

拡張視覚復号秘密分散法の QR コードへの適用

大川 直也¹ 柄窪 孝也¹

概要：本稿では、視覚復号型秘密分散法において中間層の濃淡差を用いた拡張視覚復号型秘密分散法を QR コードへ適用する。従来手法を QR コードに適用した場合、シェア画像は白いピクセルと黒いピクセルがランダムに配置された砂嵐画像になってしまう。一方、提案の(2,2)しきい値拡張視覚復号秘密分散法の場合、2枚のシェア画像を重ねることにより、秘密の QR コードを復元することができるとともに、2枚のシェア画像も砂嵐画像ではなく、それぞれ秘密の QR コードとは異なる別の QR コードを埋め込むことができる。

キーワード：QR コード，視覚復号秘密分散法

Extended Visual Secret Sharing Schemes for QR Code

NAOYA OKAWA¹ KOUYA TOCHIKUBO¹

1. はじめに

視覚復号型秘密分散法とは、1979年に Shamir[1]が提案した秘密分散法を画像に応用した手法であり、1994年に Naor と Shamir[2]が提案している。この手法では、秘密にしたい画像を複数枚のシェアと呼ばれる画像に分散処理し、そのシェア画像単体からでは元の秘密の画像はわからないが、あらかじめ定められたしきい値以上のシェア画像を重ね合わせることで、元の秘密の画像を復元することができる秘密情報の分散管理方式である。また、Naor と Shamir は、シェア画像にも意味のある画像を載せることのできる拡張視覚復号型秘密分散法も同論文内で示唆している。一方、QR コード[3]とは、株式会社デンソーウェーブが開発した2次元コードであり、URLなどの埋め込み以外にも、近年では決算方式での利用が増えてきている。

視覚復号型秘密分散法を QR コードに適用した研究としては、2016年に Cao ら[4]が提案した視覚復号型秘密分散法を用いて、2枚のシェア画像を重ねることにより QR コードの秘密画像を復元する手法がある。しかしながら、Cao らの手法では、シェア画像は白いピクセルと黒いピクセルがランダムに配置された砂嵐画像になってしまう。

そこで、本稿では、Cao らの手法を拡張し、視覚復号型秘密分散法ではなく拡張視覚復号型秘密分散法を用いることでそれぞれ別の情報が載った2枚の QR コードのシェア画像から秘密の QR コードを復元できる手法を提案する。提案手法では、シェア自身にも意味のあるデータを組み込むことが可能になる。また、5種の QR コードリーダーを用いて、Cao らの手法と提案手法を QR コードに適用したとき、データ部分のみに提案手法を適用した場合、誤り訂正能力を変えた場合の提案手法の読み取り精度を評価し、提案手法の実用性を評価した。

2. 準備

2.1 秘密分散法

Shamir の提案した (k, n) しきい値法とは、秘密情報を n 個のシェアに分割し、 n 個のうち任意の k 個のシェアを集めることにより秘密情報を復元することができる手法であり、 $k-1$ 個のシェアからは元の秘密情報がまったく得られない。

2.2 視覚復号型秘密分散法

Naor と Shamir が提案した視覚復号型秘密分散法では、1枚の画像データに秘密分散法を適用する。一般的な(2,2)しきい値視覚復号型秘密分散法の場合、秘密画像データの1ピクセルを4分割し、シェア画像は2個の黒ピクセルと2個の白ピクセルから構成されるピクセルパターンになり、白いピクセルと黒いピクセルがランダムに配置された砂嵐画像となる。シェア画像を重ねたときに OR 演算により、秘密画像データの元ピクセルが黒であったら4個の黒ピクセルになり、白であったら3個の黒ピクセルと1個の白ピクセルになるようにシェア画像を定めて濃淡差を表現している(表1)。(2,2)しきい値視覚復号型秘密分散法の例を図1-3に示す。

表1 (2,2)しきい値視覚復号型秘密分散法のシェアの組み

合わせ例

元のピクセル		
シェア1のピクセル		
シェア2のピクセル		
重ねた画像のピクセル		

¹ 日本大学生産工学部数理情報工学科
Department of Mathematical Information Engineering, College of Industrial Technology, Nihon University

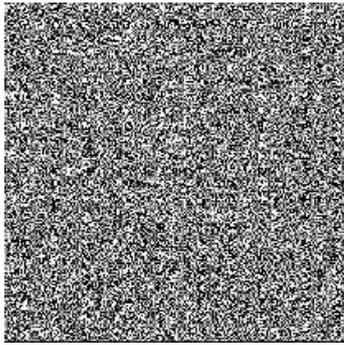


図1 (2,2)しきい値視覚復号型秘密分散法の例
(シェア画像1)

