

UAVを用いた砂防設備点検の 自動化に向けた検討

小林 正直¹・岸本 優輝¹

¹近畿地方整備局 大規模土砂災害対策技術センター (〒647-5302和歌山県東牟婁郡那智勝浦町市野々3027-6)

現在、砂防堰堤といった砂防施設の点検においては、定期点検・臨時点検の別なく、人力を基本とする点検調査と手動による点検調査報告様式へのとりまとめが必要となっている。一方でUAV、いわゆるドローンを用いた各種計測技術およびその利活用手法の展開はめざましいものがある。本研究においては、山間地域等に多く位置することと、その結果のとりまとめ量が膨大であることなどから多大な労力を要していると考えられる、砂防施設の点検作業及びその点検結果のとりまとめにおける省人化および自動化の取り組みについて、UAVによる砂防施設の点検自体に関する手法の高度化と、点検結果とりまとめ手法の高度化について検討する。

キーワード UAV、砂防施設、維持管理、3次元モデル、DX

1. はじめに

近年、建設DXに関する社会的要請が強くなってきており、インフラメンテナンスに関する各領域においても、ICT技術等を活用した省人化が急務となっている。砂防分野においては、砂防堰堤等の砂防施設の維持管理について、その環境的・社会的等の各要因から、UAVによる省人化が検討されてきた。

砂防施設点検については、砂防施設の機能維持のための技術的判断の観点から、定期点検のほか・暴風雨及び台風などの風水害発生後の臨時点検・地震発生後の臨時点検が必要で、場合によっては損傷箇所を詳細に追加点検し、施設の部位毎の変状レベルを評価した上で、施設周辺の状況も踏まえ、総合的に健全度が評価されることとなる。これらにおいて、砂防関係施設点検要領(案)¹⁾では、定期点検は目視点検もしくはUAV点検を基本とし、臨時点検においても定期点検に準じて目視点検もしくはUAV点検による点検を基本とするとされている。一方で、UAVの活用ポイント(表-1)として挙げられている観点としては、外観からの変状把握の代替、点検作業が危険な箇所における写真撮影または、広範囲を短時間で撮影した写真によって効率的に全体像を把握すること、などがあり、光学カメラ画像による点検手法が主となっている。即ち、現状想定されているUAV点検の適用範囲や利点としては、目視点検でも実施されてきたような作業の代替等に主眼が置かれ、UAVにより砂防施設点検の手間自体が削減されるような手法、たとえば3次元デ

ータによる点検等の自動化や高度化、あるいは、UAV点検データを用いることによる調査報告の省人化といった要素については確立されていないのが現状である。砂防施設の維持管理という課題に対して、デジタル技術を活用して事業全般のモデル変革を行うデジタルトランスフォーメーションの段階に至るには、これらの確立されてきた技術をさらに適用し、推進を図っていくのと同時に、データ取得から変状把握・解析・調査報告に至る各段階のデジタルイゼーションが不可欠であると考えられる。

本研究では、UAVを活用した砂防施設点検または維持管理の効率化に関し、以下の2つの観点について技術開発を行い、報告する。

(1) 2時期の点群データを自動で比較し、変状や堆砂量を自動で抽出する手法の確立に向けた検討

UAVに搭載された各撮影機器により、点群による砂防施設の3次元モデルを得ることができる。この点群データを2時期で比較することにより、砂防施設の各種変状を把握する技術が開発されている。本研究においては、その比較や差分解析の自動化を目指し、ICPと呼ばれる点群同士の位置ずれを最小化する手段について検討するとともに、RANSAC法と呼ばれる手法で点群データ中の砂防施設を自動抽出する技術について検討した。加えて、砂防堰堤堆砂域における土砂の堆砂量算出についても自動化に向けた検討を行った。

