

ホログラム QR コードの拡張 Extension of the Hologram QR Code

森 創太[†] 王森レイ[†] 甲斐 博[†] 高橋 寛[†] 森井 昌克[‡]
Sota Mori Senling Wang Hiroshi Kai Hiroshi Takahashi Masakatu Morii

1. はじめに

QR コード[1][2] は、1994 年に株式会社デンソーウェーブによって開発された二次元バーコードである。大容量の情報を、高速に読み取ることができるため、広告や商品管理、電子決済で広く利用されている。

現在、一般に利用されている QR コードでは 1 つにつき 1 つの情報しか読み取ることができないが、QR コードの用途を拡大するために、2 つ以上の情報を読み取ることができる新しい QR コードの生成法が提案されている。

古本らの手法[3] では、白と黒に加えてグレースケールのモジュールで多値化した QR コードを提案している。これは専用のデコーダでグレースケールを読み取ることができ、別の情報を出力できる。また、Tkachenko らの手法[4] では、QR コードの黒モジュールに特殊な模様を追加することで、元の QR コードに格納された情報とは別の情報を読み取ることができる。しかしながら、この QR コードでは特殊な模様を読み取るために、特殊なデコーダを用いる必要がある。Yuan らの手法[5] では、QR コードを物理的に 2 層化することで、1 つの QR コードに対して 2 つの情報を格納している。格納した 2 つの情報を読み取るために専用のデコーダを必要としないが、透明なモジュールや物理空間を必要とするため、印刷物など紙面上で構成することはできない。

QR コードのセキュリティに関する例としては、偽装 QR コードがある[6][7]。偽装 QR コードでは誤り訂正符号による誤訂正を生じさせることで異なる情報を読み取ることができる。更に、偽装 QR コードを応用したホログラム QR コード[8] が提案されている。この手法では、QR コードの読み取りに用いられている射影変換の性質が利用されており、2 つの情報を読み取ることができる。この QR コードは専用のデコーダを必要とせず、通常の QR コードと同様に表現されるため、紙に印刷して利用することができる。しかしながら、この手法では誤訂正を用いるため、格納する 2 つの情報の符号語間の距離を近づける必要があり、格納する情報に制限がある。そのため、本稿では QR コードの読み取りにおける二値化処理を利用することによって符号語間の距離に制約のない情報を格納可能なホログラム QR コードの生成手法を提案する。

本論文の構成は以下のとおりである。2 節では本研究で用いた誤り訂正符号と QR コードの性質や読み取り手順を解説する。3 節では偽装 QR コードやホログラム QR コードの生成方法について説明する。4 節では符号間距離を考慮することなく情報を格納可能なホログラム QR コードの

[†] 愛媛大学大学院理工学研究科

Graduate School of Science and Engineering Ehime University

[‡] 神戸大学大学院工学研究科

Graduate School of Engineering, Kobe University

生成方法について提案する。最後に 5 節で、本研究の結論を述べる。

2. 誤り訂正符号と QR コード

本節では、QR コードに用いられる誤り訂正符号と QR コードの構造および読み取り手順について述べる。

2.1 リードソロモン符号

リードソロモン(RS) 符号は符号理論における誤り訂正符号の一種で、QR コードや CD・DVD、衛星通信で利用されている。RS 符号では、シンボル単位で誤り訂正を行うため、連続して誤りが起こるバースト誤りに強いという特徴を持つ。QR コードでは、一部の汚れや損傷が連続して起こるため、RS 符号との相性が良い。

符号長 n 、長さの k の情報コード語である (n, k) RS 符号において、符号間の最短距離 d は

$$d = n - k + 1 \quad (1)$$

で表される。また、訂正可能な誤り訂正能力 t は

$$t = \left\lfloor \frac{d-1}{2} \right\rfloor = \left\lfloor \frac{n-k}{2} \right\rfloor \quad (2)$$

