

# パターン認識と GMD 復号法を利用した難読 QR コードの高精度認識 アルゴリズムの設計と実装

## Design and Implementation of High-Accuracy Recognition Algorithm of QR Code by Using Pattern Recognition and GMD Decoding

古本 啓祐†      草薙 祥広†      森井 昌克†  
Keisuke Furumoto      Yoshihiro Kusanagi      Masakatu Morii

### 1. まえがき

近年, QR コード[1]は従来の用途に加えて, 空港での搭乗時の手続きや処方箋などにも利用されている. また, QR コードの利便性の高さや認知度の高さを利用して, 決済や各種登録情報の管理などの用途に QR コードを組み込みサービスの利便性の向上を図る動きが増加している. QR コードの利便性の高さは優れた位置検出精度や誤りが生じた場合の訂正能力の高さに裏付けられている. しかし, 前述のような用途拡大に伴い, 印刷環境や読み取り環境によっては従来のデコード方式では対応できない場面が存在する. 原因としては QR コードの図形的な特徴が検出できずに撮影画像からの切り出しが不可能であることや, 符号化領域に訂正能力を超える誤りが生じることが挙げられる. 例えば, 処方箋に印刷されている QR コードは印刷環境の影響でかすれ状の誤りが付加していることが多く, また格納情報量が多いためバージョンの大きな QR コードが使用されていることもあり, 従来のデコード方式では十分な認識精度を実現することができない.

QR コードの認識精度向上を図り, エンコードの際の誤り訂正符号化に関する規格を一部修正することにより誤り訂正能力を向上させた方式[2]も提案されている. しかし, 前述のように近年の用途拡大は QR コードの認知度の高さに基づいた面もあり, また処方箋などの用途においては過去に印刷された QR コードが読み取れることも重要である. つまり, 新たな規格の二次元コードの利用は現実的ではない. QR コードのエンコード方式は変更せずに, デコード方式のみを改良することで認識精度を向上させる方式が望ましいが, 従来のデコードシステムで広く利用されているユークリッド復号法[3]ではなく, 一般化最小距離 (Generalized Minimum Distance: GMD) 復号法[4]を利用することによりデコードの際の誤り訂正能力を向上させた方式[5]が提案されている. しかし, 実環境において QR コードのデコードに失敗する主な原因は位置検出パターン探索の失敗による撮影画像内からの QR コードシンボルの切り出し失敗によるものである. これは QR コードシンボルの切り出しに用いられる位置検出パターンなどの機能パターンはモジュールの配置が規格化されているのみで, 誤りに対する耐性を持たないことに起因する. つまり, QR コードの復号処理以前にデコードに失敗しているケースが多く, 認識精度を向上させるためには誤り訂正能力の向上に

加えて, QR コードの切り出しに不可欠な位置検出パターンの探索精度を向上させることが必要である.

本稿で提案する高精度認識アルゴリズムでは位置検出パターンの探索を行う際にパターン認識を利用することにより, 探索精度の向上を実現している. 従来のデコードシステムでは QR コードの位置検出パターンを構成する明暗のモジュール幅の比率が走査する角度によらず一定であるという特徴を利用しているが, この手法では位置検出パターン内にかすれ状などの誤りが発生して比率が崩れた場合, 認識ができなくなってしまう. 本稿の提案アルゴリズムでは位置検出パターンの形状の特徴を利用してパターン認識を行うことにより探索精度を向上させている. さらに, ユークリッド復号法ではなく GMD 復号法を利用することにより復号精度の向上も可能としている. パターン認識の際に取得した各モジュールの形状や輝度値を利用することにより GMD 復号法に必要なシンボルの信頼度を算出する. 以上の提案手法の評価には印刷時に付加したノイズを再現した QR コードを使用し, 有用性を示す. 本稿ではこのような QR コードを難読 QR コードと表記する.

### 2. QR コード

本章では QR コードの具体的な生成手順について 2.1 節で, 読み取り手順について 2.2 節で述べる.

