

映像ポストプロダクション利用のための 領域分割に基づくレンジデータ補間法

Segmentation-Based Interpolation of Range Data for Its Application to Image Post-Production

橋口 正幸††

小松 隆††

齊藤 隆弘††

Hashiguchi Masayuki

Komatsu Takashi

Saito Takahiro

1. はじめに

レーザレンジファインダを使用することで、同一視点から同時に、被写体の輝度値データ及び距離データを取得することが出来る。この距離データという新しい情報を用いることで、既存の映像加工表現において作業軽減が期待でき、他にも画像処理の新しい判定・判断基準として使用することも考えられる。しかしながら、レーザレンジファインダから取得されるデータは、既存の撮像機器に比べ、非常に解像度が低い。ゆえに、この距離データを、既存の撮像機器から取得したデータと、位置合わせをして使用しようとしても、有効なデータとして扱うことが出来ないため、解像度向上が必要になってくる。本稿では、距離データの解像度向上にインペイントアルゴリズム法の使用を前提とし、その手法を有効に活用するための前処理として行う領域分割について述べる。

2. 領域分割

各レンジ点の法線ベクトル及び近似平面を使用して、領域分割を行っていく。まず手動で設置した種領域とその周囲の点を使用して近似平面を作成する。次に、各レンジ点から、その近似平面 $a \cdot x_y + b \cdot y_y + c \cdot z_y + d = 0$ へと下ろした垂線の足の長さを iD_y として、計算する。

$$iD_y = \frac{a \cdot x_y + b \cdot y_y + c \cdot z_y + d}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \quad (1)$$

この長さが閾値より小さく、かつその法線ベクトルが種領域の持つ法線ベクトルに近似した点を種領域と同じ領域であると認識し、領域部に加える。

3. 各レンジ点の単位法線の算出

始めに、画像内から、領域分割を行いたい部分に手動で種領域を埋め込む。次に、各種領域について、以下の処理を行う。近似平面の作成レンジデータ $r_{i,j} = (\theta_i, \varphi_j)$ から変換した3D点データを $\mathbf{p}_{i,j} = (x_{i,j}, y_{i,j}, z_{i,j})^T$ とする。ここで、ある観測3D点データ $\mathbf{p}_{i,j} = (x_{i,j}, y_{i,j}, z_{i,j})^T$ における単位法線ベクトル $\mathbf{n}_{i,j}$ を算出する。観測3D点データ $\mathbf{p}_{i,j} = (x_{i,j}, y_{i,j}, z_{i,j})^T$ を囲む近傍観測データ領域を $\Omega_{i,j}$ とする。まず、観測3D点 $\mathbf{p}_{k,l} = (x_{k,l}, y_{k,l}, z_{k,l})^T$ から、近傍領域 $\Omega_{i,j}$ 中の観測3D点 $\mathbf{p}_{k,l} = (x_{k,l}, y_{k,l}, z_{k,l})^T$ への相対位置ベクトル $\mathbf{s}_{k,l}^{(i,j)}$ を、

$$\mathbf{s}_{k,l}^{(i,j)} = \mathbf{p}_{k,l} - \mathbf{p}_{i,j} = (\alpha_{k,l}, \beta_{k,l}, \gamma_{k,l})^T \quad (2)$$

と表現し、これを正規化したベクトルを $\mathbf{p}_{k,l}^{(i,j)}$ とする。このとき、観測3D点データ $\mathbf{p}_{i,j} = (x_{i,j}, y_{i,j}, z_{i,j})^T$ における単位法線ベクトル $\mathbf{n}_{i,j}$ は、近傍領域 $\Omega_{i,j}$ において、次式の関係式を満足する。

$$(\mathbf{p}_{k,l}^{(i,j)}, \mathbf{n}_{i,j}) = 0, \quad (k,l) \in \Omega_{i,j} \quad (3)$$

