

# Trilateral filter と Belief Propagation を用いた 距離画像の平滑化及び欠損修復

大石 修士<sup>\*1</sup>, 倉爪 亮<sup>\*2</sup>, 岩下 友美<sup>\*2</sup>, 長谷川 勉<sup>\*2</sup>

## Smoothing and Inpainting Range Image using Trilateral Filter and Belief Propagation

Shuji OISHI<sup>\*1</sup>, Ryo KURAZUME<sup>\*2</sup>, Yumi IWASHITA<sup>\*2</sup> and Tsutomu HASEGAWA<sup>\*2</sup>

<sup>\*1</sup> Graduate School of Information Science and Electrical Engineering, Kyushu University  
744 Motoooka, Nishi-ku, Fukuoka, 819-0395, Japan

<sup>\*2</sup> Graduate Faculty of Information Science and Electrical Engineering, Kyushu University  
744 Motoooka, Nishi-ku, Fukuoka, 819-0395, Japan

This paper proposes two denoising techniques for noisy range images utilizing reflectivity: range image smoothing by Trilateral filter and range image inpainting by Belief Propagation. The new Trilateral filter utilizes the reflectivity in addition to the spatial and intensity information so that geometrical features such as jump and roof edges are preserved while smoothing. The range image inpainting technique based on Belief Propagation recovers a deteriorated range image using not only the adjacent range values but also the continuity of the reflectance image. We conduct simulations and experiments using synthesized images and actual range images taken by a laser range finder, and verify that the proposed techniques enables to suppress noise while preserving jump and roof edges and repair deteriorated range images.

**Key Words** : Bilateral filter , Laser range finder , Range image , Reflectance image , Denoising

### 1. は じ め に

多点 3 次元距離データがリアルタイムで得られる Time-of-Flight 式距離センサは、近年幾つかのメーカーから安価なセンサが相次いで発売され (SwissRanger SR4100 (MESA Imaging AG), D-imager (Panasonic), Canesta Vision (Canesta, Inc.)<sup>(1)</sup>), ロボット用のみならず、直感的のヒューマンインターフェースや車載センサなど、その用途が広がってきている。一方で、高い精度を誇る RIEGL VZ-400 (RIEGL GmbH) や Leica Scan Station 2 (Leica Geosystems AG) などの 3 次元レーザレンジファインダ (LIDAR), あるいは SICK LMS151 (SICK AG) や HOKUYO TOP-URG (北陽電機) などの 2 次元レーザレンジファインダを回転テーブルに取り付け、より高解像度で大規模な距離画像を得るシステ

ム<sup>(2)</sup>や、実時間で全周 3 次元距離データが取得できるセンサ (HDL-64E, Velodyne Lidar) なども開発されている。しかし、レーザの反射光から距離計測を行う場合、計測対象の表面特性やセンサ自身の電気的、機械的要因により、測定された距離画像には誤差が含まれ、場合によっては距離画像中に欠損を生じることもある。従って、これら Time-of-Flight 式距離センサに対する測定誤差の低減は、依然として大きな課題である。

そこで本稿ではリフレクタンス画像を用いた新たなノイズ除去手法を提案する。リフレクタンス画像とは、レーザ光の反射強度を濃淡値で表わしたものである<sup>(3)</sup>。本研究ではこのリフレクタンス画像と Trilateral filter, Belief Propagation を用いることで、微細な幾何特徴を保持したまま距離画像の平滑化及び欠損修復が可能な新たな手法を提案する。なお、Adelsbergerらは赤外光を用いた低解像度の Time-of-Flight カメラ (Swissranger, Mesa-Imaging) に対し、撮像系の光学モデルに基づく赤外線反射強度を利用した類似のノイズ

<sup>\*1</sup> 九州大学大学院システム情報科学府情報知能工学専攻 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744) oishi@irvs.is.kyushu-u.ac.jp

<sup>\*2</sup> 九州大学大学院システム情報科学府 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744) {kurazume, yumi, hasegawa}@ait.kyushu-u.ac.jp

低減法を提案している<sup>(4)</sup>が、その詳細な性能評価は行われていない．本論文では特にレーザパルス投射型の高解像度3次元レーザレンジファインダに対して、これまで計測には積極的に利用されてこなかったレーザパルス光の反射強度を活用し、レーザレンジファインダの距離計測精度の向上を図るとともに、シミュレーションと実機実験を通して、提案する Trilateral filter の詳細な性能評価を行うものである．