#### 2.1 QR コードの生成

QR コードは明暗 2 値で構成されているモジュールを格子状に配置することで生成される. 位置検出パターン, 位置合わせパターン, タイミングパターンから構成される機能パターンとデータコード語, 誤り訂正コード語, 形式情報から構成される符号化領域に分けられる. また, QR コードは格納するデータ容量や誤り訂正レベルに応じて 40 までのバージョンが用意されており, 例えばバージョン 1 の場合は縦横 21 モジュールから構成されている. QR コードにデータを格納する際には一定量の誤りを訂正するために有限体GF(2<sup>8</sup>)における短縮 Reed-Solomon (RS) 符号が利用されている. 誤り訂正レベルは L(7%), M(15%), Q(25%), H(30%)の 4 段階用意されており, 例えば M では最大で符号化領域全体の 15%以下の誤りが生じた場合でも訂正可能である. 本稿ではバージョン 1 で誤り訂正レベル L の QR コードを 1-L 型と表記する.

† 神戸大学大学院工学研究科,  
Graduate School of Engineering, Kobe University

1-M型のQRコードを生成する場合を例に詳細な生成手順[6]を説明する。1-M型のQRコードの符号化領域には短縮(26,16,4)RS符号とBCH符号が使用されている。短縮(26,16,4)RS符号は16個のデータコード語と10個の誤り訂正コード語を生成する際に使用される。データコード語は格納データの種類を示すモード指示子と文字数指示子を先頭に配置し、その後ろに格納データを決められた手順でJISコードに変換したものを配置する。さらに、必要なデータコード語数とするために終端パターン、埋め草ビット、埋め草コード語を追加し生成される。次に誤り訂正コード語はまず有限体GF(2<sup>8</sup>)の原始元を $\alpha$ として先ほど生成した各データ語を $\alpha$ のべき乗で表し、この $\alpha$ のべき乗からなるベクトルに対して短縮(26,16,4)RS符号の生成行列を掛けることで生成される。データコード語と誤り訂正コード語を生成する際はさらにマスク処理と呼ばれる決められたマスクパターンとのXOR演算を行い、明暗の割合に偏りが生じないように調整が行われる。QRコードの一部分に明暗のどちらかのモジュールが集中すると座標指定の精度が低下するためである。次に、符号化領域における形式情報の生成について説明する。形式情報は誤り訂正レベル指示子とマスクパターン参照子の計5ビットをBCH符号により15ビットとし、さらに15ビットのビット列とXOR演算することで生成される。以上の1-M型のQRコードの構成を図1に示す。

## 2.2 QRコードの読み取り

本節ではQRコードを含んだ画像から格納データの読み取りを行う手順について説明する。まずQRコードを含む画像からQRコードを含む領域を検出する切り出しと呼ばれる操作を行う。この切り出し処理を行う際はQRコードの幾何学的な特徴が利用される。切り出し処理には位置検出パターンの探索に加えて、QRコードのバージョンの決定と位置合わせパターンの取得、さらに各モジュールの明暗の決定までが含まれる。位置検出パターンを探索する際、位置検出パターンの明暗のモジュール幅の比率が常に1:1:3:1:1となっているという特徴を利用する。この比率は走査線が位置検出パターンの中心を通る場合、どの方向からの場合でも保たれるため、画像内でQRコードシンボルが傾いている場合でも認識することが可能である。

切り出し処理により各モジュールの明暗情報が定まり、その後の符号化領域の復号処理ではまずBCH符号の復号処理により形式情報に格納されたマスクパターン参照子の情報を取得する。次に、マスクパターン参照子の情報に基づき符号化領域に施されたマスクを解除し、データコード語及び誤り訂正コード語を復元し、RS符号の復号処理を実行し、格納データを得る。

## 3. GMD復号法

最尤復号法は受信語と全ての符号語との条件付確率を求め、最も確率の大きい符号語に復号する復号法である。最尤復号法は全ての符号語との関係を調べるため復号誤り確率が最も小さくなる復号法であるが、計算量が膨大なものとなる。そこで受信語の各シンボルに対して信頼度を設け、この信頼度を補助情報として利用することにより近似的に最尤復号を行う手法としてGMD復号法が知られている。まず、GMD復号法を試行する際にも用いられる消失訂正[7]について3.1節で、GMD復号法について3.2節で述べる。

