

光による QR コード方式 QR-code technique using Illuminated Light

石川 安則[†] 上平 員丈^{‡†} 谷中 一寿^{‡†}

Yasunori ISHIKAWA[†] Kazutake UEHIRA^{‡†} and Kazuhisa YANAKA^{‡†}

[†] 神奈川工科大学ヒューマンメディア研究センター

[†] Human Media Research Center, Kanagawa Institute of Technology

[‡] 神奈川工科大学情報学部

[‡] Faculty of Information Technology, Kanagawa Institute of Technology

E-mail: [†] yasu@yit-pe.com

1. はじめに

印刷物などに機械読み取り可能な符号情報を埋め込む手段としてバーコードが広く用いられている。2次元バーコードの一種である QR コードは、特許権が無償公開されており、また国際標準が制定され利用しやすい環境が整い、携帯電話のアプリケーションとして常備されるなど、広範な用途に利用されている[7]。しかしながら、一般にバーコードは、機械読み取りの容易性が重視されるため人の目には無意味な画像パターンにより形成される。このため画像を使って符号情報を埋め込む方法として、デザイン性などを考慮すると必ずしも最適な方法とは言えない。

こうした観点から、我々は、光を用いて符号情報を含ませた画像を実物体画像に埋め込み、人の目には不可視であるがデジタルカメラ等で撮影した画像データから符号情報が読み出せる「光透かし方式」を提案した。符号情報を含ませる方法として、離散コサイン変換 (DCT) やウォルシュ・アダマール変換 (WHT) などの直交変換を用いて単位ブロック毎に1ビットの符号を埋め込む方法を用い、秘匿性と検出精度の関係や実利用環境に即した評価を行ってきた[1]-[4]。

本報告では、光透かし方式の特徴である、i) 任意の実物体画像に何ら物理的損傷を加えずに撮影した画像データに透かし情報を埋め込める、ii) 実時間で透かし情報を書き換え可能である、iii) 立体物にも適用可能である、といった性質を維持しつつ、QR コードを直接符号情報の埋め込み手段として用いる、いわば「光 QR コード」方式について検討を行った結果について述べる。

2. 空間変調光を用いた QR コードの埋め込み

空間的に変調された照明光に透かし情報を含ませる方法として、上述のように DCT や WHT などの直交変換を用いると、高い空間周波数成分に符号情報を埋

め込むことが可能であり、一般に低い空間周波数成分が支配的と考えられる実物体画像データとの分離が比較的容易である。また高空間周波数成分を用いることにより高い秘匿性 (不可視性) が得られる。一方 QR コードの画像データは、不規則信号であるため、同様な方法で実物体の被写体画像に QR コード画像を重畳させた画像データから一般的なフィルタなどを用いて分離することは、容易ではないと考えられる。

これに対して、文献[2]では、ハール・ウェーブレット変換 (ハール DWT) を用いて、QR コード画像を高空間周波数成分に変換する方式を提案している。ハール DWT は、直交変換の一種であり本質的には DCT や WHT を用いる方法と違いは無いが、QR コードが持つ誤り訂正能力を利用することで、埋め込んだ符号情報の検出精度を向上させることができる。しかしながら、QR コードの持つ位置検出の柔軟性など復号の頑強性が失われる結果となる。

QR コードの特徴は、携帯電話のカメラなど比較的簡易な画像入力手段を用いて埋め込んだ符号情報の復号が可能な頑強性をもつことである。また、直交変換を用いる方式と比較して、被写体に照射される画像の単位面積あたりに埋め込み可能な符号情報の量が大きく取れるという特徴がある。しかし人の視覚に認識が可能であっても良いことを前提条件としており、不可視性を維持しつつ空間変調された照明光により QR コード画像を照射した場合の撮影画像データからの検出 (復号) 可能性については、照明や撮影条件の変動が大きいと考えられる。ここでは、次の3点について評価を行う。

- (1) QR コード画像の埋め込み強度と不可視性および検出精度の評価
- (2) 時系列の QR コードを用いた動画データへの埋め込みと検出精度評価
- (3) 立体物への応用と検出可能性評価

3. 実験と結果

上述のように，QR コード画像の持つ空間周波数特性は，本質的に不規則信号であるため低い空間周波数成分にも分布が広がる可能性が考えられる．このため実験では，比較的平坦な画像を被写体として用い，照明光により照射した QR コード画像を撮影し，得られた画像データを 2 値化して QR コード復元したのち，これを読み取って復号する方法により実験を行うことにした．

