

高密度情報化を可能とするQRコード符号化方式について

QR Code Encoding Method to Enable High Information Density

遠藤 祐介 † 廣友 雅徳 † 森井 昌克 †
Yusuke Endo Masanori Hiroto Masakatu Morii

1 はじめに

現在、カメラ機能を搭載した携帯電話が一般的になっている。それに伴いQRコード [1],[2] と呼ばれる2次元コードが多くウェブサイトや広告紙面上に掲載されている。バーコードのように横1方向にしか情報を保持しない1次元コードに対し、QRコードは縦横2方向に情報を有するため情報量が飛躍的に増加した。また、QRコードにはテキストデータだけでなく画像や音声といったバイナリデータの埋め込みが可能であり、様々な用途に利用できる可能性を有している。しかし、テキストデータと比較して大容量の情報量を必要とする画像および音声情報をQRコードに埋め込む場合、格納する情報量に比例してQRコードを構成する最小の単位セルであるモジュールの個数が増加しQRコードのサイズが増大する。携帯電話のカメラの性能上、サイズが増大するにつれ撮影画像内の2次元コードの1モジュールに相当する画素数が減少するためデコード精度は低下する。また、広告目的でQRコードを掲載する場合、コードサイズの増大は掲載スペースの圧迫にも繋がる。以上の問題から、小さなコードサイズに大容量データを直接格納可能な高情報密度の2次元コードの必要性が高まっている。

筆者らは2次元コードを構成するモジュールを多値化しRGB空間内の信号点を増加することにより高情報密度を実現する2次元コードであるカラー多重化QRコードを提案している [3]。カラー多重化QRコード以外にも既にRGB値の多値化により格納可能な情報量の増大を図る2次元コードについてはいくつか提案があるものの、実環境において、特に携帯電話に付属するカメラ機能による撮影から支障なく復号可能な方式に関する提案は少ない。携帯電話のカメラを用いて撮影した画像には、撮影環境の明度の相違等に起因する雑音が増加することにより撮影画像内の2次元コードのRGB値に変化が生じる。精度の高い復号を行うには雑音特性を考慮した2次元コードの設計および復号を行わなければならない。

本稿では文献 [3] で与えたカラー多重化QRコードを拡張し、さらに雑音耐性を改善するカラー多重化QRコードの構成方法および読み取り方法を提案する。提案方式では雑音特性を考慮して2次元コードの構成に使用するRGB値を設定し、雑音に対する耐性を与える。また、符号化方式として多重化を行う複数個のQRコード間の信号点配置において符号化変調技術 [4],[5],[6],[7] を応用することにより符号系列間のユークリッド距離を増大し雑音に対する耐性を改善する。復号時にはフィルタ処理による撮影画像の明度補正とRGB空間におけるユークリッド距離をメトリックとする軟判定ビタビ復号を行い、高精度の復号を可能にする。本方式により通常のQRコードと比較して5倍以上の情報密度を実現可能にし、かつ実

環境において充分実用に耐え得る方式であることを示す。

2 2次元コードの拡張

2次元コードを拡張し情報密度の向上を図る方法について多くの研究が行われている。その中でも2次元コードをカラー化することによって1つの2次元コード内に複数個分の2次元コードの情報を格納することが可能となる高情報密度を実現する2次元コードがいくつか提案されている。多色2次元コード [8]、Color C Code [9] はともに1つの2次元コードにQRコードの3倍の情報量を格納することが可能である。しかし、多色2次元コードは読み取りにスキャナを使用しており、携帯電話のカメラでの読み取りは想定していない。Color C Codeは携帯電話向けのデコードが公開されているものの、エンコーダおよび仕様が公開されておらず一般のユーザが自由に作成・利用できない。また、多色2次元コード、Color C Codeともに4重化以上の多重化に対応していない。PMコード [10] は階層型2次元コードである。複数個の2次元コードがそれぞれ固有のRGB値を有する層として重畳し、各層を加法混色した表面層を1つの2次元コードとして扱う。PMコードは理論的には最大24重化までの多重化が可能であり、現在8重化までの開発が完了していることが報告されている [10]。しかし、2010年4月現在において実環境での読み取り精度の評価が与えられておらず、携帯電話のカメラを用いた読み取りに関して実用段階に至っているのかが明らかにされていない。実際、2次元コードの24重化は理論的には可能であるが、2次元コードの構成にRGB色空間に存在する全16,777,216値のRGB値を使用することになるため、雑音によるRGB値の変化が生じる携帯電話のカメラでの読み取りは困難である。また、8重化2次元コードの読み取りには以下のような問題点がある。

