

画素単位のレジストレーションによる 3 次元形状物体画像の超解像処理

山口 拓真[†] 川崎 洋^{††} 古川 亮^{†††} 中山 利宏[†]

[†] 日本信号株式会社研究センター 〒 346-8524 埼玉県久喜市大字江面字大谷 1836-1

^{††} 埼玉大学工学部情報システム工学科 〒 338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保 255

^{†††} 広島市立大学情報科学部情報メディア工学科 〒 731-3194 広島市安佐南区大塚東 3-4-1

E-mail: [†]{ymgc-tkm,nkym-ts}@signal.co.jp, ^{††}kawasaki@cgv.saitama-u.ac.jp, ^{†††}ryo-f@cs.hiroshima-cu.ac.jp

あらまし 本論文では、3 次元物体を対象とし、カメラや対象物体が大きく動く場合においても超解像処理を安定して実現する手法を提案する。これまでの超解像処理は主に平面を対象としており、シーンに 3 次元物体があると、視点変化等により見え方が大きく変わるため、超解像処理を実現することが難しかった。近年、3 次元物体を対象に超解像処理を実現する手法も研究されているが、複数の三角パッチによる平面近似を基礎としているため、画像系列で首尾一貫した平面抽出が必要となり、実用上多くの課題が残されていた。そこで、本論文では、対象シーンから陽に平面部分を抽出することなく、3 次元物体の超解像処理を実現する手法を提案する。具体的には、特徴点を用いて予め多くの平面候補を推定しておき、画素ごとに、どの平面に乗るかを再投影誤差最小化により分類することで実現する。提案手法では、陽な平面抽出の必要性が無いため、これまで困難であった複雑な形をした 3 次元物体や、移動する物体、剛体以外の対象物に関しても超解像処理を実現することができる。

キーワード 超解像処理, レジストレーション, 3 次元形状物体, 移動物体, 平面検出

Super Resolution for 3D Shape Object Image with pixel-based registration

Takuma YAMAGUCHI[†], Hiroshi KAWASAKI^{††}, Ryo FURUKAWA^{†††}, and Toshihiro NAKAYAMA[†]

[†] Research Center, The Nippon Signal Co., LTD, 1836-1 Oaza Ezura, Kuki, Saitama 346-8524 Japan

^{††} Department of Information and Computer Sciences, Faculty of Engineering, Saitama University, Shimo-Okubo 255, Sakura-ku, Saitama, 338-8570 Japan

^{†††} Department of Computer Science, Hiroshima City University, Ozuka-higashi 3-4-1, Asaminami-ku, Hiroshima, 731-3194 Japan

E-mail: [†]{ymgc-tkm,nkym-ts}@signal.co.jp, ^{††}kawasaki@cgv.saitama-u.ac.jp, ^{†††}ryo-f@cs.hiroshima-cu.ac.jp

Abstract This paper presents a super-resolution(SR) method for 3D shape object image including moving objects and non-rigid objects. Many papers have been published, proposing a variety of methods for SR using multiple low resolution images. Most of the approaches assume that the low resolution images can be accurately registered by a 2D affine or a homography transformation. Although, there has been a few work for 3D shape objects or 3D scenes, there are still many problems remaining, such as, triangulations. We propose a SR technique based on pixel-based registration by planar approximation with iterative plane detection algorithm. Our experiments show the accuracy and robustness of the proposed method for 3D shape object image SR.

Key words Super resolution, Registration, 3D shape object, Moving object, Plane detection

1. はじめに

近年、定点カメラや監視カメラによる道路状況のモニタリングや不審者の発見など、映像情報からシーンを自動認識する研究が幅広く行われている。映像情報としてノイズの少ない高解像度画像が得られれば、これらの解

析が容易となるため、多くの画像センサが開発されているものの、上記カメラは、明暗変化の激しい屋外や、トンネルなどのように非常に暗い場所に設置されていたり、また広範囲をカバーするために広角レンズと組み合わせられていることも多く、実際にはダイナミックレンジや画角を確保するために、低解像度で画質も悪いケース

が多い。近年の半導体技術などの大幅な進展により、上記のような厳しい条件においても高解像度を実現するセンサの開発も進んでいるものの、例えば画像上に小さく写っている物体の情報が必要な場合、対象が低解像度であることに変わりはなく、センサのみによらない高解像度化技術が強く望まれている。

低解像度画像を高解像度化する手法として超解像技術がある。特に複数枚の低解像度画像から、1つの高解像度画像を復元する手法は実用性が高く広く研究されている。この超解像度手法では、各画像間の位置の対応関係を正確に求める必要がある（レジストレーション処理）。従来手法では主にシーンは静止しているか、看板などの平面の物体を対象物体とし、カメラや対象物体の移動量が入力画像間において微小であるという前提のものがほとんどであった [1], [2]。このような場合、複数の低解像度画像群のレジストレーション処理は、2次元のアフィン変換や平面射影変換によって十分な精度で行うことができる。

しかし、前述のようなより幅広い利用を考えると、シーンの中に多数の3次元物体が存在し、それらが独立して移動していたり、さらに布などのように非剛体運動をしている対象が存在する場面を想定する必要がある。このような場面において超解像処理を実現するためには、対象物体の3次元形状や動きなどを考慮する必要がある。特に、3次元形状物体は視点変化などにより見え方が大きく変わるため、従来の超解像度手法をそのまま適用することは難しい。

