

時空間画像解析を用いた全方位カメラ映像の超解像度化

川崎 洋[†] 池内 克史[†] 坂内 正夫[†]

Spatio-temporal analysis Omni Camera Image

Hiroshi KAWASAKI[†], Katsushi IKEUCHI[†], and Masao SAKAUCHI[†]

あらまし

全方位カメラによる全周画像を用いた研究が近年盛んである。筆者らはこれまで全方位カメラを利用して建物映像データベースを作成してきた。全方位カメラは一度の撮影で全周囲をの画像を得ることが出来る反面、通常のカメラとは異なる光学特性を有しており、利用の際にいくつかの困難を伴う。特に問題となるのは、一つにはカメラのキャリブレーションであり、もう一つには全周囲を一枚の画像におさめることによる低解像度である。前者はこれまでも多くの研究がなされてきたが、後者についてはこれまで全方位カメラの画像を利用することが少なかったためあまりなされていまい。最近になり、全方位カメラが実際に利用される機会が増すにつれ特に大きな問題として捉えられるようになってきた。解像度を向上する手法には大きく分けると、高解像度 CCD などのハードによる方法と、複数画像系列による超解像度化などソフトによる方法の2通りが考えられる。本論分では、後者ソフトによる手法を用いて全方位カメラの低解像度画像を超解像度化する手法について述べる。また本手法で提案する手法は全方位カメラのみに限定されるものではなく、通常の映像についても応用可能である。

キーワード 全方位画像、超解像度、時空間画像解析、建物映像データベース

1. ま え が き

全方位カメラは一度の撮影でカメラ周辺の全周画像を取得することが出来るため、ロボットのナビゲーション [1] や監視システム等に有効利用することが出来るため、これまでも多くの研究がなされてきた。また、映像そのものを利用する研究も試みられており [2]、筆者らもこれまで全方位カメラを用いた映像データベースの構築に取り組んできた [3]。これら研究のためには、全方位カメラのキャリブレーションが必須である。最近の主なキャリブレーションの研究としては [4] [5] 等が挙げられる。一方で、最近になり利用方法が画像の再構築 [2] [6] など画像そのものを対象とした手法が提案されるにつれ、全周囲を限られた密度の CCD に一度に撮影することによる解像度の大幅な低下が全方位カメラの大きな問題として指摘されるようになってきた。

一般に画像の解像度を向上させる、または画質を回復する試みとしては大きく分けると、高解像度 CCD

などのハードによる方法と、複数画像系列による超解像度化などのソフトによる方法の2つに分けられる。前者は最近の CCD の高密度化により、1000ピクセル x 1000ピクセルなどの高解像度全方位カメラも開発されるようになってきた。しかしながらこのような高解像度画像を画質の劣化を避けるために圧縮率を下げた状態で、連続的にビデオ映像として保存するのは容易ではない。また、実際に利用する際に透視変換することを考慮すると、このような高解像度 CCD でも十分とは言えない。

本論分では、ソフトウェアによる手法を用いることで、全方位カメラから得られる低解像度画像を超解像度化する手法について述べる。具体的には、車載全方位カメラで撮った映像を超解像度化し、より鮮明な建物画像を獲得し建物映像データベースの構築を目指している。本手法は、全方位カメラの映像を対象としている点、また、これまでの超解像度化の研究が主に固定カメラから撮影した映像を対象としているのに対して、動きのあるカメラから撮影した映像を対象としている点が、従来の超解像度化の研究と異なる点である。また本手法で提案する手法は全方位カメラのみに限定されるものではなく、通常の映像についても応用可能

[†] 東京大学生産技術研究所, 東京都
Institute of Industrial Science, The University of Tokyo 7-22-1 Roppongi, Minato-ku, Tokyo, 106-8558, Japan

である。

本論文では、まず、超解像度化に関するこれまでの研究について簡単に紹介し、続いて全方位カメラの特徴について簡単に述べる。次に、超解像度化を実現する手法を提案し、本手法を用いた実験とその結果を報告する。最後に、今後の課題と展開について述べる。

2. 関連研究

画像を超解像度化する試みはこれまで多くの研究がなされてきた。超解像度化は、一般に $y = Hx + b$ (y : 観測値, H : linear degradation operator, x : 実際の対象物, b : ノイズ) において、観測値 y から x を求めるという一種の逆問題といえる。

これまでのアプローチとしては主に、1枚の画像から復元する試みと、複数枚画像を利用する手法とに大きく分けられる。前者はノイズ除去や経験的な知識等を利用した画像復元なども含み、本論分における超解像度化とは趣を異にするするため軽く触れるに留める。以下にそれぞれの研究についてまとめる。

2.1 一枚からの復元

代表的な手法としては以下のようなものがある。

- ローパスフィルター等によるノイズ除去
- 最近傍値を用いた補間
- バイリニア補間
- スプライン補間

これらを組み合わせたり、経験的な知識を加えることで画像の超解像度化を行う。基本的には人間の目が画像の不連続(境界線等やノイズ)に対して敏感であることから、スムージングがベースとなる。またこれら手法を、**super resolution** とは呼ばずに単に **restoration** と呼ぶことも多い。このようなスムージングに対して、逆に境界などをシャープに復元することによる超解像度化の試みとしては、

