

奥行き画像を用いた時空間超解像画像の生成

粟津 優作, 河合 紀彦, 佐藤 智和, 横矢 直和

奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科

あらまし: 本稿では, 動画の各画像取得時のカメラパラメータを既知とした上で, 各画素の奥行き値をパラメータとして多数の画像上での対応点を同時に決定することで, 動画からの時空間超解像画像を生成する手法を提案する. 本手法では, 多数の画像に対する対応点を奥行きによる1次元探索によって決定できるため, 従来用いられていた平面仮定等を用いる必要がなく, 空間解像度の向上において, 複雑な形状を含む動画も扱うことができる. また, 隣接フレームだけでなく多数の画像を利用することで, 隣接フレーム間で対応点が存在しない場合にも他のフレームを用いて補間フレームを生成し, 時間解像度を向上させる. 実験では, 仮想環境を用いたシミュレーション動画に対する時空間超解像画像の生成を行うことで提案手法の有効性を示す.

Spatio-Temporal Super-Resolution Using Depth Maps

Yusaku AWATSU, Norihiko KAWAI, Tomokazu SATO and Naokazu YOKOYA

Graduate School of Information Science, Nara Institute of Science and Technology

Abstract: This report describes spatio-temporal super-resolution using depth maps for static scenes. In the proposed method, the depth maps are used as the parameters for simultaneous determination of the corresponding pixels in multiple input images by assuming that intrinsic and extrinsic camera parameters are known. Because the proposed method can determine the corresponding pixels in multiple images by one-dimensional search for the depth values without planar assumption, spatial resolution can be increased even for complex scenes. In addition, since we can use multiple frames, temporal resolution can be increased even when large parts of the image are disappeared in the adjacent frame. In experiments, the validity of the proposed method is demonstrated by generating spatio-temporal super-resolution images in simulation.

1 はじめに

実画像をユーザに提示することで遠隔地にいる感覚を与える技術はテレプレゼンスと呼ばれ, 医療, 娯楽, 教育などの様々な分野への応用が期待されている. これらの分野で用いられるテレプレゼンスシステムでは, 高い臨場感を再現することが求められており, 臨場感向上のための様々な手法が提案されている [1, 2]. なかでも, 人間の視覚から得られる臨場感に関する要素として, 提示されるコンテンツが高空間解像度, 高時間解像度であることが重要であると考えられている. しかし, 一般に映像を取得するカメラの撮像素子の数は有限であり, また読み出し速度に制限があるため, これらの要素を同時に満たす映像を取得することは難しい. そこで, 一般的なカメラによって取得された画像の空間解像度, 時間解像度を向上させる研究が盛んに行われている.

空間解像度の向上に関する従来研究は, 1枚の画像を入力として用いる手法 [3, 4, 5, 6, 7], 複数枚の画像を

入力として用いる手法 [8, 9, 10, 11, 12] に大別できる.

1枚の画像から空間解像度を向上させる手法は, 事前の学習を必要とする手法 [3, 4, 5] と学習を必要としない手法 [6, 7] に分類できる. 前者は, 様々な画像に対する低解像度画像と高解像度画像のペアから相関を学習しておき, 新たに撮影した低解像度画像の空間解像度を向上させる. また, 後者は多くの自然画像に見られるフラクタル性や画像の局所的な統計量などの特徴を用いて高解像度化を行う. これらの手法は対象のシーンが限定的である場合には有効であり, また, 計算コストが小さいという特長を持つが, 複数の画像から空間解像度を向上させる手法に比べて, 画質向上の効果が対象となる画像の種類に大きく依存するという問題がある.