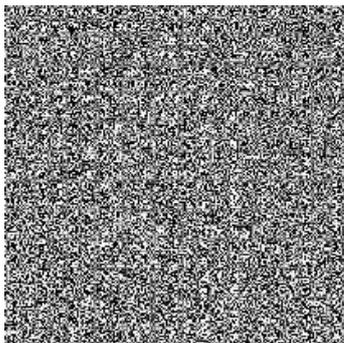


図2 (2,2)しきい値視覚復号型秘密分散法の例
(シェア画像2)

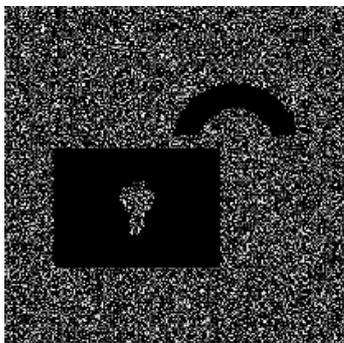


図3 (2,2)しきい値視覚復号型秘密分散法の例
(シェア画像1とシェア画像2を重ねた復元画像)

一方, Ateniese ら[5]が提案した (k, k) しきい値拡張視覚復号型秘密分散法は, n 枚のシェアに載せる画像と1枚の秘密画像をピクセル単位で処理を行う. 各ピクセルは, 入力された $n + 1$ 個のピクセル値から, n 枚の画像に対応する m 個の黒または白のピクセルパターンから構成されるシェア n 個に変換される. この白と黒のピクセルの割合によって, ピクセルの濃淡が実現される. このときのピクセルパターンを構成するピクセルの個数 m をピクセル拡大と呼ぶ.

$n = 2, m = 4$ の場合, シェア画像を重ねたときに OR 演算により, 秘密画像データの元ピクセルが黒であったら 4個の黒ピクセルになり, 白であったら 3個の黒ピクセルと 1個の白ピクセルになることは視覚復号型秘密分散法と同

じであるが, シェア画像において, シェア画像に載せる画像データの元ピクセルが黒であったら 3個の黒ピクセルと 1個の白ピクセルになり, 白であったら 2個の黒ピクセルと 2個の白ピクセルになるようにシェア画像のピクセルを定めている(表2). これにより, シェア画像にも中間の濃淡差を用いて, 黒ピクセルと白ピクセルを表現することができる. 図4-6に(2,2)しきい値拡張視覚復号型秘密分散法の例を示す.

表2 (2,2)しきい値拡張視覚復号型秘密分散法のシェアの組み合わせ例

元のピクセル		□	■	元のピクセル		□	■
シェア1のピクセル	□	■	■	シェア1のピクセル	■	■	■
シェア2のピクセル	□	■	■	シェア2のピクセル	■	■	■
重ねた画像のピクセル		■	■	重ねた画像のピクセル		■	■

元のピクセル		□	■	元のピクセル		□	■
シェア1のピクセル	■	■	■	シェア1のピクセル	□	■	■
シェア2のピクセル	□	■	■	シェア2のピクセル	■	■	■
重ねた画像のピクセル		■	■	重ねた画像のピクセル		■	■

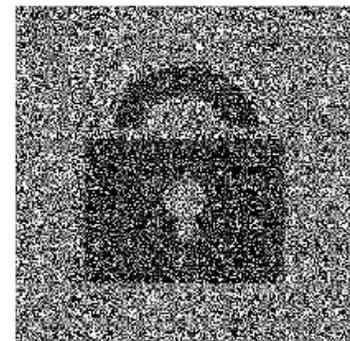


図4 (2,2)しきい値拡張視覚復号型秘密分散法の例
(シェア画像1)



図5 (2,2)しきい値拡張視覚復号型秘密分散法の例
(シェア画像2)

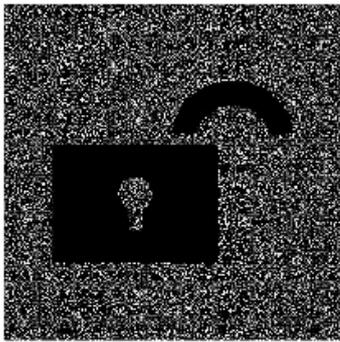


図6 (2,2)しきい値拡張視覚復号型秘密分散法の例
(シェア画像1とシェア画像2を重ねた復元画像)

