UAV を活用した海岸地形変化解析に関する研究

黒岩 正光¹・末葭 良太²・市村 康³・福岡 和明⁴

¹正会員 鳥取大学大学院 工学研究科 教授 (〒680-8552 鳥取県鳥取市湖山町南4-101)

E-mail: kuroiwa@cv.tottori-u.ac.jp

²学正会員 鳥取大学工学部土木工学科 (〒680-8552 鳥取県鳥取市湖山町南4-101)

E-mail: B12T6028Z@edu.tottori-u.ac.jp

³正会員 日本ミクニヤ株式会社 執行役員 (〒556-0021大阪府大阪市浪速区幸町3-1-10)

E-mail: ichimura@mikuniya.co.jp

⁴日本ミクニヤ株式会社 大阪支店 主任 (〒556-0021大阪府大阪市浪速区幸町3-1-10)

E-mail: fukuoka@mikuniya.co.jp

本研究では、浦富海岸の海岸侵食対策を検討するためのひとつの手法として、砂浜域を比較的高頻度で、なおかつ簡易的にモニタリングできるシステムを開発することを目的としている。本報では、UAVにより得られた空撮画像についてSfMを用い3次元モデルを作成し海岸地形変化の解析を行ったのでその結果について報告する。

UAVは、4枚羽の飛行体を用い、2秒間隔の撮影で80m上空を飛行させた。得られたデータは、SfM専用ソフトとGISソフトを用い解析を行った。

UAVを用いた海岸線の調査は、約2km程度であれば、所用時間20分程度で済み、比較的簡易にモニタリングが行えることが確認できた。また、精度については、RTK-GPS測量結果との比較から0.05m程度であることが確認できた。

Key Words : UAV, GIS, SfM, 3-dimensional model, Coastal topography

1. はじめに

近年、急速に普及し始めた、無人小型ヘリコプターは、簡便に空中写真の撮影が行えるため、地形や構造物の計測および測量¹⁾、道路やインフラの点検等、様々な分野で活用されるようになってきている。普及に伴い、各団体から安全飛行に関するガイドライン²⁾、手引き⁴⁾および基準³⁾も出されている。また、国土地理院から公共測量のためのマニュアル⁶⁾も出されている。

さらに、複数の写真からカメラの撮影位置を推定する技術や3次元形状を復元する技術も普及し始めて、簡便に写真測量が行えるようになりつつある。このような背景の中、3次元形状を復元するモデリングソフトウェアの精度検証⁷⁾、さらには写真のオーバーラップ率やカメラのレンズ種類が与える影響などについても調べられており⁸⁾、高い精度が報告されている。

鳥取県東部の浦富海岸は、港と岩礁で囲まれたポケットビーチで、海岸侵食と航路堆砂が問題となっている。対策として、航路での浚渫土砂を海上土砂投入するサンドリサイクルが実施されている。しかしながら抜本的な解決とはなっておらず新たな対策を検討する必要がある。海浜変形と波浪との関係をモニタリングする必要がある。

本研究では、浦富海岸の海岸侵食対策を検討するためのひとつの手法として、砂浜域を比較的高頻度で、なおかつ簡易的にモニタリングできるシステムを開発することを目的としている。本報では、UAV(Unmanned Aerial Vehicle)により得られた空撮画像についてSfM(Structure from Motion)を用い3次元モデルを作成し海岸地形変化の解析を行ったのでその結果について報告する。

2. 空中写真撮影

(1) 調査対象場所

調査は、図-1に示す鳥取県東部の東西約1.5kmの岩美

図-1 調査対象場所

町浦富海岸で2015年11月29日、12月18日および2016年1月13日にかけ行った。当該地周辺には、飛行に影響を与える電波塔等の構造物はなく、安全性は確認された場所であった。

(2) 撮影方法

撮影に使用した機体は、写真-1に示す。機体は、井上ら⁹⁾を参考に筆者らが、DJI社製の組み立てキットF450に、自動飛行のため3Drobotics社製のフライトコントローラーAPM2.6を搭載し作成した4枚羽の飛行体である。空中撮影は、カメラを下向きに搭載し、約1600万画素、焦点距離18.3mmの民生カメラ(GR：リコー社製)を用い、写真毎に6割以上オーバーラップするように2秒間隔の撮影を、高度80mから行った。なお、撮影は調査対象場所を東西の2区域に分け区域毎に行った。撮影時の機体操作は、離陸までは手動で操作を行い、ある程度の高度に達したのち、GPSを用いた自立飛行をさせた。1回の飛行時間は10分程度であった。

