

小型自律飛行ロボット (UAV) の活用による 簡便な地物計測

鈴木 太郎・橋 詰 匠・鈴木 真二

近年、災害等の危機管理や測量などの目的で、無人飛行ロボット (UAV: Unmanned Aerial Vehicle) の研究が盛んに行われている。その中でも数 kg 級の小型 UAV は、その運用性の高さから効率的な情報収集手段として期待されている。しかし、小型 UAV では、積載可能な重量の制限が非常に厳しく、このため撮影した画像等の情報から、地物の観測や計測に必要な正確な機体の位置姿勢を推定することが難しい。そこで本論文では、小型 UAV において画像処理を複合することにより、これらの問題の解決を試みる。また、災害情報の収集、植生観測、地物の三次元計測など、具体的な小型 UAV の応用例について紹介する。
キーワード：飛行ロボット、航空測量、災害情報収集、リモートセンシング、三次元計測

1. はじめに

マイクロプロセッサ、GPS、慣性センサ等の技術的進歩により、無人飛行ロボット (UAV: Unmanned Aerial Vehicle) の自律飛行が可能となり、近年、各研究機関・企業において、研究・開発が盛んに行われている。UAV は用途に応じて、その大きさ・重量など様々な種類のものが存在するが、その中でも特に、数 kg 級の手投げにより離陸が可能なサイズの固定翼型小型 UAV は、災害時の効率的な情報収集の手段や、森林や農業分野でのリモートセンシング手段、河川や堤防の監視や管理用途、地形や構造物の簡便な計測・測量用途など、様々な分野での利用への期待が高まっている。数 kg 級の小型 UAV は、手投げでの離陸が可能であり非常に機動性が高いため、即座に人や車が直接入ることのできない危険な場所でも、自律での飛行が可能である。さらに、搭載カメラにより有人機では困難な 100 m 程度の低空から、高精細な空撮画像が取得できるという特徴がある。また、一回の情報収集に必要なコストが安価であるため、複数回の飛行や、継続的な観測が可能であるといった利点がある。

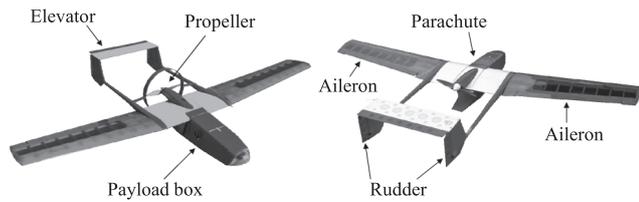
しかしながら、小型 UAV において様々な上空からの情報を収集し活用するには、以下のような課題がある。小型 UAV は積載可能な重量の制限が非常に厳しく、搭載可能なセンサの大きさ・重量に制限がある。このため、有人機や大型の UAV で利用されているような、高精度な自己位置、姿勢センサを搭載することが困難であり、地物の観測や計測に必要な正確な機体

の位置姿勢を推定することが難しい。また、レーザスキャナなどのセンサを搭載することが困難なため、三次元計測を行う場合、直接三次元座標を計測できないという課題も存在する。この理由により、小型 UAV は主にカメラ画像を用いた単純なモニタリング用途に用いられる例が多く、精密な観測や計測に用いられた例は少ない。小型 UAV を用いて精密な地物の計測を行うには、カメラなどによる環境の観測を統合して、機体の位置姿勢推定精度を向上させる必要がある。

そこで、小型 UAV に搭載したカメラ画像による画像処理を複合することにより、これらの問題を解決する。本稿では、UAV の位置姿勢情報と画像を複合した災害情報収集システム、高精細画像地図の自動作成とリモートセンシング、また、空撮画像からのステレオ視による三次元復元について、実環境での運用例をもとにその技術を紹介する。