表-1 現行要領案における砂防関係施設点検でのUAV活用ポイント¹⁾

施設(種類)		活用ポイント
砂防設備	砂防堰堤等	UAV点検では、UAVが飛行可能な空間であれば、点検作業が危険な場所、高低差が大きい箇所、着目する部位が地上から見えにくい箇所、設備全体像を把握する場合において効率的に画像を得ることができ、変状の変化を的確に比較できる。また、施設の周辺状況(渓岸浸食、斜面崩壊、堆積地の変化等)も効率的に情報を得ることが可能である。 ただし、樹木の繁茂やGPS情報の取得困難箇所、あるいはコンパス・ジャイロ等に影響がでる飛行困難空域、猛禽類の保護エリアでの点検や詳細な計測が必要な場合は目視点検が必要となる。 なお、「目視外飛行」となる場合は、改正航空法に伴い、点検ごとの飛行許可申請等の手続きが必要となる。
	溪流保全工	UAV点検が効果的な砂防施設で、広範囲を短時間で確認できる。施設の変状、河道の異常堆積や浸食等の全体像を把握することが可能(ウェイポイントフライト)で、変状がみられる施設、箇所については、垂直写真、水平写真、俯瞰写真などの画像により、時期的な変化を的確に比較できる。ただし、都道府県条例の空域制限、人口密集地上空、コンパス・ジャイロ等に影響がでる飛行困難空域である場合や、詳細な計測が必要な場合は目視点検が必要となる。なお、「目視外飛行」となる場合は、改正航空法に伴い、点検ごとの飛行許可申請等の手続きが必要となる。
	山腹工	UAV点検が効果を発揮する施設で、広範囲を短時間で確認でき、効率的に全体像を把握することが可能である。アンカーキャップや法枠の変状がみられる箇所については、垂直写真、水平写真、俯瞰写真などの画像を得ることができ、時期的な変化を的確に比較できる。なお、「目視外飛行」となる場合は、改正航空法に伴い、点検ごとの飛行許可申請等の手続きが必要となる。
地すべり防止施設	抑制工	地下構造物のUAV点検は不向きである。ただし、地表面の施設や斜面、滑落崖周辺の状況については広範囲を効率的に把握できるとともに、変状がある箇所などは水平写真、俯瞰写真などから時期的な変化を的確に比較できる。また、集水井工や排水トンネル工では、照明装置を設けることで構造物内の状況を把握することができる。
	抑止工	地下構造物のUAV点検は不向きであり、施設のほとんどが地下構造物となる抑止工は、原則として目視点検が必要となる。ただし、アンカー工の受圧板やアンカーキャップ等の露出部については広範囲を効率的に把握できるとともに、変状がある箇所などは水平写真、俯瞰写真などから変化を把握することができる。
急傾斜地崩壊防止施設(雪崩防止施設含む)	擁壁工等	擁壁工等は家屋に隣接し、家屋の上空を近接して飛行するため、安全性の課題とともに飛行許可申請等の手続きが煩雑となりUAV点検は不向きであるため、目視点検が必要となる。
	法面工	UAV点検が効果的な施設で、施設や斜面の全体像を効率的に把握することが可能である。また、アンカーキャップや法枠など施設の変状がみられる箇所については、家屋から適切な距離をとった上で、水平写真、俯瞰写真などを撮影することにより、時期的な変化を的確に比較できる。なお、都市部での飛行では、改正航空法に伴って点検ごとの飛行許可申請や地元住民の理解を得る措置などが必要となる。
臨時点検		地震・豪雨後に実施される臨時点検はUAV点検が効果を発揮するケースで、広範囲を短時間で、かつ安全に被災状況等を確認できる。飛行では、ウェイポイントフライトによって、垂直写真、水平写真、俯瞰写真、パノラマ写真などの画像を得ることができる。ただし、「目視外飛行」となる場合は、改正航空法に伴い飛行許可申請等の手続きが煩雑となる。

(2) 点検データを一元管理すると共に、点検データの整理や調査報告様式への出力を容易にする電子台帳の開発

砂防施設の点検台帳は多くが紙媒体でのデータ管理となっており、電子化が必要である。一方、各種点検データ取得はデジタル写真データや動画データ、あるいは点群データなどの3次元データなど、電子化が進んできたが、調査報告のとりまとめ様式は紙媒体での出力を想定したものとなっており、データ管理状況とちぐはぐであるだけでなく、とりまとめに人的な手間を要しており、省人化のためにはこれらデータの取り扱いや台帳とりまとめにかかる手間を排す必要がある。そのため、過去の砂防施設台帳データや新規に取得したUAV等による点検データを蓄積・管理する電子プラットフォーム(台帳)について試行的に作成し、省人化寄与度について検討を行った。