- 8重化2次元コードは各モジュールが8ビットの情報量を有するため、 2^8 値、すなわち256値の異なるRGB値を使用する。正しい読み取りを行うには2次元コードを構成する256値のRGB値を正確に識別しなければならない。
- PMコードの構成に使用するRGB値の設定は実環境での雑音特性を考慮しておらず、雑音耐性を有しない。

雑音によりRGB値の変化が生じる撮影画像において256値の異なるRGB値を正確に識別することは容易ではない。PMコードの開発会社が公開しているデコードのデモ映像 [11] では、4重化までのPMコードを読み取ることができていることを確認できる。よって、既存の2次元コードの実環境における読み取りは4重化が限界であると考えられる。

以上より、既存のカラー2次元コードで実環境における高精度の読み取りを保障しているものは現在4重化ま

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

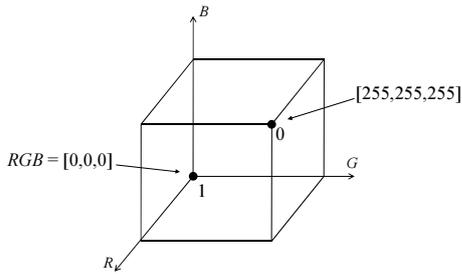


図1 QRコードのRGB空間上の信号点

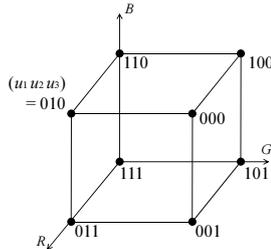


図2 3重化QRコードのRGB空間上の信号点

でに留まっており、携帯電話のカメラを用いたデコードにおいて高い読み取り精度を保証した5重化以上のカラー2次元コードは与えられていない。本稿では5重化以上の多重化を可能にし、携帯電話による読み取りが可能なカラー2次元コードを提案する。

3 多重化方法

本方式では2次元コードの構成に使用するRGB値を多値化し、複数個のQRコードの多重化を行うことにより2次元コードを生成する。生成する2次元コードをカラー多重化QRコードと呼ぶ。赤R、緑G、青Bの3要素において0から255の全256階調で表現する輝度値 $[R, G, B]$ によりQRコードのモジュールが有する2値状態である明および暗を表現すると、明は $[255, 255, 255]$ 、暗は $[0, 0, 0]$ と表される。また、QRコードの各モジュールは1ビットの情報を有し、明のモジュールは $u = 0$ 、暗のモジュールは $u = 1$ という符号ビット u で表現できる。よって、RGB色空間において $RGB = [255, 255, 255]$ に位置する信号点には $u = 0$ 、 $RGB = [0, 0, 0]$ に位置する信号点は $u = 1$ が対応付けられており、2値のRGB値はRGB色空間上に存在する信号点とみなせる。QRコードのRGB空間上における信号点を図1に示す。1モジュールに n ビットの情報を格納する場合、 n 個のQRコードを重畳し同一座標に位置するモジュールの明暗状態を $\{0, 1\}$ の2元系列で表現することにより、各モジュール毎に n ビット符号ブロック $u = (u_1, u_2, \dots, u_n)$ を得る。 u は全 2^n 種類となるため、 $RGB = [255, 255, 255]$ 、 $[0, 0, 0]$ の2値に加え、全 2^n 値の相異なるRGB値を設定してモジュールが有する状態を多値化し各RGB値に対して u を対応付けて信号点とする。例として1モジュールに3ビットの埋め込み、すなわち2次元コードの3重化を行う場合のRGB値設定を図2に示す。3個のQRコードを重畳した際、各QRコードの同一座標に位置するモジュールの明暗状態をそれぞれ u_1, u_2, u_3 とすると、各モジュール毎に

3ビットの符号ブロック $u = (u_1, u_2, u_3)$ が得られる。それぞれのモジュールの u において u_1 をR、 u_2 をG、 u_3 をBとして各輝度値成分に1ビットずつ割り当て、符号ビットが0であれば輝度値255、符号ビットが1であれば輝度値0とする。例として $(u_1, u_2, u_3) = 010$ が対応付けられた信号点を考えると、 $u_1 = 0$ より $R = 255$ 、 $u_2 = 1$ より $G = 0$ 、 $u_3 = 0$ より $B = 255$ であるから信号点 $(u_1, u_2, u_3) = 010$ の座標は $RGB = [255, 0, 255]$ となる。以上の方式により1モジュールが8値の状態を有し、1モジュールに3ビットの埋め込みが可能となる。3重化の場合はR、G、B3要素において $\{0, 255\}$ の2値のみを用いるが、0から255の256階調全てを用いると16,777,216種類のRGB値を設定でき、最大24重化まで行うことが可能となる。復号対象の画像上に雑音による輝度値の変化が生じていなければ24重化QRコードの復号を行うことが可能である。しかしながら、携帯電話に付属するカメラ機能を用いてカラー多重化QRコードを撮影し復号を行う場合、撮影環境の照明条件や撮影に使用するカメラの解像度、2次元コード印刷時の色変換などに起因する雑音によって符号化時のRGB値と異なる値へ変化する。よって、復号を行うには撮影画像のRGB値から信号点を特定する必要がある。また、多重化数が増加するにつれ必要な信号点数が増加しRGB色空間上における信号点間のユークリッド距離が減少し雑音に対する耐性が低下するため、雑音によってRGB値が変化した際に符号化時の信号点を特定することが困難となる。

