

互換領域を有する多色多領域方式の高密度二次元コード

High density two-dimensional code with compatible area using multi colour & multi region method

寺浦信之[†] 櫻井幸一[‡]
Nobuyuki Teraura Kouichi Sakurai

1. はじめに

1. 1 背景

二次元コードは、バーコードに比較して多くのデータを記憶し、また誤り訂正機能を有し汚れに強いので、当初業務用途で使用されてきた。その後、携帯電話で読取れるようになってきたので、業務用途以外のWEB誘導など広い用途で使われている。

1. 2 動機

現在普及している二次元コード[1][2]は、1980年代に発明され、その時代の撮像技術を前提に設計されている。一方、デジタルカメラの爆発的な普及を機に、撮像素子の画素数は飛躍的な拡大を遂げ、現在では1000万画素以上の撮像素子が安価に入手可能である。

従って、これらの大きな画素数の撮像素子を前提にすれば、現在の二次元コードのセルの中に、さらに微細な構造を構成しても、これらを識別することが可能である。そこで、微細構造を導入して大容量化を実現し新規の領域を付加した二次元コードを検討する。

また、カラーの撮像素子も安価に入手可能になってきており、安価にカラーの画像を撮影可能な読取装置を実現できるようになってきた。また、上記のデジタルカメラに相当する画素数の撮像素子を実装したスマートフォンが普及してきている。そこで、微細な構造を持ち、且つ多色で印刷された二次元コードの読取環境が整って来ている。

一方、大容量の二次元コードの必要性も高まってきている。WEB誘導に用いるウェブアドレスのようなデータのインデックを記憶する場合には、大容量の二次元コードは必要とされない。しかし、データそのものを保持する場合、いわゆるデータキャリアとして用いる場合には、画像や音声のデータ等の様々なデータのキャリアとしてのニーズも大きい。

WEB誘導の事例のように、すべての人への情報提供を目的とした応用だけでなく、特定の人だけに情報を提供するニーズも存在する。そこで、秘匿性のある二次元コードとしても利用可能とするため、新規領域の秘匿化を可能とすることを併せて検討する。

1. 3 既存の研究

収容データの大容量化を目的とし、セルを多値化する為の手段として多色化があり、多くの色の識別を目指す研究[3-6]がなされている。[3][5]は色の識別手法として識別対象となる標準色をコード内に保持し、識別対象と標準色を比較することで識別を行っている。[4][6]は、退色後の色空間で相互距離の最大化などを行い、識別対象間の比較で色を識別している。また、カラー化や電子透かしによってセキュリティ性の向上を目指す研究[7][8]もなされている。

一方、現在の白黒の二次元コードとの互換性を考慮したカラー二次元コードの研究は見られない。白黒の二次元コードでは、秘匿性と互換性を考慮した事例[9]が見られる。また、セルの微細化による大容量化の研究[10]がある。

1. 4 互換領域の必要性

新規のシステムに新規の情報媒体を用いる場合には問題がないが、既存のシステムが存在する場合には対応すべき課題がある。

新規に既存のシステムに用いられている二次元コードと全く互換性のない二次元コードを導入する場合には、その二次元コードを用いる新規のシステムに加えて、既存のシステムにも新しい二次元コードの読取装置を導入する必要がある。それに対して、既存の機器で読取可能な互換領域を有する場合には、図1に示すように既存のシステムでは読取装置を更新する必要はなく、そのままシステムを運用可能であり、新規の機能を新規のシステムを追加することで、システム全体の順次な高度化が可能となる。互換領域を有すること(情報媒体の上位互換性)は既存システムに影響を与えないために重要な機能である。



図1 既存及び新規のシステムでのデータ活用

1. 5 課題

互換性を維持するために既存領域を設定し、新たに大容量化した新規領域を追加することが第一の課題である。また、大容量化に伴い誤識別が懸念されるので、誤り訂正を導入することが第二の課題である。

1. 6 貢献

本研究では、従来顧みられなかった既存の二次元コードと互換性を有する領域を有し、さらに秘匿性のある領域を有する二次元コードの実現手法を提供する。本研究で提案する互換領域は既存の二次元コードと同じ容量であるので、既存のシステムで用いられている二次元コードとそのまま置き換えることが可能である。図1に示すように、全体システムの中で、新たに導入するサブシステムは互換領域と新規領域の両方を用い、既存のサブシステムは互換領域のみを用いることによって、サブシステムの併存、逐次更新ができるので、全体システムの逐次の高度化に資することができる。

[†]テララコード研究所、九州大学システム情報科学府 社会人博士後期課程, Terrara Code Research Institute

[‡]九州大学システム情報科学府, Information Science and Electrical Engineering, Kyushu University

2. 多値化

二次元コードの大きさを維持しつつ大容量化を図るためには、基本要素であるセルを多値化する必要がある。互換性を維持した多値化には、多色化[11]と多領域化[12]がある。

図2に、通常の白黒の二次元コードと多色化及び多領域化二次元コードの例を示す。

次に、文献[11]と[12]に従って、互換領域を有する多色化と多領域化による大容量化の概要を述べる。



図2 セルが1値と多値の二次元コード

2. 1 多色化

(1) 多色化によるセルの多値化

現在普及している二次元コードは、セルを白と黒の2色で表現するため、セルは1ビットの情報を持っている。これを k^2 色で表現すれば、 k ビットの情報を持つことができる。従って、8色または16色で表現すれば、それぞれ3ビット、4ビットの情報を持つことができる。

