

低解像度 QR コード認識のための 2 値グリッド拘束付き 2 段階超解像

加藤 祐二^{†*} 高橋 友和^{††a)} 出口 大輔^{†††} 井手 一郎[†]
村瀬 洋[†]

Two-step Super-Resolution with Binary and Grid Constraints for Low Resolution QR-Code Recognition

Yuji KATO^{†*}, Tomokazu TAKAHASHI^{††a)}, Daisuke DEGUCHI^{†††}, Ichiro IDE[†],
and Hiroshi MURASE[†]

あらまし QR コードは二次元コードの一種で、小面積に印刷するだけで様々な媒体に情報を付加することができ、製造における発注システムなどで利用されている。しかし、カメラと QR コードが離れるほど QR コード画像は相対的に低解像度となるため、認識が困難になる。そこで本論文では、低解像度の QR コード画像の認識性能の向上を目的として、QR コードの特徴を利用した複数フレーム超解像手法を提案する。本手法では、QR コードの認識が検出とデコードの 2 段階の処理からなることを利用して、それぞれの精度向上を行うために 2 段階の超解像処理を導入する。また、QR コードが 2 値のグリッド状のパターンで構成されることを利用し、これを超解像処理の拘束として用いる。更に、全ての QR コードが共通してもつパターンを利用して、ばけを表す点拡がり関数 (PSF : Point Spread Function) の推定を行う。実動画像を利用した認識実験の結果、撮影動画像そのままでは認識できないほど低解像度の QR コード画像に対して、提案手法は高い認識率を示した。このことから、提案手法の有効性を確認した。

キーワード QR コード認識, 複数フレーム超解像, 低解像度, 2 値拘束, グリッド拘束

1. ま え が き

近年、カメラを用いた情報入力手段として、QR コードなどの二次元コードが広く普及している。QR コードは、文字や数字などの情報を記録した白黒の二次元パターンからなるシンボルである。QR コードは小面積に印刷するだけで様々な媒体に容易に情報を付加することができるため、製造における発注システム、物流における出荷管理システム、流通における販売管理システムなどで利用されている。身近なところでは、

QR コードを携帯電話機内蔵のデジタルカメラで撮影し、埋め込まれた情報を取得するために利用されている。しかしながら、実環境中の QR コードを認識するためには、ある程度の解像度が必要となる。しかし、カメラと QR コードが離れるほど QR コード画像は相対的に低解像度となるため、認識が困難になる。そのため、低解像度の QR コード (以下、低解像度 QR コード) を認識する技術が求められている。この技術が実現されれば、遠方や複数の QR コードを認識できるようになるため、応用範囲が拡大する。また、安価で解像度の低いカメラを利用することで、工場の製品管理などにかかるコストを下げるができる。

低解像度画像から QR コードやバーコード、文字のようなシンボルを認識する研究が行われている [1]~[5]。これらの研究では、低解像度画像から高解像度画像を生成する技術である超解像処理を適用することで、認識性能の向上を図っている。この処理を行う際、対象とするシンボルの特徴を用いることで、認識性能を向上することができる [2]~[5]。文字の超解像処理において、Park らは文字が白黒のエッジからなるとい

[†] 名古屋大学大学院情報科学研究科, 名古屋市
Graduate School of Information Science, Nagoya University,
Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, 464-8601 Japan

^{††} 岐阜聖徳学園大学経済情報学部, 岐阜市
Faculty of Economics and Information, Gifu Shotoku
Gakuen University, 1-38 Nakauzura, Gifu-shi, 500-8288
Japan

^{†††} 名古屋大学情報連携統括本部, 名古屋市
Information and Communications Headquarters, Nagoya
University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya-shi, 464-8601
Japan

* 現在, キヤノン株式会社

a) E-mail: ttakahashi@gifu.shotoku.ac.jp

う特徴を利用している [5]。また、Donaldson らは文字画像のヒストグラムが 2 峰性になるという特徴を利用している [4]。一方、Champagnat らはバーコードがある方向にのみ情報をもつ厚みのあるパターンであるという特徴を利用している [2]。

QR コードの超解像処理において、我々は QR コードが白黒の 2 値からなるという特徴を利用した手法を提案している [6]。柴田らはそれに加え、QR コードが正方グリッド状のパターンからなるという特徴を利用した手法を提案している [3]。この手法では QR コードの検出位置とぼけを表す点拡がり関数 (PSF: Point Spread Function) を人手で与えている。しかしながら、低解像度では QR コードの検出が困難なため、この手法を利用するためには人手を介する必要がある。また、PSF はカメラと QR コードの距離などの撮影環境に依存するため、高精度な高解像度画像を得るためには毎回何らかの方法で推定する必要がある。そこで、提案手法ではこれらの特徴に加え、QR コードの認識が検出とデコードの 2 段階の処理からなるという特徴を利用し、それらの精度を向上するために 2 段階の超解像処理を導入する。検出のための超解像処理を行うことで、自動で QR コードを検出することが可能になる。更に、全ての QR コードが共通のパターンをもつという特徴を利用し、そのパターンから PSF の推定を行う。

以降、2. では、QR コードについて述べ、3. では、提案手法である 2 値グリッド拘束付き 2 段階超解像について詳しく説明する。4. では、認識実験とその結果の考察について述べ、最後に、5. でまとめる。

2. QR コード

QR コードの仕様、用語、認識手法は、規格 (JIS X0510) により定義されている [9], [10]。本章では、これらについて簡単に紹介する。

2.1 仕様と用語

QR コードは、モジュールと呼ばれる白黒の正方形を最小単位として構成されており、モジュールの配置によって任意の情報を表す。モジュールの縦方向と横方向の数は同じであり、その総数は型番ごとに定められている。型番は 1 から 40 までの 40 種類が存在し、型番が大きいくほどモジュール数が多く、保持可能な情報量が増える。図 1 は、型番 5 の QR コードの例である。この QR コードは縦横 37×37 個のモジュールから構成されている。このように白黒の正方形 (モ



図 1 QR コードの例
Fig. 1 Example of a QR-code.

