

(75) フォトグラメトリのための UAV 空撮モニタリングシステム

安室 喜弘¹・藤井 隆行²・谷口 阜貴²・檀 寛成³・窪田 諭¹

¹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.

²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
(〒564-8680 大阪府吹田市山手町3-3-35)

³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)

図面等が残存しない既設インフラに対する維持管理において、写真測量に基づく SfM (Structure from Motion) による 3 次元データ化を導入するケースが増えている。足場を選ばない UAV (Unmanned Aerial Vehicle) による空撮は効率的であるが、立体構造物の測量撮影には属人的技能が要求されるだけでなく、SfM に多大な計算時間を要する上に、事前には 3 次元データ化の成否が分からない。本研究では SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) により、UAV の撮影視点をモニターし、3 次元データ化に対する適否を実時間で判断するシステムを提案する。被写体に対する相対移動速度と SfM の成否との因果に基づいた指標を導出し、実験によりその有効性を確認した。

Key Words: UAV, Photogrammetry, SfM, Visual SLAM

1. はじめに

高度経済成長期に整備された社会資本ストックにおいて、建設後 50 年以上経過する割合が今後さらに高くなる見込みから、一斉に老朽化するインフラの戦略的な維持管理ニーズは高まる一方である¹⁾。厳しい財政状況や技術者の不足といった我が国の制約の中では、予防保全を目的とした維持管理の効率化も必要である。国土交通省が推進する i-Construction 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ている。この取り組みの中でも、足場を選ばずに目視の代わりとなるような空撮が可能な UAV (Unmanned Aerial Vehicle) と、SfM (Structure from Motion) を用いた 3 次元データを取得する技術は、特にデジタルデータの乏しい既設構造物の ICT 化、管理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

施工前の土工量把握や施工段階では、UAV による広

範囲の空撮と SfM による 3 次元復元データを活用することにより、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 空撮で作成した 3 次元データを出来形検査に用いれば、設計データとの定量的な比較が可能となる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 による 3 次元データ作成は建設現場の現状把握だけでなく、生産性の向上を図る上で情報化施工を推進する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

従来の空撮は上空から地表を撮影する場合が多く、カメラの画角と飛行高度から撮影画像間のラップ率を算出して、地図上で飛行軌道を立案できる。しかし、立体的な構造物の撮影には立体的な飛行軌道計画が求められる。Smith らは地表でのラップ率を考慮した飛行計画を基に、建物の高低差や壁面の 3 次元データ化を向上させる市街地での飛行計画を提案した⁷⁾。檀らは、対象構造物の各壁面を撮影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撮影ポイントを巡回する最短経路として飛行計画を立案した⁸⁾。これらは、3 次元データ化のための飛行軌道を立案する方法であるが、空撮そのものの適否を、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の自動航行にはGNSSを使う方法が主流であるが、屋内や構造物密集地などのGNSS衛星の信号が届かない場所では適用が難しい。一方、カメラやLiDARなどのセンサーから周辺環境の情報を取得し、自己位置推定と環境地図作成を同時に行うSLAM (Simultaneous Localization and Mapping) 技術は、代替手段となり得る⁹⁾。SLAMの中でも、単眼カメラのみを使用するVisual SLAMは、連続的に撮影した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、被写体との相対距離を繰り返す推定することで、周囲環境の3次元点群及びカメラの連続軌道を獲得する。

3. 提案手法

SfMは、多視点画像から被写体の3次元形状と撮影視点・姿勢を推定する問題である¹⁰⁾。計算機資源の発達により、SfMで大量の画像を使えるようになったが、全画像に対して行うバンドル調整に大規模な最適化が伴うため、場合によっては日にち単位の処理時間が必要なうえ、処理が終わるまで3次元データ化の成否が分からない。空撮現場では、3次元化に有効な画像が網羅的に撮影出来たかどうか判断できないことから、3次元化処理後に再撮影が必要になると、大きな手戻りとなる。

そこで、本研究では、Visual SLAMを利用して空撮時のUAV撮影がSfMの処理に適しているかどうかを判断し、操縦者に知らせるシステムを提案する。空撮時の写真撮影頻度が毎秒1~2回程度であるのに比べて、Visual SLAMは毎秒10フレーム以上の画像を連続的に追跡処理を行う、したがって、Visual SLAMがする場合は、さらに間欠的に撮影された画像を使用するSfMにも適さないことが容易に判断できる。