で表される。すなわち、 t 個のシンボルの誤りを訂正することが可能である。 t 個のシンボルを超える数の誤りが発生した場合は、誤訂正もしくは誤り検出となる。誤訂正は、元の符号語と別の符号語の距離が t 以下となる誤りが発生したときに生じ、誤り検出は元の符号語や別の符号語との距離が t より大きくなる誤りが発生したときに生じる。RS 符号の性質上、 t 個のシンボルを超える数の誤りが発生するとき、ほとんどの場合で誤り検出が生じる。

また、RS 符号は線形符号であるため、任意の符号語 C_1, C_2 の線形結合 $C_1 + C_2$ も符号語となる。

さらに、誤りの種類として、消失誤りがある。これは復号前に誤り位置が既知である誤りである。単なる誤りよりも訂正のための情報が多いため、多くの誤りを復号することができる。ガウスの消去法やユークリッド復号法などを用いて復号可能である。

2.2 QR コード

QR コードは、白と黒のモジュールによる幾何学的な模様で構成されている。白のモジュールは 0、黒のモジュールは 1 のビット値を表す。QR コードのサイズはバージョンによって決定され、そのバージョンは 1~40 である。QR コードに破損や汚れに耐性を持たせるため、誤り訂正符号が用いられている。QR コードの誤り訂正は小さいほうから L, M, Q, H の 4 つのレベルに分けられ、最大で約 30% が破損していても情報を正確に読み取ることができる。

2.2.1 QR コードの構造

QR コードの構造を図 1 に示す。

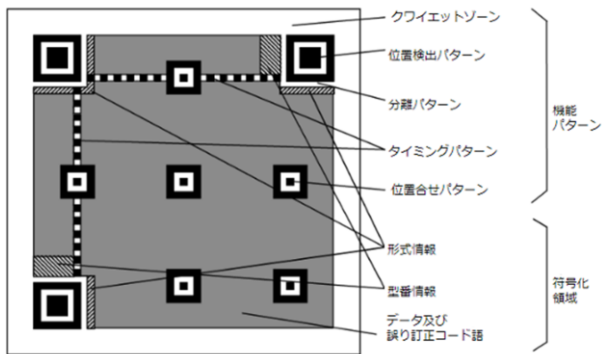


図 1 QR コードの構造 [1]

QR コードは主に機能パターンと符号化領域から構成されている。機能パターンは主に 3 つの構成要素から成り立ち、それぞれ位置検出パターン、タイミングパターン、位置合わせパターンと呼ばれる。

位置検出パターンは、QR コードの左上、右上及び左下に配置される 3 つの同一正方形が重なった形状のブロックである。各位置検出パターンのモジュール側の比率が 1:1:3:1:1 を満たすことから、位置及び回転方向を認識できる。

タイミングパターンは、図 1 のとおり、それぞれの位置検出パターンの間に配置される。黒と白が交互になったモジュールの行と列で構成されており、黒のモジュールで始まり、白のモジュールで終了する。タイミングパターンにより、モジュールの座標を検出できる。

位置合わせパターンは、3 つの同一正方形が重なった形状の小さなブロックで構成され、位置検出パターンの垂直・並行座標に関係する位置に配置される。バージョン 2 以上の QR コードに付加される。

符号化領域は特定の文字や記号を表現するシンボルキャラクタによって構成されており、機能パターンを避けて、右下から開始し、上方向や下方向への配置を交互に繰り返す、右から左へと配置する。

また、QR コードにはモジュールの値に偏りが生じないように、適切なマスクパターンを用いる。

2.2.2 QR コードの生成手順

QR コードの符号語の生成と格納は以下の手順で行われる。

【データの符号化と格納手順】

1. 文字コードを用いてデータをビット列に変換する。
2. データの先頭に 4 ビットのモード指示子、8 ビットの文字数指示子、末尾に終端パターンを付加し情報コード語を生成する。
3. 情報コード語の総シンボル数が QR コードの型番のシンボル容量を満たさないとき、埋め草コード語を容量のシンボル数となるまで付加し、情報コード語を生成する。
4. 情報コード語を、RS 符号を用いて符号化する。
5. 右下から順番に符号語を QR コードに格納する。