2.3 QRコード

QRコードには、生成するQRコードを構成している四角い黒白の点であるセル数によって、バージョン1(21セル×21セル)から40(177セル×177セル)まで存在する。バージョンが高くなると縦横それぞれ4セルずつ増えていき、QRコードに埋め込める文字数が多くなる。また、QRコードにはそれぞれのバージョンに4個の誤り訂正能力のレベルがある。誤り訂正能力とは、QRコードの汚れなどによるノイズによって読み取りで誤りが生じて、その誤りを訂正して正しい情報を読み取ることができる能力である。

QRコードの誤り訂正能力は、誤り訂正能力7%のレベルL、誤り訂正能力15%のレベルM、誤り訂正能力25%のレベルQ、誤り訂正能力30%のレベルHの4種である。同じバージョンであったとしても選択する誤り訂正能力のレベルによって、QRコードに埋め込める文字数は変わり、Hが一番少なく、Lが一番多くの文字を埋め込むことができる。本稿では、標準として漢字36文字埋め込み可能なバージョン6でレベルHのQRコードを用いる。

バージョン6のQRコードにおいて共通している構造を図7に示す。切り出しシンボルは、QRコードの3個のコーナーに配置することで、シンボルの位置や大きさ、傾きなどを検出するためのパターンである。タイミングパターンは、白セルと黒セルが交互に配置された、シンボル内のモジュール座標を決定するためのパターンである。アライメントパターンは、歪みによって生じる各セルの位置ずれを補正するためのパターンである。クワイエットゾーンはセルで構成された正方形のコードの周囲の空白部分である。切り出しシンボルを最初に検索することでQRコードの位置を360°どの方向からでも認識することができ、高速な読み取りを可能にしている。

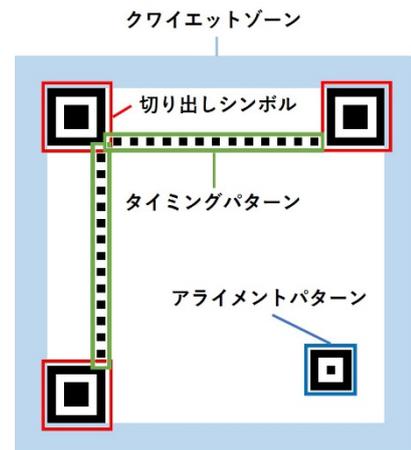


図7 バージョン6のQRコードの共通構造

3. 拡張視覚復号秘密分散法のQRコードへの適用

3.1 従来手法

Caoらの(2,2)しきい値視覚復号型秘密分散法では、秘密画像の1ピクセルを16分割している。この手法では、表3に示すシェアの組み合わせにより、白ピクセルと黒ピクセルを分散している。また、Caoらは、シェア画像の白ピクセルと黒ピクセルの偏りをなくすためにシェアのピクセルパターンを減らし、さらに、復元画像を明るくするためにシェア画像を重ね合わせたときに白ピクセルになる組み合わせを同じピクセルパターンにしている。なお、表3のシークレットのピクセルは秘密画像の元々のピクセルが黒であったのか、白であったのかを表すとともに、シェア1とシェア2のピクセルパターンを重ねたときに白ピクセルか黒ピクセルかのどちらかに復元されるのかを示している。

表3 従来手法のシェアの組み合わせ

シェア1					
シェア2					

図8は、Caoらの手法を用いて作成したシェア画像である。図9は、図8の2個のシェア画像を重ねたときに復元された秘密画像と元の秘密画像である。Caoらの手法を用いて復元したQRコードの画像は、白を8個の白ピクセルと8個の黒ピクセル、黒を16個の黒ピクセルで表現している。

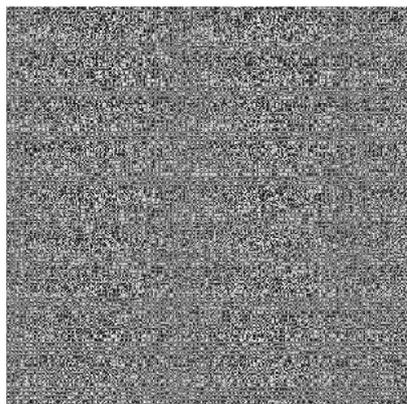
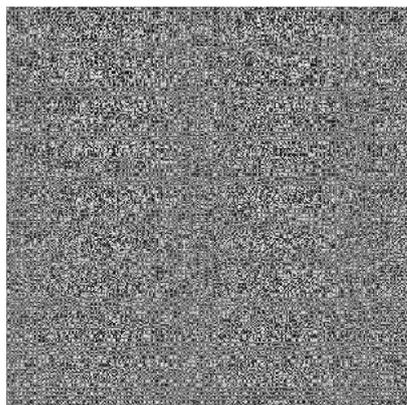