2. 小型 UAV 概要

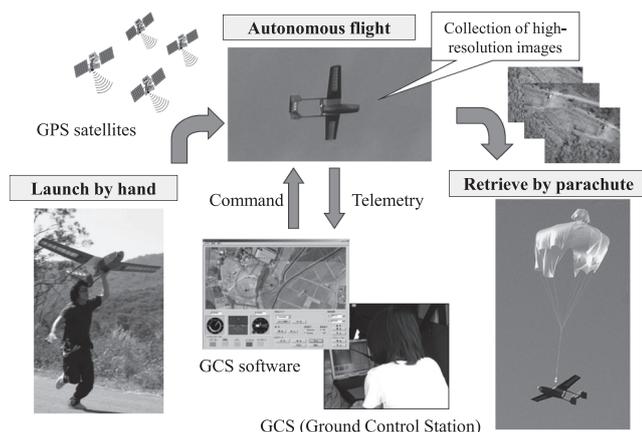
小型 UAV の外観を図-1 に示す。この小型 UAV は、大手電機メーカーと東京大学により開発されたものであり¹⁾、長さ 1.2 m、幅 1.7 m の大きさで、全備重量は 2 kg (最大搭載可能重量 500 g) である。積載可能重量が小さいため、搭載機器を GPS 受信機モジュール、MEMS 慣性センサ (加速度計 3 軸、3 軸角速度計)、圧力計 (動圧、静圧)、誘導制御計算用マイコンを搭載したアビオニクスボード、デジタルカメラに限定し、無線通信により地上の基地局へのセンサデータ、空撮



図一 小型 UAV 外観

動画の伝送を行う。

図一 2 に小型 UAV の運用の流れを示す。カメラは機体の下部に下向きに取り付けられており、VGA (640×480, 30fps) で動画を撮影し伝送を行う。また、1000 万画素の静止画を連続的に撮影し、内部メモリに保存し飛行後に回収することが可能である。自律飛行では事前に指定した指令高度・速度において、指定した複数の目標点 (Waypoint) を自動周回飛行する自律飛行を可能としている¹⁾。この小型 UAV は、図一 2 に示したように手投げによる離陸が可能であり、着陸は搭載されたパラシュートにより着陸することで、狭い場所でも安全に回収が可能である。高度 80 ~ 120 m, 秒速約 15 m/s の速度で 30 分程度の自律飛行が可能であり、数 km にわたる範囲の上空からの情報収集が可能である。実際に小型 UAV が撮影した静止画像の例を図一 3 に示す。本システムに搭載したデジタルカメラは、水平画角が約 53 度、垂直画角約 37 度であり、高度 100 m で水平飛行している場合、幅 100 m, 長さ 66 m 程度の地平面が撮影される。



図一 2 小型 UAV の運用の流れ

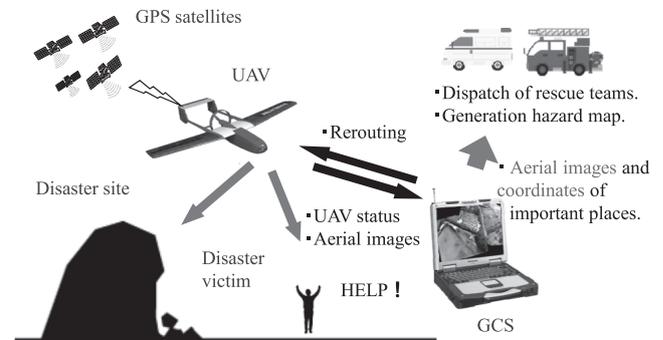


図一 3 小型 UAV による連続空撮画像

3. 小型 UAV を用いた地物の計測例

(1) 災害時を想定した情報収集システム

小型 UAV を用いた災害情報収集システムの概要を、図一 4 に示す。災害の被災直後では、交通機関は麻痺し、地上の道路等も通行が不可能になっていることが多い。そのような場合において、上空からの迅速な被害状況の把握、さらに被災地域の特定や被災者の発見・救出活動が求められる。そこで小型 UAV の機動性を生かし、有人ヘリやレスキュー隊の到着前にハザードマップを生成し、救助の支援を行うシステムの構築を行った²⁾。これは、災害の発生直後、小型 UAV を直ちに飛行させ、伝送動画をを用いて、被害状況の把握や要救助者等の有無、及びその位置等の情報を収集し、このようにして収集した画像や位置情報、取得日時などを自動的に GIS データビューア上に統合することで実現する。このハザードマップを共有し活用することで、レスキュー隊や有人ヘリによる被災者の迅速な救助や支援を可能にする。また、災害発生直後から復興まで、継続的に情報収集を行い、GIS データビューア上で被災情報を時系列的に整理することで、小型 UAV が収集した情報を、復興計画や防災策の立案に役立てることが可能となる。