複数枚の画像から空間解像度を向上させる手法は, 1台または複数台のカメラを用いて, 異なる視点から複数枚の画像を取得し, 取得した画像を画素ごとに位置合わせした上で合成することで解像度を向上させる. 高解像度画像の画素値の決定手法としては, 対応する

画素値をブレンドする手法 [8, 9, 10] や、高解像度画像から生成した低解像度画像とそれに対応する観測画像の画素値の差を最小化する手法 [11, 12] などが提案されている。これらの手法はいずれも、空間解像度を向上させるためにサブピクセル精度の位置合わせを必要としている。しかし、従来手法の大半はサブピクセル精度の位置合わせを実現するために平面仮定などの物体の形状に関する制約を用いており、解像度を向上可能なシーンが極めて限定されるという問題があった。

時間解像度の向上に関する従来研究は、入力動画像で隣接するフレームの間に補間フレームを挿入し、何らかの手法によって補間フレームの画像を生成することで、時間解像度を向上させる。補間フレームを生成する手法として、隣接フレームの特徴点の動きを用いたモーフィングによる手法 [13, 14] が提案されている。この手法では、2枚以上の入力画像間で対応点を与え、補間フレームにおける対応点の位置に応じてテクスチャを変形させることで補間フレームを生成する。このアプローチでは、生成される補間フレームの画像の品質は与えられる対応点の数に大きく依存する。しかし、一般に二枚の画像上で正しい対応点を密に決定することは難しく、特にオクルージョンなどで画像間で対応点が存在しない場合には良好な結果を得ることは難しい。一方、自由視点画像生成と呼ばれる分野の研究 [15, 16] も中間視点の画像を生成するために有効である。このような研究には様々なアプローチが存在するが、多くの手法ではモーフィングによる手法と同様に対応点が必要であり、いかに正しい対応点を密に得るかが課題となる。

複数台のカメラで同一視野を撮影した動画像を統合することで時間および空間解像度を同時に向上させる手法 [17, 18, 19] も提案されている。これらの手法は、時間解像度の高いカメラを用いたり、複数のカメラを同期させて撮影することで動物が存在する動画像にも対応が可能である。しかし、位置関係が固定された複数のカメラや特殊なカメラが必要になり、一般的なカメラで取得された動画像に対して手法を適用することはできない。

本稿では、時空間解像度の向上において、サブピクセル精度での密な対応点の決定が重要であることに着目し、新たに各画素値の奥行きをパラメータとして複数の画像間の対応点を1次元探索により決定することで、サブピクセル精度での密な対応点の決定を実現する手法を提案する。本研究では、動画像の各画像取得時のカメラパラメータを既知とした上で、複数の画像に対する対応点を奥行きの1次元探索によって決定することで対応点探索のパラメータの自由度を減らし、平面仮定などの撮影対象に関する強い制約を課すことなく、各画素を高精度に対応付ける。また、推定され

る奥行きに基づいてオクルージョンを考慮した対応点の探索を行うことで、従来手法では正しい対応が得られないシーンにおいても時間解像度を向上させる。ただし、本研究では静的なシーンのみを扱い、動画像中に動物体は存在しないものとする。

以降、2節では奥行き画像を利用した時空間超解像画像の生成手法について詳述する。3節ではシミュレーション実験によって提案手法を定量的に評価し、4節でまとめと今後の課題を述べる。

2 奥行き画像を利用した時空間超解像画像の生成

本節では、奥行き値を介して各フレームの画像の画素値を対応付けることにより、動画像の時空間超解像画像を生成する手法について述べる。ただし、本研究では静的シーンを撮影した動画像を対象とし、各フレームに対するカメラ位置・姿勢は既知とする。また、ステレオ法などにより求めた、ある程度信頼度の高い奥行き画像が初期値として与えられるものとする。提案手法では、空間解像度の向上のために、高解像度画像の尤もらしさに基づく画像の整合性に関するエネルギーと奥行きの滑らかさに関するエネルギーを定義し、これらの和を最小化することで空間解像度を向上させる。また、時間解像度の向上においても同様のエネルギーを用い、動画像上の補間フレームにおいて高解像度画像を生成することで時間解像度を向上させる。

2.1 空間解像度の向上

空間解像度の向上処理では、生成される超解像画像の尤もらしさに基づくエネルギー関数を定義し、そのエネルギー関数を最小化することによって空間解像度を向上させる。以下、本研究で用いるエネルギー関数の定義とその最小化手法について詳述する。