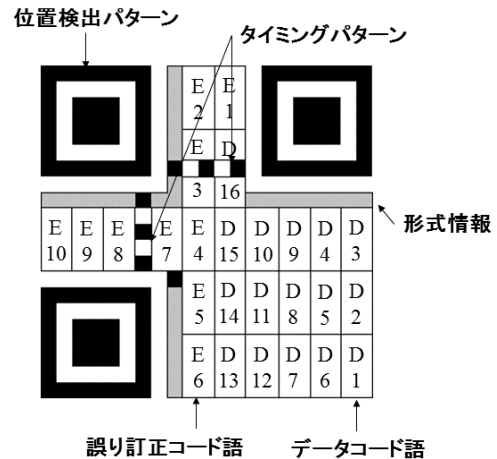


図1 1-M型のQRコードの構成

### 3.1 消失訂正

消失の個数を $\epsilon$ 、誤りの個数を $e$ とした場合、最小距離 $d$ のもとで次式を満たす範囲で消失を含む誤りの訂正が可能である。

$$2e + \epsilon \leq d - 1$$

また、消失位置多項式は消失の位置を $x_i$ として以下のようにになる。

$$\lambda(z) = \prod_{i=0}^{\epsilon-1} (1 - x_i z)$$

$\lambda(z)$ を用いて修正シンドローム多項式は以下のようにになる。なお、 $S(z)$ はユークリッド復号法における各シンドロームを係数とするシンドローム多項式である。

$$T(z) = S(z)\lambda(z) \bmod z^{2t}$$

ユークリッド復号法を実行する際に $T(z)$ を $S(z)$ の代わりに初期値とすることで消失訂正を行うことが可能である。

### 3.2 GMD復号法

GMD復号法はForneyによって提案された通信路の信頼度情報に基づく軟判定復号法である。GMD復号法では消失と誤りのある場合の復号において消失の集合を変更しながら復号を実行する。まず、GMD復号法を利用する際には最初に受信したシンボルの内、信頼度の小さい方から $d-1$ 個を消失として扱う。そして $d-1$ 個の消失で他に誤りがない場合で訂正を試行する。訂正に失敗した場合、消失の数を信頼度の低い方から $d-3$ 個とし、 $d-3$ 個の消失と1個の誤りとして訂正を試行する。以降、訂正に失敗するごとに消失の数を減らしていきながら訂正を試行する。最後に消失の数を0とし、 $[(d-1)/2]$ 個の誤りとした場合でも訂正できない場合、復号不可とする。このようにGMD復号法では最小距離 $d$ の符号に対して最大 $[(d-1)/2]$ 回の限界距離復号を行う。また、各試行の際の復号成否の判定には各シンボルの信頼度の合計を $\theta$ 、符号語の長さを $n$ として

$$\theta - 2 \sum_{i \in \epsilon} \theta_i > n - d$$

を満たした場合に訂正に成功したと判定する。ただし、 $\epsilon$  はその反復において得られた消失を含む誤りの位置の集合であり、 $\theta_i$  は  $i$  番目の位置にあるシンボルの信頼度である。

#### 4. 難読 QR コード高精度認識アルゴリズム

本章では難読 QR コードの高精度認識アルゴリズムとして、パターン認識を利用して難読 QR コードの位置検出パターンの探索精度を向上させた方式を 4.1 節で、GMD 復号法を利用して難読 QR コードの復号精度を向上させた方式を 4.2 節で述べる。ここで、従来のデコードシステムの読み取りアルゴリズムの流れを図 2 に示す。本研究では図 2 における位置検出パターンの探索の処理とデータ復号の処理の精度を本章の提案方式により向上させる。

##### 4.1 パターン認識を利用した難読 QR コードの探索精度の向上

本節ではパターン認識を利用した位置検出パターンの新たな探索方法について提案する。位置検出パターンは図 1 のように中央の暗モジュールの中心を通る一直線上の暗・明・暗・明・暗のモジュール幅の比率が常に 1:1:3:1:1 に保持されるという特徴を持つ。従来のデコードシステムはまず画像内を走査してこの特徴を持つ領域を探索している。しかし、この手法ではかすれや汚れなどの要因で明暗のモジュール幅の比率が崩れてしまった場合、位置検出パターンとして認識することができない。

そこで、位置検出パターンの探索方法について新たな手法を提案する。提案手法では、明暗の比率が一定であるという特徴ではなく、図 3 のように位置検出パターンの正方形の中に正方形が 2 個存在しているという形状の特徴を利用する。提案手法で位置検出パターンを探索する手順を以下に示す。

