

リフレクタンス画像を用いた距離画像の平滑化フィルタの開発

大石修士 倉爪亮 岩下友美 長谷川勉 (九州大学)

Development of smoothing filter for range image using reflectance data

*Shuji OISHI (Kyushu Univ.) Ryo KURAZUME (Kyushu Univ.)
Yumi IWASHITA (Kyushu Univ.) Tsutomu HASEGAWA (Kyushu Univ.)

Abstract— This paper proposes a new smoothing filter for range images taken by a Time-of-Flight range finder. A Time-of-Flight range finder gives a range value from the sensor to the target by measuring the transmitted time of the reflected light. At the same time, the power of the reflected light is also measured as a side product of the range value for the most of range finders. The basic idea of the propose technique is that the reflectance and range images are utilized for smoothing the range image corrupted by noise while preserving detailed shapes by applying the trilateral filter. Simulations and experiments using a laser range finder are successfully carried out for verifying the performance of the proposed filter.

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

1. はじめに

近年, SwissRanger SR4100 (MESA Imaging AG) や D-imager (Panasonic), Canesta Vision (Canesta, Inc.) など, リアルタイムに面状の距離画像が得られる Time-of-Flight 式距離センサが次々と開発されている [1]. これらのセンサは 20 ~ 50Hz の実時間で 150 ~ 200 画素四方 (2 万 ~ 4 万画素) 程度の距離画像が得られ, ロボットや車載センサ, 直感的ヒューマンインターフェースなど多くの用途に利用されている. しかし, 測定された距離値には奥行き方向の誤差が多く含まれ, また距離画像の解像度もデジタルカメラと比べると現状では十分とは言えない. 一方, RIEGL VZ-400 (RIEGL GmbH) や Leica Scan Station 2 (Leica Geosystems AG), TOPCON GLS-1500 (トプコン) などの高精度 3 次元レーザレンジファインダ, あるいは SICK LMS151 (SICK AG) や HOKUYO TOP-URG (北陽電機) などのスリット状レーザスキャナ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 [2] も開発されている. これらのセンサは LIDAR (Light Detection And Ranging) とよばれ, リアルタイム Time-of-Flight 式距離センサより計測時間が長いものの, 高解像度で高精度な計測が可能である. しかし測定された距離画像には計測対象の表面特性, センサ自身の電氣的, 機械的要因により微小なノイズが含まれる. 従って, これら Time-of-Flight 式距離センサ (リアルタイム Time-of-Flight 式距離センサ, LIDAR) に対するノイズ除去手法の開発は, 依然として重要な検討課題である.

Time-of-Flight 式距離センサの距離画像に含まれるノイズの除去には, 現在までに時間平滑化や空間平滑化等を用いた様々な手法が提案されている [3],[4],[5],[6],[7],[8],[9]. 一方, Time-of-Flight 式距離センサによる距離計測時には, 計測の副産物としてリフレクタンス画像 (反射率画像) が得られる [10]. ここで重要な点は, 距離画像とリフレクタンス画像は各画素ごとに 1 対 1 に対応していることである. そこで距離画像の平滑化にリフレクタンス画像を利用し, Bilateral

filter [11] を拡張した Trilateral filter を距離画像, リフレクタンス画像に適用することで, ジャンプエッジやルーフエッジなど距離画像中の微細な幾何学的特徴をできるだけ保存しつつ, 距離画像を平滑化しノイズを除去する新たな手法を提案する.

2. 提案手法

本章では, 提案するリフレクタンス画像と Trilateral filter を用いた距離画像の平滑化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 [4],[5],[6],[7],[8],[9]. これに対し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. 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, 図 1 [2] 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図 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. 図 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. 前述のように, このレーザ光の反射強度は, 距離画像のそれぞ

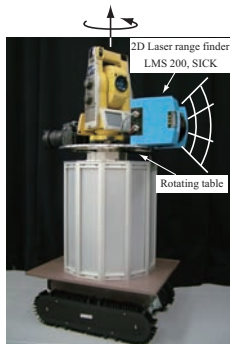


Fig.1 Acquisition system of panoramic range image[2]

