

(15) 3次元復元を目的とした UAV空撮における撮影軌道の評価

藤井 隆行¹・檀 寛成²・安室 喜弘³

¹非会員 非会員 関西大学大学院 理工学研究科 環境都市工学専攻 都市システム工学分野
E-mail:kandaimedia2014@gmail.com

²非会員 関西大学准教授 環境都市工学部 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町 3-3-35)

³正会員 関西大学教授 環境都市工学部 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町3-3-35)
E-mail:yasumuro@kansai-u.ac.jp

我が国ではインフラの効率的なメンテナンスのために、UAV (Unmanned Aerial Vehicle) の空撮と、写真測量の原理による SfM (Structure from Motion) 処理による被写体の 3 次元化が導入されている。SfM による事後処理のコストが高いため、手戻りの無いように空撮を実施することが重要であるが、立体的な構造物に対する効果的な空撮は、属人的技能に頼らざるを得ず、普及の妨げとなっている。本研究では、SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) を使った空撮視点推定に基づいて、撮影状況の可否を実時間でモニターすることを目的とする。具体的には、推定した空撮軌道の変動率を指標として、SfM への入力画像としての是非を示す指標を提案し有効性を報告する。

Key Words: UAV, visual SLAM, SfM, aerial trajectory

1. はじめに

我が国の社会資本ストックは高度経済成長期に集中的に整備され、今後急速に老朽化することが懸念されている。今後 20 年間で、建設後 50 年以上経過する施設の割合は加速的に高くなる見込みであり、一斉に老朽化するインフラを戦略的に維持管理・更新することが求められている¹⁾。このように、厳しい財政状況や技術者の不足といった制約のなかで、戦略的な維持管理・更新を行うためには予防保全を目的とした効率的な維持管理が必要であり、新技術を積極的に活用していかなければならない。実際に国土交通省では、建設工事における「調査、設計・計画、施工、維持管理」の一連の工程において ICT (Information and Communication Technology) や 3 次元データの活用等により、生産性の向上を目指した「i-Construction」という取り組みを推進している。特に、この取り組みの中で、UAV (Unmanned Aerial Vehicle) と SfM (Structure from Motion) を用いた 3 次元地形データを取得する技術は、建設業界の ICT 化、効率化を推進する上で重要な技術になると考えられる。

本研究では、用意された UAV の空撮飛行計画を実施する際に、SfM 処理に適した撮影が実現できていることを確認する方法を検討する。具体的には、橋脚等を対象

として、被写体を網羅的に撮影する最適飛行計画を立案しておき、撮影を実施する。この際に、連続的に撮影されている画像を利用して撮影視点の動きを 3 次元で推定し、SfM に適した撮影状況となっているかどうかを実時間で評価する仕組みを検討する。

2. 関連研究・技術

(1) 構造物維持管理における空撮 UAV の最適飛行計画

檀らは、構造物の維持管理での利用を想定し、空撮で対象構造物をカバーするための最適な UAV 飛行計画の立案手法を提案した²⁾。この手法は 2 段階からなる。第 1 段階では、対象構造物の各壁面を撮影するときの回数と角距離に下限を設けつつ、総撮影回数が最小となるような撮影ポイントを定める。第 2 段階では、第 1 段階で求めた撮影ポイントを巡回する最短ルートを探査する。UAV の最適飛行計画を立案する場合、対象構造物の形状や UAV が空撮を行うポイントなどは 3 次元空間内で考察する必要がある。既往研究では、3 次元空間で最適な飛行計画を立案する前段階として、2 次元空間内での最適な飛行計画立案する手法を提案する。これは、様々な方向を向いた高さ一定の垂直な壁に対して、網羅的な撮影

を実現する飛行計画を立案することに相当する。

(2) SLAM (Simultaneous Localization and Mapping)

周辺環境の情報をカメラや LiDAR などのセンサーから取得し、自己位置推定と環境地図作成を同時に行う SLAM 技術は、自律移動ロボットなどに利用されている技術であり、自律飛行 UAV にも導入されている。従来の UAV で自律飛行を行う場合は GPS に頼って移動する方法が主流であったが、屋内や構造物密集地、橋梁の下などの GPS が使えない環境では自律飛行を行うことが難しかった。しかし、SLAM を利用することで非 GPS 環境下での自立飛行が可能となった。