上式は近似的にしか満足されないので、 $\|\mathbf{n}_{i,j}\| = 1$ の制約条件の下で、上式の方程式誤差の二乗和を最小化する問題を考える。すなわち、

$$\mathbf{n}_{i,j} = \arg \min_{\|\mathbf{n}\|=1} \sum_{(k,l) \in \Omega_{i,j}} (\mathbf{p}_{k,l}^{(i,j)}, \mathbf{n})^2 = \arg \min_{\|\mathbf{n}\|=1} \left\{ \sum_{(k,l) \in \Omega_{i,j}} (\mathbf{p}_{k,l}^{(i,j)}, \mathbf{n})^2 \right\} \cdot (\mathbf{n}) \quad (4)$$

$$\text{under } \|\mathbf{n}\| = 1$$

である。ここで、上式の最小化問題は、次式のレーレ商を最小化する問題と同値である。

$$\mathbf{n}_{i,j} = \arg \min_{\|\mathbf{n}\|=1} \frac{(\mathbf{n})^T \cdot \mathbf{P}^{(i,j)} \cdot (\mathbf{n})}{\|\mathbf{n}\|^2}, \quad \mathbf{P}^{(i,j)} = \sum_{(k,l) \in \Omega_{i,j}} (\mathbf{p}_{k,l}^{(i,j)}) \cdot (\mathbf{p}_{k,l}^{(i,j)})^T \quad (5)$$

ここで 3×3 の実対称行列 $\mathbf{P}^{(i,j)}$ は、上式のレーレ商が方程式差の二乗和から導出されたものでことより明らかに、ほとんどの場合に正定値であり、その最小固有値は正となる。ただし、近傍領域 $\Omega_{i,j}$ 内のデータが完全に平面である場合には、レーレ商を厳密にゼロとするベクトルがただ一つ存在するので、実対称行列 $\mathbf{P}^{(i,j)}$ は非負行列となり、その最小固有値はゼロとなる。

上式の最小化問題の解 $\mathbf{n}_{i,j}$ は、 3×3 の正値対称行列 $\mathbf{P}^{(i,j)}$ の最小固有値 λ_{\min} に対応した単位固有ベクトル \mathbf{n}_{\min} であり、近傍領域 $\Omega_{i,j}$ における単位法線ベクトル $\mathbf{n}_{i,j}$ の意義を有する。なお、正値対称行列 $\mathbf{P}^{(i,j)}$ は次式で与えられる。

$$\mathbf{P}^{(i,j)} = \begin{pmatrix} a & d & e \\ d & b & f \\ e & f & c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{(i,j) \in \Omega_{i,j}} (\alpha_{i,j})^2 & \sum_{(i,j) \in \Omega_{i,j}} (\alpha_{i,j} \beta_{i,j}) & \sum_{(i,j) \in \Omega_{i,j}} (\gamma_{i,j} \alpha_{i,j}) \\ \sum_{(i,j) \in \Omega_{i,j}} (\alpha_{i,j} \beta_{i,j}) & \sum_{(i,j) \in \Omega_{i,j}} (\beta_{i,j})^2 & \sum_{(i,j) \in \Omega_{i,j}} (\beta_{i,j} \gamma_{i,j}) \\ \sum_{(i,j) \in \Omega_{i,j}} (\gamma_{i,j} \alpha_{i,j}) & \sum_{(i,j) \in \Omega_{i,j}} (\beta_{i,j} \gamma_{i,j}) & \sum_{(i,j) \in \Omega_{i,j}} (\gamma_{i,j})^2 \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$a > 0, \quad b > 0, \quad c > 0$$

