

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

Improvement of Error Correcting Capability in QR Code Using Pad Code Words

渡辺 優平† 遠藤 祐介‡ 森井 昌克‡
 Yuhei Watanabe Yusuke Endo Masakatu Morii

1 はじめに

QRコード [1][2] は現在日本で最も普及している2次元コードである。携帯電話にカメラとQRコードデコーダが標準搭載されている今日、広告紙面上に掲載されたQRコードを読み取ることで煩雑なキー操作なしにウェブサイトにアクセスできるようになった。バーコードのように横1方向にしか情報を持たない1次元コードに対して、QRコードは縦横2方向に情報を保持するので、格納可能なデータ量が飛躍的に増加している。また、サイズの大きいQRコードを利用することにより最大データ量が増加する。しかし、QRコードに保持されるデータ量が最大データ量より少ない場合には、埋め草コード語と呼ばれるデータを表さない固定のビットパターンを格納し、最大データ量を満たしてからQRコードを作成する。したがって、最大データ量に対して格納データ量が極端に少ない場合にはQRコードにおいて埋め草コード語の割合が高くなる。上記の問題から誤り訂正能力を最大限に利用できていない。

本稿ではQRコードの誤り訂正能力を向上する構成方式および読み取り方を提案する。提案方式は埋め草コード語の格納領域を利用し、格納データに対する検査点数を増加することによって誤り訂正能力を向上する。携帯電話等に搭載されている標準のデコーダで読み取る場合、従来のQRコードの性能で読み取り可能である。また、本稿で提案する読み取り方式を用いることによって、従来のQRコードの性能以上の誤りを支障なく復号することが可能になる。

2 QRコード

QRコードは、1次元に情報を格納する従来のバーコードと異なり、情報を2次元に配列することにより、情報密度を飛躍的に高めたマトリックス方式の2次元コードである。QRコードは小さいスペースに印字することが可能であり、格納されている情報を高速かつ正確に読み取れるという特徴を備えている。これらの特徴により当初利用が想定されていた製品の生産や流通の管理に限らず、ウェブサイトや広告紙面上に掲載されている。そして宣伝目的での利用など様々な用途に活用されている。また、破損や汚れがあるQRコードを正確に読み取れるようにするためにQRコードはRS符号を利用した誤り訂正の機能を有している。なお、破損や汚れがQRコードの7~30%であれば誤りを訂正し、格納しているデータを正確に復号することが可能である。

2.1 RS符号

RS符号とは符号理論における誤り訂正符号の一種であり、連続して起こるビット誤り(バースト誤りという)に強いという特徴を持つ。また、誤り訂正能力が優れているのでCD、DVDなどの様々なデジタル機器や地上デジタル放送等の通信分野における誤り訂正技術で応用されている。ある情報を符号化したものを符号語と呼び、一つの符号語全体の長さを符号長と呼ぶ。また、符号語に含まれるビットで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呼ぶ。RS符号は $GF(2^m)$ で表される有限体 [3] の元を根として持つ生成多項式から構成され、コンピュータの仕様上、 $GF(2^8)$ でRS符号を構成して実装されるシステムが多い。この場合符号長は $2^8 - 1 = 255$ になる。ある符号語において符号長を n 、情報点数を k で定義すると検査点数は $n - k$ で与えられる。このとき訂正可能な誤りの個数を t とすると t は、

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

から得ることができる。したがって、符号語の情報点数が少ない場合には検査点数が増加し、訂正可能な誤りの個数が増加する。つまり、検査点数が多いほど誤り訂正能力が向上すると言える。

QRコードにおいてRS符号は $GF(2^8)$ で構成される。上記より、この場合に符号長は255になるが、QRコードの仕様では符号長を短縮して符号化を実行している。

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。1モジュールが明暗の2値の状態を持ち、1ビットの情報を表す。

2. 型番

QRコードの大きさを表す。1から40まで存在し、型番が大きくなると最大データ量が増加する。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。

3. モード

QRコードに格納するデータの種類によって数字モード、英数字モード、8ビットバイトモード、漢字モードなどが存在する。また、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。

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。型番およびモードごとにビット列の長さが定義されている。モード指示子の後ろに付

† 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 4-H型式におけるRSブロック構成

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

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。データを表さない固定のビットパターンを指す。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。型番およ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。

