

2 値及びグリッド拘束に基づく QR コード向け超解像

柴田 剛志 池谷 彰彦 仙田 修司

NEC 情報メディアプロセッシング研究所 〒211-8666 神奈川県川崎市中原区下沼部 1753

E-mail: t-shibata@hw.jp.nec.com iketani@cp.jp.nec.com s-sendai@ap.jp.nec.com

あらまし 本論文では、2 値及びグリッド拘束に基づく QR コードなど 2 次元コード向け超解像方式を提案する。超解像処理は不良設定問題であり、適切な拘束条件を設定し解を一意に決定する必要がある。提案手法では、2 次元コードのセルパタンが、1) 正方グリッド状に配置されており、2) 白か黒の 2 値であることに着目し、これら 2 つを拘束条件として用い、MAP 推定により超解像画像を得る。QR コードを用いた実画像実験により、複数枚の入力画像を用いることで、超解像処理を用いない場合に比べ、エラー数を約 1/16 に低減でき、また、入力画像が一枚の場合であっても、エラー数を約 1/11 程度に低減できることを確認した。

キーワード QR コード, 超解像, 2 値拘束, グリッド拘束, 正則化, MAP 推定

1. はじめに

QR コードなどに代表される 2 次元コードは、文字や数字などの情報を記録でき、様々な用途に利用されている。しかし、撮影された 2 次元コード画像の解像度が足りない場合、2 次元コードリーダーによる認識が不可能であるという問題があった。このような問題を解決する方法のひとつとして、複数の低解像画像から鮮明な高解像画像を復元する超解像技術[1]を用いる方法がある。

超解像技術の枠組みのひとつに再構成型超解像と呼ばれるものがあり、最尤推定法(ML 法)[2]、事後確率最大法(MAP 推定)[3]、凸射影法[4]などの方法が知られている。これらの手法は、不良設定問題であるという共通の性質をもつ。すなわち、与えられた条件からだけでは解(超解像画像)が一意に定まらない。そこで、超解像画像に対する何らかの事前知識を拘束条件として用い、解を拘束することで、超解像画像を一意に定める必要がある。例えば、超解像画像にノイズなどの高周波成分が少なく滑らかであるなど、超解像画像に広く共通する性質を事前知識として用いることが一般的である。

しかしながら、このように広く共通する性質に基づく拘束条件では、解を適切に拘束することができず、超解像効果も限定的である。超解像の対象が明確である場合には、その対象の性質を積極的に利用し、より適切に解を拘束することで、超解像画像の復元精度が向上することが知られている。例えば、対象が 2 値であるという事前知識を拘束条件として用い、文字[5][6]や QR コード画像[7]を復元する方法が提案されている。

提案手法では、対象となる 2 次元コード画像が 2 値であるという特徴に加え、セル(2 値の情報を表す最小単位)の数が決まっており正方グリッド状に配置されていることに着目し、これらを事前知識として解を拘束することで 2 次元コードの復元を行う超解像方式を提案する。提案手法を用いることで、超解像を用いない場合に比べ、2 次元コードのセル誤り率を大幅に低減可能となる。

本稿は、以下のように構成される。まず、2 章で MAP 推定に基づく再構成型超解像について述べる。次に、3 章で、提案手法について述べ、4 章で、シミュレーション画像及び実画像を用いた実験を行い提案手法の有効性を示し、5 章でまとめと今後の課題について述べる。

2. MAP 推定に基づく再構成型超解像

本章では MAP 推定に基づく再構成型超解像について述べる。図 1 に示すように、 k 枚の入力画像と出力する超解像画像の各画素の輝度値をラスタスキャン順に並べた縦ベクトルを、それぞれ \mathbf{y}_i ($i=1\cdots k$) 及び \mathbf{x} と表すこととする。また、 \mathbf{x} から \mathbf{y}_i への劣化過程を関数 \mathbf{h}_i で表す。この時、MAP 推定に基づく再構成型超解像では、以下のエネルギー関数 $E(\mathbf{x})$ を最小にする \mathbf{x} を求めることで超解像画像を得る。

$$E(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^k \|\mathbf{y}_i - \mathbf{h}_i(\mathbf{x})\|^2 + \alpha c(\mathbf{x}) \quad (1)$$