(3) LSD-SLAM (Large-Scale Direct Monocular SLAM)

SLAM のうち、カメラ画像のみから環境の 3 次元情報とカメラの自己位置と姿勢を同時に推定する技術は Visual SLAM と呼ばれる。Visual SLAM の中でも特徴点を用いず、画像の輝度を直接扱う LSD-SLAM は、画像のすべての情報を活用することができる SLAM である。さらに、LSD-SLAM で取得した 3 次元点群情報が密であるため、特徴点を用いた Visual SLAM と比べて図-1 のように視覚的に 3 次元再構成結果が確認しやすくなっている³⁾。

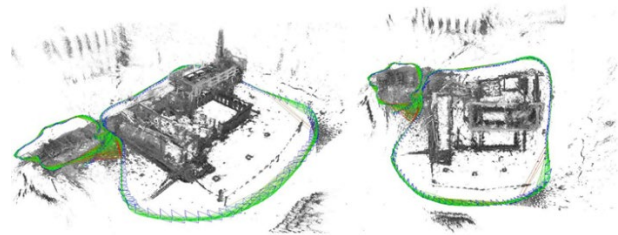


図-1 LSD-SLAM が作成したグローバルマップ³⁾

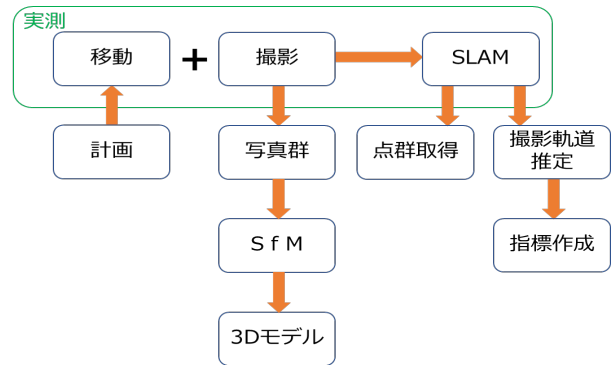


図-2 提案手法の構成

3. 提案手法

本研究では数理計画法で最適化した UAV 空撮の飛行軌道を用意し、Visual SLAM より撮影軌道を可視化しながら空撮を行うことで SfM に有効な撮影が実施できているかどうかをモニターする。そのために、SfM に適した UAV 空撮の成否を撮影時に判断する指標を提案する。指標は UAV 空撮時に Visual SLAM より抽出した推定空撮軌道を基に作成しておく。提案手法の構成を図-2 に示す。

既往の研究²⁾により計画された撮影ポイントと巡回経路を事前の飛行計画として利用する。空撮を実施する際には、カメラで動画もしくは静止画を連続的に撮影しながら UAV が飛行しているものとし、そのライブ映像を用いて、単眼カメラに対する Visual SLAM を実施する。Visual SLAM により、飛行中も逐次的に、被写体の点群を取得しながら、撮影視点と視線方向も推定されるので、SLAM 処理を空撮と並行して実施することにより、空撮状況をモニターすることを考え、撮影ポイント及び巡回経路の検証を行う。加えて、SLAM が 1/30 秒毎に空撮軌道推定を行っていることから撮影軌道の速さを求め、図-3 のような確率分布を作成する。確率分布の値及び撮影映像を基にした被写体の SfM による 3 次元復元結果から、実施した撮影が SfM による 3 次元復元に適しているか判断する指標を作成し、撮影軌道の評価を行う。