表1に4-H型式におけるRSブロックの構成を示す。4-H型式のQRコードは $(n, k, t) = (25, 9, 8)$ というパラメータを持つRSブロック4つから構成されている。仮に12byteのデータを格納すると、D12までにデータが格納される。このとき残りのD13~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。そして、それぞれのRSブロックの構成に応じてデータコード語列を分割し符号化が実行される。標準のQRコードにおける7~30%の誤り訂正率はQRコードを構成するRSブロック単位の値である。したがって、QRコードの誤り訂正率は規定の値より低くなる場合が存在する。4-H型式のQRコードを図1に示す。

3 埋め草コード語

3.1 QRコードにおけるRS符号の利用とその問題点

2.1節で示したように、QRコードにおいてRS符号はGF(2⁸)で構成されているので符号長は255となる。しか



図1 QRコード

し、QRコードにおけるRSブロックの符号長は、37-L型式等を構成するRSブロックの符号長152および153が最大となる。また、他の多くの型式のQRコードを構成するRSブロックにおいて符号長は153より小さい値で規定されている。すなわち、符号長を255としているRSブロックは存在しておらず、QRコードはRS符号の符号長を短縮した符号語により構成されている。このためQRコードにおける任意のRSブロックの符号長を n 、情報点数を k とするとQRコードにおけるRSブロックとGF(2⁸)で構成されるRS符号における標準の符号語との検査点数の関係は、

$$n - k < 255 - k \quad (2)$$

となる。したがってQRコードにおける1つの符号語では情報点数が同じ数だけ存在する場合の検査点数が標準のRS符号の符号語より減少する。このため2.1節で示した訂正可能な誤りの個数 t が少なくなる。すなわち、QRコードではRS符号の誤り訂正能力を十分に利用できていない。

3.2 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補填し規定の情報点数を満たした後、QRコードを作成する。埋め草コード語はデータを表さないビットパターンであるため、最大データ量に対して格納されるデータ量が極端に少ない場合にはQRコードに無為なデータが多くなる。また、QRコードを読み取るためには、情報点として埋め草コード語のみが格納されているRSブロックも誤り訂正可能である必要がある。以上より、QRコードに格納されるデータが最大データ量を満たしていない場合には、データとして無為な埋め草コード語がQRコードに含まれる。かつ、正しく読み取るためには情報点部が埋め草コード語のみで構成されているRSブロックが誤り訂正可能である必要がある。これらの2点においてQRコードの構成は非効率である。

4 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

提案方式ではQRコードの構成において埋め草コード語の格納領域をデータに対する符号語の検査点を埋め込む領域として利用する。この符号語は標準とは異なる構成を用いて生成される。これによりデータに対する検査点数の増大を図る。かつ、提案する構成で作成したQR

コードが標準のQRコードデコーダで読み取り可能となる仕様とする。また、QRコードの読み取りにおいては標準の誤り訂正に加え、標準とは異なる構成の符号語で誤り訂正を行うことにより、QRコードの誤り訂正能力の向上を図る。

4.1 埋め草コード語の格納領域の利用

QRコードに格納されるデータが最大データ量を満たさない場合には埋め草コード語が格納される。本節ではQRコードを構成するRSブロックの中から情報点が埋め草コード語のみであるものを判定する方法を示す。

QRコードの読み取りにおいて、埋め草コード語が情報点となっている符号語においても誤り訂正が実行される。この際、3.2節で示したように仮に訂正不可ならばQRコードの読み取りは不可となる。しかし、埋め草コード語がデコードされてデータを表すことはない。したがって、埋め草コード語が情報点になっている符号語は誤り訂正さえ可能であればどんなビットパターンが格納されていても良い。このことから、QRコードを構成する際に埋め草コード語が格納される領域を有意なコード語を埋め込む領域としての利用を考える。

QRコードの構成時に情報点が埋め草コード語で構成されるRSブロックを下記の2つのStepで判定を行い、埋め草コード語の格納領域を算出する。

Step1 RSブロックの情報点の判定

RSブロックの先頭からコード語を判定する。このとき埋め草コード語を表すビットパターン(11101100および00010001)が先頭と2番目のコード語に交互に格納されているRSブロックを検出し、情報点にデータが格納されているRSブロックの個数を記録する。