3×3 の正値対称行列 $\mathbf{P}^{(i,j)}$ の固有方程式は次式のようになり、

$$\begin{aligned} & |\mathbf{P}^{(i,j)} - \lambda \cdot \mathbf{I}| \\ &= \lambda^3 - (a+b+c) \cdot \lambda^2 + (a \cdot b + b \cdot c + c \cdot a - d^2 - e^2 - f^2) \cdot \lambda \\ & \quad + (a \cdot f^2 + b \cdot e^2 + c \cdot d^2 - a \cdot b \cdot c - 2 \cdot d \cdot e \cdot f) \\ &= \lambda^3 + a_2 \cdot \lambda^2 + a_1 \cdot \lambda + a_0 \cdot \lambda = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

その解はCardano法により解くことが出来る。まず、次を計算する。

$$\begin{aligned} p &= (3 \cdot a_1 - (a_2)^2) / 9, \quad q = (2 \cdot (a_2)^3 - 9 \cdot a_2 \cdot a_1 + 27 \cdot a_0) / 27, \\ D &= -(4 \cdot p^3 + q^2) \end{aligned} \quad (8)$$

これを用いて解を求めると、

$$\begin{aligned} x_1 &= 2 \cdot r^{1/3} \cdot \cos(\theta/3) - a_2/3 \\ x_2 &= -r^{1/3} \cdot (\cos(\theta/3) + \sqrt{3} \sin(\theta/3)) - a_2/3 \\ x_3 &= -r^{1/3} \cdot (\cos(\theta/3) - \sqrt{3} \sin(\theta/3)) - a_2/3 \\ r &= \frac{1}{2} \sqrt{q^2 + D}, \quad \theta = \arctan(-q, \sqrt{D}) \end{aligned} \quad (9)$$

最小固有値 λ_{\min} 、最大固有値 λ_{\max} はそれぞれ、

$$\lambda_{\min} = x_2, \quad \lambda_{\max} = x_1 \quad (10)$$

となる。この最小固有値に対応した単位固有ベクトルが、周辺領域のデータ点から求めた、その点の単位法線ベクトル $\mathbf{n}_{i,j}$ として採用できる。図.2は最小固有値を図化したもので、その特徴から法線ベクトルが正しく求められていることが分かる。

4. 近似平面の算出

(a) 方程式誤差の定義

レーザレーダで得られた観測データを直交座標系に変換すると以下のようになる。

$$\begin{aligned} x_{ij} &= r(\theta_i, \varphi_j) \cdot \sin \theta_i \cdot \cos \varphi_j \\ y_{ij} &= r(\theta_i, \varphi_j) \cdot \sin \theta_i \cdot \sin \varphi_j \\ z_{ij} &= r(\theta_i, \varphi_j) \cdot \cos \theta_i \end{aligned} \quad (11)$$

このパラメータを使用して、近似平面を求めるとき、以下のような方程式誤差を定義する。

$$e(\theta_i, \varphi_j) = a \cdot x_{ij} + b \cdot y_{ij} + c \cdot z_{ij} + d \quad (12)$$

(b) 誤差規範の定義

3D観測データ $(x_{ij}, y_{ij}, z_{ij})^T$ から平面へ下ろした垂線の足の長さを D_{ij} とし、誤差規範 $C(a)$ を定義する。

$$D_{ij}^2 = \frac{(a \cdot x_{ij} + b \cdot y_{ij} + c \cdot z_{ij} + d)^2}{a^2 + b^2 + c^2}$$

$$C(a) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M D_{ij}^2 = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \frac{(a \cdot x_{ij} + b \cdot y_{ij} + c \cdot z_{ij} + d)^2}{a^2 + b^2 + c^2} \quad (13)$$

(c) 誤差規範の最適化

パラメータ d について、

$$\frac{\partial C(a)}{\partial d} = \frac{2}{a^2 + b^2 + c^2} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (a \cdot x_{ij} + b \cdot y_{ij} + c \cdot z_{ij} + d) = 0 \quad (14)$$

この式を整理し、以下を得る。

$$d = -(a \cdot x_G + b \cdot y_G + c \cdot z_G) \quad \text{観測データの重心: } (x_G, y_G, z_G)$$

