

グレー及びカラー化による二次元コードの情報ハイディング

寺浦信之† 櫻井幸一‡

†テララコード研究所

477-0032 愛知県東海市加木屋町郷中53-26

TerraNob@terrara.jp

‡九州大学 システム情報科学府

819-0395 福岡県西区元岡744番地

Sakurai@itslab.csce.kyushu-u.ac.jp

あらまし 現在普及している二次元コードは、その構成要素であるセルを白と黒の二つの色を用いており、セルは白か黒かの1ビットを表現する。また、近年携帯電話で簡単に読取り可能である。しかし、用途によって秘匿性が必要とされる場合がある。そこで、従来機器で読取れる公開部と復号キイを知らなければ読取れない非公開部を実現する。セルをグレイまたはカラーを用いて多色で表現し、明度で白グループと黒グループに層別する。白と黒を該当グループで表現し、公開部を構成する。各グループについて、2色から8色を用いて1から3ビットのデータを符号化する。このとき、符号化を莫大な組合せのある符号化テーブルを用いて行ない、非公開部を構成する。

Information hiding of two-dimensional code by gray and color cells

Nobuyuki Teraura† Kouichi Sakurai‡

†Terrara Code Research Institute

53-26 Gochu Kagiya-cho Tokai-city, 477-0032, JAPAN

TerraNob@terrara.jp

‡Information Science and Electrical Engineering, Kyushu University

744 Motooka Nishi-ku Fukuoka, 819-0395, JAPAN

Sakurai@itslab.csce.kyushu-u.ac.jp

Abstract we propose a two-dimensional code having an area of two, the public section which can be read in conventional equipment and private section which reading has been limited. A cell is expressed with multiple color using gray or color. The color used for it is stratified in a white group and a black group on the basis of a lightness. White and black are expressed into an applicable group and a public part is constituted. About each group, a 1 to 3-bit data is coded using 2 to 8 colors. At this time, an encoding is performed using an encoding table with an immense combination, and a secret part is constituted.

†寺浦 信之：九州大学システム情報科学府 社会人博士後期課程

1. はじめに

この論文では、グレーまたはカラーのセルを用いて、非公開領域を有し、既存の二次元コードと上位互換性のある二次元コードを提案する。

1. 1 背景

現在用いられている二次元コード[1][3][8][9]は、誰でもが読取り装置を用いて読取ることが可能である。携帯電話に読取り機能が具備されて以来、読取り装置も普及し、文字通り誰でもが二次元コードの内容を知ることが可能となった。

1. 2 動機

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、特定の人にだけ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を開発するために、グレーまたはカラーの二次元コードを検討する。

また、上位互換性により、公開領域のデータを既存機器を使用するユーザーに提供可能となり、提案するコードの初期導入や普及が容易となる。

1. 3 既存の研究

カラー二次元コードの研究目的の一つは、収容データの大容量化にあり、多くの色の識別を目指す研究[4]がなされている。また、カラー化や積層構造によってセキュリティ性の向上を目指す研究[6][2]もなされている。

しかし、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[5]が見られる。

1. 4 課題

本研究では、グレーまたはカラー化を行うことにより秘匿性を確保するに当たって、既存の二次元コードとの上位互換性を確保することが課題である。ここでの上位互換性とは、次の二つを満たすことである。

- ①既存の二次元コードと同等の公開領域と新たな非公開領域を具備。
- ②既存の読取り装置で、公開領域が読取可能。

以下、上記の課題を達成する二次元コードについて、述べる。

2. 基本的な考え方

2. 1 上位互換性の実現

ここでは、上位互換性を実現するための考え方を説明する。

2. 1. 1 白と黒のグループ化

互換性を実現するための第一の方策は、用いる色をその輝度(反射率の代替え指標)によって、白グループと黒グループに分類し、セルが黒であれば黒グループの色とし、白であれば白グループの色とすることで公開領域のデータを二次元コード化する。このとき、白グループの最小輝度と黒グループの最大輝度の差(コントラスト)を読取り装置の識別できる範囲とする。

