

多様な高度縮尺の空中写真を用いた SfM多視点ステレオ写真測量による 和歌山大学圏域の人工地形変化抽出の試み

—誰でもできる低コストプロセス
ツールキットの構築に向けて—

原 祐二・登城 太智

1. はじめに

2010年代後半から、Agisoft社Metashape(旧PhotoScan)をはじめとした多くのSfM(Structure from Motion)多視点ステレオ写真測量(以後、SfM-MVS)ソフトウェアの急速な普及により、リモートセンシング自体の非専門家であっても自己取得したドローン空中写真や過去の国土地理院・林野庁・米軍撮影の航空写真から数値表層モデル(以後、DSM)の構築が可能となってきた¹⁾。いくつもの既往研究が多様な取得画像をもとにSfM-MVSを試行し、主にその鉛直誤差に対する考察を加えている。例えばドローン画像においては、撮影カメラ機材と地上標定点の分散状況が生成DSMの誤差に与える影響を吟味し、地形条件によって標定点の取り方に差異が生じうることを予見している²⁾。また、既存の過去の国土地理院航空写真(1975年撮影、縮尺1:10000)を用いて、傾斜地棚田の圃場整備前の旧地形の抽出を試み、最終的な鉛直誤差が1.45mとして報告がなされている³⁾。同様の研究は本報告でも対象とする大阪南部の一部地域でも試行され、一写真あたり24点程度のコントロールポイント(以後、GCP)が、生成されるDSMの精度を担保していることを論じている⁴⁾。その高い即応性により地震直後の地形変位計測の試みもなされており⁵⁾、土砂災害後の土量計測にも活用されつつある⁶⁾。そして高解像度のドローン画像を活用した土木工事の省力化にも大きく貢献している⁷⁾。

ところで、2021年7月3日に発生した熱海市の盛土起源の土石流被害により、改めて人工地形による災害誘発に衆目が集まり⁸⁾、国の要請を受け各自治体が盛土再点検を火急に行うなど、過去地形の効率的な検出方法が喫緊の課題となった⁹⁾。国土交通省は新旧2時期の既往の数値標高モデル(以後、DEM)の差分により応急的な大規模盛土抽出予察調査を行ったものの¹⁰⁾、これにより抽出される地区は概ね2000年以降の盛土に限られている。その後独自に盛土総点検に取り組んだ地方自治体も多いものの、現場では大縮尺の旧地形図の散逸が問題として表出した。例えば著者が環境部局の委員を拝命している関西圏の自治体においても、かつてはおそらく独自整備も行っていた都市計画基本図などもそのほとんどが処分されている状況にあり、結局は大阪府公文書館にマイラー原図のみが存在する1961年の1:3000地形図に依拠することになったとの報告をいただいた。それまでの地形図の多くが平板測量により作製されていたのに対し、この大阪府の1:3000地形図は空中写真測量により作製された高精度地形図の最も古いものの一つであり、原地形把握の根拠資料として価値が高い¹¹⁾。ちなみに著者の研究室においても、当該地形図を過去の土地利用や地形判読に常用しており¹²⁾、今後のさらなる活用を見据えて、公文書館から特別許可を得て、全図大判スキャニングを完了している。とはいえ、この地形図を活用できる自治体は、当然地形図がカバーしている範囲に限定され、範囲外の自治体はやむなく過去の空中写真からの標高取得を航測関連会社に緊急発注するという対処療法がなされ、日本のデジタルオープンアーカイブの未進捗を露呈する機会となってしまった。

実は、国はかねてから宅地耐震化推進事業を進めてきており、国土交通省は2008年より大規模盛土造成地の変動予測調査を開始、国土地理院はこのための「人工改変地形データ抽出のための手順書」を作成公開している¹³⁾。これを受け、各自治体では大規模盛土造成地マップの作製を進め、2020年度末の段階で全国全ての自治体において当該マップを公開済の状況にあった¹⁴⁾。前述した著者がインタビューにより情報を得た自治体でも、旧版大縮尺地形図¹⁵⁾や空中写真¹⁶⁾を活用し、おおよその盛土住宅地の分布状況をPDFダウンロード型の地図として公表している。こうした散発的な既往調査が時系列で空間情報として集約されてきていない故に、熱海市の事案により改めて急遽

多様な高度縮尺の空中写真を用いたSfM多視点ステレオ写真測量による和歌山大学圏域の人工地形変化抽出の試み

の盛土点検対応がなされたという見方もできるが、著者個人のネットワーク内の現場自治体担当者からは、国の号令に振り回されるほやきも聞かれなくはない。そうした中、最近になって国土地理院の地理院地図に、ベクトルタイルベースの人工地形が集約されるようになり¹⁷⁾、著者も国土地理院関連委員会の場や、私信を通じて今後とも拡充を図るとの情報を得ている。人工地形は時系列変化をともなうものであり、各地点での単発調査であれデータベースに組み入れていくことは、防災減災の観点から極めて好ましいといえよう。しかしながら、熱海市事案のような突発対応が求められる場合は、独自に合理的効率的に人工地形を即応的に把握する必要性は高いと考えられる。

その際、前言を翻すようだが、旧版大縮尺地形図判読が、空中写真によるDEM構築よりも、精度的¹¹⁾労力的に優れているとは限らない¹⁸⁾。大阪府公文書館の旧版大縮尺地形図にしても、マイラー図幅の一部が摩耗していたり、とりわけ重要な図郭四隅の緯度経度値が経年劣化で判読しにくくなっていたりする場合もあり、著者の研究室でも幾何補正や等高線判読に困難をともなった場合が少なくない。これに比べると、国土地理院の空中写真閲覧サイト¹⁹⁾から場所を同定可能な形で、400dpi解像度でフリーダウンロードできる過去の空中写真、特に人工地形改変が進行する以前の1950年代の米軍大縮尺空中写真や、1960年代初頭の国土地理院による最初期の大縮尺空中写真は、SfM-MVS技術を用いることで、省力的かつ広範囲の原地形DEMを構築できる可能性を持つといえる。さらには、地域によっては、林野庁が撮影した1950年代の大縮尺空中写真も購入可能なことが判明しており、当研究室でもそれらを用いて紀伊半島の棚田群を抽出してきたところである²⁰⁾。

以上のように、多くの既往研究や各機関のアーカイブを渉猟しつつ、著者も地形改変に関連する研究教育でのSfM/MVSの積極的活用を志向してきた。とりわけ、マンパワー不足により教員一人当たりの教務負担が増大傾向にある中、既存の測量やGIS関連実習をうまく有機的に相互連関させながら、ドローン空撮体験、航空写真・衛星画像分析、SfM/MVSを教育システムの中で運用してきている²¹⁾。しかしながら、地方国立大学の現場教員の私感として、既往の精緻な誤差検出研究が、即応性と多様な高度縮尺の対象域を前提とする地域生態系関連実習において、演習プロセス構築上大いに寄与して