2.2.3 QR コードの読み取り手順

様々な二次元バーコードの生成、読み取りを行うことができるライブラリとして ZXing[9] がある。ZXing はソースコードが GitHub 上で公開されており、QR コードの読み取りアプリケーションの開発に利用される。

ZXing における QR コードの読み取り手順は以下のとおりである。

【読み取り手順】

1. カメラやスキャンで画像を取得する。
 2. 取得した画像に対し、二値化処理を行う。
 3. 位置検出パターン、位置合わせパターンを検出する。
 4. 射影変換を用いて QR コードの歪みを補正する。
 5. モジュールの黒白を判定し、ビット列を取得する。
 6. 誤り訂正を行い、データを復号する。
2. では二値化処理が行われる。ZXing では照明条件などに対応するため、周辺のモジュールの輝度値を考慮して動的に閾値を求める。以下の手順で二値化処理が行われる。

【二値化手順】

1. 以下の式を用いて撮影したカラー画像をグレースケールに変換する。

$$0.299 \times R + 0.587 \times G + 0.114 \times B \quad (3)$$
2. 画像をいくつかのピクセルのまとまり（ブロック）に分割する。
 - I. ブロック内におけるピクセルの最大値と最小値を求める（最大値と最小値の差が一定値以上であれば II, III, IV の手順を省略する）。
 - II. ブロック内におけるピクセルの平均輝度値を求め、その平均値を推定値として用いる。
 - III. ブロック内における最大値と最小値の差が一定値以下であれば最小輝度値の 1/2 を推定値とする。
 - IV. ブロックの周辺にあるブロックの平均輝度値が最小値より大きいとき周辺の平均輝度値を推定値とする。
3. いくつかのブロックまとまりから平均輝度値を求め閾値とし、ブロックごとにピクセルの白黒判定をする。

変換式の R,G,B はそれぞれ赤、緑、青を表すパラメータである。それぞれが 0~255 の値をとり、(R,G,B) で色を表現する。

QR コードの読み取り手順の 4. では射影変換が用いられる。射影変換とは、ある四角形を任意の四角形に変形するための手法である。QR コードでは、カメラの傾きにより生じる歪みの補正のために射影変換が用いられ、各モジュールの正確な中心座標を求めることができる。同次座標系を用いて、撮影した画像における QR コードの中心座標を $(x, y, 1)$ 、正方形の QR コードの中心座標を $(X, Y, 1)$ 、変換行列を H とすると射影変換は以下の式で表すことができる。

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

QR コードでは、3 つの位置検出パターンと 1 つの位置合わせパターンの中心座標から行列 H を求めることができ、傾

きや歪みが生じた QR コードを正方形に変換することができる。

3. 偽装 QR コードとホログラム QR コード

本節では、まず、誤り訂正符号の誤訂正を用いて、1 つの QR コードから 2 つの情報を確率的に出力する偽装 QR コードの生成手法を述べる。次に、偽装 QR コードの手法を用いて 2 つの情報を出力することに加え、傾ける方向によって出力する情報を制御可能なホログラム QR コードの生成手法を述べる。

3.1 偽装 QR コード[6][7]

偽装 QR コードは、大きな確率で正規のサイトへ遷移する URL を出力し、小さな確率で悪質なサイトへ遷移する URL を出力する QR コードである。この QR コードは正規のサイトも出力するため、通常の QR コードとの違いを判別しづらい。この手法による新たな脅威に対する警鐘を目的として、誤訂正により悪質なサイトへ遷移する URL を出力する手法を述べる。

