述する。

(4) 各モジュールの領域取得

最適化されたグリッド線のラベルから補助線を作成し、各モジュールの領域を推定する。次に、算出された各モジュールの領域に着目し、平均輝度値から明暗情報を取得する。

(5) デコード

取得した各モジュールの明暗情報から 2 次元コードを復元し、デコード処理を行うことでデコード結果を取得する。

3.3 モジュールのグリッド線検出

従来手法における可視のグリッド線の抽出処理を、提案する方式では全層畳み込みモデルの一種である U-net [14] を使用したセマンティックセグメンテーションに置き換え、不可視のモジュール境界を含めた 2 次元コードのすべてのモジュール境界 (グリッド) を推定する。

U-net は、図 9 に示すように 5 層の畳み込み層を持つエンコーダと、同じく 5 層の逆畳み込み層を持つデコーダから構成される。エンコーダとデコーダの対応する各層は、スキップ結合によって接続される。この構造により、入力画像の局所情報を効果的に捉えつつ、高解像度のセグメンテーションを実施することが可能になる。

3.4 ID 認識最適化

先行研究では可視のエッジを抽出していたために個々のエッジの長さは平均で数エッジ程度と短かったが、提案手法では 2 次元コードを構成するグリッドを推定するために、より長いグリッド線としてグリッドを構成するグリッド線が抽出される。このことにより、本来は連続した異なる ID が割当てられるべき隣接するグリッド線に同じ ID が割当てられるという局所解が生じ、この種類の局所解に陥ると脱出が困難となることがわかった。この問題を解決するために、初期解生成手法と評価関数の変更や、修復操

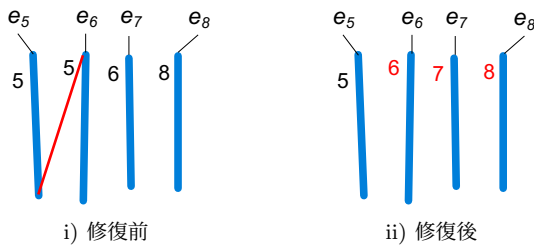


図 10: 修復操作

作の追加, デコードに用いるグリッド線生成手法の変更を行う。

3.4.1 評価関数の変更

先行研究における個体の評価は, 同じ ID 同士のグリッド線を結ぶ補助線に着目して行われる。すなわち, 個体 C がなす目的関数 $F(C)$ は, グリッド線と補助線の角度による評価 $F_a(C)$, 補助線とグリッド線の交叉回数による評価 $F_c(C)$, グリッド線間の間隔による評価 $F_i(C)$ から算出される。

$$F(C) = w_a F_a(C) + w_c F_c(C) + w_i F_i(C) \quad (1)$$

ここで, w_a , w_c , w_i はそれぞれ, $F_a(C)$, $F_c(C)$, $F_i(C)$ に掛かる重みである。本手法では, 式 (1) で示した接続線の角度による評価関数 $F_a(C)$, を式 (2) のように接続線の長さによって重み付けするように変更を行った。

$$F_a(C) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{l_i^2}{2} \left\{ \left(\frac{\theta_{i,1}}{180} \right)^2 + \left(\frac{\theta_{i,2}}{180} \right)^2 \right\} \quad (2)$$

n は接続線の総数であり, l_i は接続線の長さを表す。接続線の両端にある 2 つのグリッド線の延長線に対して接続線のなす角度を $\theta_{i,1}$, $\theta_{i,2}$ としており, グリッド線と接続線が滑らかであるほどよい解候補となる。

3.4.2 修復操作の追加

U-net の追加により生じた新たな局所解からの円滑な脱出を可能にするために, 修復操作を追加する。追加する修復操作の対象となる制約違反は, 隣接関係にあるグリッド線同士に同じ ID が割り当てられている状況とする (図 10)。このときに, 通常の値割当て操作によりグリッド線 e_6 に 6 の ID を割当てると, グリッド線 e_6 と e_7 の間で同じ ID を持つ制約違反が生じるため, 制約違反量が減少しない。特に F_a などの評価が微妙に悪化する場合は値割当てが行われない。このため, 追加する修復操作は, 注目する制約違反を起こしているグリッド線 e_v , e_{v+1} に隣接しているグリッド線について順次走査を行い, 隣接するグリッド線間で ID が連続していないグリッド線 e_w がある場合は, e_v または e_{v+1} と e_w の間のグリッド線の ID を連番となるように変更する。