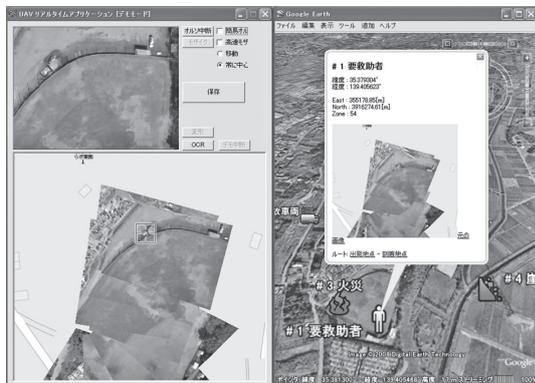


図一 4 小型 UAV による災害情報収集システムの構成

従来より、災害時等の情報収集手段として小型 UAV の応用研究が行われているが、被災地の空撮画像をリアルタイム伝送して表示するのみでは、どの場所を撮影しているかが判りづらく、被災者の発見や広範囲にわたる情報把握が難しかった。そこで、動画に画像処理を行い、機体センサ出力によって推定された自己位置・姿勢角を複合することで、この問題を解決する。各フレームの撮影範囲が狭く、また撮影対象の位置情報が不明であるという問題に対しては、地図と空撮動画を連動し、地図上で撮影対象の位置を確認することによって対処する。これを実現するために、小型 UAV の搭載センサによって推定された機体の自

己位置と姿勢角を用いて、取得画像を地図画像上へ整合するように変形して表示する。これにより、空撮画像を位置情報と連動して把握することが可能になり、状況の把握を助けることができる。以上の処理を小型 UAV の飛行中に実時間で行うことで、伝送される動画画像を用いた迅速な被災情報の収集を実現する。

具体的な被災情報の収集は、災害現場における任意の注目地点（火災発生現場や崖崩れが起きている箇所等）の位置座標を処理画像から取得し、識別情報を付加することで行う。そして、このような任意の注目地点情報を被災情報として、GIS データビューア上に統合し、ハザードマップを生成する。図—5 に、GIS 上に空撮情報を統合した例を示す。オペレータが被災者などを発見した場合、画面をマウスでクリックし、被災者としてマークすることで、座標を含めた情報がデータベースに自動的に入力され、撮影画像を含めた情報が GIS 上で参照可能となる。このように動画からリアルタイムに地図上に画像を投影していくことで、広域の情報が位置情報と共に把握が容易になることが確認できる。さらに注目点の選択により地上座標と画像を共に管理することで、災害時の迅速な状況把握や救出活動が可能となる。