図8 従来手法のシェア画像 1(上), 2(下)

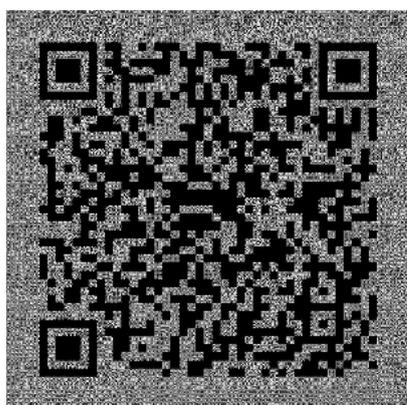


図9 従来手法のシェアを重ねた復元画像(上)と元の QR コード画像(下)

シェア画像を重ねたときに OR 演算により秘密画像を復元する視覚復号型秘密分散法ではないが、関連研究として Jiang らの手法[6]や Zhang らの手法[7]がある。Jiang らの手法では、XOR 演算を用いた画像に対する秘密分散法を QR

コードに適用している。また、Zhang らは、QR コードのクワイエットゾーン、タイミングパターン、アライメントパターン、左下の切り出しシンボル、右上の切り出しシンボル以外のデータ部分と左上の切り出しシンボルに対して、秘密分散法をピクセル単位ではなく、QR コードのセル単位でパターンの置き換えを用いて適用している。しかしながら、Jiang らの研究では、XOR を処理するための媒体が必要となってしまう、Zhang らの研究では、秘密画像を復元するために 2 枚のシェアのデータから再度パターンを読み込み、さらに、パターンを置き換える処理を行わなければならない。

3.2 提案手法

従来手法のシェア画像では、2 枚のシェア画像から 1 個の QR コードを復元することができるが、シェア画像は白いピクセルと黒いピクセルがランダムに配置された砂嵐のような画像となり、シェア画像単体では意味のある画像にはなっていない。一方、本稿で提案する手法 1 では、Ateniense らの拡張視覚復号型秘密分散法を QR コードに適用させ、秘密画像の 1 ピクセルを 4 分割にしたシェアの組み合わせのピクセルパターンを QR コードに適用することで、シェア自身にも意味のあるデータを組み合わせることが可能になる(表 4)。したがって、提案手法では、シェア画像が何のシェアであるのか示したり、それぞれのシェア画像に別々の QR コードの情報を載せたりすることで扱えるデータの量がいままでよりも格段に多くなる。なお、表 4 のシェア 1 のピクセル、シェア 2 のピクセルとはシェア画像に載せる画像の元々のピクセルが黒であったか、白であったのかを示している。

提案手法 1 では、秘密画像の 1 ピクセルを 4 分割にしているため、シェア画像と復元画像において濃淡差が小さくなってしまふ。そこで、シェア画像と復元画像が明るくなるように改良したものが提案手法 2 である。提案手法 1 では、秘密画像の 1 ピクセルを 4 分割し、2 個の黒ピクセルと 2 個の白ピクセルから構成される白を表すピクセルと 3 個の黒ピクセルと 1 個の白ピクセルから構成される黒を表すピクセルをシェア画像において用いているが、提案手法 2 では、秘密画像 1 ピクセルを 16 分割し、6 個の黒ピクセルと 10 個の白ピクセルから構成される白を表すピクセルと 9 個の黒ピクセルと 7 個の白ピクセルから構成される黒を表すピクセルをシェア画像で用いるように変更している(表 5)。また、提案手法 2 では、シェア画像の黒ピクセルを表現するピクセルパターンを重ね合わせたときに復元画像で白ピクセルになる組み合わせを共通にすることにより、Cao らの手法が復元画像を明るくするために行っていたように復元画像を明るくすることが可能となる。さらに、復元画像を明るくするために復元画像の黒ピクセルを表現するピクセルパターンを 16 個の黒ピクセルから構成される