- 画像のローカルな統計量を利用することで、繰り返し処理により超解像度化を試みる方法 [7]
- マルコフネットワークにより予め画像の特徴などを学習したおき、これにベイズ推定を組み合わせる超解像度化を試みる方法 [8]

などが挙げられる。

2.2 複数枚からの超高解像度化

対象とする複数画像に動きがあるか無いかで大きく二つに分けることが出来る。また動きのある画像についても、カメラは静止しており撮影対象が動いている場合と、カメラ自身が動いている場合の二つに分ける

ことが出来る。

2.2.1 静止した連続画像

ベイズ推定等の統計的な手法により、サブピクセル値を推定することが主な手法となる。その際に対象物体の3次元形状を考慮 [9] したり、さらに3次元形状そのものも精密に復元 [10] するなどの研究も行われている。また、このような統計的な手法のみに頼らないものとしては、

- RGBそれぞれのチャンネルの、画像内、画像間の相関を用いる方法 [11]
- 開口時間が0でないことによるモーションブラーを動き補償により解消することによる超解像度化 [12].
- 複数のカメラで撮影した画像をブロックマッチングにより **registration** することで超解像度化 [13].
- [13]に加えて時間方向にも画像系列を統合 [14] する手法
- イメージワーピングを用いる方法 [15]
- 画像そのものでなくエッジを利用する方法 [16] 等がある。

2.2.2 対象物体に動きのある連続画像

ビデオカメラを固定した状態で、動きのある物体を撮影した映像から超解像度化を行う研究をさす。最近の研究ではこのような映像を対象としたものが多い。基本的な手法としてはオプティカルフローやブロックマッチング等により対象物体の動きを推定し、その結果を使って超解像度化を行う。これまでの主な研究としては

- ブロックマッチングによる動きベクトル推定 [17]
- カルマンフィルターを用いる方法 [18]
- 各カラーチャンネルでの動きベクトルを推定することでブロックマッチングによる動きベクトルの精度を向上して超解像度化 [19]
- 映像を空間方向にはバイリニア補間し、時間方向には動き補償しながら繰り返し処理を行う手法 [20]. 映像から動きベクトルを直接求めるのではなく、時空間画像の評価関数を定義して、その値が最小となるような画像に収束させることで超解像度画像を得る。
- また、最近の研究としては、人間の顔のような複雑な形状をした物体が自由に動いている映像からの超解像度化の試みもある [21].

2.2.3 カメラに動きのある連続画像

カメラが動く場合には、カメラのエゴモーション等の推定が必要になり、比較的小さい対象物の動き推定のみによる手法よりも困難になることが多く、これま

であり多くの研究はなされていない。これまでの研究としては、背景も巨大なオブジェクトとみなすことでカメラモーションにも対応した超解像度の研究 [22] がある。これは動きのある物体をそれぞれセグメンテーションしてトラッキングすることで実現している。

本研究においても、カメラが大きく動くため、エゴモーションの推定や大きな動きの中でのピクセル単位での初期位置合わせが必要になる。

2.3 その他

一般的な画像の空間周波数などを考慮した超解像度の理論的な分析としては [23] が詳しい。また、以下のような研究も試みられている。

- バックプロジェクション法による超解像度化 [22]
- モザイクングでは重なりあう部分がかかり多いにもかかわらず、これら画像を単に位置合わせにしか利用していないことが多い。そこで、これら画像系列をサブピクセルベースで位置合わせすることで、モザイクングと超解像度化を同時に行う研究 [24]
- 全方位画像を用いた超解像度化の試みも行われている [25]。この研究においてはカメラ自体は静止している。また、リアルタイム処理を目指している点が注目される。これに対して、本研究ではカメラが大きく動きながら撮影した映像を対象としている点が異なる。また、映像データベースの構築が目的である点も異なっている。

3. 全方位カメラの光学特性

全方位カメラとは双曲回転体のミラーに周囲を投影し撮影するカメラである [2], [26], [27]。このため通常のカメラに比べてカメラの周りの環境について多くの情報を一度に獲得することが出来る。また、双曲回転体であるために比較的簡単な計算式により撮影した画像を透視変換画像に変換することが出来る。以下に全方位カメラの光学特性および、全方位カメラ画像から透視変換された画像を得るための計算式を簡単に紹介する。

図 1 に示してあるように、双曲回転体全方位カメラは特徴として 2 つの焦点を持つ。このため片方の焦点にカメラを置くと、あたかももう一つの焦点から撮影したかのような映像を撮影することが出来る。

