

埋め草コードを利用したQRコードの高誤り訂正

High Error Correcting in QR Code Using Pad Code Words

青山 直樹 † 渡辺 優平 ‡ 森井 昌克 ‡
Naoki Aoyama Yuhei Watanabe Masakatu Morii

1 はじめに

近年カメラ機能を搭載した携帯電話やスマートフォンの普及に伴い、QRコード [1][2] が情報伝達手段として広く利用されている。QRコードにはメールアドレスやURLなどの情報を埋め込むことができるため、日常生活において様々な場面で使用されている。QRコードが紙面上に印刷されている場合、紙面に生じるしみやかすれによりQRコードが破損することが考えられる。携帯電話などのカメラで読み取る場合には撮影環境やカメラの解像度によりQRコードの一部に破損が存在するとして読み取られることがある。QRコードを読み取る際に上記のようなノイズが発生した場合、埋め込まれたデータと異なる情報が読み取られる。このような場合でも格納されたデータを正しく復号する必要がある。そのためQRコードにはReed-Solomon(RS)符号 [3] を利用した誤り訂正の機能が備わっている。しかしQRコードでは格納可能な最大データ量に対して格納データ量が少ない場合には、その差分に埋め草コード語と呼ばれる無為なデータを格納し、格納可能な最大データ量を満たした上でQRコードを作成する。そのためQRコードにおいて利用可能なデータ領域を十分に活用できていない。誤り訂正を行う際に埋め草コード語に対しても誤り訂正を実行しており、誤り訂正能力に関しても最大限に利用できているとはいえない。

本稿ではインターネット上におけるQRコードの利用状況の調査結果を示す。さらに調査結果より一般的に利用されているQRコードに適用可能な認識率向上手法を提案する。埋め草コード語領域を従来の検査点に加えた領域を検査点として扱い符号化を行うことで検査点数を増加させ、誤り訂正能力の向上を図るQRコードの構成方式及び読み取り方式を提案する。提案方式で作成したQRコードは標準のデコーダで読み取り可能であり、専用のデコーダを用いることで従来のQRコードの性能以上の誤りを復号することが可能になる。

2 QRコード

QRコードは株式会社デンソーウェーブが開発したマトリックス方式の2次元バーコードである。QRコードは縦横2方向に情報を保持するため、従来の1次元バーコードから大幅に情報密度が向上している。そのため小さいスペースへ印刷したQRコードに大容量のデータが格納可能である。読み取りに関してもどの方向からでも高速で読み取りが可能である。さらに紙面上の汚れや撮影時のノイズなどにより破損したQRコードを正確に読

み取れるようにするためにRS符号を利用した誤り訂正の機能を有している。なお、破損がQRコードの30%までであれば誤りを訂正し、格納しているデータを正確に復元することが可能である。これらの特徴から当初想定されていた工場や流通における製品管理での利用だけでなく、ウェブサイトや広告紙面上などで広く利用されている。本章では誤り訂正に用いるRS符号及びQRコードの構成について述べる。

2.1 RS符号

RS符号とは誤り訂正符号の一種であり、連続して起きるビット誤り(バースト誤り)に強い。ある情報系列を符号系列に変換することを符号化と言い、情報が符号化されたものを符号語と呼ぶ。この符号語の長さは符号長と呼ばれる。また符号語のうち符号化前の情報を表すものを情報点、符号化により付加された冗長ビットを検査点という。RS符号は有限体 $[3]GF(2^m)$ により構成され、QRコードでは有限体 $GF(2^8)$ でRS符号を構成している。この場合符号長は $2^8 - 1$ である。ただしQRコードでは各型番、誤り訂正レベルに応じた形に短縮して符号化を行っている。ある符号語において符号長を n 、情報点数を k とすると検査点数は $n - k$ で与えられる。RS符号の最小距離は $d = n - k + 1$ であり、RS符号はMDS符号 [3] である。このときの訂正可能な誤りの数を t とすると、 t は