2. 1. 2 コントラストの設定

現状の二次元コードのコントラストについては、ISO/IECのマトリックス型二次元コードの品質グレード規定[10]に表1のように示されている。また、現在発売されている読取り装置の仕様例は表2のようになっている。そこで、最低コントラストとして、0.5を確保する。

なお、コントラスト(C)は、次式で表現される。

$$C = R_s - R_b \quad (1)$$

R_s : 白の最小反射率

R_b : 黒の最大反射率

表1 コントラストのグレード

コントラスト	グレード
0.7以上	4
0.55以上	3
0.4以上	2
0.2以上	1
0.2未満	0

表2 読取り性能

メーカー	最低コントラスト
A社	0.2
B社	0.25
C社	0.45

2. 1. 3 色の表現と輝度の変換

この論文では、色をRGBを用いて表現し、それぞれ0~255の値によって1600万色の中から最適な色を選択する。

また、上記の白と黒のグループについて、反射率の代替え指標として輝度を用いる。輝度とRGBの

変換式は、ITU-R BT.601[12]で規定されている次式を用いる。

$$Y = 0.299R + 0.587G + 0.114B \quad (2)$$

2. 2 セル色の特定方式

各セルの色を特定するには、次の二つの方式がある。

- ①識別方式
- ②認識方式

表3 識別方式と認識方式の比較

条件		識別方式	認識方式
特徴		候補の中から選定	対象を数値化して格付
比較色		候補色	基準色
色数	少ない	○	△
	多い	△	○

識別方式は、予め識別対象を設定し、当該識別対象と入力された値との距離を計算し、一番距離が小さく、二番目に距離が小さい候補と有意な差があり、妥当な距離の範囲内にある識別対象を、選択する方式である。具体的には、二次元コードのファインダーパターン等に、識別候補として候補色を組込んでおき、それと個々のセル色との距離を計算し、セルの色を特定する。

これに対して、認識方式は、入力された値そのものを認識結果とする色そのものの認識を行う方式である。具体的には、校正用の基準色を組込んでおき、これによって入力値の校正を行った結果を認識結果とし、セル色を特定する。

識別方式と認識方式の比較を表3に示す。ここで提案する方式の範囲では、色数が比較的すくないので、識別方式を用いることを前提として、議論を進める。

3. グレイ化

最初に、グレイ化によるセルの多層化について述べる。グレイ化は、次章で取り扱うカラー化の理論構成の特殊な場合であり、基本的な考え方の単純

化された説明となっている。

グレイ化では、4色を用いた場合と8色を用いた場合について取り上げる。

通常の二次元コードは白と黒の2色で印刷され、その基本単位であるセルは、白または黒の1ビットを表現している。それに対して、ここでは、白と黒に加えてグレイ色の2色及び6色を加えて、4色及び8色で表現する場合について、検討する。

3. 1 色の選択

セルを表現する色について、白と黒以外のグレイ色2色及び6色を選択する。選択の基準は、

- ①上位互換性
- ②4色及び8色の識別性

である。

上位互換性を維持するために、2. 1節で検討したように、白グループの最大輝度と黒グループの最小輝度の差、コントラストを0. 5以上とする。

識別性を確保するために、用いる4色及び8色について、その輝度の差を等しくなるようにする。

上記の基準で選定したグレイ色を表4に示す。

表4 色の選択事例
グレイ4色の場合

	輝度コード	RGB	輝度	色
白G	11	255	1	
	10	191	0.75	
黒G	01	64	0.25	
	00	0	0	

グレイ8色の場合

	輝度コード	RGB	輝度	色
白グループ	111	255	1	
	110	234	0.92	
	101	210	0.82	
	100	191	0.75	
黒グループ	011	64	0.25	
	010	45	0.18	
	001	21	0.08	
	000	0	0	

表4上表において、従来の白と黒はコード11と00で表され、輝度はそれぞれ1と0である。そして、中間のグレー色は、01と10であり輝度が0.75と0.25であるので、コントラスト0.5を満足している。また、この中間には未定義の色が1色存在している。