(3) 標定点と検証点

標定点は、3次元モデルに座標を与えるために必要であり、区域毎に区域の東西および中心付近に、地形状態に合わせて14から21点設定した。また、11月29日の調査では、作成するモデルの精度検証のために用いる検証点

写真-1 マルチコプター

図-2 3次元モデル作成と解析の流れ

を11点設置した。標定点および検証点の位置座標は、VRS方式のネットワーク型RTK-GPSにより求めた。

(4) 岸沖方向断面測量

UAVによる断面形状および高さの観測結果の精度を確認するために、岸沖方向の断面地形の緯度、経度および標高をRTK-GPSを保持し、歩きながら2秒間隔で自動観測した。

3. 空中写真による3次元モデル作成

空中撮影写真は、図-2に示す流れで処理を行った。3次元モデルの作成は、複数の静止画からカメラの撮影位置や3次元形状を推定するSfM技術、カメラパラメータから高密度の点群を作成し3次元形状を復元するMVS(Multi-View Stereo)技術を用いたソフトPhotoScanPro(AgiSoft社製)で行った。図-3は、SfMによって出力されたカメラの位置および方向で、青面がカメラの位置、黒線が撮影方向をそれぞれ示す。PhotoScanProでは、計算時間を短縮させるためと精度を向上させるために、より詳細なモデルを作成できるHightモードにて解析を行った。その後、得られた3次元モデルのDSM(Digital Surface Model)は、フリーのGISソフトQGISに取り込み解析を行った。

Hightモードの解析は、パソコンのスペックによるが、筆者らのi7・3.6GHzのCPU、メモリ32GB、グラフィックボードGTX960のパソコンで約200枚の写真を解析するのに、10時間程度の計算時間を要した。

4. 精度検証

精度検証は、標定点と検証点の比較より行った。図-4は精度検証の結果を示す。図中に示す値は、RMSE値(平均二乗誤差)であり、標定点についてはソフトから算出される誤差から求め、検証点についてはオルソ画像上

図-3 SfM出力結果

で検証点を確認し、その場所の水平位置と高さを求め、RTK-GPSにより得られた値を真値として算出した。なお、標定点は3回の調査の平均値で、検証点は11月調査時の平均値である。

図-4によると標定点は、その位置と高さを用いてモデルを作成しているため、水平精度0.021 m、高さ精度0.018 mとなった。しかし、検証点の精度は、水平精度0.053 mとなり、高さ精度0.029 mとなり、標定点の精度より悪い結果となった。これは、11月時の天候は雨時々曇りの状態で、雨の合間をぬって飛行させたため天候の影響で、空中撮影画像が良好でなかったことにより精度が落ちたものと考えられる。

平成28年3月に出版された「UAVを用いた公共測量マニュアル(案)」⁹⁾には、計測誤差の制限は、標定点および検証点ともに水平および高さ精度0.05 m以内であることとされており、今回の調査では標定点は制限を満たしているが、検証点における高さ精度は満たしていない。しかしながら、海岸地形変化をとらえるには十分な精度であるといえる。

精度を向上させるためには、地上測量の精度を上げること、標定点の数を増やすこと、オーバーラップ率やサイドラップ率を高めること等が必要である。また、標定

図-5 浦富海岸のオルソ画像
(図中のラインは岸沖方向断面測定箇所、数値はライン番号)

点については、対象とするエリア囲むように設置し、囲んだエリア内にも点を設置する必要がある。さらに、設置場所の周囲が開けた場所に設置する必要や、陰にならないような場所に設置するなどしなければならない。なお、光を反射する水などや動いているものなどは、写真合成の際のマッチングポイントが得られにくく、精度が悪くなり、極端に地盤高が高くなったり低くなったり、等高線が凸凹状態になったり、幾つもの小さな閉曲線の塊ができていたりする。そのため、波打ち際の解析には、図-5に示すようなオルソ画像や必要に応じ個別に空中写真で確認しながら進める必要がある。

5. 海岸地形変化解析

(1) 断面形状

図-6は、図-5中のラインについて、RTK-GPS測量から得られた結果と、3次元モデルから得られた結果を断面図として示したものである。RTK-GPSによって得られた結果を青のラインで、3次元モデルより得られた結果を赤点でそれぞれ示す。