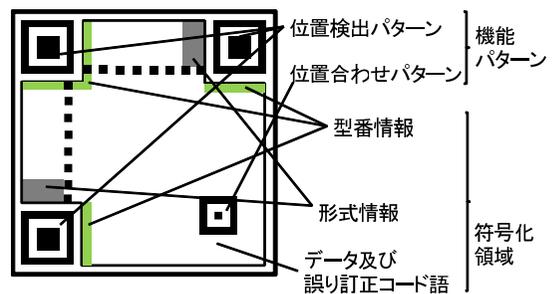


図 2 QR コードの構造
Fig. 2 Structure of a QR-code.

ジュール) をグリッド状にすき間なく配置することによって任意の情報を保持させることができる。また、QR コードは誤り訂正機能を持ち、局所的な汚損があってもデータを復元することが可能である。図 2 に示すように、モジュールは、検出のための「機能パターン」に属するものと、データや型番情報、誤り訂正レベルなどの形式情報を記録した「符号化領域」に属するものに分けられる。このうち、「機能パターン」には、検出に用いられる「位置検出パターン」と「位置合わせパターン」がある。

2.2 認識手法とその問題点

QR コードの認識は検出とデコードの 2 段階の処理からなる。まず、「位置検出パターン」と「位置合わせパターン」を検出することで、入力画像から QR コードを検出する。次に、検出した位置をもとにして、2 値化された入力画像の「符号化領域」から 1 モジュールずつ読み取ったデータをデコードし、QR コードに埋め込まれたデータを得る。

しかしながら、低解像度の画像にはノイズやぼけ等の劣化が加わり、白と黒のモジュールの境界が不明瞭になるため、図 3 に示すような低解像度 QR コード



図3 低解像度 QR コードの例
Fig. 3 Sample of a low resolution QR-code image.

から、「位置検出パターン」や「位置合わせパターン」を検出することが困難となる。また、検出できたとしても、デコードのためには QR コードの解像度が不十分であるため、各モジュールを正確に読み取ることが困難である。そこで、本手法ではこれらの問題点を解決し、QR コードの検出とデコードそれぞれの精度向上を図るため、2段階の超解像処理を導入する。まず、入力に対して1段階目の超解像処理を行うことで高解像度化し、QR コードの検出精度を向上させる。次に、検出された QR コードの位置をもとにして、QR コードが2値のグリッド状のパターンで構成されることを拘束として2段階目の超解像処理を行うことで、デコードの精度を向上させる。この際、ぼけを考慮して高解像度化するためには正確な PSF を利用することが重要である。PSF はカメラと QR コードの距離などの撮影環境に依存するため、入力から PSF を推定する必要がある。そこで、全ての QR コードが共通してもつ「位置検出パターン」を利用して、PSF の推定を行う。

3. 2値グリッド拘束付き2段階超解像

3.1 概要

提案手法の処理の流れを図4に示す。提案手法は、動画像を入力とした二つの超解像処理から構成される。1段階目の超解像処理の目的は、QR コードの検出に必要な「位置検出パターン」と「位置合わせパターン」の検出精度向上である。そこで、複数フレーム超解像処理を利用して、これらのパターンを十分に検出可能な品質の超解像画像を生成し、得られた超解像画像から QR コードを検出する。2段階目の超解像処理の目的は、QR コードのデコードに必要な「符号化領域」内の各モジュールの識別精度の向上である。そのため、より高品質な超解像画像が必要である。そこで、検出した「位置検出パターン」から PSF を推定して処理に

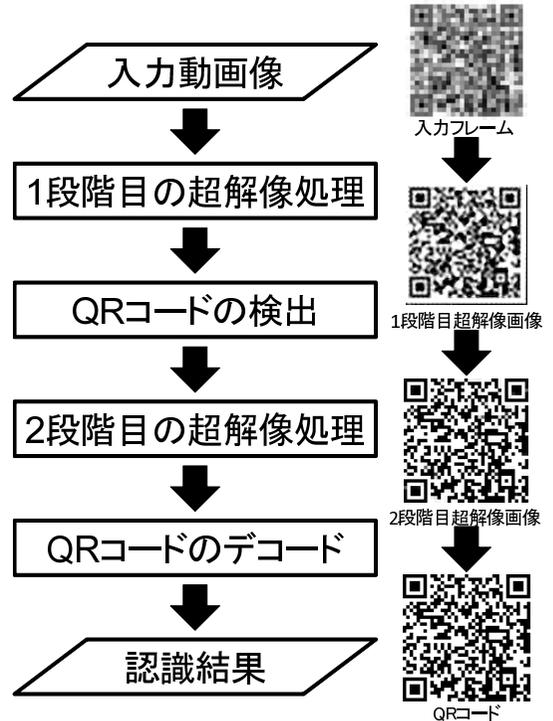


図4 提案手法の流れ図
Fig. 4 The flow diagram of the proposed method.