近年、3次元形状物体や3次元シーンの画像を対象とした研究も報告されている。Tungらは、高精細な3D video [3] を生成するために、テクスチャと3次元形状モデルについて超解像処理を適用している [4]。その処理対象例として動作に伴い変形する着物を用いており、テクスチャの超解像を行う際、三角パッチで画像を分割し、パッチごとに処理を行うことで、平面以外の形状の超解像処理を実現している。清らは、同様にパッチベースのレジストレーション処理によって、3次元奥行きが深い対象物体に対して、超解像処理を可能にしている [5]。ただし、初期のパッチは人手で与える必要がある。Mudenagudiらは、3次元シーンについて、校正済みの複数のカメラから得られる複数の画像から、深さ情報や photo-consistency 制約によってオクルージョンを考慮し、新たな視線方向の超解像画像を生成する手法を提案している [6]。以上のように、過去の3次元形状物体を対象とした超解像処理は、三角パッチにより対象物を近似し、パッチ毎に処理を行うことで超解像処理を実現する手法が基本となっている。このため、三角パッチが形状の良い近似ではない場合、正しく超解像処理が行われない。これは第2.1節で述べるように、一般に良く起こる問題である。文献 [5] のように、初期パッチのみ人手で与えることも考えられるが、曲面を持つ物体など人手で与えること自体が難しい場合もある。

本論文では、対象シーンから陽に平面部分を抽出することなく、3次元物体の超解像処理を実現する手法を提案する。具体的には、特徴点を用いて予め複数の平面候

補を推定しておき、各画素が、どの平面に乗っているかを再投影誤差最小化により分類することで、超解像処理に必要な位置決めを実現する。平面抽出の必要性が無いため、これまで困難であった複雑な形をした3次元物体や、剛体以外の対象物に関しても超解像処理を行える。提案手法の貢献は主に以下の3点である。

- 陽な平面近似によらない、画素単位でのレジストレーションによる、3次元物体の超解像度手法。
- 入力画像間の対応点に含まれるノイズやアウトライア（間違っただ対応点）に頑健な超解像度手法。
- 複数の移動物体や非剛体運動を含むシーンにも有効な超解像度手法。

実験では、複数の平面や曲面、非剛体物体からなるシーンにおいて、「1平面を仮定した手法」、「三角形分割に基づく手法」、「提案手法」の3通りの手法で超解像処理を行い、比較により、その有効性を示す。

2. 提案手法

2.1 手法の概要

従来手法で一般に用いられる三角形分割に基づく処理では、分割の位置に課題があり、複数の面を跨ぐようなパッチが生成され、部分的に正確なレジストレーション処理が行えない場合がある。文献 [7] では、三角形分割の最適化を行っており、ドロネー分割 [11] によって得られた三角パッチ (図 1a) を、輝度値の再投影誤差を基準にした再分割方法によって、面を跨ぐようなパッチをなくしている (図 1b)。これにより、テクスチャマッピング画像に改善が見られ (図 1c, 図 1d)、有効な手法だといえる。しかしながら、面の境界付近に特徴点が存在しない場合には、複数の面を跨ぐようなパッチが生成されてしまい境界部分の超解像処理に失敗してしまう (図 1e)。実際、エッジ上の特徴点は一意に決定することが難しいため、これは一般に良く起こる現象である。

また、三角形分割に基づく超解像処理を行おうとした場合、おのおののパッチのレジストレーション処理の精度は、そのパッチをなす3点の、画像間の対応点探索の精度次第であり、1点でも不安定な点が含まれていれば、そのパッチに関しては良好なレジストレーション処理が行えず、超解像処理の効果を得ることができない。また、間違っただ対応点は、周りの複数のパッチとも関わっており、その影響範囲は1つのパッチにとどまらない。

そこで、本論文では、三角パッチによらない手法を提案する。本論文における超解像処理の流れを図2に示す。本手法では、まず入力画像列で特徴点を追跡し、それら特徴点群が乗ると考えられる平面候補を複数個検出する (2.2 節)。次に、基準となるフレームの各画素についてどの平面に属するかを輝度値の再投影誤差を基準に決定する (2.3 節)。これにより、超解像処理に必要な、基準フレーム上の全画素のレジストレーションが実現される。そこで、このレジストレーション結果を用いて MAP 法による超解像処理を行う (2.4 節)。

提案手法においては、画素ごとに位置決めが実現されるためパッチ生成の問題を回避できる。また、提案手法では、画素単位のレジストレーションにおいて平面情報

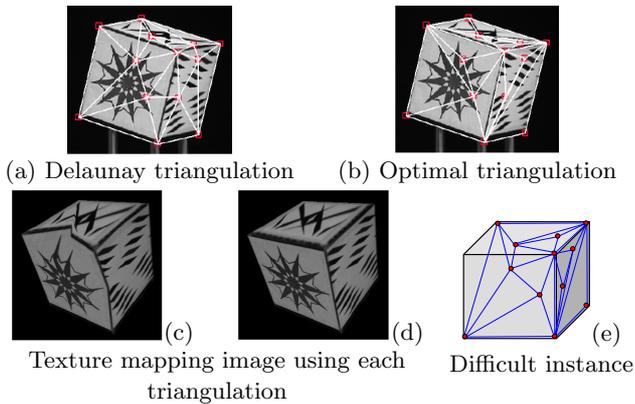


図 1 三角形分割の最適化 [7]
Fig. 1 Triangulation optimization [7].