## 2. リフレクタンス画像を用いた距離画像の平滑化及び欠損修復

本章では、提案するリフレクタンス画像を用いた平滑化及び欠損修復手法の詳細を述べる．従来提案されている距離画像の平滑化手法は、距離画像の奥行き値やメッシュ化された物体モデルの頂点位置に着目して平滑化するものであった<sup>(5)(6)(7)(8)(9)(10)</sup>．距離画像の一部が完全に欠損し、単純な平滑化では対処できない場合については、モデル内の類似領域を探索し形状の復元を試みるもの<sup>(11)</sup>や、他視点のカラー画像から生成したパッチを用い欠損領域を補う手法<sup>(12)</sup>などが提案されている．また、欠損の存在する画像に対して、欠損領域以外のテクスチャの類似度に基づいて修復を行う手法<sup>(13)</sup>や、Belief Propagation を適用して修復を図る手法<sup>(14)</sup>、さらに Belief Propagation を応用した Priority-BP を用いて最適なテクスチャの合成順を決定し修復する手法<sup>(15)</sup>などが提案されている．一方、提案手法はリフレクタンス画像と距離画像を同時に用い、両画像の性質を考慮した Trilateral filter により、エッジなどの距離画像中の幾何学的特徴をできるだけ保存しつつ、距離画像を平滑化するものである．さらに、Trilateral filter では対処できない画像中の欠損部分に対して、リフレクタンス画像と Belief Propagation による欠損修復手法を新たに提案する．本章ではまず、Time-of-Flight 式距離センサから得られるリフレクタンス画像について説明し、次に提案する2つの手法の詳細を述べる．

**2.1 リフレクタンス画像** レーザレンジファインダなど Time-of-Flight 式距離センサは、センサから能動的に発射された光（レーザ光など）が、対象物表面に反射して再びセンサに戻るまでの時間を計測することで、対象物までの距離を得るものである．一例として、Fig.1<sup>(2)</sup>に示すように、2次元レーザレンジファインダ（LMS200, SICK）を回転テーブル上に固定し、テーブルを回転させながらスリット状レーザにより計測を行い、全周囲の距離データを取得した結果を Fig.2(a) に示す．このように距離データを濃淡値として2次元表示した画像を距離画像という．一方、一般的な Time-of-Flight 式距離センサでは、レーザ光の反

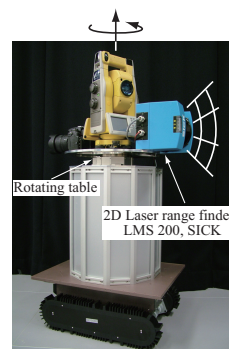


Fig. 1 Acquisition system of panoramic range image<sup>(2)</sup>

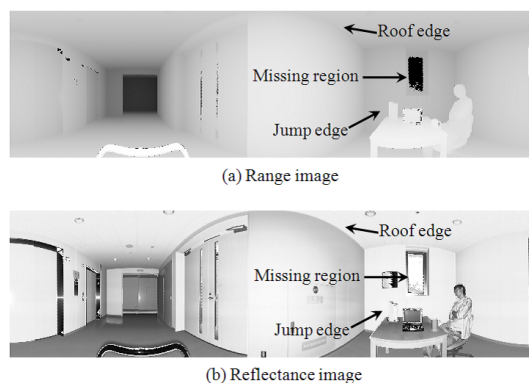


Fig. 2 Range and reflectance images

射時間とともにレーザ光の強度（リフレクタンス値）を計測することができる．Fig.2(b)にリフレクタンス値を濃淡値として表示した画像（リフレクタンス画像、あるいは反射率画像）を示す．ここで重要な点は、このレーザ光の反射強度は、距離画像のそれぞれの画素に対して一意に決定できる、すなわち一つの奥行き値に対して一つの反射強度が決まることである．言い換えれば、距離画像とリフレクタンス画像は原理的に厳密に位置合わせされた画像であるとも考えられる<sup>(3)</sup>．

**2.2 Trilateral filter による距離画像の平滑化** ノイズを含む距離画像を平滑化するには、Median filter や Gaussian filter など濃淡画像に用いられる空間平滑化フィルタを、単純に距離画像に適用する手法が考えられる．例えば Gaussian filter では、元画像の画素  $i$  の位置及び輝度をそれぞれ  $x_i, f_i$ 、ガウス関数の標準偏差を  $\sigma_x$  とおくと、Gaussian Filter 適用後の輝度  $g_i$  は以下のように計算される．

$$g_i = \frac{\sum_{j \in S_i} w_x(x_i, x_j) f_j}{\sum_{j \in S_i} w_x(x_i, x_j)} \quad (1)$$

$$w_x(x_i, x_j) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x} e^{-\frac{|x_i - x_j|^2}{2\sigma_x^2}} \quad (2)$$