次に a, b, c について最適化を行う。

$$C(a) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \frac{[(a \cdot (x_{ij} - x_G) + b \cdot (y_{ij} - y_G) + c \cdot (z_{ij} - z_G) + d)]^2}{a^2 + b^2 + c^2}$$

$$= \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \frac{(a^T \cdot M_{ij} \cdot a)}{\|a\|^2}$$

$$M_{ij} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M (b_{ij}^T) \cdot (b_{ij}) = \begin{pmatrix} \sum_{i,j} \sum_{i,j} (x_{ij} - x_G)^2 & \sum_{i,j} \sum_{i,j} (x_{ij} - x_G)(y_{ij} - y_G) & \sum_{i,j} \sum_{i,j} (x_{ij} - x_G)(z_{ij} - z_G) \\ \sum_{i,j} \sum_{i,j} (x_{ij} - x_G)(y_{ij} - y_G) & \sum_{i,j} \sum_{i,j} (y_{ij} - y_G)^2 & \sum_{i,j} \sum_{i,j} (y_{ij} - y_G)(z_{ij} - z_G) \\ \sum_{i,j} \sum_{i,j} (x_{ij} - x_G)(z_{ij} - z_G) & \sum_{i,j} \sum_{i,j} (y_{ij} - y_G)(z_{ij} - z_G) & \sum_{i,j} \sum_{i,j} (z_{ij} - z_G)^2 \end{pmatrix} \quad (15)$$

$$b_{ij}^T = (x_{ij} - x_G, y_{ij} - y_G, z_{ij} - z_G)$$

行列 M_{ij} の最小固有値に対応した正規固有ベクトルの定数倍のベクトルを求めることにより、 $C(a)$ の最小化を求めることができ、 a, b, c が算出され、近似平面が得られる。

5. 結果

本手法において、建造物の壁面や屋根は正確に抽出されている。しかし、地面や他の領域との境界は正確には抽出されていない。また画面の左右にある木の領域についても抽出されていない。これは本手法では、木の部分のような不規則な変化をするレンジデータに対して精度を上げるような対策をとっていないためである。領域分割に先立って、レンジデータに選択的平滑化を適用するなどの前処理をする必要が考えられる。

6. むすび

領域分割の精度を向上させると共に、領域毎にインペイントアルゴリズムを適用することで、レンジデータを補間する手法についても現在検討を加えている。

謝辞

本研究は、文部科学省『ハイテクリサーチセンター整備事業』の援助の下に行われた。感謝の意を表する。

[参考文献]

- [1] 橋口、小松、齊藤：IMPS__1-2.15 平成15年11月
- [2] 橋口、小松、齊藤：総合大会__D-11-145 平成16年3月



図.1 レンジデータと共に計測したテクスチャデータ

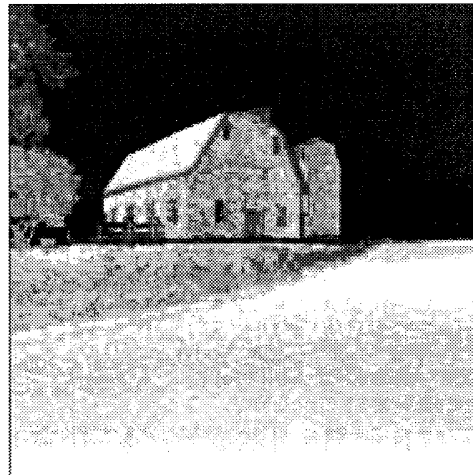


図.2 単位法線推定の最小固有値



図.3 領域分割結果

< 連絡先 >

神奈川大学 工学部 電気電子情報工学科 齊藤研究室
 〒221-8686 横浜市神奈川区六角橋三丁目27番地1号
 TEL 045(481)5661 内線3806

† 神奈川大学 工学部
 † 神奈川大学ハイテクリサーチセンター