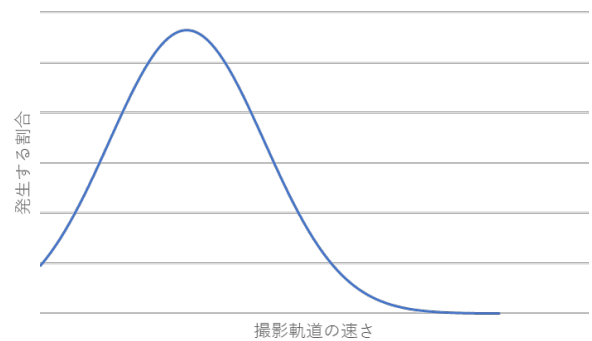


図-3 確率分布の予想図

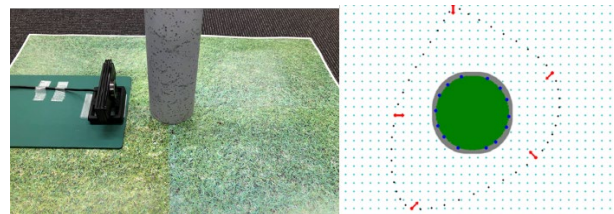


図-4 実験の様子 (左) と飛行計画 (右)

4. 予備実験

(1) 予備実験の概要

UAV 空撮を実施する前段階として、指標を策定するための予備実験を行う。本稿では、橋脚に見立てた小さなスケールの円筒の模型(図-4 参照)を撮影対象として撮影計画を立て、計画に沿って小型の Web カメラによる単眼撮影を手動で行う。その際に一定の速さでカメラを移動させる場合と不規則な速さで移動させる場

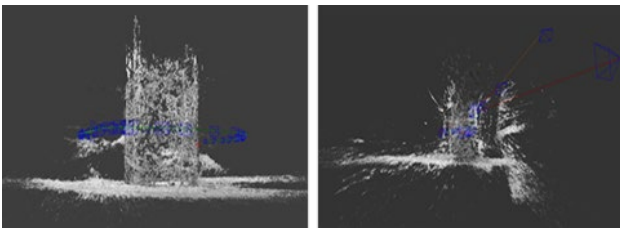


図-5 SLAM点群結果比較(左：低速移動時，右：高速移動時)

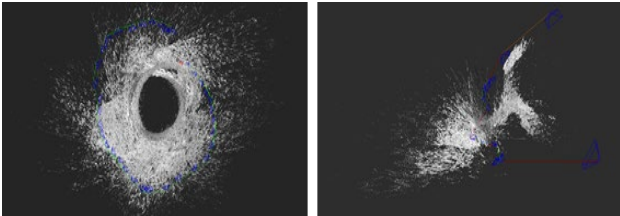


図-6 上部から見たSLAM点群結果比較
(左：低速移動時，高速移動時)



図-7 推定された撮影軌道(左：低速移動時，右：高速移動時)

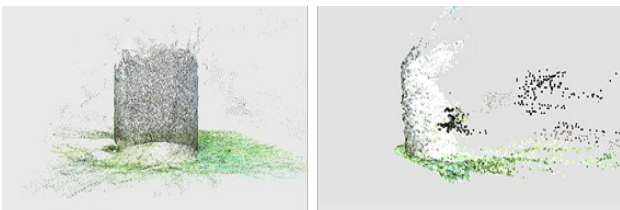


図-8 SfMによる3次元復元結果比較
(左：低速移動時，右：高速移動時)

合の2通りで撮影を行う。同時にLSD-SLAMを実行し、得られた3次元点群情報から撮影されている被写体の状況をリアルタイムで確認する。最後に撮影した映像から取得した映像を用いてSfMで3次元復元を行い、カメラの移動速度との関連性を確認する。尚、橋脚の周辺環境を考慮し、円筒周辺の地面を芝生のテクスチャを印刷したもので覆った(図-4(左))。

(2) 予備実験環境

予備実験にはノートPC(OS:Ubuntu 16.04 LTS, CPU: Intel(R) Core(TM) i7-8750H, GPU: NVIDIA GeForce 1060 6GB, メモリ: 16 GB)にLSD-SLAM[®]を実装し、USBカメラ(BUFFARO製, BSW200MBK, 200万画素, 水平画角120°)を繋いで手でカメラを動かして、空撮に見立てる。被写体にはコンクリート状のテクスチャ画像を印刷して橋