ただし  $S_i$  は画素  $i$  の近傍を表し、 $|x_i - x_j|$  は画素  $i, j$  間の空間距離である．

一方で, Tomasi らによって開発された Bilateral filter<sup>(16)</sup>は, エッジを保存しつつノイズを除去することが可能なフィルタであり, これを距離画像に適用すればエッジ形状を保存した平滑化が可能であると考えられる. すなわち, 距離画像における画素  $i$  の位置と距離値をそれぞれ  $x_i, f_i$ , 位置および距離値に対するガウス関数の標準偏差を  $\sigma_x, \sigma_f$  とすると, 距離画像に対する Bilateral Filter は以下の式で表される.

$$g_i = \frac{\sum_j w_x(x_i, x_j) w_f(f_i, f_j) f_j}{\sum_j w_x(x_i, x_j) w_f(f_i, f_j)} \quad (3)$$

$$w_x(x_i, x_j) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_x}} e^{-\frac{|x_i - x_j|^2}{2\sigma_x^2}} \quad (4)$$

$$w_f(f_i, f_j) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_f}} e^{-\frac{|f_i - f_j|^2}{2\sigma_f^2}} \quad (5)$$

しかし距離画像では, Fig.2(a) に示すように奥行き値の変化が大きいジャンプエッジは明確に表れるため, Bilateral filter の利用が有効であるが, 奥行き値が連続的に変化するルーフエッジは効果が小さいことが予想される. 一方, 距離画像に一对一に対応したリフレクタンス画像には, Fig.2(b) に示すようにルーフエッジは反射率の変化として明瞭に現れる. そこで本稿では, 距離画像, リフレクタンス画像の両方を考慮することで, エッジ形状を保存しつつ距離画像を平滑化する Trilateral filter を提案する.

具体的な Trilateral filter の計算法を以下に示す. 距離画像における画素  $i$  の位置と距離値をそれぞれ  $x_i, f_i$ , 対応するリフレクタンス画像における画素  $i$  のリフレクタンス値を  $d_i$  とする. ガウス関数の標準偏差を  $\sigma_x, \sigma_f, \sigma_d$  とすると, 距離画像とリフレクタンス画像を利用した新たなフィルタを以下の式で定義する.

$$g_i = \frac{\sum_j w_x(x_i, x_j) w_f(f_i, f_j) w_d(d_i, d_j) f_j}{\sum_j w_x(x_i, x_j) w_f(f_i, f_j) w_d(d_i, d_j)} \quad (6)$$

$$w_x(x_i, x_j) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_x}} e^{-\frac{|x_i - x_j|^2}{2\sigma_x^2}} \quad (7)$$

$$w_f(f_i, f_j) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_f}} e^{-\frac{|f_i - f_j|^2}{2\sigma_f^2}} \quad (8)$$

$$w_d(d_i, d_j) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_d}} e^{-\frac{|d_i - d_j|^2}{2\sigma_d^2}} \quad (9)$$

式 (6) で表されるフィルタは, 距離画像とリフレクタンス画像から 3 種類の情報 (空間情報, 距離値の差, リフレクタンス値の差) を取得し, それらを入力として平滑化を行うものであり, Trilateral filter と呼ぶことにする. Trilateral filter は, 距離画像からジャンプエ

ッジを, またリフレクタンス画像からルーフエッジをそれぞれ特に容易に検出可能であり, Bilateral filter の単純な拡張に比べて高いエッジ保存性能を有することが期待できる.

**2.3 リフレクタンス画像と Belief Propagation による距離画像の修復** 前節では, Trilateral filter 及びリフレクタンス画像を用いた距離画像の平滑化手法を提案した. この手法はノイズを含む距離画像の平滑化に対しては効果的であるが, 鏡面反射による飽和や散乱, 吸収に伴うレーザ反射光の減衰などにより, Fig.2(a) に示すような欠損が距離画像中に生じた場合には対処できない. 本節では, このような欠損を含む画像を修復するために, Belief Propagation とリフレクタンス画像を用いた新たな手法を提案する.

**2.3.1 Loopy belief propagation** 互いに繋がれた多数のノードからなるグラフ  $P$  において, 以下のように定義するエネルギー関数を最小化するラベル  $f_p$  をノード  $p$  に割り当てることを考える.

$$E(f) = \sum_{p \in P} D_p(f_p) + \sum_{(p,q) \in N} W(f_p, f_q) \quad (10)$$

ここで,  $D_p(f_p)$  はノード  $p$  にラベル  $f_p$  を割り当てるコスト,  $W(f_p, f_q)$  はラベル  $f_p$  及び  $f_q$  がそれぞれノード  $p, q$  に割り当てるコストである. また,  $N$  はノード  $p$  の近傍のノードを表わしている.