いるとは言い難い状況にあると思われる。すなわち、和歌山大学が立地する地方都市郊外や、地域生態系調査研究の現場となりうる大阪都市圏、和歌山圏域の各研究教育対象地区において、建築土木施工で要求される cm オーダーの測量水準は必ずしも必要としない。むしろ、現場の人工地形環境の概要把握、すなわち原地形情報との差分による切り盛り分布の見える化だけでも、人間の地形改変能力の大きさを自然地形プロセスのそれと比較したり、地盤安定性の観点から防災減災上の課題を検討したり、さらには人工地形と植生遷移や地域生態系の発現状況を考察することが十分に可能であると実感している。もちろん、成果公表の際は、そうした概数情報による地形環境の可視化成果は、きちんとその精度上の問題点を明記した上でなされなければならない。そして、10年近くこの課題と向き合う中で、研究教育目標と、対象とするランドスケープの空間規模と必要精度の間には、複数パターンがあり、SfM/MVSの活用において対象地区タイプにより概ね作業工程のツールキット化が可能になってきている。こうした背景をふまえ、本論では、地方国立大学である和歌山大学の教育研究における SfM/MVS の階層的な人工地形環境への適用を、その作業工程を具体的に示しながら、国土地理院の過去空中写真(マクロスケール)と自主定期撮影のドローン画像(ミクロスケール)を事例として紹介する。

2. 対象とする二地区

本報告では、著者が本務先における研究教育で即応的に準備した SfM-MVS プロセスから、そのデータソース、領域範囲、空間解像度が異なるものの、利活用率が高いと思われる 2 事例を紹介する。すなわち、大阪府北部領域と、和歌山大学システム工学部至近の切土面に対する適用である。大阪府北部領域を選定した実用的な理由は、当該領域が国土地理院の地形分類図の非カバーエリアであるためである。山と海が近接している近畿圏の中長期的な土地開発にともなう地形変化を分析する上で、大阪北部丘陵地・山地の開発域の地形地理情報が欠損しているのは非常に残念であるものの、ここで報告するプロセスにより自主構築を試みる価値は大きい。なお、大阪南部領域も土地条件図が長らく欠損していたが、筆者が国土地理院の地理情報利用促進に関

多様な高度縮尺の空中写真を用いたSfM多視点ステレオ写真測量による和歌山大学圏域の人工地形変化抽出の試みする委員を務める中で問題提起し続けたことも多少は功を奏したのか、2023年6月1日に公開されるに至った²²⁾。

一方、和歌山大学システム工学部至近の切土面であるが、ここは2012年4月の南海和歌山大学前駅の開業に合わせ、2009年から徐々に整備されてきた(図1)、和歌山大学栄谷キャンパス北東端から大学敷地内を北上し藤戸台住宅地街路までを接続する大学から新駅までの短絡路途中にある(図2)。図2



図1 2010年4月18日撮影の対象切土部

外来種ナルトサワギクが繁茂している。岩盤に植栽されたソメイヨシノヤクスギの苗の支柱が認められる。



図2 2022年11月11日空撮画像(画面下部が南、上部が北)

南北接続路沿いの画面中央が対象切土部、その南側は学内グラウンド改修工事で発生した残土置き場となっている。

から、自然の谷凹部を選定して掘り下げた切り通しのように見受けられるが、著者が運用してきた学生地形実習によれば実は元来尾根部で、そこを無理矢理10m近くも切り込んで造成された表土を欠乏した完全な岩盤面である²¹⁾。それは、2010年撮影の図1からも、外来種のナルトサワギクのお花畑状態になっていることから容易に類推でき、そのような岩盤の割れ目におそらくは残部予算で贖罪的にソメイヨシノやクヌギなどの1m程度の苗木が密植されていた。2009年当時は、この岩盤裸地面から植生遷移がいかに生じるのか、純粋な興味から地上植生観測実習を開始、2014年からはドローンを投入して季節毎の空撮も実習内外で実施してきた。そして、現在では当初の予想を善かれ悪しかれ覆す植生の定着もみられており、本報告ではドローン画像を多用したSfM-MVSプロセスによる植生量変化の差分抽出と、著者も委員として微力ながら貢献し、2023年2月に公開された和歌山県のレーザー点群情報(2019年観測)²³⁾を用いた植生高の推定について、プロセス記述重視により説明していく。なお、使用ソフトウェアおよび空間参照サイトは、特記がない限り、Agisoft Metashape Professional version 2.0.1、ESRI ArcGIS Pro version 2.8.3、CloudCompare version 2.11.3、Adobe Photoshop CS 6 (64bit) version 13.0、地理院地図²⁴⁾および同ベクター版¹⁷⁾である。

3. 大阪府北部領域における国土地理院空中写真からの旧地形情報構築

まず、国土地理院の空中写真閲覧サービス¹⁹⁾(なお、このアドレスは地理院地図と一文字違いのURLのため、注意を要する)から、場所と年代を絞り、地形変化抽出のための旧地形復元という目的に合致する空中写真を検索する。ここで注意しなければならないのは、国有林野を中心とした山岳地帯は林野庁により空撮が行われてきており、ごく一部が「他機関の情報」として地理院地図に掲載されるようになったものの、2023年9月現在でも、閲覧サービスや地理院地図にて情報提供がなされていない。著者もこの林野部の欠損について、国土地理院に照会したが、たしか2020年当時で林野庁の空中写真のオルソ化(正射投影モザイク画像構築のこと)に着手しているとの私信を得、その後1-2年にて登山家が愛好するような急峻な山岳地帯に関し、最新の林野庁撮影のオルソ画像が掲載されるに至った。関連し、より古い年代のオ

多様な高度縮尺の空中写真を用いた SfM 多視点ステレオ写真測量による和歌山大学圏域の人工地形変化抽出の試み

ルソ画像が供用されるのであれば、そのプロセスで当時のDEMも構築されるのではと推察し、著者が委嘱をいただいている地理空間情報活用推進に関する近畿地区産学官連携協議会²⁵⁾などを通じて照会してきているが、古い時代のDEMは精度の問題から作製利用はしていないとの回答を得ている。このことから、自主DEM構築の意義は今もって高いことを実感した。

以上より、今回事例対象とした大阪府北部領域に限らず、旧地形の復元を試みる際は、現在は都市縁辺部に位置している領域であっても、林野庁撮影管轄エリアであることが少なくなく、大縮尺かつ地形改変が進行する前の現在の都市郊外地域の空中写真は候補が少ないことを念頭に置く必要がある。実際、大阪府北部領域においても、土地開発前の空中写真として、1961年1:10000および1963年1:20000が選定された。これらより前の時期としては、米軍による空中写真があるものの、縮尺(およそ1:44000)や色調精度の問題があり、一方1961年、1963年空中写真は未だ大規模開発が及んでいない土地利用を呈していたことから、後者を選定した。米軍撮影の空中写真は、主要都市域においては大縮尺(1:10000)かつ高精細な画像がダウンロード可能であり、地理院地図にもオルソ化された地図タイルとして掲載されている。しかし、戦後から高度経済成長期にかけて、都市圏が外縁部へ拡大するにつれ地形改変が連続的に生じていく領域においては、本事例報告でも利用する1960年代前半の大縮尺空中写真(同様に地理院地図にも地図タイル掲載されている)、すなわち空中写真撮影が米軍管轄から日本へと許可された時代に広域撮影された写真²⁶⁾に依拠することは多いと思われる。