$$t = \lfloor (n - k) / 2 \rfloor \quad (1)$$

で与えられる。よって、同じ符号長の符号語において符号語の情報点が少ない場合には検査点数が増加し、誤り訂正可能数が増加する。

2.2 QRコードの構成

以下でQRコードの各用語について解説する。

1. モジュール

QRコードを構成する最小の単位セルであり、通常形状は正方形である。1モジュールが明暗の2値の状態を持ち、1ビットの情報に相当する。

2. 型番

1型から40型までの間において、番号でQRコードの大きさを示す。1型は 21×21 モジュール、40型は 177×177 モジュールで構成される。型番が1つ上がるごとに一辺につき4モジュールずつ増加する。またQRコードに適用された誤り訂正レベルを示すこともある。以下型番号 V 、誤り訂正レベル E であるQRコードを型番 $V - E$ と表記する。

3. モード

数字モード、英数字モード、8ビットバイトモード、漢字モードが存在しそれぞれ格納可能な文字データが異なる。各々のモードごとにデータを何ビットで表現するかが定義されている。モードを示すためにQRコードのデータを表すビット列の先頭にモード指示子と呼ばれる4ビットの識別子が含まれている。

† 神戸大学工学部, Faculty of Engineering, Kobe University

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

表1 型番4-HにおけるRSブロック構成

	情報点			検査点		
RSブロック1	D1	…	D9	E1	…	E16
RSブロック2	D10	…	D18	E17	…	E32
RSブロック3	D19	…	D27	E33	…	E48
RSブロック4	D28	…	D36	E49	…	E64



図1 QRコード

4. 文字数指示子

QRコードに格納されているデータ文字列の長さを定義するビット列。モードごとにビット列の長さが定義されており、モード指示子の後ろに付加される。

5. 終端パターン

データを表すビット列の終了を示すために使用する0000のビットパターン。このビットパターン以降に含まれるデータは読み取り結果に影響しない。

6. コード語

QRコードにおいてデータを8ビットごとに分割した1つ当たりの塊。

7. 埋め草コード語

QRコードに格納されているデータ量がQRコードの最大データ量に満たない場合にデータを格納する領域に埋め込まれる、データを表さない仮のコード語を指す。なお、固定のビットパターンとして11101100および00010001が交互に格納領域に埋め込まれる。

8. データコード語

格納データから得られるコード語と埋め草コード語から成るコード語。符号語の情報点に相当する。

9. 誤り訂正レベル

QRコードにはL, M, Q, Hの4段階の誤り訂正レベルが用意されている。それぞれ7%, 15%, 25%, 30%の割合までならばQRコードにおける符号語の誤りを訂正し、復号することが可能である。

10. RSブロック

QRコードを構成する符号語を指す。型番及び誤り訂正レベルによってRS符号のパラメータが規定されている。また、QRコードが複数のRSブロックで構成されているときには符号長ならびに情報点数が異なる2種類のRSブロックが存在する場合がある。RSブロックが複数存在する場合にはコード語をインタリーブにして配置する。

型番4-HのQRコードのRSブロックの構成は表1のようになっている。型番4-HのQRコードは $(n, k, d) = (25, 9, 17)$ というパラメータのRSブロック4つから構成されている。たとえば文字数指示子、モード指示子、終端パターン、格納データの合計26byteのデータを格納したとすると、D1からD26までデータが格納される。このとき残りのD27~D36に埋め草コード語が格納され、データコード語列が構成される。このためRSブロック4の情報点は全て埋め草コード語が格納されることになる。型番4-HのQRコードの例を図1に示す。

2.3 埋め草コード語

2.2節よりQRコードは、格納されるデータ量が格納可能な最大データ量を満たしていない場合には埋め草コード語をその差分に補填し、規定の情報点数を満たし

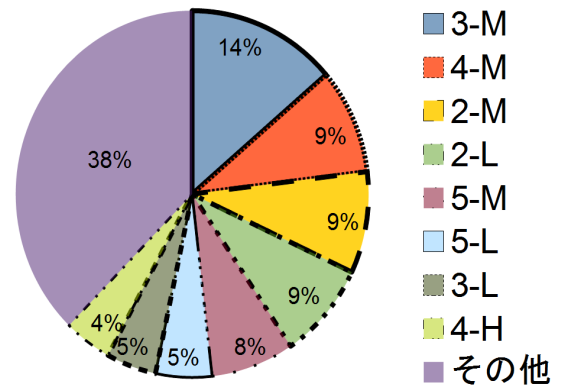


図2 利用率上位8つのQRコードの利用率

た後QRコードを作成する。そのため、格納データが少ないほどQRコードに格納される無為なデータの量が大きくなってしまふ。またQRコードを読み取る際に埋め草コード語領域に対しても誤り訂正を行うため、埋め草コード語領域の誤りが多い場合にも復号不可能となる。このように無為なデータが格納されている埋め草コード語領域に対しても誤り訂正能力を使用しているためにQRコードは非効率な設計であるといえる。