Belief Propagation は, 次のように定義されるメッセージを近傍のノードと反復的にやり取りし, エネルギー関数を最小化する最適なラベル  $f_p$  を決定する.

$$m_{p \rightarrow q}^t(f_q) = \min_{f_p} \left( D_p(f_p) + W(f_p, f_q) + \sum_{s \in N(p) \setminus q} m_{s \rightarrow p}^{t-1}(f_p) \right) \quad (11)$$

$T$  回のメッセージ交換の後に, 以下のコスト関数を最小化する最適なラベル  $f_q^*$  が決定される.

$$b_q(f_q) = D_q(f_q) + \sum_{p \in N(q)} m_{p \rightarrow q}^T(f_q) \quad (12)$$

**2.3.2 リフレクタンス画像を用いた距離画像の修復** 上述した Belief Propagation 及びリフレクタンス画像を用いて, 欠損を含む距離画像の修復を考える. Time-of-Flight 式距離センサにより距離データを取得する場合, 対象物体の表面特性によっては鏡面反射による飽和や散乱, 吸収による減衰が起き, 距離画像に欠損部分が生じる. 多くの場合, この欠損部分では距離情報だけでなくリフレクタンス情報も同時に失われる. そこで本論文では, 以下の 2 つのステップからなる欠損修復手法を提案する.

Step 1: まず, 256 段階の濃淡値で表されたリフレクタンス画像に対し, Belief Propagation を適用して修復を行う。これはリフレクタンス画像ではエッジが鮮明に観測されやすく, 距離画像に比べ修復が容易であるためである。

Step 2: 次に, 修復したリフレクタンス画像と Belief Propagation を用いて距離画像の修復を行う。Belief Propagation は大量のメモリと多くの計算時間を要するため, まず初めに距離画像を 256 階調の濃淡画像に変換する, 従って, 割り当てられるラベルの数は 256 となり, 0~255 の整数で表現される。また本手法では, コスト項  $D_p(f_p)$  を, 欠損部分に対しては

$$D_p(f_p) = 0 \quad (13)$$

その他の部分に対しては

$$D_p(f_p) = |f_p - L_p| \quad (14)$$

と定義する。ただし,  $L_p$  はピクセル  $p$  で当初観測された距離値である。さらに, ピクセル  $p$  の近傍 4 ピクセル  $q$  を考慮し, ラベル  $f_p$  及び  $f_q$  を割り当てるコスト関数を次のように定義する。

$$W(f_p, f_q) = f(r_p, r_q)(f_p - f_q)^2 \quad (15)$$

ただし,  $r_p$  及び  $r_q$  はそれぞれ Step 1 で修復されたリフレクタンス画像におけるピクセル  $p, q$  の輝度値であり, また  $f(r_p, r_q)$  はリフレクタンス値の差に関するゲイン項である。

$$f(r_p, r_q) = \alpha e^{-\beta(r_p - r_q)^2} \quad (16)$$

式 (15) より, 類似したリフレクタンス値を持つ近傍のピクセルほど優先的に距離画像中の欠損修復に用いられる。一方で, リフレクタンス値が不連続に変化しているピクセルは, 距離画像の修復には用いられない。

### 3. 実験

これまでに述べた 2 つの提案手法に対し, シミュレーション画像及び実際に得られた距離画像を用いて実験を行った。本章ではそれぞれの結果を順に示す。

#### 3.1 Trilateral filter による距離画像の平滑化

3.1.1 合成画像を用いた実験 Fig.3 に示すように, 屋内の壁に沿って一辺 1m の箱が置かれた環境の合成画像を作成し, 計算機実験を行った。ただし, OpenGL により距離値の観測点と光源とを一致させて作成した輝度画像 (Fig.3(a)) をリフレクタンス画像の代替として用い, 距離画像 (Fig.3(b)) に距離値の最大 1% のランダムノイズを加えた。