図-6によると、ライン19やライン42で岸から沖に向けて変曲点を有する断面もRTK-GPSと3次元モデルから得られた結果は、比較的良く一致しており、傾向を捉えている。しかしながら、12月のライン29では、RTK-GPSと3次元モデルから得られた結果では、約1m近くの差が出ている。ライン29はテトラポットを横切るようなラインとなっており、測定点が開けた空間でないといふ近傍の高さに引っ張られ地盤高が高くなるというソフトの特徴によって出たものと考えられる。

図-7は、各ラインにおける断面地形の経月変化を示す。

図-7によると、ライン19では堆積傾向にある。ライン29では11月と12月は変化がなく、その後堆積している。ライン42では、汀線近傍で11から12月にかけて侵食し、そ

の後堆積している。

複雑な構造物がある場合は、精度に課題が残るが、短時間で広範囲の地形測量が行えるUAVによる手法は効果的である。さらに、3次元モデルを作ることが容易で、面的に地形情報を取得することができ、任意の断面形状を捉えることができる。

(2) 汀線変化

図-8は、DSMより求めたTP0.0 mのラインを汀線として、経月変化を示したものである。TP0.0 mの等高線は、波打ち際に当たるために、先にも記述したように、DSMから求めた等高線だけでは、判別がつかないため、オルソ画像と等高線を照らし合わせて、汀線を推測した。

汀線は、図中の測線1の東西、測線12から14、測線16から23でそれぞれ前進傾向がみられた。一方、測線6、測線15で後退傾向がみられた。なお、測線7から11にかけては変化がみられなかった。全体的に11月から1月にかけて東西で前進傾向にあった。

(3) 地盤高変化

図-9は、等高線0.0 mと3.0 mで囲むエリアを抽出し、地盤高から土量を求めたものである。図-9によると、土量は11月から12月にかけて52,800 m³から49,000 m³まで減少し、12月から1月にかけて53,200 m³に増加している。11月と1月の土量は、わずか400 m³、1月が多い。汀線は、11月から1月にかけて全体的に前進しているが、土量の変化は異なった結果となった。そのため、面的な地盤高の変化を調べるために、DSMによる解析を行った。

図-10は、11月から12月にかけての地盤高の変化を。図-11は、11月1月にかけての地盤高の変化率をそれぞれ示したものである。地盤高の変化は、QGISのラスタ計算機能を使い、12月のDSMから11月のDSMの減算、1月のDSMを11月のDSMで除算を行いそれぞれ算出した。ただし、減算および除算は各月の領域が互いに重なり合う箇所についてのみ行っている。

図-10によると、測線で5から7および測線14、15、測線25で地盤高の低下がみられ、侵食している傾向が分か

る。測線8および測線15,測線16間にみられるように、沖側で地盤高の低下による侵食、岸側で地盤高の増加による堆積などの状況が面的にとらえることができる。

図-11によると、測線1から4, 11から14, 16から24で1.5倍程度の地盤高の増加による堆積が認められる。一方、測線5から8, 15, 25で地盤高の低下による侵食が認められる。

3次元モデルを用いた解析は、地盤高の増減だけではなく増減の割合なども比較的簡単に算出できる。

このように、面的な堆積、侵食傾向の簡易的なモニタリングが可能であることが分かった。

図-9 土量の経月変化

図-10 11月から12月にかけての地盤高の変化
(横軸の数値は測線番号)

図-11 11月から1月にかけての地盤高の変化率
(横軸の数値は測線番号)

6. UAVの活用

RTK-GPSを用いた東西約1.5kmの海岸の調査として、汀線測量および岸沖方向の断面測量を行うのに掛かる時間は、3から4時間程度であるが、空中撮影による所要時間は準備も含め30分程度であり、標定点の測量をあわせても2時間程度であり、半分程度の時間で終了することができる。なおかつ、面的なデータの取得が可能である。さらに、高頻度で調査を行う場合は、飛行ルートを記録させそのルートを活用し次回の飛行が可能であり、同じルート上からの空中写真撮影が可能である。

以上のように、メリットが多い反面、落下の危険性があり、被害を与える可能性があるために、機体のチェックや安全性の確認を怠らないことが重要である。未然の事故防止としては、気象条件や周辺状況の確認、必要な携帯品の確認、飛行点検をチェックリスト等も用い、飛行前のチェックを入念に行う必要がある。チェックリストについては、国土交通省九州地方整備局でも行っており¹⁰⁾、参考にできる。