2. 点群データを用いた変状自動抽出の検討

変状を自動で抽出するシステムを後述するデータプラットフォームに実装することを目的として、2時期点群の差分解析により、砂防施設の欠損や摩耗・洗掘を自動抽出する手法について実験を行った。

(1) 変状自動抽出の流れ

点群を用いた変状の自動抽出の流れを図-2、図-3に示す。まずUAVによる撮影により得られた画像データから、SfM処理によって点検対象となる砂防施設を範囲に含んだ3次元モデルを作成する。次に、2時期のデータ間で不動点となる平面、即ち砂防堰堤の部分をRANSAC法と呼ばれる手法で推定し、当該部分を分割して抽出する。次に、点群を2時期のデータで比較するために、ICP法での位置合わせ(レジストレーション)を行う。最後に点群

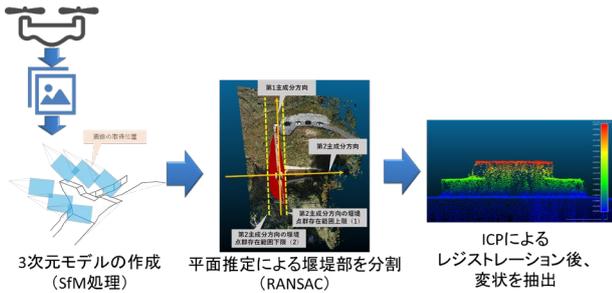


図-2 UAV点検の流れ

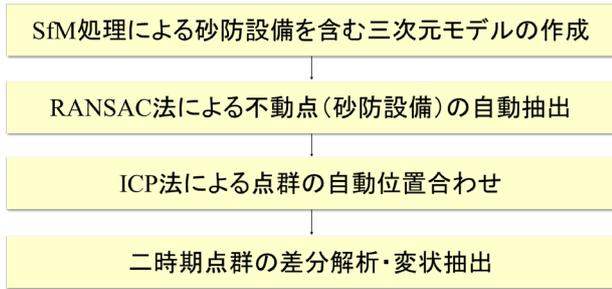


図-3 UAV点検における変状自動抽出のイメージ

同士の差分を解析し、変状部分を抽出する。これらの流れを自動で行うことが可能かどうか、検討を加えた。なお本研究においてはこれらの第1段階となる3次元モデルの作成自動化については、十分に実用化が可能な既知の技術として、検討を行わない。

(2) RANSAC法とICP法による砂防施設の自動抽出と点群の位置合わせ

まず、2時期の点群で小さな変状を正確に抽出するためには、差分解析の前に、点群同士の位置ずれを最小化しておく必要がある。本研究においてはこの作業を自動で行うことができるかどうか、データ処理方法としてICP (Iterative Closest Point) 法を採用した。これは、3次元空間中の点の集合が2つ与えられた時について互いに重なるように各点を移動(レジストレーション)させるもので、最近接点との平均二乗誤差が最小になるように、回転と平行移動を繰り返し、自動で位置合わせを行うものである。なお、本手法で位置合わせを行う際には、2時期でほぼ変化のない不動点を指定する必要があることから、砂防施設の構造体がそれにあたると考え、点群から人工的な平面形状を抽出可能なRANSAC (Random Sample Consensus) 法により、砂防堰堤の特に人工物平面を自動抽出することとした。本手法は、観測地に外れ値が含まれているときに、外れ値の影響を抑えることを目的としたロバスト推定と呼ばれる方法の一つで、観測値からランダムにサンプリングを行ったデータの中から最適なパラメータを推定する処理を繰り返し、その中で最良の推定結果を出力する方法である。本研究では人工物平面を抽出するため、多数の点群の中から平面の存在を仮定した上で、ランダムに抽出した3点から仮の平面を生成し、



