

増分的撮影による効率的 SfM/MVS 再構成のための撮影支援システム — 追加撮影位置の最適決定手法 —

北海道大学 ○吉田 元輝, 金井 理, 伊達 宏昭

要 旨

Structure from Motion/Multi-View Stereo (SfM-MVS)は、画像集合から物体の3次元高密度モデルを再構成可能な技術だが、高品質・高能率に再構成を行える画像の撮影位置や撮影枚数の決定は現在撮影者任せとなっている。この問題解決のため、本研究では最終的なモデルの再構成品質を近似物体表面モデルで予測し、最適な追加撮影位置の推定が可能な撮影支援システムを提案する。検証実験から、既提案システムより高品質・高能率な高密度モデル再構成が可能であることを示した。

1. はじめに

Structure from Motion / Multi-View Stereo (SfM-MVS)は、多数の画像から表面形状を反映したテクスチャ付き高密度モデルを再構成可能な技術で^[1]、近年、インフラ建造物の現況形状記録用として普及が進んでいる。しかし SfM-MVS では、どの位置から画像を撮影すれば高品質なモデルの再構成が可能かを事前予測できず、撮影位置・姿勢(カメラポーズ)や撮影枚数が不適切であると、高密度モデル上に非再構成領域や精度劣化などの低品質部が容易に発生する。一方、この問題を避けるため過剰な画像撮影を行うと、MVS 処理に膨大な時間を要してしまうという問題をもつ。

そこで本研究では、対象を疎に撮影した初期画像集合から出発し、比較的短時間で処理可能な SfM から得られる3次元特徴点(タイポイント)集合とカメラポーズから、MVS による高密度モデルの再構成品質を予測し、低品質部と推定された領域を追加撮影する追加カメラポーズを導出する増分的撮影向けの SfM-MVS 撮影支援システムを提案する。

2. 提案する撮影支援システム

開発した増分的撮影支援システムの概要を図 1 に示す。以下で各処理の詳細を説明する。

2.1 平面スプラットによる近似モデル生成

初期画像集合に対する SfM 処理から得られたタイポイント集合 T から平面スプラット集合 S を生成し、 S を高密度モデル形状を予測した近似モデルとする。平面スプラットとは、あるタイポイント周辺の局所表面を近似する微小矩形である。スプラット生成手順を図 2 に示す。まず、タイポイント $i(i \in T)$ に対する k 最近傍点集合 $N(i, k)$ 内から、式(1)(2)を満たすスプラット生成用近傍点集合 $N'(i)$ を求める。

$$N'(i) = \{j \mid \text{dist}(i, j) < d_{\max}, C_v(i) \cap C_v(j) \neq \emptyset, i, j \in T\} \quad (1)$$

$$d_{\max} = 2 \text{med}_{i \in T} \left\{ \max_{j \in N(i, k)} \text{dist}(i, j) \right\} \quad (2)$$

ここで d_{\max} は、タイポイントの近傍範囲を定義する最大距離で、スプラットの最大辺長の決定に使われる。また式(1)は、タイポイント i の近傍点 j のうち、 i までの距離が d_{\max} 未満、かつ j を観測するカメラ集合 $C_v(j)$ と i のカメラ集合 $C_v(i)$ が同じカメラを含む場合、スプラット生成用近傍点集合 $N'(i)$ に j を含める。次に、 $N'(i)$ 内の点群の主成分分析を行い、固有値 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ ($\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3$) と単位固有ベクトル e_1, e_2, e_3