2.1.1 画像の整合性と奥行きの滑らかさに基づくエネルギー関数の定義

本研究では、超解像処理の対象となる第 f フレームの超解像画像の画素値と各フレームの観測画像の画素値との整合性に関するエネルギー E_{If} (以下、画像の整合性に関するエネルギー) と奥行きの滑らかさに関するエネルギー E_{Df} を用い、以下のように、エネルギー関数を定義する。

$$E_f = E_{If} + wE_{Df} \quad (1)$$

ここで、 w は重み係数である。以下では、エネルギー E_{If} , E_{Df} について順に詳しく述べる。

エネルギー E_{I_f} は、第 f フレームの超解像画像の尤もらしさを表すエネルギーであり、第 a フレームから第 b フレーム ($a \leq f \leq b$) までの観測画像を用い、次のように定義する。

$$E_{I_f} = \frac{\sum_{n=a}^b |\mathbf{N}(\mathbf{O}_n)(\mathbf{g}_n - \mathbf{m}_{nf})|^2}{\sum_{n=a}^b |\mathbf{O}_n|^2} \quad (2)$$

ただし、 $\mathbf{g}_n = (g_{n1}, \dots, g_{np})^T$ は第 n フレームの観測画像の画素値を p 次元のベクトルとして表記したものであり、 $\mathbf{m}_{nf} = (m_{nfy1}, \dots, m_{nfyf})^T$ は推定された第 f フレームの超解像画像と奥行き値に基づいて第 n フレームの観測画像をシミュレートした画像（以下、シミュレート画像）である（図1参照）。また、 $\mathbf{N}(\mathbf{O}_n)$ はベクトル \mathbf{O}_n の各要素を対角要素に持つ $p \times p$ の対角行列である。 E_{I_f} は、基本的に観測画像 \mathbf{g}_n とシミュレート画像 \mathbf{m}_{nf} の差分に基づいて計算されるが、シミュレート画像 \mathbf{m}_{nf} の画素値には、オクルージョンや画面外への投影によって、第 f フレームの画像上の画素と直接対応付かないものが含まれる。本研究では、0 または 1 を要素を持つマスク画像 $\mathbf{O}_n = (O_{n1}, \dots, O_{np})$ を用いて、式 (2) に示すように、直接対応しない画素をエネルギー算出時に除外する。なお、シミュレート画像 \mathbf{m}_{nf} は次式により算出する。

$$\mathbf{m}_{nf} = \mathbf{H}_{fn}(\mathbf{z}_f)\mathbf{s}_f \quad (3)$$

ここで、 $\mathbf{s}_f = (s_{f1}, \dots, s_{fq})^T$ は超解像画像の画素値を、 $\mathbf{z}_f = (z_{f1}, \dots, z_{fq})^T$ は超解像画像 \mathbf{s}_f の各画素に対応する奥行き値を表す q 次元ベクトルである。 $\mathbf{H}_{fn}(\mathbf{z}_f)$ は奥行き値 \mathbf{z}_f を用いて、第 f フレームの超解像画像から第 n フレームの観測画像をシミュレートする変換行列を表しており、次式により算出する。

$$\mathbf{H}_{fn}(\mathbf{z}_f) = [\alpha_1 \mathbf{h}_1, \dots, \alpha_i \mathbf{h}_i, \dots, \alpha_p \mathbf{h}_p]^T \quad (4)$$

ただし、 α_i は後述する正規化要素であり、 \mathbf{h}_i は次式に示す q 次元ベクトルである。

$$\mathbf{h}_i = (h_{i1}, \dots, h_{ij}, \dots, h_{iq})^T \quad (5)$$

ここで、 h_{ij} は超解像画像の j 番目の画素と観測画像の i 番目の画素の対応の有無を示す 0 または 1 のスカラー値であり、推定された奥行き値に基づいて、次式によって算出する。

$$h_{ij} = \begin{cases} 0; & d_n(\mathbf{p}_{fj}) \neq i \text{ または } z'_{fj} > z_{ni} + C \\ 1; & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