利用する。また、QR コードが2値のグリッド状のモジュールで構成されることを拘束として利用する。これらによって、より高品質な超解像画像を生成し、得られた画像から QR コードのデコードを行う。

3.2 1段階目の超解像：複数フレーム超解像

複数フレーム超解像処理 [7] を利用する。この処理は平均画像作成処理と再構成処理からなる。入力動画像は、フレーム間に位置ずれを含み、各フレームはぼけを含んでいる。まず、各入力フレーム間の位置ずれを推定し、それらを利用して入力フレームの平均画像を作成する。次に、再構成処理では、平均画像を参照しながら、ぼけを除去した高解像度画像を再構成する。以下、それぞれの処理について述べる。

3.2.1 フレーム間の位置合わせによる平均画像の作成

大きさ $L_1 \times L_2$ (pixels) の連続するフレーム f_i ($i = 1, \dots, N$) からなる入力動画像から、大きさ $H_1 \times H_2$ (pixels) ($H_1 > L_1, H_2 > L_2$) の平均画像 r と平均画像の各画素の重要度を表す重み画像 w を作成する。カメラで撮影した動画像には、手ぶれなどに

よってフレーム間に微小な位置ずれが生じる．ここでは、低解像度画像間の位置ずれをサブピクセル精度で推定し、位置合わせを行い高解像度画像空間で平均を計算することで平均画像を作成する．ここで、画像の表記は画素値を要素とする縦ベクトルとし、 \mathbf{f}_i , \mathbf{r} , \mathbf{w} の j 番目の画素値をそれぞれ f_{ij} , r_j , w_j と表記する．

以下で、入力動画像から平均画像と重み画像を作成する処理について説明する．

(1) \mathbf{f}_i ($i = 1, \dots, N$) をグレースケール化し、画素値の範囲を $[0, 1]$ に正規化する．具体的には、画像全体での最小値、最大値がそれぞれ 0, 1 になるように、画素値を線型に変換する．

(2) \mathbf{f}_1 を基準として、 \mathbf{f}_1 に対する \mathbf{f}_i ($i = 2, \dots, N$) の位置ずれを表す変換行列 \mathbf{M}_i ($i = 2, \dots, N$) をサブピクセル精度で求める． \mathbf{M}_i の推定には、画像間の位置合わせ手法として一般に広く用いられている ICIA (Inverse Compositional Image Alignment) 法 [11] を用いる．この手法は、基準画像と変形画像の間の誤差が最小となるような変形パラメータを繰返し計算によって求めるものである．

(3) \mathbf{M}_i ($i = 1, \dots, N$) とアップサンプリングの行列 \mathbf{U} を用いて、低解像度画像空間上の $f_{ij'}$ が高解像度画像空間上の画素 j' に投影されるとき、 r_j を次式により求める．

$$r_j = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j' \in \mathcal{D}_i} f_{ij'}}{w_j} \quad (1)$$

ここで、 w_j は画素 j に投影された画素の数であり、 \mathcal{D}_i は画素 j に投影されるフレーム \mathbf{f}_i の画素番号の集合である．また、文献 [7] の複数フレーム超解像手法では処理の高速化が行われているため、式 (1) 中の総和範囲は通常の複数フレーム超解像とは異なる．

3.2.2 再構成処理

平均画像 \mathbf{r} と超解像画像 \mathbf{h} の誤差を表す以下の目的関数 $J_1(\cdot)$ をこう配投影法 [8] で最小化することで超解像画像 \mathbf{h} を得る．

$$J_1(\mathbf{h}) = \sum_{j=1}^{H_1 \times H_2} w_j (\mathbf{b}_j^T \mathbf{h} - r_j)^2 \quad (2)$$

ここで、 \mathbf{b}_j は \mathbf{r} のぼけを表す PSF のベクトル表現である．PSF が重要となるのは特にデコード処理である．ここでの、PSF は適当な分散のガウス分布で近似する．

3.3 2 段階目の超解像：拘束付き複数フレーム超解像

まず、入力フレーム間の位置ずれと検出した QR コードの位置を考慮して、図 5 のように QR コードの各モジュールが $K \times K$ (pixels) で表現されるような座標系 (以下、QR コード座標系と記す) における平均画像を生成する．次に平均画像中の「位置検出パターン」を利用して、ぼけを表す PSF を推定する．再構成処理では、推定した PSF と QR コードが 2 値のグリッド状のパターンで構成されているという特徴を利用して再構成処理を行うことで、高解像度化を行う．

以下、平均画像の作成方法、PSF の推定手法、拘束付き再構成処理について述べる．

3.3.1 平均画像の作成

QR コード座標系で、 $H' \times H'$ (pixels) の平均画像 \mathbf{r}' と重み画像 \mathbf{w}' を作成する．ここで、 H' = 縦 (横) 方向のモジュール数 $\times K$ である．まず、1 段階目の超解像画像から「位置検出パターン」と「位置合わせパターン」を検出することで、QR コードの検出を行い、超解像画像を QR コード座標系へ変換する行列 \mathbf{Q} を求める．ここで、「位置検出パターン」と「位置合わせパターン」の検出には、文献 [9] に記載されている方法を用いる．具体的には、まず、「位置検出パターン」が 1:1:3:1:1 の比率の幅をもつ黒-白-黒-白-黒の列で構成されることを利用して、三つの「位置検出パターン」を検出し、次に、検出された各「位置検出パターン」との間の位置関係と、「位置合わせパターン」が 1:1:1:1:1 の比率の幅をもつ黒-白-黒-白-黒の列で構成されることを利用して、「位置合わせパターン」を検出する．

また、縦 (横) 方向のモジュール数または型番は、「位置検出パターン」間の距離とモジュールの大きさから計算可能である．そして、3.2.1 と同様の方法で平均画像を作成する．このとき、1 段階目の超解像処理の際に用いた \mathbf{M}_i ($i = 2, \dots, N$) と \mathbf{U} に加え、 \mathbf{Q} を用いて平均画像上に投影する．

3.3.2 PSF 推定

PSF を等方性のガウス分布と仮定して推定を行う．QR コードは白と黒の 2 値で構成されるため、ぼけが発生しているエッジ付近の画素値の変化を PSF の推定に利用することができる．特に「位置検出パターン」は全ての QR コードに共通のパターンで、水平・垂直方向に比較的長いエッジをもつため、これを利用することで安定した PSF の推定ができる．そこで、「位置

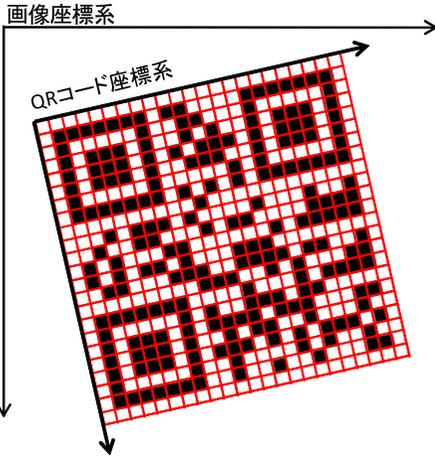


図5 画像座標系とQRコード座標系 ($K=1$ の場合)
Fig. 5 Image coordinate system and QR-code coordinate system ($K=1$).