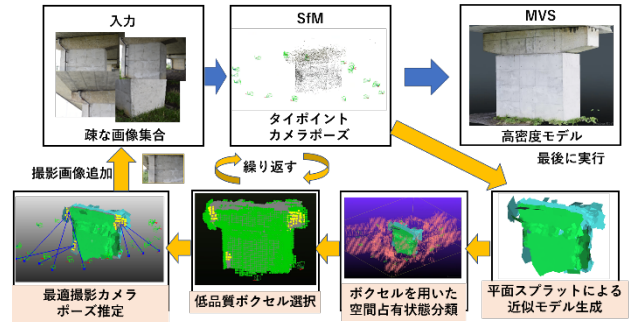


図 1 増分的撮影向け SfM-MVS 撮影支援システム

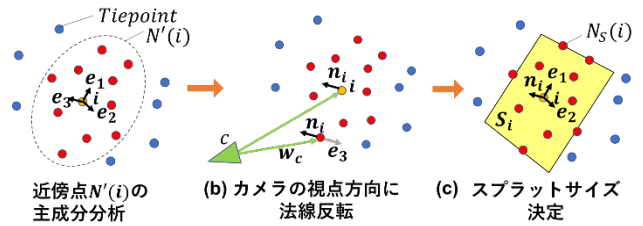


図 2 平面スプラット生成手順

を求める。そして図 2(b)のように、 e_3 の向きをカメラ c から i に向かう視線方向ベクトル w_c と反対向きにとり、これを i におけるスプラット法線ベクトル n_i とする。最後に図 2(c)のように、 i を通り n_i を法線とする平面に $N'(i)$ を投影した点集合 $N_S(i)$ を作り、 $N_S(i)$ を含み e_1 と e_2 方向に辺を持つ最小面積矩形をスプラット S_i として生成する。この平面スプラット集合 $S = \{S_i\}$ を、高密度モデルの近似モデルとする。

2.2 ボクセルを用いた空間占有状態分類と

低品質ボクセル選択

次に SfM 処理から出力されたカメラポーズと、平面スプラットによる近似モデルを含む Axis Aligned Bounding Box(AABB)内を一定サイズのボクセルで分割し、各ボクセルの空間占有状態を分類する。まず、スプラットを含むボクセルに Occupied (占有) ラベルを与え、それ以外のボクセルを Unknown (未知) に初期化する。次に、各カメラの投影中心から AABB 境界面上に位置するボクセルに向かうレイキャスティングを行い、カメラから Occupied ボクセルまでのレイ上のボクセルに Free (空間) ラベルを与える。ただし、カメラから最短距離の Occupied ボクセル内にあるスプラットが裏側の場合、カメラからスプラット間のラベルは Unknown のままとする。この判定により、図 3(a)のカメラポーズと平面スプラットに対し、図 3(b)のようなボク

セルの空間占有状態分類が得られる。ここで図3のように、画像不足で生ずる非再構成領域は、Free と Unknown ボクセルの隣接境界部に存在する可能性が高いため、Free に隣接する Unknown ボクセルを低品質ボクセルとして選択する。最後にユークリッドクラスタリングにより、低品質ボクセル群をボクセル間距離に応じてグループ化する。

2.3 追加撮影カメラポーズ推定

最後に、低品質ボクセル内に含まれる可能性のある対象物表面の再構成品質を改善する追加撮影カメラポーズの推定を行う。まず、追加撮影の候補カメラ位置を AABB 内の等間隔グリッド上に生成する。次に、候補カメラの視線ベクトルを法線に持ち、低品質ボクセルの各グループを囲む最小サイズの矩形窓を生成する。この窓を通じて可視となる Unknown ボクセル数が最大となるカメラポーズを最適追加カメラポーズ c_{opt} として選択する。さらに、 c_{opt} と既撮影カメラ画像がオーバーラップを持つよう、この二つのカメラの間に等間隔に接続用の追加カメラポーズを挿入する。

