

超解像処理を利用した画質改善技術に関する研究

飯島 俊匡, 高橋 裕之, 橋場 参生

Technique of Improving Image Quality Using Super-Resolution Technology

Toshimasa IJIMA, Hiroyuki TAKAHASHI, Mitsuo HASHIBA

抄 録

画像を利用した計測や評価技術は、工場の生産ラインや農作物の品質評価、監視カメラを用いたセキュリティなど様々な産業分野で利用されている。これらの画像利用技術では、用いる画像の画質が良いほど得られる情報量が増え、精度が高くなるため、その利用価値が高まる。しかし、撮影機材のコストや利用環境が原因で低画質な画像しか得られない場合がある。そこで、低解像度の画像から高解像度の画像を推定する超解像処理などを利用することで、映像の画質を改善する技術の開発に取り組んだので報告する。

キーワード：超解像, レジストレーション, サブピクセルマッチング, 反復逆投影 (IBP) 法

Abstract

Measurement and evaluation techniques using the image are used in various industrial fields as factory production lines, quality evaluation of agricultural products, security cameras, among others. In these techniques, the amount of information and the accuracy, the more it uses a good image, the more obtained increase. Therefore, the more useful it becomes. However, due to cost of cameras and usage environment, it may only get low quality images. Thus, we report the working on improving the quality of the image by using super-resolution technology that estimates high-resolution images from low-resolution images.

KEY-WORDS : Super-resolution, Image registration, Subpixel matching, Iterative backward projection

1. はじめに

近年のカメラデバイスの低価格化などにより、様々な産業分野で画像を利用した計測や評価技術が利用されている。例えば、工業分野では工場の生産ラインにおける部品の位置決めや検品などであり、農業分野では生産物の品質評価やリモートセンシングなど、セキュリティ分野では監視カメラを利用した防犯や犯罪捜査などである。こうした産業における画像利用技術では、用いる画像の画質が良いほど得られる情報量が増え、精度が高くなるためその利用価値が高まる。

しかし、画質はカメラの性能や撮影条件などに依存するため、低画質な映像しか得られない場合があり、その改善技術が求められている。

特に、カメラで撮影される映像の画質に大きく寄与する画像の解像度は、CCDやCMOSなどの撮像素子の密度に依存しているが、一般的に高解像度なカメラは高価であるため、導入が困難な場合がある。また、設置上の問題から既存の設備を更新することが困難な場合や、既に撮影された映像を高画質化したいという要求も強い。例えば、セキュリティ分野では監視カメラで撮影された人物の顔や自動車のナンバーブ

事業名：一般試験研究

課題名：超解像処理を利用した画質改善技術に関する研究

レートなど、不明瞭な映像を鮮明化するニーズが非常に強い。

一方、映像を表示するモニタデバイスもデジタルハイビジョン放送への対応などにより、近年大型化および高解像度化が進んでおり、既存の低解像度の映像コンテンツを拡大表示したときの画像の荒さや不鮮明さが目立つようになっている。

また、モニタデバイスは将来的にさらに高解像度化が進むと見込まれており、高品位に映像を拡大する技術がますます重要になる。

このように、映像を高解像度化して画質を改善することに対する要求は強く、その解決策が求められている。そこで本稿では超解像処理¹⁾を利用することで、低画質な映像を高画質化する技術に取り組んだので報告する。

2. 解像度変換処理

2.1 補間処理

画像は格子状に離散的に配置された画素により構成されている。その画像を拡大、すなわち画素数を増やす解像度変換を行う場合、元の画像に存在しない画素のデータを生成する必要がある、従来より用いられてきた手法として補間処理がある。一般的な補間処理には、最近傍 (nearest neighbor) 法、双線形補間 (bilinear interpolation) 法、双三次補間 (bi-cubic interpolation) 法、lanczos法などの内挿が用いられる。しかし、単純な内挿だけでは画像の輪郭や模様など、コントラストが高い部分にジャギー (階段状のギザギザ) が生じ、画質が劣化してしまう。また、補間処理により解像度の高い画像を生成しても、標本化定理によりナイキスト周波数を越える周波数成分は得られないため、画像に「ぼけ」が生じてしまうという問題がある (図1)。

