

3次元形状を含むシーンにおける手ぶれ映像の超解像処理

松下 侑輝[†] 福元 伸也[†] 川崎 洋[†] 山口 拓真^{††} 古川 亮^{†††}
福田 悠人^{†††}

[†] 鹿児島大学大学院理工学研究科 〒 890-0065 鹿児島市郡元 1-21-40

^{††} 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

^{†††} 広島市立大学大学院情報科学研究科 〒 731-3194 広島市安佐南区大塚東 3-4-1

^{††††} 埼玉大学大学院理工学研究科 〒 338-8570 さいたま市桜区下大久保 255

E-mail: †{sc108046,fukumoto,kawasaki}@ibe.kagoshima-u.ac.jp, ††ymgc-tkm@signal.co.jp,

†††ryo-f@hiroshima-cu.ac.jp, ††††fukuda@cv.ics.saitama-u.ac.jp

あらまし 本論文では、3次元形状物体を含むシーンにおける手ぶれ映像を対象とし、高解像度化する方法を提案する。これまで3次元形状物体を含むシーンを撮影した手ぶれ映像に対する超解像処理手法が提案されているが、それらは、平行移動のみを考慮した領域分割に基づく手法のため、回転などの動きに弱かった。そこで、本論文では、画像全体を小さなブロックに分割し、ブロック毎にモーションブラーカーネルを導出して、ブラー除去を行うことで、前記問題を解消する手法を提案する。デブラーした画像にMAP法に基づいた超解像処理を行うことで、より精度の高い高解像度画像を生成することができる。実験では、平行移動する物体や回転運動する物体を対象として提案手法の有効性を確認した。

キーワード 超解像処理, モーションブラー除去, レジストレーション, 平面射影変換, 移動物体, 平面検出

1. はじめに

監視カメラやビデオカメラの動画から静止画を取り出したいことがある。しかし、動画から単純にフレームを切り出しただけの静止画では、解析するには品質が不十分な場合が多い。フレームの品質が低い原因は、動画の場合、静止画に比べて低解像度であったり、物体自体の動きやカメラのぶれなどのモーションブラーの発生があげられる。

3次元形状物体およびモーションブラーが含まれる映像に対して、単純に超解像処理を適用しただけでは、高い効果を期待できない。モーションブラー除去に関する研究として、2台のカメラを使ってブレの方向と量を推定する方法 [1] が提案されているが、対象とするビデオカメラ以外にデバイスが必要であり、システムが複雑化するという問題がある。また、超解像処理においては、モーションブラーが含まれていても、それらをノイズ(特にL1ノイズとして扱う方が良いとされている)として扱われることが多く、画質の改善度合いは限られる [2]。

また、3次元形状を含む画像を対象とした超解像処理の研究として、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]。これらの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。

そこで、本論文では、平面射影変換を利用した平面領域の抽出を行い、モーションブラーを除去する。平面領域を抽出することで、3次元形状物体や独立して動く複数物体を含んだシーンに対しても、超解像画像を生成することができる。

2. 処理手法の概要

複数の移動物体が含まれるシーンや3次元形状物体が含まれ奥行きが無視できないシーンにおいては、ブラー除去や超解像処理の前に平面領域分割を行う必要がある。提案手法では、大きく次の3つの処理を行う(図1)。

- I 平面領域推定
- II モーションブラー除去
- III 超解像処理

Iでは、(a) KLT Tracker [7] を用いて特徴点を抽出し、次

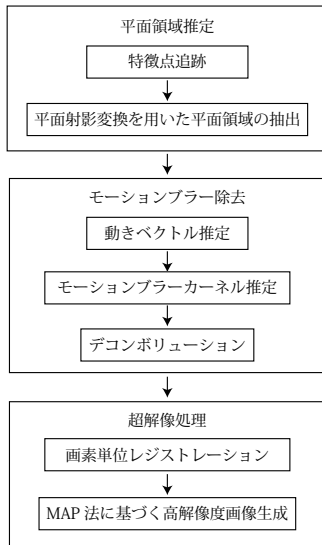


図1 処理の流れ

に、(b) 平面射影変換行列を用いて平面領域の抽出を行う。IIでは、それぞれの領域において(c) 動きベクトル推定を行う。次に動きベクトルを利用してブロック領域で(d) ブラーカーネルの推定を行う。次に、ブラーカーネルを用いた(e) デコンボリューションによってモーションブラーの除去を行う。IIIでは、モーションブラーを除去した画像から、まず、画素毎に輝度値の再投影誤差が最小となるような平面において(f) 画素単位のレジストレーションを行う。次に、(g) MAP法に基づく高解像処理によって高解像度画像を生成する。以下、それぞれの詳細について述べる。