3.1.1 誤訂正の制御

データ A からデータ B への誤訂正が起こるためには、訂正可能な誤りの数を t としたとき、データ A の符号語 C_A に誤り e が生じたときとデータ B の符号語 C_B の符号語間の距離が $d(C_A + e, C_B) \leq t$ である必要がある。この条件を満たすためには、 C_A のシンボルのうち $d(C_A, C_B) - t$ シンボルが C_B のシンボルと一致する必要がある。しかしながら、この誤りが実際に起こりうる確率は非常に低い。

そこで、 C_A の C_B と異なるシンボルのうち t シンボルを C_B のシンボルに置き換えたものを C'_A とする。そうすることで、 $d(C'_A, C_B) - t$ 個のシンボルが C_B と一致する誤りが生じることで C_B への誤訂正が生じる。すなわち C'_A を考えることで誤訂正の発生に必要な C_B のシンボルと一致する誤りの数を減らすことができる。しかしながら、 $d(C'_A, C_B) - t$ 個のシンボルが C_B と一致する誤りが生じる確率も限りなく少ない。

3.1.2 偽装 QR コードの生成

誤訂正を意図的に起こし、別の URL を出力するように制御することで偽装 QR コードを生成することができる。誤訂正が起こりやすくするために、QR コードのデコーダの仕組みを利用する。デコーダでは、以下の 2 つの要素によりモジュールが黒か白かを判定している。

要素 1 モジュールの中心輝度値

要素 2 周辺モジュールを参考にした黒白判定の閾値

この 2 つの要素から、黒白判定を不安定にしたいモジュールの中央に黒のドットを付加することを考える。

以上より、偽装 QR コードの生成手順は以下のとおりである。

【偽装 QR コードの生成手順】

入力: データ A, データ B

出力: データ A, データ B を確率的に表示する QR コード

Step1: データ A とデータ B の符号語 C_A, C_B を生成する。

Step2: C_A の C_B と異なるシンボルのうち、 C_B と対応するシンボルのうち異なるビットが多い順に C_B のシンボルに置き換え、 C'_A とする。

Step3: C'_A を QR コードの生成方法に従い、白と黒のモジュールとして格納する。

Step4: C'_A の C_B と異なるシンボルのうち、 C_B と対応するシンボルのうち異なるビットが少ない順に $d(C'_A, C_B) - t$ 個のシンボルにドットを付加する。

3.2 ホログラム QR コード

本節では、前節の偽装 QR コードの手法を応用したホログラム QR コードの生成手法を述べる。ホログラム QR コードでは、歪みが生じる射影変換の性質を利用することで、傾ける方向に従って出力する情報を制御する。

3.2.1 ホログラム QR コードの生成

文献[8]では左右に傾けて読み取ることでそれぞれ異なる情報を読み取るホログラム QR コードが提案されている。傾けて読み取ることによって、2 つのドットのうち片方のみを認識する位置にドットを配置している。左右の読み取り方向により異なるモジュールのドットを認識することで、異なる情報を読み取ることができる。

読み取り方向によって異なるモジュールのドットを読み取るためには、右端か左端に歪みを生じやすい射影変換の性質より、ドットを付加するモジュールを QR コードの右端か左端に配置する必要がある。また、読取りの精度を上げるため、ドットを付加するモジュールを少なく（最小は 2 つ）する必要がある。そこで、情報コード語の排他的論理和を新たな情報コード語とし、情報コード部以外に消失があると仮定の上、消失訂正を行うことで誤り訂正ブロックのシンボルのビットを操作することができる。これは、ある情報から符号語を生成していると考えられる。データ A, B の情報コード語から作られる情報コード語を $i_A + i_B = i_C$ とする。 i_C に対する符号語を C_C と表す。ただし、ここで C_C の最後のシンボルと最後から 2 番目のシンボルの 2 つのシンボルについては、“1”であるビットが 1 つであるとす。また、 C_C のハミング距離は $2t + 2$ となるように構成する。このような C_C を用いて、 $C_B = C_A + C_C$ となるように符号語 C_B を構成することで条件を満たす符号語を構成する。この手順を以下に示す。