提案するシステムの利用イメージを図-1に示す。通常、UAVは、撮影画像を機体内蔵の記録媒体に保存するほか、カメラ映像を操縦コントローラにも伝送する。操縦者は、機体を目視確認しながら、手でカメラ映像を確認して操縦とカメラの操作を行う。本研究では、

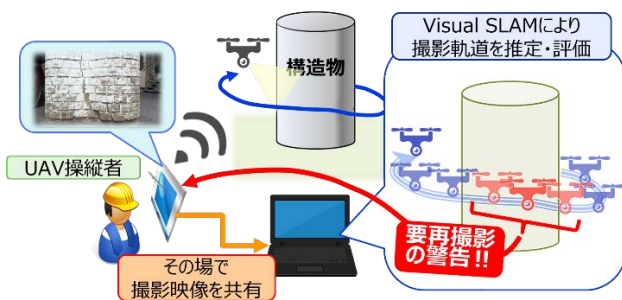


図-1 UAV空撮のSfMへの適否を監視するシステムの概要

このカメラ映像を、提案システムにも分配して利用する。UAVのカメラ映像に対してVisual SLAMを実施し、被写体との相対的なカメラの視点移動を推定し、カメラの動きがSfMに適しているか否かを実時間で知らせる。

空撮状況の適否の判断には、UAVの軌道とSfMの成否との因果関係から策定した独自の指標を用いる。指標は、空撮で得られた写真画像からSfMを実施した3次元再構成結果の品質との因果関係を基に策定しておく。UAV空撮時にカメラからのライブ映像を用いてVisual SLAMを実行し、空撮後にVisual SLAMで取得した撮影軌道の特徴を抽出し、軌道の各区分ごとに撮影された画像を分類し、SfMを実施する。得られる3次元モデルとその区分での軌道特徴との関係を精査することで、SfMの成否を反映した軌道の特徴を指標とする。

このシステムにより、SfMに適さないと判断された箇所での撮影をその場で補填することで、事後に発生し得る手戻りを未然に防げる。

4. 実装

(1) 概要

提案するシステムの処理構成を図-2に示す。本システムでは、UAV (DJI社:Mavic2Pro, FOV:77°) のコントローラから映像をノートパソコン OS: Ubuntu 16.04 LTS, CPU: Intel(R) Core(TM) i7-8750H, GPU: NVIDIA GeForce 1060 6GB, メモリ: 16GB) でキャプチャし、機体の撮影と並行してVisual SLAM (LSD-SLAM¹¹⁾) を実行しながら、カメラの移動速度を実時間で監視し、予め策定した指標を基準として、撮影画像の適/不適を判断する。不適切な場合は再撮影が必要な箇所を操縦者に通知する。

LSD-SLAMは、ROS (Robot Operating System) を利用して実装されており、Publish/Subscribe メッセージングモデルを用いてソフトウェアプロセス (ノード) どうしが通信する¹³⁾。本研究では、ROSの中で、1フレーム毎のカメラの移動量を算出するノードを新たに自作し、適切な

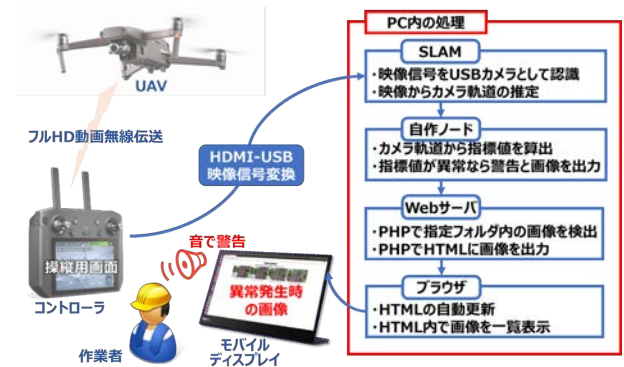


図-2 提案システムの構成と処理の流れ

範囲外となる指標値を検出した際に警告音を鳴らすように設定した。加えて、警告音を発した時刻の撮影画像をブラウザに表示することで、再撮影の該当箇所を操縦者に視覚的に伝える。そのための Web サーバを同じパソコン内に用意し、動的に HTML ファイルを生成して Web 表示する機能も PHP で実装した。警告音は一定のリズムで発し、正常時、要注意、警告の 3 段階の音源ファイルを用意して、指標値により切り替えて再生する。