3. 平面領域の抽出

3.1 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。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[10]。

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2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2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。

3.2 再投影誤差最小化による平面領域分割

3.1の処理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

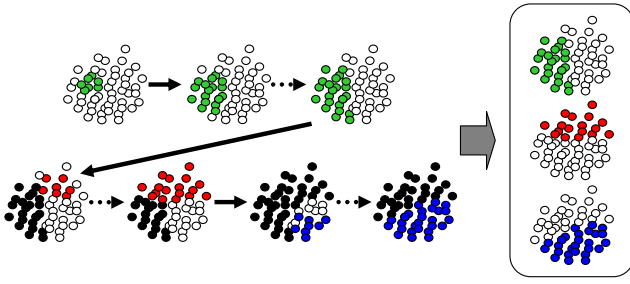


図 2 平面検出の様子

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、

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

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 3 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。

4. 複数物体に対するモーションブラー除去

4.1 動きベクトルの推定

シーン中には一つ、または複数の物体があり、それらは独立して動いている可能性がある。そのような画像のモーションブラーを除去する場合、画像のピクセルがどのように動いているか、すなわち動きベクトルを推定する必要がある。動きベクトルは、処理するフレームとそ

れの一つ前のフレームの間でピクセルの対応付けを行い、対応するピクセルどうしの座標の差から求めることができるが、モーションブラーがあると不安定である。そこで、平面候補群推定処理で算出した平面射影行列の射影から、基準フレームのピクセルと他フレームのピクセルの対応関係を導く。具体的には、処理するフレームと基準フレーム間のピクセルの対応と、基準フレームと処理するフレームの一つ前のフレーム間のピクセルの対応を、それぞれの平面射影変換行列による射影で導出する。この二組の対応関係を組み合わせることで、処理するフレームと一つ前のフレームの間でピクセルの対応付けを行うことができ、動きベクトルを推定することができる。こうすることで、前後のフレームで対応関係が得られないピクセルも動きベクトルを推定できる。これは、特に回転などの際に有利に働くと考えられる。

4.2 モーションブラーカーネル推定

ここでは、モーションブラーカーネルは直線状であると仮定する。直線状ブラーカーネルでは、カメラの動きが複雑である場合には、正しい復元はできないが、入力データはビデオ映像を前提としており、各フレームのカメラの動きは直線状のシンプルなカーネルでも表現できる。モーションブラーカーネルの方向については、動きベクトルの方向を用い、スケージングの決定には、係数を掛けることにより決定した。この係数は、Gaussian distribution を用いて自動推定することができる [11]。本論文では、手動で与えるものとした。

4.3 モーションブラー除去

デコンボリューションアルゴリズムについては、幾つかの手法が存在するが、我々は、Iterative Back Projection 法を用いる [12]。これは、リングングの少ない比較的良好な結果が得られるとされているためである。

5. 複数物体に対する超解像処理

複数の移動物体が含まれるシーンや 3 次元物体が含まれている奥行きが無視できないシーンにおける超解像処理は、サブピクセル精度での位置合わせが課題となる。本稿では、領域分割に基づく画素単位のレジストレーション方法 [13] を利用したレジストレーションを行い、MAP 法に基づく超解像画像生成を行う [14], [15]。

5.1 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。

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 $\{\mathcal{H}_i^{(k)}\}^{-1}$ 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、

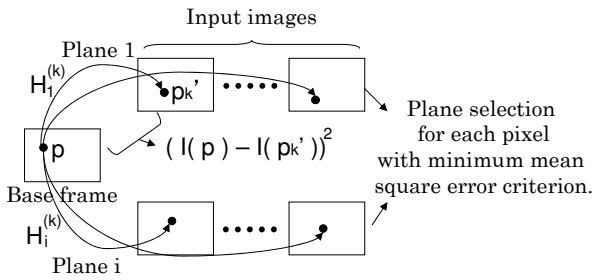


図 3 平面選択の様子

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．

5.2 MAP 法に基づく超解像処理

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 Posteriori) 法による定式化が多く行われている [14], [15]．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，