3.1 静止画像における検出精度の評価

まず基本的な評価実験として，プロジェクタを用いて QR コード画像を照射した被写体を，デジタルカメラで撮影した静止画像による評価を行った．実験では，白セルおよび余白部分を 8 ビットのグレースケール値において定常値とし（これを DC 値と呼ぶ），黒セルの値は，DC 値からの変動幅（これを AC 値と呼ぶ）だけ少ない値として，AC 値の振幅により QR コードの埋め込み強度を変化させて評価を行った．プロジェクタは， 1024×768 画素の解像度を持つ液晶プロジェクタを用い， 4288×2848 画素の解像度を持つデジタルカメラで 70mm のズームレンズを用いて撮影を行った．プロジェクタから被写体面までの距離は約 800mm，ズームレンズ面から被写体面までの距離は約 700mm，被写体面の法線からズームレンズ面方向の角度は約 20° とした．被写体は，通常のプリンタ用の白無地普通紙を用いた．実験に用いた QR コードは， 29×29 セル（バージョン 3）のサイズを用いて 24 文字の英数字を埋め込んで作成した．誤り訂正能力は，最大の 30% とした．また，QR コードの 1 セルに対して液晶プロジェクタの 1 画素を対応させる 1 倍モードと，2 画素を対応させる 2 倍モードの 2 つのモードで実験を行った．DC 値は 100 に固定し，AC 値を実験パラメータとして，5，7，10，15，20，25 の値で実験を行った．

図 1 は， 3×3 個の QR コード（1 倍モード）を並べて被写体に照射し，デジタルカメラで撮影した画像の全体を示す．照射領域の画素数は，約 580×600 画素であった．撮影された画像データから，右列中央行に位置する QR コードを切りだし，グレースケール変換を行った画像を図 2 に示す．この画像に 2 値化処理を行うことにより QR コードの復元処理を行ったが，使用した液晶プロジェクタの画素境界が明瞭に残り，一般的な 2 値化処理では復元が困難であった（図 3）．このため，QR コード画像領域の 4 つの角点を計測し，全体のセル数（バージョン 3 では 29×29 ）で均等分割した小四辺形の略中心画素の画素値に対して，特定の白セルの画素値と比較することにより 2 値化を行った．この方法により復元した QR コード画像を図 4 に示す．

復元した QR コードに対して，読み取りソフト[8]を

用いて復号した結果を表 1 に示す．照射された QR コードの不可視性については，2m 程度離れて観察した結果，AC=5 ないし 10 程度でも QR コードのパターンがわずかに認識でき，AC=15 以上では，かなり明瞭に認識できた．

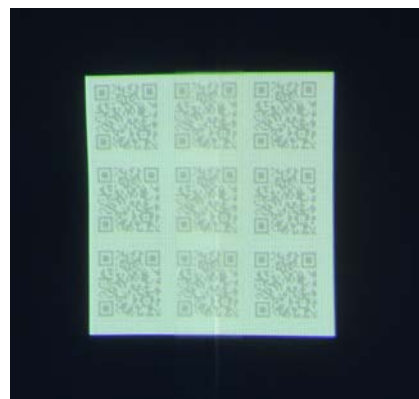


図 1 QR コードの照射画像
(29×29 セル・1 倍モード，DC=100，AC=25)

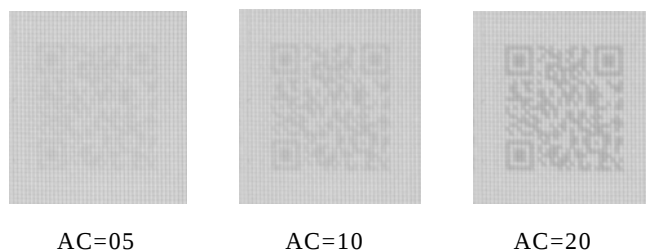


図 2 切り出した QR コードの照射画像
(グレースケール変換後， 29×29 セル・1 倍モード)