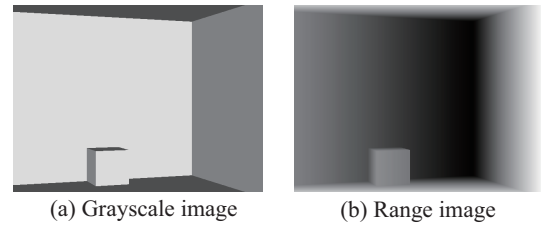


Fig. 3 synthesized images for simulation experiment

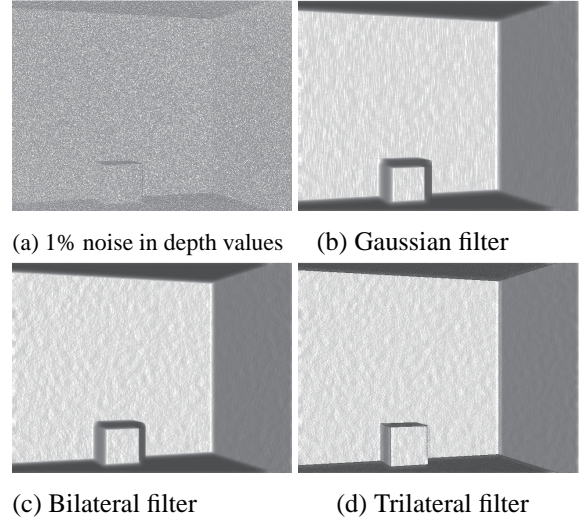


Fig. 4 Denoised images by Gaussian filter, Bilateral filter and Trilateral filter

Fig.4 に Gaussian Filter, Bilateral Filter, および Trilateral Filter 適用後の距離画像から隣り合う画素を結んで三角パッチを構成した 3 次元モデルを, また Table1 にそれぞれフィルタを適用後の距離画像の RMS 誤差を示す。なお, フィルタのカーネルサイズは  $9 \times 9$  画素, 距離値の範囲は 13,293 ~ 17,128[mm], 輝度値は 0 ~ 255 であり, 標準偏差は  $\sigma_x = 4.0, \sigma_f = 6, \sigma_d = 0.4$  とした。Table1 より, 提案した Trilateral filter が最も RMS 誤差が小さく, ルーフエッジ, ジャンプエッジともに保存されていることがわかる。

Table 1 RMS error

|                              | RMS [mm] |
|------------------------------|----------|
| Original image               | 45.8     |
| Gaussian filter              | 17.8     |
| Bilateral filter             | 14.1     |
| Trilateral filter (proposed) | 11.7     |

3.2 LIDAR を用いた実験 Fig.1 に示す 3 次元レーザ計測ロボット CPS-V<sup>(2)</sup>を用いて評価実験を行った。実験は Fig.5 に示すように, 箱が 1 つ置かれており, ルーフエッジが主に観測される単純な環境 (Scene 1) と, 人間を含む複数の物体によりジャンプエッジが





Fig. 5 Experimental setup

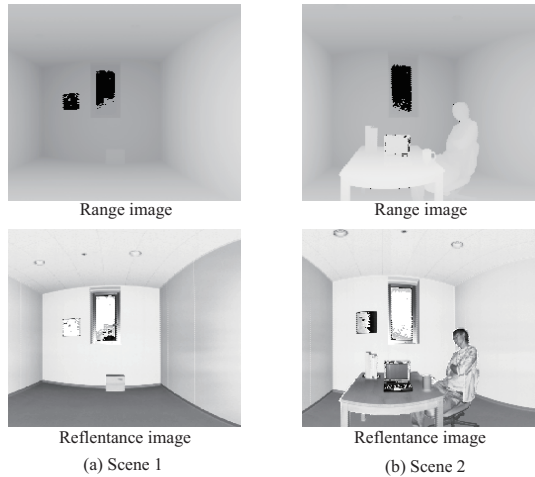


Fig. 6 Range and reflectance images

計測される環境 (Scene 2) に対して行った。それぞれの環境に対する距離画像、リフレクタンス画像を Fig.6 に示す。ただし、Fig.1 のロボットは回転テーブルを回転させながら Fig.2 のような全周方向の距離データを取得するため、画像サイズは距離画像、リフレクタンス画像ともに  $200 \times 721$  画素である。Fig.6 はそのうちの一部を拡大して示している。

まず Fig.5(a) に示す、箱が一つ置かれた単純な環境に対する実験結果を Fig.7 に示す。Fig.7(a) は平滑化フィルタを適用する前の距離画像から構築した 3 次元モデルである。距離値に含まれるノイズにより、壁面や物体の表面に本来存在しない凹凸が見られる。一方、Fig.7(b),(c),(d) はそれぞれ距離画像に対し、Gaussian Filter, Bilateral Filter, および Trilateral Filter を適用した場合である。Gaussian Filter, Bilateral Filter を適用した場合、壁面の凹凸は平滑化されているが、箱や窓枠のエッジも同時に鈍っていることがわかる。一方、提案する Trilateral Filter では、箱や窓枠のエッジは鮮明なまま、壁面の凹凸が適切に平滑化されている。また、Fig.8 に各フィルタ適用後の箱部分の縦断面形状 (Fig.7(a) の cross section 部) の比較を示す。点線の丸で囲まれた部分で、Gaussian filter, Bilateral filter はエッジが鈍化しているが、Trilateral filter はエッジが適切に保存されていることが確認できる。なお、フィルタ

