

Structure from Motion による効率的で高品質な as-is モデル生成のための最適撮影計画（第2報）

— 近似物体表面モデルの生成と品質予測指標の推定 —

北海道大学 ○森谷 亮太, 金井 理, 伊達 宏昭

要旨

インフラ建造物の点検成果の一形態として、変状等を含む現況をモデル化した as-is モデルの利活用が始まっている。しかし、Structure from Motion (SfM)による as-is モデルの生成過程では、どの位置から何枚画像を撮影すれば高品質な SfM モデルが再現されるか事前に推定する事が困難である。そこで本研究では、高品質な SfM モデルを生成する可能性を高める最適な撮影計画の導出手法の開発を目的とする。本報では、Bundle 調整から得られる3次元特徴点群とカメラ位置・姿勢のみから近似物体表面モデルを推定し、最終的に生成される SfM モデルの品質を事前予測する手法を開発したので報告する。

1. はじめに

近年、高度経済成長期に建設された橋梁などの大規模インフラ建造物の老朽化が急速に進行している[1]。インフラ建造物の安全の担保および維持管理のためには、現況と過去の点検履歴の把握が重要であるが、現在のような図面による点検履歴の記録では、変状箇所の把握を行いつらく、点検作業の効率を下げる一因となっている。その解決のため、近年国土交通省は、インフラ建造物の3次元 as-is(現況)モデルを点検成果記録方法の一形態として利活用し始めた[2]。これに対応し、橋梁やダムのようなコンクリート建造物の as-is モデル化では、カメラのみを用いてテクスチャリッチな3次元モデルを生成できる Structure from Motion (SfM)技術の活用が広がっている。

図1に示すように SfM は、重複を持つ大量の画像を入力とし、Bundle 調整と Dense Matching (DM)の二つの処理[3]により、形状表面上のひびや欠損をとらえたテクスチャを持つメッシュモデル(SfM モデル)の生成が可能な特長を持つ。しかし、画像の撮影枚数・箇所により、高密度な SfM モデルを生成する DM に膨大な処理時間を要したり、生成されたモデル上に品質低下部が含まれることがある。

そこで本研究では、SfM による高品質な as-is モデル生成を可能とする最適撮影計画導出手法の開発を目的とする。本報では、短時間で計算できる Bundle 調整から得られる3次元特徴点群とカメラ位置・姿勢のみから、近似物体表面モデルを生成し、最終的に生成される SfM モデルの形状品質を事前予測する手法の開発を行った。

2. 近似物体表面モデルの生成

本手法では SfM モデルの形状品質および最適撮影位置の推定のため、DM と比べ、比較的短時間で終了する Bundle 調整で出力される3次元特徴点群 P およびカメラ位置 C のみから、モデル化対象の近似物体表面モデルを生成する。図2のように、この手法では Labatut らの手法[4]を簡略化し、まず P に対して、Delaunay 四面体分割を行った四面体集合 H を生成する。その後、各特徴点 $p_i(\in P)$ と可視なカメラ $c_j(\in C)$ との視線ベクトル $(v_j^i = c_j - p_i)$ 集合 $V_i = \{v_j^i\}$ に対し、 H との交差判定を行い、交差した四面体を削除することによって、近似物体表面モデル M を生成する。

3. 3次元 SfM モデルの品質予測指標の推定

3.1. 品質予測指標

DM で生成される SfM モデルの品質を予測するため、Maruo らの手法[5]を拡張し、Bundle 調整後のカメラ位置・姿勢および3次元特徴点群から品質予測指標の推定を行う。

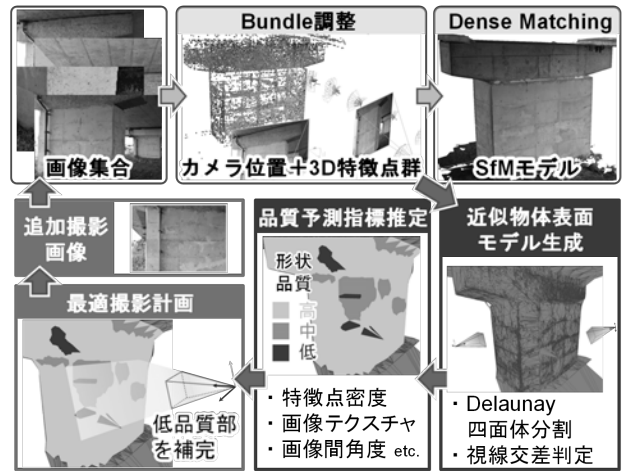


図1 SfM モデル生成プロセス

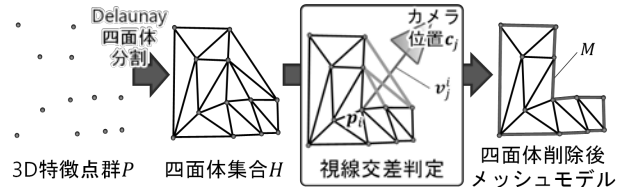


図2 近似物体表面モデル生成プロセス

まず、指標算出前に、 P の近傍点間の平均距離 \bar{R} が $\bar{R} = 1$ となるように、モデルスケールを正規化する。本報では、手法[5]に、以下の5), 6)を加えた次の6種類の指標により品質の推定を行った。