ここで、第 1 項は、入力画像 \mathbf{y}_i と、超解像画像 \mathbf{x} に劣化過程 \mathbf{h}_i を加えたものとの誤差の総和を表す誤差項で、劣化過程 \mathbf{h}_i は、以下のように線形演算にて表すのが一般的である。

$$\mathbf{h}_i(\mathbf{x}) = \mathbf{D}\mathbf{B}\mathbf{M}_i\mathbf{x} \quad (2)$$

ここで、 \mathbf{D} 、 \mathbf{B} はそれぞれ、ダウンサンプリング、ブラーを表す行列であり、通常はこれらの行列をあらかじめ仮定として与える。 \mathbf{M}_i は、 i 枚目の低解像画像の座標と超解像画像の座標との間の変換を表す行列であり、各低解像画像の座標と超解像画像の座標との位置合わせを前処理として行い、その結果から算出する。一般的には、超解像画像の座標は、入力画像のどれか 1 枚の画像の座標を基準として用いる。

一方、第 2 項は、超解像画像 \mathbf{x} が満たすべき拘束条件を表す正則化項であり、 c は正則化のための拘束条件を表す関数、 α は誤差項と正則化項とのバランスを取るた

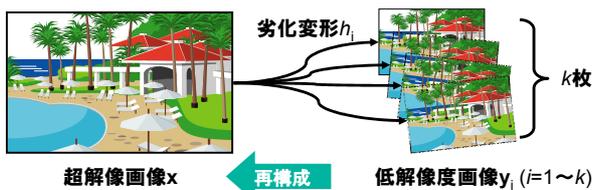


図 1 複数枚超解像の概念図

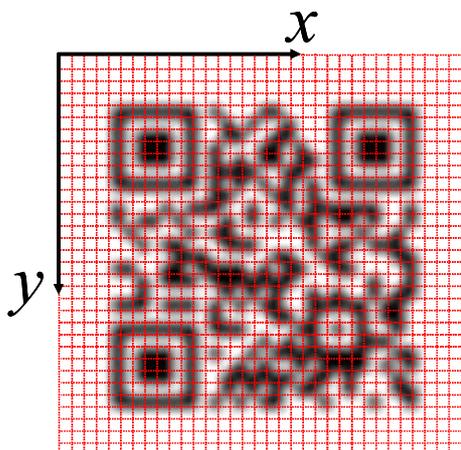


図 2 2次元コード(QRコード)のグリッド拘束

めの重み係数である。E(x)を最小にする x を求めることで、複数の入力画像とできるだけ一致しつつ正則化の条件も満たす x が求められる。

3. 提案手法

前章までで、MAP 推定を用いた一般的な再構成型超解像の定式化について述べたが、本章では、これをどのように2次元コードに特化させるかについて述べる。まず、2次元コードの性質として以下の2点に着目する。

- (1) セルは、数が決まっており、正方グリッド状に配置されている。
- (2) 白か黒の2値である。

以下では、(1)をグリッド拘束、(2)を2値拘束と呼ぶ。以下、これらの拘束の詳細について説明する。

3.1. グリッド拘束

超解像画像中の同一セル内に含まれる画素の画素値は、同一の画素値をとらなくてはならない。そこで、図 2に示すように、超解像画像 x の画素数をセル数と一致させる。超解像画像の画素数を、2次元コードのセルパターンを表現可能な最小限の画素数まで小さくし、解の自由度を強く拘束することで、2次元コードの復元の精度向上を測る。具体的には、図 2に示すような2次元コードのマトリックスの横縦が、それぞれ x 軸 y 軸と一致した座標(以下、グリッド座標と呼ぶ)にて超解像画像を生成する。この時、(2)中の M_i は、i 枚目と 1 枚目の低解像画像間の