ただし、 \mathbf{p}_{fj} は図1に示すように、超解像画像の j 番目の画素に対応するシーンの3次元座標を表し、 $d_n(\mathbf{p})$ は、 \mathbf{p} を第 n フレームに投影した座標に対応する画素

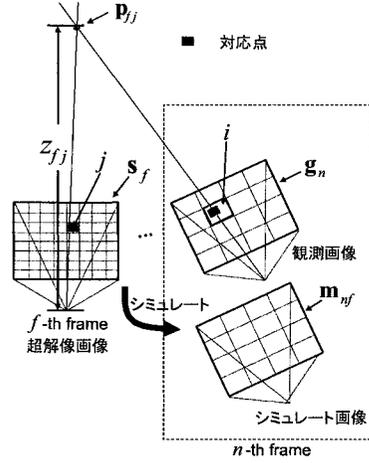


図1: 超解像画像と観測画像の画素の対応関係

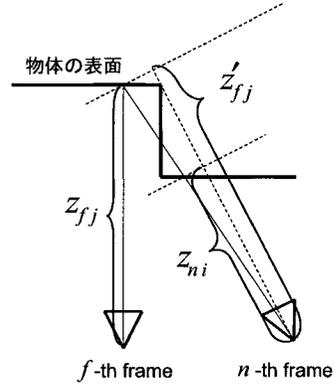


図2: オクルージョンによる奥行き値の変化

のインデックスを表す。また、図2に示すように、 z'_{fj} は第 f フレームの奥行き値 z_{fj} を第 n フレームの奥行き値に変換した値を表し、 z_{ni} は対応する第 n フレームの奥行き値を表す。 C はオクルージョンの判定に用いる閾値である。

なお、式 (4) における α_i はシミュレート画像 \mathbf{m}_{nf} の i 番目の画素に投影される超解像画像の画素数による正規化要素であり、上記の方法で決定された \mathbf{h}_i を用いて次式で算出する。

$$\alpha_i = \begin{cases} 0 & ; |\mathbf{h}_i| = 0 \\ \frac{1}{|\mathbf{h}_i|^2} & ; |\mathbf{h}_i| > 0 \end{cases} \quad (7)$$

エネルギー E_{Df} は、超解像対象フレームの奥行き値の滑らかさを表し、同一物体上では奥行きは急激に変

化しないという仮定の下、次のように定義する。

$$E_{Df} = \sum_j \left(\left(\frac{\partial^2 z_{fj}}{\partial x^2} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial^2 z_{fj}}{\partial x \partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial^2 z_{fj}}{\partial y^2} \right)^2 \right) \quad (8)$$

ただし、 $\frac{\partial}{\partial x}$ 、 $\frac{\partial}{\partial y}$ は画像面上での x 、 y 方向の偏微分を表す。

2.1.2 エネルギー最小化による奥行き値の最適化に基づく超解像画像の生成

超解像画像の画素値と奥行き値を変数とし、前項で定義したエネルギー関数を最小化することで、超解像画像を生成する。式(2)に示したようにエネルギー E_{If} は観測画像 g_n とシミュレート画像 m_{nf} の差分に基づき算出される。ここで、 g_n は不変であるが、式(3)に示したように、 m_{nf} は超解像画像の画素値 s_f と奥行き値 z_f に依存する。計算コストの問題から超解像画像の画素値と奥行き値を同時に最適化することは難しいため、本研究では次の2つの処理をエネルギーが収束するまで繰り返すことで、エネルギー E を最小化する。

- (i) 超解像対象フレームの奥行き値 z_f を固定し、超解像画像の画素値 s_f を更新
- (ii) 超解像画像の画素値 s_f を固定し、超解像対象フレームの奥行き値 z_f を更新

処理(i)では、超解像対象フレームの奥行き値 z_f を固定するため、超解像画像と観測画像の画素間の対応関係 $H_{fn}(z_f)$ は変化しない。また、奥行き値の滑らかさに関するエネルギー E_{Df} も定数として扱えるため、式(1)を最小化するには、画像の整合性に関するエネルギー E_{If} が最小となるように超解像画像の画素値を更新すればよい。ここでは、Iraniらの手法[11]と同様の方法で、次式に従い超解像画像の画素値 s_{fj} の更新を行う。

$$s_{fj} \leftarrow s_{fj} + \frac{\sum_{n=a}^b ((g_{ni} - m_{nfi}) O_{ni})}{\sum_{n=a}^b O_{ni}} \quad (9)$$