検出パターン」のエッジ付近からガウス分布の分散 σ を求めることで以下の式で示す PSF を推定する。

$$N(x, y, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3)$$

ぼけのない QR コード画像のエッジ付近の画素値の変化をステップ関数で表現する。また、平均画像は 2 値である QR コードに PSF を適用した画像であると考えられる。そのため、平均画像の「位置検出パターン」のエッジ付近の画素値の変化をガウス分布の累積分布関数で近似することで、ステップ応答とする。ステップ応答の式を以下に示す。

$$f(d, \sigma) = \frac{1}{2} \left(1 + \operatorname{erf}\left(\frac{d}{\sqrt{2}\sigma}\right)\right) \quad (4)$$

ここで、 d はエッジからの距離、 erf は誤差関数である。近似には水平方向と垂直方向の両方のエッジが利用可能であるが、ここでは簡単のため垂直方向のエッジのみを利用するものとする。近似はエッジの左右 $\left[\frac{K}{2}\right]$ (pixel) ずつを利用して、以下の式を最小化する σ を求めることで行う。

$$E = \sum_{p \in \mathcal{P}} (r'_p - f(d, \sigma))^2 \quad (5)$$

ここで、 d はエッジからの画素 p までの距離である。また、 \mathcal{P} はエッジの近似に用いる画素番号の集合であり、重み $w'_j \neq 0$ の画素 j のみエッジの近似に用いる。最小化には、最急降下法 [8] を用いる。次に、ステップ応答を微分することで一次元 PSF を求める。最後

に中心からの距離に対する等方性より二次元 PSF を計算する。

K の決定は、1 段階目の超解像処理における倍率とサブピクセルでの位置合わせ精度に依存する。倍率が高く位置合わせ精度が十分高い場合には大きな K を用いるべきであるが、位置合わせ精度には限界があるため、実際には大きな K を用いる効果は少ない。

提案手法と同様に 1 枚のぼけた画像から PSF を推定する手法は多く提案されている [12], [13]。これらの手法では、画像中のぼけたパターンからぼけのない未知のパターンを推測する必要がある。例えば文献 [13] では、ぼけた画像から検出されたエッジ付近の領域から本来のエッジ形状を推測して、PSF 推定に利用している。これに対して、提案手法が PSF 推定に利用するエッジは、全ての QR コードに共通して存在する既知のパターンであるため、未知のパターンを推測して用いる場合と比較して、より高精度な PSF の推定が期待できる。

3.3.3 拘束付き再構成処理

QR コードが 2 値のグリッド状のモジュールで構成されることを拘束として利用する。再構成処理に以下の二つの制約を加える。

- モジュール内の画素値は等しい (グリッド拘束)
- 全ての画素は白または黒である (2 値拘束)

再構成処理は 2 値拘束を導入した目的関数 $J_2(\cdot)$ を用いる。

$$J_2(\mathbf{h}') = \sum_{j=1}^{H' \times H'} w'_j (\mathbf{b}'_j{}^T \mathbf{h}' - r'_j)^2 + \alpha \sum_{j=1}^{H' \times H'} (h'_j - V_w)^2 (h'_j - V_b)^2 \quad (6)$$

ここで、 \mathbf{b}'_j は推定された PSF のベクトル表現である。また、第 2 項は 2 値拘束の項であり、 V_w は 1 (白画素の値)、 V_b は 0 (黒画素の値) を表す。

この項は超解像画像の画素値が白若しくは黒に近い場合に小さなペナルティを与え、白若しくは黒から遠い場合には大きなペナルティを与える。この項を加えることで、画素値が白 V_w または黒 V_b に近い値となる。 α は誤差項と拘束項の比率を調整する係数である。

この最小化を行う際にグリッド拘束を導入する。QR コードはモジュールの数が決まっているため、 $J_2(\cdot)$ の最小化は画素単位ではなく、モジュール単位でできる。そこで、モジュール中心の画素値をそのモジュール内

の全ての画素の画素値として利用する．これにより最小化の際のモジュール内の画素値は常に等しくなる．最小化にはこの配投影法を用い，初期画像には 1 段階目の超解像画像を QR コード座標系に変換し，同一モジュール内の画素値をモジュール中心の画素値の画素値に設定した画像を用いる．

最後に，文献 [9] に記載されている方法を用いて QR コードのデコードを行う．具体的には，まず，しきい値処理によって画像を 2 値化する．次に，画像上にサンプリンググリッドを設定し，グリッド線の交点上の画素をサンプリングすることによってビット列を得る．そして，得られたビット列に対して誤り訂正と復号処理を行うことによって認識結果の文字列を得る．

4. 実験と考察

以下の二つの認識実験とその結果について述べる．

実験 1：他手法との認識性能の比較

実験 2：入力フレーム数と認識性能の関係の調査

テストデータとして人工的に生成した動画像と実際に撮影した動画像を利用した．使用した QR コードは型番 5 (37×37 モジュール) であり，誤り訂正率を 30% に設定した．QR コードには訂正率が 7%～30% の 4 段階の誤り訂正レベルが存在する．今回の技術は，QR コードを近くで撮影できない状況で，誤り訂正率の限界を高める技術であると考えられるため，最も高い訂正率 30% に設定した．