Step1 2 値化した画像の輪郭を抽出する。

Step2 抽出した各輪郭について、その輪郭が囲む面積 (1 ピクセルを面積 1 とする) と輪郭を含む最小の矩形を求める。

Step3 各輪郭について以下の条件を満たしているかどうか判定を行う。

$$\text{条件 1: 輪郭が囲む面積} \leq \frac{\text{画像全体の面積}}{500}$$

$$\text{条件 2: } \frac{\text{輪郭が囲む面積}}{\text{矩形の面積}} \leq 0.65$$

$$\text{条件 3: } \frac{\text{矩形の短辺}}{\text{矩形の長辺}} \leq 0.7$$

Step4 正方形の中に正方形が 2 個存在する輪郭を位置検出パターンとして認識する。

Step5 Step4 において、位置検出パターンが 3 箇所認識できなかった場合、正方形の内側に条件 1 のみを満たす輪郭が 1 個から 3 個存在する輪郭を位置検出パターンとして認識する。

Step6 Step5 までで認識できた位置検出パターンが 1 箇所または 2 箇所だった場合、認識できた位置検出パターンと同程度の大きさの正方形を位置検出パターンとして認識する。

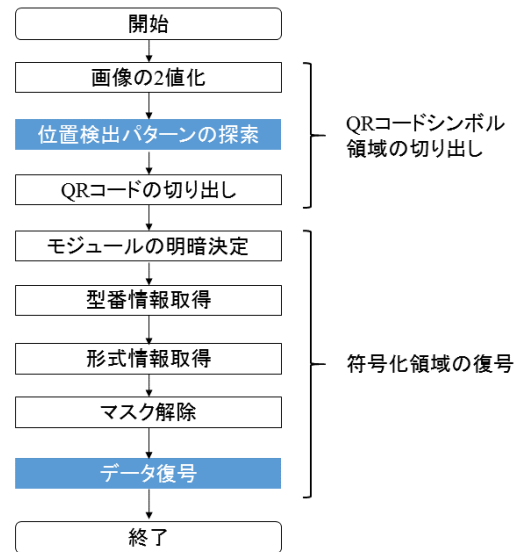


図 2 QR コードの読み取りアルゴリズム

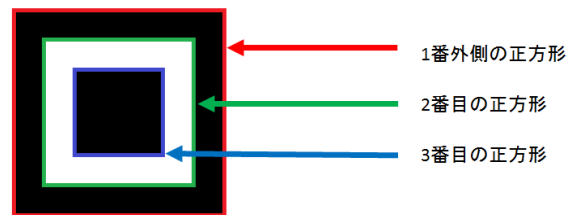


図 3 位置検出パターンの形状

以上の手順で位置検出パターンの明暗のモジュール幅の比率が崩れている場合でも探索を行うことが可能である。

Step3 の各条件において、条件 1 は輪郭の面積について判定を行っている。また、条件 2 では輪郭の形状が、その輪郭を含む最小の矩形に近いかどうか判定を行っている。条件 3 では輪郭を含む最小の矩形が正方形に近いかどうかの判定を行っている。また、Step5 において、正方形の内側に存在する条件 1 のみを満たす輪郭の数について、1 個から 3 個としたのは、位置検出パターンの一番小さい暗モジュールで構成される正方形がノイズによって分裂した場合を考慮している。

##### 4.2 GMD 復号法を利用した難読 QR コードの復号精度の向上

2 章で述べたように QR コードの生成時には短縮 RS 符号が利用されており、3 章で述べた GMD 復号法を適用可能である。QR コードの読み取りの際に各シンボルの信頼度を算出し GMD 復号法を適用する方式[5]が提案されている。GMD 復号法を適用することでユークリッド復号法を利用した従来のデコードシステムでは読み取りが不可能であった難読 QR コードを読み取ることが可能である。以下に文献[5]の方式を述べる。QR コードにおける各シンボルの信頼度情報の取得方法は大きく分けてモジュール単位の精度を算出する操作とシンボルの信頼度をシンボル自身のコントラストとその構成モジュールの精度から算出する操作に分けられる。提案方式における GMD 復号法に必要な