図-4 RANSAC法による砂防設備の抽出結果

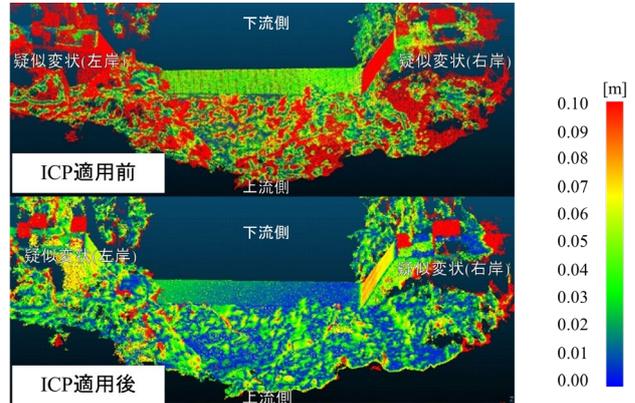


図-5 点群を回転させた場合の差分解析結果 (上段:ICP適用前, 下段:ICP適用後)

その平面から一定距離内の点数を数えることを繰り返し、点群内における平面を高速に得る処理を行った。得られた抽出結果の例を図-4に示す。

また、本研究では作成された2時期の点群の位置情報が大きくずれていた場合にも、同手法が有効であることを示すため、元の点群の3次元位置を手動で1.6°回転させ、擬似的に変化のある点群を作成した。この点群データを用いてICP手法により位置合わせ及び差分解析を行った結果を図-5に示す。ICP手法による位置合わせを行わなかった場合には全体的に0.1m以上の差が生じているのに対し、ICP適用後には全体的に誤差が軽減されていることが確認された。

これらの点群に対する処理は機械的に実施される手法であることから、後述するデータプラットフォーム等における処理ソフトウェア等に組み込むことにより、自動化が可能であることが確認された。

(3) 2時期点群の差分解析による変状抽出

砂防堰堤周辺に変状(袖部の欠損等)を想定した段ボールを配置した状態と、配置前の状態とで、点群を作成し、上記の処理を行った上で差分解析による変状抽出をテストした。図-6に差分解析結果を示す。点群同士の差が10cm以上ある部分を赤色で着色しているが、疑似変状に見立てた段ボールが正確に抽出されており、加えて、前後で変化がないと思われる周辺の部分について、若干の着色がある部分も見受けられるが、概ね変化がない平面として抽出されていることが分かる。これにより、前