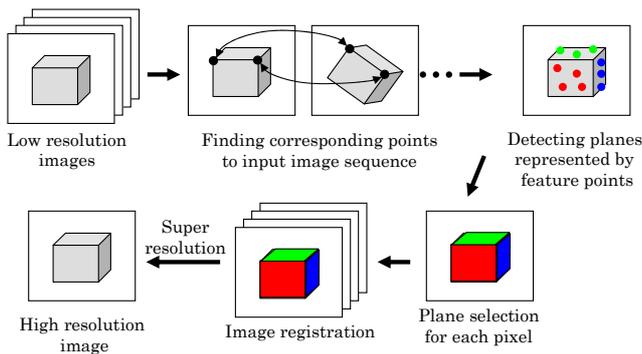


図 2 提案手法による超解像処理の流れ。
Fig. 2 Processing flow of our super resolution.

を用いるが、その際、従来の三画パッチの場合、平面推定に3点しか使用しないのに対して、提案手法では、ある程度の数の特徴点集合を用いるため、特徴点追跡の失敗にも影響されにくいというメリットがある。

2.2 特徴点追跡による平面候補群の推定

これまで、主に3次元復元を目的として平面検出に関する研究が報告されており[8], [9], 特徴点をクラスタリングするなどして平面領域の検出を実現している。画像中に存在する全ての物体の高精度な平面検出が可能であれば、超解像処理におけるレジストレーション処理に利用できると考えられるが、画像間の対応点には多くのアウトライアがあり、実際のシーンには曲面や移動物体なども存在するため、現状これら平面検出手法を超解像処理に利用することは難しい。

そこで、本論文では、平面近似による高精度のレジストレーションを目指すのではなく、画素単位でのレジストレーションにより、前述のような平面近似の困難さに影響されないロバストな超解像手法の実現を目指す。具体的には、陽に平面領域を定義せずに、予め複数の平面候補群を推定しておき、各画素がどの平面に属するかを分類する手法となっている。このため、平面候補群に正解平面が含まれるように、十分な数の候補を推定しておけば、陽に平面検出を行わずに3次元物体の超解像処理が実現できる。

処理の効率化の点からは、出来るだけ少ない平面候補

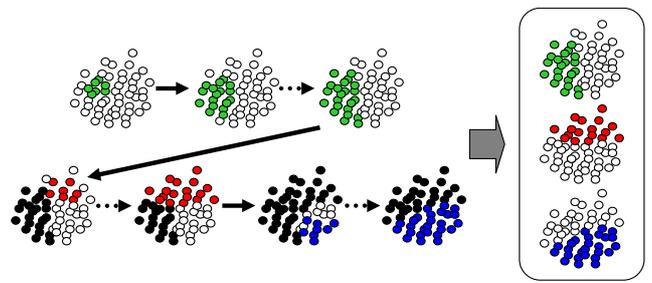


図 3 平面検出の様子
Fig. 3 Plane detection.

群で全ての正解平面を包含することが望ましい。そこで、本論文では、平面候補群を推定する際に、特徴点をクラスタリングするのではなく、ある特徴点が複数の特徴点集合に属することを許容した特徴点集合を求めて推定を行うことでこれを実現する。実際の特徴点集合による平面候補群の推定アルゴリズムを以下に示す。

Algorithm 1 平面候補群推定処理

- 1: 入力: 入力フレーム間で特徴点をトラッキングし、全てのフレームでトラッキング出来た特徴点群
- 2: while 特徴点群に未選択かつラベリングされていない特徴点が存在 do
- 3: 未選択かつラベリングされていない特徴点 1 点選択し任意数 (本論文では 7 点) の近傍の特徴点を加えた新しい平面候補の点集合を作成。
- 4: while 平面候補の点集合に変動がある do
- 5: 平面候補の点集合から、各フレーム間の平面射影変換行列を計算。
- 6: 平面候補の点集合を空にする。
- 7: for 特徴点群の全ての点 do
- 8: 得られた平面射影変換行列と特徴点との適合度合いを計算。
- 9: if 適合度合いが閾値以上 then
- 10: 平面候補の点集合に加える。
- 11: end if
- 12: end for
- 13: end while
- 14: 得られた点集合を同一平面上に存在する特徴点集合とみなす。
- 15: end while

Step.8 の、平面射影変換行列と特徴点の適合度合いについては、各特徴点について、全てのフレームを通して射影した際の位置の差分が閾値以下であったフレーム数をカウントし、このフレーム数によって、その特徴点に適合した平面射影変換行列であるかを判断する。本論文では、位置の差分の閾値として二乗誤差が 0.2 ピクセル以内、フレーム数の閾値は全フレーム数の半数以上とした。この手順により得られた各特徴点集合を、同一平面上に存在する特徴点の集合とみなす。

上記のアルゴリズムの処理の様子を図 3 で示す。ここでは、黒い点は既にいずれかの特徴点集合に含まれている点、白い点はまだどの特徴点集合にも属していない点を表している。最終的に、図 3 では、3 つの特徴点集合 (平面) が検出されたことになる。

提案手法の特徴として、重複する点(領域)が許容されるため、曲面などのように平面ではない物体であっても近似平面が多く含まれることにより、超解像処理の精度向上が可能となる点がある。また、間違っただけの平面が候補中に存在していても、そのような平面は、次節の処理により効率よく除外されるため、ノイズやアウトライアに対してロバストである。