(2) 互換性

8色を用いた多色化では、8色を輝度（反射率の代替指標）によって4色ずつ白グループと黒グループに分別し、既存の二次元コードの白または黒に対応する色グループの色を割り当てる。そして、白グループの最小輝度と黒グループの最大輝度の差をISO/IECの規定[13]の大きさに設定する。これにより、既存の二次元コードの読取り装置では、白グループの色は白に、黒グループの色は黒と識別されるので、既存の装置で読取り可能となり、互換領域を維持できる。

色の選択の事例と選択した各色のRGBの具体値を表1に示す。この場合では、白と黒のグループ間の輝度差は0.44に設定されている。ここで、輝度(Y)とRGB値の変換式は、ITU-R BT.601[14]で規定されている次式を用いた。

$$Y = 0.299R + 0.587G + 0.114B$$

表1 色コードと色の対応事例

色群	色コード	RGB			輝度	色
		R	G	B		
白グループ	000	255	255	255	1	
	001	255	255	0	0.93	黄色
	010	64	255	255	0.84	青色
	011	0	255	0	0.72	緑色
黒グループ	100	255	0	255	0.28	洋赤色
	101	128	0	255	0.18	洋青色
	110	159	0	0	0.13	赤色
	111	0	0	0	0	黒色

(3) 色の符号化

選択した8色について、000から111までの3ビットで表現した色コードを割り当てる。この割当ての例を表1に示す。

この色コードで示された白グループと黒グループの色はそれぞれ4色であるので、新たに2ビットを表現できる。この色コードと保持するデータの対応を示す符号化テーブルを表2に示す。この例では、色コード000(白)はデータ00を保持する。8色の多色化によって、従来と同容量の既存領域と従来の2倍の容量の新規領域からなる二次元コードを表現する。

表2 多色化の符号化テーブル

	色コード	色	符号化データ
白グループ	000		00
	001	黄色	01
	010	青色	10
	011	緑色	11
黒グループ	100	洋赤色	00
	101	洋青色	01
	110	赤色	10
	111	黒色	11

2. 2 多領域化

(1) 多領域化によるセルの多値化

セルを分割して複数のサブセルを設け、符号化領域とセル色領域に分類する。セル色領域には本来のセル色を配置し、符号化領域のサブセルに白または黒を配置する。セルとサブセルの関係図を図3に、サブセルの符号化単位を図4に示す。ここで、データを記憶しない色固定のセルはサブセル分割を行わない。

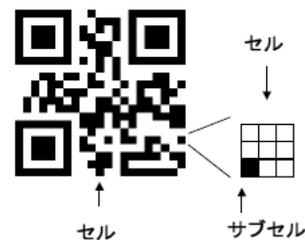


図3 セルとサブセル



図4 サブセルの機能領域

図4に示すように、セルを $n \times n$ の n^2 個のサブセルに分割し、中央部の m^2 個のサブセルをセル色領域とし、周囲の $n^2 - m^2$ 個のセルを符号化領域とする。中央部と周囲部に分割するためには、 n が3以上である必要がある。

(2) 互換性

互換性を維持する為に、セルに記憶する色をセル色領域に配色する。既存の読取り装置の多くは、セルの中央部を識別対象としている。そこで、上記のようにセルの中央部をセル色領域とすれば、セル色領域を識別対象とするので、既存の読取り装置は符号化領域の存在に影響を受けずに、セル色で符号化された領域のみを識別し、従来の二次元コードとして読取るので、互換性が維持される。

(3) サブセルの符号化

各サブセルに白または黒を配色すると、サブセル数のビットデータを保持できる。保持するデータと配色を符号化テーブルで変換して、配色を決定する。

サブセル数が 8 個の場合、8 ビットを表現できる。サブセルの配色と符号化データの対応を示す符号化テーブルを表 3 に示す。

表 3 多領域化の符号化テーブルの例

サブセル色配置	符号化データ
白白白白白白	00000000
白白白白白白黒	00000001
白白白白白白黒白	00000010
白白白白白白黒黒	00000011
....	.
黒黒黒黒黒黒白	11111110
黒黒黒黒黒黒黒	11111111

3. 多色多領域化

多色方式では、32 色を超える色を識別するのは困難度が高い [6]。また、多領域方式では、サブセル数を多く取るとサブセルのサイズが小さくなり、識別が困難となる。そこで、これらの方式を併用することで、個別の手法では実現できない大容量化を行うことが可能となる。また、大容量化によって新たに設定された領域について誤り訂正を導入する。

著者らは、多色多領域方式の二次元コードについて検討結果を示している [15]。本論文では、セルのサブセル分割構造を 4x4 から 3x3 と分割数を少なくして識別性を向上させ、個々のサブセルにデータを付与する単純化を計り、またサブセル色をセル色グループから選択し、より互換性が高く実用的な方式を提案する。

3. 1 多色方式と多領域方式の併用

多色方式と多領域方式を併用した多色多領域方式について色識別が容易な 8 色を用いる場合を図 5 に示す三つの構成について検討する。ここで、2x2 と 3x3 はセルを縦横に 2 分及び 3 分することを示す。