ピクセルパターンから 4 個の白ピクセルと 12 個の黒ピクセルから構成されるピクセルパターンにし、復元画像も中間の濃淡差を用いて表現している。

表 4 提案手法 1 の拡張視覚復号型秘密分散法のシェアの組み合わせ

		シエア1のピクセル				シエア1のピクセル					
シエア1		■	■	■	■	■	■	■	■		
	シエア2のピクセル	■	■	■	■	■	■	■	■	シークレットのピクセル	
シエア2	シエア2のピクセル	■	■	■	■	■	■	■	■		
	シエア2のピクセル	■	■	■	■	■	■	■	■		
	シエア2のピクセル	■	■	■	■	■	■	■	■		
	シエア2のピクセル	■	■	■	■	■	■	■	■	シークレットのピクセル	

表 5 提案手法 2 の拡張視覚復号型秘密分散法のシェアの組み合わせ

		シエア1のピクセル			シエア2のピクセル				
シエア1		■	■	■	■	■	■		
	シエア2のピクセル	■	■	■	■	■	■	シークレットのピクセル	
シエア2	シエア2のピクセル	■	■	■	■	■	■		
	シエア2のピクセル	■	■	■	■	■	■		
	シエア2のピクセル	■	■	■	■	■	■		
	シエア2のピクセル	■	■	■	■	■	■	シークレットのピクセル	

4. 評価

4.1 提案手法の読み取り精度の評価

Cao らの手法で作成した復元画像の QR コード、図 10 の QR コードに提案手法 1、提案手法 2 を適用して生成したシェア画像と復元した秘密画像の QR コードを株式会社デンソーウェーブが公式でリリースしているアプリケーション “Q” [8], LINE 株式会社がリリースしているアプリケーション LINE[9], Twitter 株式会社がリリースしているアプリケーション Twitter[10], Apple 製品に標準でインストール

されているアプリケーション カメラ[11], Google LLC がリリースしているアプリケーション Chrome[12]の 5 種の QR コードリーダーで読み取り、提案手法の QR コードの読み取り精度の評価を行った(表 6)。評価方法は、iPhone8 を用いて各アプリケーションで 10 回ずつ読み取りを行い何回読み取ることになったのかで判断した。1 回の読み取り時間は 30 秒未満とし、30 秒以上かかった場合は失敗とする。図 11-13 は、実際に図 10 の QR コードに提案手法 1 を適用したシェア画像と復元画像である。図 14-16 は、実際に図 10 の QR コードに提案手法 2 を適用したシェア画像と復元画像である。