4. 評価実験

提案手法の有効性を検証するため, 合成データと実撮影データを用いて実験を行った。U-net の学習には, 合成データを使用した。合成データは, 折り紙シミュレータを使用して作成された歪んだ紙を模倣した 3 次元データに 2 次元コードや正解映像をテキストチャとして貼り付けて仮想的に撮影を行った画像から構成されており, 正解画像は背景領域・縦方向のグリッド線領域・横方向のグリッド線領域・グリッド線の交点領域・遮蔽領域の 5 つのクラスを含む。データ数は 33,600 枚で, 訓練データとテストデータが 9:1 になるように分割した。また, 画像サイズは 512x512 とした。

また, 実撮影データは, 感熱紙に印刷された 2 次元コードに歪みを加えて撮影を行い, 通常の 2 次元コードリーダーでは読み取ることが困難な歪んだ 2 次元コード画像 40 枚である [1]。

4.1 実験設定

評価実験の比較手法として, 新川らの手法 [1](比較手法 1) と株式会社デンソーウェーブの”クルクル - QR コードリーダー”^{*1}(比較手法 2) を用いた。

提案手法と比較手法 1 においては, 1 枚の画像毎に 5 回復号を行い復号成功率が 50%以上となった場合を復号成功とした。また, 比較手法 2 においては距離と角度を自由に動かし約 5 秒間撮影を行い, 復号に成功した場合を復号成功とした。

2 次元コードの歪みの激しさを定量化するために, 歪み量と遮蔽量を以下のように定義した。

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)

遮蔽量 2 次元コードを構成する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 (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す。

4.2 実験結果

復号成功枚数と復号に要した処理時間を表 1, 2 に示す。実験の結果, 40 個の 2 次元コードのうち, 比較手法 1 では 22 個, 比較手法 2 においては 5 個, 提案手法では 38 個の復号に成功した。また, 表 2 に示すように, 処理時間は新川らの手法と比較して約 75%短縮することに成功した。

提案手法と比較手法を用いて 40 個の 2 次元コードを復号した場合の成否結果を図 11~13 に示す。図 11~13 のグ

*1 <https://www.denso-wave.com/ja/system/qr/product/reader.html>

表 1: 復号成功枚数

提案手法	比較手法 1	比較手法 2
38/40	22/40	5/40

表 2: 復号に要した処理時間 [ms]

提案手法	比較手法 1
3,103	12,909

ラフは横軸が歪み量，縦軸が遮蔽量を表す。また，グラフ上で復号の成否を○×を用いて表す。提案手法を用いることで，遮蔽領域が存在する 2 次元コードの復号に成功していることがわかった。

先行研究と提案手法のエッジ検出結果の例を図 14 に示す。U-net を用いた提案手法のグリッド線検出は，ソーベルフィルタを用いた先行研究のエッジ検出と比較し，ソーベルフィルタでは検出が困難な輝度勾配のない領域のモジュールのグリッド線の検出が可能となる。

復号に用いた 2 次元コードや復号結果の例を図 15 に示す。図 15 の復号結果に示される赤色の領域は，復号に失敗したモジュールを意味する。U-net でエッジ検出を行うことで，ソーベルフィルタを用いたエッジ検出では検出が困難な輝度勾配のない領域に存在するエッジの検出が可能となったことに加え，遮蔽領域は遮蔽領域クラスとしてセグメンテーションが可能になる。これにより，遮蔽領域付近のエッジを検出を抑制し，歪みによって発生するエッジ同士の誤接続を抑制している。上記の改良により，遮蔽領域が存在する 2 次元コードの復号が可能になったと考察した。

5. 結論

本研究では，複雑に歪んだ 2 次元コードを復号する方式を提案した。提案手法は，エッジ検出に U-net を使用し，それに伴い最適化手法の評価関数や個体生成方法の改善を行った。実験から，提案手法は従来手法よりも実撮影上で撮影された歪みを含む 2 次元コードの復号成功率が向上し，処理時間を短縮できることを確認した。今後，さらなる高速化を検討する。

参考文献

[1] Shoki Shinkawa, Makoto Kamizono, Shoko Hira, and Satoshi Ono. Decoding distorted two-dimensional barcodes using combinatorial optimization. In *2021 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*, pp. 523–528. IEEE, 2021.

