

リフレクタンス画像を用いた距離画像の欠損修復

Edge-preserving Range Image Inpainting using Reflectance Image

○ 大石 修士 (九大) 正 倉爪 亮 (九大)
 岩下 友美 (九大) 正 長谷川 勉 (九大)

Shuji OISHI, Kyushu University, oishi@irvs.is.kyushu-u.ac.jp
 Ryo KURAZUME, Kyushu University
 Yumi IWASHITA, Kyushu University
 Tsutomu HASEGAWA, Kyushu University

Time-of-Flight range finder gives a range value from the sensor to the target by measuring the time until the emitted laser pulse is reflected on the target's surface and returned to the sensor. The power of the reflected light is also measured as a side product of the range value. In this paper, we propose new inpainting technique for range images utilizing reflectivity. 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 demonstrate that the proposed technique enables to repair deteriorated range images successfully.

Key Words: Belief Propagation, Inpainting, Laser range finder, Range image, Reflectance image

1 はじめに

レーザ光を2次元的に走査し、その往復時間から3次元形状を正確に測定する3次元レーザスキャナは、土木建設現場での現況確認や歴史的文化遗产のデジタルアーカイブなどで現在広く利用されている。例えば、RIEGL VZ-400 (RIEGL GmbH) や Leica Scan Station 2 (Leica Geosystems AG), TOPCON GLS-1500 (TOPCON) など、大規模な3次元点群データが比較的短時間で得られるレーザスキャナは、土木建築分野で急速に広まりつつある情報化施工において重要な入力装置の一つとなっている。一方、作業移動ロボットのための環境計測用センサとして、SICK LMS151 (SICK AG) や HOKUYO TOP-URG (北陽電機) などのより安価な2次元レーザスキャナを、回転テーブル等に取り付け、ロボット周囲の3次元環境地図を作成するシステム [1] なども提案されている。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によっては鏡面反射やレーザ光の減衰が起き、距離画像中に欠損を生じることがある。従って、これら Time-of-Flight 式距離センサに対する欠損修復手法の開発は大きな課題である。

そこで本稿ではリフレクタンス画像を用いた欠損修復手法を提案する。リフレクタンス画像とは、Time-of-Flight 式距離センサから投射されたレーザ光の反射強度を濃淡値で表わしたものである [2]。本研究ではこのリフレクタンス画像と Belief Propagation を用いることで、幾何特徴を保持したまま距離画像の欠損修復が可能な新たな手法を提案する。

2 リフレクタンス画像を用いた距離画像の欠損修復

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欠損修復手法としては、モデル内の類似領域を探索し形状の復元を試みるもの [3] や、他視点のカラー画像から生成したパッチを用いた欠損領域を補う手法 [4] 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 [5] や、Belief

Propagation を適用して修復を図る手法 [6]、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 [7] などが提案されている。一方、本稿ではリフレクタンス画像と距離画像を同時に用いた 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 [1] 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。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 [2]。

2.2 リフレクタンス画像と Belief Propagation による距離画像の修復

Time-of-Flight 式距離センサを用いた計測では、対象物表面での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、図 2(a) に示すような欠損が距離

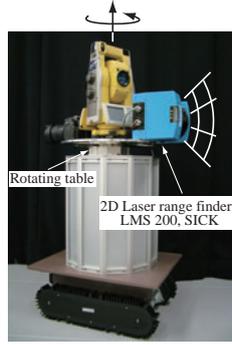


Fig.1 Acquisition system of panoramic range image [1]



Fig.2 Range and reflectance images

画像中に生じ、距離値が取得できないことがある。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。

2.2.1 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。

$$E(f) = \sum_{p \in P} D_p(f_p) + \sum_{(p,q) \in N} W(f_p, f_q) \quad (1)$$

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。

$$m_{p \rightarrow q}^t(f_q) = \min_{f_p} \left(D_p(f_p) + W(f_p, f_q) + \sum_{s \in N(p) \setminus q} m_{s \rightarrow p}^{t-1}(f_p) \right) \quad (2)$$

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。

$$b_q(f_q) = D_q(f_q) + \sum_{p \in N(q)} m_{p \rightarrow q}^T(f_q) \quad (3)$$

2.2.2 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。前述の通り、Time-of-Flight 式距離センサにより距離値を取得する場合、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

$$D_p(f_p) = 0 \quad (4)$$

その他の部分に対しては

$$D_p(f_p) = |f_p - L_p| \quad (5)$$

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。

$$W(f_p, f_q) = f(r_p, r_q)(f_p - f_q)^2 \quad (6)$$

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。

$$f(r_p, r_q) = \alpha e^{-\beta(r_p - r_q)^2} \quad (7)$$

式 (6) 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。

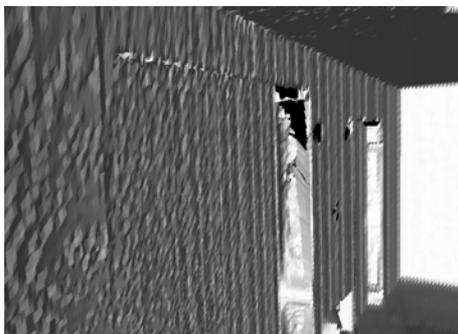
3 Belief Propagation による距離画像の修復

図 1 に示す 3 次元レーザ計測ロボット CPS-V [1] を用いて 200×721 画素の距離画像を取得し、Belief Propagation を用いた距離画像修復の実機実験を行った。なお、式 (7) におけるパラメータの値はそれぞれ $\alpha = 0.75$, $\beta = 0.5$ であり、 $T = 20$ とした。