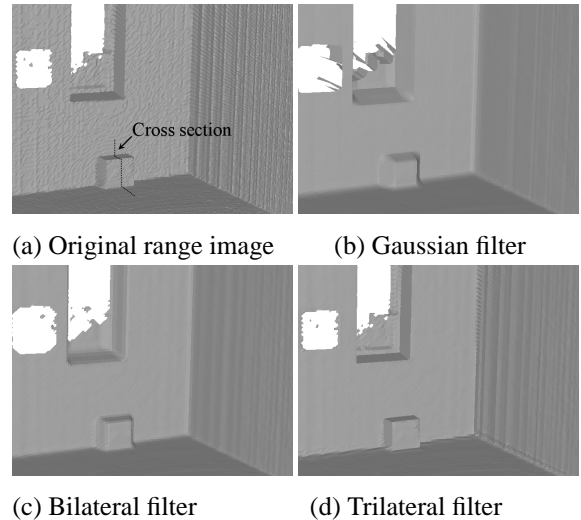


Fig. 7 Experimental results for a simple environment

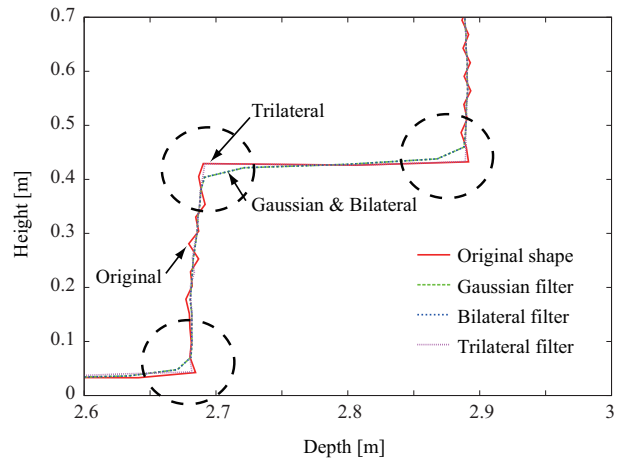


Fig. 8 Comparison of cross-section shape of the box

のカーネルサイズは  $9 \times 9$  画素、距離値の範囲は  $275 \sim 8,191$  [mm], リフレクタンス値は  $0 \sim 255$  であり、標準偏差は  $\sigma_x = 0.8$ ,  $\sigma_f = 7$ ,  $\sigma_d = 0.1$  とした。

次に Fig.5(b) に示す、人を含むより複雑な環境で行った結果を Fig.9 に、その部分拡大図を Fig.10 に示す。同様に、Fig.9(a), Fig.10(a) は平滑化フィルタの適用前、(b),(c),(d) は Gaussian Filter, Bilateral Filter, および Trilateral Filter を適用した場合である。前述の実験と同様に、Gaussian Filter や Bilateral Filter により壁の凹凸は平滑化され、特に Bilateral Filter ではパソコンのディスプレイ部 (矢印) などのジャンプエッジも形を保っているが、壁のルーフエッジや人物の顔や服の皺も同時に平滑化されている。一方、Trilateral Filter はそれらの細かな凹凸が保存され、かつ壁などは適切に平滑化されていることがわかる。