図 10 元の QR コード画像

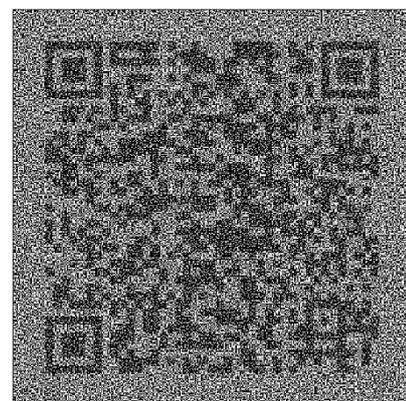


図 11 提案手法 1 のシェア画像 1

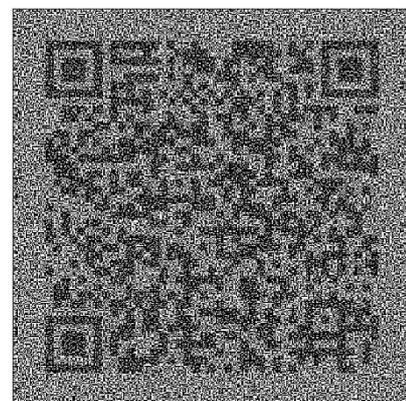


図 12 提案手法 1 のシェア画像 2

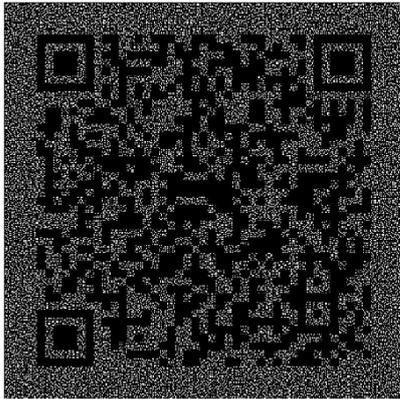


図13 提案手法1のシェア画像1とシェア画像2を重ねたときの復元画像

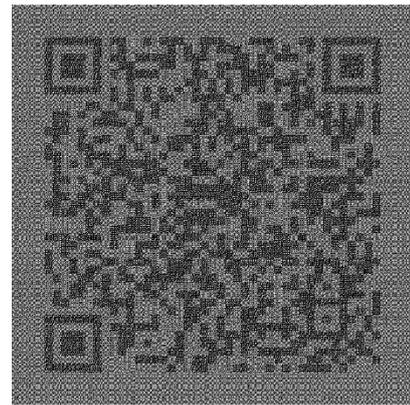


図16 提案手法2のシェア画像1とシェア画像2を重ねたときの復元画像

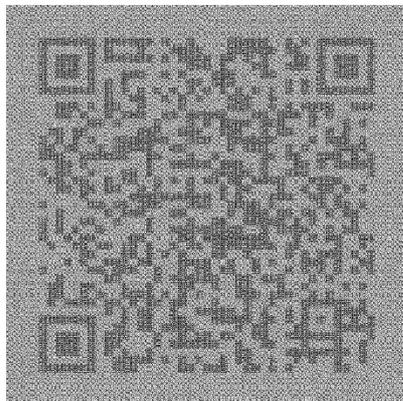


図14 提案手法2のシェア画像1

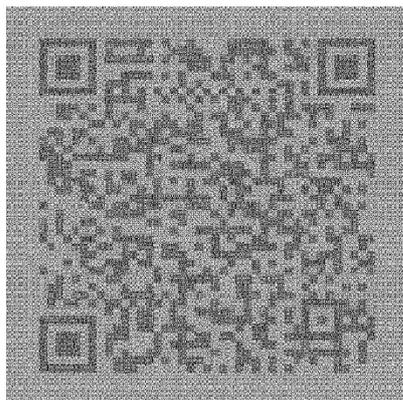


図15 提案手法2のシェア画像2

表6 従来手法と提案手法の読み取り精度の比較

画像	Q	LINE	Twitter	Apple	Chrome
Cao らの手法の復元画像	100%	70%	100%	20%	100%
提案手法1のシェア画像1	70%	60%	0%	0%	40%
提案手法1のシェア画像2	80%	70%	0%	0%	20%
提案手法1の復元画像	70%	70%	10%	0%	20%
提案手法2のシェア画像1	100%	90%	80%	50%	80%
提案手法2のシェア画像2	100%	80%	80%	30%	70%
提案手法2の復元画像	100%	80%	70%	40%	60%

Cao らの手法, 提案手法1, 提案手法2のシェア画像および復元画像のQRコードを実際にQRコードリーダーで読み込んでみた結果, Q, LINE, ChromeのQRコードリーダーではどの手法でもQRコードを読み取ることに成功した。しかし, Twitter, Apple標準のQRコードリーダーでは, 提案手法1は読み取ることができなかった。また, QRコードを読み取る際にQRコードが置かれている場所の色が黒色である方がシェア画像と復元画像のQRコードの濃淡差の認識しやすいことがわかった。

提案手法1とCao らの手法を比べてみると, LINEでは同じ精度で読み取ることができたが, シェア画像と復元画像が暗いため, 他のQRコードリーダーでは低い読み取り精度になってしまった。

提案手法2とCao らの手法を比べてみると, LINE, Apple標準のQRコードリーダーでは, Cao らの手法よりも読み取り精度が良くなった。また, Twitter, ChromeのQRコードリーダーでは, Cao らの手法よりも少し読み取り精度が

落ちてしまったが、QR コードリーダーによって読み取りやすい位置があるため、QR コードリーダーの読み取りに慣れることにより問題のないレベルの読み取り精度になると考えられる。提案手法2のシェアのQRコードでは、QRコードの濃淡差が薄く、認証に少し時間がかかってしまう場合があった。

提案手法1と提案手法2を比べてみると、5種のQRコードリーダーすべてで、提案手法2で作成したシェア画像と復元画像のQRコードの読み取り精度が向上した。これは、提案手法1に比べて提案手法2のシェア画像と復元画像が明るくなったことと、1ピクセルを4分割していたものから16分割にしたことにより画像の滑らかさが向上し、黒セルと白セルの識別がしやすくなったことが主因だと考えられる。

4.2 データ部分に適用した場合の評価

図10のQRコードはすべて同じバージョン6のQRコードを用いており、Zhangらの手法のようにQRコードのセルで共通になっている切り出しシンボル、アライメントパターン、タイミングパターン、クワイエットゾーンはそのままにし、それ以外のデータ部分に提案手法2を適用した場合に読み取り精度が向上するののかの評価を4.1と同様の条件で行った(表7)。図17-19は、実際に図10のQRコードのデータ部分のみに提案手法2を適用した場合のシェア画像と復元画像である。