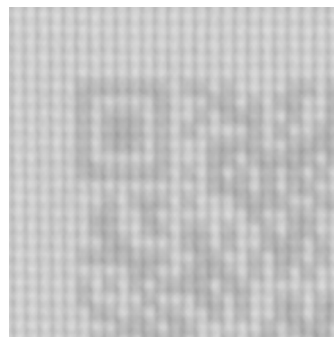


図 3 切り出した QR コードの照射画像（拡大）
(グレースケール変換後， 29×29 セル・1 倍モード，AC=20)



図4 復元した QR コード
(29×29 セル・1 倍モード)

表1 静止画像における復号結果

Error : 復号できず, 数値 (%) : 復号できた場合の誤り率

AC	5	7	10	15	20	25
1 倍	Error	Error	15.7%	7.1%	0%	0%
2 倍	Error	15.7%	7.1%	0%	1.4%	2.9%

3.2 時系列画像における検出精度評価

被写体に照射する QR コードを時系列的に変化させ、デジタルビデオカメラで撮影した動画データから順次時系列の QR コードを復元する実験を行った。QR コードは、前項と同じく 29×29 セル（バージョン 3）のサイズとし、5 種類の異なる 24 文字の英数字を埋め込み（誤り訂正能力 30%）作成した QR コードを順番に繰り返す時系列 QR コードを作成し、プロジェクタから表示するようにした。表示フレームレートは、10 フレーム／秒（fps）としたため、撮影に用いたミラーレス一眼デジタルカメラ（前項の静止画像に用いたカメラと機種が異なる）のビデオ撮影モードのフレームレートが 30fps であるので、撮影した動画データでは、同じ QR コードが 3 フレーム連続して取り込まれることになる。ただし、プロジェクタの表示とビデオ撮影は同期していないので、動画データの連続する 3 フレームのうち 1 フレームは表示の切り替わり境界をまたぐ可能性がある。実験では、1024×768 画素の解像度を持つ液晶プロジェクタを用い、デジタルカメラのビデオ撮影モードは、1280×780 画素の解像度を持つモーション JPEG・AVI ファイルフォーマットとし、42mm のズームレンズを用いた。プロジェクタから被写体面までの距離は約 800mm、ズームレンズ面から被写体面までの距離は約 200mm、被写体面の法線からズームレンズ面方向の角度は約 30° であった。なお、QR コードの倍率は、1 倍モードのみとした。

表2 時系列画像における復号結果

- ・フレーム No. : 連続する 15 フレームの順序
- ・Error : 復号できず, 数値 (%) : 復号できた場合の誤り率

フレーム No.	復号	QRコード ボタン
1	17.1	ボタン1
2	18.6	
3	10.0	
4	14.3	ボタン2
5	11.4	
6	7.1	
7	12.9	ボタン3
8	10.0	
9	18.6	
10	Error	ボタン4
11	14.3	
12	Error	
13	14.3	ボタン5
14	12.9	
15	5.7	

上記の AVI ファイルから 30fps 毎の静止画フレームを分離し、個々のフレームから 1 つの QR コードを切りだし、前項で述べた静止画像の処理と同様に、グレースケール変換と 2 値化処理を行い、QR コード画像を復元した。復元された QR コードのうち、特定の連続する 15 フレームについて読み取りソフトを利用して復号を行った。埋め込み強度のパラメタとして AC=5, 10, 15 を用いて実験を行ったが、AC=5, 10 ではすべてのフレームが読み取りエラーとなり復号できなかった。AC=15 では、表 2 に示すように一部を除いて誤り訂正を行って正しく復号できた。

3.3 立体物への応用評価

光透かし方式の立体物への応用については、文献[4]に報告されているが、直交変換を用いる場合、透かし画像の単位ブロック毎の矩形領域を正確に切り出す必要がある。このため、立体物上に照射して変形した透かし画像の領域を特定するため、あらかじめ座標軸を描画した画像（グリッド画像）を照射し、撮影したグリッド画像から変形した矩形領域の座標値を計測し、この座標値から変形補正した矩形領域を求める方法をとった。これに対して QR コードは、こうした幾何学的変形（歪み）に対して本質的に強い耐性を持つことが特徴であるが、この性質は、読み取り時の画像処理性能に依存する。

実験では、立体物上で変形した QR コードの読み取

り可能性評価のため、比較的強いコントラストで QR コード画像を照射して復号可能性を評価した。実験における QR コードのバージョンやプロジェクタによる照射条件、デジタルカメラの撮影条件などは、前記 3.1 節の条件を用いた。ただし、QR コードの倍率は 2 倍である。図 5 は、DC=255, AC=128 において撮影された画像である。この画像から変形（幾何学的歪み）が比較的少ない中心付近の QR コードを切りだしてグレースケール変換した画像を図 6 に示す。しかしながら使用した読み取りソフトでは、これらの QR コードを復号することはできなかった。