埋め草コード語は終端パターン以降に格納されるのでどのようなデータが入っていても読み取りには影響しない。したがって固定のビットパターン以外のデータでも格納することが可能である。この埋め草コード語領域を利用してQRコードの誤り訂正能力を向上させる手法として渡辺らの手法[4]が提案されている。これはQRコードが複数のRSブロックで構成されている場合に埋め草コード語領域を利用して誤り訂正能力の向上を図る手法である。

3 QRコードの利用状況

インターネット上で一般的に利用されているQRコードについて調査を行った。更に収集したQRコードにどの程度埋め草コード語が存在しているのかを示す。調査にはキーワードを「QRコード」としてGoogle画像検索を用いて収集した525個のQRコードを用いた。それらのQRコードについて型番や誤り訂正レベルごとの収集数、さらに格納されている埋め草コード語の量の解析を行った。収集数上位8つの型番、誤り訂正レベルのQRコードの収集数全体に占める割合を図2に示す。上位8つのQRコードのうち5つが1つのRSブロックから構

表2 QRコードの収集数と埋め草コード語領域の平均値

RSブロック数	収集数	埋め草コード語領域 (byte)
1	253	8.7
2以上	272	14.7
全体	525	11.5

成されるQRコードであり全体に占める割合は42%となっている。更にその他に含まれるものも考えると、1つのRSブロックで構成されるQRコードは一般に利用されているQRコードの約半数を占めていることが確認できる。特に今回の調査では型番3-MのQRコードが最も利用率が高いという結果を得られた。

4 埋め草コード語領域を利用したQRコードの認識率向上

3章の調査により一般に利用されているQRコードにおいてどの程度埋め草コード語領域が存在しているのか確認した。QRコードを構成するRSブロック数が1つの場合と複数の場合における埋め草コード語領域の平均値を表2に示す。

渡辺らの手法[4]は複数のRSブロックから構成されるQRコードに対して、情報点が全て埋め草コード語となっている符号語を利用して誤り訂正能力の向上を図るものである。調査結果において渡辺らの手法を適用できるような埋め草コード語領域が存在するQRコードの個数は、35個であった。これは収集数全体の7%であるが、複数のRSブロックから構成されるQRコードにおいて占める割合で考えると13%となる。更に表2の埋め草コード語領域を考えると、複数のRSブロックから構成されるQRコードでは平均して15byte程度存在する。埋め草コード後領域が15byte存在する場合には、型番4-Hなどで渡辺らの手法を適用することが可能である。特に型番4-Hに関しては図2より一般的に利用されていることが確認できる。したがって渡辺らの手法を適用することで認識率を向上することができるQRコードは一定数存在することが確認できる。さらに調査結果より1つのRSブロックから構成されているQRコードも一般的に利用されていることがわかる。加えて平均して9byte程度の埋め草コード語が存在することも確認できる。このことからQRコードが1つのRSブロックから構成されている場合について埋め草コード語領域を利用して認識率を向上させる手法を考える。

本章では埋め草コード語領域を利用したQRコードの認識率向上手法を示す。提案方式ではQRコードが1つのRSブロックで構成されている場合、埋め草コード語領域を検査点として利用することで誤り訂正能力の向上を図る。従来のRSブロックにおいて情報点数は固定であるため、格納データが情報点数に満たない場合にはその差分に固定のビットパターンである埋め草コード語が格納されてしまう。そこで情報点数を格納データに応じて変化させ、従来の検査点に埋め草コード語領域を追加して符号化を行う。よってこの構成方式では埋め草コード語領域の量に応じて検査点数を増加した符号語によりQR