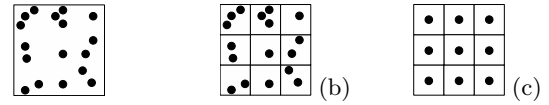
$$\hat{x} = \operatorname{argmin}_x \left\{ \sum_{k=1}^N \|y_k - DB_k W_k x\|^2 + \lambda \|Cx\|^2 \right\} \quad (2)$$

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，

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

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



(a) An original pixel The high resolution image pixels
図 4 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．

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 4 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 4 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 4b 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 4c 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 4b に相当し，式 (3) の場合が図 4c となる．文献 [16] 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．

6. 実 験

6.1 設 定

本論文における処理は，大まかに，平面領域推定，モーションブラー除去，超解像処理で構成される．入力画像には，Canon 社製 D5Mark2 のカメラで撮影した連続画像群を使用する．deblur 処理は，入力画像を 10×10 のピクセルの領域に分割して行い，それぞれその領域を中心とした 60×60 ピクセルの領域を入力画像から切り出して IBP 法によるデコンボリューションを行う．推定するカーネルは，分割した領域中に対応する動きベクトルの平均を用いる．ただし，動きベクトルの長さは 0 から 50 までとし，それ以外はノイズとして処理の対象から除外する．

超解像処理は，KLT tracker による対応点探索，再投影誤差最小化によるレジストレーション，MAP 法による高解像画像生成で行う．超解像処理を行うのに必要な PSF カーネルは，シーンごとに設定した．また，高解像度画像は入力画像を縦横それぞれ 4 倍したものとする．実験では，入力画像群を提案手法で deblur し，入力画像群に超解像処理を行った結果と，ブロックマッチングベース^(注1)でのベクトル推定での deblur したデータに超解像処理を行った結果の両方を示す．

6.2 平行移動する物体による実験

2 枚のテクスチャのある平面が別方向に動いているシーンを，固定カメラで撮影した．入力画像は 690×460 ピ

(注1): ブロック毎に一つ前のフレームとのブロックマッチングを用いたオプティカルフローを導出し，その結果を動きベクトルとした．

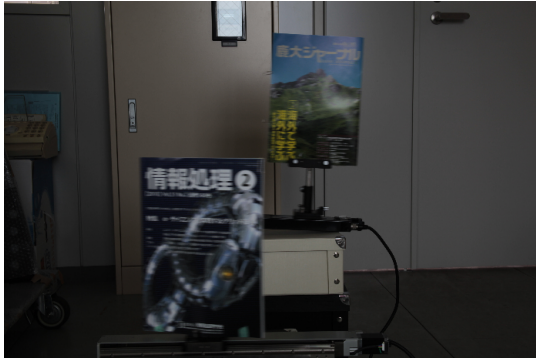


図 5 入力画像 (基準フレーム)

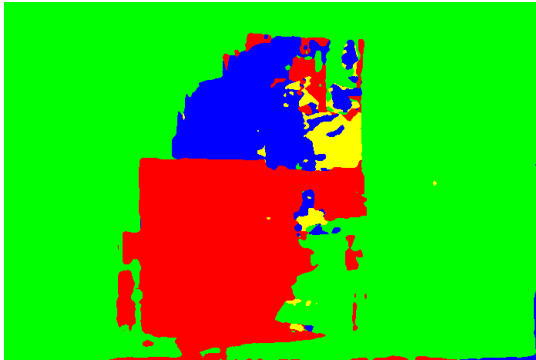


図 6 平面推定結果

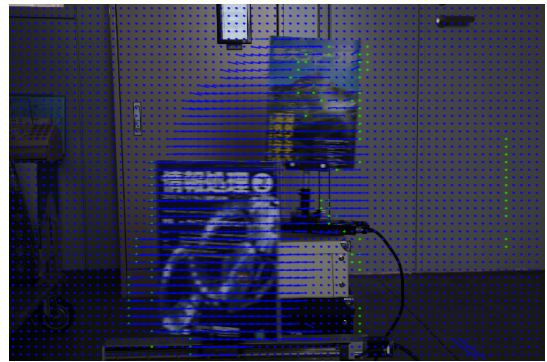


図 7 動きベクトル画像

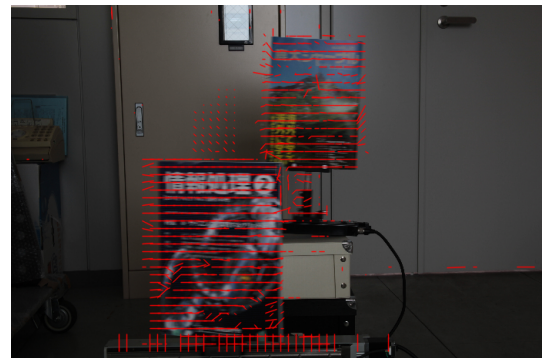


図 8 動きベクトル (ブロックマッチングベース)