シンボルの信頼度を求める方針は、視覚的に捉えることの可能なシンボル領域のコントラストや歪み具合を機械的に取得することである。これはQRコードのみならず二次元コード一般に言えることであるが、撮影時におけるピントのズレや一部分に付加したノイズの情報は多くの場合視覚的に捉えることが可能であり、提案方式ではこの視覚的に捉えることの可能なシンボルの状態を機械的に取得し信頼度情報としている。図4にこの視覚的に捉えることが可能なノイズの例を示す。図4はQRコードのある2つのシンボルを抜き出したものであり、左右のシンボルを比較した場合、右側のシンボルにより多くのノイズが付加していることを視覚的に捉えることが可能である。シンボルの信頼度情報を取得する際に構成モジュールの精度も利用しているが、これはQRコードの復号時には各モジュールの中心座標と明暗情報の取得が行われるため、その情報を有効利用するためである。以下にモジュールの精度とシンボルの信頼度の具体的な算出方法について説明する。

モジュールの精度を算出する際にはまずモジュールの輝度値からノイズの付加の程度を推測する。モジュールの輝度値はQRコードのデコードを実行する際に取得しているモジュールの中心とその周囲の任意の個数のピクセルのRGB値から算出する。RGB値をそれぞれ $r, g, b$ とすると輝度値 $L$ は以下の式で求められる。

$$L = 0.298912r + 0.586611g + 0.114477b$$

このモジュールの輝度値について、その値が生成時と等しい255や0近辺の値であればノイズが付加している可能性は低いと推測できる。一方で128近辺の値の場合はノイズが付加し正確な明暗の識別が困難であると推測される。これは次に述べるシンボル全体の信頼度を算出する際にも共通する考え方である。また、そのモジュールの輝度値を算出する際に利用した中心付近の任意の個数のピクセルにおけるRGB値の分布にばらつきがある場合、モジュールの形状が変形し明暗の境目が不明瞭になっていると推測される。本稿では対象のピクセルの内、輝度値が50以上異なるものがあつた場合、そのモジュール内においてばらつきが発生しているとしている。このモジュールの中心付近におけるピクセルのばらつき情報はシンボルの信頼度を修正する際に使用する。

次にGMD復号法を実行する際に必要なシンボルの信頼度の算出方法について説明する。シンボルの信頼度を算出する際は、まずシンボル全体の輝度値から信頼度を算出し、その後に構成モジュールの精度から信頼度を修正する。シンボル全体の輝度値を算出する際は構成モジュールの内、数の多い方の明暗のみを対象とし、その多い方の明暗のモジュールの輝度値の平均値をそのシンボルの輝度値とする。シンボルの輝度値はモジュールの輝度値の場合と同じく、255や0近辺の値であればノイズが付加している可能性が低いと推測し、128近辺の値の場合はノイズが付加し正確な識別が困難であると推測する。つまり、シンボルの輝度値に応じて信頼度を算出する。具体的には次式でシンボルの信頼度 $\theta$ を算出する。次式における $L$ は前述した輝度値、 $s$ はデコードする際に明暗を識別するしきい値である。一般のデコードシステムにはしきい値を128に固定した方式や明暗の分布状態からしきい値を算出する方式が多い。

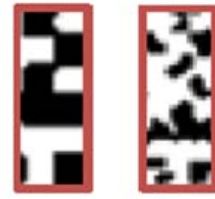


図4 ノイズの付加したシンボル例

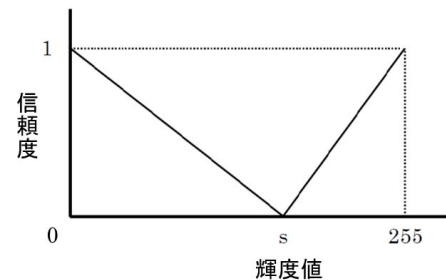


図5 信頼度関数

$$\theta = \begin{cases} \frac{s-L}{s} & (L < s) \\ \frac{L-s}{255-s} & (L \geq s) \end{cases}$$