以上の問題点より、カラー多重化QRコードを構成する際には雑音特性を考慮してRGB空間内に信号点を配置する必要がある。本方式では携帯電話のカメラの撮影画像における雑音特性をモデル化し、RGB空間上において相異なる信号点が雑音によって重複して分布しないように信号点の座標を設定する。また、符号化変調技術を2次元コードの構成に応用することにより、符号系列間のユークリッド距離を増大させて雑音に対する耐性を与える。本稿ではQRコードの5重化を仮定して多重化方法および読み取り方法を述べる。一般の多重化の場合も本稿の方法と同様にして構成および復号が可能である。

4 カラー多重化QRコードの概要

4.1 エンコード方法

Step1 入力データ分割

2次元コードに格納するデータを情報量が等しくなるように5つのデータに分割する。

Step2 QRコードのエンコード

Step1で分割したデータより5個のQRコードを生成する。QRコードの型番は5つの入力データにおいて情報量が最大のデータから生成可能なQRコードの最小の型番に統一する。QRコード生成の際に使用するモードは8ビットバイトモードを使用する。生成した i 個目($i = 1, 2, 3, 4, 5$)のQRコードの明暗情報を2元系列

$$QR_i = (a_{i1}, a_{i2}, a_{i3}, \dots) \quad (1)$$

とする。 a_{ij} は i 個目のQRコードのモジュール配置規則において j 番目に該当するモジュールの状態を示し、明ならば $a_{ij} = 0$ 、暗ならば $a_{ij} = 1$ とする。

Step3 符号化

5 個の各 QR コードの j 番目のモジュールの状態ビットからなる 5 ビット情報ブロック

$$a_j = (a_{1j}, a_{2j}, a_{3j}, a_{4j}, a_{5j}) \quad (2)$$

を配列することにより, 情報系列 $a_1 a_2 a_3 \dots$ を得る. $a_1 a_2 a_3 \dots$ を符号化率 $1/2$, 拘束長 11 の再帰的組織畳込み符号器に入力し, 第 1 出力より $a_1 a_2 a_3 \dots$, 第 2 出力より 2 元系列 $b_1 b_2 b_3 \dots$ を得る. 得られた出力系列に対しパンクチャド符号化を行い, 符号化率 $5/6$ の符号系列 $c_1 c_2 c_3 \dots$ を得る. $c_1 c_2 c_3 \dots$ は 6 ビット符号ブロック

$$c_j = (a_{1j}, a_{2j}, a_{3j}, a_{4j}, a_{5j}, b_{5j}) \quad (3)$$

からなる.

Step4 RGB 値変調

Step3 で得られた $c_1 c_2 c_3 \dots$ を用いて, c_j に対応付けられた RGB 値に変調し, RGB 値系列

$$RGB = (R_1 G_1 B_1, R_2 G_2 B_2, R_3 G_3 B_3, \dots) \quad (4)$$

を得る.

Step5 カラー多重化 QR コードの生成

Step4 で得られた RGB を用いて, QR コードのモジュール配置規則において j 番目に該当するモジュールの RGB 値を $R_j G_j B_j$ とすることにより, カラー 5 重化 QR コードを生成する.

4.2 デコード方法

Step1 撮影画像取得

携帯電話のカメラより撮影画像を取得し RGB 情報を抽出する.

Step2 フィルタ処理による明度補正

撮影環境の照明条件の相違によるカラー多重化 QR コードのモジュールの RGB 値の変化を抑えるため, 撮影画像に対して明度補正処理を行う.

Step3 位置検出

撮影画像に対して 2 値化を行い位置検出パターンを用いてカラー多重化 QR コードの位置と傾きを検出し補正する.

