

(53) 3次元再構成を目的とした UAV空撮における品質評価のための指標策定

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:k125432@kansai-u.ac.jp (〒564-8680 大阪府吹田市山手町3-3-35)

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

我が国では既設インフラの効率的な維持管理のために、UAV (Unmanned Aerial Vehicle) の空撮と、写真測量に基づく SfM (Structure from Motion) による3次元化処理が活用されている。SfMは計算コストが高く、処理が完了するまで3次元化の成否が分からないため、手戻りの無い撮影が重要であるが、立体構造物に対する効果的な UAV 空撮は、属人的技能に頼らざるを得ない。本研究では、SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) による撮像視点推定を利用して、SfM のための空撮としての適否を実時間でモニターする技術を提案する。SfM の品質との因果に基づき、SLAM で推定した空撮軌道の変動率に対する SfM 成否の指標を導出し、その有効性を報告する。

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

1. はじめに

高度経済成長期に集中的に整備された我が国の社会資本ストックは、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の戦略的な維持管理・更新が求められている¹⁾。厳しい財政状況や技術者の不足といった制約のなかでは、予防保全を目的とした効率的な維持管理が必要であり、新技術の積極的な活用も求められる。国土交通省は、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」を推進している。この取り組みの中でも、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、効率化において重要視されている²⁾。

2. 関連研究・技術

(1) 建設分野での3次元データ活用

建設業界の ICT 化を推進するためには3次元データの

活用が必要とされており、3次元レーザースキャナや UAV による建設現場の3次元化が進んでいる。3次元レーザースキャナを利用する測量では、広域な範囲の3次元データを均一な成果で取得するため、効率的な3次元データ作成が可能となる。より大規模な建設現場では足場を選ばない UAV と SfM による測量が導入されている。施工前の土工量把握や施工段階での進捗管理を行うには、UAV による広範囲の空撮と SfM による3次元復元によって作成される3次元データを活用する方法は、他の方法よりも短時間で土工量を算出することができる³⁾。また、UAV によって作成した3次元データを出来形検査に用いれば、設計データとの比較による定量的な確認が可能となる⁴⁾。ほか、建機を自動操縦して施工する際の計画にも利用できる⁵⁾。UAV を用いた3次元データ作成技術は建設現場の現状において有効であるだけでなく、情報化施工を推進し、生産性の向上を図る上で重要な技術といえる。

(2) 構造物維持管理における空撮用 UAV の最適飛行計画

建設現場では上空から見下ろして地形を測量するような撮影を行う場合が多く、ラップ率を確保した飛行計画を立案しやすい。しかし、維持管理の対象としては立体構造物を撮影しなければならず、立体的な飛行計画が求められる。立体構造物に対する飛行計画立案手法として、

Smith らはラップ率を考慮して作成された広域の飛行計画を基に、市街地における建造物などの高低差や壁面の3次元データ化を向上させる飛行計画を提案した⁷⁾。また、檀らは、対象建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、撮影ポイントを巡回する最短経路となる飛行計画を提案した⁸⁾。これらは3次元データ化のための飛行計画を立案するものだが、計画実施時に3次元データ化に適した空撮となっていることを、現場で即時的に確認する方法は報告されていない。

(3) SLAM を利用した UAV の自律飛行

UAV の自動航行を行う場合は GPS による方法が主流であり、屋内や建造物密集地、橋梁の下などの GPS が使えない環境では自動航行を行うことが難しい。しかし、SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) 技術を利用することで非 GPS 環境下での自動航行が可能となり、障害物を避けるような自律飛行機能を持つようになった⁹⁾。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る。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 はカメラから取得した画像の変位から撮影位置を推定する技術であるため、対象画像をすべて最適化して視点推定を行う SfM と強い関連性があると考えられる。

3. 提案手法

(1) 概要

SfM は、多視点画像を用いた3次元形状復元やカメラの位置・姿勢の推定問題であり、カメラの視点を変えながら撮影した複数枚の画像から、被撮像シーンの3次元形状とカメラの位置を同時に復元する¹⁰⁾。SfM による3次元再構成には、大量の画像を使うほど、全画像における対応点に対するバンドル調整の処理に大規模な最適化処理が伴うため、時間が必要なうえ、処理が終わるまで3次元再構成の成否がわからない。そのため、3次元再構成に適した画像が得られているかどうかは、空撮実施時には判断することができず、画像を持ち帰って3次元再構成処理をしてみたら、再撮影が必要だと判ると、大きな手戻りが発生してしまう。