表4下表において、従来の白と黒はコード111と000で表され、輝度はそれぞれ1と0である。そして、白グループの輝度最小と黒グループの輝度最大となるグレー色は、100と011であり輝度が0.75と0.25であるので、コントラスト0.5を満足している。また、この中間には未定義の色が5色存在している。

3.2 符号化

次に、前節で定めた各色の符号化について述べる。白グループと黒グループのそれぞれについて、色は2色または4色であるので、そのいずれかを白に、他方を黒に割り当てる。この割当て表である符号化テーブルの例を表5に示す。

表5 符号化テーブル
グレー4色の場合 グレー8色の場合

	輝度 コード	符号 化		輝度 コード	符号 化
白 G	11	白	白 グ ル ー プ	111	白白
	10	黒		110	白黒
黒 G	01	黒		101	黒白
	00	白		100	黒黒
			黒 グ ル ー プ	011	白白
				010	白黒
				001	黒白
				000	黒黒

表5において符号化される白と黒は、内層の仮想的な二次元コードのセル色である。すなわち、グレー4色の場合には内層に1層、グレー8色の場合には内層に2層の二次元コードを仮想している。

3.3 符号化テーブルの数

3.3.1 4色の場合

表5の符号化テーブルは、白グループで11と10を白と黒に割り当てるか、黒と白に割り当てるかの

2通りが存在する。符号化テーブルの組合せの数は、二つの符号化色の順列であるので、組 $2P_2$ である。従って、黒グループと合わせて、全体の組合せの数は、以下となる。

$$2P_2 \times 2P_2 = 4 \quad (3)$$

符号化テーブルが明らかになると、攻撃者によって容易に復号されることになる。しかし、通常符号化テーブルは秘匿されているので、攻撃者はラウンドロビン攻撃を行うこととなる。そこで、全てのセルについて、上記の同じ符号化テーブルを用いて符号化すると、符号化テーブルの場合の数は4であり、容易に復号される。そこで、セルによって異なった符号化テーブルを適用することとすると、場合の数を増大させることが可能となる。

16セルについて異なる場合には 4.3×10^9 であるので、16以上のセルについて異なった符号化テーブルを適用するのが適当である。

3.3.2 8色の場合

表5の符号化テーブルでは、白と黒のグループで白白、白黒、黒白、黒黒の4通りが存在する。符号化テーブルの組合せの数は、四つの符号化色の順列であるので、 $4P_4$ である。従って、白と黒のグループと合わせて、全体の組合せの数は、

$$4P_4 \times 4P_4 = 576 \quad (4)$$

であり、576通りとなる。

この程度の場合の数では、ラウンドロビン攻撃に対して脆弱である。そこで、前節と同様にセルによって異なった符号化テーブルを適用する。

4セルについて異なる場合には、 1.1×10^{11} であるので、4以上のセルについて異なった符号化テーブルを適用するのが適当である。

ただし、後述する誤り訂正機能によって、ある程度誤った符号化テーブルのセットを選択しても、正しい結果に導かれる。そこで、その実質的な符号化テーブルの数は減少するので、誤り訂正率に対応して、異なる符号化テーブルを用いるセル数を選択する必要がある。

3.4 復号キイ化

16または4のセルで異なった符号化テーブルを用いる場合について、それを復号するリーダーに与える復号キイを検討する。

4色の場合には、一つのセルについて、白及び黒グループで各2ビット4ビットであるので、16セルについては合計で64ビットで表現することが可能である。

8色の場合には、一つのセルについて、白及び黒グループで各2ビットが4セットの合計16ビットであるので、4セルについては合計で64ビットで表現することが可能である。

4. カラー化

前章では、グレーの4色または8色を用いて、既存の二次元コードと互換性を有する公開層1層と秘匿される非公開層1層または2層を実現する場合について述べた。ここでは、カラーの16色を用いて、非公開層を3層とする場合について述べる。