なお、安全な飛行に対しては、国土交通省の「無人航空機（ドローン、ラジコン機等）の安全な飛行のためのガイドライン」²⁾を遵守する必要がある。

7 おわりに

本研究では、砂浜域を比較的高頻度で、なおかつ簡易的にモニタリングできるシステムを開発することを目的としている。本報では、UAVによる空中写真から3次元モデルを作成し海岸地形変化の解析を行い、以下のことがわかった。

- (1) UAVは東西約1.5kmの海岸を10分程度の飛行で空中写真を取得できた。
- (2) UAVによる空中写真から得られたRMSE値(平均二乗誤差)は、標定点で水平精度0.021m、高さ精度0.018mであった。検証点では、水平精度0.053m、高さ精度0.029mであった。
- (3) UAVによる手法は効果的で、面的に地形情報を取得することができ、任意の断面形状を捉えることができる。
- (4) 面的な堆積、侵食傾向の簡易的なモニタリングが可能であることが分かった。

UAVを用いた調査では、記録された飛行ルートを活用することで効率的で、簡易的なモニタリングを可能にすることができた。

謝辞：本研究を進めるにあたり、調査の協力をいただいた鳥取大学海岸研究室の皆さま、3次元モデルの作成を行ってもらった日本ミクニヤ株の大塚真司氏に深く感謝いたします。本研究は、日本学術振興会より助成を受けた「基盤研究 (C)」の研究成果の一部であることを付記する。

参考文献

- 1) 市村 康・福岡和明・黒岩正光・竹本勇介(2015)：マルチコプターを用いた沿岸域調査に関する研究，日本沿岸域学会研究討論会 2015 講演概要集，No.28，CD-ROM.
- 2) 国土交通省(2015)：無人航空機（ドローン、ラジコン機等）の安全な飛行のためのガイドライン，<http://www.mlit.go.jp/common/001110370.pdf>.
- 3) ミニサーベイヤーコンソーシアムネクスト(2015)：マルチローターヘリコプター安全ガイドライン，第 21 版，<http://mini-surveyor.com/information.html>.
- 4) 日本写真測量学会(2015)：測量調査に供する小型無人航空機を安全に運航するための手引き，<http://www.jsprs.jp/>.
- 5) 国土交通省国土地理院(2016)：公共測量における UAV の使用に関する安全基準(案)，<http://psgs2.gsi.go.jp/koukyou/public/uav/index.html>.
- 6) 国土交通省国土地理院(2016)：UAV を用いた公共測量マニュアル(案)，<http://psgs2.gsi.go.jp/koukyou/public/uav/index.html>.
- 7) 小花和宏之・早川裕式・斉藤 仁・ゴメスクリストファー(2014)：UAV-SfM 手法と地上レーザ測量により得られた DSM の比較，写真測量とリモートセンシング 53(2)，pp67-74.
- 8) 早坂寿人・大野裕幸・大塚 力・関谷洋史・瀧繁幸・中野一也・小林 浩・鈴木英夫(2015)：UAV による撮影画像を用いた三次元モデリングソフトウェアの精度検証，日本写真測量学会平成 27 年度年次学術講演会発表論文集，pp1-4.
- 9) 井上 公・内山庄一郎・鈴木比奈子(2014)：自然災害調査研究のためのマルチコプター空撮技術，防災科学研究所研究報告，第 81 号，pp61-98.
- 10) 坂井佑介・杉町英明(2015)：災害現場調査におけるマルチコプターの活用報告，土木技術資料，No.4，Vol.57，pp28-31.

(2016.2.4受付)

STUDY ON COASTAL TOPOGRAPHIC CHANGE ANALYSIS UTILIZING UAV

Masamitsu KUROIWA, Ryouta SUEYOSHI, Yasushi ICHIMURA
and Kazuaki FUKUOKA

The purpose of this study is to develop the system that the topography of sandy beach can be observed using UAV(Unmanned Aerial Vehicle), as the one of the method for considering the countermeasures against the coastal erosion problem in Uradome Beach, Tottori. In this paper, the coastal topographic change in the Uradome beach was analyzed from the three-dimensional model using SfM (Structure from Motion) associated with the aerial image obtained by the UAV, and the accuracy of the analyzed result was discussed. The UAV used in this study was four wings flight vehicle, and the aerial photos were taken per two seconds with a height of T.P.80 meters. The photos of approximately 200 sheets were analyzed by using SfM and GIS software. The observation using UAV along the coastline worked out in 20 minutes about 2 kilometers. The accuracy of the observation with RMSE was verified from a result of the comparison between the RTK-GPS and the UAV survey, the RMSE was about 0.05m.