[2] 吉田博一. デジタルデータ記録紙のデジタルデータ読取装置. 特許番号 第 2742555 号, 1998.

[3] 飯田正広, 重草久志. 2 次元コード読取方法, 2 次元コード読取装置及び記録媒体. 特許出願公開番号 特開 2000-222517, 2000.

[4] 水本裕之, 瀬口陽太郎. 二次元コード読取装置. 特許出願

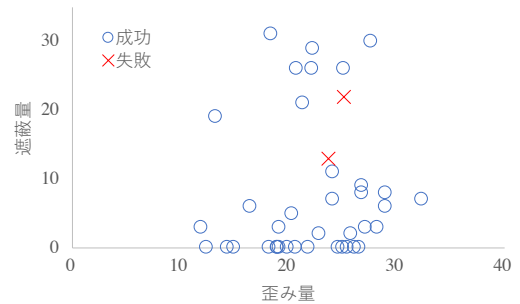


図 11: 提案手法による復号結果

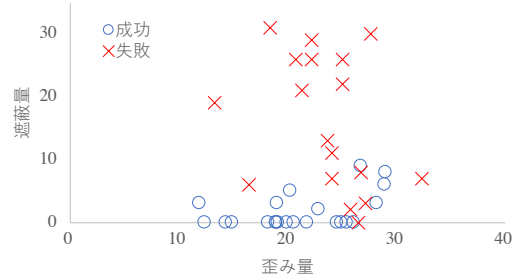


図 12: 比較手法 1 による復号結果

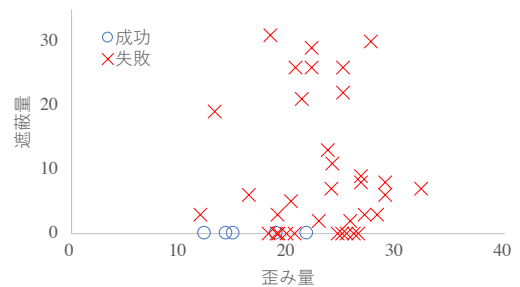
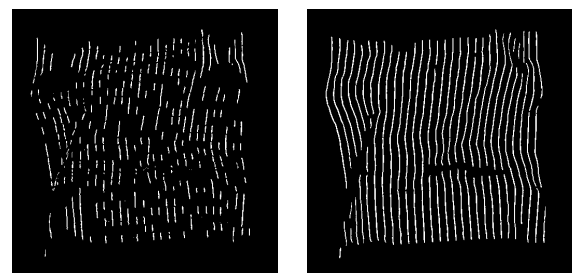


図 13: 比較手法 2 による復号結果



(a) 比較手法 1 (b) 提案手法

図 14: エッジ検出結果

公開番号 特開 2004-362053, 2004.

[5] S. Ono, Y. Kawakami, H. Kawasaki, and S. Fujita. A two-dimensional barcode with robust decoding against distortion and occlusion for automatic recognition of garbage bags. In *2014 22nd International Conference on Pattern Recognition*, pp. 2879–2884, Aug 2014.

[6] Kohei Kamizuru, Yudai Kawakami, Hiroshi Kawasaki, and Satoshi Ono. Belief-propagation-based robust decoding for two-dimensional barcodes to overcome distortion and occlusion and its extension to multi-view decoding. In *2015 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, pp. 2359–2363. IEEE, 2015.