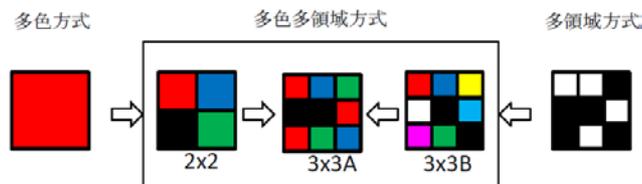


図 5 多色多領域方式のセルの構成

(1) 2x2 型

多色方式は、セル色を白または黒グループの色を用いることにより、既存の読取り装置からはセルが白または黒と識別されることにより、互換性を実現している。2x2 型は多色方式の拡張方式であり、セルを 4 分割するが、その 4 つのサブセルが全て白または黒グループの色を用いる。2x2 型は後述する 3x3 型と比較してサブセル分割数が小さく、サブセルの面積が大きくサブセルの識別が容易である。

2x2 型は、表 4 に示すように、互換部である既存領域に 1 ビットとサブセル部に新規領域として 2 ビットのサブセルを 4 個有しているため、1 セルあたり総計 9 ビットを表現している。

(2) 3x3B 型

多領域方式は、既存の読取り装置がセルの中央部を主な識別対象としていることを用いて互換性を実現している。中央部のサブセルをセル色とし、周辺部のサブセルに白または黒として、各 1 ビットのデータを付与している。3x3B 型は、多領域方式の拡張であり、中央部のサブセルを多領域方式と同じくセル色として白または黒を配置し、周辺部のサブセルを白または黒グループ色の区別なく 8 色で符号化する。

3x3B 型は中央部のサブセルに既存領域として 1 ビット、周辺部に新規領域として 3 ビットのサブセルを 8 個有しており、1 セルあたり総計 25 ビットを表現する。この方式は、データ密度が高いが、反面周辺のサブセル色がセル色と異なる場合があり、セルが小さい場合には、手振れやピンボケによる互換性への影響が懸念される。

(3) 3x3A 型

3x3A 型は、2x2 型と 3x3B 型の折衷方式である。3x3A 型のように、セルを 3x3 のサブセルに分割し、中央のサブセルをセル色として白または黒に設定するが、周辺部のサブセルは 3x3A 型のように 8 色で符号するのではなく、2x2 型のように白または黒のグループの 4 色を用いて符号化する。

3x3A 型は、中央部のサブセルに既存領域として 1 ビット、周辺部のサブセルに新規領域として 2 ビットのサブセルを 8 個有しており、1 セルあたり総計 17 ビットを表現する。この方式は、全てのサブセルがセル色となり、安定した互換性の実現が期待できる。

表 4 多色多領域方式のデータ構造及び関連方式との比較

項目	多色方式	多色多領域方式			多領域方式
		2x2	3x3A	3x3B	
セル部	セル色数	8色	2色	2色	2色
	保持ビット数	3	1	1	1
サブセル部	符号化サブセル数	0	4	8	8
	サブセル色数	0	4色	4色	8色
	保持ビット数	0	8	16	24
	全体ビット数	3	9	17	25
セルの構造					

3. 2 誤り訂正

提案方式では、セルを分割した小さなサブセル単位で色を識別するので、既存の二次元コードよりも誤りが多く発生することが予想される。誤りの多くは汚れに起因し、セル単位またはサブセル単位のブロック誤りが発生する。従って、ブロック単位の誤り訂正能力の高いリードソロモン符号 (RS 符号) [16] を導入する。

RS 符号において、データコード語数 k 、誤り訂正可能なデータ語数 t 、全コード語数 n とすると、

$$n = k + 2t$$

訂正能力を最大とするために、誤り訂正対象をすべてのデータコード語にすると、

$$t = k$$

従って、

$$n = k + 2k = 3k$$

これから、全コード語数は、データ部の 3 倍の容量を必要とする。

(1) シンボル構成の検討

次に、シンボル長及びシンボルへのビット割当てについて、検討する。

2x2 型では、2 ビットを表現するサブセルを 4 個有しており、新規領域に 8 ビットが記憶される。この 8 ビットをシンボル単位とし、データ語とする。

3x3A 型では、2 ビットを表現するサブセルを 8 個有しており、新規領域に 16 ビットが記憶される。8 ビットをシンボル単位とし、これらを 2 データ語とする。

3x3B 型では、3 ビットを表現するサブセルを 8 個有しており、新規領域に 24 ビットが記憶される。8 ビットをシンボル単位とし、これらを 3 データ語とする。

上記の三つの構成の RS 符号のシンボル構成を表 5 示す。また、3x3A 型のシンボル構成図を図 6 に示す。

表 5 RS 符号のシンボル構成

項目	構成			
	2x2	3x3A	3x3B	
既存領域	データ長	セル色: 1ビット		
	シンボル長	8ビット		
	シンボル構成	8セルで1シンボル		
新規領域	データ長	2ビット X4サブセル	2ビット X8サブセル	3ビット X8サブセル
	シンボル長	8ビット		
	シンボル構成	1セル内で 1シンボル	1セル内で 2シンボル	1セル内で 3シンボル