以下の式 8 と 9 の計算式により、3 次元空間上の点を 2 次元平面の座標に変換することが出来る。

$$\frac{X^2 + Y^2}{a^2} - \frac{Z^2}{b^2} = -1 \quad (1)$$

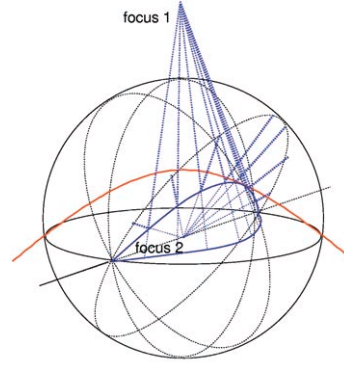


図 1 全方位カメラの光学モデル
Fig. 1 Model of hyperboloidal omni camera

$$(Z > 0)$$

$$(0, 0, +c) \quad (c = \sqrt{a^2 + b^2}) \quad (2)$$

$$(0, 0, -c) \quad (3)$$

(a, b, c are parameter of hyperboloidal mirror face)

$$Z = \sqrt{X^2 + Y^2} \tan \alpha + c \quad (4)$$

$$\alpha = \arctan \frac{(b^2 + c^2) \sin \gamma - 2bc}{(b^2 - c^2 \cos \gamma)} \quad (5)$$

$$\gamma = \arctan \frac{f}{\sqrt{x^2 + y^2}} \quad (6)$$

$$\theta = \arctan \frac{Y}{X} = \arctan \frac{y}{x} \quad (7)$$

α : an elevation between O and P

γ : an elevation between O and p

θ : an azimuth angle

$$x = X \times f \times \frac{b^2 - c^2}{(b^2 + c^2)Z - 2bc\sqrt{X^2 + Y^2} + Z^2} \quad (8)$$

$$y = Y \times f \times \frac{b^2 - c^2}{(b^2 + c^2)Z - 2bc\sqrt{X^2 + Y^2} + Z^2} \quad (9)$$

4. 映像の超解像度化

関連研究で述べたようにこれまで多くの超解像度化の手法が提案されてきた。本研究においては対象がビデオ映像であるため、複数枚の連続画像を利用することが可能である。また、カメラが移動するため、これ

まで主に試みられてきたベイズ推定などの統計的な手法を単純に適用することは困難である。そこで本研究では、画像の解像度は本来、レンズの開口径数や空間周波数応答、ピクセルの密度等の要素が複雑に絡んでいると考えられるが、これを一つの点拡がり関数に単純化することで、この関数をカーネルとするバックプロジェクション法により、画像誤差を極小化することによる超解像度化を試みる。以下ではバックプロジェクション法について述べた後、本研究におけるカーネルの設計方法について説明する。また、本研究では動きのある映像を対象としているため、カメラのエゴモーションの推定及びこれら映像の位置合わせが必須である。これら手法についても述べる。

4.1 バックプロジェクション法

本研究で用いるバックプロジェクション法は文献[22]を主に参考としている。具体的な手法としては、得られた超解像度画像と実際の画像系列との誤差を評価関数を用いて表現し、これを最小化するように繰り返し処理を行うというものである。個々の繰り返し処理は、2段階のステップを踏む。ステップ1は複数画像からの超解像度画像の生成であり、ステップ2はその超解像度画像を再び低解像度化する画像処理である。ステップ1の処理における超解像度画像の生成は、ステップ2の誤差をバックプロジェクションすることにより行われる。以下にその過程を示す。

$$f^{(n+1)} = f^{(n)} + \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K H_k^{-1} ((g_k - g_k^{(n)}) * p) \quad (10)$$

ここで K は入力画像の数であり、 $f^{(n)}$ は n 番目に生成した超解像度画像、 g_k は k 枚目のオリジナル入力画像、 $g_k^{(n)}$ は $f^{(n)}$ から再生成した低解像度画像である。また、 H_k^{-1} は以下に述べる移動マトリクス H_k から計算され、 p は後述のバックプロジェクションカーネルである。

また、誤差評価関数はステップ2の処理で得られた低解像度画像と、実際の入力画像系列とを用いて以下の式により定義される。

$$e^{(n)} = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \|g_k - g_k^{(n)}\|_2^2} \quad (11)$$

この誤差評価関数が最小値に収束した時の画像を最終的な超解像度画像とする。評価関数の最小化は、繰り返し処理の度に画像系列の中から順に一枚ずつ(第

k 画像とする)サブピクセル単位で xy 方向に平行移動(マトリクス H_k)することで行われる。また、効率よく収束させるためにニュートン法を用いている。

4.2 カーネル設計

バックプロジェクション法においては、カーネルの設計が画像の超解像度化に重要な影響を及ぼす。バックプロジェクション法は一種の逆問題の解法であるため、カーネルの設計次第では解が不安定になったり、現実とは異なる画像に収束してしまう。文献[22]では、超解像度画像に収束するためのカーネルの条件について分析している。また、本研究においては通常のカメラと異なり、全方位カメラを使用しているため、全方位カメラに適したカーネルの設計が必要である。全方位カメラ特有の光学特性についての分析は[25]に詳しい。