4.1 色の選択

セルを表現する16色について、白と黒以外のカラー色14色を選択する。選択の基準は、グレー色の場合同様に、

- ①上位互換性
 - ②16色の識別性
- である。

前節と同様に、上位互換性を維持するために白グループの最大輝度と黒グループの最小輝度の差、コントラストを0.5以上とする。




白及び黒グループのそれぞれの8色を選定する方法について述べる。RGBのそれぞれの値については、各色を四つのレベルを設定し、それぞれ表6に示す値とした。この値は、表4に示したグレー4色の場合と同じあり、最大強度である255を4で除し、未定義レベルを含めて等間隔に設定されている。この方法では、 2^6 すなわち64色が対象となる。これらについて、2.1.3節で示した式(2)を用いて、輝度を計算し、基準を満たす色を選定した。選定に当たっては、色の識別を容易にするために、色コードについて、他の色との色コードの差の合計が、2以上となるように選定したが、一部の色については差が1となっている。









上記の基準で選定したカラー色を表6、表7に示す。

表6 各色のRGB値

RGBコード	RGB値
00	0
01	64
10	191
11	255

表7 カラー16色の選択事例

	色コード			輝度	色
	R	G	B		
白グループ	11	11	11	1	
	10	11	11	0.92	
	11	11	01	0.91	
	11	10	11	0.85	
	10	11	01	0.84	
	10	10	11	0.78	
	01	11	11	0.78	
	01	11	10	0.75	

	色コード			輝度	色
	R	G	B		
黒グループ	00	00	00	0	
	01	00	00	0.08	
	00	00	10	0.09	
	00	01	00	0.15	
	01	00	10	0.16	
	01	01	00	0.22	
	10	00	00	0.22	
	10	00	01	0.25	

4.2 符号化

次に、各色の符号化について述べる。白グループと黒グループのそれぞれについて、色数は8色であるので、一つのセルは3ビットを表現できる。そこで、各セルの色は、三つの白黒の仮想二次元コードの色を表現できるので、白白白、白白黒、白黒白、などのいずれかを割り当てる。この割当て表である符号化テーブルの例を表8に示す。

表8 符号化テーブルの例

	色コード			符号化		
	R	G	B	1層	2層	3層
白グループ	11	11	11	白	白	白
	10	11	11	白	白	黒
	11	11	01	白	黒	白
	11	10	11	白	黒	黒
	10	11	01	黒	白	白
	10	10	11	黒	白	黒
	01	11	11	黒	黒	白
	01	11	10	黒	黒	黒

	色コード			符号化		
	R	G	B	1層	2層	3層
黒グループ	00	00	00	白	白	白
	01	00	00	白	白	黒
	00	00	10	白	黒	白
	00	01	00	白	黒	黒
	01	00	10	黒	白	白
	01	01	00	黒	白	黒
	10	00	00	黒	黒	白
	10	00	01	黒	黒	黒

4.3 符号化テーブルの数

表8の符号化テーブルでは、白と黒のグループで白白白、白白黒、白黒白、などの8通りが存在する。符号化テーブルの組合せ数は、8個の符号化色の順列であるので、 $8P8$ である。従って、白と黒のグループと合わせて、次となる。

$$8P8 \times 8P8 \doteq 1.6 \times 10^9$$

この程度の場合の数で、ラウンドロビン攻撃に対して十分対抗可能である。

そこで、全てのセルについて同一の符号化テーブルを適用するのが適当である。

4.4 復号キイ

4.4.1 復号キイ化

一つのセルについて、白及び黒グループで各3ビットが8セットの合計48ビットであるので、48ビットで表現することが可能である。

4.4.2 非公開領域の公開

ここで、標準的な符号化テーブルを設定して公開

し、それに基づいて符号化を行うことにより、すべての層を公開領域とすることが可能となる。また、一部の層について、標準的な符号化テーブルと同じ符号となる符号化テーブルを用いる事により、当該層のみを公開領域とすることができる。

例えば、前節の復号キイにおいて、公開領域とする層についてのみビットを設定し、非公開領域とする層については、例えば全て0を記入して、当該復号キイを通知することにより、特定の層のみを情報提供することができる。