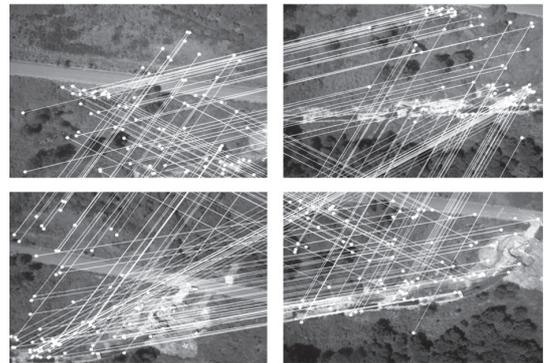
図—5 GIS にリアルタイムに情報統合を行った例

(2) 画像地図の自動生成によるリモートセンシング

(a) UAV 空撮画像からの画像地図生成

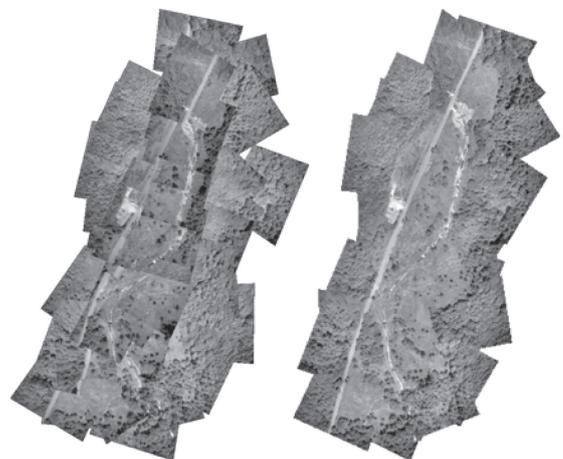
小型 UAV で撮影される画像は非常に高解像度である反面、撮影範囲が狭いため、広域の観測を行うには画像を合成することで広域の画像地図を作成する必要がある。しかし、高い精度で地物の状況を把握することが求められるアプリケーションにおいては、小型 UAV の旋回により生じる画像の歪み、そして位置姿勢の誤差により撮影画像が正確に整合しないことが大きな課題となる。そこで、小型 UAV の位置姿勢の最適化計算による画像地図の作成手法を構築した³⁾。自律飛行のための搭載センサにより算出された小型

UAV 位置姿勢は、搭載センサの制限から位置姿勢に誤差が含まれている。そこで、UAV に搭載されたカメラにより撮影された画像情報を複合することで、UAV の位置姿勢を最適化計算により修正する。具体的には、UAV の飛行後に得られた空撮画像と誤差を含む位置姿勢を用いて、画像特徴の再投影誤差を示す評価関数を作成し、これを最小化することで、UAV 位置姿勢を推定し画像地図を作成する。このプロセスを自動で行うことで、小型 UAV を用いた容易な地上の解析を実現する。UAV 空撮画像間において、画像特徴の自動対応付けを行った例を図—6 に示す。



図—6 連続空撮画像間の画像特徴のマッチング

ここで画像特徴として、SIFT (Scale Invariant Feature Transform) 特徴と呼ばれる画像特徴を利用する。このようにして対応付けられた画像特徴の投影座標の誤差を最小化することにより、画像撮影時の UAV の位置姿勢を補正する。図—7 (a) に小型 UAV 搭載センサによる位置姿勢を用いて、地表面に画像を投影することで作成した画像地図、図—7 (b) に提案手法により作成した画像地図を示す。これらから、提案手法では整合のとれた広域の画像地図を生成できていることが確認できる。以上により非常に高分