(2) SfM の成否とカメラ挙動の因果関係

空撮の適否を判断する指標を定めるために、SfM 処理および Visual SLAM を実施する試行を繰返した。移動速度に変化をつけて UAV を手動で動かしながら撮影を行った。撮影映像から 2 秒ごとに切り出した画像を SfM に用い、3 次元再構成に成功した撮影と失敗した映像に分類した。図-3 に 3 次元再構成の成否の例を示す。いずれも、左図の青い矩形が推定された撮影視点であり、右図は SfM の結果をもとに MVS (Multi-view Stereo) 処理によって高密度点群を生成した結果である。SfM の成否による SLAM の処理結果の違いを図-4 に示す。白い点群が追跡された被写体の 3 次元点、緑線がカメラ軌跡、青色の四角錐がカメラ位置を表している。SfM が成功した画像系列から推定されたカメラ軌道 (図-4(左)) は実際のカメラの動きを反映しているが、SfM が途中で失敗した画像系列から推定されたカメラ軌道 (図-4(右)) は、実際の軌道から大きく乖離した推定結果となった。

推定されたカメラ軌道から映像フレーム間の被写体に対する相対的なカメラの移動速度を求め、その分布を表したヒストグラムを図-5 に示す。黄色が SfM に成功した度数 (約 1600 フレーム)、青色が失敗した度数 (44 フレーム) を正規化して示し、赤線は成功した度数の分布を近似した正規分布である。横軸はカメラの相対移動速度を表す。SfM が失敗する例は、急に速度が大きくなる場合で、サンプル数は限られているが、速度が 0.09 未満では SfM の失敗例が無く、0.5 以上の速度が 8 割以上を占めた。一方、SfM に成功した場合の 99% 以上が、0.08 以下の速度範囲に含まれており、カメラ相対移動速度の上限値 0.08 を指標として採用することとした。

5. 実験

(1) 方法

前章で策定した指標を採用し、提案するシステムのの実働評価を行う。対象としては、兵庫県川辺郡猪名川町にある堀家製錬所跡の柱状の構造物を用いた (図-6)。堀家製錬所跡は、明治 30 年から明治 40 年頃まで多田鉱山で銀や銅を製錬した史跡で、残されている複数の構造物のうち、高さ約 5 m のレンガ構造物を対象とした。

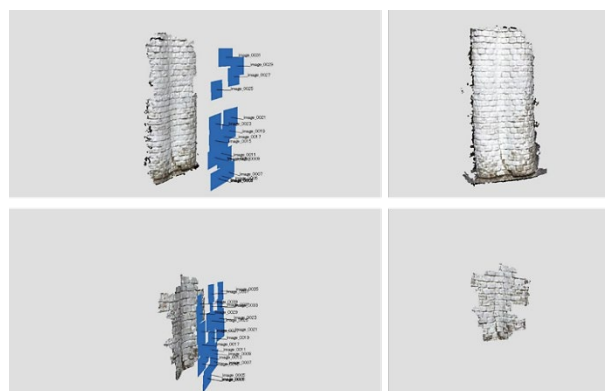


図-3 3次元再構成の結果の例 (上段：成功，下段：失敗)
いずれも、左図は SfM で推定された撮影視点 (青い矩形) と被写体の関係、右図は MVS による被写体の 3 次元モデル

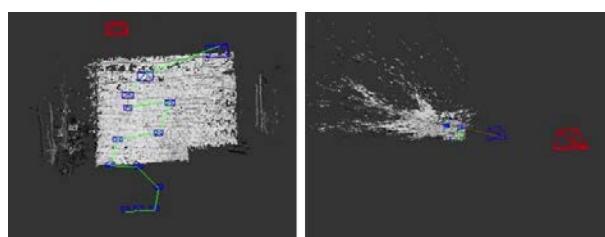


図-4 推定されたカメラ軌道と被写体の 3 次元点群の例
(左：成功，右：失敗)