クセルである．図 5 は，基準フレームとなる 1 フレーム目の入力画像である．図 6 は，平面推定結果を示す．図 7 は一つ前の画像との動きベクトルを示しており，分割した 10×10 のピクセルの領域の中心の動きベクトルがそれぞれの青い線分に対応している．緑の点は，動きベクトルの大きさが 0 か 50 を越えているものを示す．図 8 はブロックマッチングベースでの動きベクトルを示しており，赤い線が動きベクトルを示す．入力画像 (図 9) に比べ，deblur した画像 (図 10) は，解像力が改善されていることが分かる．また，超解像結果も，deblur せずに入力画像をそのまま使用した場合 (図 11) より deblur したものを使用した場合 (図 12) の方が解像力が改善されていることが分かる．ブロックマッチングベースでのベクトル推定は，動く物体の周辺の部分の推定にエラーがあり (図 13(a)) ，それを用いた deblur 結果 (図 14) や超解像結果 (図 15) では，動く物体の周辺の解像力の改善に差があることが分かる (図 13(b)) ．

6.3 回転運動する物体による実験

テクスチャのある平面 1 枚を回転する台の上に置き，回転させた映像を固定カメラで撮影した．入力画像は 640×480 ピクセルである．図 16 は，入力画像である．セグメンテーション結果を図 17 に示す．4 フレーム目の入力画像を図 18 に示す．図 18 で示す 2 つのブロックそれぞれのカーネルで画像全体を deconvolution するとカーネル推定した領域だけ局所的に解像力が上がるが全体的な解像力の改善は見られない (図 19 , 20) ．提案手

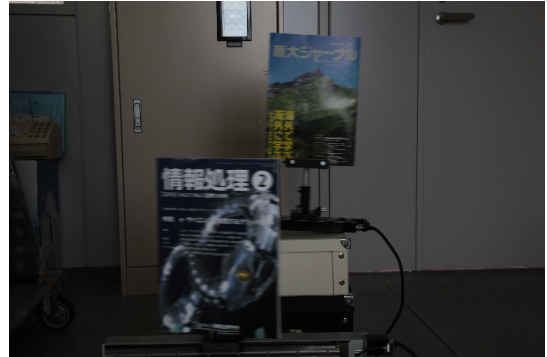


図 9 入力画像 (2 フレーム目)

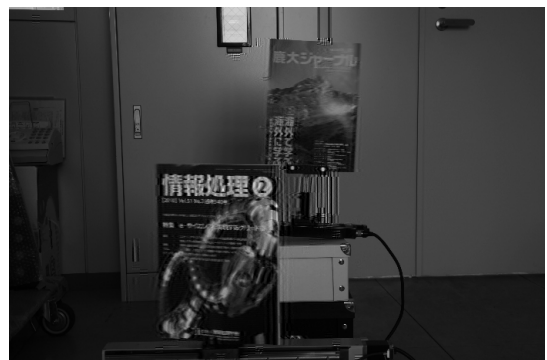


図 10 提案手法での deblur 結果

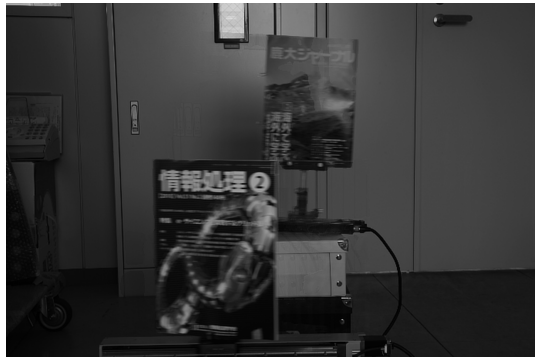


図 11 超解像結果 (deblur なし)

