

車載全方位カメラ映像からの建物画像の超解像度化

川崎 洋 池内 克史 坂内 正夫

東京大学生産技術研究所

〒 106-8558 東京都港区六本木 7-22-1 Tel : 03-3401-1433

E-mail: {h-kawa, sakauchi}@sak.iis.u-tokyo.ac.jp, ki@iis.u-tokyo.ac.jp

あらまし

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の画像を得ることが出来る反面、限られたピクセル内にそれら全てを写し込むため、画像を利用するには十分な解像度を得ることが出来ず、これまで大きな問題であった。また、過去の超解像度化の対象映像は、静止したカメラを用いたものがほとんどであるのに対し、今回対象とする映像は車載カメラで建物を撮影したものであり、カメラ自体が大きく動くため、従来手法の単純な適用は困難である。そこで、本論文では、このように大きく動く全方位カメラで撮影した映像をEPIとバックプロジェクション法を用いることで超解像度化する手法を提案し実装する。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、通常カメラ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

Super-resolution of the buildings from Omni Video

Hiroshi KAWASAKI Katsushi IKEUCHI Masao SAKAUCHI

Institute of Industrial Science, The University of Tokyo

7-22-1 Roppongi, Minato-ku, Tokyo JAPAN 106-8558 Tel : 03-3401-1433

E-mail: {h-kawa, sakauchi}@sak.iis.u-tokyo.ac.jp, ki@cvi.iis.u-tokyo.ac.jp

Abstract

In this paper, we propose an efficient algorithm of super-resolution technique for omni-directional camera which is installed on the top of the car. Omni-directional camera can take a 360 degrees scene at once, and useful for robot-navigation, surveillance and other areas, however, the limitation of CCD and omni-camera's unique optic characteristic makes the resolution very low. Therefore, improving the resolution of omni-directional camera images is very important. To super-resolve the omni-camera image taken by the dynamically moving car, we employ two technique such as EPI and back projection method. As the result, we can successfully generate the better resolution images from input low resolution omni-camera image sequence.

key words

Omni-directional camera, super-resolution, Spatio-temporal analysis

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、この特徴を利用した研究がこれまで広く行なわれて来た。筆者らも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いる [1]。一方で、全方位カメラの利用方法が画像の再構築 [2][3] など画像そのものを対象としたものが多く提案されるにつれ、全周画を限られた密度の CCD に一度に撮影することによる解像度の大幅な低下が問題点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試みとしては大きく分けると、高解像度 CCD など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 つに分けられる。前者は近年の CCD の高密度化により、1000x1000 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、ビデオ映像として保存するのは容易ではない。また、実際の利用に際して透視変換することを考慮すると、このような高解像度 CCD でもまだ十分とは言えない。

本論分では、ソフト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、車載した全方位カメラで撮った映像を超解像度化することにより、鮮明な建物画像を獲得し、建物映像データベースを構築することを目的としている。本手法は、全方位カメラの映像を対象として、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、大きく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、従来の研究とは異なる。また本論文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。

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がこれまで多くなされてきた。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。画像の空間周波数などを考慮した画像の超解像度化の理論的な分析としては [4] に詳しい。

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、今回の超解像度化とはあまり関連が無いため、後者の複数画像系列からの超解像度化手法について簡単に紹介する。

複数枚からの超高解像度化手法は、対象とする複数画像に動きがあるか無いか、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のか、カメラ自身が動いているのか、等によって細かく分けられる。

・ 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 [5] したり、さらに 3次元形状そのものも精密に復元 [6] するなどの研究が行われている。

・ 対象物体に動きのある連続画像

上述の静止物体に対して、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の超解像度化を行う研究が近年盛んである。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、その結果を用いて超解像度化を行う。

・ 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、前述の対象物に動きがある映像よりも困難になることが多い。そのため、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 [7] 等にとどまっている。

また、最近注目される超解像度化の手法として以下のような研究も行なわれている。

・ バックプロジェクション法による超解像度化 [7]

・ モザイクと超解像度化を同時に実現 [8]