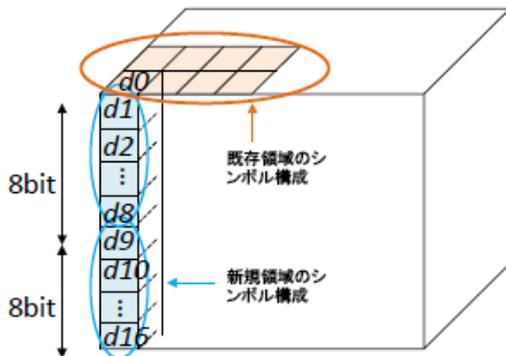


図 6 3x3A 型の誤り訂正のシンボル構成

3. 3 符号化

多色多領域方式の符号化は、既存領域の符号化と新規領域の符号化の二つの符号化がある。ここでは、新規領域の符号化について 3x3A 型を例に説明する。

新規領域に保持される 16 ビットのデータはセル周辺部の 8 個のサブセルに配置される。この配置は、表 6 に示す符号化テーブルに従って定める。すなわち、16 ビットのデータに対して一意に定まるサブセル色の配置が定義されているので、当該サブセル色配置によって符号化がなされる。

しかし、この多色多領域の符号化テーブルは、 2^{16} 個のサブセル色配置を 16 ビットで表現しており、 2^{20} ビットのサイズとなり、このまま使用するのには実用的ではない。そこで、実際の処理では、符号化データを 2 ビットずつ 8 個に分割する。そして、各 2 ビットを表 2 に示す多色化の符号化テーブルによって順次色を選択することで 16 ビットの符号化を行う。

表 6 多色多領域の符号化テーブルの例

白グループ色の場合

サブセル色配置	符号化データ
白白白白白白	0000000000000000
白白白白白白黄	0000000000000001
白白白白白白青	0000000000000010
白白白白白白緑	0000000000000011
....	.
白黄青緑緑黄青白	00011011111100100
白黄青緑緑黄青黄	00011011111100101
....	.
緑緑緑緑緑緑緑青	1111111111111110
緑緑緑緑緑緑緑緑	1111111111111111

黒グループ色の場合

サブセル色配置	符号化データ
赤赤赤赤赤赤赤赤	0000000000000000
赤赤赤赤赤赤赤紫	0000000000000001
赤赤赤赤赤赤赤茶	0000000000000010
赤赤赤赤赤赤赤黒	0000000000000011
....	.
赤紫茶黒黒紫茶赤	00011011111100100
赤紫茶黒黒紫茶紫	00011011111100101
....	.
黒黒黒黒黒黒黒茶	1111111111111110
黒黒黒黒黒黒黒黒	1111111111111111

3. 4 秘匿化

本論文の目的は、互換領域を維持した大容量化にあるが、大容量化した部分について、秘匿化を行うことが可能である。

(1) 秘匿化手法

提案方式では、多色方式と多領域方式に用いられている

符号化が用いられる。多色多領域による符号化は表6の符号化テーブルによって行われるが、その多色化部の符号化は表2に示した符号化テーブルが用いられている。そこで、表2の多色化の符号化テーブルを共通鍵として用いることで暗号化することを検討する。

表2において、白グループ色は4色であるので、このテーブルの組合せ数は4!である。白と黒の両方のグループの組合せ数Nは、

$$N = 4! \times 4! = 526$$

となる。セルの中にはサブセルが8個あるので、それぞれに異なった符号化テーブルを適用すると、全体の組合せ数Mは

$$M = N^8 = 526^8 \approx 1.2 \times 10^{22}$$

となる。このとき、一つの符号化テーブルは16ビットで表現されるので、全体では128ビットであり、128ビット長の共通鍵程度の計算量的安全性を有する。

また、奇数番目のセルと偶数番目のセルで異なった符号化テーブルセットを用いれば、 1.4×10^{44} の組合せ数となる。一般的に、複数の異なった符号化テーブルを用いて、順に各セルに適用すれば、その符号化テーブルの組合せ数はその積となり、必要な秘匿度を得ることができる。

(2) 暗号化データ収容方式との比較

アプリケーション(プログラム)で暗号化したデータを新規領域に記憶し、読取り時に暗号化データをアプリケーションで復号して元のデータを得ることによってもデータの秘匿化を図ることが可能である。しかし、個別のアプリケーション毎に暗号化と復号の処理機能が必要となり、煩雑であるという欠点がある。上記の符号化テーブルを用いる方式では、読取装置が復号した後にアプリケーションプログラムにデータを受け渡すものであり、個別のアプリケーションで対応する必要がないという利点がある。

4. 符号化と復合の処理

ここでは、第3節で示した多色多領域の二次元コードの中で、3x3A型を例にして符号化と復号の処理を説明する。

二次元コードのセル中央部の既存領域及びセル周辺部の新規領域に保持するデータは、それぞれ収容するデータを符号化するデータ部と収容するデータの誤り訂正データを符号化する誤り訂正部から構成される。

前記の3x3A型では、中央部のセル色領域の1ビット及び周辺部の多色化による16ビットの合計17ビットを一つのセルで表現する。中央部の既存領域に収容するデータ $d0$ 及び周辺部の新規領域に収容するデータ $d1, \dots, d16$ からなる全収容データを $D = (d0, d1, \dots, d16)$ とする。ここで、表7に示すように、データを三つのグループに分類し、 $D0 = (d0)$ 、 $D1 = (d1..d8)$ 及び $D2 = (d9..d16)$ とする。また訂正部データを $D0r = (d0r)$ 、 $D1r = (d1r, \dots, d8r)$ 及び $D2r = (d9r, \dots, d16r)$ とする。

