

マッチングコストに応じたコントラスト改善画像の選択による 低テクスチャ物体の SfM-MVS 再構成モデル品質の向上

北海道大学 ○阿久津 啓, 森谷 亮太, 金井 理, 伊達 宏昭

要 旨

多数画像から3次元モデルを再構成できる SfM-MVS 技術の利用が建設や土木などで普及している。しかし、単一色塗装面など低テクスチャ部の3次元再構成は失敗する事例が多く、処理の頑健性や再構成モデルの精度向上に余地がある。本研究では、MVS 処理時に、元画像とコントラスト改善画像の両者に対し、深度マップや深度マップ計算時のステレオマッチングコストを評価し、画素単位で高品質な深度・法線を選択することで、再構成モデル品質を向上させる手法を開発した。

1. はじめに

多数の画像から3次元モデルを再構成できる SfM-MVS(Structure-from-Motion-Multi-view Stereo)再構成技術[1]が、建設、土木、測量などの3次元計測に利用されている。しかし、対象が不適切な露光条件で撮影されたり、露光が適切であっても、対象が単一色で塗装されている場合、撮影画像に低テクスチャ部が含まれる。この部分で、画像から3次元再構成を行おうとしても、該当部の輝度変化が乏しいため、SfM が失敗したり、MVS で生成されたモデル上に欠陥や精度劣化が生じることが確認されている。

この対策として、(1)入力画像に前処理を施す方法[2]、(2)MVS の内部処理を改善する方法[3]、(3)MVS 出力点群からのメッシュ生成処理を改善する方法[4]などが提案されている。本研究でも(1)の1手法として、Wallis filter とヒストグラム完全均一化による画像のコントラスト改善が、3次元モデル品質向上に有効であることを示してきた[5]。しかし、①Wallis filter によるコントラスト改善は、画像中で輝度変化に富んだ部分では逆に効果が弱まる問題や、②コントラスト改善の有無や改善方法の違いにより、SfM の成功率やよりよい再構成が行える領域が画像内で異なってしまう問題が確認された。

そこで本報では、これら問題点を解決するため、図1のように、入力画像にコントラスト改善を施すのみならず、MVS 内部処理も改善する方法を提案する。具体的には、手法の異なる複数のコントラスト改善画像で深度・法線マップを各々生成し、それらから点群生成に用いる深度・法線を、画素単位で適応的に選択することによって、低テクスチャ部の再構成モデルの品質を向上させる手法を新たに提案する。

2. 入力画像の前処理による再構成モデルの高品質化

低テクスチャ部の再構成を可能とする手法として、入力画像のコントラスト改善によって、該当部の輝度変化を高める方法が考えられる。その1つとして、文献[2]では、Wallis filter によるコントラスト改善が提案されている。8 bit 画像の画像座標 (u, v) の輝度値 $I(u, v)$ に対する Wallis filter 後の輝度値 $I'(u, v)$ は、式(1)により算出される。

$$I'(u, v) = \sigma_{set} \times \frac{I(u, v) - \mu}{\sigma + 0.8} + 127 \quad (1)$$

ここで、 σ_{set} はユーザ指定の改善強度パラメータ、 μ は対象画素 (u, v) を中心とする幅 $w \times w$ の窓内部の平均輝度値、 σ は窓内部の輝度値の標準偏差である。この処理によって、 σ に応じた輝度値の修正が行われ、低テクスチャ

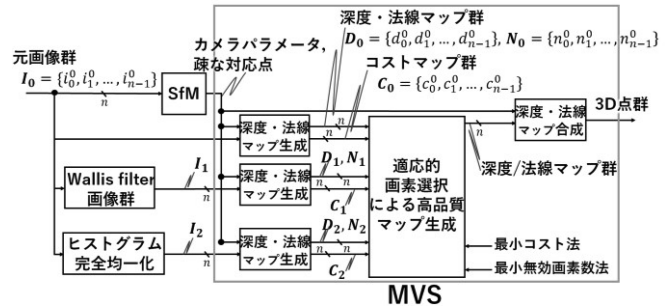


図1 提案する低テクスチャ物体の再構成モデル品質向上手法

部の輝度差が増幅される。

一方、前報[5]では、ヒストグラム完全均一化を適用したコントラスト改善を提案した。ここでは、輝度値0から順に、ヒストグラムのすべてのビンが同一値になるよう、ランダムに選択された画素の輝度値を変更する。この処理によって、画像全体の平均情報量が最大になり、各画素の特異性が増し、ステレオマッチングにおける誤対応の可能性を抑制する効果をもつ。