本研究では、UAV 空撮の際に、カメラが取得する映像フレームの画像情報に基づいてカメラの挙動を追跡し、空撮で得られた写真画像から SfM を実施した3次元復元結果の品質との因果関係を精査する。図-1 に示すよう

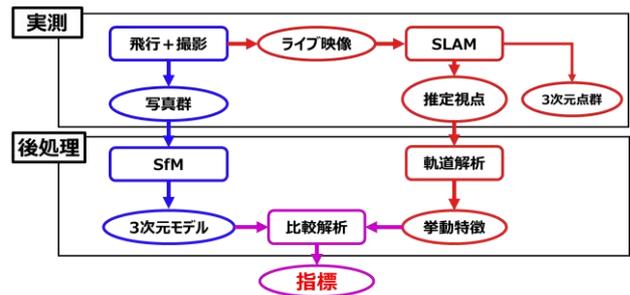


図-1 提案手法の構成

に、UAV 空撮時にカメラからのライブ映像を用いて Visual SLAM を実行することで、逐次的に、被写体の3次元点群を取得しながら、撮影視点と視線方向を推定し、飛行中のカメラ挙動をモニターする。空撮後に、Visual SLAM から取得した撮影視点から、カメラの挙動特徴を抽出し、SfM により作成した3次元モデルとの比較解析をすることで、カメラ挙動において、SfM による3次元再構成結果を反映した指標を策定する。

(2) Visual SLAM による撮影状況の可視化

Visual SLAM は、連続して撮影される画像内の被写体の変位より、撮像間隔におけるカメラの動きの推定と、複数視点での画像測量による被写体の奥行推定を繰り返すことで、周囲環境の3次元点群及びカメラの連続軌道を推定する。ORB-SLAM¹¹⁾のように、画像から自然特徴のキーポイントを抽出してトラッキングを行う Visual SLAM では、キーポイントによる頑健なマッチングによるトラッキングが可能であるが、被写体からの抽出されるキーポイントが少なすぎると、トラッキングに失敗してしまう。加えて、取得できる3次元点群もキーポイントに依存するため、疎な環境マップとなる。図-2 に示す ORB-SLAM の実施例のように、生成された3次元点群が疎らで、被写体となっている建造物の概形が分かり難い。LSD-SLAM (Large-Scale Direct Monocular SLAM) は特徴点を用いず、画像の輝度勾配に基づいて画像間の対応付けを行うため、比較的多くの画素を活用できる。よって、図-3 に示すように、密な3次元点群として環境のグローバルマップを作成できる¹²⁾。空撮実施時にカメラ挙動のモニターを行うことに加え、コンクリート建造物などに対しても密度の高い3次元点群を生成可能であることから、本研究では、LSD-SLAM を採用する。

4. 指標策定のための実験

(1) 概要

3次元再構成を目的とした空撮の成否を判断する指標を定めるために、SfM による3次元再構成の品質と Visual

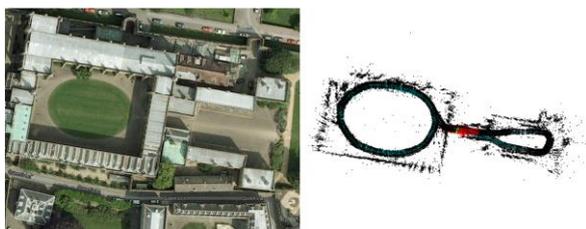


図-2 ORB-SLAMが作成したグローバルマップ¹¹⁾

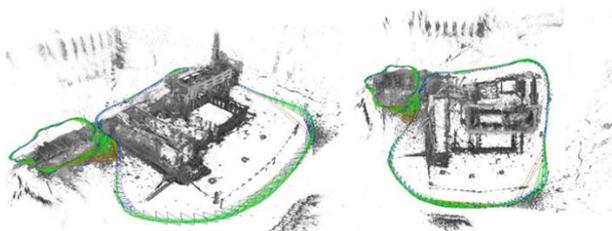


図-3 LSD-SLAMが作成したグローバルマップ¹²⁾



図-4 実験の様子 (左：撮影者，右：被写体の柱)