3.3 Belief Propagation による距離画像の修復  
次に、Belief Propagation を用いた距離画像修復の計

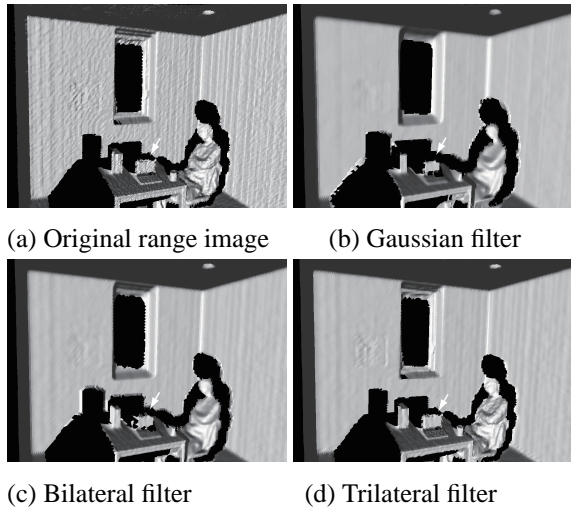


Fig. 9 Experimental results for a complex environment

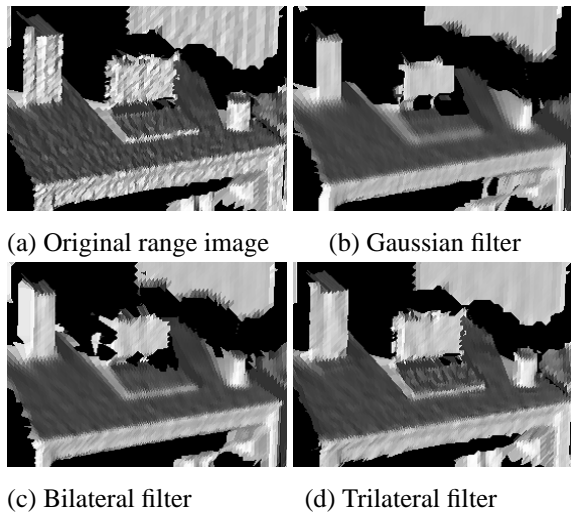


Fig. 10 Partial enlarged views

算機実験を行った．実験にあたって， $320 \times 240$  画素の距離画像を作成し， $20 \times 20$  画素の欠損部分を手で加えた．ただし先述の計算機実験と同様に，リフレクタンス画像の代わりに OpenGL で作成した輝度画像を用いている，なお，式 (16) におけるパラメータの値はそれぞれ  $\alpha = 0.75$ ， $\beta = 1.0$  であり， $T = 30$  とした．

Fig.11(a)(b) は元の距離画像及び欠損を生じさせたものであり，Fig.11(c)(d) ではそれぞれ欠損を生じたリフレクタンス画像，修復されたリフレクタンス画像を示している．さらに，Belief Propagation を距離画像に適用して修復を行った結果を Fig.11 に示す．Fig.11(e) はリフレクタンス画像を用いない場合，Fig.11(f) はリフレクタンス画像を用いた場合である．それぞれの距離画像より生成した 3 次元モデルを Fig.11(g)，Fig.11(h) に示す．また， $T$  を変化させ同様の実験を行なった．それぞれの場合の RMS 誤差を Table 2 に示す．

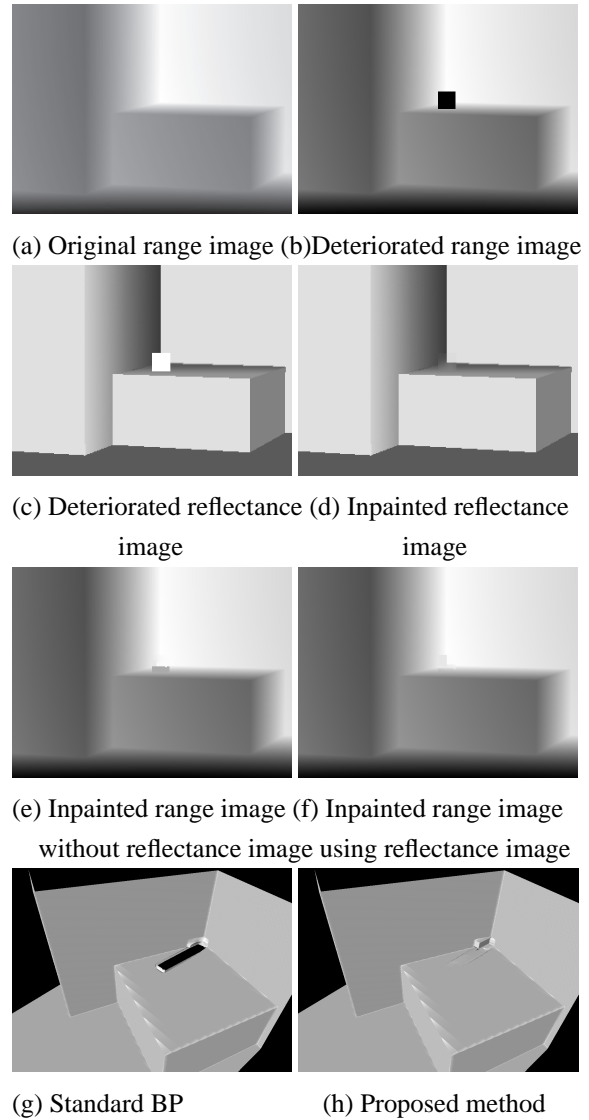


Fig. 11 Range image inpainting by Belief Propagation

これらの結果から，Belief Propagation とリフレクタンス画像を用いた 2 ステップアルゴリズムにより，より正確な距離画像の修復が可能であることが確認された．

Table 2 RMS error for range image inpainting

| iteration | RMS[mm]             |                  |
|-----------|---------------------|------------------|
|           | Without reflectance | With reflectance |
| 12        | 36.24               | 29.01            |
| 30        | 28.99               | 10.68            |
| 50        | 29.44               | 10.64            |

#### 4. ま と め

本論文では，レーザレンジファインダなど Time-of-Flight 式距離センサに対し，距離計測と同時にその副産物として得られるリフレクタンス値に着目した距離画像の平滑化手法，及び欠損のある距離画像の修復手