3. 一般的な深度・法線マップ合成による MVS 手法

一般的な MVS 手法では、まず視点毎に深度・法線マップが生成された後、それらが合成され、3次元点群が生成される。視点数(カメラ数)が n 、画像やマップ x の画素位置 (u, v) にある画素値を $x(u, v)$ と表現すると、元画像群 $I_0 = \{i_0^0, i_1^0, \dots, i_{n-1}^0\}$ に対し、SfM を施し、カメラパラメータと疎な対応点を取得する。次に、これら2つの情報と I_0 の部分集合である画像群からステレオマッチングにより、各視点の深度・法線マップを要素にもつ深度マップ群 $D_0 = \{d_0^0, d_1^0, \dots, d_{n-1}^0\}$ と法線マップ群 $N_0 = \{n_0^0, n_1^0, \dots, n_{n-1}^0\}$ を生成する。ステレオマッチング処理時には、 I_0 中の異なる画像上の画素間の適合性が評価され、その指標を最大化する最適化問題が解かれる。そして、カメラ中心から対象までの深度と、対象の局所平面の法線が、画素ごとに求まる。従って、深度・法線マップとともに副産物として、異なる画像上の画素間の適合性の評価結果であるコストマップ群 $C_0 = \{c_0^0, c_1^0, \dots, c_{n-1}^0\}$ も得られる。ここで、コストが大きいほど画素の適合性は低い。

続く深度・法線マップ合成では、SfM で計算済みのカメラの位置姿勢と深度・法線マップ群 D_0, N_0 から、3次元点群が生成される。

4. 異なるコントラスト改善画像の深度・法線マップを用いた適応的選択による高品質マップ生成

前節の一般的な深度・法線マップ合成による MVS 手法では、マップ生成を 1 つの画像群 I_0 に対してのみ行う。一方で、本手法では、図 1 のように、異なる 3 つのコントラスト改善画像群 (元画像群も含む) I_0, I_1, I_2 に対しマップ生成を行い、 D_0, D_1, D_2 と N_0, N_1, N_2 を取得する。そして、 D_0, D_1, D_2 と N_0, N_1, N_2 の中から、高品質深度マップ群 D_* と法線マップ群 N_* を生成する。この生成過程では、 D_* 中の視点 i の画素位置 (u, v) における深度 $d_i^*(u, v)$ は、 $d_i^0(u, v) \in D_0, d_i^1(u, v) \in D_1, d_i^2(u, v) \in D_2$ の中からより高品質なものを、画素毎に選択し、法線もまた同様に選択する。この選択手法として、次の 2 つを提案する。

4.1. 最小コスト法

最小コスト法では、 C_0, C_1, C_2 中でコストの小さい深度・法線を優先的に選択する。まず、元画像群のある視点 i のコスト $c_i^0(u, v)$ とコントラスト改善画像群の対応するコスト $c_i^1(u, v), c_i^2(u, v)$ を比較する。そして、コストが最小である画像群が $j_* \in \{0, 1, 2\}$ だとすると、その深度 $d_i^{j_*}(u, v)$ 、法線 $n_i^{j_*}(u, v)$ が、それぞれ、 $d_i^*(u, v), n_i^*(u, v)$ に代入される。この処理を全視点の全画素で行うことで、高品質深度マップ群 D_* と法線マップ群 N_* が生成される。

4.2. 最小無効画素数法

最小無効画素数法では、深度が不定となる無効画素の数が最小になるよう優先順に応じて、深度・法線が選択される。優先順を例えば、 $I_0 \rightarrow I_1 \rightarrow I_2$ と決める。視点 i の画素位置 (u, v) における深度マップ値 $d_i^0(u, v)$ が無効画素の場合、同じ画素位置の深度マップ値 $d_i^1(u, v)$ が有効画素であれば、それで補填する。全視点の全画素に対しこの処理を行い、未だ存在する無効画素を同様に、 $d_i^2(u, v)$ で補填する。こうして、高品質深度マップ群 D_* を生成する。また、高品質法線マップ群 N_* は、 D_* の選択結果を反映し生成する。

5. 有効性評価実験

4 節で提案した 2 種類のマップ生成法を評価するために、図 2(a) のモルタル外壁の 3 次元再構成実験を行った。入力画像群は、1 群につき 17 枚 (各 6016×4016 画素) で、元画像、完全均一化、式(1)の Wallis filter ($\sigma_{set} = 60, w = 85$) の 3 群を用いた。カメラパラメータは、完全均一化処理を施した画像群 I_2 に対する SfM から取得した結果を共用した。また、SfM とマップ生成、合成には、フリー SfM-MVS ソフトウェアである COLMAP[6]を用いた。最小無効画素数法では、優先度を元画像 \rightarrow Wallis filter \rightarrow 完全均一化の順とした。

図 2 に、元画像と完全均一化、Wallis filter を施した画像を示す。また、図 3(b)-(f) に、処理毎の再構成点群を比較する。また、(a) の点線内領域のうち、基準平面から ± 0.6 m 以内の点を対象に、その点数と基準平面からの距離の標準偏差を評価した結果を表 1 に示す。ただし、基準平面は、レーザースキャン点群より算出し、ICP により位置合わせを行った。