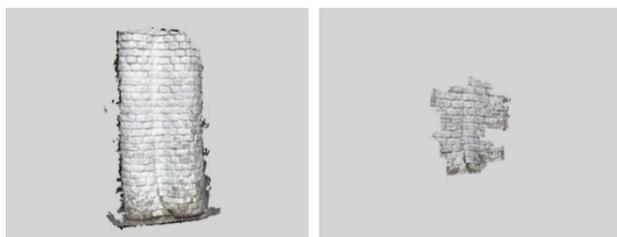


図-5 3次元再構成の結果 (左：成功，右：失敗)

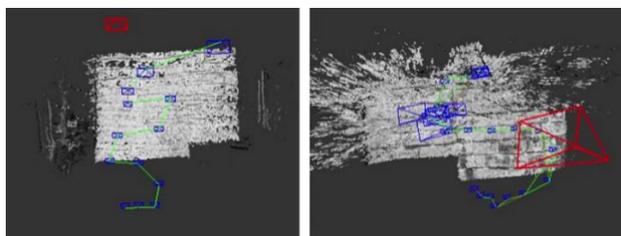


図-6 推定されたカメラ軌道と被写体の3次元点群
(左：成功，右：失敗)

SLAM で得られる空撮状況の情報の比較を行う。空撮時に、取得される写真撮影の頻度に比べて Visual SLAM で利用する画像情報ビデオのフレームレートは 10 倍以上速い。したがって、Visual SLAM においてトラッキング

が失敗するような挙動で撮影された写真は、後の SfM でも適していないことが容易に予測されるが、Visual SLAM がトラッキングに成功している間に撮影された写真において SfM で成否が分かれる状況があれば、Visual SLAM から得たカメラの挙動の特徴の中で、逐次的に UAV 空撮が SfM による 3 次元再構成に適しているかどうかを判断する指標を策定できるものと考えられる。

(2) 実験方法

ここでは、写真撮影と SfM 処理および撮影映像を用いて Visual SLAM を実施する試行を繰り返す。被写体には図-4 (右) に示すような特徴のある柱を対象とし、操縦技能や風等の影響を避けて速さを意図的に変化させるため UAV を手動で動かしながら撮影を行う。図-4 (左) に示すように片手で UAV を動かし、被写体が常に画角に収まるように撮影映像を確認しながら撮影を実施した。撮影後、撮影映像を用いて LSD-SLAM を実行し、推定されたカメラ挙動を確認する。最後に撮影映像から取得した画像を用いて SfM による 3 次元再構成を行い、SLAM によって推定されたカメラ軌道との関連性を確認する。

(3) 実験環境

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-SLAM¹²⁾ を実装し、撮影は UAV (DJI 社 : Mavic 2 Pro, FOV : 77°) を手動で動かし、空撮に見立てて実施した。

(4) 実験結果

撮影した映像から 2 秒ごとに切り出した画像を、3 次元再構成用として SfM に用い、3 次元再構成に成功した撮影と失敗した撮影に分類した。図-5 に 3 次元再構成の成否の一例を示す。図-5 (左) では、被写体の 3 次元形状が再構成されているが、図-5 (右) では、一部しか 3 次元形状が再構成されていないことが分かる。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 の処理においてバンドル調整に採用される画像が減ってしまったことが原因と考えられる。

SfM による 3 次元再構成の成否によって分類した撮影映像を用いて、SLAM により推定したカメラ軌道と被写体の 3 次元点群の例を、それぞれ図-6 に示す。3 次元形状を再構成することができた撮影映像から推定されたカメラ軌道 (図-6(左)) は実際のカメラ軌道に近いが、3 次元形状を再構成することができなかった撮影映像から推定されたカメラ軌道 (図-6(右)) は実際のカメラ軌道から大きく乖離している。今回の実験から、SLAM が画像の変位を基に推定したカメラ軌道と SfM の成否には強い相関があるといえる。