2.3 再投影誤差最小化による画素単位のレジストレーション

超解像処理を行うためのレジストレーション処理では、入力画像の各画素について、基準フレームにおけるその画素の対応位置が必要とされる。前述した手順によって得られた平面領域は陽に定義されたものではなく、特徴点集合から平面候補として推定されたものであるため、実際に各画素がどの平面に乗っているかは未だ分かっていない。このため各画素の対応関係も求まっていない。各画素がどの平面に属しているかが決まれば、各画素の基準フレームでの対応位置を得ることができる。

本論文では、各候補平面を構成する特徴点集合から得られる平面射影変換行列を用いて、基準フレームを各フレームへ射影した場合の輝度差の平均を画素毎に求め、最も小さい値を与える平面を各画素について選択する。これは、入力フレーム数を N 、 i 番目の特徴点集合から得られる基準フレームから k 番目のフレームへの射影変換行列を $\mathcal{H}_i^{(k)}$ 、基準フレームおよび k 番目のフレームの任意の点での輝度値をそれぞれ $I(\cdot)$ 、 $I^{(k)}(\cdot)$ とした場合、

$$\hat{p} = \arg \min_i \left[\frac{\sum_{k=1}^M \left\{ I(p) - I^{(k)}(\mathcal{H}_i^{(k)} p) \right\}^2}{M} \right] \quad (1)$$

を基準フレームの各画素について求めることで計算される。ここで、 p はある座標を表すベクトルであり、 $M(\leq N)$ は、射影先の画素が有効だった(画像内に存在していた)フレーム数を表す。画素 p がどの平面に属するか決定される様子を図4に示す。

再投影誤差を用いていることから、最小平均二乗誤差が明らかに大きい場合は、該当する画素をリジェクトすることが可能であり、特徴点が存在しない領域の処理についても安定した超解像処理が行える。これはオクルージョンに対しても有効である。

また、基準フレームの各画素はいずれかの平面に属していることになるが、一般に近傍画素は同一の平面に属している可能性が高い。そこで、近傍画素が同じ平面に分類されやすくすることで、より安定した平面選択が可能となる。本論文では、モードフィルタによるスムージング処理を平面選択結果に適用する。具体的には、注目画素の24近傍を含めた25画素分の平面選択結果において最も出現頻度が多かった平面をその画素の平面として再割り当てを行う。

各画素の分類終了後、超解像処理のために、入力画像の各画素が、基準フレームのどの位置に対応するかを求める(レジストレーション処理)。具体的には、 k 番目フレームから基準フレームへの i 番目の平面射影変換行列

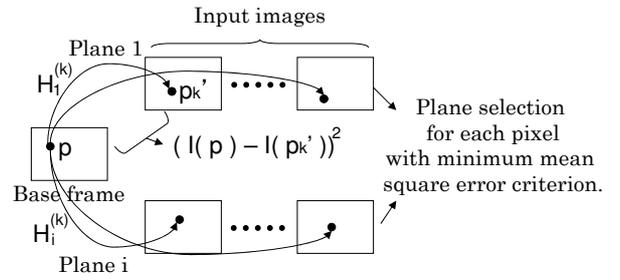


図4 平面選択の様子
Fig.4 Plane selection.

$\{\mathcal{H}_i^{(k)}\}^{-1}$ によって、各フレームの画素を基準フレームに射影し、式(1)で求めた射影先の基準フレームの画素が属している平面の番号 \hat{i} と、利用した $\{\mathcal{H}_i^{(k)}\}^{-1}$ が表す平面の番号 i が一致していれば、対応する画素から得られた輝度値として採用する。これにより、全てのフレームの全ての画素が基準フレームのどの位置に対応しているかを、サブピクセル精度で得ることができる。

2.4 超解像処理

従来より、多くの超解像処理に関する研究が報告されており、MAP(Maximum A Posterior)法による定式化が多く行われている[1], [2]。本論文においても、広く用いられているMAP法を利用する。MAP法では、複数の低解像度画像が与えられたときの事後確率を最大にする高解像度画像の推定を行う。具体的には、 x を高解像度画像ベクトル、 y を入力画像ベクトル、 N を入力フレーム数としたときの、事後確率 $p(x|y_1, y_2, \dots, y_N)$ を最大にする高解像度画像 \hat{x} を推定することとなる。また、誤差分布を正規分布と仮定した場合には、

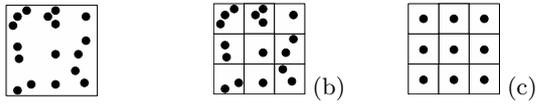
$$\hat{x} = \arg \min_x \left\{ \sum_{k=1}^N \|y_k - DB_k W_k x\|^2 + \lambda \|Cx\|^2 \right\} \quad (2)$$

と表現することができる。ここで、 D はサブサンプリングを表す行列、 B_k はPSF(Point spread function)を表す行列、 W_k はシーンやカメラの動きを表す行列を意味しており、 $\|y_k - DB_k W_k x\|^2$ は高解像度画像から推測される低解像度画像と実際の観測画像との二乗誤差とみなすことができる。また、 C は高解像度画像の事前情報を表す行列であり、 λ は事前情報の寄与度合いを表すパラメータを意味している。この定式化は、最尤(Maximum likelihood)推定に事前分布に基づく正則化項を加えたものに等しい。実際に高解像度画像を推定する際には、共役勾配法などの最適化手法が用いられる。

本論文では、式(2)で表される定式化を用いるが、このままでは利用する画像枚数が増えれば増えるほど、二乗誤差項を計算するのに必要な処理時間が増大してしまう。そこで、低解像度画像を高解像度画像に射影したときの、低解像度画像の画素値の平均値を利用した定式化、

$$\hat{x} = \arg \min_x \left\{ \sum_{j=1}^P w_j (m_j - b_j x)^2 + \lambda \|Cx\|^2 \right\} \quad (3)$$

を用いる。ここで、 m_j および w_j は、入力画像の各画素



(a) An original pixel The high resolution image pixels

図5 基準フレームおよび対応する高解像度画像の画素．黒い点はその位置に射影された入力画像の画素．

Fig.5 An original pixel and the corresponding pixels of high resolution image. The dots represent corresponding pixels of other frames.