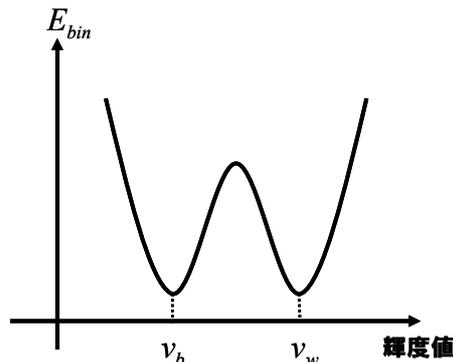


図 3 1画素あたりの2値拘束のエネルギー

座標変換 W_i と、1 枚目の低解像画像の座標とグリッド座標との座標変換 W_{grid} を用い、以下のように表せる。

$$M_i = W_i W_{grid} \quad (3)$$

したがって、誤差項は(1)と(3)より以下のように表せる。

$$E_{data} = \sum_{i=1}^k \|y_i - DBW_i W_{grid} x\|^2 \quad (4)$$

3.2. 2値拘束

次に2値拘束について述べる。2次元コードの各セルは2値であるため、超解像結果の出力である x も最終的には2値画像でなくてはならない。白の輝度値を v_w 、黒の輝度値を v_b とするとき、このような拘束を満足するためには、エネルギー関数 E_{bin} は、 v_w 及び v_b に極小値を持つ関数であることが必要である。提案手法では、この条件を満足するエネルギー関数 E_{bin} として図 3に示すような概形をもつ、以下のものを用いた。

$$E_{bin} = \sum_{j=1}^n (x_j - v_w)^2 (x_j - v_b)^2 \quad (5)$$

ここで、 x_j は出力画像 x の各要素であり、入力画像の輝度値を 0~1 となるように補正し、 $v_w=1$ 、 $v_b=0$ とした。

3.3. 2次元コード超解像の定式化

以上の2つの拘束を用いて、2次元コードに特化した再構成型超解像のためのエネルギー関数 $E(x)$ を以下のように定義する。

$$E(x) = E_{data} + \alpha E_{bin} \quad (6)$$

ここで、第1項は誤差項である。第2項は2値拘束であり、重み係数 α がかけられている。

エネルギー $E(x)$ を共役勾配法により最小化させ超解像画像を得る。共役勾配法では、正確な解を得るためには、初期値を適切に設定することが重要である。本手法では、2次元コードのセルの一部(以下、マーカー)は固定値であることに着目し、固定値の部分は、各セルの対

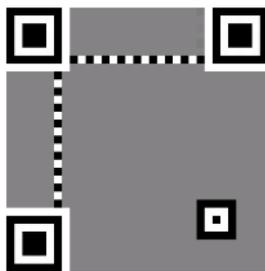


図 4 QR コードの固定パターン (灰色以外)



図 5 擬似的な QR コードの生成

応する値(白色=1.0、黒色=0)を初期値とする。例えば、2次元コードが QR コードである場合、固定パターンは図 4 のようになる。図 4は、33×33 セルの場合であるが、セル数によってマーカー位置は異なり、あらかじめ定められた規則に基づいて配置されている[9]。その他のセルについては、各入力画像を \mathbf{M}_i^{-1} にて変形し、これらを平均した画像の各画素の画素値を初期値として与える。

4. 実験

まず、提案手法に用いた 2 つの拘束の効果を評価するためにシミュレーション実験を行った。次に、位置合わせ誤差など、拘束条件の効果とは無関係に復元精度を劣化させる要因が存在する環境での性能を評価するため、実画像を用いた実験を行った。以下では、2次元コードとして QR コードを実験に使用した。

4.1. シミュレーション実験

拘束条件の効果とは無関係に復元精度を劣化させる要因として、(1)位置合わせ処理の計算誤差により発生する座標変換 \mathbf{W}_i 及び \mathbf{W}_{grid} の誤差、(2)実際の劣化過程と仮定した劣化過程 \mathbf{B} との誤差、などが挙げられる。これらの要因が排除された環境で提案手法の性能を評価するためにシミュレーションによる実験を行った。本節では、まず、シミュレーション実験の概要について述べた後、次に実験結果について述べる。