ここではこれらカーネルに関する分析及び全方位カメラ特有の光学特性を考慮した上で、全方位カメラに適したカーネルを設計する。理論的には、カーネルの設計には、全方位カメラのMTF、CCDによるローパスフィルタとしての振る舞い、および俯角による周波数要求の変化の3つを考慮しなければならない。しかしながら、これら全ての要素を厳密に反映させることは現実的には困難である。また、文献[22]で解析されている通り、超解像度の収束には必ずしも厳密なカーネルは必要でない。そこで、本研究においては、これらの複数の要素を組み合わせたものを、1つの点拡がり関数に単純化することで具体的な処理を実現した。実際には、CCDによるローパスフィルタとしての効果を点拡がり関数で表し、この関数の拡がり度合いを俯角により変化させている。具体的には J_1 を第1種第1次のベッセル関数、 F をフーリエ変換とする次式で表される p をカーネルとして用いている。ここで、 d は俯角により変化する値であり、全方位画像の中心に近いほど大きく離れるほど小さな値となる。また、 l は注目画素からの距離であり、 k は係数である。

$$p(l) = F \left(\left[\frac{2J_1(kdl)}{kdl} \right]^2 \right) \quad (12)$$

4.3 エゴモーションの推定及び初期位置合わせ

本研究においては、カメラが固定でないため、エゴモーションの推定が必要である。また、バックプロジェクションにおいて超解像度画像を収束させるためには、前処理として入力画像系列をピクセル単位で初期位置合わせしておく必要がある。

本論文においては対象映像として車載カメラから撮影したビデオ映像を利用しているため、超解像度化に必要な画像枚数を取得するための時間は微小時間であり、カメラの動きを車の進行方向及び上下の振動だけに単純化し、回転及び伸縮の影響はほとんどないものとしても差し支えない。

エゴモーションの推定には、これまで筆者らが取り組んできた全方位カメラのEPIによる時空間解析を用いた[4]。この手法により、効率よく高精度な推定が可能な他、同時に建物画像の同定も可能なため、建物映像データベースの構築に都合が良い。また、ピクセル単位での位置合わせには階層ブロックマッチングを適用した。

以下では全方位カメラEPIによるエゴモーションの取得方法および、階層ブロックマッチングによる位置合わせのそれぞれについて述べる。

4.3.1 EPIによるエゴモーションの推定

時空間画像の解析手法としてEPI法が知られている[28][29]。このEPI法とは画像から3次元情報を獲得する為の解析手法であり、時空間画像の断面(Epipolar Plane Image)上では画像間の対応点が連続することを利用して、現実の画像で得ることが困難な対応点の取得を直線の検出に置き換えることで、比較的安定に3次元情報を獲得するものである。

本論文では対象映像として都市を車載カメラから撮影した映像を用いているため、以下に述べる理由からEPI解析に適している。

- (1) 道路に沿って直進運動する車から撮影しているため、微小時間においては一定速度、撮影経路を直線と仮定することが出来る
- (2) 一般に建物は道路に沿って平行に建っているため、EPI上で直線の軌跡を描く
- (3) 建物は平面で構成されていることが多く、これを拘束条件とすることでより安定かつ現実的な解析が出来る
- (4) 地図などの情報とマッチングすることで建物の同定が可能である

ここでは、EPI解析を用いることで都市の建物群を撮影したビデオ映像から3次元情報を獲得し、建物を同定すると同時にカメラ自身のエゴモーションの推定を試みる。実際の建物の正確な形状は分からないため、ここで得られるカメラのエゴモーションは相対的なものである。

全方位カメラ画像からEPIを作成するために、全方

位カメラ画像から時空間画像を生成する。この時空間画像は全方位カメラ画像を時間軸にそって積層することによって得ることが出来る(図2(a))。通常のEPIはこの時空間画像を画像の x 軸に平行な直線(エピポーラ線)で切断した断面図として得ることが出来る。しかし、全方位カメラ画像におけるエピポーラ線は楕円または双曲線を描くため、通常カメラと同じEPIを得るためにはこのようなエピポーラ曲線に沿って時空間画像を切断しなければならず困難を伴う。我々は論文[4]において全方位時空間画像を単純に縦方向に切断し3次元形状を取得する手法を提案した。本研究においても同様の手法を利用することで効率的な3次元形状およびカメラのエゴモーションの取得を試みる。図2(b)に縦方向に切断した例を示す。切断面において、通常のEPI平面同様の直線軌跡が描かれているのが分かる。

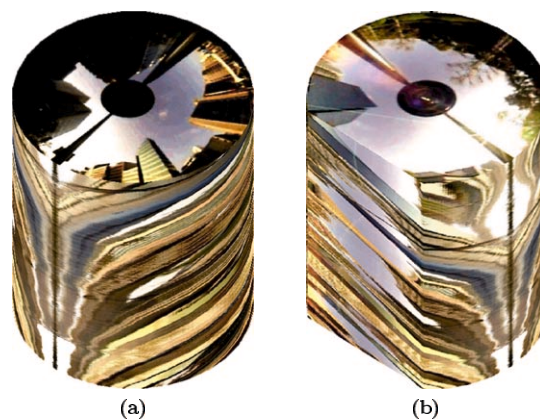


図2 (a)全方位カメラ時空間画像 (b)縦に切断した例
Paraboloidal omni spatio-temporal volume

Fig.2 (a)Omni spatio-temporal volume (b)vertical cross section of spatio-temporal volume of omni-directional camera