図 3 より、元画像のみの場合に比べ、他のいずれの処理も再構成点数の増加に寄与することが確認できる。特に、(e) は、処理が容易にも関わらず、再構成点群が広く分布している。しかし、画像中で輝度変化に富んだ部分では、(d) や (f) に比して、(e) は点密度が低下している点や、表 1 より、完全均一化より精度が低下している点が欠点として挙げられる。一方で、本報提案の (b)(c) は、(e)(f) に比べて若干の精

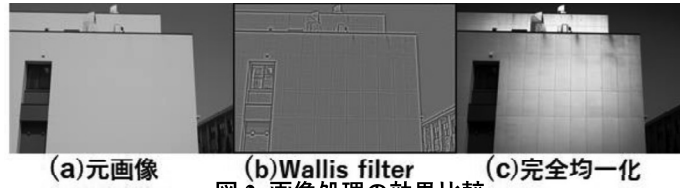


図 2 画像処理の効果比較

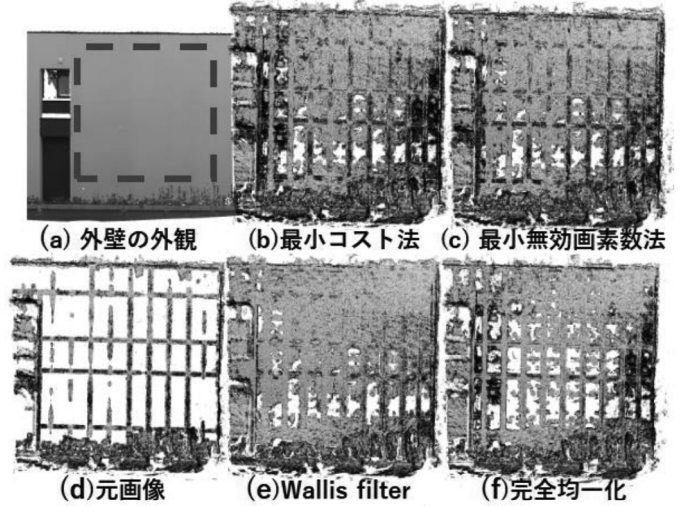


図 3 外壁の外観と処理毎の点群

表 1 基準平面からの定量評価

画像処理	元画像	Wallis filter	完全均一化	最小コスト法	最小無効画素数法
点数	79,801	148,533	162,911	213,043	185,868
標準偏差[mm]	43	31	26	33	34

度劣化があるものの、(e) に比べて若干再構成領域が拡大し、輝度変化に富んだ部分の点密度も増大している。以上より、提案手法 (e) や (f) は、再構成点群の品質を、より一層向上させることが確認できる。

6. おわりに

低テクスチャ部の SfM-MVS 再構成品質を向上をさせるため、元画像群と異なる複数のコントラスト改善画像群から、画素単位で点群生成に用いる深度と法線を適応的に選択し、高品質深度マップと法線マップを生成し、3 次元再構成の品質向上を図る手法を提案し、その有効性を評価した。その結果、Wallis filter が苦手とする輝度変化に富んだ部分でも安定した再構成点数を確保でき、また前処理の違いによる再構成領域の違いを互いに補填し合うことで、再構成領域の拡大が行えることを確認した。

しかし、完全均一化によるコントラスト改善は、画像全体の平均情報量の最大化しか行わないため、ステレオマッチングに用いられる局所領域のみでコントラスト改善を行い、平均情報量を局所的に向上させるなどの改善を行いたい。また、より効果的な低テクスチャ部の画素間の適合性評価も考察していきたい。

参考文献

- [1]. 織田 和夫, "解説: Structure from Motion (SfM) 第一回 SfM の概要とバンドル調整", 写真測量とリモートセンシング, 55-3, pp. 206-209, (2016)
- [2]. Gaiani, Marco, et al. "An advanced pre-processing pipeline to improve automated photogrammetric reconstructions of architectural scenes.", Remote Sensing, 8(3), 178, (2016)
- [3]. Romanoni, Andrea, and Matteucci, Matteo, "TAPA-MVS: Textureless-Aware PatchMatch Multi-View Stereo.", arXiv:1903.10929, (2019)
- [4]. Jancosek, Michal, and Tomáš Pajdla, "Multi-view reconstruction preserving weakly-supported surfaces.", CVPR 2011. IEEE, pp. 3121-3128, (2011)
- [5]. 阿久津啓, et al. "多重撮影とヒストグラム均一化による低テクスチャ物体の SfM-MVS 再構成処理の頑健性と精度向上", 2019 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp. 89-90, (2019)
- [6]. COLMAP - Structure-from-Motion and Multi-View Stereo <https://github.com/colmap/colmap>