また、セル中央部に収容するデータ $D0$ 及び $D0r$ を白と黒に符号した白黒符号部を $U0 = (u0), U0r = (u0r)$ とする。セル周辺部に収容するデータ $D1, D2, D1r, D2r$ を多色に符号化した多色符号部を $U12 = (u1, \dots, u8), U12r = (u1r, \dots, u8r)$ とする。

これらの個別のデータ配置を表7に示す。既存領域と新規領域の誤り訂正の能力を同じにすれば、 (n, k, t) は同じとなり、既存の領域のデータ部の周辺部には新規領域のデータ部が配置され、誤り訂正部の周辺には誤り訂正データが配置される。

表7 データの配置

項目	データ部	訂正部	
(中央部) 既存領域	データ	d0	d0r
	白黒符号	u0	u0r
(周辺部) 新規領域	データ1	d1..d8	d1r..d8r
	データ2	d9..d16	d9r..d16r
	多色符号	u1..u8	u1r..u8r

4.1 符号化処理

ステップ1: データの準備

二次元コードに収容するデータを、既存領域に収容するデータ Ds と新規領域に収容するデータ Di に分けて準備する。

ステップ2: データのセル配置

既存領域に収容するデータ Ds を1ビットと新規領域に収容するデータ Di を16ビットを各セルに配置し、データセット $D = (d0, d1, \dots, d16)$ を得る。

ステップ3: 既存領域の訂正データの作成

既存領域の収容データ $D0 = (d0)$ から、RS符号に基づく誤り訂正データ $D0r = (D0r)$ を作成する。この処理は、既存の二次元コードの訂正データ作成処理と同じである。

ステップ4: 新規領域の訂正データの作成

新規領域の収容データ $D1 = (d1, \dots, d8)$ 及び $D2 = (d9, \dots, d16)$ から、RS符号に基づく誤り訂正データ $D1r = (d1r, \dots, d8r)$ 及び $D2r = (d9r, \dots, d16r)$ を作成する。

ステップ5: 中央部の白黒符号化

既存領域の収容データ $D0 = (d0)$ 及びその誤り訂正部データ $D0r = (d0r)$ を白黒符号化し、 $U = (u0)$ 及び $Ur = (u0r)$ を得る。既存領域については、読取り性能向上のために規定されているパターンマスク処理[1]を行う。

ステップ6: 周辺部の多色符号化

新規領域の収容データ $D1, D2$ 及びその誤り訂正データ $D1r, D2r$ について、符号化テーブル(表2)に従いサブセル色を決定し、 $U12 = (u1, \dots, u8)$ 及び $U12r = (u1r, \dots, u8r)$ を得る。

ステップ7: 固定部への配色

ファインダーパターンなどの既存の二次元コードとして配色が固定されているセルについて、既存領域用に当該白または黒を配色する。

また、用いる色の経年変化による退色に対応するために、ファインダーパターンの固定部のセルに、使用した色を識別の為の標準色として、白グループの色は白のセルに、黒グループの色は黒のセルに配置する。

4.2 復号処理

ステップ1: 画像入力、画像抽出

撮像装置によって、二次元コードを含む画像を撮像し、二次元コードに含まれるファインダーパターンを基に二次元コードを検出し、二次元コードの画像を抽出する。

ステップ2: セル及びサブセルの切り出し

二次元コード画像から各セルを切り出し、さらにサブセルの画像を切り出す。

ステップ3：標準色の識別

ファインダーパターンなどの固定部に配置した標準色のセル色を識別し、用いた8色のRGB値 $SRGBcn=(SRcn, SGCn, SBcn)$ を得る。ここで、cは白または黒グループの色の種別を示し、nはそれぞれの色グループ中の色番号を示す。

ステップ4：セル中央部の白黒識別

各セルの中央部のサブセルについて、白または黒の識別を行い $U0, U0r$ を得る。

ステップ5：セル周辺部の多色識別

各セルの周辺部のサブセルについて、色識別を行い $U12, U12r$ を得る。具体的には、サブセル中央部の画素のサンプリングを行い、当該画素のRGB値 $RGB=(R,G,B)$ を得る。ステップ4で決定したセル中央部の色の色グループに属する4色の標準色との距離を計算する。距離尺度としてはRGB空間でのユークリッド距離を用いる。各標準色との距離を Ln とすると、

$$Ln^2 = (R - SRcn)^2 + (G - SGCn)^2 + (B - SBcn)^2$$

ここで得られた四つの距離の中で、一番小さな距離の色を当該サブセル色と決定する。これにより、各サブセルの色符号 $U12=(u1,...,u8)$ 及び $U12r=(u1r,...,u8r)$ を得る。

ステップ6：既存領域データの復号

ステップ4の処理によって得た $U0, U0r$ からパターンマスク処理などを行い $D0*, D0r*$ を得る。ここで、 $D0*, D0r*$ には誤りを含んでいる可能性が存在する。そこで、RS符号の誤り訂正処理を行い、訂正後のデータである $D0=(d0)$ を得る。

ステップ7：新規領域データの復号

ステップ5の処理によって得た $U12=(u1,...,u8), U12r=(u1r,...,u8r)$ から符号化テーブル表2を用いて、 $D1*, D2*, D1r*, D2r*$ を得る。ここで、 $D1*, D2*, D1r*, D2r*$ には誤りを含んでいる可能性が存在する。そこで、 $D1$ 及び $D2$ についてRS符号の誤り訂正処理を行い、訂正後のデータである $D1=(d1,...,d8), D2=(d9,...,d16)$ を得る。