2.2 超解像処理

それに対し超解像処理は、空間的および時間的な周辺領域から高解像度の画像を推定する手法であり、ジャギーや「ぼ

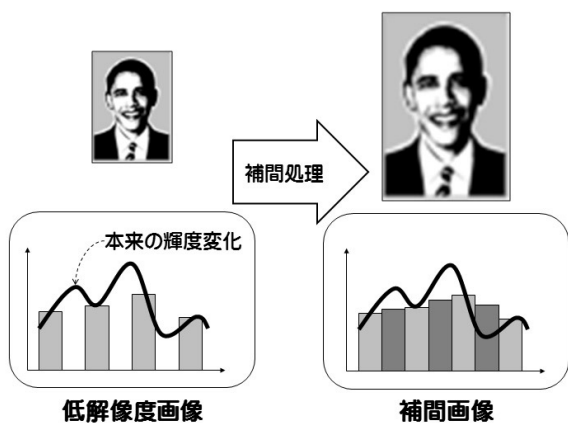


図1 補間処理の例

け」の少ない画像の生成が可能である。超解像処理の方式としては、1枚の低解像度画像から高解像度の画像を推定する単一フレーム型と、複数枚の画像から推定する再構成型に大別される。

2.2.1 単一フレーム型超解像処理

単一フレーム型超解像処理では補間処理同様、標本化定理により制限される周波数以上の高周波成分を復元することは原理的に不可能であるため、撮影対象に対する事前の知識等を利用する。その代表的な手法として、事例ベース方式²⁾、フラクタル方式³⁾などがある。

事例ベース方式は、あらかじめ訓練画像から低解像度画像を生成し、低周波成分と高周波成分との対応事例を画素パッチとしてデータベース化しておき、そのデータベースを用いて高解像度の画像を推定する手法である。この場合、十分な画質の画像を得るためには、非常に大きなデータベースを用意する必要があり、記憶容量やデータベース検索の処理量が膨大になるという課題を持つ。

また、フラクタル方式は、同一画像上の自己合同性に着目して高解像度化する手法である。例えば、被写体の輪郭などのエッジ部分は、そのエッジに沿って同じような輝度変化が連なっていることが多い。つまり、エッジの一部に類似した領域が近隣に複数存在することから、この自己合同な部分の画素値を近くにある別の標本値として用いることで精密なエッジを再現でき、「ぼけ」の少ない画像の生成が可能となる (図2)。

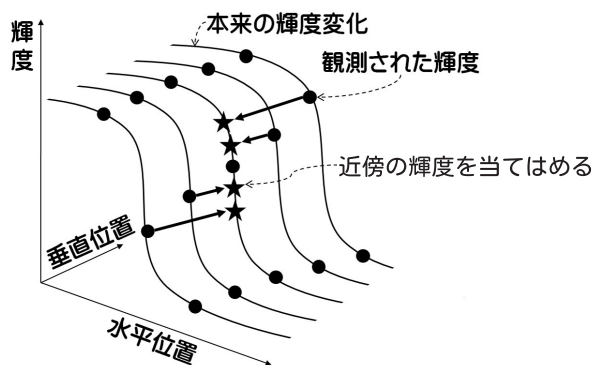


図2 単一フレーム型超解像処理 (フラクタル方式)

2.2.2 再構成型超解像処理

再構成型超解像処理は、カメラに入力され観測した低解像度画像が生成されるまでの過程をモデル化し、その逆過程を辿ることで高解像度化を実現する手法である。初期には画像の周波数領域に着目した手法から始まり、近年は空間領域を用いた再構成型超解像処理の手法が多く提案されている。

周波数領域方式は、連続信号の高周波成分はナイキスト周波数以下で標本化された離散信号のエイリアシングとして現

れることから、標本化時のエイリアシングを含む低解像度画像を複数枚用いることで、それらの高周波成分を復元する方法である。この方式は比較的計算量が少ないため高速に超解像処理できる利点はあるが、低解像度画像の位置ずれが平行方向である場合に限定される。

また、空間領域を用いた再構成型超解像処理の代表的な手法として、反復逆投影 (IBP: Iterative Backward Projection) 法^{4, 5)}, MAP (Maximum A Posteriori) 法⁶⁾, POCS (Projection Onto Convex Sets) 法⁷⁾などがある。