処理(ii)では、超解像画像の画素値 s_f を固定し、奥行き値 z_f の最適化を行う。本研究で用いるエネルギー E において、シミュレート画像 m_{nf} の各要素は奥行き z_f に対して不連続に変化するため、 E の z による微分値を代数的に求めることは不可能である。そのため、本研究では、各奥行き値を微小範囲内で離散的に動かし、エネルギー E が最小となる値に奥行きを繰り返し更新することでエネルギーを最小化する。

2.2 時間解像度の向上

本研究では、観測フレーム間に仮想的なフレームを設定し、そのフレームに対して前節で述べた空間解像度の向上処理を適用することで、補間画像を生成する。ただし、補間フレームでは、空間解像度の向上処理で利用するカメラ位置・姿勢と奥行き情報が無いため、これらの値を設定する必要がある。以下、補間フレームのカメラ位置・姿勢と初期値となる奥行きの設定方法について詳述する。

提案手法ではまず、式(10)、(11)に従い、補間フレームのカメラ位置・姿勢を設定する。

$$\mathbf{P}'_t = \frac{(N-t)}{N} \mathbf{P}_r + \frac{t}{N} \mathbf{P}_{r+1} \quad (1 \leq t < N) \quad (10)$$

$$\mathbf{Q}'_t = \frac{(N-t)}{N} \mathbf{Q}_r + \frac{t}{N} \mathbf{Q}_{r+1} \quad (1 \leq t < N) \quad (11)$$

ここで、 N は時間解像度の倍率を示しており、 \mathbf{P}_r は r 番目の観測フレームを、 \mathbf{P}'_t は、 r 番目と $r+1$ 番目の観測フレームを N 分割したときの t 番目の補間フレームのカメラ位置を表す。同様に、 \mathbf{Q}_r 、 \mathbf{Q}'_t はそれぞれ観測フレームと補間フレームのカメラ姿勢を表す。

補間フレームの奥行き値の初期値は、近傍に存在する複数の観測フレームの奥行きを用いて、次式に従い生成する。

$$z_t = \underset{l \in \Psi}{\text{median}}(\mathbf{M}_{lt} z_l) \quad (12)$$

ここで、 z_t は補間フレーム t の奥行きを表し、 \mathbf{M}_{lt} はカメラ位置・姿勢情報を用いて、第 l フレームの奥行きを補間フレーム t へと変換する行列を表す。また、 Ψ は一定範囲内の近傍フレームを表す。

3 実験

提案手法の有効性を検証するため、シミュレーションによる時空間超解像画像の生成を行い、生成した画像の画質の評価を行った。本実験では、図3に示すような仮想環境において、対象物体を移動しながら撮影した動画を入力として用いた。ここでは、観測地点のカメラ位置・姿勢として真値をそのまま用い、奥行き値の初期値には、奥行き値の真値に画像上の平均投影誤差1画素に相当するガウスノイズを加えたものを用いた。表1に本実験で用いたパラメータを示す。なお、空間解像度の向上処理には全ての観測フレームを用いた。上記の条件のもと、PC(CPU: Xeon 3.4GHz, Memory: 3GB)を用いて超解像画像を生成した。本実験において、1枚の超解像画像を出力するために要した時間は平均5分であった。