表7 データ部分のみに提案手法2を適用した場合の読み取り精度の比較

画像	Q	LINE	Twitter	Apple	Chrome
シェア画像1	60%	70%	60%	10%	80%
シェア画像2	80%	70%	90%	50%	70%
復元画像	80%	10%	70%	0%	80%

データ部分のみに提案手法を適用した結果、QRコード全体に提案手法を適用した場合と比べ、シェア画像と復元画像がQRコードであると認識する認識精度は向上したが、読み取り精度自体は落ちてしまった。特に、LINE、Apple標準の2種では、復元画像の読み取りがほぼできなくなってしまった。これは、画像内に純粋な黒と白が存在するためシェア画像と復元画像の濃淡差よりもその黒と白の濃淡差を読み取ってしまいQRコードであることは認識してもそれ以外のデータ部分において、黒セルと白セルを上手く認識することができなくなってしまったことが主因であると考えられる。

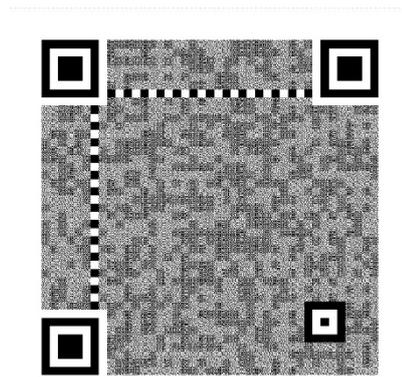


図17 データ部分のみに適用したシェア画像1

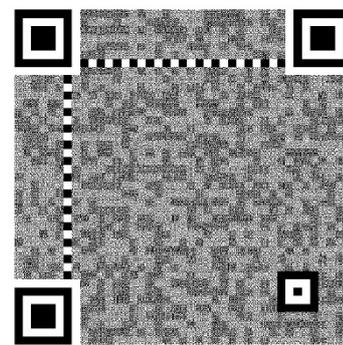


図18 データ部分のみに適用したシェア画像2

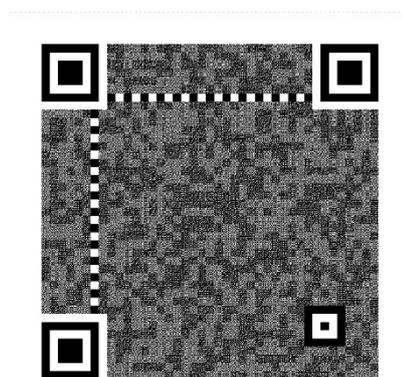


図19 データ部分のみに提案手法2を適用したシェア画像1とシェア画像2を重ねたときの復元画像

4.3 誤り訂正能力を変えた場合の読み取り精度の評価

2.3で述べたようにQRコードには4種類の誤り訂正能力がある。これまでは読み取り精度を上げるために誤り訂正能力30%のQRコードを使用したが、提案手法2がどの誤り訂正能力のQRコードまでであれば適用可能であるの

かの評価を行う。評価方法は、誤り訂正能力の異なる4種類のQRコードのシェア画像1, シェア画像2, 秘密画像を用意し, 4.1と同様の条件で評価した(表8)。

表8 誤り訂正能力を変えた場合の読み取り精度の比較

訂正能力	画像	Q	LINE	Twitter	Apple	Chrome
7%	シェア画像1	40%	0%	0%	0%	20%
	シェア画像2	50%	0%	0%	0%	0%
	復元画像	80%	0%	0%	0%	0%
15%	シェア画像1	100%	50%	50%	30%	60%
	シェア画像2	100%	50%	50%	40%	70%
	復元画像	100%	60%	70%	40%	70%
25%	シェア画像1	100%	90%	90%	70%	90%
	シェア画像2	100%	90%	90%	70%	90%
	復元画像	100%	90%	90%	80%	90%
30%	シェア画像1	100%	90%	80%	50%	80%
	シェア画像2	100%	80%	80%	30%	70%
	復元画像	100%	80%	70%	40%	60%

誤り訂正能力を変えた結果, 誤り訂正能力25%以上のQRコードに提案手法2を適用するのが望ましいが, 誤り訂正能力15%までであれば, 提案手法を適用することが可能であることがわかった。誤り訂正能力7%では, Q以外のQRコードリーダーではほとんど認識することができなかった。また, QのQRコードリーダーでもシェア画像と復元画像のQRコードを認識して読み取るのに非常に時間がかかった。