上式を図に表したのが図5である。図5から輝度値がしきい値近辺である場合が最も信頼度が低く、255や0近辺の値である場合は最も信頼度が1に近づくことが分かる。

シンボル全体の明暗状態から信頼度を算出し、次にシンボルの形状が変形している場合やノイズが偏っている場合を想定して信頼度の修正を行う。修正はモジュールの精度を算出する際に判定したばらつき情報を利用する。対象のシンボルの構成モジュールに含まれるばらつきと判定されたモジュールの個数で先ほど求めたシンボルの信頼度を除算する。 $\theta$ が修正前の信頼度であり、 $c$ がばらつきと判定されたモジュール数とすると次式で表される。

$$\theta' = \frac{\theta}{c+1}$$

修正した信頼度である $\theta'$ を対象のシンボルの信頼度としてGMD復号法を実行する。

また、本稿ではデコードに失敗した場合はしきい値 $s$ の値を変更して試行を複数回行う仕様とする。しきい値 $s$ の算出方法について、まず画像全体の各輝度値の出現頻度の分布状態からあるしきい値 $s$ を設定する。再試行する場合には画像をいくつかのブロックに分割し、各ブロック内において同様の手順でしきい値 $s$ を算出する。それぞれのブロック内におけるシンボルの信頼度を算出する際はそのブロックにおけるしきい値 $s$ を使用する。さらに、実際に本章で述べた2つの提案手法を利用したデコードシステムを構築する場合は、4.1節の位置検出パターン探索の際に算出した各モジュールの輪郭や輝度値の情報を利用して、信頼度の算出を行っている。

## 5. 検証実験

本章では4章の提案方式を実環境における誤りの発生を再現した難読QRコードに対して適用した検証実験について述べ、その結果の考察を行う。

### 5.1 実験概要

4.1節で述べたパターン認識を利用した難読QRコードの位置検出パターンの探索精度を向上させた提案方式と4.2節で述べたGMD復号法を利用した難読QRコードの復号精度を向上させた提案方式を実装したデコードシステムを提案システムと表記する。本章ではこの提案システムと従来のデコードシステムの評価を行う。従来のデコードシステムでは位置検出パターンを探索する際は、構成している明暗の比を利用し、復号処理の際にはユークリッド復号法を利用している。

評価を行う難読QRコードとして位置検出パターンも含んだ領域全体に対して領域分割を変更しながらノイズを付加したサンプルを作成する。従来研究[5]では符号化領域のみにノイズを付加した場合の評価のみであったが、これは従来手法では位置検出パターンにノイズを付加した場合はシンボルの切り出しを行うことができず、復号処理を行う前にデコードに失敗するためである。本章では位置検出パターンの探索精度の評価も含めて行うために、シンボル全体に対してノイズを付加するものとする。具体的にはシンボル全体に対して領域分割を10~50%の間で2%ごとに変更しながら5ピクセル水平方向にランダムにずらす画像処理を行い難読QRコードを生成した。図6に誤りの例を示す。実環境では図6に示したように位置検出パターンにノイズが付加した場合、明暗の比率が一部崩れてしまうことが多い。領域分割を変更しながらノイズを付加したのは、ユークリッド復号法を利用した従来のデコードシステムならびにGMD復号法を利用した提案方式における復号精度の評価も行うためである。画像処理を加えるQRコードには3-M型のものを使用した。また、提案方式におけるGMD復号法のアルゴリズムには神谷の手法[8]を適用した。適用したアルゴリズムを以下に示す。

#### GMD Algorithm 1

```

01:  $k \leftarrow 0, L_0 \leftarrow 0,$ 
 $P_0(z) \leftarrow 1, R_0(z) \leftarrow T(z), U_0(z) \leftarrow 0, V_0(z) \leftarrow z^{2t}$ 
02:  $Q_k(z) \leftarrow \left[ \frac{R_k(z)}{1 - x_k z} \right], \gamma_k \leftarrow R_k(z) - (1 - x_k z)Q_k(z)$ 
 $W_k(z) \leftarrow \left[ \frac{V_k(z)}{1 - x_k z} \right], \nu_k \leftarrow V_k(z) - (1 - x_k z)W_k(z)$ 
03: if ( $\gamma_k = 0$ ) then
 $L_{k+1} \leftarrow L_k$ 
 $P_{k+1}(z) \leftarrow P_k(z), R_{k+1}(z) \leftarrow Q_k(z),$ 
 $U_{k+1}(z) \leftarrow (1 - x_k z)U_k(z), V_{k+1}(z) \leftarrow V_k(z)$ 
04: if ( $\gamma_k \neq 0$ ) then
(a) if ( $\nu_k \neq 0$  and  $2L_k \geq k + 1$ ) then
 $L_{k+1} \leftarrow L_k$ 
 $P_{k+1}(z) \leftarrow P_k(z) - \frac{\gamma_k}{\nu_k} U_k(z)$ 
 $R_{k+1}(z) \leftarrow Q_k(z) - \frac{\gamma_k}{\nu_k} W_k(z)$ 
 $U_{k+1}(z) \leftarrow (1 - x_k z)U_k(z), V_{k+1}(z) \leftarrow V_k(z)$ 
(b) else
 $L_{k+1} \leftarrow L_k$ 
 $P_{k+1}(z) \leftarrow (1 - x_k z)P_k(z), R_{k+1}(z) \leftarrow R_k(z)$ 
 $U_{k+1}(z) \leftarrow U_k(z) - \frac{\nu_k}{\gamma_k} P_k(z)$ 