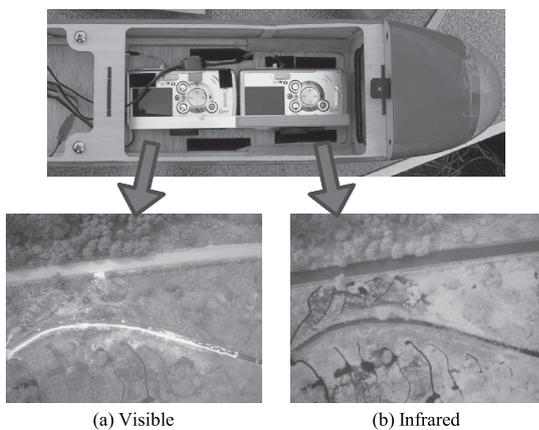
(a) 搭載センサによる画像地図 (b) 提案手法による画像地図

図—7 位置姿勢の最適化計算により作成した画像地図

解能な小型 UAV の画像を用いて、様々な広域のモニタリングや調査を行うことが可能となる。

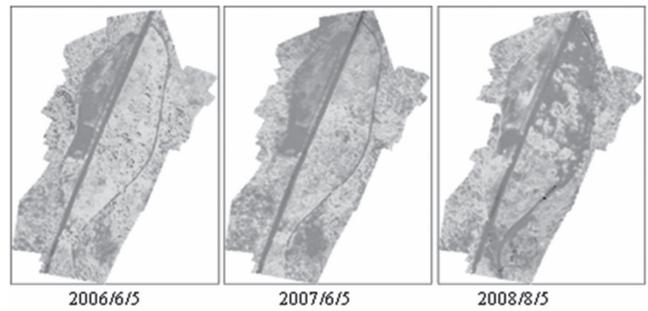
(b) 植生観測への UAV の応用

森林等の植生や農作物の生育状況を効率的に把握する手段の実現は、農林業従事者の高齢化に向けて大きな課題となっている。そこで、小型 UAV を用いて植生観測を行うことを目的とし、可視・近赤外の波長が異なるデジタル空撮画像から高分解能な植生の分類図を自動で生成するシステムの構築を行った^{3), 4)}。図—8に示すように、空撮用の可視・近赤外カメラを搭載することで、同一場所において波長の異なる画像を取得可能である。近赤外画像と可視画像と比較を行うことで、植生の分布を効率的に把握することができる。具体的には、前述した手法により、観測区域全体の画像地図を自動で生成する。また、可視・赤外の画像地図の重ね合わせにより植生指標の算出を行う。ここで、植生指標として、人工衛星や航空測量による植生観測で広く用いられている、正規化植生指標 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) を採用した。NDVI は、植物中の葉緑素による近赤外波長と赤波長の反射の特性を利用した指標である。



図—8 可視・近赤外画像の取得

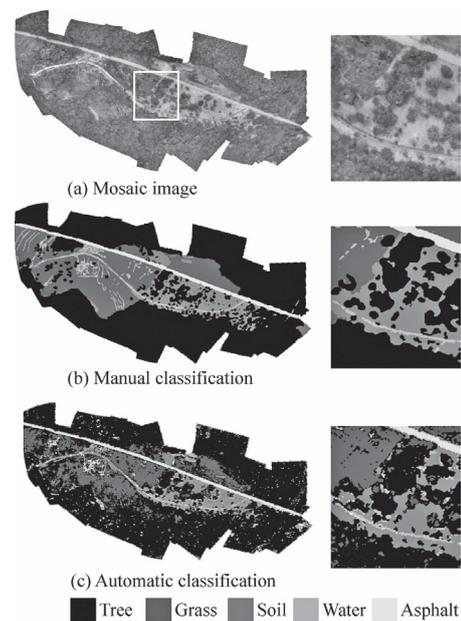
実験環境である広島県北広島町の八幡湿原では、自然再生事業が実施されており、樹木の伐採や導水路の敷設等が行われ、植生が変化している。そこで、このような植生の変化を把握することを目的とし、2005年から約4年間で6回にわたり、本システムによる観測試験を実施した。対象とする観測区域は、南北方向に約800m、東西方向に約500mの範囲である。観測試験の結果として、提案手法により生成したNDVIの画像地図の変化を図—9に示す。対地高度約120mの飛行でNDVI画像の分解能は約5cm/pixelとなった。さらに各年のNDVI画像を比較することで、樹木の伐採にしたがって土壌が露出し、植生指標が変化している



図—9 小型 UAV による NDVI 画像地図の比較

ことが確認できる。これにより、樹木、低草などの植生の活性度を、定量的に把握することが可能となる。

さらに、作成した画像地図を用いて地表面の自動分類を行った。生成した画像地図の各チャンネルにおける画素値を特徴量とし、特徴空間を用いて分類を実行した。扱う特徴量は、搭載カメラにより取得した可視、近赤外、そしてHSV表色系を使用している。分類のアルゴリズムには、一般に知られるk-means法にクラス重心の移動を適切に行い、分類エラーを低減するための追加条件を加えたアルゴリズムを使用した。図—10(b)に比較用として手動による分類を行った例、図—10(c)に提案手法により自動分類を行った例を示す。これらの図の比較より、樹木、草本、水域といったレベルでの土地被覆分類図が自動的に作成できることが確認できる。この分類図作成には手動では約5時間を要したが、提案する自動生成では僅か3分間と大幅に高速化できることが確認された。また、現時点では樹木や植物の種類ごとの詳細な分類は困難であるものの、水域や草本領域の面積の変化や繁殖状態などを、自動的に計測することが可能となった。