Step4 ビタビ復号

撮影画像より輝度値 $R'G'B'$ を取得し符号化領域内のモジュールの $R'G'B'$ を配置規則に基づいて配列することにより, 受信系列

$$R'G'B' = (R'_1 G'_1 B'_1, R'_2 G'_2 B'_2, R'_3 G'_3 B'_3, \dots) \quad (5)$$

を生成する. 生成した受信系列に対しビタビ復号を行い復号系列 $u'_1 u'_2 u'_3 \dots$ を得る.

Step5 復号結果の出力

Step4 において得られた $u'_1 u'_2 u'_3 \dots$ をもとに 5 個の QR コードを復元し, 通常の QR コードと同様に各々デコードを行う. 5 個の QR コードのデコード結果を結合して得られたデータを復号結果として出力する.

5 カラー多重化 QR コード

5.1 RGB 値設定

携帯電話のカメラを用いて撮影を行った際の輝度値 $R'G'B'$ を計測し, 雑音特性のモデル化を行

表 1 評価環境

撮影場所	白色蛍光灯下
プリンタ	Epson Colorio PM-A970
印刷用紙	スーパーファイン紙
携帯電話	NTT docomo F-01A
撮影解像度	768 × 1280 ピクセル

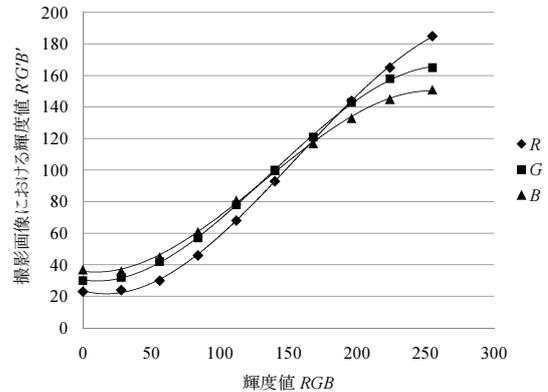


図 3 雑音特性

う. 評価対象として R, G, B の 3 要素がそれぞれ $\{0, 28, 56, 84, 112, 140, 168, 196, 224, 255\}$ の 10 値のうちいずれかをとる 1000 種類のカラーパターンを紙に印刷したものを用いる. 評価環境を表 1 に示す. 表 1 に示す携帯電話のカメラで評価対象を撮影し, 5.3 節で述べるフィルタ処理を行った上で撮影画像における評価対象の輝度値 $R'G'B'$ を測定する. モデル化の簡単のため, 輝度値の変化は R, G, B の 3 要素において独立, すなわち撮影画像における輝度値 R' は R のみで決定し, G および B の値は R' に影響しないと仮定する. 生成時の輝度値 RGB と撮影画像における輝度値 $R'G'B'$ の関係を図 3 に示す. 図 3 より導出できる近似曲線を輝度値 RGB に対する雑音特性モデルとする. 雑音特性モデルは以下の式で表せる.

$$R' = -0.000016R^3 + 0.0075R^2 - 0.24R + 24 \quad (6)$$

$$G' = -0.000017G^3 + 0.0070G^2 - 0.14G + 30 \quad (7)$$

$$B' = -0.000016B^3 + 0.0062B^2 - 0.11B + 35 \quad (8)$$

雑音特性モデルを考慮することにより撮影画像における異なる RGB 値間のユークリッド距離が増大するように RGB 空間上に信号点を配置する. 信号点配置は格子状とし, R 軸, G 軸, B 軸をそれぞれ 4 値に分割することにより構築できる格子の交点 64 個を信号点とする. R 軸を分割する 4 値の輝度値を $R_i (i = 0, 1, 2, 3)$, 雑音特性モデルにおいて R_i の撮影画像における輝度値を R'_i で表す. 図 4 に示すように 4 値の R'_i が等間隔になるように R_i を設定する. G, B についても同様に各輝度値 4 値 $G_j (j = 0, 1, 2, 3), B_k (k = 0, 1, 2, 3)$ を設定する. 導出した R_i, G_j, B_k の各 4 値を次に示す.

$$\begin{cases} R_0 = 0, R_1 = 122, R_2 = 180, R_3 = 255 \\ G_0 = 0, G_1 = 109, G_2 = 165, G_3 = 255 \\ B_0 = 0, B_1 = 106, B_2 = 161, B_3 = 255 \end{cases} \quad (9)$$