Step2 埋め草コード語の格納領域の算出

QRコードのRSブロックにおける情報点数およびStep1で記録されたRSブロックの個数から下記のような計算で埋め草コード語の格納領域を算出する。ただし、RSブロックの種類によって場合分けを行う必要がある。ここで、QRコードの全てのコード語の個数を C 、全てのRSブロックの個数を R 、埋め草コード語の格納領域のコード語の個数を P 、検査点数を e 、Step1で記録されたRSブロックの個数を r とする。

[RSブロックが1種類の場合]

RSブロックの情報点数を i とすると、

$$P = C - R \times e - r \times i \quad (3)$$

[RSブロックが2種類の場合]

RSブロックのうち符号長が短いものの個数を s 、情報点数を i とすると、

$$P = C - R \times e - s \times i - (r - s) \times (i + 1) \quad (4)$$

このようにして算出した埋め草コード語の格納領域に通常とは異なるビットパターンを格納してQRコードを作成する。このQRコードを読み取る際にデータが埋め込まれているRSブロックの判定は下記の2つのStepで行われる。

Step1 データ量の算出

文字数指示子の情報を利用して、QRコードに格納されている文字数を取得する。文字数から格納データ量を計算する。その後モード指示子、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する。

Step2 RSブロック数の算出

Step1で得たデータ量から、データが格納されているRSブロックの個数を下記の式によって算出する。ただし、RSブロックの種類によって場合分けを行う必要がある。ここで、Step1で得たデータ量を D 、求めるRSブロックの個数を R とする。

[RSブロックが1種類の場合]

RSブロックの情報点に格納されているデータ量に応じて場合分けを行う必要がある。

{情報点全てがデータの場合}

RSブロックの情報点数を i とすると、

$$R = D/i \quad (5)$$

{情報点の一部までがデータの場合}

RSブロックの情報点数を i とすると、

$$R = 1 + D/i \quad (6)$$

[RSブロックが2種類の場合]

RSブロックの情報点に格納されているデータ量に応じて場合分けを行う必要がある。

{情報点全てがデータの場合}

RSブロックのうち符号長が短いものの個数を s 、情報点数を i とすると、

$$R = s + (D - i \times s)/(i + 1) \quad (7)$$

{情報点の一部までがデータの場合}

RSブロックのうち符号長が短いものの個数を s 、情報点数を i とすると、

$$R = 1 + s + (D - i \times s)/(i + 1) \quad (8)$$

QRコードを構成する際に式(3)および(4)をそれぞれの場合に応じて用いることによりRSブロック単位で埋め草コード語の格納領域を取得することが可能である。また、QRコードを読み取る際に式(5)~(8)を同様にそれぞれの場合に応じて用いることによりRSブロック単位でデータの格納領域とそうでないものの判定を行うことが可能である。

4.2 構成方式

提案方式では標準のエンコーダに下記の4つのStepの処理を加える。これにより、埋め草コード語の格納領域を利用して標準とは異なる構成で生成した符号語の検査点を埋め込むようにしてQRコードを構成する。

Step1 格納領域の算出

4.1節で示した方法を用いて情報点全てが埋め草コード語であるRSブロックを判定し、情報点部にデータが格納されているRSブロックの個数を記録する。

Step2 情報点部の分割

Step1から得られるRSブロックの個数から各RSブロックの情報点部をデータが格納されているものと、埋め草コード語が格納されているものとに分割する。このとき得られた埋め草コード語の個数 P とQRコードに格納されているデータを表すコード語の個数の和が255より大きい場合には255以下になるように P およびデータを表すコード語を分割する。



図2 8-L 型式



図3 8-H 型式



図4 15-L 型式



図5 15-H 型式

表2 各型式における符号語の構成

型式	RS 符号 (n, k, t)	RS ブロック数
8-L	$(121, 97, 12)$	2
8-H	$(40, 14, 13)$	4
	$(41, 15, 13)$	2
15-L	$(109, 87, 11)$	5
	$(110, 88, 11)$	1
15-H	$(36, 12, 12)$	11
	$(37, 13, 12)$	7