を高解像度画像に射影した際の、高解像度画像の j 番目の画素に含まれる画素値の平均値および画素数を、それぞれ表しており、 P は高解像度画像 x の画素数を示している．また、全てのフレームにおいて PSF は一定と仮定し、 j 番目の画素に対応する PSF カーネルを b_j と表している．図5に、基準フレームのある画素についての、それぞれの定式化におけるレジストレーション処理の違いを示す．図5では、入力画像を縦横方向にそれぞれ3倍にすることを仮定している．図5bでは、サブピクセル精度で得た基準フレームにおける位置を実数のまま利用し、高解像度画像に射影するのに対し、図5cでは、高解像度画像の各画素はその画素に射影された画素の平均値で表現されている．式(2)におけるレジストレーション処理が図5bに相当し、式(3)の場合が図5cとなる．文献[10]では、このように平均値へ置き換えることによる超解像処理への影響は小さいとしている．

3. 実験

3.1 設定

本論文における超解像処理は、大まかに、KLT tracker [12] による入力画像間の対応点探索、各手法によるレジストレーション処理、式(3)による高解像画像生成で構成される．それぞれの超解像処理において、レジストレーション処理以外は、パラメータは全て統一して実験を行った．入力画像はグレースケールの 300×300 ピクセルとし、連続で撮影した画像群から基準フレームを指定し、その前後20フレームの合計41フレームを用いる．入力画像は全て、ウェブカメラ(ロジクール社製 Qcam Pro 9000)を使用して撮影されたものである．超解像処理を行うのに必要な PSF カーネルについては標準偏差1.8のガウシアンカーネルを利用した．また、式(3)における正則化項には4近傍の MRF(Markov Random Field)を仮定して、行列 C は4近傍のラプラシアンカーネル $\{(0, 1, 0), (1, -4, 1), (0, 1, 0)\}$ との畳み込み演算に相当する行列となる．この正則化項の寄与度合いを表す λ は0.3に設定する．これらの正則化項に関するパラメータは経験的に決定したものである．また、高解像度画像は入力画像を縦横それぞれ4倍した 1200×1200 ピクセルとする．実験では過去の代表的な超解像手法として、以下の2つの手法で超解像処理を行い、提案手法との比較を行った．

『1平面を仮定した超解像処理』 全ての入力フレーム間で追跡できた特徴点を基に、各フレームから基準フレームへの平面射影変換行列1つを算出し、それにより

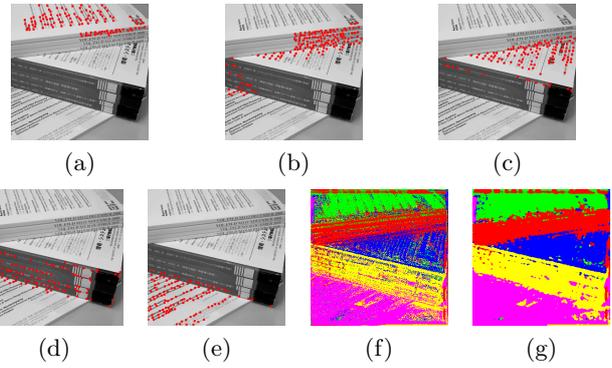


図6 提案手法による同一平面上の特徴点集合探索(平面探索)結果および各画素における平面選択結果．緑、赤、青、黄、紫が、(a)、(b)、(c)、(d)、(e)の平面にそれぞれ対応している．

Fig.6 Plane detection and plane selection results. Green, red, blue, yellow and purple correspond to plane (a), (b), (c), (d) and (e), respectively.

入力フレーム各画素の基準フレームにおける対応位置を求める．

『三角形分割に基づく超解像処理』 全ての入力フレーム間で追跡できた特徴点を基に、ドロネー分割により三角形パッチを生成し、その三角パッチ単位で各フレーム間の2次元アフィン変換行列を求め、各画素の基準フレームにおける対応位置を求める．

3.2 静止した物体による実験

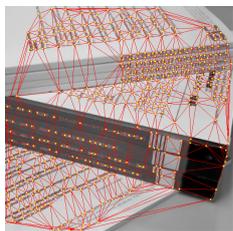
3.2.1 平面構成物体による実験

前記3種類のレジストレーション処理による超解像処理結果を比較するために、複数平面で構成される物体の画像を対象に行った実験結果を図11a~d示す．従来より良く用いられている1平面を仮定した手法では、超解像処理の効果は一部分にしか見られておらず(図11c)、三角形分割に基づく手法では、全体的に解像力の向上が見られるが、部分的にレジストレーション処理に失敗して超解像処理の効果が得られていない部分がある(図11d)．これらに比べて提案手法では良好な結果が得られていることが分かる(図11b)．提案手法による平面探索結果および各画素における平面選択結果を図6a~eに示す．図6a~eの赤い点の集合はそれぞれの平面を表す特徴点集合を意味している．図6fは各画素における平面選択の結果を示しており、図6a~eは、緑、赤、青、黄、紫にそれぞれ対応している．例えば、図6fにおいて赤で表現されている画素に対応する平面は、図6bの特徴点集合で表される平面に属していると判断されていることを意味している．また、図6gはモードフィルタによるスムージング後であり、実際の超解像度処理にはこちらの平面選択結果を用いた．これらの結果を見ると、1平面に属する画素集合が複数の面を跨いでしまっている様子が観察される．これは、テクスチャのない領域では、正しい平面に属していなくても再投影誤差が小さい値になることが一般に起こりうるため、誤った平面選択をしてしまったためと考えられる．平面推定や3次元復元が目的であれば、このような誤りは致命的となるが、本論文の目的