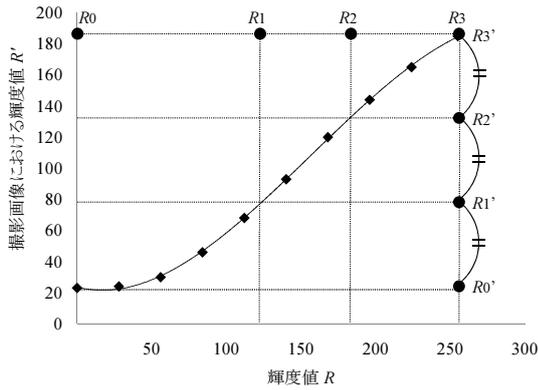


図4 輝度値 R の設定方法

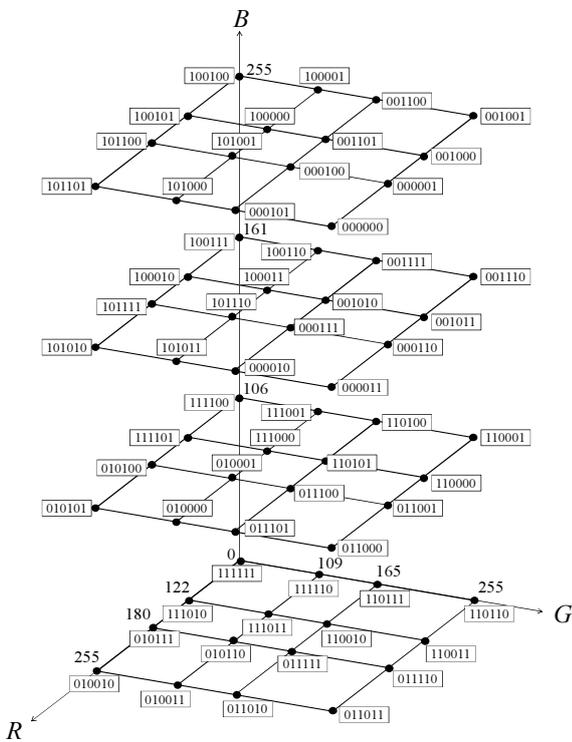


図5 5重化 QR コードにおける信号点配置

以上の方法によりカラー多重化 QR コードの構成に使用する 64 値の輝度値 $[R_i, G_j, B_k]$ を設定する。

5.2 符号化変調の応用

RGB 色空間上の信号点 64 値に対して複数個の QR コードの明暗情報を示す符号ブロックの割り当てを行う。各信号点に対して対応付ける符号ブロックの符号長は 6 ビットとする。符号長が 6 ビットであれば、64 値 ($= 2^6$ 値) の信号点にそれぞれ固有の符号ブロックを割り当てることが可能となる。割り当て方法としてセット分割法を用いて 6 ビット符号ブロック $u = (u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6)$ を各信号点に対応付ける。カラー 5 重化 QR コードにおいて用いる信号点配置を図 5 に示す。セット分割法は各信号点に対応付けられる符号語と信号点間のユークリッド距離が明確な対応関係を持つことから、上述の方法によ

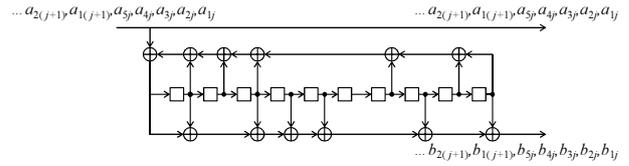


図6 符号化率 1/2, 拘束長 11 の畳み込み符号の符号器

て誤り訂正符号化と RGB 値変調の統合的な設計が可能となる。符号化部分および変調部分を統合的に設計することにより、符号系列間のユークリッド距離の増大を図る。

次に、カラー多重化 QR コードの符号化に使用する畳み込み符号の設計を行う。カラー 5 重化 QR コードにおける符号化の場合、入力ビット数 $k = 5$ 、出力ビット数 $n = 6$ となる符号化率 $5/6$ の畳み込み符号を用いる。カラー多重化 QR コードの構成に使用する畳み込み符号器を図 6 に示す。符号器は符号化率 $1/2$ 、拘束長 11 の再帰的組織畳み込み符号器を利用する。その生成行列は

$$G(D) = \begin{bmatrix} 1 & \frac{1+D+D^3+D^4+D^5+D^8+D^{10}}{1+D+D^2+D^3+D^7+D^9} \end{bmatrix} \quad (10)$$

で表される。カラー 5 重化 QR コードの符号化を行う場合、図 6 の符号器より得られた符号系列をパンクチャリングし、符号化率を $5/6$ とする。パンクチャリング行列

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

とする。図 6 の符号器に a_i を 1 ビットずつ順次入力すると第 1 出力より a_{i1} から a_{i5} を符号化せずにそのまま出力ビットとして得る。第 2 出力 b_i は現在の入力ビットと過去の入力 10 ビットの畳み込みにより得られる。 $b_i = (b_{i1}, b_{i2}, b_{i3}, b_{i4}, b_{i5})$ の 5 ビットのうち、 P に従い $b_{i1} \sim b_{i4}$ を除去し b_{i5} のみを符号系列に用いる。よって、符号化により得られる符号系列 $c_1 c_2 c_3 \dots$ は符号ブロック $c_j = (a_{1j}, a_{2j}, a_{3j}, a_{4j}, a_{5j}, b_{5j})$ からなる。