ここで、先に、国土地理院の空中写真ダウンロード時の注意点を掲出しておきたい。まず当然のこととして、可能な最高解像度の400dpiにてダウンロードすることが重要である。なお、1200dpiの空中写真は別途発注することで入手可能ではあるが、これまでの経験上、旧地形復元には400dpiのフリーダウンロード可能なバージョンで十分であると考えている。そして、写真の撮影ラインに沿って、連番で抜けがないように対象エリアをやや広く覆う形で全画像取得する。この際、補間撮影ラインの画像や、別時期別縮尺の写真を混合しないことが重要である。混合して今後説明していく作業プロセスを経た場合、図3に例示するような明らかにソースによる高度エラーが生じるこ

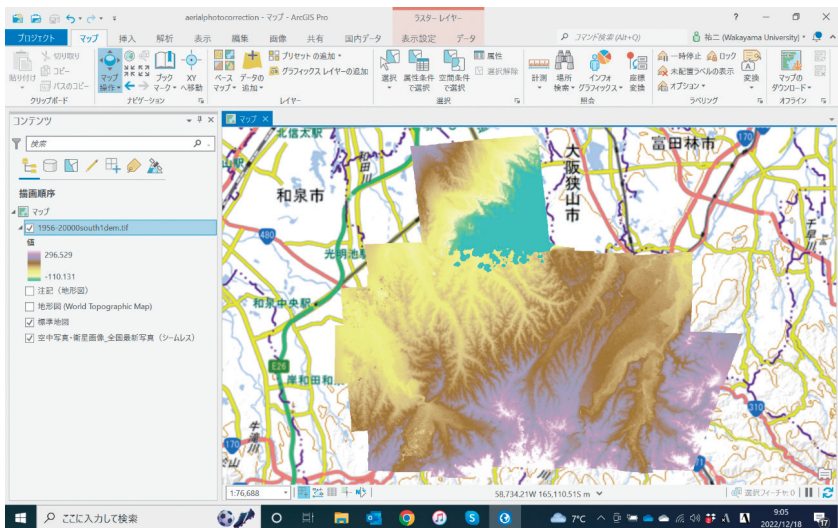


図3 異なる撮影ライン・縮尺・年代の写真を混合して発生した標高エラーの例
大阪府南部領域の事例。これでは地形改変抽出には役立つ。

とが多い。従って、撮影時の航空機の連続撮影写真を網羅することが必要条件となるのである。これらを勘案の上、本事例地域では、1961年1:10000空中写真85枚(総ファイル容量150メガバイト)および1963年1:20000空中写真86枚(総ファイル容量172メガバイト)を分析に用いることとなった。ここで2時期に分割して選定した理由は、1961年1:10000空中写真が事例対象地南部しかカバーしていなかったため、追加にて1963年1:20000空中写真を使用することとしたためである。逆に、1963年の空中写真は対象地南部をカバーしておらず、両写真群を利用することとなった。以後の作業工程では、1961年写真群と1963年写真群を独立フォルダに格納して取り扱い、旧地形情報の最終出力に至るまで混合利用をしないこととしている。

次に、ダウンロードした画像をここではPhotoshopにより、写真周辺の情報黒枠をトリミング削除し、かつ可能な限り画像の南北方向を整合させておく。これは角度一度単位での整合という意味ではなく、ほぼ正方形を呈している空中写真の四辺を90度刻みで回転させ、写真画像を地理院地図とも比較

多様な高度縮尺の空中写真を用いた SfM 多視点ステレオ写真測量による和歌山大学圏域の人工地形変化抽出の試み

しながら、上辺が北側に位置するように配置することを指す。なお、この回転作業自体は、Windows のエクスプローラー上でも、当該画像を右クリックし、右回転か左回転を数クリックすることで対処可能である。ところで、Photoshop によるトリミングを、一枚ずつマニュアルで行うのは膨大な時間と労力がかかる。ここではアクション機能とバッチ機能²⁷⁾を援用して自動処理により対応した。この際も、トリミング前のオリジナル画像の格納されているフォルダとは別に、トリミング後の画像を集約するフォルダを新規に作成して対応した。こうした自動処理豆知識の自己集積が、ビッグデータ化していく空間情報の解析にも非常に有効だと日々感じている。関連し、こうした処理を通じて、ファイル容量が倍々で増えていくことも多い。そして、高速処理を担保するため、高容量の SSD、特に M.2 タイプの SSD を、システム稼動にも、データ解析時にも常用するようになってきている。そして、別途バックアップ用の RAID 構築した HDD サーバーも運用している。

こうして下準備が完了した空中写真を、Metashape によりオルソ化、そして位置情報の附与、高度情報の抽出と精度検証を進めていく。具体的には、まず、Metashape の「ワークフロー」リボン下のプロセスを、上から順番に、

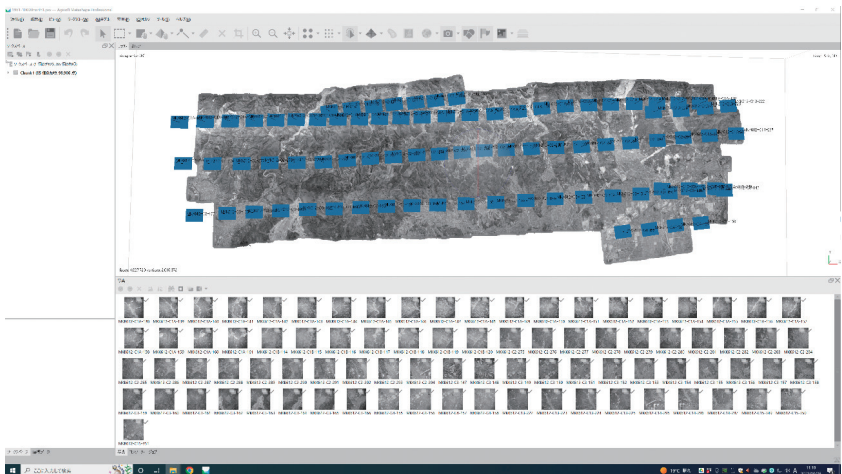


図4 Metashape の第一工程例

まずは緯度経度情報を附与する前に、いったん空中写真をモザイク化する。

「写真を追加」、「写真のアラインメント」、「メッシュ構築」、「テクスチャー構築」まで進める(図4)。操作自体はそれぞれほぼ数クリックで完了するが、処理時間はかなり要する。処理時間は写真枚数に加え、使用PCの性能に依拠し、特に相応のメモリーとGPUを搭載していることが肝要である。著者の場合、DELLのワークステーションに200ギガ強のメモリーとNvidia Quadro T600グラフィックボードを搭載して本報告のプロセスに臨み、それ程時間ストレスを感じたことはなかったものの、それでも1時間程度の時間を要するプロセスは生じた。