【符号語の構成手順】

入力: データ A, データ B

出力: $d(C_A, C_B) \leq 2t + 2$ かつ最後と最後から 2 番目のシンボルが C_A と比べ、1 ビットのみ異なる C_B

Step1: データ A, B にモード指示子、文字数指示子、終端パターンを付加し、埋め草コード部をすべて 0 とし、付加した i_A, i_B を生成する。

Step2: $i_A + i_B = i_C$ とする。

Step3: i_C を埋め草コード部と誤り訂正ブロックの最後の 2 シンボルを除くランダムな位置に消失があると仮定し、消失訂正を行う。

Step4: ハミング距離が $2t + 2$ 以下かつ最後と最後から 2 番目のシンボルが 1 であるビットが 1 つのみという条件を満たす符号語が生成されるまで Step3 を繰り返し、生成した符号語を C_C とする。

Step5: 一般的な QR コードの符号生成方法で C_A を生成する

Step6: $C_B = C_A + C_C$ とし符号語 C_B を構成する。

以上の手順で生成した符号語 C_A, C_B をもとにホログラム QR コードを生成する。手順は以下のとおりである。

【ホログラム QR コードの生成】

入力: 符号語 C_A, C_B

出力: 左右の読み取りによって異なる情報を出力する QR コード

Step1: C_A のシンボルにおいて, C_B とのハミング距離が大きいものから順に t 個, C_B のシンボルに置き換え, C'_A とする.

Step2: C'_A を QR コードの生成方法に従い, 白と黒のモジュールとして格納する. ドットを付加するモジュールの両方の色が白となるようにマスクパターンを選択する.

Step3: 最後と最後から 2 番目のシンボルのうち 1 のビットに対応するモジュールにドットを付加する.



図 2 ホログラム QR コードの例

この生成法を利用して生成した QR コードの例を図 2 に示す. 右に傾けて読み取ると「SCIS2019」, 左に傾けて読み取ると「SCIS2018」を出力することができる.

4. ホログラム QR コードの拡張

本稿では, 赤シートと二値化の処理方法を用いたホログラム QR コードを提案する. 前節では, 誤り訂正符号の誤訂正を用いたため, 生成する符号に誤訂正を生じさせるある種の条件が必要であったが, 本手法では, 符号間距離を考慮することなく情報を格納することができる.

ここで赤シートとは, 学習参考書などにおいて暗記などで用いられる半透明の赤いプラスチックのシートのことである. 赤シートを通すときと通さないときで別の情報を出力する QR コードの生成方法について述べる.

4.1 ドットのカラー化によるホログラム QR コード

人は太陽や照明の光が反射した光を見て色を認識する. 例えば, 青いコップを見たときに青色と認識するのは, 入射した光のうち青い光のみが反射するからである. 赤シートはこの仕組みを利用して通す光を赤のみに制限することで, 赤で書いた文字を見えなくしたり, 緑で塗りつぶした範囲を黒くしたりする. そこで, 赤シートを通すときと通さないときとで二値化したときの色が変化するモジュールを配置することで 2 つの情報の格納を実現する.

赤シートを通したとき白, 赤シートを通さないとき黒となる色は, RGB 値のうち, R 成分の値が大きく, グレース

ケールの変換式を用いたときの値 (輝度値) が小さい. 逆に, 赤シートを通したとき黒, 赤シートを通さないとき白となる色は, G 成分や B 成分の値が大きく, 輝度値が大きい.

また, いずれの場合にも, 白となる色は, R 成分や G 成分が大きく, 輝度値が大きいものであり, 黒となる色は, B 成分の値が大きく, 輝度値が小さいものである.

印刷の場合, 色を CMYK で表現するため, RGB とは色味に差が出ることを考慮する必要がある.