以上の方式により全モジュールに対し 6 ビット符号ブロック c_j が得られる。各モジュールに対し図 5 の信号点配置において c_j が対応付けられた輝度値 RGB_{c_j} をモジュール RGB 値として設定することによりカラー多重化 QR コードを生成する。

5.3 ビタビ復号によるデコード

携帯電話のカメラによる撮影画像を用いてカラー多重化 QR コードのデコードを行う際、雑音によって変化した RGB 値をもとに生成時のカラー多重化 QR コードを復元する。カラー多重化 QR コードの復号はフィルタ処理による RGB 値補正とビタビ復号からなる。

フィルタ処理は撮影環境の違いによる画像の明度の相違を抑制する処理である。撮影画像より取得した輝度値 $R'G'B'$ を雑音モデル構築時の環境で撮影した画像と同程度の明度に補正する。しかし、明度と色相が分離していない RGB 色空間において明度のみを補正するのは困難である。明度補正は明度が独立した色空間において行うことが望ましい。よって明度が独立している HLS 色空間を用いて、RGB 値を HLS 値に変換した上で明度 L に対して補正を行う。補正基準としてカラー多重化 QR コードの位置検出パターンおよび位置合わせパターンの明モ

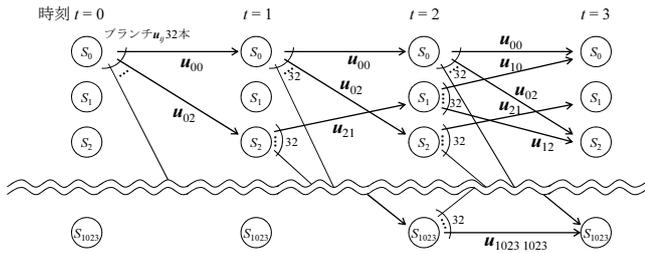


図7 符号化率 5/6, 拘束長 11 のトレリス線図(概略)

ジュール ($RGB = [255, 255, 255]$) を用いる。撮影画像における明モジュールの明度 L が一定値になるように補正率 α を用いて, $L := L \times \alpha$ という補正式により補正を行う。5.1 節における雑音モデル構築の際に用いた撮影画像の明度を L_c とすると, 補正率 α は $\alpha = L_c/L$ と表せる。全モジュールに対して補正を行った後, HLS 値から RGB 値へ再変換を行う。

フィルタ処理後, 撮影画像内のカラー多重化 QR コードから得られる受信系列 $R'G'B'$ に対して軟判定ビット復号を行う。受信系列 $R'G'B' = (R'_1G'_1B'_1, R'_2G'_2B'_2, R'_3G'_3B'_3, \dots, R'_lG'_lB'_l)$ は撮影画像内のカラー多重化 QR コードのモジュールの輝度値 $R'_iG'_iB'_i$ を QR コードの符号化領域のモジュールの配置規則にしたがって配列することにより得られる。 l は符号化領域内の全モジュール数を示す。ビット復号のメトリックは受信語 $R'G'B'$ とブランチに対応付けられた信号点 $RGBu$ とのユークリッド距離

$$du = \sqrt{(R' - Ru)^2 + (G' - Gu)^2 + (B' - Bu)^2} \quad (12)$$

とする。符号化率 5/6, 拘束長 11 のトレリス線図の概略を図7に示す。トレリス線図は符号器のメモリレジスタの内部状態が全零である時刻 $t = 0$ の S_0 から出発する。各メモリレジスタは $\{0, 1\}$ の 2 値を有し全メモリレジスタ数 $m = 10$ であるから, 内部状態数は $1024 (= 2^{10})$ となる。各状態 S_i からそれぞれに 6 ビットの符号ブロック $u = (u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6)$ が対応付けられた 32 本のブランチが出ており, 充分時間の経過した段階では 1 つの状態に 32 本のブランチが入る。ビット復号の手順を以下に示す。

[ビット復号の手順]

Step1 パスメトリックの計算

時刻 t の任意の状態 S_i から時刻 $t + 1$ の S_j に入るブランチ u_{ij} のブランチメトリック du_{ij} を算出してこれまで経由してきたパスメトリック $p_{t,i}$ と加算し, $p_{t+1,j}$ とする。