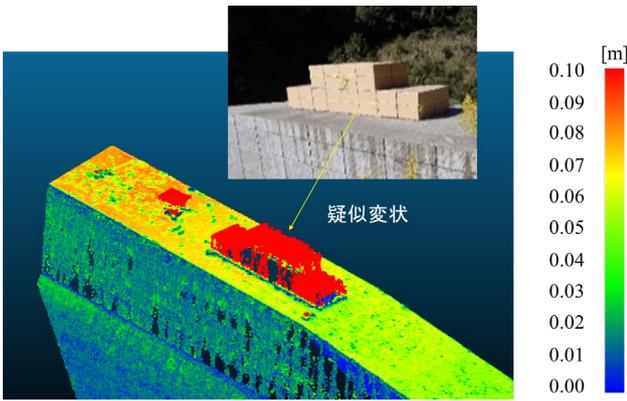


図-6 2時期点群データの差分解析結果

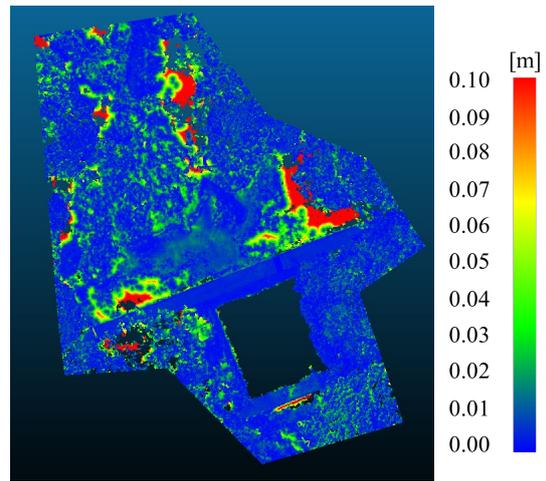


図-8 ICPレジストレーション後の差分抽出結果

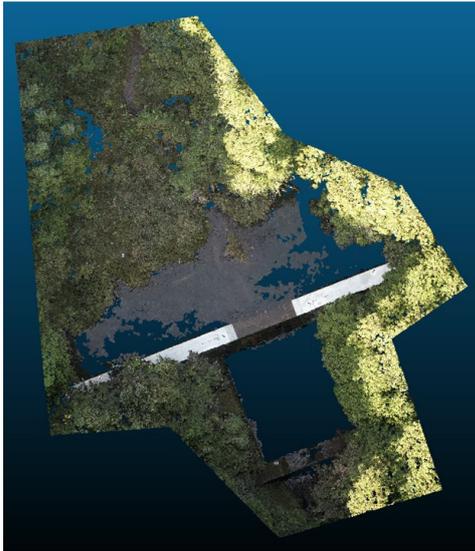


図-7 堆砂敷変化抽出に使用した点群

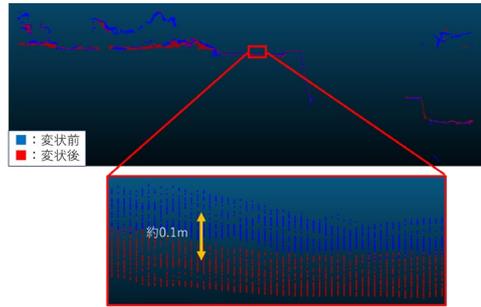


図-9 ICPレジストレーション後の断面例

後の点群をほぼズレなく、自動的に処理する手法により比較し、変状を抽出することが可能であると確認された。

3. 点群データを用いた堆砂量自動算出の検討

(1) 解析手法

砂防堰堤における堆砂敷の変化について、点群データから自動で抽出・算出するための実証を行った。解析手法は、第2章に示す、変状の抽出手法と同様に、「UAVによるデータ取得」、「SfM処理による3次元モデルの作成」、「2時期点群の位置合わせ」、「差分解析」の順とした。

(2) 解析結果

解析には、第2章第2節で砂防施設を自動抽出した点群を使用した。簡単のため手動で範囲を区切った後、解析に使用した点群を図-7に、ICPレジストレーションを行った後に差分抽出を行った解析結果を図-8に、ICPレジストレーション後の断面図の例を図-9に示す。なお、今回は堆砂域に擬似的に段ボールを設置することにより精

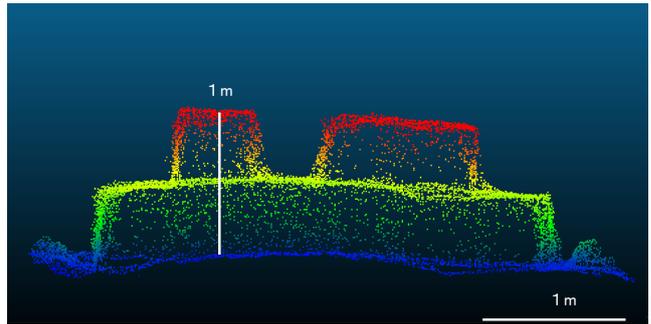


図-10 疑似変状の抽出状況の例

度を検証した。疑似変状の抽出状況を水平で見た図の例を図-10に示す。結果として、ICPレジストレーションを行った点群の比較では、2時期点群の不変点の差分は数cmオーダーと、十分に小さくなることが分かり、加えて堆砂域における地形変化、即ち堆砂量変化をほぼ正確に把握することが可能であることが分かった。

4. UAV点検データを一元管理する電子台帳の開発

現在主流である目視点検による砂防施設の巡視データと、UAV点検による巡視データの双方を蓄積させるためや、維持管理上比較的頻繁に参照すると思われる砂防施設台帳等の情報を一元管理し効率的に活用するための、電子台帳の開発を行った。電子台帳の様式作成にあつ

ては、過年度に実施された設備点検台帳の様式を参考にした。

(1) 台帳により蓄積される情報の整理

UAV概略点検、即ち画像による点検に際し、取得されることが必要かつ蓄積されることが望まれる情報を整理した。整理にあたっては、SfM解析による点群データやオルソ画像作成を視野に、近年のUAV汎用機における自動操縦ルート設定方法も踏まえ検討を加えた。電子台帳の様式としては、砂防設備点検票、異常箇所概要図、写真帳、変状進行性確認票のほか、フライト諸元等とし、フライト諸元には、写真撮影の際の3次元座標とカメラ方位角のほか、オルソ撮影のためのオーバーラップ率・サイドラップ率・カメラ角度・飛行高度・地上解像度を記録するものとした。これにより、過年度に撮影された画像と画角その他情報が同等の画像を蓄積することが可能となり、効率的になると考えられる。