データセット 1：人工動画像

計算機上で作成した QR コード画像からカメラの撮影による劣化過程をシミュレートして動画像を生成した．具体的には，各モジュールが 13×13 (pixels) となるように作成した QR コードに射影変換とガウスブレンダー ($\sigma = 0 \sim 7$) を加え， $18 \times 18 \sim 63 \times 63$ (pixels) に縮小し，ガウスノイズ ($\sigma = 0 \sim 10$) を重畳して 100 フレームを生成した．様々な文字列を格納した 20 種類の QR コードの画像を用い，各解像度に対して，動画像を 200 本生成した．シミュレーションにより生成した画像の例を図 6 に示す．ここで，動画像中の QR コードの解像度は，各フレームの QR コードの外接方形の平均サイズで表す．

データセット 2：実動画像

紙面に印刷した約 5.8 cm 四方の QR コードをディジタルカメラ Point Grey Flea 3 を使用して 30 fps で撮影したものを入力動画像として用意した．QR コードとほぼ正対するようにカメラを手でもち，約 100 cm

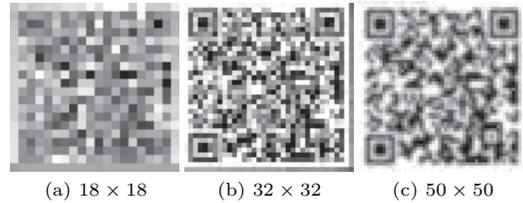


図 6 各解像度 (pixels) の人工動画像フレームの例
Fig. 6 Samples of frames of simulated videos with different resolutions (pixels).

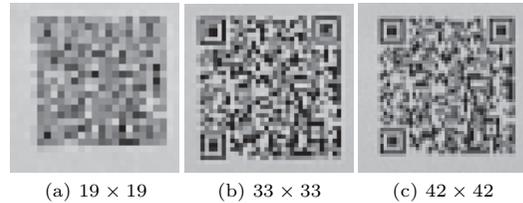


図 7 各解像度 (pixels) の実動画像フレームの例
Fig. 7 Samples of frames of real videos with different resolutions (pixels).

から約 200 cm 離れた位置から撮影した．様々な文字列を格納した 10 種類の QR コードを用い，各解像度に対して，動画像を 100 本撮影した．各動画像のフレーム数は 100 フレームであった．QR コードの解像度は 19×19 , 23×23 , 27×27 , 33×33 , 42×42 (pixels) の 5 種類であった．撮影した動画像の例を図 7 に示す．

4.1 実験 1：他手法との認識性能の比較

4.1.1 実験概要

以下の四つの手法による QR コードの認識性能を評価した．

提案手法：2 値グリッド拘束付き 2 段階超解像処理により得られた超解像画像を認識に用いた．1 段階目の超解像処理の拡大率は 4 倍，PSF として用いるガウス分布の標準偏差は，実動画像を用いた予備実験の結果から 1.4 とした．また，2 段階目の超解像処理の K は，予備実験の結果から 3 とした．超解像画像から認識できれば認識成功とした．ここで， K を決定するための予備実験では， K を変化させたときの人工動画像に対する認識率を解像度ごとに比較した．結果の一部を表 1 に示す．表から，いずれの解像度においても $K = 3$ のときに最も高い認識率が得られていることが分かる．

1 段階目のみ：提案手法の 1 段階目の超解像処理により 4 倍に拡大した画像を認識に用いた．超解像画像から認識できれば認識成功とした．

表 1 パラメータ K と認識率の関係
Table 1 Relationship between parameter K and recognition rate.

| QR コードの解像度 (pixels) | 19.8 | 20.7 | 21.6 |
|---------------------|------|------|------|
| $K = 1$ | 0.21 | 0.52 | 0.84 |
| $K = 3$ | 0.34 | 0.64 | 0.90 |
| $K = 5$ | 0.28 | 0.61 | 0.87 |

単純画像補間: 入力動画の各フレームをバイキュービック補間で 4 倍に拡大した画像を認識に用いた. 1 本の動画の全てのフレームに対して認識処理を行い, 1 フレームでも認識できればその動画は認識成功とした.

拡大なし: 入力動画の各フレームをそのまま認識に用いた. 1 本の動画の全てのフレームに対して認識処理を行い, 1 フレームでも認識できればその動画は認識成功とした.

4.1.2 結果と考察

QR コードの各解像度に対する認識率を図 8 に示す. 単純画像補間と拡大なしでは, 人工動画においては $18 \times 18 \sim 34 \times 34$ (pixels), 実動画においては $19 \times 19 \sim 33 \times 33$ (pixels) の低解像度な場合, 全く認識することができなかった. これに対し, 提案手法では高い認識率が得られた. また, 人工動画においては全ての解像度, 実動画においては 42×42 (pixels) を除く解像度において, 提案手法は他手法の認識率を上回った. これらのことから, 提案手法の有効性を確認した.

実画像を対象とした提案手法 (1 段階目のみ) と単純画像補間の検出率を図 9 に示す. 提案手法は単純画像補間と比較して, 低解像度において高い検出率を得られた. したがって, 柴田らの手法 [3] では, 人手で行われていた QR コードの検出処理を, 提案手法では自動で行うことができることが確認できた. これらのことから, 検出のための 1 段階目の超解像処理の有効性を確認した.