ステップ8：データの抽出

ステップ6、ステップ7から得た $D0, D1, D2$ から既存領域の収容データ Ds と新規領域の収容データ Di を抽出する。

5. 検証と確認の試験

5.1 互換性検証試験

(1) 試験条件

提案しているサブセルを有する二次元コードの既存領域は、既存の二次元コードと上位互換性を有する構成になっている。そこで、実際に種々の条件のサブセル構成の二次元コードを製作し、既存の二次元コードの読取り装置で既存領域の読取り試験をおこなった。

評価試験用の二次元コードとして、下記を用いた。

- ・二次元コードの種類：QRコード[1]
- ・バージョン：バージョン2[1] (25x25セル)
- ・誤り訂正：レベルH[1] (訂正率約30%)
- ・プリンタ：MG6230 (キャノン製)
- ・印刷用紙：マット紙、写真紙

また、上位互換性検証のためには、サブセルの配色位置が分散したほうが望ましいので、サブセルへの符号化を行わず、各サブセル毎に乱数を用いて決定し色配置を

分散させた。

試験に用いた多色多領域二次元コードを図7に示す。また、白黒、多色、多領域の二次元コードは図2に示したものである。



図7 多色多領域方式の二次元コード

読取りには、下記のスマートフォンと業務用読取り装置を用いた。

- ①スマートフォン：iPhone5(Apple製) (800万画素)

読取りソフト：QRコードスキャナ (デンソーウェーブ製)

照明：白色蛍光灯

- ②業務用手持式読取り装置：BHT-604(DENSO製) (画素数未公表) (照明：赤色LED、波長未公表)

(2) 読取り結果

スマートフォンを用いた場合の読取り結果を表8及び表10に、専用機を用いた場合の読取り結果を表9に示す。表中で白黒(既存)と示したのは、通常の白黒の二次元コードである。また、カラー8色1x1とあるのは、サブセルに分割しない多色二次元コードである。白黒3x3Bとあるのは、サブセルの色を白グループ色を白に、黒グループを黒にした場合である。読取りは各10回行った。

なお、GALAXY Note 2(SAMSUNG製)を用いた試験を併せて行った。読取り結果は同じであった。

表8 互換性検証試験結果 (スマートフォン、マット紙) (括弧内はセルサイズ) (mm)

コードサイズ 構造	20 (0.8)	15 (0.6)	12 (0.48)	8 (0.32)	6 (0.24)	4 (0.16)
白黒(既存)	○	○	○	○	○	×
カラー8色1x1	○	○	○	○	△	×
カラー8色2x2	○	○	○	○	○	×
カラー8色3x3A	○	○	○	○	○	×
カラー8色3x3B	○	○	×	×	×	×
白黒3x3B	○	○	×	×	×	×

読取り率 ○:100%、△:20%、×:0%

表9 互換性検証試験結果 (専用機、マット紙) (括弧内はセルサイズ) (mm)

コードサイズ 構造	20 (0.8)	15 (0.6)	12 (0.48)	8 (0.32)	6 (0.24)	4 (0.16)
白黒(既存)	○	○	○	○	○	×
カラー8色1x1	×	×	×	×	×	×
カラー8色2x2	○	○	○	×	×	×
カラー8色3x3A	○	○	○	○	×	×
カラー8色3x3B	○	×	×	×	×	×
白黒3x3B	○	×	×	×	×	×

読取り率 ○:100%、×:0%

表 10 互換性検証試験結果 (スマートフォン、写真紙)
(括弧内はセルサイズ) (mm)

コードサイズ 構造	15 (0.6)	12 (0.48)	8 (0.32)	6 (0.24)	4 (0.16)	3 (0.12)
白黒(既存)	○	○	○	○	○	×
カラー8色1x1	○	○	○	○	△	×
カラー8色2x2	○	○	○	○	△	×
カラー8色3x3A	○	○	○	○	○	×
カラー8色3x3B	○	×	×	×	×	×
白黒3x3B	○	×	×	×	×	×

読取り率 ○:100%、△:20%、×:0%

(3) 検証試験結果の検討

①スマートフォンの場合

スマートフォンによる読取りでは、カラー8色 2x2 型と 3x3A 型で、白黒の通常の二次元コードと同等の大きさまで読取りが可能であった。

1x1 型と 2x2 型で差が出たのは、セルが小さい場合、1x1 型のセルでコントラスト比の小さな色が配色されて読取りが困難になるときでも、2x2 型の場合にはコントラスト比の大きな色が混合し、読取れる確率が高くなっていると考えられる。

カラー3x3B 型と 3x3A 型で読取りに比較的大きな差が出た。この原因は、3x3B 型の周辺部のサブセル色が中央部のセル色のグループ色でないことである。3x3A 型との差はこの点のみである。これは手振れやピンボケによって、周辺部のサブセル色が中央部のサブセルと重畳された結果と考えられる。白黒 3x3B の結果も同様である。

写真紙に印刷した場合には、マット紙に比較してより小さなセルサイズまで読取り可能であった。より精度よく印刷することで、より小さなセルまで識別可能であり、互換性を維持できる結果が得られた。

②専用機の場合

専用機では、白黒の既存の二次元コードについては、スマートフォンと同等であったが、多色多領域などの二次元コードでは、小さなコードサイズの読取りで劣化が見られた。これは専用機に用いられている撮像素子の画素数が、スマートフォンの半分程度と小さいことが原因の一つと考えられる。