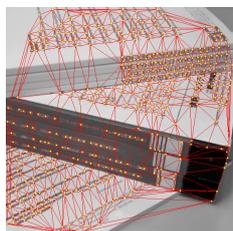
は超解像処理であるため、このような間違っただけの選択が行われても最終的な画像生成にはほとんど影響がない。これは、陽な平面推定や3次元復元によらない本手法の重要なメリットの1つである。

2.1節で述べたように、三角形パッチ単位でのレジストレーション精度は、対応点探索の影響を大きく受け、図11dに示す処理結果においても、部分的にぼけた結果となってしまうことが分かる。実験での対応点探索は、比較対象どの手法についても同じものを用いているが、提案手法による処理結果(図11b)では、対応点探索の失敗による影響を受けることなく、正しく超解像処理が行われていることが分かる。

また、三角形分割に基づく手法では、さらに、分割位置についての課題もある(2.1節)。これは、図7aのドロネー三角形分割結果を見ると、対象物体である本のエッジを跨ぐようなパッチが多く生成されるところに観察される。このような場合に、テクスチャのエッジ情報を考慮して三角パッチを再構成手法も提案されているものの[7]、長いエッジ上に少ない特徴点しかない場合にはやはり正しいパッチを得ることは難しい。文献[7]の手法を適用した三角形分割結果が図7bであるが、物体のエッジ上ではやはり正しく三角形が生成されていないことが分かる。その結果、三角形分割に基づく超解像処理では、図7cのようにエッジがぼけた結果となっている。これに対して、提案手法による処理結果(図7d)では、ぼけや変形などは見られず、三角形分割の影響を受けずに3次元形状物体の超解像処理が行えていることが分かる。



(a) Delaunay triangulation



(b) Re-triangulation by Morris and Kanade [7]



(c) Triangulation-based method



(d) Proposed method

図7 ドロネー三角形分割結果と超解像処理結果

Fig. 7 Delaunay triangulation and the super resolution image

3.2.2 曲面物体による実験

3次元形状物体は、箱などのように平面で構成されるものだけではないため、曲面を持つ物体についても検証を行った。ここでは、図11eのような、本が曲面を成している状況の画像に対して実験を行った。同時にレンジセンサにより3次元計測を行って得られた3次元形状を



図8 曲面物体の三次元形状

Fig. 8 3D shape of the curved surface object.

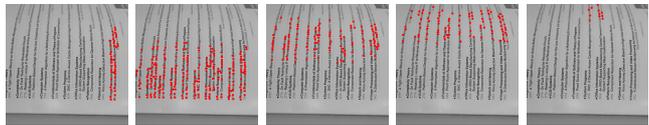


図9 曲面物体画像の平面探索結果

Fig. 9 Plane detection results of a curved surface object.

参考のために図8に示す。超解像処理結果および提案手法での平面分類結果を図11f~h、図9にそれぞれ示す。この入力画像では、画像上部のフォーカスがずれていることもあり、その付近の対応点探索精度は高くない。1つの平面を仮定した方法では、対応点探索に失敗した点が含まれていても、推定された平面に近い部分の解像力が向上していることが分かる(図11g)。しかしながら、それ以外の部分(今回は画像上部)では超解像処理効果は見られない。三角形分割に基づく手法では、対応点探索精度が高ければよい結果をもたらすと思われるが、実際は非常に困難であり、図11hのような結果となった。これらに対して、提案手法では、図9に表すような平面群で曲面が近似されており、3次元の奥行きや対応点探索の失敗の影響を受けずに、正しく全体に渡り超解像処理出来ていることが図11fより分かる。

3.3 移動する3次元物体による実験

画像中に移動物体が含まれる場合についても検証を行うために、入力画像中に固定された物体と移動物体を含む画像を撮影し実験を行った。図11iが入力画像であり、画像中の右側の4冊の冊子は左側のものとは離れており、それら4冊の冊子は常に動いているといったシーンの画像である。このとき、カメラは手で持っているため、2つの物体が独立して動いている状況とみなすこともできる。このような複数の独立した移動物体が存在するシーンにおいては3次元復元による手法は本質的に適用が難しい。それぞれの手法による処理結果を図11j~lに示す。1つの平面を仮定しては、複数の移動物体を扱うことができないため図11kのように残像のような現象が起こっている。三角形分割に基づく手法では、局所的な処理であるため、移動物体には対応できるものの、図11lからも分かるように、対応点探索精度やパッチ生成位置の影響を受けて正しく超解像処理が出来ていない部分が存在する。一方、提案手法では、テクスチャが存在しないような部分において色むらのような現象が見られるものの、全体的に解像力は改善されていることが分かる(図11j)。