また、一般にEPIの解析にはカメラの移動速度が一定であることや、十分なフレームレート等が必要であるが、筆者らが提案している手法ではEPIを従来のように静的に解析するのではなく、EPIどうしを動的にマッチングすることにより解析を行うため、EPI上におけるパターンに連続性があれば十分であり、精密に計測したビデオ映像でなくても解析可能である。

図3に得られた全方位カメラEPIの例を示す。このEPI上から直線を検出し、傾きを得ることで建物の3次元形状の取得とカメラの横方向の動きの推定が可能

である。実際の処理としては、全周囲を一度に撮影できる全方位カメラの特性を利用して、撮影した全方位映像から、取得した3次元形状とエゴモーションを使用することで同一の建物だけの画像系列を透視変換して抽出する。

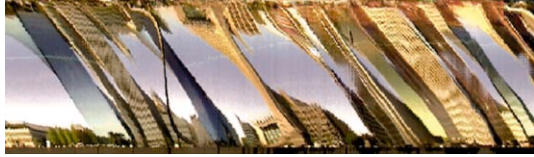


図3 全方位カメラ画像EPI
Fig.3 Omni-directional camera EPI

4.3.2 階層ブロックマッチングによる位置合わせ
超解像度化を安定して行うためには、入力画像系列がピクセル単位で位置合わせされている必要がある。前節において既に、全方位カメラEPIにより全方位画像から特定の建物画像のみがある程度位置合わせされた状態で得られているため、ここではさらに精度の高い位置合わせを実現するために階層ブロックマッチングを行う。

5. 障害物の除去

本手法は統計的手法と組み合わせることで、画像の超解像度化と同時に障害物の除去が可能である。もともとバックプロジェクションにおいては得られた画像と個々の画像との誤差を最小にするようにピクセル値を決定するため、この時の評価関数にある閾値を設定し、その閾値以上にはずれたピクセル値を除外し処理することで障害物やノイズの除去が可能となる。しかし、初期画像が単純なピクセルの平均値であれば、閾値を設定するだけでは誤ったピクセル値に収束してしまうため、本研究では投票によるピークを形成するピクセル値を採用し超解像度画像を生成している。

このような障害物の除去は、個々建物映像を取得する際に、電柱や街路樹等の除去に有効である。

6. 実験

提案した手法の有効性を検討するために実際に撮影した映像を用いて実験を行った。以下にその概要と結果を述べる。

6.1 対象映像

本実験では、全方位カメラを車載し直線に近い道路

に沿って撮影した建物映像を対象とした。映像は一旦NTSC信号に変換された後、VCRに保存される。このインターレース信号をバイリニア補完により640x480の画像系列として計算機に保存し、実験に使用した。使用した画像の例を図8の上図に示す。

6.2 実験結果

以下にこれまで述べたそれぞれの手法の結果を示す。

6.2.1 EPI法を用いた初期位置合わせ

EPI法により得た建物の3次元形状とカメラのエゴモーションを利用して、全方位画像から抽出した特定建物の例を図4に、これに階層ブロックマッチングを行うことで初期位置合わせした画像の例を図5示す。カメラが大きく動いているにもかかわらず同じ建物が正しく抽出され、初期位置あわせができていることが確認できる。