```



図6 位置検出パターンや符号化領域にノイズが付加した例

$$V_{k+1}(z) \leftarrow W_k(z) - \frac{\nu_k}{\gamma_k} Q_k(z)$$

05:  $k \leftarrow k + 1, \text{output } L_k, P_k(z), R_k(z)$   
 if ( $k < d - 1$ ) then return to (02), else stop.

$T(z)$ は消失を $d - 1$ 個とした場合の修正シンドローム多項式であり、 $x_k$ は消失とした $d - 1$ 個の内、最も信頼度が高いものを0番目としたときの $k$ 番目に信頼度が高いシンボルである。また、アルゴリズム05行目で $k$ を更新する前に $x_k$ の信頼度を0とする。GMD復号法を実行する際は $L_k, P_k(z), R_k(z)$ を求めた後にそれぞれの根を求める。根の集合を $P[k]$ および $R[k]$ とし、 $P_k(z)$ の根の個数を $|P[k]|$ とする。また、 $k = 0$ であり、 $\theta$ を全シンボルの信頼度の和とする。ただし、反復処理の間に用いられなくなった消失の位置 $x_k$ の信頼度を0とした場合でも $\theta$ の値は更新しない。 $2L_k \geq k + 1$ もしくは $|P[k]| \neq L_k$ の少なくとも一方の条件を満たした場合、 $k + 2$ を $k$ として再度条件を確認し、 $k > d + 1$ となったところで終了する。条件を満たさなかった場合は、 $P[k]$ およびその際に用いた消失から $R[k]$ を除いた位置のシンボルの和を $\theta_s$ とし、 $\theta - 2\theta_s > n - d$ を満たしたならばGMD復号法に成功したと判定する。誤りの位置は $P[k]$ の要素となっている。誤りの大きさ $Y_j$ はその際に用いた消失位置多項式を $\Psi(z)$ として、 $\alpha^{-j}$ が $P[k]$ に含まれる場合は以下の式を利用する。

$$Y_j = \frac{\alpha^{-j(d-2)}}{U_k(\alpha^{-j})\Psi(\alpha^{-j})P_k'(\alpha^{-j})}$$

また、 $\alpha^{-j}$ を消失として用いていた場合は以下の式を利用する。

$$Y_j = \frac{R_k(\alpha^{-j})}{\alpha^{-j}\Psi'(\alpha^{-j})P_k(\alpha^{-j})}$$

### 5.2 検証結果と考察

まず、位置検出パターンの探索精度に関して、ノイズが位置検出パターンの部分に付加し、構成している明暗の比が崩れた場合、従来のデコードシステムではデコード失敗となった。これは位置検出パターンの探索に失敗し、シンボルの切り出しに失敗したためである。また、提案システムでは4.1節のStep5の認識できた位置検出パターンと同程度の大きさの正方形を位置検出パターンとするという条件において認識に成功した。提案システムでは位置検出パターンを構成している明暗の比率がノイズにより崩れた場合、その崩れた位置検出パターンが2つの場合は、4.1節のStep6の手順によりシンボルの切り出しを行うことができたが、3つすべての位置検出パターンにノイズが付加し明暗の比率が崩れた場合は切り出しを行うことができなかった。これは4.1節のStep6の手順において探索の基準と