コードを作成する。QRコードの読み取り時には格納データを情報点数として扱い、復号を行う。上記の読み取り方式によりQRコードの認識率の向上を図る。さらに提案方式により構成されたQRコードは従来の読み取り方式でも読み取り可能であるとする。

4.1 構成方式

まずQRコードを構成する際に埋め草コード語の格納領域を検出する手法を示す。QRコードの構成時に下記の2つのStepを行うことで埋め草コード語の格納領域の検出及び算出を行う。

Step1 RSブロックの情報点の判定

RSブロックの先頭から情報点について判定を行い、データが格納されている領域と埋め草コード語が格納されている領域の判別を行う。このとき埋め草コード語を示す固定のビットパターンである11101100及び00010001が交互に繰り返して格納されている位置を検出する。

Step2 埋め草コード語の格納領域の算出

Step1で検出した埋め草コード語領域の先頭から、QRコードに格納されているデータ量 I を算出する。QRコードに格納可能な最大データ量を D_{max} とすると、埋め草コード語のコード語数を P は、

$$P = D_{max} - I \quad (2)$$

により導出される。

次に上記のように算出した埋め草コード語の格納領域を利用するQRコードの構成方式について述べる。提案方式では従来のエンコーダに対し、下記の4つのStepの処理を加える。この追加した処理によって埋め草コード語の格納領域を利用して検査点を増加させたQRコードを構成する。

Step1 従来のRSブロックの生成

格納するデータに対して、従来の方法で符号化を行いRSブロックを生成する。ただしこの際使用するモードは8ビットバイトモードであるとする。

Step2 格納領域の算出

上記で示した方法を用いて、QRコードを構成するRSブロックの情報点から埋め草コード語の格納領域及び格納されているデータ量を算出する。

Step3 符号語の生成

Step2で算出した格納データ量を情報点数、規定のRSブロックの検査点数に埋め草コード語数を加えた値を検査点数として格納データに対してRS符号化を実行し、検査点数を増加させた符号語を生成する。

Step4 QRコード作成

Step3で生成した符号語の検査点部を埋め草コード語領域及び規定の検査点の格納領域に格納し、従来の配置規則に従いデータを埋め込み、QRコードを作成する。

以上の構成方式を用いて作成した型番2-L,2-M,3-M,4-LのQRコードを図3~図6に示す。図3~図6のQRコードに格納したデータ量は、全て文字数指示子等合計して26byteとした。

4.2 読み取り方式

QRコードの読み取り時のRSブロックに格納されているデータの判定は下記の処理によって行う。



図3 型番 2-L



図4 型番 2-M



図5 型番 3-M



図6 型番 4-L

表3 各 QR コードの RS ブロックのパラメータ

型番	従来方式 (n, k, d)	提案方式 (n, k, d)
2-L	(44,34,11)	(44,26,19)
2-M	(44,28,17)	(44,26,19)
3-M	(70,44,27)	(70,26,45)
4-L	(100,80,21)	(100,26,75)

Step1 格納データ量の算出

文字数指示子を読み込み、QR コードに格納されている文字数を取得する。取得した文字数から格納データ量を算出する。文字数から判定したデータ量に加えモード指示子、文字数指示子、終端パターンのビット数を加えて合計のデータ量を算出し、そのデータ量を情報点数とした符号語が QR コードを構成しているとみなす。

また QR コードを読み取る際には上記のように格納データ量を算出する。次に埋め草コード語領域を利用して構成された QR コードの読み取り方式について述べる。QR コードを構成する際に生成した規定と異なるパラメータの符号語に対する復号方法を下記に示す。

Step1 格納データ量の取得

上記で示した方法により文字数指示子の情報から QR コードを構成する RS ブロックの格納データ量を取得する。

Step2 誤り訂正

取得した格納データ量を情報点数、情報点数以外の符号語のデータ量を検査点数として、QR コードを構成している符号語に対して復号を実行する。

上記の読み取り方式によって図3～図6のQRコードを正しく読み取ることが可能である。

表4 円状の破損に対しての誤り訂正能力の比較

型番	ピクセル数	R_1	R_2	P_{R_1}	P_{R_2}
2-L	165×165	16	20	10%	12%
2-M	165×165	20	20	12%	12%
3-M	185×185	24	31	12%	16%
4-L	205×205	20	45	10%	22%