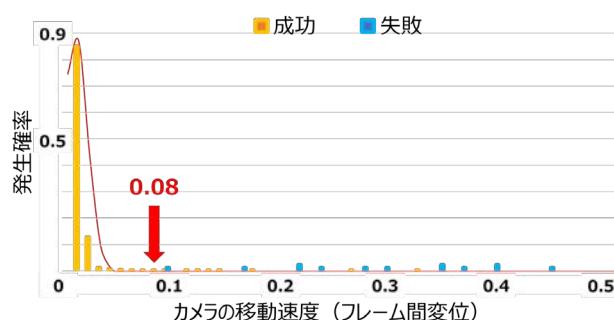


図-5 カメラの相対移動速度のヒストグラム



図-6 堀家製錬所跡での実験の様子

(3) 実験結果

実験では、提案システムにより撮影の適否を確認しながら UAV を操作する。指標の範囲外となりシステムが警

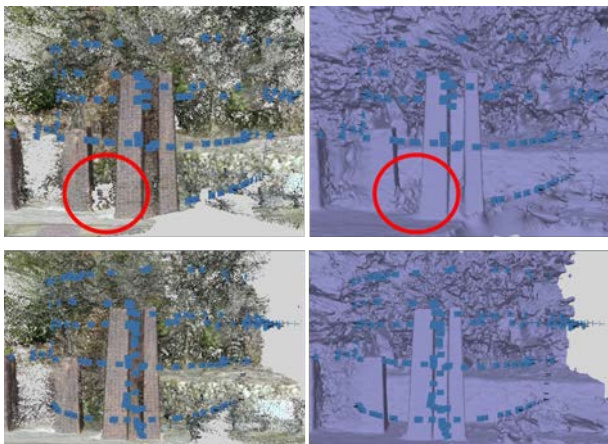


図-7 3次元再構成結果：補填撮影なし（上段）と補填撮影あり（下段）の点群データ（左列）と3次元モデル（右列）

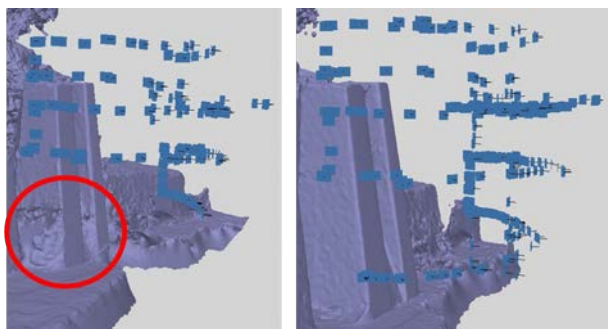


図-8 3次元再構成結果の拡大表示：
補填撮影なし（左）と補填撮影あり（右）

告を発した場合は、再撮影候補視点を確認し、機体を該当箇所まで戻して再撮影を行った。事後に、SfMによる3次元再構成を実施した結果を図-7に示す。図-7上段は、再撮影画像を含めずに3次元再構成を行った結果であり、図-7下段は、再撮影画像を含め結果である。再撮影しない場合は被写体の一部が欠損しているが、再撮影時の画像を含めた場合は、この箇所の3次元形状が復元出来ている。図-8に、同じ結果の拡大図を示す。図-8(左)では、地面に近い側面での撮影において、構造物表面に対する撮影画像のラップ率が不足し、3次元化において欠損している。提案システムで指摘された箇所付近の正面と側面を補填撮影したことにより、図-8(左)では、連続的に良好な3次元データが得られたことが分かる。

6. おわりに

本研究では立体構造物の3次元データ化を目的としたUAV空撮時の撮影状況から、SfMによる3次元再構成処理に適した撮影となっているかどうかを判断して操縦者に知らせるUAV空撮状況の監視システムを提案し、Visual SLAMで推定される撮像視点から、被写体に対するカメラの相対速度を評価指標として、適否を判断するシステムを実装した。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逐次的に画像間のトラッキングを実施し、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。

カメラ機材が変わった場合に指標の再策定が必要なことから、カメラの機差を吸収できるような指標の策定が今後の課題として挙げられる。

謝辞：本研究の一部は関西大学先端科学技術推進機構研究「文化遺産の維持管理のためのICT技術研究」グループの助成による。

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., Moehle N., Goesele M., Heidrich W., Aerial path planning for urban scene reconstruction: A continuous optimization method and benchmark, *ACM Trans. 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., New Applications of 3D SLAM on Risk Management Using Unmanned Aerial Vehicles in the Construction Industry, *IntechOpen*, DOI: 10.5772/intechopen.73325, 2018.
- 10) R. Hartley R., A. Zisserman : Multiple View Geometry in Computer Vision, Cambridge University Press, 2004.
- 11) Engel, J. and Schöps, T. and Cremers, D. : LSD-SLAM : Large-Scale Direct Monocular SLAM, *European Conference on Computer Vision*, pp. 834-849, 2014.