5. 符号化と復号の処理

ここでは、カラー16色を用いた公開領域(第0層)と非公開領域(第1, 2, 3層)を有する二次元コードの符号化と復号の処理について説明する。

5.1 符号化処理

符号化の処理ステップを表9に示す。

表9 符号化の処理ステップ

ステップ	処理内容
ステップ1	データの準備
ステップ2	各層の白黒二次元コード化
ステップ3	符号化テーブルの選択
ステップ4	可変領域のセル色決定
ステップ5	固定領域のセル色決定

ステップ1: データの準備

公開領域に收容するデータ d_0 及び非公開領域に收容するデータを各層に分配して得た各層に收容するデータ d_1, d_2, d_3 からなる收容データ $D = (d_0, d_1, d_2, d_3)$ を準備する。

ステップ2: 各層の白黒二次元コード化

各層毎に收容すべきデータを白黒の二次元コード化し、二次元コードの白黒データ $U = (u_0, u_1, u_2, u_3)$ を得る。

ステップ3: 符号化テーブルの選択

符号化に用いる白グループ及び黒グループの符号化テーブルを選択する。選択した符号化テーブルから復号キイを作成する。

ステップ4: 可変領域のセル色の決定

公開領域の各セルの白黒データ u_0 に基づき、ステップ3で選択した白グループまたは黒グループの符号化テーブルを用いて、非公開領域の各セルの白黒データ u_1, u_2, u_3 を符号化し、可変領域(データ領域、管理領域)のセルの色を決定する。

ステップ5: 固定領域のセル色の決定

識別対象のセル色(候補色)を割り当てられたセルに設定する。それ以外のファインダーパターンなどの固定領域は黒または白に設定する。

5. 2 復号処理

復号の処理ステップを表10に示す。

表10 復号の処理ステップ

ステップ	処理内容
ステップ1	画像入力、画像抽出
ステップ2	基準色の抽出
ステップ3	可変領域のセル色識別
ステップ4	各層の白黒二次元コードに復号
ステップ5	白黒二次元コードの復号
ステップ6	データの抽出

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: 基準色の抽出

二次元コードの画像から、候補色が格納されているセルを特定し、候補色のデータを取得する。

ステップ3: 可変領域のセル色の識別

二次元コードの可変領域のセルについて、候補色との距離を計算し、1位と2位の差が有意であり、距離が定められた範囲にある場合には、1位の色を当該セルの色として選択する。

ステップ4: 各層の白黒二次元コードに復号

各セルについて、復号キーで指定された符号化テーブルによって、各層の各セルの白または黒の色を復号し、二次元コードの白黒データ $U=(u_0, u_1, u_2, u_3)$ を得る。

ステップ5: 白黒二次元コードの復号

ステップ4で得られた二次元コードの白黒データ $U=(u_0, u_1, u_2, u_3)$ から各層の二次元コードを復号し、各層に収納されたデータ $D=(d_0, d_1, d_2, d_3)$ を得る。

ステップ6: データの抽出

公開領域及び非公開領域について、収納したデータを抽出する。

6. 互換性の検証

グレー4色及びカラー12色を用いた場合について、既存の読取り装置を用いて公開領域の読取りの検証を行った結果について述べる。

6. 1 試験条件

6. 1. 1 表示、印刷媒体

表示は、1024x768 ピクセルの液晶パネル、印刷は市販の白のマット紙とコピー用普通紙を用いた。

6. 1. 2 二次元コード

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

バージョン : バージョン 1 (21x21 セル)

誤り訂正 : レベルH (30%)

ファインダーパターン(FP)とタイミングパターンの固定部分を白と黒に固定した場合と固定部分も着色した場合を作成し、比較した。互換性検証のためには、各色が一様に出現したほうが望ましいので、内層部分への符号化は行わず、乱数によって各セルの色の選択を行った。

コントラストが50%の場合の例を図1に示す。

グレー4色 カラー16色 グレー4色 カラー16色
FP白黒 FP白黒 FP各色 FP各色



図1 検証に用いた二次元コードの例

6. 1. 3 読取り機器

読取りには、下記のスマートフォンと専用ハンディターミナルを用いた。

・スマートフォン: Xperia acro(SONY 製)