4.1.1. シミュレーション実験の概要

シミュレーション実験にて使用する低解像画像は、まず擬似的な QR コード (以下、擬似 QR コード) を作成し、次に擬似 QR コードの劣化過程をシミュレーションすることによって生成した。擬似 QR コードは、擬似 QR コ



拡大&回転&ずらし (10倍、最大5度、1画素) ぼかし&縮小 ノイズ重畳 ($\sigma=5$ 、 $m=27^2\sim 37^2$) (20db)

図 6 劣化した入力画像の生成手順

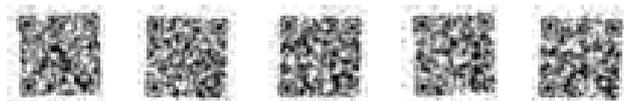


図 7 画素数 $m=27\times 27$ の生成例

ードのセル数を決め(今回は周囲 4 セルの余白を除いて 33×33 セルとした)、ランダムに 2 値画像を作成したのち、マーカー部分を固定値に置き換えることで生成した。このようにして生成した擬似 QR コードの例を図 5 に示す。全セル数は 33×33=1089 であるが、固定値であるマーカー部分を除いたセル数は 838 である。

劣化過程は、図 6 に示すように、擬似 QR コード画像を 10 倍に拡大後、ランダムに回転・ずらすことによって微少な位置ずれを発生させ、次に標準偏差 5.0 のガウシアンフィルタによるぼかし及び縮小を行った後、ノイズ (30[dB]) のガウシアンノイズ) を重畳することでシミュレーションした。低解像画像中、擬似 QR コードの余白部分を除いた外接矩形の大きさが 27×27 画素の場合の生成された低解像画像の一例を図 7 に示す。

本実験では、入力画像枚数と超解像画像の画質との関係を調べるため、低解像画像は同一の擬似 QR コード 1 パターンごとに 20 個ずつ生成した。また、擬似 QR コードのパターンのばらつきよる誤差を押さえるため、実験には 100 種類の擬似 QR コードを用いた。さらに、画素数と超解像効果との関係を調べるため、余白部分を除いた外接矩形の大きさが 27×27 画素、32×32 画素、37×37 画素の画素数を持つ 3 種類の低解像画像を用い実験を行った。低解像画像間の座標変換 \mathbf{W}_i 、1 枚目の低解像画像の座標とグリッド座標との座標変換 \mathbf{W}_{grid} は、生成の際に使用した変形と同等のものを用いた。提案手法との比較のために、以下 3 種類の方法についても同様の実験を行った。

1) 超解像なし: 各入力画像を \mathbf{M}_i^{-1} にて変形した後、これらを平均することで「超解像なし」画像を生成。

2) 2 値拘束のみ: グリッド座標の代わりに 1 セル当たり 2×2 画素の画素を持つ座標と 1 枚目の入力画像の座標との変換 $\tilde{\mathbf{W}}_{grid}$ を \mathbf{W}_{grid} の代わりに使用し超解像画像を生成。

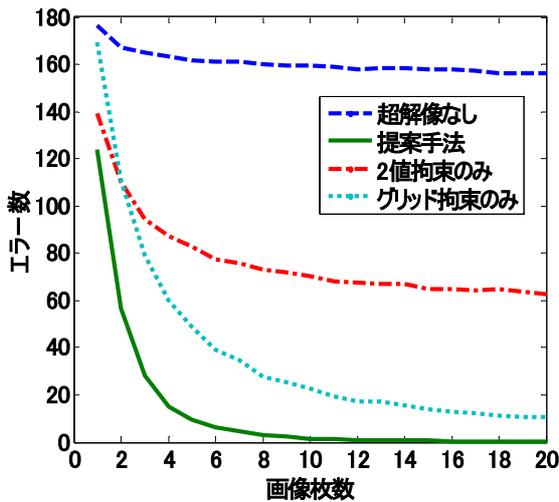


図 8 2 種類の拘束条件の効果と枚数の関係
(シミュレーション実験、画素数 $m=27 \times 27$)