図4の段階まで至ると、空中写真がカバーするおおよその領域が把握され、附与する位置情報を持つソース地図との目視比較が容易となる。ここでは、汎用性の高い地理院地図を用いる。具体的には、図5に示されているように、2画面ディスプレイを活用し、地理院地図と作業途上のMetashapeを別画面で表示し、両方に共通するGCPを目視判読により抽出、各GCPの地理院地図の座標および標高値を、Metashapeの新規マーカーの座標・標高として打ち込んでいく。この際、Metashapeのマーカー群の座標系は、座標データウィンドウ右上の設定ボタンより、JGD2011地理座標系を選択した。GCPは多ければ多いほどよいというわけではなく、画面周辺部から空間均等分散を考慮しつつ領域全体にむらなく追加していくことが肝要である。ここでは、最終的に、1961年1:10000空中写真(85枚のモザイク)では13ポイント、1963年1:20000空中写真(86枚のモザイク)では15ポイントの新規GCPマーカーを附与した。その後、全マーカーのチェックボックスにチェックを入れ、再度、前述した「写真のアラインメント」以降の作業工程を進めれば、最終的にDEMが出力できるようになる。ここで、「写真のアラインメント」から再構築せずに、マーカーにチェックを入れた段階で、座標ウィンドウの「トランスフォームを更新」ボタンのワンクリックでも、モザイク全体に位置情報が附与されるが、経験上、最終的に表示される全マーカーの誤差は、「写真のアラインメント」から再構築した方が正確であることが多い。これは、とりわけソース写真が何ら位置情報を保有していない場合に該当する。なお、このプロセスは、座標ウィンドウの「カメラを最適化」ボタンでも代用できるようだが、著者の場合、「写真のアラインメント」からやり直すことが常であ

多様な高度縮尺の空中写真を用いた SfM 多視点ステレオ写真測量による和歌山大学圏域の人工地形変化抽出の試み
る。一方で、次章で説明する EXIF に GPS 情報を含むドローン画像の場合は、「トランスフォームを更新」でも差し支えないという見解もある²⁸⁾。最終的な全マーカー誤差は、1961年1:10000空中写真で0.000662m、1963年1:20000空中写真で0.000075mと表示された。また、最終出力された旧DEMの解像度は、初期設定を維持した結果、1961年で2.71518m、1963年で5.31545となり、水平方向の解像精度に問題はないと判断された。

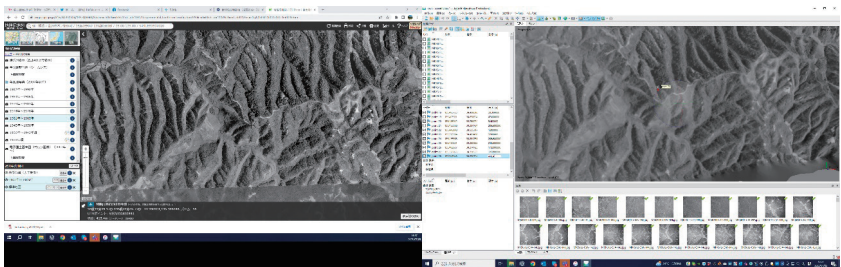


図5 座標値の附与工程

GCPを目視判読し、地理院地図の座標・標高値をMetashapeの新規マーカーに属性格納する。大画面のデュアルディスプレイの配備が作業効率化に有効である。

最終出力された旧地形DEMと、国土地理院の最新の10mDEM(基本測量のDEM10B)との差分図を、図6・7(1961の1:10000ソース)に例示する。また、差分ヒストグラムを、図8として示す。ここで、両旧DEMとも、新旧空中写真判読から地形変化が認められない領域でのランダムポイント50地点で概ね数m以内の誤差であった。しかし、旧DEM縁辺部の誤差は10m程度生じる場合も認められた。人工地形自体の抽出は、図7に示されているように、概ね5m以上の変化であれば十分可能と判断された。

4. 和歌山大学接続路切土面の植生量変化

本章では、ドローン画像の自己取得による植生量の時系列変化について、その作業工程を中心に記述する。本対象地では、2014年から空撮記録を開始したが、初年度の2014年のみCanonのミラーレスカメラにGPSを装着し、工場組立された大型マニュアルドローンにて目視内機械シャッター撮影を行っ

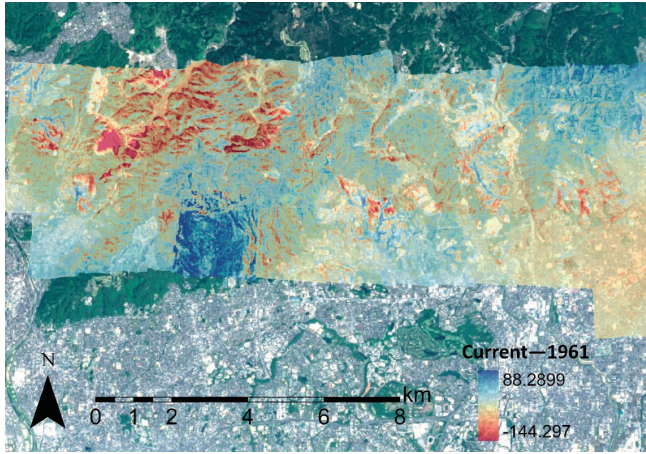


図6 新DEM－1961DEMの差分図例

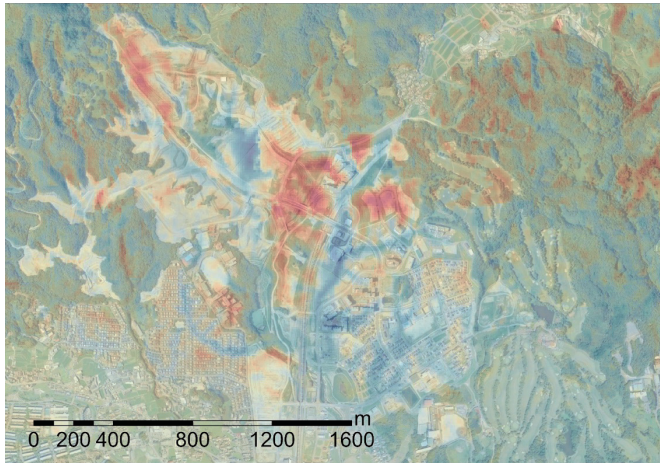


図7 図6中、土地開発による地形改変が明瞭な彩都西駅付近の拡大図
 かつての尾根（ここでは赤色側）と谷地形（ここでは青色側）が復元できている。

た。後述するように、この際の空間精度は写真測量にたえるものではなかった。その後、2015年にDJI社のPhantom 3、2016年にMavic Pro、2018年にMavic 2 Proを導入、DJI社の測量用自動航行アプリGS Proにて領域撮影を