1) Density (F_D)

P 内の点の局所密度が低い部分では品質が低下するため、 p_i 周りの他の特徴点の局所密度 $F_D(i)$ を式(1)で評価する。

$$F_D(i) = |B_i|, B_i = \{p_j | d(p_i, p_j) \leq R, i \neq j\} \quad (1)$$

ただし、 R は近傍半径、 $d(p, q)$ は特徴点 p, q 間の距離である。

2) Uncertainty (F_U)

p_i を可視な2画像の視線ベクトル $v_j^i, v_k^i(\in V_i)$ 間角度が小さい場合に推定される深さ方向の精度が低下するため、 p_i に対する最大視線方向角 $F_U(i)$ を式(2)で評価する。

$$F_U(i) = \max_{v_j^i, v_k^i \in V_i} \angle(v_j^i, v_k^i) \quad (2)$$

3) 2D-Saliency (F_{2D})

p_i が画像上に投影された特徴点近傍のテクスチャが乏しい場合に品質が低下しやすいため、平均輝度勾配 $F_{2D}(i)$ を式(3)で評価する。

$$F_{2D}(i) = \frac{1}{N_{S_i}} \frac{1}{|S_i|} \sum_{j \in S_i} \|\nabla(j)\| \quad (3)$$

ただし、 S_i は \mathbf{p}_i の画像投影点を中心とする正方形画像パッチに含まれる画素集合、 N_{S_i} は \mathbf{p}_i が可視な画像パッチ枚数、 $\nabla(j)$ は画素 j 周りの画像の輝度勾配である。

4) 3D-Saliency (F_{3D})

異なる半径 r に対する \mathbf{p}_i の法線ベクトル $\mathbf{n}_r(\mathbf{p}_i)$ の差が大きい場合、対象物表面も複雑な形状となっている可能性が高いため、形状顕著性 $F_{3D}(i)$ を式(4)で評価する。

$$F_{3D}(i) = \|\mathbf{n}_{r_1}(\mathbf{p}_i) - \mathbf{n}_{r_2}(\mathbf{p}_i)\| \quad (4)$$

5) Frontality (F_f)

\mathbf{v}_j^i の $\mathbf{n}_r(\mathbf{p}_i)$ に対する入射角が大きい場合、形状再現性が低下すると推察されるため、平均入射角 $F_f(i)$ を式(5)で評価する。

$$F_f(i) = \frac{1}{|V_i|} \sum_{\mathbf{v}_j^i \in V_i} \angle(\mathbf{v}_j^i, \mathbf{n}_r(\mathbf{p}_i)) \quad (5)$$

6) Reliability (F_R)

\mathbf{p}_i を可視な画像数 $|V_i|$ が少ない場合、形状推定信頼性は低下するため、 $F_R(i)$ を式(6)より評価する。

$$F_R(i) = |V_i| \quad (6)$$

3.2. 形状品質集約エネルギー (E_{agg})

各指標 F_X を、下式(7)により正規化エネルギー $E_X \in [0,1]$ へと変換する。

$$E_X = L(F_X - \mu_X, \sigma_X) \quad (7a)$$

$$E_X = 1 - L(F_X - \mu_X, \sigma_X) \quad (7b)$$

ただし、 $X \in \{D, U, 3D, 2D, I, R\}$ 、 μ_X は平均、 σ_X は標準偏差、 $L(x - \mu, \sigma) = 1 / (1 + \exp(\frac{-2(x-\mu)}{\sigma}))$ である。また、式(4),(5)は式(7a)を、式(1),(2),(3),(6)は式(7b)を使用して、変換する。

最後に E_X の平均値をとり、形状品質集約エネルギー E_{agg} を品質予測指標として式(8)で評価する。 E_{agg} の値が大きい箇所ではSfMモデル形状の品質低下が予測され、その領域を補完撮影する追加画像が必要と判断できる。

$$E_{agg} = (E_D + E_U + E_{2D} + E_{3D} + E_I + E_R) / 6 \quad (8)$$

4. 有効性検証実験

図3に示す雁来大橋の橋脚(7.0 × 1.9 × 4.9 m)を対象として、商用ソフト ContextCapture[6]を使用し、33枚の初期画像からBundle調整を行った。これより生成した近似物体表面モデルを図4に示す。次に、近傍半径を $R = r_1 = 10\bar{R}$ 、 $r_2 = 20\bar{R}$ として、 E_{agg} を推定した結果を図5(a)に示す。四角枠内の予測品質が低くなっていることが確認でき、図5(b)に示すDMで生成されたSfMモデルについても対応する正面上部が復元されていないことが分かる。