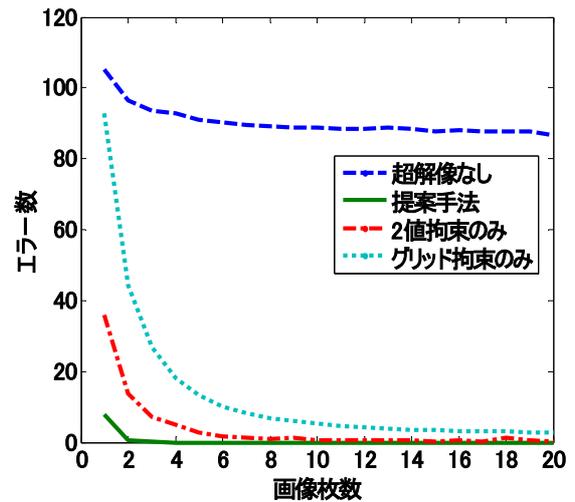


図 10 2 種類の拘束条件の効果と枚数の関係
(シミュレーション実験、画素数 $m=37 \times 37$)

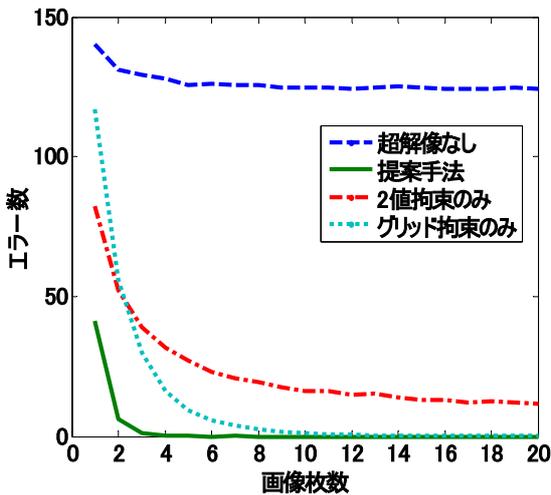


図 9 2 種類の拘束条件の効果と枚数の関係
(シミュレーション実験、画素数 $m=32 \times 32$)

3)グリッド拘束のみ：式(6)の $\alpha=0$ として、超解像画像を生成

4.1.2. 実験結果

2 値拘束及びグリッド拘束を利用する・しない場合の性能を測定した結果を図 8、図 9 および図 10 に示す。エラー数とは、固定値以外の 838 セル中、各画像を閾値 0.5 にて 2 値化した場合に正解と異なるセルの数であり、生成した疑似 QR コード 100 種類での平均値である。「超解像なし」の結果は、複数の低解像画像の画素値を平均しているためにノイズ除去の効果があり、若干ではあるが画像枚数を増やすとエラーが削減されている。「2 値拘束のみ」「グリッド拘束のみ」の結果は、「超解像なし」の場合に比べエラー数が削減されているが、どちらかの拘

束のみでは、特に入力画像の画素数が小さい場合には、エラー数の削減効果が小さい。それに対して、提案手法では、両方の拘束を用いることで、入力画像枚数が増えるに従って、上述の 3 つの方法に比べ、さらにエラーを削減可能である。処理結果の一例として、画像枚数が 7 枚、入力画像の画素数が 27 画素である場合の、「超解像なし」「2 値拘束のみ」「グリッド拘束のみ」及び「提案手法」における結果と真値との誤差を図 11(a), (b) (c)及び (b)に示す。図 11 より、提案手法を用いることで、グリッド拘束及び 2 値拘束を単独で用いた場合に比べ高精度な復元が可能であることがわかる。この原因は、図 11(a), (b) 及び(c)より、2 値拘束により新たに正しく復元されるセルと、グリッド拘束により新たに正しく復元されているセルは異なるが、提案手法では、これらの拘束を同時に用いるため、どちらかの拘束により正しく復元されたセルは、提案手法においても正しく復元されているためと考えられる。以上の結果から、提案手法による拘束の効果を確認された。