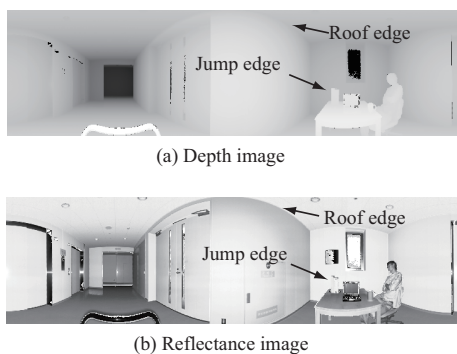


Fig.2 Range and reflectance images

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 [10]。

2.2 リフレクタンス画像を利用した Trilateral filter

ノイズを含む距離画像を平滑化するには、メディアンフィルタやガウシアンフィルタ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。特に Tomasi らによって開発された Bilateral filter [11] 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。しかし距離画像では、図 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、距離画像に一対一に対応したリフレクタンス画像には、図 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 σ_x , σ_f , σ_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。

$$g_i = \frac{\sum_j w_x(x_i, x_j) w_f(f_i, f_j) w_d(d_i, d_j) f_j}{\sum_j w_x(x_i, x_j) w_f(f_i, f_j) w_d(d_i, d_j)} \quad (1)$$

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

$$w_f(f_i, f_j) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_f} e^{-\frac{|f_i - f_j|^2}{2\sigma_f^2}} \quad (3)$$

$$w_d(d_i, d_j) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_d} e^{-\frac{|d_i - d_j|^2}{2\sigma_d^2}} \quad (4)$$

式 (1) 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。

以上まとめると、本論文で提案する Trilateral filter とリフレクタンス画像を用いた距離画像の平滑化手法は以下ようになる。

1. Time-of-Flight 式距離センサにより面状の計測を行い、各点の奥行き値及びリフレクタンス値を得る。
2. 得られた奥行き値及びリフレクタンス値から距離画像とリフレクタンス画像を生成する。ただしそれぞれの画像の輝度値は、距離画像については奥行き値に、リフレクタンス画像についてはリフレクタンス値にそれぞれ比例したものとす。
3. 距離画像の輝度及び距離情報、リフレクタンス画像の輝度情報を、式 (1) ~ (4) で示した Trilateral filter に入力し、平滑化された距離画像を得る。
4. 必要に応じて平滑化された距離画像からメッシュを構築し、3次元モデルを作成する。

3. 実験

3.1 合成画像を用いた実験

図 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。ただしリフレクタンス画像の代わりに、OpenGL で作成した輝度画像 (図 3(a)) を用い、距離画像 (図 3(b)) に距離値の最大 1% のランダムノイズを加えた。

図 4 に Gaussian filter, Bilateral filter, および Trilateral filter を適用した結果を、また表 1 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 5×5 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 $\sigma_x = 5$, $\sigma_f = 0.11$, $\sigma_d = 15$ とした。表 1 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。

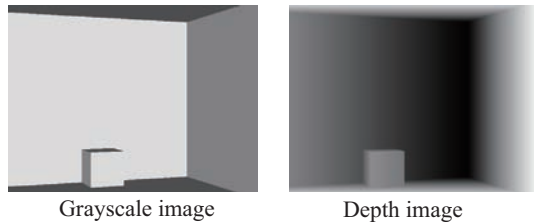


Fig.3 synthesized images for simulation experiment

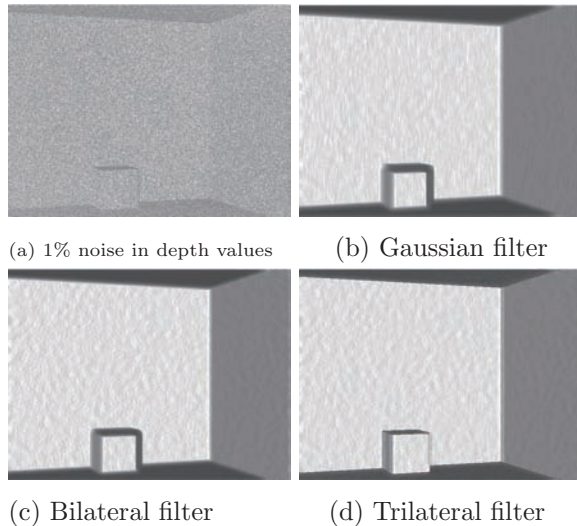


Fig.4 Denoised images by Gaussian filter, Bilateral filter and Trilateral filter

	RMS [mm]
Original image	45.8
Gaussian filter	33.1
Bilateral filter	26.6
Trilateral filter (proposed)	21.8