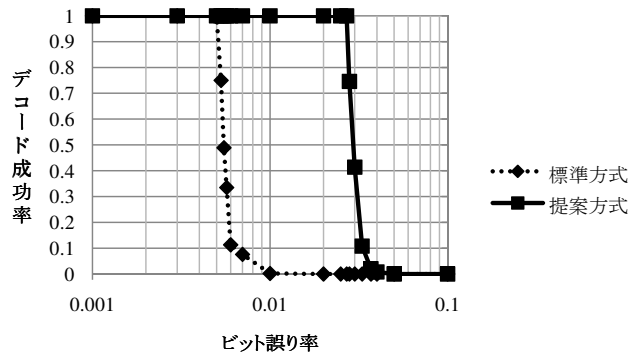


図6 8-L 型式におけるデコード成功率とビット誤り率の関係

Step3 符号語の生成

Step2 において P およびデータを表すコード語の分割が実行されない場合には、格納データを保持する RS ブロックの情報点全体に対して P を検査点数として符号化を行い標準の RS ブロックとは異なる構成の符号語を生成する。分割が実行された場合にも、Step2 により得られた値に応じて情報点数および検査点数を決定し、同様に符号語を生成する。

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の格納領域に埋め込み、QR コードにおける標準の RS 符号化を実行する。生成された符号語により QR コードを構成する。

4.3 読み取り方式

QR コードを構成する際に埋め草コード語の格納領域に埋め込んだ検査点を下記のような 4 つの Step の処理によって誤り訂正に利用する。

Step1 標準の誤り訂正を実行

QR コードにおける標準の誤り訂正を実行する。ただし、訂正不可の符号語が存在しても処理を続行する。

Step2 RS ブロック数の算出

4.1 節で示した方法を用いてデータが格納されている RS ブロックの個数を算出する。

Step3 符号語の再構成

Step2 で算出した RS ブロックの個数に応じて、全ての RS ブロックの情報点から構成時に生成した標準の構成とは異なる符号語の情報点および検査点を取り出し、符号語を再構成する。

Step4 誤り訂正の実行

Step3 で構成した符号語に対して誤り訂正を実行する。提案方式により作成した 8-L, 8-H, 15-L, 15-H 型式の QR コードを図 2~5 に示す。図 2~5 の QR コードの格納データ量は全て 64byte とした。

5 各種誤りに対する提案方式の評価

5.1 ビット誤りに対する誤り訂正能力

提案方式におけるビット誤りに対する誤り訂正能力の評価実験を行った。実験には図 2~5 に示した QR コードを用いた。8-L, 8-H, 15-L, 15-H 型式の QR コードにおける RS 符号のパラメータおよび RS ブロック数は表 2 のとおりである。これらの QR コードに 64byte のデータを格納する。この場合、格納データに対する標準と異なる構成の符号語は 8-L 型式において $(n, k, t) = (163, 66, 48)$ 、8-H 型式において $(n, k, t) = (81, 66, 7)$ 、15-L 型式において $(n, k, t) = (251, 33, 109)$ および $(n, k, t) = (252, 34, 109)$ 、15-H 型式において $(n, k, t) = (218, 67, 75)$ というパラメータでそれぞれ生成される。これらの符号語の検査点が埋め草コード語の格納領域に埋め込まれる。図 2~5 の QR コードに対して $10^{-1} \sim 10^{-3}$ の確率でビット誤りを発生させ、各ビット誤り率において 1000 回の読み取りを行った。実験は携帯電話に搭載されている標準のデコーダ、提案方式により実装したデコーダの 2 方式によって行った。それぞれの結果を図 6~9 に示す。また、提案方式において誤り訂正レベルごとのビット誤りに対する誤り訂正能力の比較を行った。比較の結果を図 10 および図 11 に示す。

図 6~9 より、各型式においてビット誤りに対する誤り訂正能力が向上していることがわかる。また、図 10 より型番 8 において誤り訂正レベル L の方が H より高精度な読み取りが可能となることがわかる。図 11 より型番 15 において誤り訂正レベル L を用いても誤り訂正レベル H と同程度の精度による読み取りが可能となることがわかる。