また、図 10 より、入力画像の画素数がセルサイズに比べ大きい場合には、提案手法を用いることで、画像枚数が少ない場合でも、2 つの拘束を用いることでエラー率を低減可能であることがわかる。実際、画像枚数が 1 枚であっても、エラー率を「超解像なし」に比べ約 1/10 程度に、「グリッド拘束のみ」及び「2 値拘束のみ」の場合に比べ約 1/5 程度に削減できている。



図 11 各拘束条件の効果
(シミュレーション実験、画素数 $m=27 \times 27$ 画像枚数 $k=7$)



図 12 低解像画像及び真値

4.2. 実画像実験

次にシミュレーション実験では排除されていた誤差要因が存在する場合における提案手法の有効性を検証するために実画像実験を行った。入力画像は、紙面上に印刷された擬似 QR コードをカメラで撮影したものを用いた。擬似 QR コードは、シミュレーション実験と同様の方法で生成した。擬似 QR コードのパターンの種類は 10 種類、各パターンについて 2 種類の異なる解像度にて各 50 枚ずつ、すなわち 10 種類 \times 2 種類 \times 50 枚の計 1000 枚の低解像画像を撮影した。このとき、カメラが、擬似 QR コードに対しほぼ正対した位置にあるようにし、手持ちで微小な平行移動を与えながら撮影した。異なる解像度 4 種類の各画像において、擬似 QR コードの余白部分を除いた外接矩形の大きさはそれぞれ 33×33 [画素]、 43×43 [画素]である。入力画像と真値の一例をそれぞれ図 12(a), (b) に示す。

なお、本実験において、 \mathbf{W}_i の算出には Lucas-Kanade 法を用いた[8]。一方、 \mathbf{W}_{grid} は、擬似 QR コードの位置検出

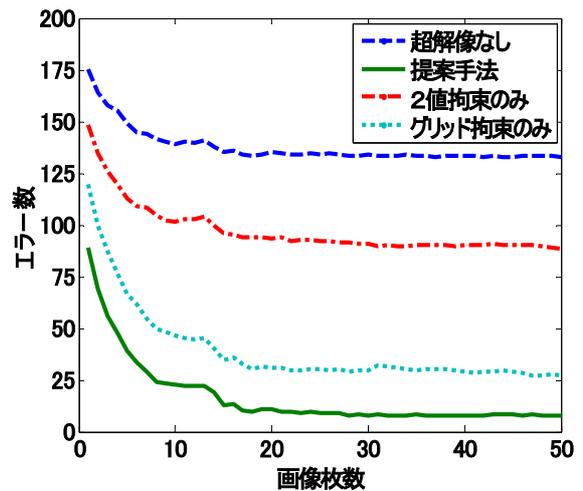


図 13 2種類の拘束条件の効果と枚数の関係
(実画像実験、画素数 $m=33 \times 33$)

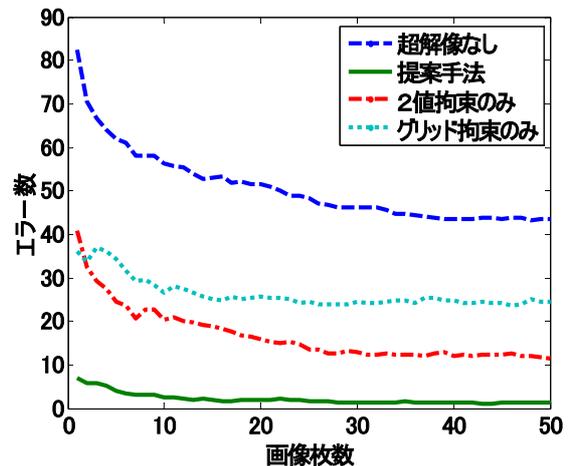


図 14 2種類の拘束条件の効果と枚数の関係
(実画像実験、画素数 $m=43 \times 43$)