専用機では、カラー8色 1x1 すなわち多色化だけで多領域化を行わない構造ではコードのサイズに関らず、読取り率は 0% であった。この主な原因は、専用機では読取りのための照明に赤色 LED を用いており、補色である青緑色に近い色コード 010 色 (表 6 では青と表記) が本来白グループであるにも関わらず、反射されずに黒と識別されたからである。カラー8色 2x2 では、青緑色以外の色がサブセルに含まれる確率が高く、その場合には白と識別され、すべて青緑が配色されたセルは誤識別されるが、比率が小さいため誤り訂正機能で修正され、読み取れたと考えられる。カラー8色 3x3A 及び 3x3B では、中央部に白または黒のサブセルを有しており、赤色照明の影響が低減している。カラー8色 3x3B がセルサイズが小さくなると、読取り率が 0% になるのは、セルの周辺部のサブセル色が、セル色の反対色になる場合にはセルが小さい場合に影響が大きいからである。これは、白黒 3x3B と同じ読取り結果であることから推定できる。

写真紙に印刷した場合は、全ての構造で表 9 に示した結

果と比較して、コードサイズを小さく一列右にシフトした結果であった。精度の高い印刷は専用機でも効果が表れた。

5. 2 識別性確認試験

スマートフォンを用いて、識別性の確認を行った。確認試験は下記の条件で行った。

- ・プリンタ：MG6230 (キャノン製) (公称 9600DPI)
- ・印刷用紙：マット紙 (プラス製)
- ・読取装置：GALAXY Note 2(SAMSUNG 製)(810 万画素)
- ・二次元コード：バージョン 2 (25x25 セル)
：サイズ (6x6, 12x12, 20x20mm)

- ・撮影条件：自動焦点モードで最接近

撮影した画像と論理的配置図を図 8 に示す。

18x18mm 及び 12x12mm の場合には、論理的配置図と比較して、再現性よく、印字、撮像されている。サブセルには、約 21x21 ピクセル及び 15x15 ピクセルが配置されており、良好にサブセルの読取りが可能である。一方、6x6mm の場合には、サブセルの形状は再現できていない。理想的な状態では原理的に 1 ピクセルで識別可能である。しかし、汚れ、手振れ、ピンボケなどの外乱の為、5x5 ピクセル程度が必要となる。この場合、サブセルには 7x7 ピクセルが配置されているので、この印刷状態においても、パターン識別の手法を用いることで、識別の可能性はあると考える。

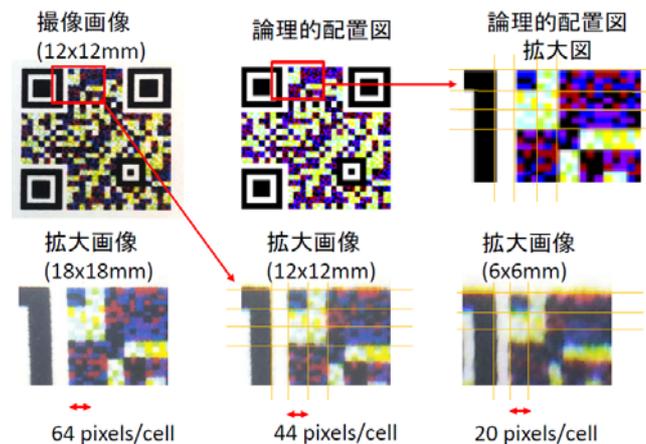


図 8 撮像画像と論理的配置図

5. 3 試験結果のまとめ

スマートフォン及び専用機の互換性検証試験の結果、3x3A 型が一番安定した読取り結果を得た。

周辺部のサブセル認識が可能と推定できる 12mm 角の二次元コードでは、セルサイズは 0.48mm である。このセルサイズで 20mm の二次元コードを構成すると、バージョン 6(41x41)となり、誤り訂正レベルを最高のレベル H (30% レベル) とするとデータコード語は 60 語 (バイトに相当) となる[1]。従って、3x3A 型では、その 16 倍の新規領域を設定されるので、960 バイトを新規に保持できる。また、誤り訂正レベルを最低のレベル L とすると、2176 バイトを保持できる。

6. 多色多領域化の実現性の検討

6. 1 撮像素素数

現在、スマートフォンに用いられている撮像素子の画素数は、800 万~1400 万画素程度である。近い将来 1600

万画素の撮像素子が安価に普及し、スマートフォンだけでなく専用機にも実装可能となると予想される。この撮像素子の一辺の1/4に二次元コードの画像を投影して撮影する場合、撮像素子が縦横同じ画素数とすると、各方向に1000画素がある。そこで、NxN構成の二次元コードでは、1セル当たりのピクセル数 $Pp(N)$ は、

$$Pp(N) = 1000/(N)$$

となる。そこで、25x25構成の二次元コードでは、

$$Pp(25) = 40$$

となる。3x3A型の構成では、1サブセルあたり13x13ピクセルとなる。通常、5x5画素のブロックが存在すれば、識別が可能であるので、25x25セルの二次元コードにおいても、3x3構成のサブセルへの微細分割が充分可能である。