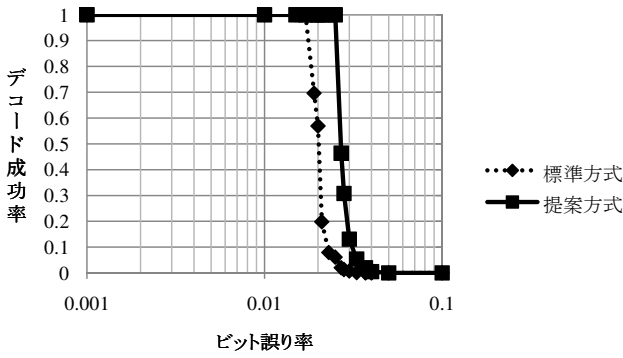


図7 8-H 型式におけるデコード成功率とビット誤り率の関係

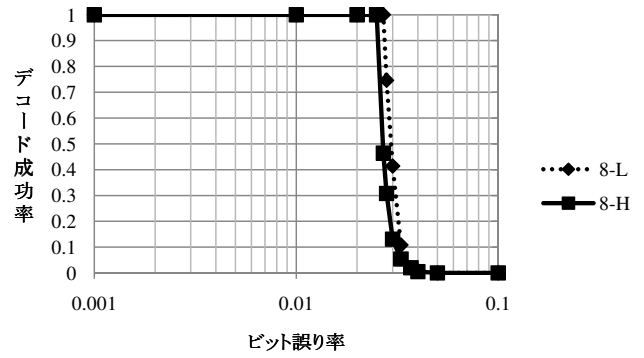


図10 8-L 型式と8-H 型式の比較

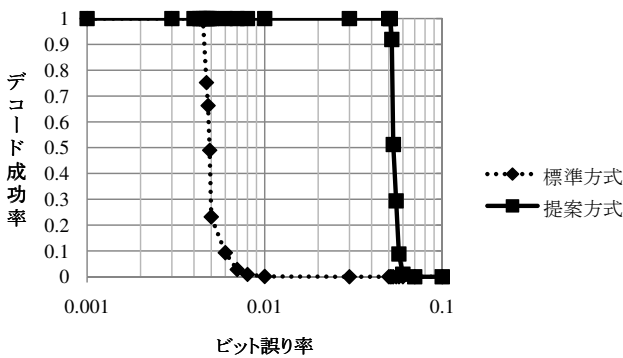


図8 15-L 型式におけるデコード成功率とビット誤り率の関係

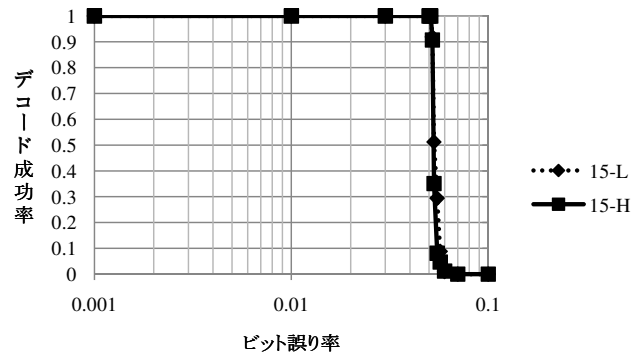


図11 15-L 型式と15-H 型式の比較

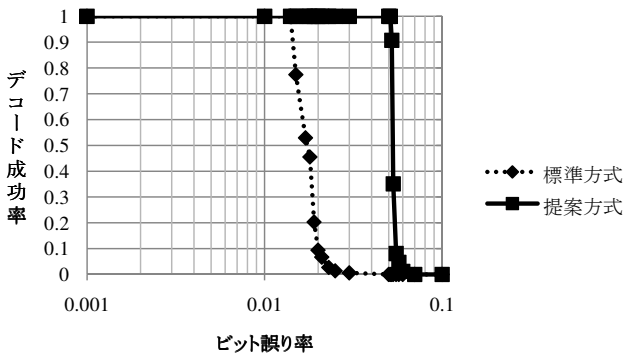


図9 15-H 型式におけるデコード成功率とビット誤り率の関係

表3 破損を想定したQRコードにおける誤り率

型式	しみ	かすれ
8-L	約 20%	約 27%
8-H	約 26%	約 30%
15-L	約 30%	約 38%
15-H	約 33%	約 42%

5.2 QRコードの破損に対する誤り訂正能力

続いて、破損や汚れがある場合を想定したQRコードを作成し、標準および提案方式のデコーダで読み取りが可能か否かの評価を行った。評価は図12~19のQRコードに対して行った。これらは、図2~5のQRコードにそれぞれしみを想定した円状の誤りを発生させたもの、およびかすれを想定した斜線状の誤りを発生させたものである。