IBP法は、推定した低解像度画像と観測した低解像度画像の誤差を高解像度化し、推定した高解像度画像に逆投影する操作を繰り返すことで超解像処理を行う手法である。MAP法は、ベイズ推論に基づいた確率モデルを用いる手法であり、高解像度画像と観測画像との間の誤差を表す項に正則化項を付け加えた物を確率表現し、事後確率を最大化する最適化問題として高解像度画像の推定を行う。POCS法は、高解像度画像と低解像度画像の画素値に関して連立方程式を作成し、それを逐次的に解くことにより高解像度画像を推定する手法である。

3. IBP法

本研究では、計算量が多いがアルゴリズムが比較的簡単で実用性の観点で優れているとされる再構成型超解像処理であるIBP法を採用した。

IBP法は、入力された映像が標本化および離散化され、低解像度の画像として観測されるプロセスをモデル化し、その逆過程を辿ることで高解像度の画像を得る。その逆過程では、複数枚の低解像度画像を1ピクセル以下(サブピクセル)のレベルで位置合わせをするレジストレーション(Registration)処理と、位置合わせした画像を重ね合わせた時に生じる「ぼけ」の影響を取り除く鮮明化(Deblurring)処理の2つのプロセスを行う(図3)。

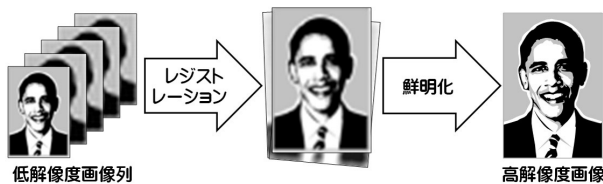


図3 再構成型超解像処理

3.1 観測モデル

図4は、高解像度画像に動き、ぼけ、エイリアシング、ノイズなどが加わり、低解像度画像が生成される過程をモデル化したものである。このモデルに基づいて低解像度画像と高解像度画像の関係を記述する。

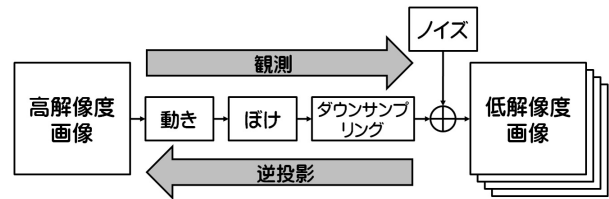


図4 観測モデル

高解像度画像を X 、観測した低解像度画像を y_k とする。 k は観測のインデックスを示し、 $k \in \{1, 2, \dots, N\}$ である。すると観測モデルは次のように定式化できる。

$$y_k = DB_k M_k X + n_k \quad (1)$$

ただし、 D はダウンサンプリング、 B_k はぼけ、 M_k は動きを表す行列であり、 n_k は低解像度画像に含まれるノイズを表すベクトルである。この $DB_k M_k$ をまとめて A_k として表記すると次式のようになる。

$$y_k = A_k X + n_k \quad (2)$$

3.2 レジストレーション

レジストレーションは2枚の画像の位置合わせ、すなわち変位を求める処理であり、領域マッチングやオプティカルフロー推定などを利用する。デジタル画像においては、一般的な領域マッチングの精度はピクセル単位に限定されるため、ここでは画素の分解能以上の精度を得るためサブピクセルマッチング^{8, 9)}を用いる。

サブピクセルマッチングは多数の手法があるが、ここでは一般的な領域マッチングを用いてピクセル単位精度で画像間の一致度評価値を求め、それを補間することでサブピクセル単位のマッチング位置を求める手法を採用した。この手法は他の手法に比べ計算量が少ないという利点がある。本研究では一致度評価値に輝度差の2乗和(SSD: Sum of Squared Difference)、補間方法に放物線を組み合わせたSSDパラボラフィッティングを用いた(図5)。

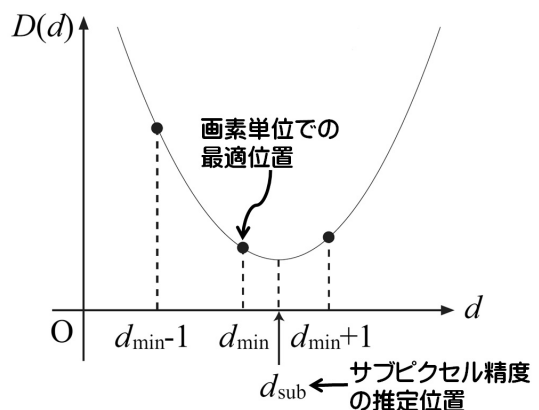


図5 SSDパラボラフィッティング

比較対象の画像を $I_1(x)$, $I_2(x)$, 変位を d , 比較対象の領域を W とすると, SSDの値 $D(d)$ は以下の式で表される。

$$D(d) = \sum_{x \in W} (I_1(x) - I_2(x+d))^2$$

このとき $D(d)$ を最小とする変位 d_{\min} がピクセル単位精度での最適値である。ここからパラボラフィッティングによりサブピクセル精度での変位を計算する。