なる四角形の精度の関係上、別の輪郭を誤検出してしまったためだと考えられる。

また、位置検出パターンの探索に成功し、シンボルの切り出しが行えた場合の復号精度について、従来のデコードシステムでは位置検出パターンにノイズが付加していない場合において32%の符号化領域にノイズが付加した場合まで復号が可能であった。位置検出パターンにノイズが付加した場合は前述のように位置検出パターンの探索の段階でデコード失敗となった。提案システムでは位置検出パターンも含めたシンボル全体に対して48%のノイズが付加した場合まで読み取り可能であった。符号化領域に限定してノイズが付加した場合は提案システムは42%まで読み取り可能であった。なお、前述のように提案システムにおいても位置検出パターンにノイズが集中し、3つの位置検出パターンすべての明暗の比率が崩れている場合はデコード失敗となった。

以上のように、従来のデコードシステムは位置検出パターンにノイズが付加し、明暗の比率が崩れている場合は、シンボルの切り出しを行うことができずにデコード失敗となる。提案システムでは2つまでの位置検出パターンの明暗の比率が崩れている場合までシンボルの切り出しを行うことが可能であり、また、符号化領域におけるノイズに対する誤り訂正能力も上述のようにユークリッド復号法を用いた場合よりも向上させることが可能である。なお、誤り訂正レベルMにおける訂正能力は15%であるが、上記の評価ではユークリッド復号法を利用したデコードシステムにおいて15%以上の誤りに対しても読み取り可能となっているが、これは画像処理を加える領域割合について述べており、例えば本稿の難読QRコードにおいては水平方向に5ピクセルずらした場合でも必ずしも元の明暗状態によっては誤りとは限らない場合があるためである。

## 6. まとめ

本稿では4.1節で述べたパターン認識を利用した難読QRコードの位置検出パターンの探索精度を向上させた提案方式と4.2節で述べたGMD復号法を利用した難読QRコードの復号精度を向上させた提案方式からなる難読QRコードの高精度認識アルゴリズムを提案し、その評価を行った。まず、位置検出パターンの形状の特徴を利用したパターン認識を利用することにより、従来のデコードシステムで探索失敗となる難読QRコードに対してもシンボルの切り出しを行うことが可能である。なお、実環境においてはデコードに失敗する主な原因は位置検出パターンの探索の失敗であり、その点からも位置検出パターンの探索精度を向上させることは有益であると考えられる。また、GMD復号法を利用することにより、従来のデコードシステムで用いられているユークリッド復号法の誤り訂正能力を超えたノイズが付加した難読QRコードに対しても復号が可能である。

## 参考文献

- [1] 株式会社デンソーウェーブ, “二次元コードシンボル—QRコード—基本仕様,” 日本工業規格 JIS X0510, 2004.
- [2] 青山直樹, 渡辺優平, 森井昌克, “埋め草コード語を利用したQRコードの高誤り訂正,” 第12回情報科学技術フォーラム(FIT2013), O-003, 第4分冊, pp.509-514, 2013年9月.
- [3] Y. Sugiyama, M. Kasahara, S. Hirasawa, and T. Namekawa, “A method for solving key equation for decoding Goppa codes,” *Information and Control*, vol.27, no.1, pp.87-99, Jan., 1975.
- [4] G. D. Forney, Jr., “Generalized minimum distance decoding,” *IEEE Transactions on Information Theory*, vol.12, no.2, pp.125-131, Apr., 1966.
- [5] 古本啓祐, 森井昌克, “GMD復号法を利用した難読QRコードの認識精度向上,” 電子情報通信学会技術研究報告, 情報理論(IT)研究会, vol.114, no.138, IT2014-27, pp.89-94, 2014年7月.
- [6] 池田和興 “QRコードについて,” 数学セミナー559号, pp.42-48, 日本評論社, 2008年4月.
- [7] 堀口敏男, “BCH符号の誤り・消失訂正の一方法,” 電子情報通信学会論文誌 Vol.J73-A No.9, pp.1534-1536, 1990年9月.
- [8] N. Kamiya, “On Multisequence Shift Register Synthesis and Generalized-Minimum-Distance Decoding of Reed-Solomon Codes,” *FINITE FIELDS AND THEIR APPLICATIONS*1, pp.440-457, 1995.