PSF を推定した場合と推定しない (1 段階目の超解像処理で用いた PSF を利用した) 場合を比較した結果の画像例を図 10 に示す. ここで, (a) と (b) の QR コードはモジュール中心の画素値をそのモジュール内の全ての画素の画素値として生成したものである. (a) と (b) を比較すると, PSF を推定することで誤ったモジュールの数が減少していることから, PSF 推定の有効性を確認した. また, (c) に示すように, PSF を推定しない場合はぼけによってエッジが不鮮明となっ

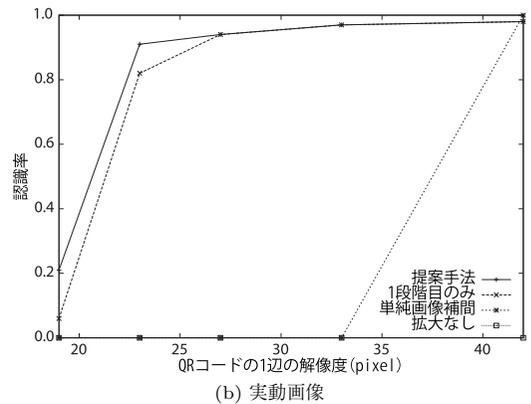
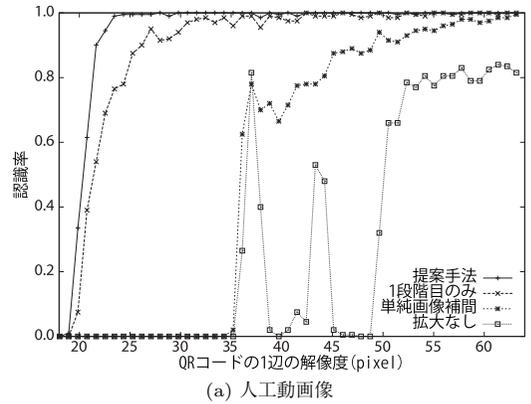


図 8 認識率の比較

Fig. 8 Comparison of recognition accuracy.

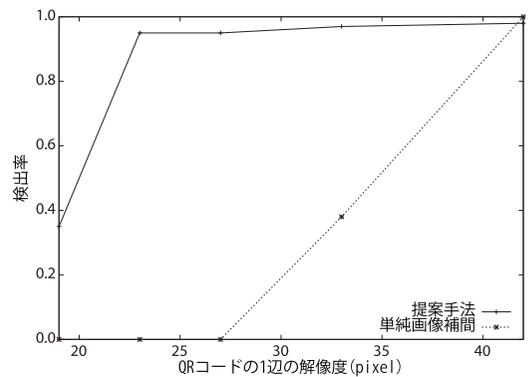


図 9 検出率の比較 (実動画)

Fig. 9 Comparison of detection accuracy (real videos).

ている. それに対し, (d) の PSF を推定した場合はエッジが鮮明になっている. このように, ぼけを正確に推定できたため, 誤りが減少したと考えられる.

図 11 に 2 段階目の超解像処理に各拘束を利用した

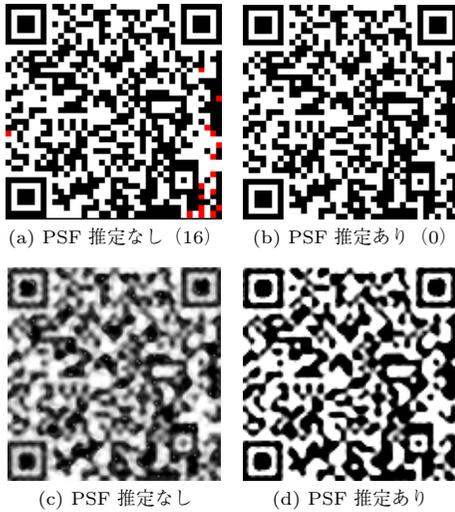


図 10 PSF 推定の効果：2 値グリッド拘束なし。上段は超解像画像から生成した QR コード，下段は超解像画像。赤いモジュールは真値と異なるモジュール。括弧内の数値はそれらの数

Fig. 10 Effect of PSF estimation: Upper figures show QR-codes obtained from super-resolution images and lower ones show the super-resolution images. Incorrect modules are indicated in red and the numbers of them are shown in parentheses.

時に得られた QR コード画像の例を示す。(b) 拘束なしと比較して、(d) 2 値拘束、(c) グリッド拘束を入れることで、誤ったモジュールの数が減少していることが分かる。更に、これらを組み合わせた (e) 2 値グリッド拘束を入れることにより、誤ったモジュールの数が更に減少していることが分かる。このことから、2 値グリッド拘束の有効性を確認した。

4.2 実験 2：入力フレーム数と認識性能の関係の調査

4.2.1 実験概要

入力動画のフレーム数と認識率の関係を調べるため、入力動画のフレーム数を 1~100 枚まで変化させて認識率を求めた。

4.2.2 結果と考察

実働画像を対象とした場合の、入力フレーム数と認識率の関係を図 12 に示す。入力フレーム数が多くなるほど認識率が向上する傾向が見られた。また、いずれの解像度に対しても、入力フレーム数が一定数以上で認識率がほとんど変化しなくなった。これらの傾向は、人工動画を対象とした場合にも見られた。

入力フレーム数が増加することで、高解像度化に有

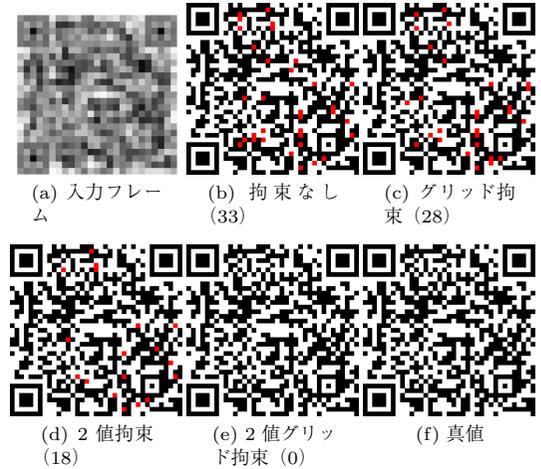


図 11 各拘束条件の効果：赤いモジュールは真値と異なるモジュール。括弧内の数値はそれらの数

Fig. 11 Effect of each constraint condition: Incorrect modules are indicated in red and the numbers of them are shown in parentheses.