今, 簡単のために一次元方向で考える。 d_{\min} でのSSDを $D(0)$ とし, d_{\min} の両隣の画素位置でのSSDを求め, それぞれ $D(-1)$, $D(1)$ とする。 d_{\min} の近傍では $D(d)$ は放物線を描くとすると, $D(-1)$, $D(0)$, $D(1)$ からその係数が求まる。すると $D(d)$ が最小となる変位 d_{sub} が直ちに求まり, サブピクセル精度での推定値となる。

$$d_{\text{sub}} = \frac{D(-1) - D(1)}{2D(-1) - 4D(0) + 2D(1)}$$

これを用いて画像の水平方向および垂直方向それぞれ独立にサブピクセル変位推定を行い, レジストレーションを行った。

3.3 鮮明化

観測モデルの定式化から, 超解像処理は式(1)の高解像度画像 X を求めればよい。 A_k が完全に既知であれば単に逆行列を計算することで高解像度画像 X は求まるが, A_k は未知であるため単純には計算できない。

今, 推定した高解像度画像を X' とすると, 真の高解像度画像 X は $X = X' + \delta X$ で表される。これを式(2)にノイズ項を無視して当てはめると,

$$A_k \cdot \delta X = y_k - A_k \cdot X'$$

となる。これを反復計算となるよう $\delta X = X^{(n+1)} - X^{(n)}$ と置き換え, A_k^{-1} を A_k^{bp} , $A_k \cdot X'$ を $y_k^{(n)}$ で表すと,

$$X^{(n+1)} = X^{(n)} + A_k^{bp}(y_k - y_k^{(n)})$$

と変形できる。IBP法はこの計算を繰り返すことにより高解像度画像を推定する (図6)。

まず, 観測した低解像度画像 y_k を補間処理により高解像度化し, 位置ずれに応じて重ね合わせることで初期推定高解像度画像 $X^{(0)}$ を生成する。サブピクセルの位置ずれをもって重ね合わせることで, エリアシングが生じ折り返し周波数が付加される。次に, $X^{(0)}$ から N 枚のサブピクセルシフトした低解像度画像 $y_k^{(0)}$ を生成し, 観測した低解像度画像 y_k との差を取る。このとき, $y_k^{(0)}$ と y_k が一致すれば, $X^{(0)}$ は真の高解像度画像 X と等しいことになる。また, $X^{(0)}$ の推定誤差が大きいほど $y_k^{(0)}$ と y_k の差は大きくなる。そこで, この差分画像 $\{y_k^{(0)} - y_k\}$ を補間処理により高解像度化し, 位置ずれに応じて $X^{(0)}$ に加算することで更新された高解像度画像 $X^{(1)}$ を得る。この処理を次式で表す誤差関