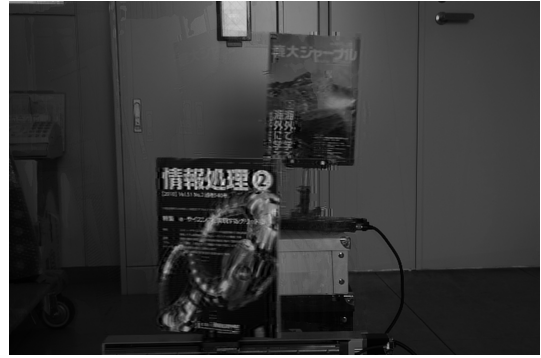


図 15 超解像結果 (ブロックマッチングベースでの deblur 結果)

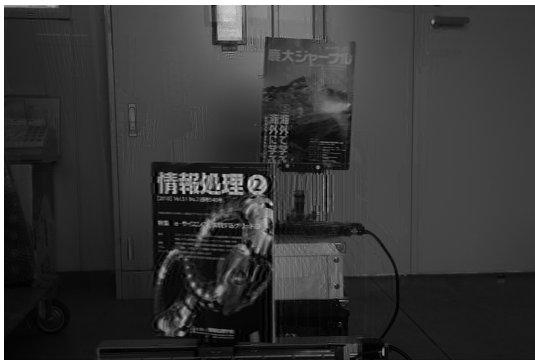


図 12 超解像結果 (提案手法で deblur)



図 16 入力画像 (基準フレーム)



図 13 ブロックマッチングベースでの推定エラー

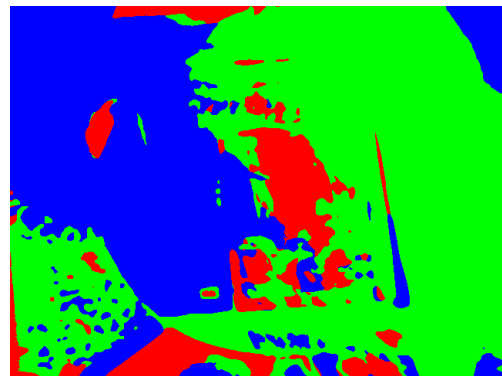


図 17 平面推定結果

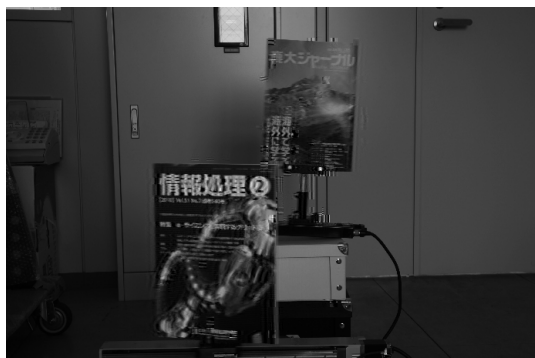


図 14 ブロックマッチングベースでの deblur 結果

法では、ブロック毎にアダプティブに deblur を行うため、画像全体の解像力が改善された (図 21)。しかし、一部ノイズが発生している部分も存在している。そのような部分では推定される動きベクトルが大きく (図 22)、カーネルが正確に推定されていないと考えられる。提案手法のベクトル推定の deblur、ブロックマッチングベースのベクトル推定及び deblur (図 23,24) とともに deblur できずにノイズが発生していることが分かる部分があるが、超解像結果 (図 25,26) は、deblur していないもの (図 27) よりも解像度が上昇していることが分かる。また、ブロックマッチングベースでの deblur 結果を超解像した結果は、ノイズが発生している部分は少ないが、そのような部分を除けば、提案手法での結果の方が解像度が上昇していることが分かる (図 28,29)。