4. 考察

静止画像における実験については、DC=100 の場合、1 倍モードで AC=10 以上の埋め込み強度であれば、誤り訂正能力（誤り訂正率 30%）を用いれば復号可能であった。2 倍モードであれば、AC=7 の埋め込み強度でも復号可能であった。いずれの場合も、平坦な被写体面への照射であり、目視で完全に不可視ではないが、市中のポスターや広告など制約が比較的緩い条件で余白に情報を埋め込むなどの目的には十分な利用価値があると考えられる。ただし、QR コード画像を照射する照明装置の能力と、これに対応した 2 値化のアルゴリズムが検出精度に制約を与える可能性がある。

時系列画像の実験では、静止画の場合と同等な条件で、10fps のフレームレートにおいて 1 倍モードで AC=15 では、30%の誤り訂正能力内で検出可能であるとの評価結果であった。不可視性については、静止画と同様な条件であると考えられるが、QR コードのパターンを時系列的に変化させると、位置検出パターン部と余白部を除けばランダムにパターンが変化し、埋め込み強度が低ければ妨害が少なくなる可能性がある。

立体物への適用については、QR コードの位置検出能力の頑強性を担保する読み取り時の画像処理能力に依存すると考えられる。特に、非線形な幾何学的変形に対して、位置検出のための機能パターン（位置検出パターン・タイミングパターン・位置合わせパターン）を適切に認識できる知識処理が要求されると考えられる。

5. おわりに

空間的に変調された照明光を用いて、QR コード画像を被写体に照射して検出する方式の検討を行い、実証実験とその結果を報告した。従来の直交変換を用いる光透かし方式と比較して、人の視覚への妨害性にやや劣ると考えられるが、適切な画像処理（変形補正と 2 値化）により十分な検出精度が得られることが分かった。QR コードは、すでに広く利用されており、光



図 5 立体物への QR コードの照射（全体）
(29×29 セル・2 倍モード, DC=255, AC=128)

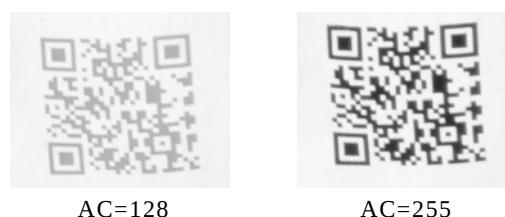


図 6 立体物への QR コードの照射（切り出し後）
※いずれも復号できず
(29×29 セル・2 倍モード, DC=255)

を用いることの特徴的性質との融合による、さらなる応用の拡大が期待される。

文 献

- [1] 石川安則, 上平員丈, 谷中一寿, “光透かしを用いた符号情報埋め込み技術”, 画電誌, vol.40, no.4, pp.707-712, Jul. 2011.
- [2] Y. Ishikawa, K. Uehira and K. Yanaka, "Embedding Watermarking into Real Object Image Data Using QR-code and Optical Watermarking Technique", Proc. ICIP2011, pp.34-38, Aug. 2011.
- [3] Y. Ishikawa, K. Uehira and K. Yanaka, "A Technique of Time Domain Sequential Data Embedding into Real Object Image Using Spatially Modulated Illumination ", Proc. ISSPIT2011, pp.62-66, Dec. 2011.
- [4] Y. Ishikawa, K. Uehira and K. Yanaka, "Protection of 3D Objects against Illegal Photography Using Optical Watermarking Technique with Spatially Modulated Illumination", Proc. IMAGAPP2011, pp.49-52, Mar. 2011.
- [5] 棟安実治, “情報伝達のための電子透かし”, 信学基礎・境界ソサイエティ, Fundamentals Review, Vol.2, No.2, pp.53-62, Oct. 2008.
- [6] 小野東, 江川雄毅, “印刷耐性のある電子透かし方式の検討”, 情処学論, vol.45, no.3, pp.880-890, Mar. 2004.
- [7] <http://www.denso-wave.com/qrcode/> ('12-5-10 参照)
- [8] <http://tokasoft.matrix.jp/soft/> ('12-5-10 参照)