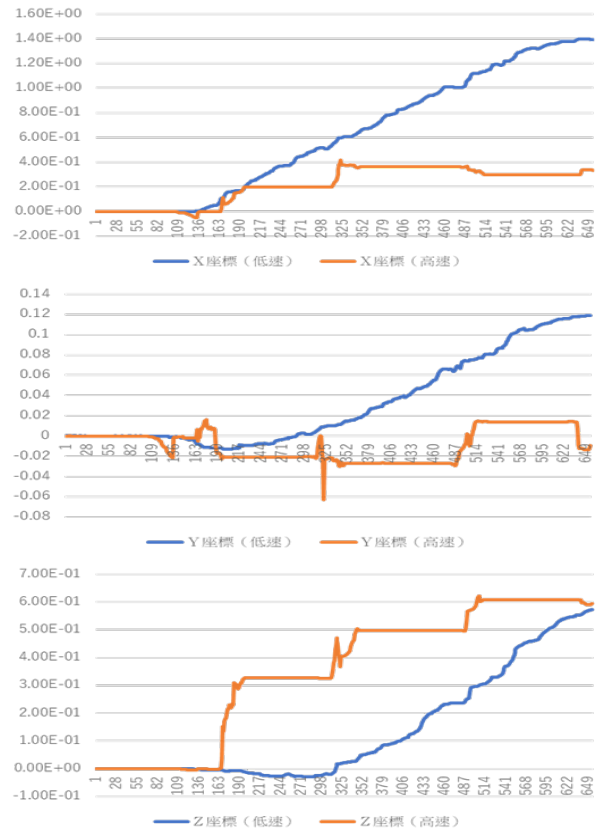


図-9 推定された撮影軌道の変位グラフ

梁の橋脚に見立てた円筒(直径約7cm, 高さ約21cm)を使用した(図4(左))。

5. 予備実験の結果

図-5, 図-6, 図-7は撮影中にLSD-SLAMが出力する被写体の3次元点群と推定撮影軌道を示している。一定の速度で撮影した場合(図-5(左), 図-6(左))はLSD-SLAMから得られた3次元点群が被写体の概形を成しているが、不規則な速さで撮影した場合(図-5(右), 図-6(右))は3次元点群が概形を成していないことがわかる。これは、撮影軌道の推定に失敗していることに起因することが図-7からもわかる。

撮影された一連の映像を用いてSfMによる3次元復元を行った結果として得られたモデルを図-8に示す。一定の速度で撮影を行ったモデル(図-8(左))では被写体の3次元形状が復元されているが、不規則な速さで撮影を行ったモデル(図-8(右))では一部しか復元されていない。これは、特徴点の抽出と画像間の対応付けがうまく行われなかったために、SfMに採用される入力画像の採用枚数が減ってしまったことが原因と考えられる。図-9に示した撮影中に推定されたカメラ軌道の変位からも、急峻な動きが含まれる不規則なカメラ移動とLSD-SLAMの正否に強い相関があると考えられる。

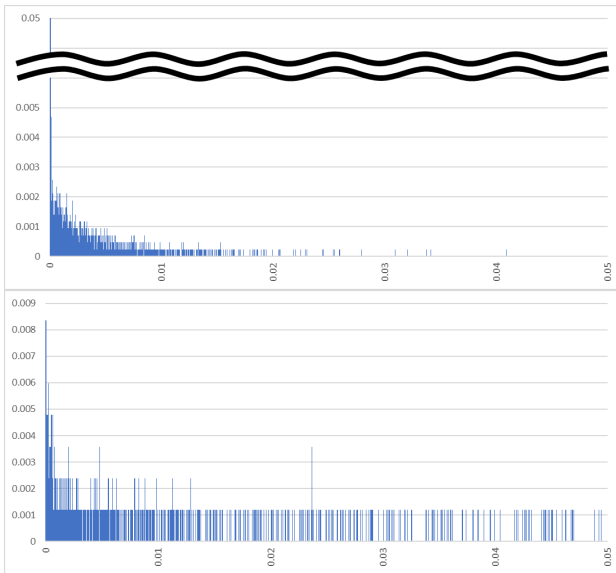


図-10 撮影軌道から求めた速さのヒストグラム
(上：低速移動時，下：高速移動時)