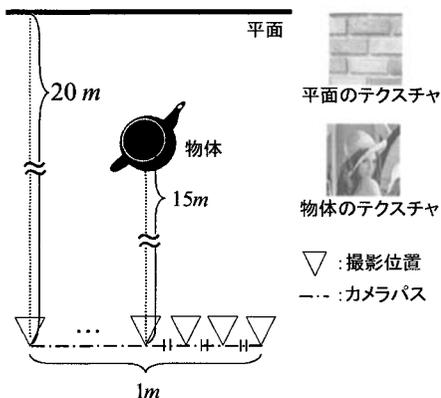


図 3: 実験におけるカメラの動きと物体の配置

図 4 に、提案手法によって生成した超解像画像（出力動画の第 29 フレーム）と入力画像をバイリニア拡大した画像および正解画像を示す。同図中の右列はそれぞれの画像の同一箇所を拡大したものである。図 4 から超解像処理による画質の改善効果を確認することができる。また、図 4(b) に示した超解像画像の生成に用いた奥行き初期値と、最適化後の奥行きを図 5 に示す。同図より、背景の平面と物体の表面上において不連続であった奥行きが滑らかに更新されていることが確認できる。

次に、時空間超解像画像の真値に対する PSNR (Peak Signal-to Noise Ratio) を算出し、生成された時空間超解像画像の画質を定量的に評価した。ここでは、比較対象として以下に示す 2 つの動画を用いた。

- (a) 入力動画に対して同一の空間解像度かつ 2 倍の時間解像度で観測を行い、バイリニア補間によって空間解像度を向上させた動画
- (b) 入力動画に対して縦横それぞれ 2 倍の空間解像度かつ同一の時間解像度で観測を行い、直前のフレームの画像を補間フレームに挿入することで、時間解像度を向上させた動画

図 6 にそれぞれの手法で生成した動画の真値に対する PSNR を示す。なお、動画 (b) における観測フ

表 1: 実験で用いたパラメータ

入力動画	320×240 [画素] \times 31[フレーム]
出力動画	640×480 [画素] \times 61[フレーム]
重み w	100
閾値 C	1[m]



(a) 入力画像 (バイリニア補間で拡大)



(b) 超解像画像



(c) 正解画像

図 4: 観測フレームの画像の比較

レームは正解画像と同一であるため、補間フレームにおける PSNR のみを示している。同図より、動画 (a) と比較して、提案手法で生成した超解像画像はどのフレームにおいても PSNR が高く、画質が向上していることが分かる。また、動画 (b) と比較して、提案手法で生成した超解像画像は補間フレームにおける PSNR の落ち込みが小さいことが分かる。ただし、提案手法では、開始フレームと最終フレーム周辺において画質の向上効果が小さいことも確認できる。これらは対象フレームの観測位置から空間的に近い位置で撮影されたフレームが少ないことが原因であると考えられる。

4 まとめ

動画の各画像取得時のカメラパラメータを既知とした上で、各画素の奥行き値をパラメータとして多数の画像上での対応点を同時に決定することで時空間超解像画像を生成する手法を提案した。実験において、正解画像に対する PSNR を算出することで、超解像画像の画質の定量的評価を行い、バイリニア補間による空間解像度の向上処理などと比較して、提案手法の解

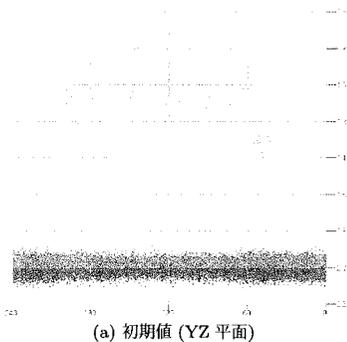


図 5: 奥行きの変化

像度の向上効果が高いことを確認した。今後、実動画への手法の適用および有効性の検証が必要である。

参考文献

[1] 和田浩明, 池田聖, 佐藤智和, 横矢直和: “複数経路上を歩行移動可能なテレプレゼンスシステムにおける違和感の低減に関する検討”, 日本バーチャルリアリティ学会サイバースペースと仮想都市研究会 研究報告, Vol. 11, No. 1, pp. 29-34, 2006.

[2] 池田聖, 佐藤智和, 横矢直和: “全方位型マルチカメラシステムを用いた高解像度な全天球パノラマ動画の生成とテレプレゼンスへの応用”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 8, No. 4, pp. 443-450, 2003.

[3] W. T. Freeman, T. R. Jones, C. Pasztor: “Example-based Super-resolution”, IEEE Computer Graphics and Applications, Vol. 22, No. 2, pp. 56-65, 2002.