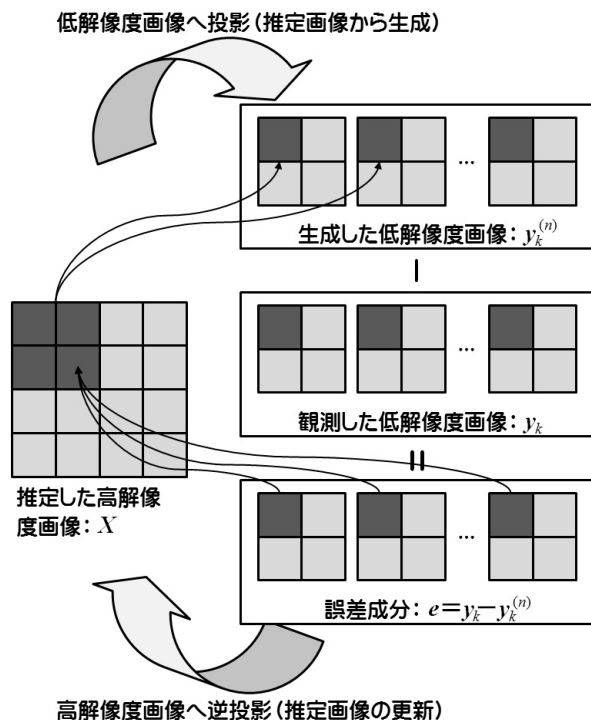


図6 IBP法

数が十分小さくなるまで繰り返すことで, 折り返し周波数成分から適切な高周波成分を復元する。

$$e^{(n)} = \sum_{k \in N} \|y_k^{(n)} - y_k\|^2$$

4. 実験と評価

本研究では上記のような手法に基づき, 超解像処理を実装した画質改善ソフトウェアを開発した。今回実装した超解像処理は, レジストレーションにSSDパラボラフィッティングを用いたIBP法を適用した。

ここでは, 超解像処理による画質改善効果を検証するため, シミュレーション画像と実画像両方について実験を行った。

4.1 シミュレーション画像

次のように人工的に画素単位以下のずれを持つ低解像度画像を生成し, 高解像度化の実験を行った。シミュレーションに用いた画像は全て256階調のグレースケール画像である。

まず, 大きさが960×600画素の画像にテキストをアウトラインフォントで表示したものを原画像とし, この画像から解像度が1/4, すなわち大きさが240×150画素となる観測画像を生成する。原画像に対して4×4画素ブロックの平均を取ることで低解像度化し, この4×4画素ブロックの位置を1画素単位で変えたものを64枚作成することで, 1/4ピクセルずつ位置ずれがある低解像度画像を得た。この低解像度画像のうち, ランダムに選んだ20枚を用いて超解像処理によ

る画質改善処理を行った。

それぞれの画像を図7～10に示す。ただし、図はそれぞれの画像の一部を切り出したものである。図7は原画像、図8は生成した低解像度画像の1枚、図9は1枚の低解像度画像を双三次補間により高解像度化した画像、図10は20枚の位置ずれのある低解像度画像から求めた超解像画像である。超解像画像は、補間画像に比べてぼけが低減されており、文字の輪郭の鮮明度が高く、画質が改善していることが分かる。

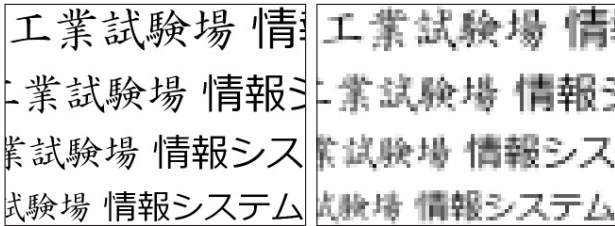


図7 原画像

図8 生成した低解像度画像

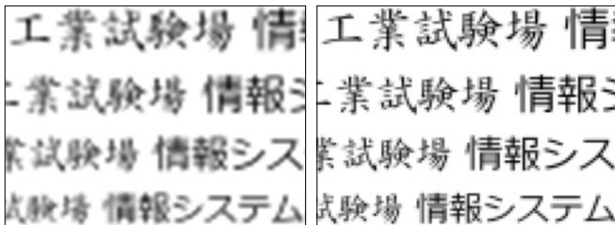


図9 双三次補間画像

図10 超解像画像

さらに画質改善効果を定量的に比較するため、原画像との差異を評価する尺度として、次式で表される歪み率 (PSNR:Peak Signal to Noise Ratio) を用いて評価した。

$$PSNR = 10 \log \left(\frac{N \cdot M^2}{\sum (I(x) - I'(x))^2} \right)$$

ここで $I(x)$ 、 $I'(x)$ は比較する画像、 N は画像の画素数、 M は最大画素値である。

原画像と補間画像および超解像画像のPSNRはそれぞれ、補間画像が15.30dB、超解像画像が17.45dBであった。定量的な評価でも超解像処理の方が良好な結果を得た。

4.2 実画像

また、実際に撮影した映像での画質改善効果を確認するため、Webカメラからの入力画像を対象として実験を行った(図11)。Webカメラの解像度は320×240画素であるが、レンズの歪みの影響などを考慮し、画像中央部分の160×120画素領域を対象とした。