画像のモザイクでは重なりあう部分が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実現する手法

全方位画像を用いた超解像度化の試みも行われている [9]。この研究においてはリアルタイム処理を目指している点が注目される。ここではカメラ自体は固定されている。これに対して、本研究ではカメラ自身が動きながら撮影した映像を対象としている点、また、映像データベースの構築が目的である点などが異なっている。

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, 10]。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の特徴として 2 つの焦点を持つことが挙げられる。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。

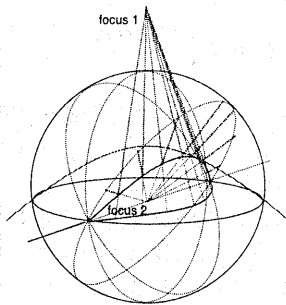


図 1: 全方位カメラの光学モデル

この特徴を利用することで、三角関数を含まない以下の式 7 と 8 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。

$$\frac{X^2 + Y^2}{a^2} - \frac{Z^2}{b^2} = -1 \quad (Z > 0) \quad (1)$$

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

$$(0, 0, -c)$$

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

$$Z = \sqrt{X^2 + Y^2} \tan \alpha + c \quad (3)$$

$$\alpha = \arctan \frac{(b^2 + c^2) \sin \gamma - 2bc}{(b^2 - c^2 \cos \gamma)} \quad (4)$$

$$\gamma = \arctan \frac{f}{\sqrt{x^2 + y^2}} \quad (5)$$

$$\theta = \arctan \frac{Y}{X} = \arctan \frac{y}{x} \quad (6)$$

α : an elevation between upper focus and p

γ : an elevation between lower focus and p

θ : an azimuth angle

$$x = X \times f \times \frac{b^2 - c^2}{(b^2 + c^2)Z - 2bc\sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}} \quad (7)$$

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

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出来る。しかしながら、本研究ではカメラ自身が大きく移動するため、これまで主に試みられてきた超解像度化手法をそのまま適用することは出来ない。そこで本研究では、画像の解像度は本来、レンズの開口関数や空間周波数応答等の光学的作用に、ピクセル密度や AD 変換等の電気的作用が複雑に絡んでいるものと考えられるが、これを一つの点拡がり関数で表現することで、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、画像誤差を最小化することによる超解像度化を試みた。本研究においてバックプロジェクション法を用いた理由としては、このように抽象化したカーネルでも安定して収束する性質や、カメラ自身が移動するためベイズ推定のような統計的な手法を使うことが出来ない場合でも、誤差最小化により超解像度化を実現することが出来るためである。

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ヨ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 [7] を主に参考している。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の誤差をその前の繰り返し処理で生成された超解像度画像にバックプロジェクションすることで行われる。以下にその過程を示す。

$$f^{(n+1)} = f^{(n)} + \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K H_k^{-1} ((g_k - g_k^{(n)}) * p) \quad (9)$$

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} は後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。

$$e^{(n)} = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \|g_k - g_k^{(n)}\|_2^2} \quad (10)$$

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 [7] では、超解像度画像が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 [9] 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つを特に考慮する必要があると考えられる。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り、また、文献 [7] で解析されている通り、超解像度画像が収束するためのカーネルは、ただ一つだけ存在している訳ではなくある程度自由度がある。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つの点拡がり関数で表現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 $p(l)$ をカーネルとして用いた。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をとる。また、 l は注目要素からの距離であり、 k は係数である。

$$p(l) = F \left(\left[\frac{2J_1(kdl)}{kdl} \right]^2 \right) \quad (11)$$

4.3 エゴモーシヨ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、エゴモーシヨンの推定が必要である。また、バックプロジェクション法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。

本論分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と仮定し、回転及び伸縮の影響はほとんどないものとして差し支えない。

エゴモーシヨンの推定には、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 [11] を用いた。この手法により、効率よく高精度な推定が可能で、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 [12][13]。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る。EPI 法は、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、比較的安定した 3 次元情報の獲得を可能にする。

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. 道路に沿って移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。実際には、建物の形状や位置が正確には分からないため、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 [11] において全方位時空間画像を単純に縦方向に切断することで 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た。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。