パターン及び位置合わせパターンの位置座標を手動で与え決定した。以下では、提案手法との比較のために、シミュレーション実験と同様、比較のために、3 種類の方法についても同様の実験を行った。

4.2.1. 実験結果

シミュレーション実験と同様に、2 値拘束及びグリッド拘束を利用する・しない場合の性能を測定した結果を図 13 および図 14 に示す。また、超解像結果の一例として、画像枚数が 50 枚、入力画像の画素数が 33 画素である場合の、「超解像なし」「2 値拘束のみ」「グリッド拘束のみ」及び「提案手法」における真値との誤差を図 15(a), (b) (c) 及び(b)に示す。図 13 および図 14 より、シミュレーション実験と同様、実画像実験においても「超解像なし」の場合に比べ、「2 値拘束のみ」「グリッド拘束のみ」はエラー



図 15 提案手法における超解像結果

(実画像実験、画素数 $m=33 \times 33$, 画像枚数 $k=50$)

一数が削減されており、「提案手法」は、これら2つの拘束を単独で用いる場合よりもさらに削減されている。実際、低解像画像の画素数が 33×33 画素の場合、「超解像なし」のエラー数は、50枚の入力画像を用いても平均125セル以上であるのに対し、提案手法では平均8セル以下であり、約1/16にエラー数を低減できている。また、画素数が 43×43 画素の場合では、入力画像が1枚のみであってもエラー数は平均7セル以下であり、「超解像なし」の場合にはエラー数が平均82.4セルであることから、約1/11程度に低減できている。以上より、位置合わせによる誤差などが存在する場合においても、提案手法が有効であることがわかる。

5. まとめと今後の課題

本論文では、2次元コードの特徴として、2次元コードのグリッド拘束及び2値拘束を拘束条件として用い、MAP推定により超解像処理を行う手法を提案した。シミュレーション実験により、これらの拘束条件の性質を検証した。また実画像実験により、提案手法により、複数枚の入力画像を用いることで、超解像処理を用いない場合に比べ、エラー数を約1/16に低減でき、また、入力画像が一枚の場合であっても、同様のエラー数を約1/11程度に低減できることを確認した。今後の課題は、位置検出パターン及び位置合わせパターンの自動検出がある。

文 献

- [1] C. Park, K. Park, M. Kang, "Super-resolution image reconstruction: a technical overview," *Signal Processing*, vol.20, no.3, pp.21-36, 2003.
- [2] B. Tom and A. Katsggelos, "Reconstruction of a high resolution image by simultaneous registration, restoration, and

interpolation of low resolution images," *Proc. of Image Processing*, vol.2, pp.539-542, 1995.

- [3] R.R. Schulz and R.L. Stevenson, "Extraction of high-resolution frames from video sequences," *Proc. of Image Processing*, vol. 5, pp. 996-1011, 1996.
- [4] H. Stark and P. Oskoui, "High resolution image recovery from image plane arrays, using convex projections," *Journal of the Optical Society of America A*, vol. 6, pp.1715-1726, 1989.
- [5] K. Donaldson and D. K. Myers, "Bayesian super-resolution of text in video with a text-specific bimodal prior," *International Journal on Document Analysis and Recognition*, vol.7, pp.159-167, 2005.
- [6] P. D. Thouin and C.-I. Chang, "A method for restoration of low-resolution document images," *International Journal on Document Analysis and Recognition*, vol.2, pp.200-210, 2000.
- [7] 加藤祐二・出口大輔・高橋友和・井手一郎・村瀬洋, "2値パターン拘束と超解像を組み合わせた低解像度 QR コード認識", 電子情報通信学会 パターン認識・メディア理解研究会, vol.110, no.187, PRMU2010-63, pp.63-68, 2010.
- [8] B. Lucas and T. Kanade. "An iterative image registration technique with an application to stereo vision." *Proc of International Joint Conference on Artificial Intelligence*, pp. 674-679, 1981.
- [9] <http://www.qrcode.com/>