5. まとめ

本稿では, Caoらの手法を拡張し, 視覚復号型秘密分散法ではなく拡張視覚復号型秘密分散法を用いることでそれぞれ別の情報が載った2枚のQRコードのシェア画像から秘密のQRコードを復元できる手法を提案した。従来手法をQRコードに適用した場合, シェア画像は白いピクセルと黒いピクセルがランダムに配置された砂嵐画像になってしまう。一方, 提案手法では, シェア自身にも意味のあるデータを組み込むことが可能になる。

提案手法をQRコードに適用した場合, シェアの画像のQRコードをQRコードリーダーで読み取ることは可能であった。また, 復元画像においてはシェア画像を重ねたときに白ピクセルになる個数によって復元画像の濃淡差が変化するため, その明るさを上げることによって読み取り精度が向上する。ただし, シェア画像や復元画像を明るくするために余計に濃淡差の階層を増やしてしまうとQRコー

ドリーダーの読み取り精度が落ちてしまう。また, 拡張視覚復号型秘密分散法では, 復元画像の白ピクセルはシェア画像の黒ピクセルと同じ暗さになるので, 視覚復号型秘密分散法ほど明るくすることはできない。これは, 分割数を増やすことにより, シェアの取り得る組合せ数を増やすことで改善されるが, 濃淡差がある程度ないとQRコードリーダーが濃淡差を読み取ることができないという問題があり, どの程度まで提案手法を明るくすることが可能なかを調べるのが今後の課題である。

今回の評価を通して, 視覚復号型秘密分散法や拡張視覚復号型秘密分散法をQRコードに適用した場合, 作成されたシェア画像と復元画像のQRコードは, 読み取る環境により読み取り精度がかなり変わることが分かった。具体的には, 読み取るQRコードのクワイエットゾーンより外側が黒いとQRコードの濃淡差を読み取りやすくなり, 逆に, クワイエットゾーンより外側が白いと読み取りづらくなってしまったことが分かった。

謝辞 本研究はJSPS 科研費18K11303の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] Adi Shamir, "How to share a secret," Communications of the ACM, vol.22, no.11, pp.612-613, 1979.
- [2] Moni Naor and Adi Shamir, "Visual Cryptography," Lecture Notes in Computer Science vol.950, pp.1-12,1995.
- [3] JIS X 0510, "二次元コードシンボル—QRコード—基本仕様," 日本規格協会, 2004.
- [4] Xiaohe Cao, Liuping Feng, Peng Cao and Jianhua Hu, "Secure QR Code Scheme Based on Visual Cryptography," Advances in Intelligent Systems Research, vol.133, pp.433-436,2016.
- [5] G. Ateniese, C. Blundo, A. De Santis, and D.R. Stinson, "Extended capabilities for visual cryptography," Theor. Comput. Sci., Vol.250, pp.143-161,2001.
- [6] Yue Jiang, Yuliang Lu, Xuehu Yan, Lintao Liu, "Extended Secret Image Sharing with Lossless Recovery Based on Chinese Remainder Theorem and Quick Response Code," 2018 IEEE 3rd ICIVC, pp.678-683, 2018.
- [7] Xin Zhang, Jia Duan and Jiantao Zhou, "A Robust Secret Sharing QR Code via Texture Pattern Design," 2018 APSIPA ASC, pp.903-907,2018.
- [8] "公式QRコードリーダー"Q". <https://apps.apple.com/jp/app/%E5%85%AC%E5%BC%8Fqr%E3%82%B3%E3%83%BC%E3%83%89%E3%83%AA%E3%83%BC%E3%83%80%E3%83%BC-q/id911719423>, (参照 2019-11-01).
- [9] "LINE". <https://apps.apple.com/jp/app/line/id443904275>, (参照 2019-11-01).
- [10] "Twitter". <https://apps.apple.com/jp/app/twitter/id333903271>, (参照 2019-11-01).
- [11] "Apple 標準アプリケーション カメラ". <https://support.apple.com/ja-jp/HT208843>, (参照 2019-11-06)
- [12] "Chrome - Google のウェブブラウザ". <https://apps.apple.com/jp/app/chrome-google-%E3%81%AE%E3%82%A6%E3%82%A7%E3%83%96%E3%83%96%E3%83%A9%E3%82%A6%E3%82%B6/id535886823>, (参照 2019-11-01)