図12に補間処理により2倍に拡大した画像、図13に10枚の入力画像を用いて超解像処理により2倍に拡大した画像を示す。シミュレーション画像で得られた結果と同様、超解像処理の方が文字の輪郭がはっきりしており、画質改善効果が高

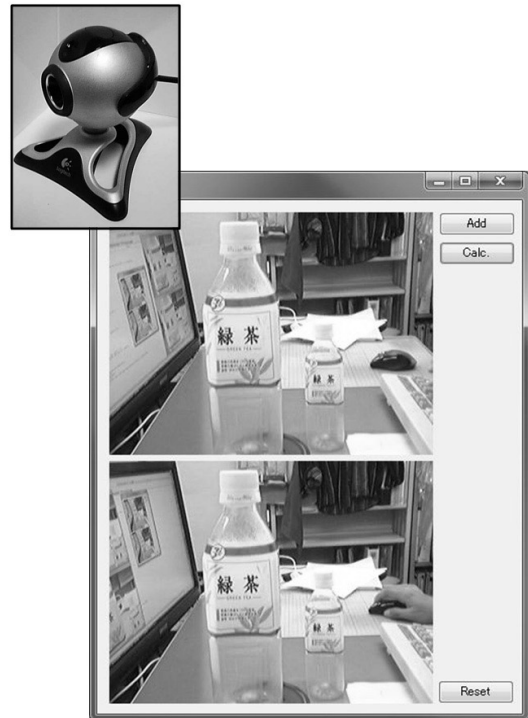


図11 Webカメラと試作したソフトウェア



図12 補間画像

図13 超解像画像

いことが分かる。このとき、超解像処理の計算時間は、Intel Core 2 Duo E8500 (3.16GHz)、メモリ4GBのデスクトップPCを使用して、約8秒であった。

5. まとめ

超解像処理を利用することで、低解像度の画像から高解像度の画像を推定することで画質を改善する手法を開発し、画質改善ソフトウェアとして実装した。また、この画質改善手法を安価なWebカメラに適用し、実環境においても有効な結果が得られることを確認した。

今回実装した超解像処理を用いた画質改善手法は計算量の多い処理であり、実際の産業分野に適用するためには処理速度の高速化が課題である。今後は、より画質改善効果の高い超解像処理アルゴリズムについて検討するとともに、分散処理やGPGPU (General-Purpose computing on Graphics Processing Units) などを活用した処理の高速化について取り組む予定である。

引用文献

- 1) 杉本茂樹, 奥富正敏: “画像の超解像度化処理”, 日本ロボット学会誌, Vol.23 No.3, pp.305-309, (2005)
- 2) W.T.Freeman, T.R.Jones and E.C.Pasztor: “Example-based super-resolution,”, IEEE Computer Graphics and Applications 22, 2, pp.56-65, (2002)
- 3) D.P.Hart: “Super-Resolution PIV by Recursive Local-Correlation”, Journal of Visualization, The Visualization Society of Japan, Vol.10, (1999)
- 4) M.Irani and S. Peleg: “Super resolution from image sequences,”, In Proceedings of the 10th International Conference on Pattern Recognition, vol.2, pp.115-120, (1990)
- 5) Vivek Bannore: “Iterative-Interpolation Super-Resolution Image Reconstruction.”, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp.113, (2009)
- 6) R.C.Hardie, K.J.Barnard and E.E.Armstrong: “Joint MAP Registration and High Resolution Image Estimation Using a Sequence of Undersampled Images”, IEEE trans.Image Processing, Vol.6, No.12, pp.1621-1633, (1997)
- 7) F.W.Wheeler, R.T.Hoctor and E.B.Barrett: “Super-Resolution Image Synthesis using Projections onto Convex Sets in the Frequency Domain”, IS&T/SPIE Symposium on Electronic Imaging, Vol.5674, pp.479-490, (2005)
- 8) 波部齊, 角岡幹篤, 鷺見和彦, 松山隆司: “画像の2次元空間構造を利用したサブピクセルマッチングの高精度化”, 画像の認識理解シンポジウム MIRU2005, IS 3-124, pp.1193-1200, (2005)
- 9) 清水雅夫, 奥富正敏: “領域ベースマッチングのための2次元同時サブピクセル推定法”, 電子情報通信学会論文誌, J87-D-II, 2, pp.554-564, (2004)