法を提案した。

提案手法で用いるリフレクタンス画像は、Time-of-Flight 式距離センサの距離計測の副産物として得られるため、新たな計測や装置の追加が必要ない、照明条件に関係なく夜間でも計測可能である、などの優れた特徴を有する。また距離画像はジャンプエッジが、リフレクタンス画像はルーフエッジがそれぞれ容易に検出できることから、片方の画像のみを用いる場合に比べて高いエッジ保存性能を有する。

今後は欠損修復に対する実機を用いた実験と定量的な評価を行うとともに、最適パラメータについての検討を行う予定である。

## 謝 辞

本研究の一部は、文部科学省科研費補助金基盤 B「人間・ロボット共生環境における日用小物品の情報構造化」(課題番号: 22300069) の支援を受けて行われました。

## 参 考 文 献

- (1) A. Kolb and E. Barth, R. Koch, and R. Larsen. Time-of-flight cameras in computer graphics. *Computer Graphics Forum*, Vol. 29, No. 1, pp. 141–159, 2010.
- (2) 倉爪亮, 戸畑享大, 村上剛司, 長谷川勉. Cps-slam の研究-大規模建造物の高精度 3 次元幾何形状レーザ計測システム-. *日本ロボット学会誌*, Vol. 25, No. 8, pp. 1234–1242, 2007.
- (3) 倉爪亮, 西野恒, M. D. Wheeler, 池内克史. リフレクタンスエッジと濃淡エッジを用いたテクスチャのアラインメント. *電子情報通信学会論文誌 D-II*, Vol. J85-D-II, No. 6, pp. 1038–1046, 2002.
- (4) Rolf Adelsberger, Remo Ziegler, Marc Levoy, and Markus Gross. Spatially adaptive photographic flash. In *ETH Zurich, Department of Computer Science, Technical Report No. 612*, 2008.
- (5) Mathieu Desbrun, Mark Meyer, Peter Schröder, and Alan H. Barr. Implicit fairing of irregular meshes using diffusion and curvature flow. In *SIGGRAPH '99*, pp. 317–324, 1999.
- (6) Thouis R. Jones, Frédo Durand, and Mathieu Desbrun. Non-iterative, feature-preserving mesh smoothing. In *SIGGRAPH '03: ACM SIGGRAPH 2003 Papers*, pp. 943–949, New York, NY, USA, 2003. ACM.
- (7) Shachar Fleishman, Iddo Drori, and Daniel Cohen-Or. Bilateral mesh denoising. *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 22, No. 3, pp. 950–953, 2003.
- (8) A. Miropolsky and A. Fischer. Reconstruction with 3d geometric bilateral filter. In *SM '04: Proceedings of the ninth ACM symposium on Solid modeling and applications*, pp. 225–229, Aire-la-Ville, Switzerland, Switzerland, 2004. Eurographics Association.
- (9) J. Diebel and S. Thrun. An application of markov random fields to range sensing. In *Proceedings of Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS)*, Cambridge, MA, 2005. MIT Press.
- (10) M. Bohme, M. Haker, T. Martinetz, and E. Barth. Shading constraint improves accuracy of time-of-flight measurements. In *Computer Vision and Pattern Recognition Workshops, 2008. CVPRW '08. IEEE Computer Society Conference on*, pp. 1–6, 23–28 2008.
- (11) 河合紀彦, 佐藤智和, 横矢直和. 局所形状の類似度評価に基づくエネルギー最小化による三次元欠損修復. *画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2008) 講演論文集*, pp. 272–277, 2008.
- (12) Jacob Becker, Charles Stewart, and Richard J. Radke. Lidar inpainting from a single image. In *In Proceedings of the IEEE International Workshop on 3-D Digital Imaging and Modeling*, 2009.
- (13) 河合紀彦, 佐藤智和, 横矢直和. テクスチャの明度変化と局所性を考慮したパターン類似度に基づくエネルギー最小化による画像修復. *画像の認識・理解シンポジウム (MIRU2007) 講演論文集*, pp. 227–234, 2007.
- (14) Pedro F. Felzenszwalb and Daniel P. Huttenlocher. Efficient belief propagation for early vision. *International Journal of Computer Vision*, Vol. 70, No. 1, 2006.
- (15) N. Komodakis and G. Tziritas. Image completion using global optimization. In *Proc. IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 442–452, 2006.
- (16) C. Tomasi and R. Manduchi. Bilateral filtering for gray and color images. In *ICCV '98: Proceedings of the Sixth International Conference on Computer Vision*, pp. 839–846, Washington, DC, USA, 1998. IEEE Computer Society.