3.4 変形する柔軟物体による実験

撮影対象物体として、変形を伴う柔軟物体を用いた実験を行った。このような柔軟な物体の超解像処理は、従

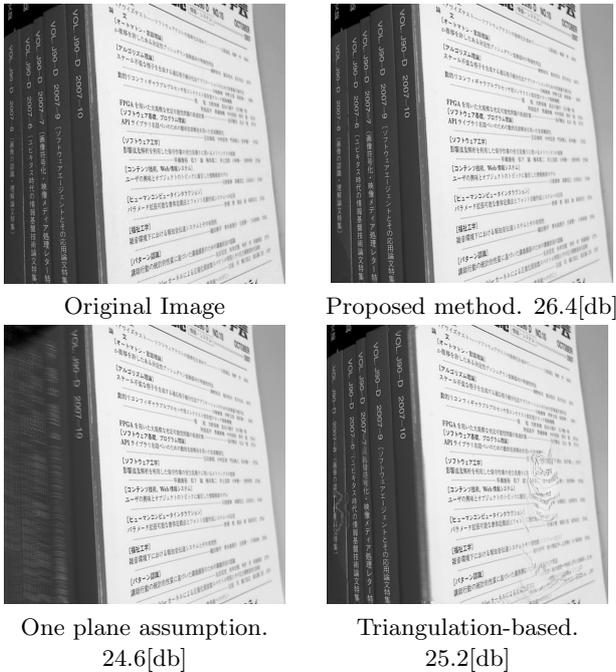


図 10 3 手法による超解像度画像の比較 .

Fig. 10 Comparison of super resolution images derived by the three methods.

来手法により実現することは極めて難しく、文献 [4] のように 3 次元形状が得られている場合を除いては、過去にほとんど例がない。入力画像 (図 11m) における対象物体は旗であり、撮影中、(主に旗の左半分が) 常に揺れている。図 11n ~ p に示す実験結果では、提案手法 (図 11n) および三角形分割に基づく手法 (図 11p) によって対象物体全体の超解像の効果が見られる。しかしながら、三角形分割に基づく手法では、対応点探索の失敗や誤った 3 角形分割の影響から、部分的にノイズが出てしまっている。それに対し、提案手法では十分な超解像処理効果が得られていることが分かる。

3.5 シミュレーション画像による評価

最後に、提案手法、1 平面を仮定した手法、三角形分割に基づく手法による超解像処理画像を、PSNR (Peak signal to noise ratio) により数値的に評価を行った。データは、3 次元シーンをダイナミックに動作するカメラで撮影した、 600×600 ピクセルの 41 枚の画像を用意し、それらを 300×300 ピクセルに縮小したものを低解像度画像として用いた。それぞれの手法を用いて超解像度処理を行い、 600×600 ピクセルの高解像度画像を生成し、元画像との PSNR を計算した。図 10 に、元画像、3 つの超解像処理結果画像と PSNR を示す。提案手法による高解像度画像は他の手法のものに比べて、客観的な数値評価でも優位であることが確認できた。

4. ま と め

本論文では、3 次元形状物体を対象とした超解像処理について、対象シーンから陽に平面部分を抽出することなく、画素単位でのレジストレーション処理による超解像処理を実現する手法を提案した。提案手法では、まず、

平面候補群を、特徴点集合から平面射影変換行列を繰り返して求めながら集合を更新する処理によって効率よく推定する。次に、基準画像を各フレームをに投影した場合の輝度差分を各画素について求め、各画素について最も小さい差分を与える平面を選択することで、それぞれの画素がどの平面上に存在している画素かを判別する。そして、属する平面の特徴点集合から得られる平面射影変換行列を用いて、レジストレーション処理および超解像処理を行う。

実画像を用いた実験を行ったところ、従来の三角パッチを用いた手法などと比べて良好な結果が得られ、本手法の有効性が確認できた。また、提案手法は画素ごとの処理であるため、複数の移動物体を含む画像や変形を伴う柔軟物体に対しても対応でき、これを実験により検証した。今後は、輝度変化を伴う物体や、モーションブラーなどへの対応を行う予定である。

文 献

- [1] S. C. Park, M. K. Park, and M. G. Kang, "Super-resolution image reconstruction: a technical overview," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 20, Issue 3, pp. 21–36, May 2003.
- [2] A. K. Katsaggelos, R. Molina, and J. Mateos, *Super Resolution of Images and Video*, Morgan & Claypool publishers, 2007.
- [3] T. Matsuyama, X. Wu, T. Takai, and T. Wada "Real-Time Dynamic 3D Object Shape Reconstruction and High-Fidelity Texture Mapping for 3D Video," *IEEE Trans. Circuits and Systems for Video Technology*, vol. CSVT-14, no. 3, pp. 357–369, 2004.
- [4] T. Tung, S. Nobuhara, T. Matsuyama, "Simultaneous super-resolution and 3D video using graph-cuts," *Proc. IEEE Conf. Comput. Vision Pattern Recog.*, Anchorage, AK, USA, 2008.
- [5] 清 真一朗, 齋藤 英雄, "未校正の移動カメラによる複数平面シーンの超解像度画像生成," *信学論 (D-II)*, vol. J86-D-II, no. 5, pp. 688–696, May 2003.
- [6] U. Mudenagudi, A. Gupta, L. Goel, A. Kushal, and P. Kalra, "Super resolution of images of 3D scenens," *Proc. Asian Conf. Comput. Vision*, pp. 85–95, Tokyo, Japan, Nov. 2007.
- [7] D. D. Morris, and T. Kanade, "Image-consistent surface triangulation," *Proc. IEEE Conf. Comput. Vision Pattern Recog.*, vol. 1, pp. 332–338, Hilton Head, SC, U.S.A., Jun. 2000.
- [8] M. Zucchelli, J. Santos-victor, and H. I. Christensen, "Multiple plane segmentation using optical flow," *Proc. British Machine Vision Conf.*, pp. 313–322, Sep. 2002.
- [9] 川上 裕司, 伊藤 吉弘, 金澤 靖, "特徴点の位置分布に基づくランダムサンプリングによる平面領域のロバストな検出法," *信学論 (D-II)*, vol. J88-D-II, no. 2, pp. 313–324, Feb. 2005.
- [10] 田中 正行, 奥富 正敏, "再構成型超解像処理の高速化アルゴリズムとその精度評価," *通学論 (D-II)*, vol. J88-D-II, no. 11, pp. 2200–2209, Nov. 2005.
- [11] M. W. Bern, and D. Eppstein, "Mesh generation and optimal triangulation," *Computing in Euclidean Geometry*, ed. D. Z. Du, and F. K. M. Hwang, pp. 23–90, World Scientific, 1992.
- [12] C. Tomasi, and T. Kanade, "Detection and Tracking of Point Features," *Carnegie Mellon University Technical Report CMU-CS-91-132*, Apr. 1991.