多様な高度縮尺の空中写真を用いた SfM 多視点ステレオ写真測量による和歌山大学圏域の人工地形変化抽出の試み

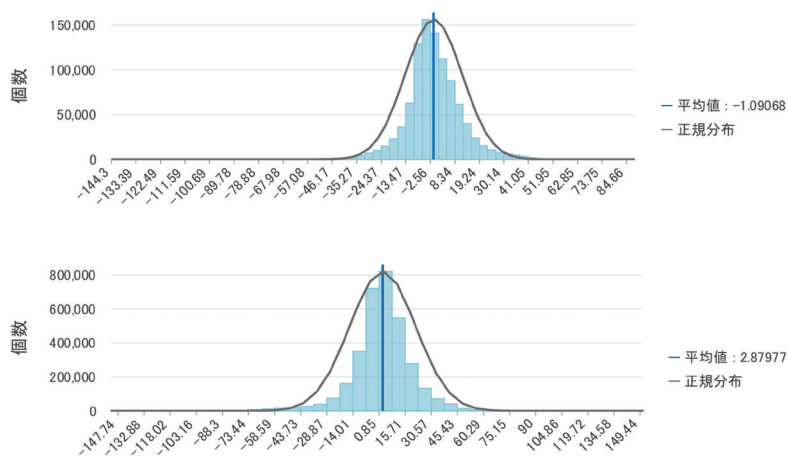


図8 新DEM-旧DEMのヒストグラム（上が1961、下が1963）

演算解像度は新DEMの10mであり、縦軸は10mセルの個数を示している。平均値近くの集中は、旧DEM自体の誤差を示し、平均値より離れた場所は人工地形（ここではマイナスが切土、プラスが盛土を示す）を反映している。

毎年季節毎に継続してきた。なお、最新のMavic 3およびMavic 3 Proも保有活用しているが、こちらはGS Proに非対応となっており、2023年現在でも、写真測量時はMavic 2 Proが主役となっている。これらとは別に、マルチスペクトル画像が取得できるP4 Multispectralも保有しており、GS Proにて運用しているが、事後処理はMetashapeではなく、マルチスペクトル画像処理に特化したDJI Terraアプリを使っているため、本章での説明は割愛する。

GS Proでは一回のオート領域フライトで、最大99枚の写真を撮影することができる。また、後述するように、ドローン画像では航空法により規定された150m以下の飛行高度であれば、粗くても概ね数cmスケールの解像度が得られることから、本対象地域においても高度設定を変数とし、99枚の画像が得られるように、対地高度88.8mにて空撮モニタリングを行っている。撮影時のポイントとしては、タブレットのスクリーンショット機能により、最低一回は高度情報を含むフライト時のGS Pro設定を記録しておくことが肝要である。これにより、詳細なフライトログの分析なしに、事後高度や風況を再

現できる。撮影後のMetashape上での処理であるが、前章で記述した「写真のアラインメント」以降のプロセスとほぼ同様であるため、ここでは詳述しない。国土院空中写真使用時との違いとして、図9のように、写真毎に位置情報がすでに付与されている点がある(図4・5では写真に位置情報属性はない)。この位置情報は、飛行撮影時のドローン機体のGPSを読み込んでいる。ここで留意したいのが、GPS情報は水平精度に比して垂直精度が非常に悪いということである。この改善のため、準天頂衛星²⁹⁾やRTK(リアルタイムキネマティック)の必要性が強調されてきている。しかし、著者もP4Multispectral使用時にRTKの活用を進めてきているが、今もってその恩恵を感じられるほどの鉛直精度向上は認められていない(ネットワーク設定などに問題がある可能性も排除できず、今後とも精査していく)。ましてや、RTK対応のないMavic 2 Proをメイン機として測量用空中写真を撮影する場合、高度情報は10-20m程度の誤差を含むことが常となっている。前章でもふれたように、生成したモザイク画像と地理院地図を比較してGCPをマーカー追加し、その後「トランスフォームを更新」により精度改善を試行することもできる。また、空撮時に地上に複数の既知標高の基準点を設置し、モザイク処理の後それらをGCPとして同様の精度改善を試みることもできる。しかし、とりわけGCPが判読しがたい樹冠に覆われた森林部ではこの手段は有効ではないと感じている。幸いにも本報告での対象地は、林冠密閉された林場ではなく、近接裸地と高度差分がしやすい単木や疎林が主体の領域である。これらもふまえ、全体鉛直誤差の便宜的な補正として、Metashapeの「ツール」、「カメラキャリブレーション」、「GPSオフセット」を活用して、最初に構築したモデルと地理院地図の既知標高点との差分値をもとに、全体を上か下にオフセットして対処している。数cm精度が必要な土木工事での利活用などに比して、生態系の量的把握時においては、オフセット対応でも十分樹高などの情報導出には対処可能と考えている。「GPSオフセット」後に、改めて「カメラのアラインメント」以下のプロセスを経ると、おおそ地理院地図の標高値と画面全体で一致するモデルを得ることができる。その後、必要に応じて、「ツール」、「ポイントクラウド」、「ポイントの分類」により、精度は低いものの、裸地面や森林などに分類する機能が最近のMetashapeには実

多様な高度縮尺の空中写真を用いた SfM 多視点ステレオ写真測量による和歌山大学圏域の人工地形変化抽出の試み

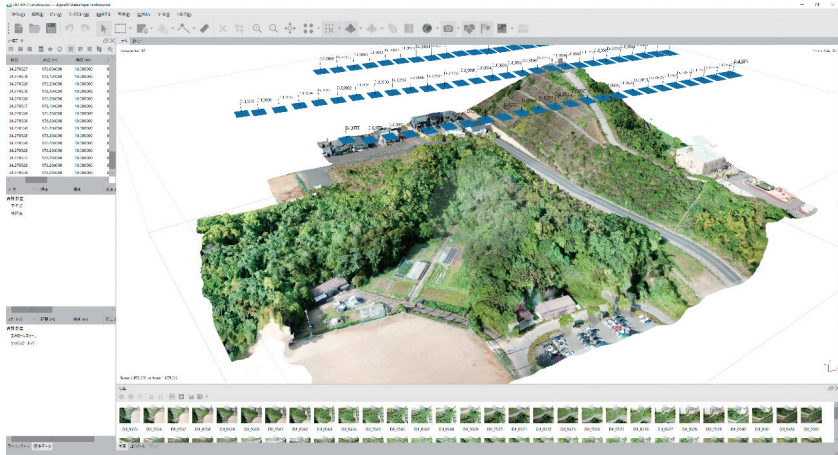


図9 Metashape上でモザイク、三次元化されたドローン画像群
写真のEXIF内にGPS情報を保有している。

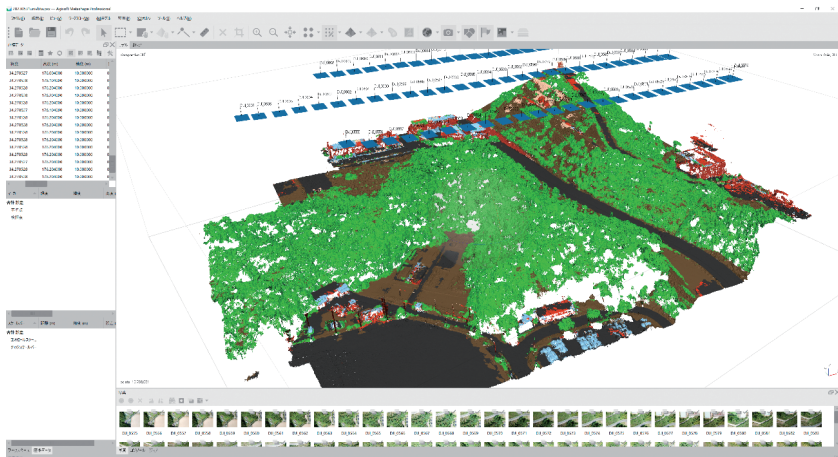


図10 構築したポイントクラウド
地面、植生、建物、路面、車、人工物に自動分類することができる。

装されている(図10)。

このようにして時系列でドローンオルソ画像および植生高を含むDSMをGISに格納した。さらには、和歌山県が公開している2019年のレーザー測量

による点群データ(DSMおよびDEMの二つが存在)もデータとして追加した。ダウンロード直後の点群データはテキスト形式であるため、まずは拡張子を書きかえてCSVファイルに変換する。これを直接MetashapeやArcGISでインポートすると、データが重すぎて解析に進めないことが多い。そこで、フリーソフトのCloudCompareでまず読み込み、LAS形式でエクスポート、それをMetashapeでインポートすると、ポイントクラウドとして分析が可能となる。この一手間は、ビッグデータである点群情報の取り扱い自体、長年の開発スキームの延長線上に存在しているGISソフトウェアは不得手としており、新しい点群に特化したソフトウェアの方が処理速度において優位性があることを示しているように思われる。