[4] 溝内義章, 末松信朗, 林朗: “多様体学習に基づく単フレーム超解像”, 情報科学技術フォーラム講演論文集, pp. 65-66, 2006.

[5] 上村健二, 津村徳道, 中口俊哉, 菅谷隆, 三宅洋一: “Texon 置換に基づく画像の高解像度化手法”, 映像情報メディア学会誌, Vol. 60, No. 10, pp. 1655-1657, 2006.

[6] 川合康裕, 天野敏之: “固有空間を用いた BPLP による Super Resolution”, 電子情報通信学会総合大会講演論文集, No. 2, p. 91, 2004.

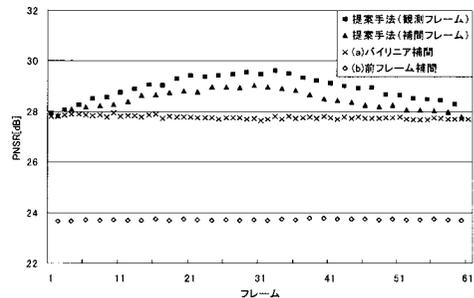


図 6: PSNR の比較

[7] M. C. Hong, T. Stathaki, A. K. Katsaggelos: “Iterative Regularized Image Restoration Using Local Constraints”, Proc. IEEE Workshop on Nonlinear Signal and Image Processing, Vol. 1, pp. 145-148, 1997.

[8] W. Zhao, H. Sawhney, M. Hansen, S. Samarasekera: “Super-Fusion: A Super-Resolution Method Based on Fusion”, Proc. Int. Conf. on Pattern Recognition, Vol. 2, pp. 269-272, 2002.

[9] M. C. Chiang, T. E. Boulton: “Efficient Super-Resolution via Image Warping”, Image and Vision Computing, Vol. 18, No. 10, pp. 761-771, 2000.

[10] M. Ben-Ezra, A. Zomet, S. K. Nayar: “Jitter Camera: High Resolution Video from a Low Resolution Detector”, Proc. Computer Vision and Pattern Recognition, Vol. 2, pp. 135-142, 2004.

[11] M. Irani, S. Peleg: “Improving Resolution by Image Registration”, Graphical Models and Image Processing, Vol. 53, No. 3, pp. 231-239, 1991.

[12] 後藤知将, 奥富正敏: “画像復元とレジストレーションの同時最適化の実験的検証”, 信学論 (D), Vol. J90-D, No. 6, pp. 1632-1635, 2007.

[13] S. Yamazaki, K. Ikeuchi, Y. Shingawa: “Determining Plausible Mapping Between Images Without A Priori Knowledge”, Proc. Asian Conf. on Computer Vision, Vol. 1, pp. 408-413, 2004.

[14] S. E. Chen, L. William: “View Interpolation for Image Synthesis”, Proc. Int. Conf. on Computer Graphics and Interactive Techniques, Vol. 1, pp. 279-288, 1993.

[15] 石川智也, 山澤一誠, 横矢直和: “複数の全方位動画からの自由視点画像生成”, 画像の認識・理解シンポジウム講演論文集, pp. 1396-1403, 2005.

[16] 稲本奈穂, 斎藤英雄: “視点位置の内挿に基づく 3 次元サッカー映像の自由視点鑑賞システム”, 映像情報メディア学会誌, pp. 529-539, 2004.

[17] 松延徹, 長原一, 岩井儀雄, 谷内田正彦, 鈴木俊哉: “モーフィングによる高解像度高フレームレート動画の生成”, 信学論 (D), Vol. J90-D, No. 4, pp. 1073-1084, 2007.

[18] 今川太郎, 吾妻健夫, 佐藤智和, 横矢直和: “解像度と露出時間の異なる画像を用いた高時空間解像度画像の生成”, 信学技報, PRMU2006-278, pp. 137-142, 2007.

[19] E. Shechtman, Y. Caspi, M. Irani: “Space-Time Super-Resolution”, IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 27, No. 4, pp. 531-545, 2005.