モジュールの色の実験では, 「<https://sites.google.com/view/kobe-cx>」と「<https://sites.google.com/view/kobe-ab>」の情報を持つホログラム QR コードを作成し, ドットの代わりに赤シートにより白と黒が反転する色を配置した.

具体的には以下の表 1 のような色を用いた. ここで, 赤シートを通したときに判定される色を a として, 赤シートを通さないときに判定される色を b とする. この時の色の組み合わせを (a,b) という形式で表現する. a,b はそれぞれ黒か白を表す.

表 1 RGB 値とモジュールの色の関係

RGB 値	色の組合せ
(165,255,255)	(白,黒)
(255,125,0)	(黒,白)
(255,255,0)	(白,白)
(0,0,255)	(黒,黒)

図 3 は赤シートを通すとモジュールに色を加えた箇所が白に判定されるため「<https://sites.google.com/view/kobe-cx>」が読み取られ, 赤シートを通さない場合は「<https://sites.google.com/view/kobe-ab>」が読み取られる. 図 4 は図 1 の逆で赤シートを通すと色を加えた場所が黒に判定される. 図 5 と図 6 は赤シートを通しても通さなくてもそれぞれ「<https://sites.google.com/view/kobe-cx>」と「<https://sites.google.com/view/kobe-ab>」と読み取られる.

以上のように, 赤シートを通すときと通さないときとで 2 つの情報が QR コードから読み取られることを確認した.



図 3 (黒, 白) となる RGB 値を配置



図 4 (白, 黒) となる RGB 値を配置



図 5 (白, 白) となる RGB 値を配置



図 6 (黒, 黒) となる RGB 値を配置

4.2 ハミング距離が大きな 2 つの情報のホログラム QR コードの生成

前節では、ホログラム QR コードでドットを挿入したモジュールに対して、ドットのかわりに色を与えることで赤シートによって 1 つの QR コードから 2 つの情報を取得できることを確認した。

本節では QR コード全体に対してモジュールに色を加えることで 2 つの異なる情報を与える QR コードを生成することを行う。この方法では符号語間のハミング距離は気になくてよい。

QR コードのモジュールをカラー化して、RGB 値を 2 つの符号語に対応するようにモジュールに設定する。しかしながら、二値化に用いる閾値は周辺のモジュールを考慮し動的に定まるため、周辺のモジュールの色を考慮する必要がある。

そこで、2 つの符号語の異なるビットに対応するモジュールだけに色を設定するのではなく、機能パターンを除く全てのモジュールに色を設定する。RGB 値は表 1 の値を用いる。

このホログラム QR コードの生成手順は以下のとおりである。

【赤シートを用いたホログラム QR コードの生成手順】

入力: データ A, データ B

出力: 赤シートの有無で別の情報を出力する QR コード

Step1: データ A, B を格納する QR コードを ZXing の方法に従い QR コード Q_A , QR コード Q_B を生成する。

Step2: Q_A, Q_B の QR コードのモジュールの値を比較し、白で一致するモジュールに対して組合せパターン (白, 白) となる RGB 値を設定する。また、黒で一致するモジュールに対し組合せパターン (黒, 黒) となる RGB 値を設定する。

Step3: モジュールの値が一致しない場合、 Q_A について白のモジュールで、 Q_B について黒のモジュールであれば (白, 黒) となる RGB 値とする。また、 Q_A について黒のモジュールで、 Q_B について白のモジュールの場合は (黒, 白) となる RGB 値を設定する。

Step4: QR コードを出力する。

この方法で生成した QR コードの例は図 7 および図 8 に示す。

図 7 の例では、赤シートを通すとき URL1 を出力し、赤シート通さないとき URL2 を出力する。また図 8 の例では、赤シートを通すとき URL3 を出力し、赤シート通さないとき URL4 を出力する。