これらの作業と並行して、2022年秋季に、著者の研究室に新規配属された三年生の植生調査トレーニングも兼ねて、対象地の毎木調査を実施した。メジャーと測量ポールを用いて、A3サイズにカラー印刷した同時期のドローンオルソ画像を基図として、樹木の位置、胸高直径、樹高、樹種を記録、その後ArcGISにて当該ドローンオルソデータを背景に樹木をポイントデータとして構築した。こうして、現地での観測情報、時系列のドローンオルソ画像およびDSM、レーザー点群のDSMとDEMが、GISに格納された。その後、各画像間の空間誤差を目視判読しつつ、樹冠と近接裸地面との差分判読をベースに、樹木ポイントデータに各年の推定樹高を属性付与していった。

現地調査基図として用いた2022年ドローン画像と樹木ポイントデータを重ねた地図を図11に、樹木の推定樹高変化を表1に示す。また、前述したように最も空間精度が低いと思われる2014年オルソ画像を図12に示した。これらより、水平精度も垂直精度も、遷移初期段階の低木を一意的に自動抽出・属性付与することは困難であることが分かる。しかし、裸地からの遷移初期段階という土地条件においては、目視判読をもとにした、単木として生育している低木の樹冠頂部と、近接裸地面の標高の差分値は、樹木生長量を追跡するに耐えうる精度を持つといえる。表1中の2022年10月20日の現地樹高観測(onsiteと附記された4列目)とSfM/MVSからの推定樹高値(12列目)との比較による平均誤差が全樹木で0.91m、樹高3m以上で1.23m、樹高3m未満で0.43mであること、そして最も確度の高い和歌山県観測のLidarのDSM-DEM