Step2 メトリックの比較

時刻 $t + 1$ の S_j に複数のパスが入る場合, それぞれのパスメトリック $p_{t+1,j}$ の比較を行い, $p_{t+1,j}$ が最小のパスを生き残りパスとして選択し, それ以外のパスを除去する。

Step3 復号系列の導出

受信系列の全受信語について以上の操作を続け, 最終的にパスメトリックが最小となる状態 $S_{terminal}$ を選択し, $S_{terminal}$ から生き残りパスを遡り時刻 0

表2 信号点・符号系列間の最小ユークリッド距離

無符号化方式	78.5
符号化変調方式	150.2

の S_0 まで繋がるパスの符号系列 $u'_1u'_2u'_3 \dots u'_l$ を復号系列とする。

以上の手順により, 復号系列 $u'_1u'_2u'_3 \dots u'_l$ を得る。時刻 t の復号ブロック $u'_i = (u_{t1}, u_{t2}, u_{t3}, u_{t4}, u_{t5}, u_{t6})$ を用いて k 個目 ($k = 1, 2, 3, 4, 5$) の QR コードの符号化領域の配置規則において t 番目に該当するモジュールの明暗状態を u_{tk} とし, 多重化した 5 個の QR コードを復元する。復元した 5 個の QR コードに対して一般の QR コードのデコード方法と同様にデコードを行い, 復号結果を結合して格納情報を取得する。

6 評価

6.1 雑音耐性性能評価

カラー多重化 QR コードの雑音耐性の理論的評価を行う。雑音に対する耐性は RGB 色空間上の相異なる信号点間のユークリッド距離の最小値によって決まる。符号化変調を応用せず 32 値の信号点を用いて 5 重化を行う無符号化方式の信号点間および提案方式である符号化変調方式の符号系列間の RGB 色空間上での最小ユークリッド距離を表2に示す。表2より, 符号化変調を応用した設計を行うことにより符号系列間のユークリッド距離が増大しており, カラー多重化 QR コードの雑音耐性が改善していることが分かる。

6.2 読み取り可否評価

携帯電話のカメラを用いたカラー多重化 QR コードの読み取りの可否について評価実験を行った。雑音を考慮した RGB 値設定および符号化変調技術の応用による読み取り精度の改善を評価するために, 以下の 3 方式によって生成したカラー多重化 QR コードを用いて読み取りを行う。

方式1 雑音特性未考慮および無符号化

方式2 雑音特性を考慮した RGB 値設定および無符号化

方式3 雑音特性を考慮した RGB 値設定および符号化変調

実験環境は表1と同様とする。実験環境として実環境における使用を想定し, 室内白色蛍光灯下でカラー多重化 QR コードの一部に影が重ならないように撮影する。誤り訂正レベルは設定可能な 4 つのレベルのうち最も訂正能力の高いレベル H(30%), 型番は各携帯電話事業者が読み取りを保証する最大のサイズである型番 10(モジュール数 57×57) とした。QR コードに格納するデータは上記の設定で埋め込み可能な最大の情報量を有するテキストデータとする。カラー多重化 QR コードを表1のプリンタを用いて紙に印刷し, 携帯電話のカメラを用いて各 30 回撮影およびデコードを行った。各方式に基づいて生成したカラー 4 重化 QR コード, カラー 5 重化 QR コードの読み取り成功率を表3に示す。表3よりカラー 4 重化 QR コード, カラー 5 重化 QR コードともに雑音特性を考慮した RGB 値設定および符号化変調技術の応用によって読み取り精度が改善することを確認した。

表3 カラー多重化 QR コードの読み取り成功率

	4 重化 QR コード	5 重化 QR コード
方式 1	76.6%	6.7%
方式 2	100.0%	73.3%
方式 3	100.0%	100.0%

表4 最大格納情報量評価実験環境

撮影場所	室内白色蛍光灯下
プリンタ	Epson Colorio PM-A970
印刷用紙	スーパーファイン紙
携帯電話	NTT docomo F-01A
撮影解像度	1944 × 2592 ピクセル
誤り訂正レベル	Q(25%)
コード印刷サイズ	70mm × 70mm

6.3 最大格納情報量評価

実験環境において携帯電話のカメラを用いた読み取りが可能なカラー 5 重化 QR コードの最大格納情報量を導出する検証実験を行った。実験環境を表 4 に示す。表 4 の設定で生成した格納情報量の異なるカラー 5 重化 QR コードについて各 30 回の撮影および復号を行い、格納情報量別の読み取り精度を求めた。比較実験として QR コードについて同様の方法により実験を行った。QR コードの読み取りは携帯電話に標準搭載されている QR コードリーダーを用いた。