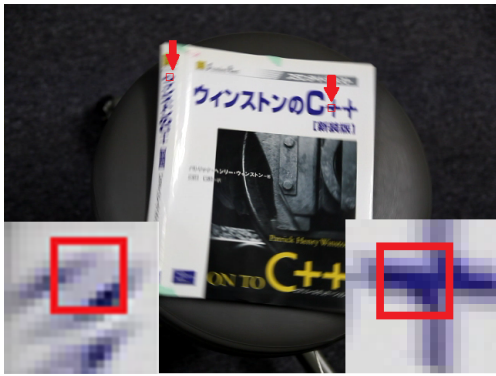


図 18 入力画像 (4 フレーム目) カーネル推定した領域



図 22 動きベクトル画像



図 19 「ウ」のカーネルで画像全体を deblur した結果

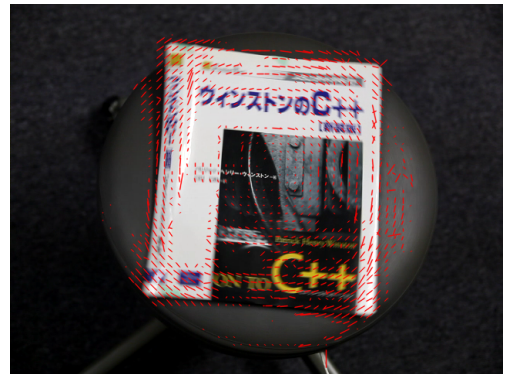


図 23 動きベクトル画像 (ブロックマッチングベース)

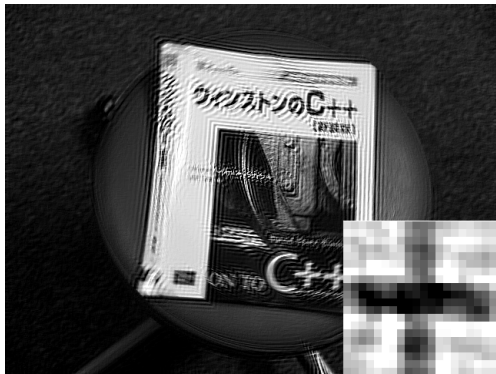


図 20 「+」のカーネルで画像全体を deblur した結果



図 24 deblur 結果 (ブロックマッチングベース)



図 21 提案手法での deblur 結果



図 25 超解像結果 (提案手法)



図 26 超解像結果 (ブロックマッチングベース)



図 27 超解像結果 (deblur なし)



図 28 超解像結果 (提案手法)



図 29 超解像結果 (ブロックマッチングベース)

7. ま と め

本稿では、3次元形状物体を含むシーンにおける手ぶれ映像を対象として、高解像度化する方法を提案した。提案手法では、特徴点追跡により平面候補群を推定し、各画素がどの平面に属するかを分類することにより、領域分割を行った。次に、各平面領域で平面射影変換行列を算出し、動きベクトルを求めた。そして、動きベクトルからモーションブラーカーネルを推定し、モーションブラー除去を行った。こうして得られた画像を超解像処理の入力とすることで、従来手法よりも解像力の高い画像が生成できた。実験では、平行移動する物体と回転運動する物体の場合において、提案手法の有効性を確認できた。

謝辞 本研究の一部は、総務省戦略的情報通信研究開発制度 (SCOPE) ICT イノベーション創出型研究開発 (101710002)、文部科学省科学研究費補助金 (21200002) および内閣府・最先端・次世代研究開発支援プログラム (LR030) の助成を受けて実施されたものである。ここに記して謝意を表す。

文 献

- [1] TAI, Y.-W., DU, H., BROWN, M. S. and LIN, S. Image/Video Deblurring using a Hybrid Camera, CVPR (2008).
- [2] FARSIU, S., ROBINSON, M. D., ELAD, M. and MILANFAR, P. Fast and robust multiframe super resolution, *IEEE Trans. on Image Processing*, **13**, 10 (2004), 1327-1344.
- [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] C. Tomasi, and T. Kanade, "Detection and Tracking of Point Features," *Carnegie Mellon University Technical Report CMU-CS-91-132*, Apr. 1991.
- [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] 山口 拓真, 川崎 洋, 古川 亮, 中山 利宏, "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," 第12回画像の認識・理解シンポジウム論文集 (MIRU2009 論文集), pp. 1223-1230, Jul. 2009.
- [11] FERGUS, R., SINGH, B., HERTZMANN, A., ROWEIS, S. T. and FREEMAN, W. T. Removing camera shake from a single photograph, *SIGGRAPH* (2006).
- [12] IRANI, M. I. and PELEG, S. Improving Resolution by Image Registration, *CVGIP*, **53** (1991), 231-239.
- [13] YAMAGUCHI, T., KAWASAKI, H., FURUKAWA, R. and NAKAYAMA, T. Super-Resolution of Multiple Moving 3D Objects with Pixel-based Registration, *ACCV* (2009).
- [14] 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.
- [15] A. K. Katsaggelos, R. Molina, and J. Mateos, *Super Resolution of Images and Video*, Morgan & Claypool publishers, 2007.
- [16] 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," *信学論 (D-II)*, vol. J88-D-II, no. 11, pp. 2200-2209, Nov. 2005.