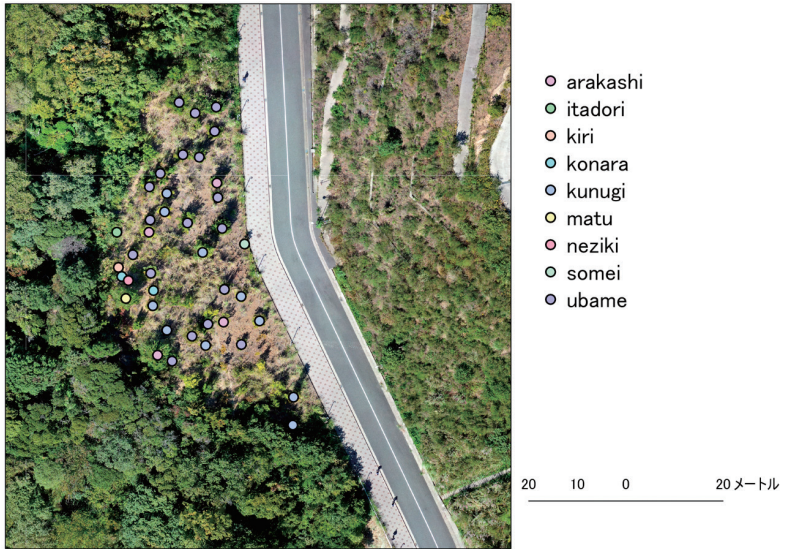


図11 2022年ドローン画像（現地樹木調査基図）と樹木ポイントデータ

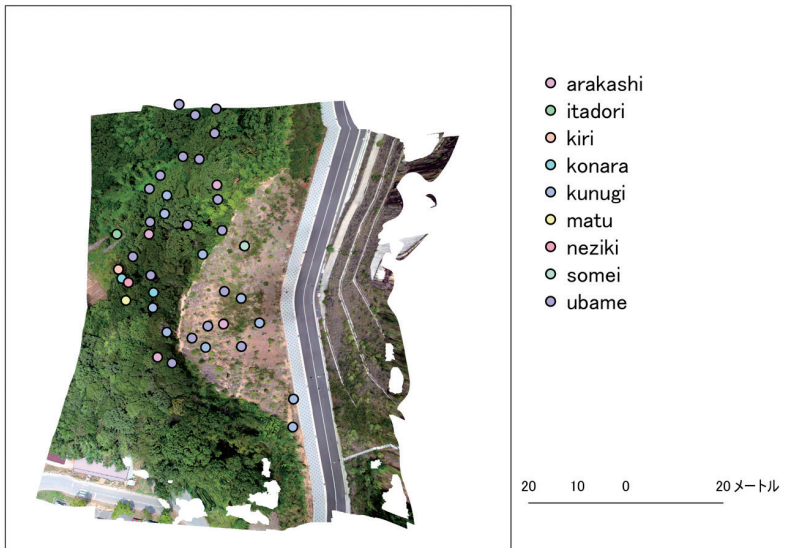


図12 2014初期マニュアル空撮によるオルソ試行と空間誤差

表 1 植生遷移推定量

ID	name	DBH(cm)	height_20221020bnc(tc(m))	height20140722r(m)	0.03	height20161118(m)	uninterpreted	height20170821f(m)	1.20	height20181111(m)	0.90	height20194ldar(m)	0.30	height20201116(m)	uninterpreted	height20210319(m)	1.80	height20221020r(m)	1.90	height20230802r(m)	2.80
1	isomi	2.5	2.70	uninterpreted		uninterpreted		uninterpreted		1.20	0.90	0.30	uninterpreted	1.80	uninterpreted	1.80	1.90	uninterpreted	2.80		
2	ubame	9.5	4.90	0.40	1.40	0.70	1.50	3.20	0.50	3.20	0.80	2.60	3.20	3.50	3.20	3.50	3.90	uninterpreted	3.90		
3	ubame	1.8	1.80	0.20	0.70	0.90	0.90	0.90	0.80	0.80	0.80	0.50	0.70	1.00	0.70	1.00	0.70	uninterpreted	0.70		
4	arakashi	7.2	4.50	0.30	2.10	3.60	3.00	3.60	3.00	3.60	3.00	3.00	3.10	3.70	3.10	3.70	3.90	uninterpreted	3.90		
5	ubame	4.1	3.50	0.05	0.50	1.10	1.60	2.60	2.60	2.60	1.60	2.60	2.40	2.30	2.40	2.30	2.90	uninterpreted	2.80		
7	ubame	2.7	2.30	0.10	1.40	0.80	3.10	3.60	3.10	3.60	3.10	3.60	3.10	2.80	3.10	2.80	3.20	uninterpreted	1.80		
8	ubame	4.8	4.30	0.30	1.60	2.20	1.50	1.50	1.50	1.50	1.40	1.40	1.40	1.40	1.40	1.10	1.50	uninterpreted	1.20		
9	ubame	3.2	2.20	0.06	1.30	1.20	1.30	1.30	1.30	1.30	0.80	0.80	1.40	1.40	1.30	1.30	1.50	uninterpreted	1.60		
10	ubame	4.5	4.00	0.10	1.40	1.50	2.30	2.40	2.40	2.30	2.40	2.40	2.20	2.20	2.30	2.20	3.20	uninterpreted	2.60		
11	ubame	4.1	3.00	0.20	2.10	1.10	2.00	2.70	2.00	2.70	2.80	2.70	2.80	2.70	2.80	2.70	2.70	uninterpreted	2.50		
13	ubame	10.5	4.80	0.10	3.80	2.00	3.90	4.10	4.10	3.90	4.10	4.10	4.10	3.90	3.90	3.90	3.80	uninterpreted	4.30		
14	ubame	4.1	4.40	0.08	1.30	2.10	1.90	2.80	2.80	2.80	2.30	3.40	2.50	3.40	2.50	3.40	2.50	uninterpreted	1.50		
15	kunugi	5.1	3.60	0.04	1.20	2.50	1.80	2.30	2.30	1.80	2.30	2.70	1.60	2.50	1.60	2.50	3.10	uninterpreted	4.00		
16	kunugi	7.6	4.80	0.10	2.60	3.10	3.60	3.10	3.60	3.60	2.70	2.70	2.60	4.50	2.70	4.50	4.10	uninterpreted	2.10		
17	ubame	4.1	4.00	0.20	0.80	1.70	2.00	2.40	2.00	2.40	2.30	2.40	2.30	2.70	2.30	2.70	2.60	uninterpreted	2.20		
18	ubame	4.0	3.90	0.00	1.10	1.30	1.70	1.90	1.90	1.70	1.90	2.40	2.30	3.20	2.30	3.20	2.60	uninterpreted	2.20		
19	arakashi	4.1	4.40	1.20	2.20	3.50	3.10	3.10	3.10	3.10	2.90	2.90	2.50	3.40	2.50	3.40	2.80	uninterpreted	2.40		
20	kunugi	12.2	5.50	0.50	0.70	3.10	uninterpreted	3.80	3.00	3.80	3.00	3.00	4.00	4.90	4.00	4.90	5.20	uninterpreted	4.80		
21	tadobri	1.6	3.00	0.00	1.00	1.70	1.30	1.80	1.30	1.80	1.30	2.30	2.70	2.80	2.70	2.80	3.50	uninterpreted	3.00		
22	ubame	4.1	3.20	0.30	1.70	1.30	1.80	2.70	1.70	2.70	2.70	2.70	2.80	3.20	2.80	3.20	2.90	uninterpreted	2.00		
23	kirii	8.6	3.90	0.06	2.90	1.50	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	2.70	2.70	2.80	2.70	2.80	3.50	uninterpreted	3.60		
24	konara	2.5	1.80	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.30	0.00	1.30	0.50	uninterpreted	1.90		
25	nezuki	2.2	1.20	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.60	0.90	1.40	1.50	1.40	1.50	0.40	uninterpreted	0.70		
26	rinu	12.6	6.50	2.30	1.70	3.00	2.90	2.90	2.90	2.90	3.50	3.50	4.20	4.70	4.20	4.70	6.20	uninterpreted	7.40		
27	ubame	4.3	3.30	0.00	1.10	1.60	1.80	2.60	1.80	2.60	1.80	2.60	2.70	3.00	2.70	3.00	3.20	uninterpreted	3.80		
28	konara	0.8	4.00	0.30	1.10	2.10	1.10	1.10	1.10	1.10	0.50	0.50	0.90	1.70	0.90	1.70	1.70	uninterpreted	1.30		
29	ubame	4.7	1.80	0.00	1.80	0.80	1.90	2.50	1.90	2.50	1.90	1.30	1.60	2.10	1.60	2.10	2.10	uninterpreted	1.70		
30	kunugi	2.9	3.50	1.80	0.70	2.50	2.10	2.90	2.10	2.90	2.10	2.90	2.10	2.10	2.10	2.10	1.90	uninterpreted	1.10		
31	kunugi	4.8	3.00	0.10	1.60	1.90	2.20	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	0.80	4.60	0.80	4.60	2.10	uninterpreted	2.00		
32	arakashi	10.8	3.50	2.10	2.40	3.20	4.20	3.50	4.20	3.50	4.20	3.50	4.80	4.60	4.80	4.60	6.10	uninterpreted	6.10		
33	ubame	7.0	4.70	0.30	1.10	2.10	1.60	1.60	1.60	1.60	1.40	1.40	1.20	1.60	1.20	1.60	2.70	uninterpreted	4.10		
34	kunugi	5.4	2.90	0.10	1.00	1.60	1.80	1.80	1.80	1.80	1.80	1.80	1.70	2.00	1.70	2.00	2.10	uninterpreted	1.30		
35	ubame	3.0	2.30	0.20	1.00	1.60	2.00	2.00	2.00	2.00	1.80	1.80	1.60	2.10	1.60	2.10	1.00	uninterpreted	0.80		
36	kunugi	3.5	2.40	0.50	0.70	0.90	1.40	1.20	1.20	1.20	1.20	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.50	uninterpreted	1.40		
37	ubame	1.9	1.40	0.40	2.40	0.80	2.90	0.60	0.60	0.60	0.70	0.70	0.80	0.90	0.80	0.90	0.60	uninterpreted	1.40		
38	kunugi	7.2	4.70	0.30	0.50	2.00	1.40	0.80	1.40	0.80	2.90	3.00	3.10	3.30	3.10	3.30	3.30	uninterpreted	3.30		
39	ubame	5.4	3.80	0.60	2.20	1.60	2.50	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.40	2.60	2.40	2.60	2.20	uninterpreted	1.90		
40	arakashi	4.1	2.80	0.00	1.50	1.40	1.70	1.70	1.70	1.70	1.40	1.40	1.40	1.80	1.40	1.80	2.20	uninterpreted	3.10		
41	kunugi	7.5	6.00	0.20	0.60	2.60	3.70	3.70	3.70	3.70	3.70	3.70	5.10	5.10	5.10	5.10	5.00	uninterpreted	6.30		
43	kunugi	4.3	4.50	0.50	uninterpreted	2.30	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.10	1.40	1.40	1.40	1.40	3.10	uninterpreted	4.10		

多様な高度縮尺の空中写真を用いたSfM多視点ステレオ写真測量による和歌山大学圏域の人工地形変化抽出の試み
差分による樹高値(9列目)と、観測期日が近い2018年11月11日のSfM/MVS
推定樹高値(8列目)間の差異が平均で0.00m、最大でも0.80mに止まっている
事実も、SfM/MVS差分樹高の有効性を支持している。