読取りソフト: QRコードスキャナ

・専用ハンディ:BHT-604(DENSO 製)

6. 2 検証結果

前節で示した条件において、実施した実験結果を表11に示す。この結果について、検討する。

グレイ4色については、良好な結果が得られた。

カラー12色については、普通紙でコントラスト50%時に、読取りが行えなかった。また、専用ハンディでは、マット紙でも読取れなかった。

グレイ4色及び画面表示での読取りが良好であることから、カラー各色の普通紙などでの輝度と印刷時の反射率への変換や読替えが適切でない可能性が高い。この結果として、白グループの最低輝度周辺の色と黒グループの最大輝度周辺の色が限界を超えており、実効的なコントラストが得られていないと思われる。

表11 コントラストによる各場合の読取り結果

グレイ4色 (Xperia)									
読取り結果	良好	□■ ★★ ○●	□■ ★★ ○●	□■ ★★ ○●	□■ ★★ ○●	□■ ★★ ○●	■ ○●		
	場合						★★		
	不可						□	□■ ★★ ○●	□■ ★★ ○●
		50	40	30	25	20	15	10	5
コントラスト									

グレイ4色 (BHT-604)									
読取り結果	良好	□■ ★★ ○●	□■ ★★ ○●	★★ ○●	★★ ○●	○			
	場合					*			
	不可			□■ ○●	□■ ○●	□■ ○●	□■ ○●	□■ ○●	□■ ○●
		50	40	30	25	20	15	10	5
コントラスト									

カラー12色 (Xperia)									
読取り結果	良好	□■ ★★ ○●	□■ ★★	□■ ★★	■	■	■	■	
	場合		●						■
	不可		○	○●	□ ★★ ○●	□ ★★ ○●	□ ★★ ○●	□ ★★ ○●	□ ★★ ○●
		60	50	40	30	25	20	15	10
コントラスト									

カラー12色 (BHT-604)									
読取り結果	良好	□■ ★★ ○●	■	■					
	場合								
	不可	□	□ ★★ ○●	○●	□■ ★★ ○●	□■ ★★ ○●	□■ ★★ ○●	□■ ★★ ○●	□■ ★★ ○●
		60	50	40	30	25	20	15	10
コントラスト									

□:画面、★:マット紙、○:普通紙(FPなどにも配色)

■:画面、★:マット紙、●:普通紙(FPなどを白黒固定)

良好:1度で読取り、場合:何度かのトライで読取り。

マット紙での高精細印刷やFPなどの白黒固定は効果が認められた。

7. 終りに

本論文では、グレイまたはカラー色を用いた二次元コードについて、従来の白黒の二次元コードと上位互換性を維持しながら秘匿性を確保する提案を行ない、互換性の検証を行った。

今後、輝度と印刷時の反射率の検討、印刷時に適合する色の選定、選定した色の識別について、具体的に検証していく予定である。

参考文献

- [1] 寺浦 信之、二次元コード、食品包装 2009年1月号 p18-p23、2009年2月号 p42-p46、2009年3月号 p56-p61
- [2] 寺浦 信之、多層式光学的情報媒体による二次元コードの情報ハイディング、CSS2011, pp. 211-216
- [3] 長屋 隆之、高速読取り二次元コード [QRコード] の開発、情報処理学会全国大会講演論文集 第52回平成8年前期(2), 253-254, 1996
- [4] 助川 修司、QRコードの多色化による二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] 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
- [6] 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
- [7] <http://www.itu.int/rec/R-REC-BT.601/e>
- [8] ISO/IEC 18004:2006 Information technology – Automatic identification and data capture techniques – QR Code 2005 bar code symbology specification.
- [9] ISO/IEC 16022:2006 Information technology – Automatic identification and data capture techniques – Data Matrix bar code symbology specification.
- [10] ISO/IEC 15415:2011 Information technology – Automatic identification and data capture techniques – Bar code symbol print quality test specification – Two-dimensional symbols.