実験の結果カラー 5 重化 QR コードの場合、格納情報量が 1970bytes のカラー 5 重化 QR コードを 80% 以上の高い精度で復号できることを確認した。また、QR コードの場合、読み取り成功率が 80% 以上となる精度の復号が可能であるのは最大 1228bytes であった。

実験結果より、従来の QR コードでは 1.2KB を超える情報量を格納する場合読み取りが困難となる。一方、カラー 5 重化 QR コードでは約 2KB の情報量を格納する場合においても高精度の読み取りが可能である。

7 考察

6.3 節の最大格納情報量評価において、表 4 の撮影機器および実験環境では約 2KB の情報量を有するカラー 5 重化 QR コードの高精度読み取りが可能であることを示した。しかし、カラー 5 重化 QR コード読み取りの際により高解像度の撮影機器を用いることにより、さらに大容量情報を有するカラー 5 重化 QR コードの読み取りが可能であると考えられる。

また、撮影画像の圧縮方式を変更することにより、最大格納情報量のさらなる増大が可能になると考えられる。一般的な携帯電話に搭載されているカメラを用いてカラー多重化 QR コードの撮影を行う場合、撮影画像の情報量を削減するために画像に対し圧縮を行う。通常、圧縮方式には Joint Photographic Experts Group、通称 JPEG が採用されている [12]。JPEG は非可逆圧縮方式であり、大幅な情報量の削減が可能であるものの画質の劣化を伴う。撮影画像の圧縮による画質劣化は撮影画像内のカラー多重化 QR コードの RGB 値に変化をきたすため、読み取り精度の低下を招く一因となる。したがって、撮影画像の

圧縮方式を画質劣化の少ない方式に変更することにより、読み取り可能な最大格納情報量がさらに増大すると考えられる。

8 まとめ

本稿では RGB 情報の多値化により情報密度を高めたカラー多重化 QR コードの改良および評価を行った。改良点として、多重化を行う複数個の QR コードの明暗情報を符号化する際に符号化変調技術を応用し符号系列間のユークリッド距離を増大することにより雑音耐性を改善した。本方式により、QR コードの 5 倍の情報密度を有するカラー 5 重化 QR コードを生成でき、かつ実験環境における使用に充分耐え得ることを示した。

本稿では表 1 に示した携帯電話に付属するカメラ機能をもとに雑音モデルの定式化および信号点配置の RGB 値の決定を行った。しかし、他の携帯電話のカメラ機能を用いた場合にも同様の雑音特性モデルと信号点配置の RGB 値を利用でき、符号化変調による雑音耐性とビタビ復号によるデコード方法によって高い読み取り精度を保障できると考えられる。種々の携帯電話のカメラ機能による読み取り精度実験とその検証については今後の課題とする。

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] DENSO WAVE INCORPORATED, QRcode.com, <http://www.denso-wave.com/qrcode/>, 2010.
- [3] 遠藤祐介, 恩賀嶺, 廣友雅徳, 森井昌克, “カラー多重化 QR コードの提案と評価,” 信学技報. LOIS2009-25, pp.43-48, 2009.
- [4] 今井秀樹, 符号理論, 電子情報通信学会, 1990.
- [5] 笠原正雄, “符号化変調方式 [I] - デジタル変調方式とその発展を支えたテクノロジー -, ” 電子情報通信学会誌, vol.72, no.1, pp.97-106, 1989.
- [6] 笠原正雄, “符号化変調方式 [II] - デジタル変調方式と誤り訂正符号の統合 -, ” 電子情報通信学会誌, vol.72, no.2, pp.217-226, 1989.
- [7] 笠原正雄, “符号化変調方式 [III・完] - 符号化変調方式とその将来 -, ” 電子情報通信学会誌, vol.72, no.3, pp.306-316, 1989.
- [8] 助川修司, 伊藤正都, 近藤圭佑, 大園忠親, 新谷虎松, “QR コードの多色化による 2 次元コードの大容量化について,” 情報処理学会全国大会講演論文集, vol.70, pp.“4-845”-“4-846”, 2008.
- [9] Colour Code Technologies Co., Ltd., 【 Color C Code 】 次世代大容量カラーコード, <http://www.gmg-color.jp/cc/>.
- [10] Content Idea of ASIA Co.,Ltd., PM-Code, http://ci-a.co.jp/pm/pmeng_lw.html, 2006.
- [11] Content Idea of ASIA Co.,Ltd., HTC-03A(Android) Read The PM-Code Demo Apple Store Movie.mov, YouTube, <http://www.youtube.com/watch?v=4girCfkg4Mk>, 2009.
- [12] JTC1/ SC29, “Information technology - Digital compression and coding of continuous-tone still images: Requirements and guidelines,” ISO/ IEC 10918-1, 1994.