次に図3に示すように、[7]の成果に基づき、 E_{agg} が高い低品質領域を正面から撮影した画像を1枚追加した。画像追加後の E_{agg} を図6(a)、生成したSfMモデルを図6(b)、さらに画像追加前後の形状断面を図7に示す。一枚の画像追加にも関わらず予測品質が向上し、断面形状の平面度も増加したことが確認できる。さらに実寸スケールになるように調整を加えDMを行った。生成したSfMモデルの平面部分形状に対して、最小二乗平面フィットを行い、点群までの平均距離誤差は0.014 mから0.005 mに減少した。画像追加前における各処理時間は、Bundle調整に71 s、近似物体表面モデル生成に3.6 s、品質予測に14.1 s、DMに22 minだった。DMと比較し、Bundle調整を含め約15倍高速に、SfMモデルの品質を予測することが可能であることを確認した。

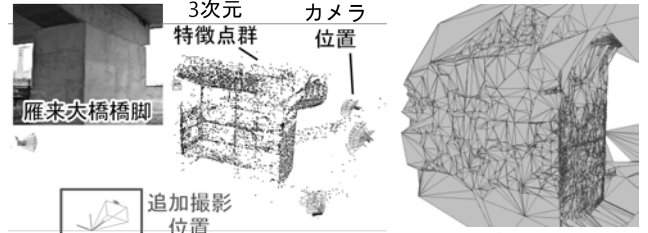
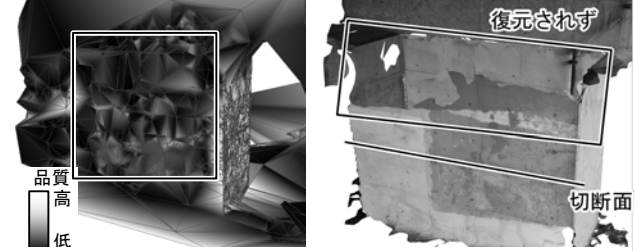


図3 カメラ位置・姿勢および3次元特徴点群

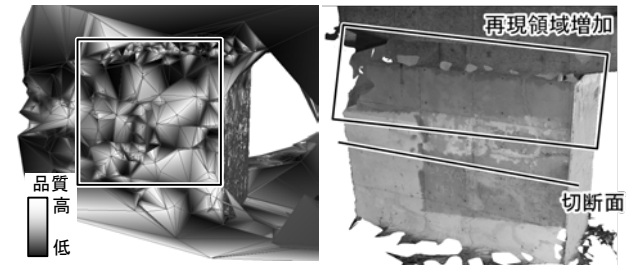
図4 生成した近似物体表面モデル



(a) 品質予測付き表面モデル

(b) SfM モデル

図5 画像追加前(33枚)の品質予測指標およびSfMモデル



(a) 品質予測付き表面モデル

(b) SfM モデル

図6 画像追加後(34枚)の品質予測指標およびSfMモデル

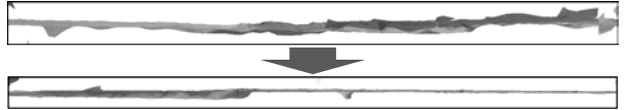


図7 形状断面図(上:画像追加前,下:画像追加後)

以上より、提案した品質指標から、最終的なSfMモデルの品質を予測し、最適撮影位置を導出可能であることが示唆された。

5. おわりに

本研究では、最適撮影位置の推定のために、Bundle調整後のカメラ位置・姿勢および3次元特徴点群のみから、近似物体表面モデルの推定と最終的に生成されるSfMモデルの品質を事前に推定する手法を提案した。提案手法により最終的なSfMモデルの品質を推定し、DM前に追加撮影位置の導出が可能であることが示唆された。今後は品質予測指標からの最適な画像撮影位置の自動推定手法を開発する。

参考文献

- [1] 「道路メンテナンス年報」(国土交通省 道路局), <http://www.mlit.go.jp/common/001199051.pdf>, 2017年8月
- [2] 「点検記録作成支援ロボットを用いた3次元成果品納品マニュアル(橋梁編)(案)」(国土交通省), <http://www.mlit.go.jp/common/001230335.pdf>, 2018年3月
- [3] 日本写真測量学会, “三次元画像計測の基礎:バンドル調整の理論と実践”, 東京電機大学出版局, 2016
- [4] P. Labatut et al., “Efficient Multi-View Reconstruction of Large-Scale Scenes using Interest Points, Delaunay Triangulation and Graph Cuts,” 2007 IEEE 11th International Conference on Computer Vision, pp. 1–8, 2007.
- [5] M. Mauro et al., “A unified framework for content-aware view selection and planning through view importance,” Bmvc, pp. 1–11, 2014.
- [6] ContextCapture, <https://www.bentley.com/ja/products/brands/contextcapture>
- [7] 森谷他, “Structure from Motionによる効率的で高品質なas-isモデル生成のための最適撮影計画—モデル品質低下要因の分析とその対処法の考察—”, 2018年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, pp.62–63, 2018.