そこで、推定された撮影軌道から撮像フレーム間のカメラの移動の速さを求め、その分布を示すヒストグラムを作成した(図-10)。このヒストグラムによると、一定の速さで移動している場合は速さの値が0に近い数値の度数が多くなり、速さが大きくなるにつれて度数が少なくなっていることから安定した動きを示していることがわかる。不規則な速さで移動した場合のグラフを見ると0に近い数値の度数は多いが、速さの値が大きくなっても度数が減少していないことが分かる。

6. 検証実験と考察

今回実施した予備実験の結果から SfM による 3 次元復元成功時(低速移動時)の推定撮影軌道を基に撮影軌道を評価する指標を作成した。

図-11 は 3 次元復元成功時の撮影軌道から求めた速さの分布である。この分布から 3 次元復元成功時の撮影軌道から求めた速さの値が、99.999%の割合で 0~0.02 の範囲に含まれることが分かった。よって、撮影軌道から求めた速さの値が 0.02 以下であれば、撮影した映像から SfM によって復元される被写体の 3 次元形状が安定すると言える。高速移動時の速さは度々 0.02 以上の値が発生しているため分布の範囲が非常に大きくなっている。よって、SfM による 3 次元復元成功時の分布の範囲ならば SLAM が正常に動作すると判断した。実際に 0.02 以上の速さが発生した区間を SfM によって 3 次元復元した結果が図-12(右)である。特徴点の対応付けに失敗し、3 次元復元を行うことができなかった。これらのことから今

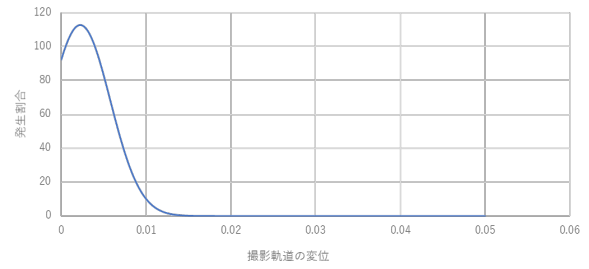


図-11 低速移動時の撮影軌道から求めた速さの分布

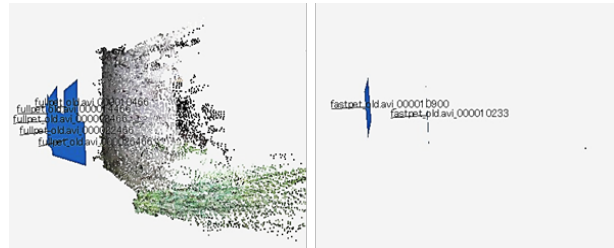


図-12 撮影映像の同じ区間を使った 3 次元復元結果
(左：低速移動時，右：高速移動時)

回作成した分布から得た値は SfM による 3 次元復元に適した UAV 空撮の成否の判断を行う指標となり得ると考えられる。

6. おわりに

本研究では SLAM から得られた 3 次元点群情報と撮影軌道から、SfM を目的とした UAV 空撮における撮影軌道を評価する基準を作成し、その基準が撮影軌道を評価するための指標となることを示した。

今後は、SfM による 3 次元復元が失敗した際のデータを基にした指標の許容範囲の精査及び実際の構造物に対する指標を用いた撮影軌道の評価を行う予定である。

参考文献

- 1) 国土交通省：インフラメンテナンス情報，
<<http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/maintenance/02research/0201.html>>，(入手 2019.6.2).
- 2) 檀寛成，稲津直毅，尾崎平，窪田諭，安室喜弘：構造物維持管理における空撮用 UAV の最適飛行計画，土木情報学シンポジウム講演集 Vol.43，pp.233-236，2018.
- 3) Engel, J. and Schöps, T. and Cremers, D. : LSD-SLAM : Large-Scale Direct Monocular SLAM, *European Conference on Computer Vision*, pp. 834-849, 2014.