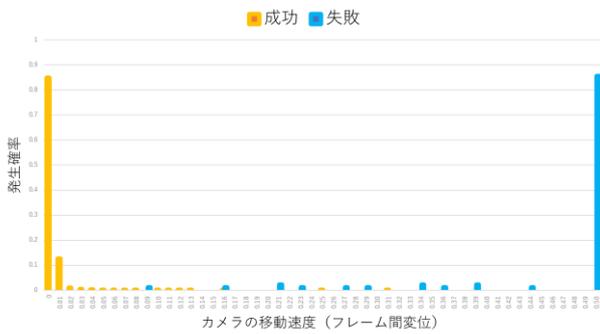


図-7 カメラ軌道から求めた速さのヒストグラム

5. 指標の策定

ここでは今回実施した実験の結果の検証を行い、SfMによる3次元再構成が成功した時の推定カメラ軌道を基にカメラ軌道を評価する指標を定める。今回の実験で実施した撮影を基に推定されたカメラ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。作成したヒストグラムを図-7に示す。このヒストグラムから、3次元再構成に成功している場合はすべての速さの値が0.5以下の値に収まっており、0に近い数値の度数が大きく、速さの値が増加するにつれて度数が減少し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。3次元再構成に失敗した場合のヒストグラムを見ると0.5以上の値の度数が全体の8割以上と高くなっている。このヒストグラムから、3次元再構成に失敗した時のカメラ軌道から求めた速さの値が0~0.08の範囲に含まれておらず、3次元再構成に成功した時のカメラ軌道から求めた速さの値が、99%以上の割合で0~0.08の範囲に含まれていることが分かった。よって、カメラ軌道から求めた速さの値が0.08以下であれば、撮影した映像からSfMによって再構成される被写体の3次元形状が安定すると言える。

6. おわりに

本研究では、Visual SLAMで得られる撮像視点の軌道から、SfMを目的としたUAV空撮としてのカメラ軌道を評価する指標を策定する方法を提案した。Visual SLAMは空撮の写真撮影レートに比べて速いサンプリングレートで画像間のトラッキングを実施して、カメラ軌道を推定しているため、画像間の相関を利用して3次元再構成を行うSfMの成否のモニターに利用できる可能性が高いことを示した。

今後はSfMによる3次元再構成が失敗した際のデータを増やして、そのヒストグラムについて指標の許容範囲を精査し、撮影中に指標を提示して、UAVの操縦者に

警告を発する仕組みの検討、飛行中のUAVに対する指標の適用を実施する予定である。

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) Youngjib H. and Kevin K. H. and Jacob J. L. and Mani G. F. Visual monitoring of civil infrastructure systems via camera-equipped Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): a review of related works, *Visualization in Engineering*, Vol. 4, No. 1, 2016.
- 3) 神崎恵三：建設生産システムへの3次元モデルの活用計画・施工・維持管理への活用事例，土木学会論文集 Vol.73, No.4, pp. I_55-I_63, 2017.
- 4) 早川健太郎，黒台昌弘，笠博義：建設分野におけるUAVの活用事例とUAV画像による3次元モデリング，日本リモートセンシング学会誌，Vol.38, No.3, pp.213-218, 2018.
- 5) 四家千佳史，小野寺昭則，高橋正光：建機メーカーが描くICT建機施工を中心とした建設現場の未来（「スマートコンストラクション」の導入），日本建設機械施工協会誌 Vol.61, No. 168, pp.16-20, 2015.
- 6) 国土交通省国土地理院：UAVを用いた公共測量マニュアル(案)，2017.
- 7) Smith N., Moehrl N., Goesele, M., Heidrich W., Aerial path planning for urban scene reconstruction: A continuous optimization method and benchmark, *ACM Transactions on Graphics*. vol. 37, No. 6, pp.1-15, 2018.
- 8) 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.
- 9) Alfredo T. P., José M. E. B. C., Modesto R. B., Edgar T. P. and Jessica L. M. G. (2018). New Applications of 3D SLAM on Risk Management Using Unmanned Aerial Vehicles in the Construction Industry, *IntechOpen*, <<https://www.intechopen.com/books/drones-applications/new-applications-of-3d-slam-on-risk-management-using-unmanned-aerial-vehicles-in-the-construction-in>>, (入手2019.8.16)
- 10) R. Hartley R, A. Zisserman : Multiple View Geometry in Computer Vision, Cambridge University Press, 2004.
- 11) Ra'ul Mur-Artal and Juan D. Tardós. . ORB-SLAM: Tracking and Mapping Recognizable Features, *Workshop on Multi View Geometry in Robotics (MVGRO)-RSS 2014*, 2014.
- 12) Engel, J. and Schöps, T. and Cremers, D. : LSD-SLAM : Large-Scale Direct Monocular SLAM, *European Conference on Computer Vision*, pp. 834-849, 2014.