URL1~URL4 が示す実際の URL については表 2 のとおりである。

表 2 図 7 と図 8 で遷移する URL

	URL
URL1	https://www.kobe-u.ac.jp/ja/
URL2	https://www.ehime-u.ac.jp
URL3	https://www.ieice.org
URL4	https://www.ipsj.or.jp



図 7 URL1 と URL2 を読み取るホログラム QR コード



図 8 URL3 と URL4 を読み取るホログラム QR コード

4.2.1 読み取り実験

前節で述べた提案手法でホログラム QR コードを生成し、既存のデコーダを用いて読み取り実験を行う。表 3 に実験環境を示す。

表 3 ホログラム QR コードの実験環境

プリンタ	Ricoh SP C841 カラーレーザプリンタ
赤シート	DAISO (株式会社大創産業) 赤と緑のペア暗記用下敷き
スマートフォン	iPhone 14 メインカメラ画素数: 1200 万画素 画面解像度: 2532×1170 pixel

図 7 および図 8 の QR コードをプリンタで印刷し、スマートフォンで読み取りを行う。印刷した QR コードに赤シートを被せるときと被せないときとでそれぞれ 100 回ずつ

読み取りを行った。表 4 に読み取り実験の結果を示す。表 4 の読み取り確率は、成功回数/試行回数を示している。

表 4 ホログラム QR コードの読み取り精度

読み取り方法	図 7		図 8	
	URL1 の読み 取り確 率	URL2 の読み 取り確 率	URL3 の読み 取り確 率	URL4 の読み 取り確 率
赤シートを 通す	100/100	0/100	100/100	0/100
赤シートを 通さない	0/100	100/100	0/100	100/100

表 4 から、図 7 および図 8 について、高い確率でホログラム QR コードから情報を読み取ることができることがわかる。

5. おわりに

本稿では、新しいホログラム QR コードとして、赤シートを通すか否かで異なる 2 つの情報を読み取ることができる QR コードを提案した。二値化の仕組みを用いて情報を格納することによって、全く異なる 2 つの情報を格納できることを明らかにした。また、市販のスマートフォン (iPhone) を使用して読み取り実験を行った。実験結果から高い精度で読み取り可能であることを示した。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 20K11810 の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] 日本工業規格, “JIS X 0510:2018, 情報技術—自動認識及びデータ取得技術—QR コードバーコードシンボル体系仕様”, (2018).
- [2] DENSO WAVE INCORPORATED, <https://www.qrcode.com>, visited on June. 9, 2024.
- [3] 古本 啓祐, 森井 昌克, “利用者によって用途を選択可能な多値二次元コードを利用した視覚障害者支援システム”, 情報処理学会論文誌, Vol.57, No.12 (2016).
- [4] I. Tkachenko, W. Puech, C. Destruel, O. Strauss, J. Gaudin and C. Guichard, “Two-Level QR Code for Private Message Sharing and Document Authentication”, in IEEE Transactions on Information Forensics and Security, Vol.11, No.3 (2016).
- [5] T. Yuan, Y. Wang, K. Xu, R. R. Martin and S. Hu, “Two-Layer QR Codes”, in IEEE Transactions on Image Processing, Vol.28, No.9 (2019).
- [6] 大熊 浩也, 瀧田 慎, 森井 昌克, “偽装 QR コードの構成とその効果, およびその対策について”, コンピュータセキュリティシンポジウム 2018 論文集, (2018).
- [7] 瀧田 慎, 大熊 浩也, 森井 昌克, “二つの情報を出力する QR コードの構成—悪性サイトに誘導する QR コードの存在とその脅威—”, 電子情報通信学会論文誌, Vol.103, No.4 (2020).
- [8] 川原 大弥, 山崎 康平, 瀧田 慎, 白石 善明, 森井 昌克, “2 層化された QR コードとその原理—ホログラム QR コードの開発—”, 電子情報通信学会, Vol.120, No.324 (2020).
- [9] ZXing, <https://github.com/zxing/zxing>, visited on June. 9, 2024.