用な情報が增加する。そのため、認識率が向上したと考えられる。しかし、入力フレーム数が一定数以上になると新たな情報が得られなくなるため、認識率が変化しなくなったと考えられる。図 12 より、QR コードの大きさが 27×27 , 33×33 (pixels) のときに 10 フレーム、 23×23 (pixels) のときに 50 フレーム以上で認識率はあまり変化しなくなった。この結果から、高い認識率を得るためには、動画中の QR コードの解像度が小さいほど多くの入力フレーム数を必要とすることが分かる。よって、撮影時間と認識性能のトレードオフを考慮して、使用するフレーム数を設定する必要があると考えられる。また、データベースを利用した超解像や 1 枚を入力して解像度を向上させる超解像など、少ない枚数を入力とした手法と組み合わせることで、撮影時間を短縮することができると考えられる。

1 段階目の超解像における画像間の位置合わせ精度は、提案手法の最終結果に大きく影響する要素の一つである。そこで、人工動画の実験において、どれくらいの位置合わせ精度が得られているかを定量的に評価した。具体的には、位置合わせ処理前後における各フレームの基準フレームに対する位置ずれ量を計算し、QR コードの解像度ごとにそれらの RMSE (Root Mean Square Error) を比較することによって位置合わせ誤差を評価した。結果を図 13 に示す。図から、QR コードの 1 辺の解像度が 25 pixel 以上の場

表 2 平均モジュール誤り率 (%)
Table 2 Average module error rate (%).

| QR コードの解像度 (pixels) | 19.8 | 20.7 | 21.6 |
|---------------------|------|------|------|
| 平均モジュール誤り率 (%) | 3.0 | 2.5 | 1.1 |

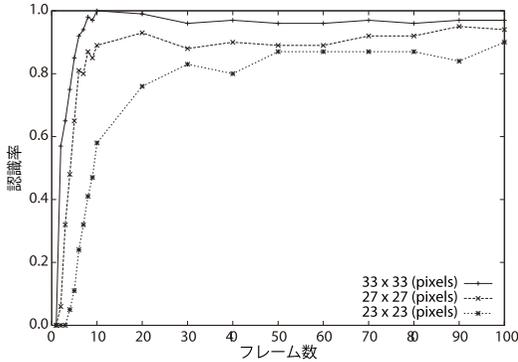


図 12 実験 2 結果：入力フレーム数と認識率の関係（実動画像）

Fig. 12 Result of experiment 2: Relationship between the number of input frames and recognition accuracy.

合には、0.4 pixel 以上の誤差を位置合わせ処理によって 0.1 pixel 以下まで減少できていていることが分かる。

QR コードの誤り訂正率は認識率に大きく関係する。本実験では 30% の訂正率を設定したが、訂正率が低くなるにつれて認識率は低下していくと考えられる。QR コードの誤り訂正はモジュール単位で行われるため、モジュール誤り率（白を黒、あるいは黒を白として誤って認識する割合）が重要である。これに関して、人工動画像に対して提案手法を適用した際のモジュール誤り率を調査した。具体的には、生成された QR コードごとのモジュール誤り率を計算し、それらを解像度ごとに平均した。結果の一部を表 2 に示す。表から、提案手法のモジュール誤り率は、いずれの解像度においても平均で 5% 未満の低い値となっていることが分かる。このことから、誤り訂正率が低い場合でも、効果が期待できる。

5. む す び

本論文では、低解像度 QR コード認識のための 2 値グリッド拘束付き 2 段階超解像手法を提案した。本手法では、QR コードの検出と認識それぞれに対する精度向上を図るため、2 段階の超解像処理を導入した。1 段階目の超解像処理では、QR コードの検出精度向上のため、複数フレーム超解像処理を行うことで高解像

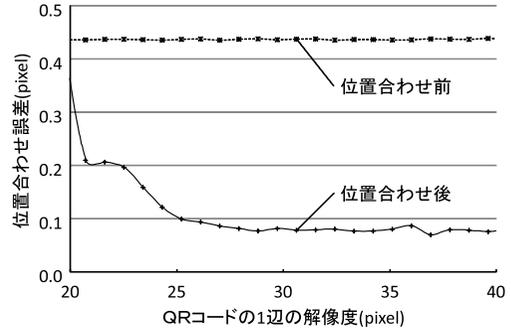


図 13 位置合わせ誤差

Fig. 13 Image alignment error.

度画像を生成した。2 段階目の超解像処理では、QR コードのデコード精度向上のため、QR コードの特徴として、QR コードが 2 値のグリッド状のパターンで構成されることを利用し、これを超解像処理の拘束として用いた。また、全ての QR コードが共通してもつ「位置検出パターン」を利用して、PSF の推定を行った。

人工的に生成した動画像と実際に撮影した動画像を利用して、提案手法による低解像度 QR コードの認識実験を行った。実験の結果、入力動画像そのままでは認識できないほど低解像度の QR コード画像に対して、提案手法は高い認識率を示した。このことから、提案手法の有効性を確認した。

今後の課題として、1 枚からでも解像度の向上が可能な 1 枚超解像との組合せにより、より少ないフレーム数の動画像を入力とした処理を検討したい。また、今回は PSF が QR コード全体で一様として扱ったが、例えば、カメラと QR コードが正対していないような状況では、QR コードが射影的に変形し、PSF が一様ではなくなると考えられる。このような状況での QR コード認識の高精度化についても検討したい。

謝辞 日ごろより熱心に御討論頂く名古屋大学村瀬研究室諸氏に深く感謝する。本研究の一部は、公益財団法人小川科学技術財団助成金、科学技術研究費補助金による。

文 献

- [1] A. Okura, D. Deguchi, T. Takahashi, I. Ide, and H. Murase, "Low-resolution character recognition by video-based super-resolution," Proc. 10th Int. Conf. on Document Analysis and Recognition, pp.191–195, 2009.
- [2] F. Champagnat, C. Kulcsar, and G. Le Besnerais, "Continuous super-resolution for recovery of 1-D im-

age features algorithm and performance modeling,” Proc. 2006 IEEE Computer Society Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition, vol.1, pp.916–926, 2006.