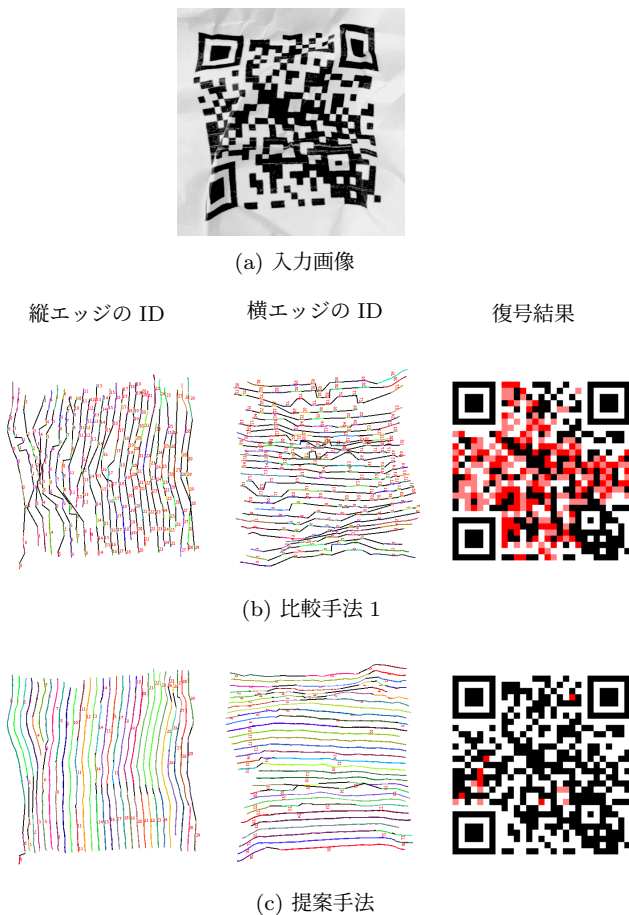


図 15: 復号結果の比較

- [12] Timo Ojala, Matti Pietikainen, David Harwood. A comparative study of texture measures with classification based on featured distributions. *Pattern recognition*, Vol. 29, No. 1, pp. 51–59, 1996.
- [13] 鞍津輪一希, 上鶴晃平, 久富あすか, 川崎洋, 小野智司ほか. 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. *情報処理学会論文誌数理モデル化と応用 (TOM)*, Vol. 12, No. 2, pp. 69–81, 2019.
- [14] Olaf Ronneberger, Philipp Fischer, and Thomas Brox. U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. In *International Conference on Medical image computing and computer-assisted intervention*, pp. 234–241. Springer, 2015.

- [7] Harold Fredricksen and Irving Kessler. Lexicographic compositions and debruijn sequences. *Journal of Combinatorial Theory, Series A*, Vol. 22, No. 1, pp. 17–30, 1977.
- [8] Li Zhang, Brian Curless, and Steven M. Seitz. Rapid shape acquisition using color structured light and multi-pass dynamic programming. In *In The 1st IEEE International Symposium on 3D Data Processing, Visualization, and Transmission*, pp. 24–36, 2002.
- [9] Motilal Agrawal, Kurt Konolige, and MortenRufus Blas. Censure: Center surround extremas for realtime feature detection and matching. In David Forsyth, Philip Torr, and Andrew Zisserman, editors, *Proc. European Conference on Computer Vision (ECCV)*, Vol. 5305 of *Lecture Notes in Computer Science*, pp. 102–115. Springer Berlin Heidelberg, 2008.
- [10] K Nakamura, K Kamizuru, H Kawasaki, and S Ono. Multi-agent-based two-dimensional barcode decoding robust against non-uniform geometric distortion. *International Journal of Computer Information Systems and Industrial Management Applications*, Vol. 9, pp. 60–70, 01 2017.
- [11] Kohei Kamizuru, Kazuya Nakamura, Hiroshi Kawasaki, and Satoshi Ono. A belief-propagation-based decoding method for two-dimensional barcodes with monochrome auxiliary lines robust against non-uniform geometric distortion. In *Thirteenth International Conference on Quality Control by Artificial Vision 2017*, Vol. 10338, p. 1033805. International Society for Optics and Photonics, 2017.