以上、異なる空間スケールかつ高い利用頻度と想定される二事例対象地におけるSfM-MVSの活用法を述べてきた。本報告が多分野での工程参照事例となることを祈念している。また、本報告で取り扱った空間情報については、さらなる精度考察および時系列でのデータ累積の後、和歌山大学図書館のリポジトリでの公表も検討していきたい。

謝辞

本研究を遂行する上で、和歌山大学システム工学部景観生態学研究室の学生のみなさんには、樹木調査を支援いただき、ゼミでも有意義なコメントをいただきました。また、本研究はJST共創の場形成支援プログラム(COINEXT: JPMJPF2003)より支援いただきました。ここに記して深謝いたします。

引用文献

- 1) 金井理 (2021) : SfM-MVS技術の動向 : 写真測量とリモートセンシング 60 (3), 95-99
- 2) 高橋洋二 (2021) : 標定点の配置によるSfM/MVSの3次元形状再現性の比較評価 : 写真測量とリモートセンシング 60 (4), 179-182
- 3) 清水裕太・松森堅治 (2020) : SfM 多視点ステレオ写真測量による過去の空中写真からの三次元地形モデルの構築 : 新近畿中国四国農業研究 3, 1-7
- 4) 根本達也・吉田隆二・升本真二・三田村宗樹・比嘉友彰 (2015) : 大阪府泉北丘陵南部における航空写真を用いた地形変化量の算出 : 情報地質 26 (2), 102-103
- 5) 石黒聡士・熊原康博・後藤秀昭・中田高・松多信尚・杉戸信彦・廣内大助・渡辺満久・澤祥・鈴木康弘 (2016) : UAVによる空撮とSfM-MVS解析による地表地震断層の地形モデル作成とその精度—2014年11月長野県北部の地震を例に— : 日本リモートセンシング学会誌 36 (2), 107-116
- 6) 齋藤仁・内山庄一郎・小花和宏之・早川裕弼 (2016) : 平成24年(2012年)7月九州北部豪雨に伴う阿蘇火山地域での土砂生産量の推定—UAVとSfM多視点ステレオ写真測量を用いた高精細地形データの活用— : 地理学評論 Series A 89 (6), 347-359

- 7) 早川健太郎・黒台昌弘 (2022) : UAVを用いた建設現場における地形変化の計測について : 応用地質 62 (6), 363-367
- 8) 小泉祐一郎 (2022) : 熱海市土砂災害の法制的研究—土砂の移動に関する規制の変遷と展望— : 静岡産業大学 情報学部 研究紀要 24, 107-140
- 9) 朝日新聞 (2021年7月6日配信) : 国交相「全国の盛り土、総点検を」熱海の土石流うけ 〈<https://www.asahi.com/articles/ASP764SHRP76UTIL00Q.html>〉 2022年11月7日参照
- 10) 国土交通省 (2021年7月9日配信) : 盛土の可能性のある箇所の概略的な抽出について～デジタルマップの2時期比較で抽出します～ 〈https://www.mlit.go.jp/report/press/sabo01_hh_000112.html〉 2022年11月7日参照
- 11) 石黒聡士・佐野滋樹・長谷川智則・鈴木康弘 (2015) : 切盛境界把握のための旧地形の標高計測手法と精度検証 : 地学雑誌 124 (2), 297-308
- 12) 谷政智・原祐二・三瓶由紀 (2016) : 堺市旧野田村地区における都市化による水路・農地利用の変容とカエル種生息分布への影響 : 環境情報科学論文集 30, 237-242
- 13) 国土地理院 : 人工改変地形データ抽出のための手順書 〈https://www.gsi.go.jp/bousaichiri/georeport_index.html〉 2022年11月13日参照
- 14) 国土交通省 : 大規模盛土造成地マップの公表状況等について 〈https://www.mlit.go.jp/toshi/toshi_tobou_tk_000075.html〉 2023年10月19日参照
- 15) 岸和田市 : 大規模盛土造成地マップの公表について 〈<https://www.city.kishiwada.osaka.jp/soshiki/45/daikibo-morido.html>〉 2022年11月13日参照
- 16) 和歌山市 : 大規模盛土造成地マップの公表について 〈http://www.city.wakayama.wakayama.jp/kurashi/douro_kouen_machi/1009501/1009507/1002224.html〉 2022年11月13日参照
- 17) 国土地理院 : 地理院地図 Vector 〈<https://maps.gsi.go.jp/vector/>〉 2022年11月13日参照
- 18) 平山雄貴・根本達也・升本真二 (2018) : 大阪府千里丘陵における等高線間情報から作成したDEMと航空写真から作成したDSMとの比較 : 日本情報地質学会講演会 講演要旨集 29, 9-10
- 19) 国土地理院 : 地図・空中写真閲覧サービス 〈<https://mapps.gsi.go.jp/>〉 2022年11月14日参照

多様な高度縮尺の空中写真を用いた SfM 多視点ステレオ写真測量による和歌山大学圏域の人工地形変化抽出の試み

- 20) 岡野友哉・原祐二 (2019) : 有田川中流域における1953年大縮尺空中写真を用いた棚田データの作製と現状土地被覆間の空間解析 : 農村計画学会誌 38 (2), 128-135
- 21) 原祐二・田内裕人 (2018) : 郊外地形改変開発型大学キャンパスの地域生態系を活用した防災・環境教育研究連携 : 和歌山大学栄谷キャンパスの事例 : 和歌山大学災害科学教育研究センター研究報告 2, 50-54
- 22) 国土地理院 : 数値地図25000(土地条件)刊行情報 (https://www.gsi.go.jp/bousaichiri/lc_cd25000.html) 2023年8月29日参照
- 23) 和歌山県 : 3次元点群データ(主に2019観測) (https://wakayamaken.geocloud.jp/mp/22) 2023年9月6日参照
- 24) 国土地理院 : 地理院地図 (https://maps.gsi.go.jp/) 2022年12月5日参照
- 25) 国土地理院 : 地理空間情報活用推進に関する近畿地区産学官連携協議会 (https://www.gsi.go.jp/kinki/renkei.html) 2023年9月6日参照
- 26) 写真測量発達史委員会 (1972) : 日本写真測量発達史年表 : 写真測量 11 (Special), 102-152
- 27) 株式会社アーツィス : Photoshopのアクション機能とバッチ機能を活用して、画像処理を自動化(一括処理)しよう! (https://www.asobou.co.jp/blog/web/action-batch) 2023年9月8日参照
- 28) SKラボ : Metashape professionalでGCPを使ってUAV画像からDEM、オルソを作成する (https://sk-lb.net/metashape-with-gcp/) 2023年9月9日参照
- 29) 内閣府 : みちびきの必要性 (https://qzss.go.jp/overview/services/sv02_why.html) 2023年9月10日参照

Detections of landform changes by SfM/MVS using various types of aerial images: toward establishing process toolkits

HARA Yuji and TOJO Taichi

Abstract

Recent rapid growth of SfM/MVS technology allows researchers without deeper skills of photogrammetry to detect landform changes at multiple spatiotemporal scales. Here we report our recent projects quantifying landform changes using downloadable aerial photos and self-acquired drone images with special focus on its practical processes. Our trials were able to detect landform changes with reliable accuracies to use for ordinary academic classes and landscape level research. This practical report could contribute to future research in other study areas and academic fields.