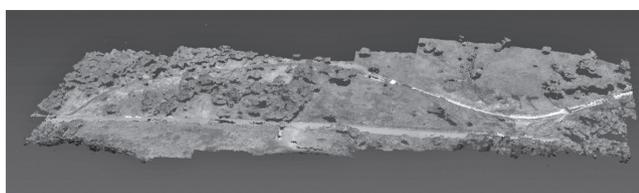
図—10 小型 UAV による植生判別の結果

(3) UAVによる三次元計測

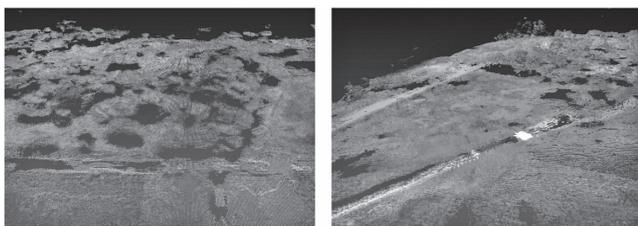
災害時の建物の被害等を正確に把握するためには、地物の三次元の位置情報の計測が必要となる。また、地物の三次元情報を取得することで、崖崩れ、土砂崩れ等からの、復興計画の立案や復興作業への利用や、防災のためのハザードマップの作成に役立てることができると考えられる。

そこで、小型 UAV を用いて撮影した連続画像にモーションステレオを施すことで三次元計測を行う手法を構築した²⁾。本手法では、小型 UAV の位置姿勢角変化による画像の歪みを高い精度で補正するため、(2) (a) で述べた、連続撮影画像中の画像特徴点の再投影誤差の最小化による位置姿勢の補正手法を用いる。さらに、修正した位置姿勢を用いて、連続空撮画像からステレオペア画像を作成し、モーションステレオを適用することで環境の三次元復元を行った。モーションステレオの際の画像間の対応点の決定のロバスト性を改善するため、色情報を考慮したウィンドウマッチングを行う。具体的には、画像間の対応点を決定する際に、注目ピクセルだけではなく、その周囲色情報も考慮して、対応点決定、誤対応の除去処理を実施した。

図一 11 (a) に生成した三次元画像の全体図を示す。環境は前述した広島県北広島町の八幡湿原であり、本計測では、高度 100 m からの計測を行い、平面分解能 20 mm、奥行分解能 150 mm という非常に高分解能の三次元計測を実現した。また、三次元画像の拡大図を図一 11 (b) に示す。このように小型 UAV を用いて環境の高分解能な三次元計測を行うことで、崖崩れの土砂体積の計測や、ハザードマップの作成などの防災分野への応用や、堤防の高さ管理や樹木の高さ測定など様々な分野での応用が可能となると考えられる。



(a) 全域の三次元復元結果



(b) 三次元復元結果の拡大図

図一 11 小型 UAV による三次元復元結果

4. おわりに

本論文では、小型 UAV の概要、及び、それを用いた簡易な計測に関する紹介を行った。小型 UAV の特徴は、手投げが可能で大きさがでありながら、約 500 グラムのペイロードを確保し、完全に自動での飛行が可能である。取得した空撮画像に、各種センサ情報と複合した画像処理を施すことで、災害情報収集や、植生観測、三次元計測など、地図情報と連携した地物解析が可能システムを構築した。これらの簡便な地物計測手法の、簡易的な航空測量や防災などの分野での応用が期待される。

謝辞

本論文で用いている小型 UAV は、三菱電機(株)、東京大学鈴木・土屋研究室により共同で開発されたものである。また、広島県八幡湿原での空撮は、広島県立総合技術研究所林業技術センターの協力により行われた。

JCMA

《参考文献》

- 1) 辰巳薫, 他: 小型自立飛行ロボットシステムの開発と飛行試験, 日本航空宇宙学会誌, Vol.54-625, pp.41-45, 2005.
- 2) 鈴木太郎, 他: 小型自律飛行ロボットを用いた災害時における情報収集システムの構築, 日本ロボット学会誌, 26 (6), pp.553-560, 2008.
- 3) 三好大地, 他: 小型自律飛行機による植生観測手法の構築, 第9回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 2008.
- 4) 桑原佑吉, 他: 小型自律飛行機による可視・近赤外画像を利用した植生評価システムの構築, ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2009.

【筆者紹介】

鈴木 太郎 (すずき たろう)
早稲田大学
理工学術院
日本学術振興会特別研究員 (DC)



橋詰 匠 (はしづめ たくみ)
早稲田大学
理工学研究所
教授



鈴木 真二 (すずき しんじ)
東京大学大学院
工学系研究科 航空宇宙工学専攻
教授