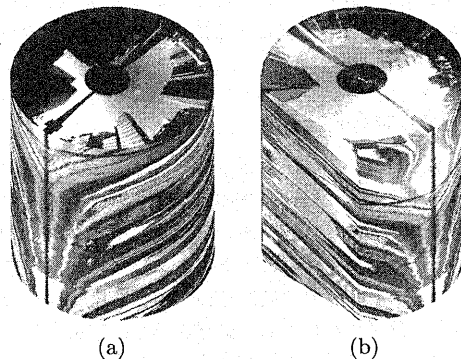


図 2: (a) 全方位カメラ時空間画像 (b) 縦に切断した例

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、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、撮影した全方位映像から同一の建物だけの画像系列を透視変換して抽出する。

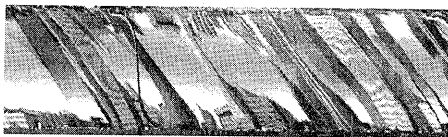


図 3: 全方位カメラ画像 EPI

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初期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った。

5 障害物の除去

本手法を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。バックプロジェクション法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を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り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、個々の建物映像を取得する際に、電柱や街路樹等を除去するのに有効である。

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 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 ピクセル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 4 に示す。

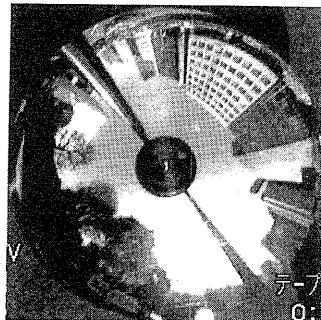


図 4: 全方位画像例

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 法を用いてカメラのエゴモーションを推定し、これにより全方位画像から特定建物を抽出し、さらに階層ブロックマッチングにより初期位置合わせした例を図 5 に示す。カメラが大きく動いているにも関わらず同じ建物が正しく抽出され、階層ブロックマッチングにより初期位置あわせが正しくできていることが確認できる。

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。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。

図 7 においては、入力画像が空を多く含むため、初期位置あわせとして階層マッチングを用いただけでは平均画像(図中段)のようになってしまっている。そこで、空部分を除いた建物部分だけでマッチングした結果、超解像度化出来ているのが確認できる(図下段)。

これらの超解像度画像から、仰角による周波数応答を考慮したカーネルを使用した結果、ある程度まで仰角が変化しても、画像の超解像度化が行われていることが分かる。しかし、仰角がさらに大きな部分(建物の上方)に関しては解像度の向上が見られない。これは、

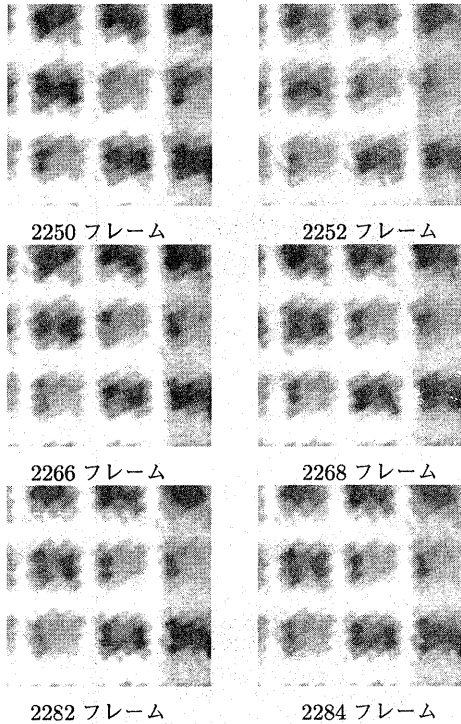


図 5: ブロックマッチングによる位置合わせ

全方位カメラは中心部分(透視変換画像では上方部分)においては、ピクセル密度が周辺部分に対して著しく低いことに加えて、通常ピクセル密度の高い周辺部分のMTFが最大となるように設計されているため、上方部分の情報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の除去をシミュレートした例を図8に示す。この実験における障害物は、建物よりもカメラに近い位置に木(図中緑色の物体)を仮定し、これがEPI上で直線を描くように全方位画像に人工的に付加したものを入力画像とした。障害物が除去されて超解像度化されているのが確認できる。