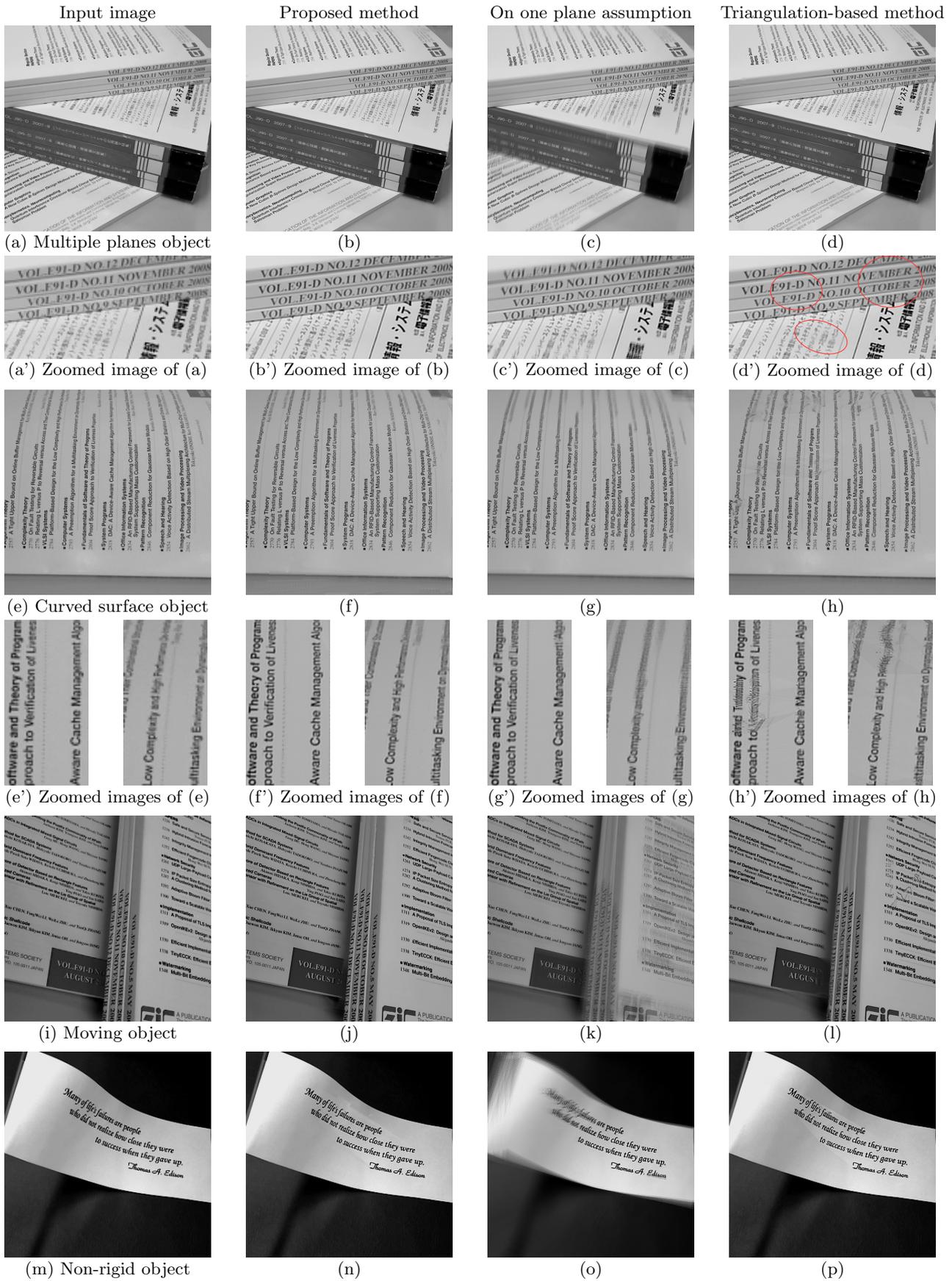


図 11 入力画像と 3 つの手法 (提案手法, 1 平面を仮定した手法, 三角形分割に基づく手法) による超解像処理結果.

Fig. 11 Input images and the super resolution images derived by proposed method, a method with one planar assumption and triangulation-based method.