6. 2 サブセルの識別と収容データの最大化

多色多領域の二次元コードの識別では、次の三つの識別により達成される。

- A. 二次元コードの存在の識別
- B. セルの色識別
- C. サブセルの色識別

ここで、AとBは従来の二次元コードの課題であり、Cは本提案固有の課題である。

提案した3x3A型の多色多領域二次元コードでは、サブセルの集合体として、白黒セルと同等のセルを構成し、また固定部は白黒に維持しているため、従来どおりA、Bが達成できる。互換性検証試験で読取れるサイズの多色多領域の二次元コードでは、上記のAとBを達成しているため、C. サブセルの識別ができれば多色多領域の二次元コードを実現できる。

通常二次元コードで用いられているセルサイズは一辺が0.6mm程度である。これは、25x25セルで15x15mmの二次元コードに相当する。識別性確認試験において、12x12mmのコードサイズでは明確に形成されているサブセルを確認しているため、通常用いられているセルサイズでは、多色多領域二次元コードは十分に識別可能と言える。

目標は互換性検証試験において読取れた最小セルサイズ0.24mm(コードサイズ6x6mm)において、サブセルサイズ0.08mmを識別することである。これが収容データ最大化の課題である。

6. 3 収容データの想定

新規領域に秘匿性を与える場合には、特定の復号キートを有する読取り者のみに情報提供するので、一つの二次元コードに複数のデータを収容し、読取り者によって異なるデータを提供する。

会員制度をとる団体が、会員にのみ特別な情報を提供する場合には、商品の値札などに印刷し、会員価格を収容する。物流業者に知られたくない小売業者向けのデータを収容する。また、幾つかの会員のレベルが設定されている場合には、新聞雑誌などに印刷した二次元コードに、専用のWEBアドレスを収容し、会員レベルに対応するWEBに誘導する、などが想定される。

7. 終りに

本論文では、二次元コードのセルの多ビット化の二つの手法(多色方式と多領域方式)を併用した多色多領域方式を検討した。多色方式と多領域方式の既存の二次元コードとの互換性維持手法を継承し、従来の二次元コード

で読取れる既存領域と既存領域の16倍の記憶容量のある新規領域のある多色多領域二次元コードを提案した。また、その新規領域に誤り訂正を導入し、秘匿化の可能性を示した。

そして、既存の二次元コードと同等のサイズまで既存領域が読取り可能であることを検証試験により検証した。

また、小さなサイズの二次元コードにおいてもサブセルが精度良く撮像できることを確認した。

印刷後の再撮影時の輝度縮退効果や経時劣化を勘案した色の選定、提案した二次元コードのサブセル識別ソフトウェアの作成による新規領域の読取りの具体的な検証は今後の課題としたい。

謝辞

第一著者の研究は、財団法人生涯学習開発財団より奨学資金を得て行われた。ここに記して、感謝の意を表します。

参考文献

- [1] ISO/IEC 18004:2006 Information technology -- Automatic identification and data capture techniques -- QR Code 2005 bar code symbology specification.
- [2] ISO/IEC 16022:2006 Information technology -- Automatic identification and data capture techniques -- Data Matrix bar code symbology specification.
- [3] H. Kato, K. Tan, D. Chai, Development Of A Novel Finder Pattern For Effective Color 2D Barcode Detection, Proceedings of IEEE International Symposium on Parallel and Distributed Processing with Applications. ISPA '08. (pp. 1006-1013). Sydney, Australia. IEEE Computer Society, 2008
- [4] 助川 修司, 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 第70回平成20年(4), 845-846, 2008
- [5] 寺田 遼平、藤本 敬介、中山 泰一、カラー二次元コードを高解像化するための認識アルゴリズムの実現と評価、信学技報、SS2008-57, 2009-3
- [6] 遠藤 祐介、廣友 雅徳、佐治 勇樹、渡辺 優平、森井 昌克、多値二次元コードにおける高階調認識アルゴリズムの提案、電子情報通信学会論文誌 D Vol. J95-D No.11 PP.1935-1943
- [7] 小野 智司、電子透かしを用いたカラー二次元コードの複製検知、電子情報通信学会論文誌. D, 情報・システム J94-D(12), 1971-1974, 2011
- [8] 新見道治、反復型可逆の情報ハイディングを利用した大容量二次元コード、2009年電子情報通信学会総合大会、S21-S22
- [9] 原 昌弘、二次元コードの生成方法およびその読取り装置、特開 2008-299422
- [10] Adams, G., Simske, S., Pollard, S. 2D Barcode Sub-Coding Density Limits. NIP27: 27th International Conference on Digital Printing Technologies and Digital Fabrication, October 2-6, 2011, Minneapolis, Minnesota, USA, 696-699.
- [11] 寺浦 信之、櫻井 幸一、グレイ及びカラー化による二次元コードの情報ハイディング、コンピュータセキュリティシンポジウム(CSS2012), 309-316, 2012
- [12] 寺浦 信之、櫻井 幸一、セルの微細分割による二次元コードの情報ハイディング、第11回情報科学技術フォーラム(FIT2012), 571-578, 2012
- [13] ISO/IEC 15415:2011 Information technology -- Automatic identification and data capture techniques -- Bar code symbol print quality test specification -- Two-dimensional symbols.
- [14] <http://www.itu.int/rec/R-REC-BT.601/e>.
- [15] 寺浦 信之、櫻井 幸一、互換領域を有する暗号付二次元コードへのセルレベルの誤り訂正の導入、2013年暗号と情報セキュリティシンポジウム(SCIS2013), 2013
- [16] 和田山 正, 誤り訂正技術の基礎, 森北出版, 2010.7.