7 むすび

本論文では、動きのあるカメラから撮影した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

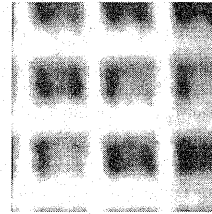


図 6: 超解像度画像例 1

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。

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点、また、全方位カメラ画像に超解像度化を試みた点が新しい。このような動きのある映像を超解像度化するために、時空間画像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、全方位カメラ画像を超解像度するために、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られることが確認できた。

今後の課題としては、建物映像データベースとして利用するために、さらなる画質の改善等が挙げられる。このため、現在、高密度CCDを併せて用いることで、画質をさらに向上させる研究に取り組んでいる。また、ランパレーションでない対象物や、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。

参考文献

- [1] 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.
- [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] T. Takahashi, H. Kawasaki, K. Ikeuchi and M. Sakauchi, “Expanding possible view points of virtual environment using panoramic images,” CVPR, June 2000.
 - [4] T. S. Huang and R. Y. Tsai, “Multi-frame image restoration and registration,” Computer Vision and Image Processing, vol. 1, pp. 317-339, 1984.
 - [5] P. Cheeseman, B. Kanefsky, R. Hanson and J. Stutz, “Super-resolved surface reconstruction form multiple images,” Technical Report FIA-93-02, NASA Ames Research Center, Artificial Intelligence Branch, Feb. 1993.
 - [6] V. N. Smelyanskiy, P. Cheeseman, D. A. Maluf and R. D. Morris, “Baysian super-resolved surface reconstruction form images,” CVPR, vol. 2, pp. 375-382, June 2000.
 - [7] 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.
 - [8] A. Zomet and S. Peleg, “Applying super-resolution to panoramic mosaics,” IEEE Workshop on Applications of Comuter Vision, Oct. 1998.
 - [9] 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.
 - [10] 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.
 - [11] H. Kawasaki, K. Ikeuchi and M. Sakauchi, “Spatio-Temporal analysis of omni image,” CVPR, vol. 2, pp. 577-584, June 2000.
 - [12] 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.
 - [13] 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.

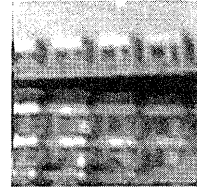
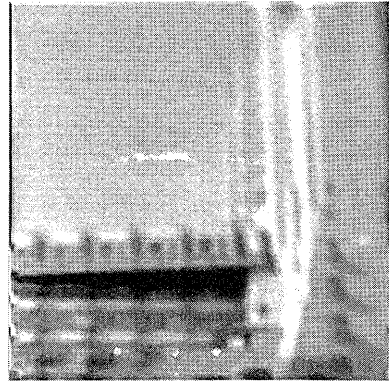
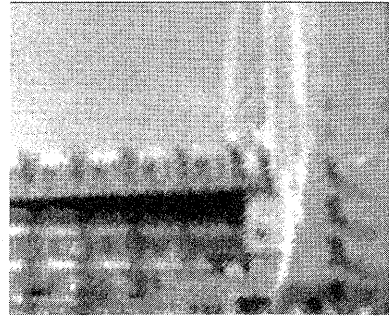


図 7: 超解像度画像例 2:上から, 入力画像, 超解像度画像, アダプティブウィンドウを用いた超解像度画像

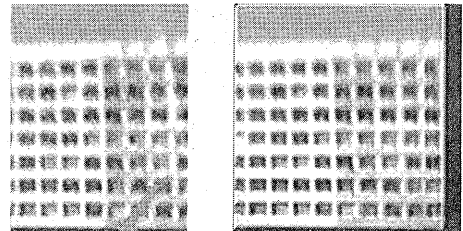


図 8: 左, ノイズののった透視変換画像, 右, ノイズ除去を行った超解像度画像