Table 1 RMS error

3.2 レーザレンジファインダを用いた実験

図1に示すレーザレンジファインダを搭載した3次元レーザ計測ロボットCPS-V[2]を用いて評価実験を行った。実験は図5に示すように、人間を含む複数の物体によりジャンプエッジが計測される環境に対して行った。距離画像、リフレクタンス画像を図6に示す。ただし、図1のロボットは回転テーブルを回転させながら図2のような全周方向の距離データを取得する。画像サイズは距離画像、リフレクタンス画像ともに 200×721 画素である。図6はそのうちの一部分を拡大して示している。

実験結果を図7に示す。図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、図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。

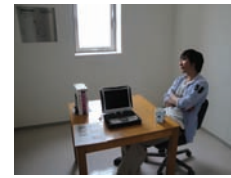


Fig.5 Experimental setup

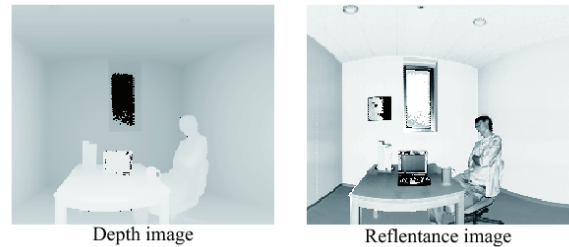


Fig.6 Range and reflectance images

Gaussian filter を適用した場合、壁面の凹凸は平滑化されているが、各物体のエッジも同時に鈍っていることがわかる。また、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の形を保てているが、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、提案する Trilateral filter では、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。なお、フィルタのカーネルサイズは 5×5 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 $\sigma_x = 5$ 、 $\sigma_f = 0.11$ 、 $\sigma_d = 15$ とした。

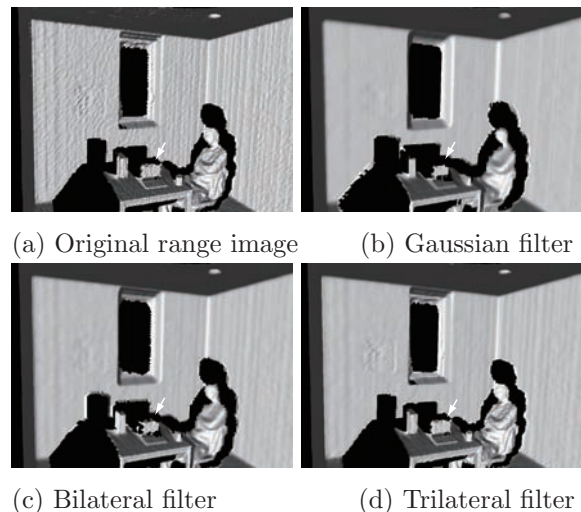


Fig.7 Experimental results for a complex environment

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を提案した。本手法は、距離画像とリフ

レクタンス画像に対して、濃淡画像に対する Bilateral filter を拡張した Trilateral filter を適用することで、距離画像中の幾何構造を保存しつつノイズを抑制し距離画像を平滑化するものである。また合成画像およびレンジファインダを用いた評価実験を行い、Gaussian Filter, Bilateral filter に比べて、エッジ保存しつつ距離画像を平滑化する優れた性能を有することを確認した。

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と期待される。

今後は定量的な評価実験、および最適パラメータについての検討などを行う予定である。

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] Gabriel Taubin. A signal processing approach to fair surface design. In *SIGGRAPH '95: Proceedings of the 22nd annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pp. 351–358, New York, NY, USA, 1995. ACM.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Shachar Fleishman, Iddo Drori, and Daniel Cohen-Or. Bilateral mesh denoising. *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 22, No. 3, pp. 950–953, 2003.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.