図12~19のQRコードはそれぞれ、標準のデコーダでは読み取ることが不可能であるが、提案方式のデコーダでは読み取りが可能である。表3に図12~19のQRコードにおいて誤りが発生したコード語の割合を示す。このとき、それぞれの場合において下記のことわかる。

- 8-L 型式の場合
8-L 型式において標準の誤り訂正率は7%であり、提案方式における最大の誤り訂正率は約50%になる。表3より標準のデコーダで訂正可能な誤り率を超えているので提案方式のデコーダにおいてのみ読み取りが可能になる。
- 8-H 型式の場合
8-H 型式において標準の誤り訂正率は30%であり、提案方式における最大の誤り訂正率は約70%になる。表3より破損を想定した場合、標準より誤り訂正能力が向上しているとはいえない。しかし、誤り訂正不可のRSブロックが存在するため、提案方式のデコーダにおいてのみ読み取りが可能になる。
- 15-L 型式の場合
15-L 型式において標準の誤り訂正率は7%であり、提案方式における最大の誤り訂正率は約56%になる。表3より標準のデコーダで訂正可能な誤り率を超えているので提案方式のデコーダにおいてのみ読み取りが可能になる。



図12 8-L 型式：しみ



図13 8-L 型式：かすれ



図18 15-H 型式：しみ

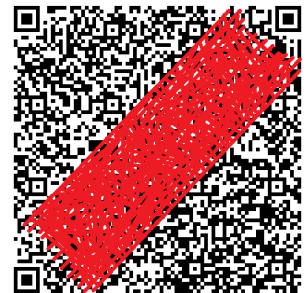


図19 15-H 型式：かすれ



図14 8-H 型式：しみ

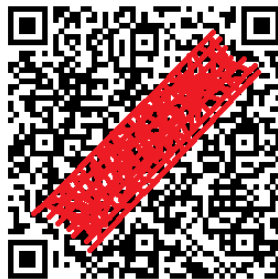


図15 8-H 型式：かすれ



図16 15-L 型式：しみ

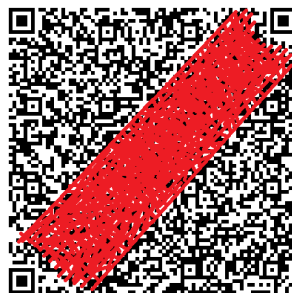


図17 15-L 型式：かすれ

● 15-H 型式の場合

15-H 型式において標準の誤り訂正率は 30% であり、提案方式における最大の誤り訂正率は約 78% になる。表 3 より標準のデコーダで訂正可能な誤り率を超えているので提案方式のデコーダにおいてのみ読み取りが可能になる。

5.3 考察

QR コードの構成において無為なデータである埋め草コード語の格納領域を利用して格納データに対する新たな符号語の検査点を埋め込むことにより格納データに対する検査点数を増加させた。加えて、読み取りの際に標準の誤り訂正に加えて新たな符号語による誤り訂正を実行することにより QR コードの誤り訂正能力の向上を確認した。また、提案方式によりデータコード語の格納領域が大きくなる誤り訂正レベル L の方が H よりも誤り訂正能力の向上が著しいことを確認した。これにより、提案方式において条件次第では標準では誤り訂正能力が低い誤り訂正レベル L の方が H よりも優れた誤り訂正能力を持つ場合があると考えられる。

6 まとめ

本稿では 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利用して格納データに対する検査点数を増加することによって誤り訂正能力を向上している。

提案方式により誤り訂正レベル L の QR コードにおいて標準では 7% の誤り訂正率が最大 50~60% に向上する。また、誤り訂正レベル H の QR コードにおいて標準では 30% の誤り訂正率が最大 70~80% に向上する。以上のように本稿で提案する構成方式および読み取り方式を用いることにより、従来の QR コードの性能以上の誤りを支障なく読み取ることが可能である。また、携帯電話等に搭載されている標準のデコーダで読み取る場合、従来の QR コードの性能で読み取ることが可能である。

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] DENSOWAVE INCORPORATED, 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.