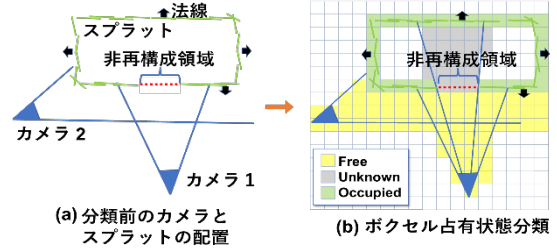


図3 ボクセルによる空間占有状態分類

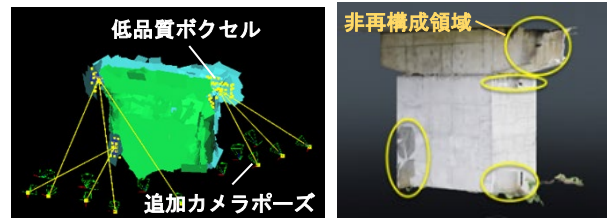


図4 近似モデル(左)と高密度モデル(右)の比較

3. 撮影支援システムの実行例

3.1 実験方法

雁来大橋コンクリート橋脚(1.8m×4.9m×7.0m)を対象に、本撮影支援システムにより追加撮影計画を導出し(提案手法)、森谷ら^[2]の四面体メッシュを近似モデルに用いた既存支援システムの撮影計画(従来手法)と比較を行った。橋脚周辺で過剰に撮影した110枚の画像データセット U を用い、 U 内からランダムに29枚選択した初期画像集合 I_0 を入力として最適追加カメラポーズ c_{opt} を導出し、 $(U - I_0)$ 内から c_{opt} と最も近いカメラポーズの画像 i_{opt} を選択し、 i_{opt} を I_0 に追加した画像集合 I_1 を作成した。以上の画像追加を I_1, I_2, \dots と増分的に繰り返し、各段階で得られる画像集合 I_i から MVS 処理で作成された高密度モデルの品質を評価した。

3.2 高密度モデルの再構成結果

初期画像集合 I_0 の29枚に対し、提案手法で導出された近似モデルと追加カメラポーズ、対応する MVS による高密度モデルを図4に示す。提案手法が、高密度モデル上の非再構成領域を正しく予測し、その領域を追加撮影する適切なカメラポーズを決定していることが判る。なお、近似モデル生成と追加カメラポーズ導出は、2.4s で完了した。

次に初期画像29枚から開始し、従来手法と提案手法により求めた追加撮影を行い、各段階の画像集合 I_i から MVS で高密度モデルを生成した比較結果を図5に示す。また、各モデルを、 U から再構成した基準モデルと比較した時の平均誤差と誤差標準偏差の推移を図6に示す。

図5より、既存手法では3回目の追加後画像46枚による高密度モデル上にもなお非再構成領域が見られるが、提案手法では、追加後画像47枚で非再構成領域が無くなったことが確認できる。また図6より、提案手法で生成したモデルは、既存手法に比べ、より少ない撮影画像枚数で、効率的に再構成誤差を改善できていることが確認できる。

4. まとめ

本研究では、増分的撮影による効率的 SfM/MVS 再構成

	I_1	I_2	I_3
従来手法	画像枚数 35	40	46
提案手法	35	40	47

図5 MVS による高密度モデルの比較

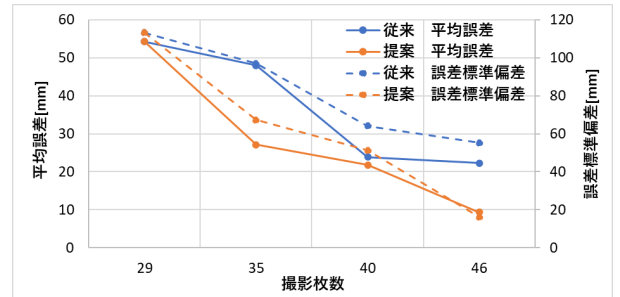


図6 画像追加に対する平均誤差と誤差標準偏差の推移

のための撮影支援システムを提案した。SfM から生成する近似モデルとして平面スプラット表現を導入し、対象物表面の近似精度を向上させた。また、ボクセル分割と空間占有状態分類を導入し、非再構成領域を低品質ボクセルで表現した。これらにより、よりの確な追加カメラポーズ推定が可能となり、従来手法より少ない画像枚数で、高品質な3次元モデル化が可能となることを確認した。

参考文献

- [1] Jiang, S., Jiang, C., Jiang, W.: Efficient structure from motion for large-scale UAV images: A review and a comparison of SfM tools. ISPRS J. Photogramm. Remote Sens, 167, 230–251 (2020).
- [2] Moritani, R., Kanai, S., Date, H., Niina, Y., Honma, R.: Plausible reconstruction of an approximated mesh model for next-best view planning of SfM-MVS. Int. Arch. Photogram. Remote Sens. Spatial Inf. Sci. XLIII-B2-2020, 465–471 (2020).