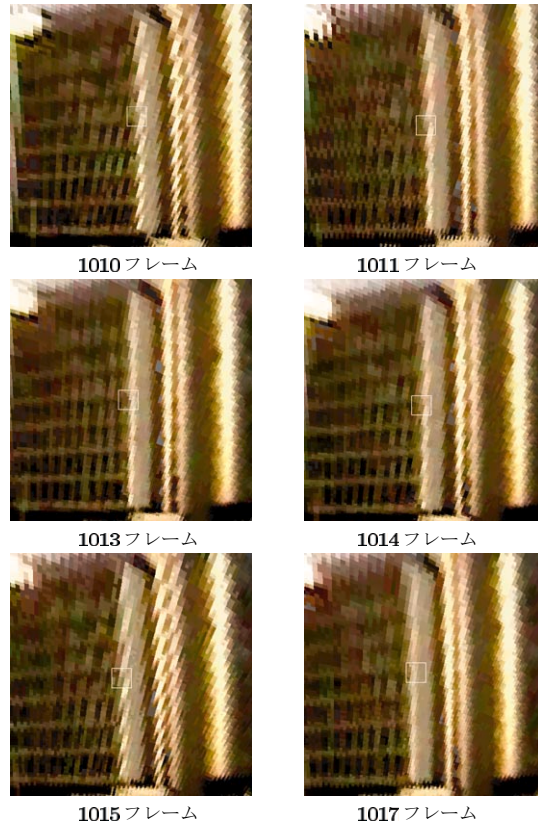


図4 EPI法による自動画像抽出例
Fig.4 Automatic extraction of images using EPI

6.2.2 バックプロジェクションによる超解像度画像
このようにして初期位置合わせされた画像の系列を

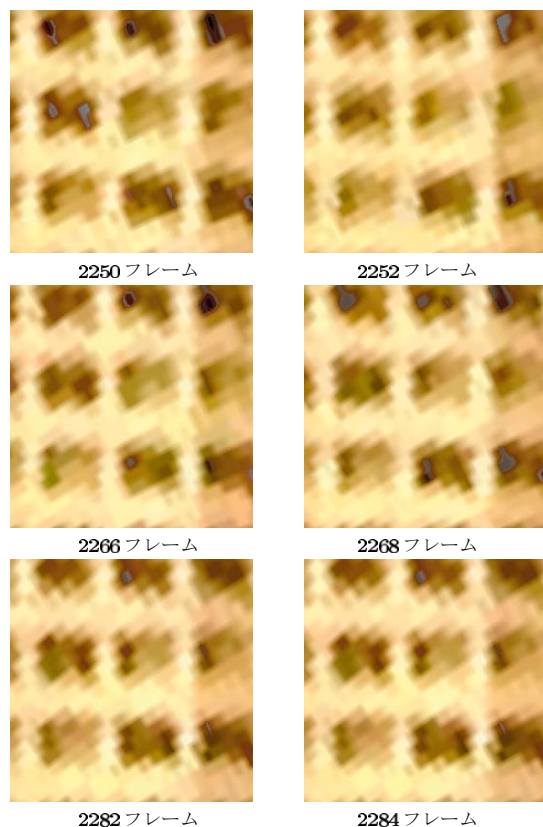


図5 ブロックマッチングによる位置合わせ
Fig. 5 registration using block match

バックプロジェクション法により超解像度化した画像の例を図6に示す。左上が図4を超解像度化したもの、右上が図5を超解像度化したものである。またその下の図は映像データベースとして地図とマッチングした結果、超解像度化した建物画像を自動抽出した例である。建物画像が超解像度化されているのが確認できる。また、図7に別の建物画像の例を示す。

これらの超解像度画像から仰角による周波数応答の変化を考慮したカーネルを使用したにも関わらず、仰角の大きな部分(建物の上方)に関してはあまり解像度の向上が見られないことが分かる。これは、もともとの入力画像の空間周波数が低すぎるため情報の欠損が大きすぎるためと考えられる。

6.2.3 障害物の除去

また、提案した手法により障害物を除去をシミュレートした例を図8に示す。障害物が除去されているのが確認できる。

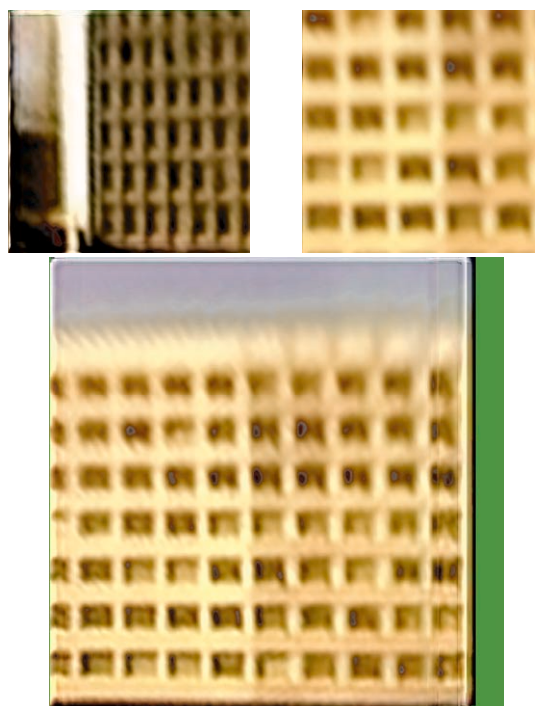


図6 超解像度画像例1
Fig. 6 super-resolved images

7. む す び

本論文では、動きのある映像の超解像度化手法を提案し、これを全方位カメラに適用するためのカーネルの設計方法および位置合わせの手法について述べた。また、本手法を実際の映像に適用し実験した結果、画像を超解像度化することが出来た。

本研究は、これまでの超解像度化の研究が主に対象としてきた映像と異なり、カメラ自身が大きく動きながら撮影した映像を対象としている。また、全方位カメラ画像に超解像度化を試みた点も新しい。このような動きのある映像を超解像度化するために、時空間解析を用いてカメラの動き推定および3次元形状の取得を行った。具体的な手法としては、映像を時間軸方向に積層した時空間画像を切断して得られるEPI面を解析することで建物の3次元形状及びカメラの動きを推定した。また、全方位カメラ画像に超解像度化を適用するために全方位カメラの光学特性を考慮したカーネルの設計を行った。