図7 型番 2-L(解像度低下)



図8 型番 4-L(解像度低下)

5 難読 QR コードに対する認識能力の評価

QR コードを携帯電話のカメラ等を用いて読み取る際に発生すると考えられるノイズや、局所的に発生するノイズを想定した破損を施した QR コードを作成し、従来方式および提案方式によるデコーダにて読み取りが可能であるか評価実験を行った。評価には図3～図6のQRコードに対して、撮影の際に生じるノイズを想定して解像度を低下させたもの、QR コードシンボルの中心を中心点とした円状の破損を発生させたものを使用した。1つのRSブロックから構成されるQRコードでは誤りが生じたコード語の位置による復号の可否に対する影響はなく、復号の可否は誤りが生じたコード語の数に依存する。したがって局所的に発生したノイズとして中心から広がる円状の破損を使用しても、他の位置に生じた円状の破損を考える場合と同様の評価結果を得ることが可能であると考えられる。

使用した型番のQRコードについて従来方式と提案方式によるRSブロックのパラメータを表3に示す。このとき格納データ量は全て26byteとする。円状の破損に関しては、円の半径を1ピクセルずつ大きくしていき、従来方式、提案方式のそれぞれで読み取り可能となる最大半径を測定した。このとき従来方式での最大半径を R_1 、提案方式での最大半径を R_2 とする。最大半径 R_1 、 R_2 がQRコードシンボルの1辺において占める割合をそれぞれ P_{R_1} 、 P_{R_2} とする。したがって P_{R_1} 、 P_{R_2} が大きいほどQRコードシンボルに占める円状の破損の割合が大きい。黒色の円状の破損を発生させたので、円の内部の黒のモジュールは正しく読み取られ、白のモジュールは黒であると間違っ読み取られることになる。表4に各型番のQRコードシンボルを構成するピクセル数、円状の破損において従来方式及び提案方式のそれぞれで読み取り可能となった最大半径 R_1 、 R_2 及び P_{R_1} 、 P_{R_2} を示した。提案方式で読み取り可能である最大の破損を施したQRコードにおいて読み取り時に誤りが生じたコード語の割合について表5に示す。



図 9 型番 2-L(円状の破損)



図 10 型番 2-M(円状の破損)



図 11 型番 3-M(円状の破損)



図 12 型番 4-L(円状の破損)

表 5 各破損における誤り率

型番	解像度低下	円状の破損
2-L	約 9%	約 16%
2-M	約 11%	約 16%
3-M	約 14%	約 29%
4-L	約 27%	約 35%

図 7～図 8 に解像度を低下させた QR コードのうち、従来方式では読み取り不可能であり提案方式でのみ読み取り可能であったものを示す。図 9～図 12 は従来方式では読み取り不可能であるが、提案方式では読み取り可能であるような最大の円状の破損を施した QR コードである。このとき、各型番において下記のことがわかる。

- 型番 2-L の場合

型番 2-L において解像度が 18dpi 以上の場合は、従来のデコーダと提案方式によるデコーダの両方で読み取りが可能である。しかし 17dpi まで解像度を下げた場合には提案方式のデコーダでのみ読み取りが可能となる。円状の破損においては従来方式に比べ提案方式を用いることでより大きい半径の破損が発生した場合での読み取りが可能となった。提案方式にて構成された符号語の誤り訂正能力は従来の 7% から約 20% まで向上している。したがって表 5 のように従来方式による誤り訂正能力を超えた誤りが発生した場合であっても提案方式を用いることで読み取り可能となったと考えられる。

- 型番 2-M の場合

型番 2-M において解像度が 17dpi 以上の場合は、従来のデコーダと提案方式によるデコーダの両方で読み取りが可能である。しかし 16dpi まで解像度を下げた場合にはどちらのデコーダであっても読み取りが不可能となった。よってこの型番、誤り訂正レベ