(2) 電子プラットフォームの試作

前述した電子台帳を自動で出力可能かつ、点検結果の蓄積・閲覧が可能となる電子プラットフォームを試作した。UAV画像を取り込んだ際に、画像の位置情報EXIFデータ・飛行ログデータの取り込みが可能であり、画像の位置情報と過年度の類似画像抽出機能やユーザーによる分類機能を実装した。また、既往の3次元データビューアの機能も活用し、点群を表示し、画面分割による比較、標高色分け等が可能にした(図-11)。加えて、砂防施設の3次元モデルを表示すること及び、モデル上に3次元ピンを設定し、変状の状態、変状写真をピンと紐付けて管理できる機能を開発した(図-12)。さらに、写真情報は整理して管理され、過年度または多時期の画像を比較して閲覧できる機能を実装した(図-13)。最後に、施設毎の台帳をXLS形式で出力することで、手作業による点検台帳に比べ効率性・性能・安定性・視認性が高まるかどうか検討した。

結果として、砂防設備の点検とデータ整理・台帳作成にかかる時間を1施設あたり約70分低減することができた。これは、従来手法によるものと比べ、約37%の時間短縮に相当するものと試算された。また、点検台帳作成労力についてはシステム操作の習熟につれ向上されること、台帳作成・出力の前段階として写真取り込みを行った際に適切に写真をグルーピングし、グループ名を適切に設定しておくことなどの習熟性が重要であることが分かった。また、実際に運用を見越してシステム構築する際には、扱うデータの重さが問題になる可能性があることから、端末性能に留意することや、サーバを設置するなどして適切にデータ管理を行うことなどが必要であることが明らかになった。視認性については、3次元空間で砂防施設や変状等を可視化することで、点検情報や変状の視認性が高まり、変状の把握や過年度の結果との比

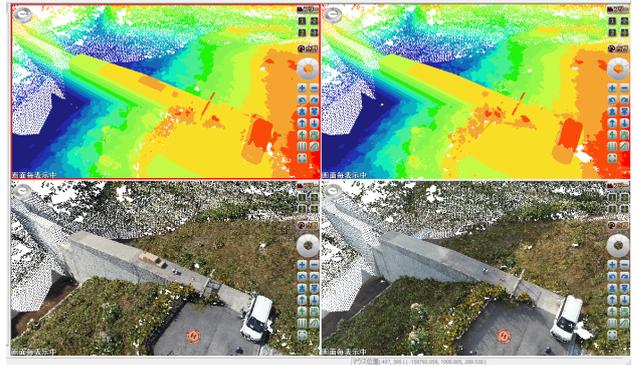


図-11 点群表示機能の例

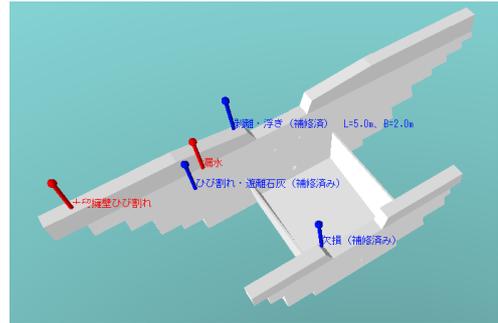


図-12 砂防堰堤表示と3次元ピン表示の例



図-13 写真比較表示画面

較に有効であることが明らかとなった。

5. おわりに

本研究によりUAV点検を効率化するためのデータプラットフォームならびにICPを用いた変状自動抽出技術の有効性を確認できた。今後の課題として、事務所実装のためのシステム開発、運用を想定したデータプラットフォームの機能改善、GNSS精度の低い点群への対応検討や堆砂敷の実際の変化に対して本手法を適用し実用性の確認をすることなどが考えられる。

謝辞：本検討課題においてはアジア航測(株)に受託いただきご尽力いただいた。また、国土技術政策総合研究所土砂災害研究部の竹下航氏(現：紀伊山系砂防事務所)、水流竜馬氏に有益なご意見をいただき検討を進めることができた。ここに感謝の意を表します。

参考文献

1)国土交通省砂防部保全課：砂防関係施設点検要領(案)；令和4年3月