実際に撮影した映像を用いて、実験・評価を行った

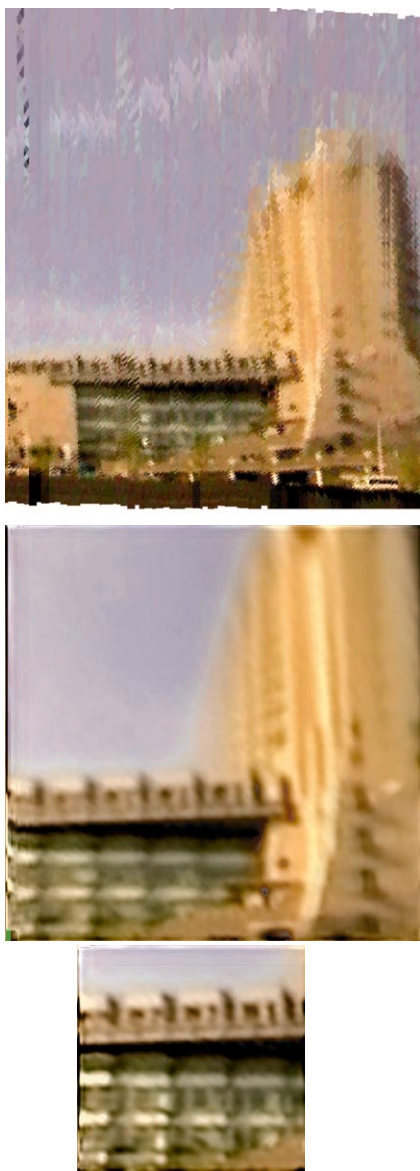


図7 超解像度画像例2:上から順番に、これまでのモザイクによる画像、超解像度画像、アダプティブフィルタを用いた超解像度

Fig.7 super-resolved images

ところ、時空間画像解析により正しく初期位置合わせを実現することが出来た。また、設計したカーネルを用いてバックプロジェクション法を適用することで、全方位画像を超解像度化することが出来た。

また、本手法を統計的な手法と組み合わせることで、超解像度化と同時に障害物の除去にも大きな効果が得

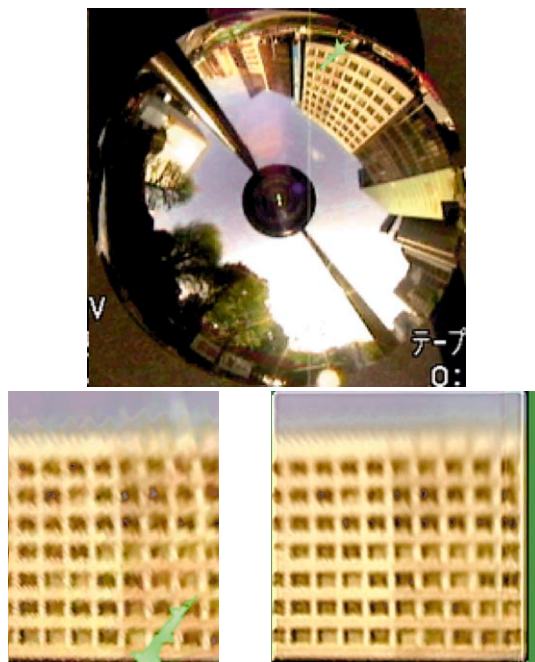


図8 ノイズ除去例:上、ノイズののった全方位画像、左下、透視変換画像、右下、ノイズ除去を行った超解像度画像

Fig.8 super-resolved images

られることが確認できた。

今後の課題としては、未だに十分な解像度が得られていない建物上方部分の超解像度化および、建物映像データベースとして利用するために、さらなる品質の改善等が挙げられる。このため、現在、高密度の CCD を併せて用いることによる画質の向上に取り組んでいる。また、ランバーシャンでない対象物や、複雑な形状の対象物の超解像度化、より効果的なカーネルの検討なども挙げられる。

謝辞 本研究の一部は、文部省科学研究費補助金(創成的基礎研究費・課題番号09NP1401)による。

文 献

- [1] J. Y. Zheng and S. Tsuji, "Panoramic representation of scenes for route understanding," *Int. Conf. Pattern Recognition*, pp. 161-167, June 1990.
- [2] 尾上良雄, 山澤一誠, 横矢直和, 竹村治雄, "全方位画像からの視線追従型実時間画像生成によるテレプレゼンス," *信学技報, PRMU97-20*, pp. 151-157, May 1997.
- [3] 川崎洋, 谷田部智之, 池内克史, 坂内正夫, "Omni ビデオカメラからの3次元都市の自動生成," *情処研報, CVIM-119*, pp. 25-32, Nov. 1999.
- [4] H. Kawasaki, K. Ikeuchi and M. Sakauchi, "Spatio-Temporal analysis of omni image," *CVPR*, June