ルにおいては従来方式と提案方式において読み取りの可否の差は生じていない。解像度を下げた場合には QR コードのシンボル全体に対して誤りが生じる。したがって符号語に生じた誤りが訂正可能数以下であっても QR コードとして認識不可能となることがあるため、認識率に差が生じにくいと考えられる。さらに 16dpi まで解像度を下げた場合においては、提案方式によって生成された符号語の誤り訂正能力を超える誤りが発生していることが考えられる。加えて円状の破損においても従来方式、提案方式で読み取り可能である破損の最大半径は同様であった。提案方式では表 3 のように誤り訂正レベルに影響されず同じ型番、格納データ量であれば同一のパラメータを持つ RS ブロックが生成される。よって誤り訂正レベルが向上することで従来方式と提案方式の誤り訂正能力の差が小さくなったことが原因と考えられる。また提案方式において読み取り可能な解像度、円状の破損における最大半径が型番 2-L と同様であることも生成される RS ブロックのパラメータが変化していないことから確認できる。

- 型番 3-M の場合

型番 3-M において解像度が 16dpi 以上の場合は、従来のデコーダと提案方式によるデコーダの両方で読み取りが可能である。しかし 15dpi まで解像度を下げた場合には従来方式、提案方式のデコーダの両方で読み取り不可能となる。これは上記のように QR コードのシンボル全体に誤りが発生することで認識率に差が生じにくくなっているためと考えられる。結果として解像度を低下させた場合に QR コードとして認識可能なものは従来方式でも復号可能となる。さらに解像度を低下させると QR コードとして認識できず、従来方式と提案方式の両方で読み取り不可能になる。円状の破損においては従来方式に比べ提案方式を用いることでより大きい半径の破損が発生した場合での読み取りが可能となった。提案方式にて生成される RS ブロックの訂正能力は従来の 15% から約 31% まで向上している。したがって表 5 のように従来方式の誤り訂正能力以上の誤りが生じていても提案方式を用いることで訂正が可能であることが確認できる。

- 型番 4-L の場合

型番 4-L において解像度が 17dpi 以上の場合は、従来のデコーダと提案方式によるデコーダの両方で読み取りが可能である。しかし 16dpi まで解像度を下げた場合には提案方式のデコーダでのみ読み取りが可能となる。円状の破損においては従来方式に比べ提案方式を用いることでより大きい半径の破損が発生した場合での読み取りが可能となった。このとき提案方式により生成された RS ブロックの誤り訂正能力は従来の 7% から約 37% まで向上している。したがって表 5 のように従来方式の誤り訂正能力を超えた誤りが生じている場合であっても提案方式を用いることで読み取りが可能となる。

6 まとめ

本稿ではインターネット上にて利用されている QR コードの調査を行いどのような型番, RS ブロックのものが使用されているのか調査を行った. さらに調査結果において一般的に利用されている QR コードに対し認識率が向上する手法を提案した. QR コードの誤り訂正能力の向上を目的として, 埋め草コード語を利用した QR コードの構成方法および読み取り方法を提案した. 提案方式は埋め草コード語の格納領域を従来の検査点領域に追加することで格納データに対する検査点数を増加させ, 誤り訂正能力を向上させている. また提案方式による QR コードの誤り訂正能力は, 構成時の誤り訂正レベルには依存しない.

また提案方式では同じ格納データ量を考える場合, 符号長が大きいほど検査点数が増加し誤り訂正能力が向上する. 従来方式では最大誤り訂正能力は 30% であるが提案方式を用いることで最大 30~40% まで誤り訂正能力が向上する. また携帯電話等に搭載されているような標準のデコーダで読み取る際には, 従来の QR コードの性能での読み取りが可能となっている.

参考文献

- [1] 日本工業規格, JIS,X0510, 二次元コードシンボル—QR コード—基本仕様,1999.
- [2] DENSOWAVEINCORPORATED,QRcode.com,
<http://www.denso-wave.com/qrcode/>,2010.
- [3] 今井 秀樹, 符号理論, 電子情報通信学会,pp.42-75,1990年.
- [4] 渡辺 優平, 遠藤 祐介, 森井 昌克, 埋め草コード語を利用した QR コードの誤り訂正能力向上について, 第 10 回情報科学技術フォーラム,pp.512-516,2011 年