- [3] 柴田剛志, 池谷彰彦, 仙田修司, “2 値及びグリッド拘束に基づく QR コード向け超解像,” 第 13 回画像の認識・理解シンポジウム予稿集, IS3-11, pp.936–941, 2011.
- [4] K. Donaldson and G.K. Myers, “Bayesian super-resolution of text in video with a text-specific bimodal prior,” Int. J. Document Analysis and Recognition, vol.7, no.2–3, pp.159–167, 2005.
- [5] J. Park, Y. Kwon, and J.H. Kim, “An example-based prior model for text image super-resolution,” Proc. 8th Int. Conf. on Document Analysis and Recognition, vol.1, pp.374–378, 2005.
- [6] Y. Kato, D. Deguchi, T. Takahashi, I. Ide, and H. Murase, “Low resolution QR-code recognition by applying super-resolution using a property of QR-codes,” Proc. 11th Int. Conf. on Document Analysis and Recognition, pp.992–996, 2011.
- [7] 田中正行, 奥富正敏, “再構成型超解像処理の高速度アルゴリズムとその精度評価,” 信学論 (D), vol.J88-D, no.11, pp.2200–2209, Nov. 2005.
- [8] 南 茂夫, 河田 聡, 科学計測のためのデータ処理入門, CQ 出版, 2001.
- [9] “二次元コードシンボルー QR コードー基本仕様,” JIS X 0510, 2004.
- [10] 株式会社デンソーウェーブ, “QRcode.com,” <http://www.denso-wave.com/qrcode/>, 2000.
- [11] S. Baker and I. Matthews, “Lucas-Kanade 20 years on: A unifying framework,” Int. J. Comput. Vis., vol.56, no.3, pp.221–255, 2004.
- [12] D. Kundur and D. Hatzinakos, “Blind image deconvolution,” IEEE Signal Process. Mag., vol.13, no.3, pp.43–64, 1996.
- [13] N. Joshi, R. Szeliski, and D.J. Kriegman, “PSF estimation using sharp edge prediction,” Proc. 21st IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition, 2008.

(平成 24 年 4 月 4 日受付, 8 月 13 日再受付)



加藤 祐二 (学生員)

平 22 名大・工・情報卒。平 24 同大学院情報科学研究科博士前期課程了。修士(情報科学)。同年, キヤノン(株)入社, 現在に至る。画像処理, パターン認識に興味をもつ。



高橋 友和 (正員)

平 9 茨城大・工・情報卒。平 12 同大学院理工学研究科博士前期課程了。平 15 同研究科博士後期課程了。博士(工学)。同年より 2 年間名古屋大学大学院情報科学研究科 COE 研究員。平 17 より 3 年間日本学術振興会特別研究員。平 20 より岐阜聖徳学園大学経済情報学部准教授, 現在に至る。画像認識の基礎研究並びにその応用に興味をもつ。画像電子学会会員。



出口 大輔 (正員)

平 13 名大・工・情報卒。平 18 同大学院情報科学研究科博士後期課程了。博士(情報科学)。平 16~18 まで日本学術振興会特別研究員。平 18 名大大学院情報科学研究科研究員, 平 18 名大大学院工学研究科研究員, 平 20~24 まで同大学院情報科学研究科助教, 平 24 より同大情報連携統括本部情報戦略室准教授, 現在に至る。主に画像処理・パターン認識技術の開発とその ITS 及び医用応用に関する研究に従事。CARS2004 Poster Award, CADM2004 大会賞, 平 18 日本医用画像工学会奨励賞, 平 18 日本コンピュータ外科学会講演論文賞, 日本医用画像工学会, 日本コンピュータ外科学会, 日本生体医工学会各会員。



井手 一郎 (正員: シニア会員)

平 6 東大・工・電子卒。平 8 同大学院工学系研究科情報工学専攻修士課程了。平 12 同研究科電気工学専攻博士課程了。博士(工学)。同年国立情報学研究所助手。平 16 名古屋大学大学院情報科学研究科助教, 平 19 より准教授。この間, 平 14~16 総合研究大学院大学数物科学研究科助手併任, 平 16~22 情報・システム研究機構国立情報学研究所客員助教・准教授兼任, 平 17, 18, 19 フランス情報学・統計システム研究所(IRISA)招聘教授。平 22~23 オランダアムステルダム大学情報学研究科上級訪問研究員。パターン認識技術の実応用や映像メディア処理全般に興味をもっている。情報処理学会, 映像情報メディア学会, 人工知能学会, 言語処理学会, IEEE, ACM 各会員。



村瀬 洋 (正員: フェロー)

昭 53 名大・工・電気卒。昭 55 同大学院修士課程了。同年日本電信電話公社(現 NTT)入社。平 4 から 1 年間米国コロンビア大客員研究員。平 15 から名古屋大学大学院情報科学研究科教授, 現在に至る。文字・図形認識, コンピュータビジョン, マルチメディア認識の研究に従事。工博。昭 60 本会学術奨励賞, 平 6 IEEE-CVPR 最優秀論文賞, 平 7 情報処理学会山下記念研究賞, 平 8 IEEE-ICRA 最優秀ビデオ賞, 平 13 高柳記念奨励賞, 平 13 本会ソサイエティ論文賞, 平 14 本会業績賞, 平 15 文部科学大臣賞, 平 16 IEEE Trans. MM 論文賞, ほか受賞。IEEE フェロー, 情報処理学会会員。