- 2000.
- [5] S. B. Kang, "Catadioptric Self-Calibration," CVPR, vol. 2, pp. 201–207, June 2000.
- [6] T. Takahashi, H. Kawasaki, K. Ikeuchi and M. Sakauchi, "Expanding possible view points of virtual environment using panoramic images," CVPR, June 2000.
- [7] M.-C. Hong, T. Stathaki and A. K. Katsaggelos, "Iterative regularized image restoration using local constraints," Proc. IEEE Workshop on Nonlinear Signal and Image Processing, vol. 1, Mackinac Island, MI, pp. 145–148, Sept. 1997.
- [8] W. T. Freeman and E. C. Pasztor, "Learning low-level vision," Int. Conf. Image Processing, oct 1999.
- [9] P. Cheeseman, B. Kanefsky, R. Hanson and J. Stutz, "Super-resolved surface reconstruction from multiple images," Technical Report FIA-93-02, NASA Ames Research Center, Artificial Intelligence Branch, Feb. 1993.
- [10] V. N. Smelyanskiy, P. Cheeseman, D. A. Maluf and R. D. Morris, "Bayesian super-resolved surface reconstruction from images," CVPR, vol. 2, pp. 375–382, June 2000.
- [11] B. C. S. Tom, K. T. Lay and A. K. Katsaggelos, "Multi-channel image identification and restoration using the expectation-maximization algorithm," Optical Engineering.
- [12] A. J. Patti, M. I. Sezan and A. M. Tekalp, "Super-resolution video reconstruction with arbitrary sampling lattices and non-zero aperture time," Transactions on Image Processing, vol. 6, no. 8, pp. 1064–1076, Aug. 1997.
- [13] T. Igarashi, T. Komatsu, K. Aizawa and T. Saito, "Very high resolution imaging scheme with multiple different-aperture cameras," Signal Processing: Image Communication, vol. 5, 1993.
- [14] Y. Nakazawa, T. Saito, T. Komatsu, T. Sekimori and K. Aizawa, "Two approaches for image-processing based high resolution image acquisition," Int. Conf. Image Processing, vol. 3, Nov. 1994.
- [15] M.-C. Chiang and T. E. Boulton, "Efficient image warping and super-resolution," Proceedings of the Third IEEE Workshop on Applications of Computer Vision, pp. 56–61, Dec. 1996.
- [16] M.-C. Chiang and T. E. Boulton, "Local blur estimation and super-resolution," CVPR, 1997.
- [17] R. R. Schultz and R. L. Stevenson, "Extraction of high-resolution frames from video sequences," Transactions on Image Processing, vol. 5, no. 6, pp. 996–1011, June 1996.
- [18] M. Elad and A. Feuer, "Super-resolution reconstruction of continuous image sequence," Int. Conf. Image Processing, Oct. 1999.
- [19] B. C. Tom and A. K. Katsaggelos, "Resolution enhancement of color video," Proc. European Conf. on Signal Processing, Italy, pp. 145–148, Sept. 1996.
- [20] M.-C. Hong, T. Stathaki and A. K. Katsaggelos, "An iterative weighted regularized algorithm for improving the resolution of video sequences," Int. Conf. Image Processing, vol. II, Santa Barbara, CA, pp. 474–477, Oct. 1997.
- [21] S. Baker and T. Kanade, "Super-Resolution optical flow," CMU-RI-TR-99-36 Technical Report, 2000.
- [22] M. Irani and S. Peleg, "Motion analysis for image enhancement: Resolution, occlusion, and transparency," J. on Visual Communications and Image Representation, vol. 4, no. 4, pp. 324–335, Dec. 1993.
- [23] T. S. Huang and R. Y. Tsai, "Multi-frame image restoration and registration," Computer Vision and Image Processing, vol. 1, pp. 317–339, 1984.
- [24] A. Zomet and S. Peleg, "Applying super-resolution to panoramic mosaics," IEEE Workshop on Applications of Computer Vision, Oct. 1998.
- [25] 長原一, 八木康史, 谷内田正彦, "全方位時空間画像からの超解像度化," 情処研報, 00-CVIM-121, pp. 97–104, March 2000.
- [26] S. Nayar, "Catadioptric omnidirectional video camera," CVPR, pp. 482–488, June 1997.
- [27] 山澤一誠, 八木康史, 谷内田正彦, "移動ロボットナビゲーションのための全方位視覚系," 信学論, vol. J79-D-II, no. 5, pp. 698–707, May 1996.
- [28] 山本正信, "連続ステレオ画像からの3次元情報の抽出," 信学論 (D), vol. J-69, no. 11, pp. 1631–1638, Nov. 1986.
- [29] R. Bolles, H. Baker and D. Marimont, "Epipolar plane image analysis: an approach to determining structure from motion," Int. J. of Computer Vision, vol. 1, pp. 7–55, 1987.

(平成 11 年 2 月 25 日受付)

川崎 洋

1994 京大・工・電気電子卒。現在、東大大学院修士課程在学中。主として画像処理、映像メディアに関する研究に従事。

池内 克史 (正員)

1973 京大・工・機械卒。1978 東大・工・情報工学博士課程了。MIT 人工知能研究所、電総研を経て 1986CMU 計算機科学科およびロボティクス学科研究教授 (Principle Research Scientist)。1996 より東大生産技術研究所教授。人間の視覚機能、明るさ解析、物体認識、人間による組み立て作業の自動認識などの研究に従事。工博。D. Marr 賞 (ICCV : 1990), IEEE 優秀論文

文賞 (CVPR : 1991), 最多引用論文賞 (AI Journal : 1992)
等受賞. IEEE, 日本ロボット学会各会員.

坂内 正夫 (正員)

1975 東大大学院工学系研究科博士課程了. 同年同大学工学部電気工学科専任講師, その後, 横国大学工学部情報工学科助教授, 東大生産技術研究所助教授を経て, 現在, 同大学生産技術研究所教授. 1998 より同大学生産技術研究所所長. マルチメディアデータベースなどの研究に従事. 工博.