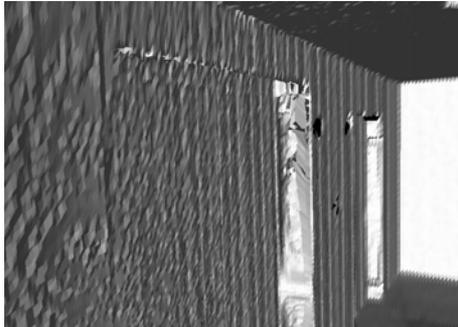
図 3(a) は CPS-V により得られた欠損を含む 3 次元モデルである。Belief Propagation を距離画像に適用して修復を行った結果を図 3(b), (c) に示す。図 3(b) はリフレクタンス画像を用いない場合, 図 3(c) はリフレクタンス画像を用いた場合である。本実験では, リフレクタンス画像の有無で顕著な差は見られなかった。

次に CPS-V により得られた 3 次元モデルに対し, 図 4(a) に示すより大きな欠損部分を手動で加え, Belief Propagation を適用して修復を行った。図 4(b) はリフレクタンス画像を用いない場合, 図 4(c) はリフレクタンス画像を用いた場合である。また, それぞれの場合の RMS 誤差を表 1 に示す。

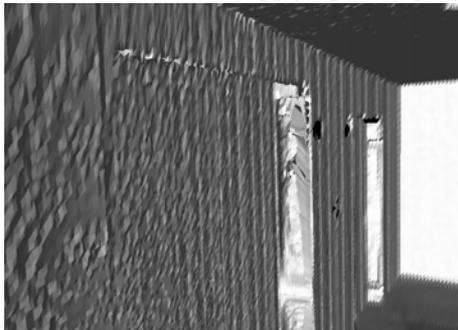
これらの結果から, Belief Propagation とリフレクタンス画像を用いた 2 ステップアルゴリズムにより, より正確な距離画像の修復が可能ながあることが確認された。



(a) Original 3D mesh model with a missing region

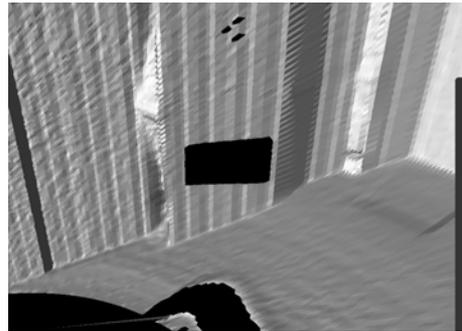


(b) The 3D mesh model after applying belief propagation

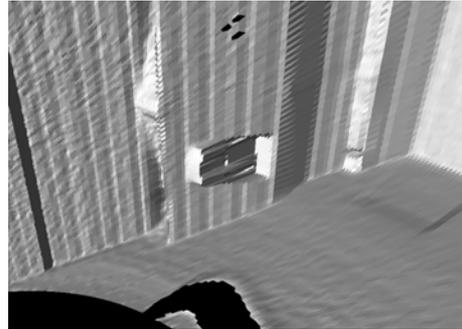


(c) The 3D mesh model after applying our two-step algorithm

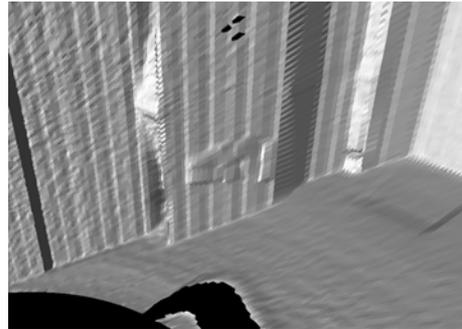
Fig.3 Experimental results for the range and reflectance images taken by the laser scanner



(a) Original 3D mesh model with a missing region



(b) The 3D mesh model after applying belief propagation



(c) The 3D mesh model after applying our two-step algorithm

Fig.4 Experimental results for the performance evaluation

Table 1 RMS error in experimental results for the performance evaluation

	RMS [mm]
Without reflectance	7.68
With reflectance (2step)	1.44

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欠損の生じた距離画像の修復手法を提案した。本手法は, Belief Propagation を用いて距離画像中の欠損修復を行う際に, リフレクタンス画像におけるエッジを考慮することで, 距離画像中の幾何構造を保存した欠損修復を図るものである。本稿では, レーザレンジファインダを用いた評価実験を行い, Belief Propagation を単純に適用した場合に比べて, エッジを保存しつつ距離画

像の欠損の補間が可能であることを確認した。

今後は他のセンサ機器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。

文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] Pedro F. Felzenszwalb and Daniel P. Huttenlocher. Efficient belief propagation for early vision. *International Journal of Computer Vision*, Vol. 70, No. 1, 2006.
- [7] N. Komodakis and G. Tziritas. Image completion using global optimization. In *Proc. IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 442-452, 2006.