

修士論文

題目

空撮画像を用いた土砂移動推定

報告者

氏名：室永 将門

学籍番号：7113-0054

指導教員

佐治 斉

提出日

令和05年01月31日

静岡大学大学院 総合科学技術研究科情報学専攻

目次

第1章	はじめに	3
1.1	背景	3
1.2	先行研究	4
1.2.1	前後DEMを用いた土砂移動解析	4
1.2.2	前後空撮画像マッチングによる土砂移動解析	4
1.2.3	点群座標値を用いて3次元マッチングを行う手法	4
1.2.4	点群より作成したラスター型地表面モデルから画像マッチングを行う手法	4
1.2.5	SAR画像を用いた広域の地表面の変動解析手法	5
1.2.6	数値地形画像マッチング手法	5
1.3	本研究の目的	5
1.4	本論文の構成	5
第2章	手法	6
2.1	概要	6
2.2	入力データ	6
2.3	三次元復元	6
2.3.1	写真のアライメント	7
2.3.2	高密度クラウドの構築	7
2.3.3	メッシュの構築	7
2.3.4	テクスチャの構築	7
2.3.5	オルソ画像の作成	7
2.3.6	DSMの作成	7
2.4	災害前DEMの前処理	7
2.4.1	リサンプリング	7
2.4.2	災害前DEMの正規化	8
2.4.3	災害前DEMの切り抜き	8
2.4.4	傾斜度データの作成	8
2.4.5	傾斜方位データの作成	8
2.5	領域データの抽出	8
2.5.1	オルソ画像の領域分割	8
2.5.2	カラーラベリング	8

2.6	建物領域の標高値補正	8
2.6.1	建物領域の検出	8
2.6.2	隣接地表面領域の抽出	9
2.7	土砂領域のマスク画像作成	9
2.7.1	土砂候補領域検出	9
2.7.2	植生領域検出	9
2.7.3	統合処理による土砂領域検出	9
2.7.4	土砂領域検出結果の二値化処理	9
2.7.5	土砂領域のマスク画像作成	9
2.8	土砂量推定	9
2.9	土砂移動推定	10
第3章	実験	11
3.1	実験環境	11
3.2	入力データ	11
3.3	実験結果	11
3.4	精度評価	11
3.5	考察	11
第4章	まとめ	12
4.1	結論	12
4.2	今後の課題	12
4.2.1	1つ目	12
4.2.2	2つ目	12
	对外発表	13
	参考文献	14
	謝辞	16

第1章 はじめに

1.1 背景

近年、豪雨や地震による斜面崩壊、地すべり、土石流等の土砂災害が多発しており、気象庁の統計では1時間降水量 50mm 以上の大雨の平均年間発生回数は、統計初期の10年間（1976～1985年）に比べ最近10年間（2012～2021年）で約1.4倍に増加した[1]。2021年では土砂災害が972件発生し、家屋や人命に大きな損害を与えた[2]。これらの被害箇所を早急に把握することは救助活動の支援や二次災害防止、および復旧活動の支援等の観点で重要である[?]。しかし、被害箇所は広範囲であることが多く、安全面の観点から現地での情報収集が困難である。そこで、災害時に安全かつ迅速に解析が可能であるリモートセンシング技術が注目されている[?]

リモートセンシング技術による被災解析には主に人工衛星、有人航空機（以降、ヘリコプター）、無人航空機（以降、ドローン）が用いられる。人工衛星は広範囲の把握が可能であり、画像処理において扱いが容易な直下視点の画像が入手可能である。しかし、解像度が低いいため詳細な情報の入手が困難であり、天候や撮影周期によっては画像が得られないという問題がある。ヘリコプターは人工衛星に比べ災害発生直後に画像を取得でき、解像度においても優れている。しかし、金銭的成本が非常に高く、周囲に発着場が必要であるという問題がある。また、保有台数が少なく災害箇所を網羅できない可能性があり、悪天候時には出動できないこともある。ドローンは安価かつ迅速に解像度の高い画像の取得が可能であるため、被害箇所の早急な把握に有効である。現状の活用事例ではドローンの操縦から取得したデータの解析までの作業が全て手動で行われており、運用にかかる労力が問題となっている。また、撮影範囲が狭い。

また、災害現場では収集した情報を元に、地図上に土砂量変位や土砂移動変位を重ねた被災状況地図の作成が行われる。災害直後の救助活動において要救助者位置の推定・搜索・流出家屋の特定等の作業が行われるが、要救助者が住宅とともに下流に流される、あるいは住宅付近に埋まっていることが多いため、土砂量や土砂移動の変動を示す被災地図は、上記作業において重要な指標となる。従来、土砂移動の推定では被災前後空撮画像等を用いて地表物のランドマークや明瞭な地形変化点を基準とした目視判読により変動量の測定を行っているが[3]、広範囲に適用する際に労力等のコストが大きい。（土砂量についても）

TODO: 空中写真測量・地上測量による図化目視判読現地測量・各種計器を用い

た手法にも言及する

1.2 先行研究

(土砂量)

1.2.1 前後DEMを用いた土砂移動解析

前後のDEMを用いて地表面の変化を抽出する手法（DEM差分抽出法）では、災害前後のDEMの標高差分値を算出する。鉛直方向の変位を算出できるが、形状の変化等を考慮しておらず水平方向の変位が算出できない。

1.2.2 前後空撮画像マッチングによる土砂移動解析

前後の空撮画像を用いた画像マッチングによる変位抽出を行う手法（COSI-Corr（Co-registration of Optically Sensed Images and Correlation）法）では、DEM等により位置情報を与えて補正を行う。しかし、抽出できる変位量は画素サイズにより規制される。また、空撮画像を用いるため、植生の繁茂した領域では誤抽出が発生する。

1.2.3 点群座標値を用いて3次元マッチングを行う手法

計測時の点群の座標値自体を用いて3次元のマッチングを行う手法（ICP（Iterative Closest Point）法）では、小領域における前後の点群間でそれらの配置が一致するように移動量を算出する。しかし、処理が複雑で計算時間が多い。また、解析結果が元となる計測データ同士の精度に大きく影響され広域の変動解析には多大な労力がかかる。

1.2.4 点群より作成したラスタ型地表面モデルから画像マッチングを行う手法

画像マッチングを行うことで水平変位が算出できるが、鉛直変位は点群からの計算を行ってから合成する必要がある。

1.2.5 SAR 画像を用いた広域の地表面の変動解析手法

SAR 画像のインタフェロメトリ法 (InSAR) では広域の地表面変動を数 mm オーダーで解析可能であるが、中小規模の災害への適用が難しい。また、山間部では不可視領域が発生したり、衛星の進行方向によっては感度が落ちる。

1.2.6 数値地形画像マッチング手法

また、航空レーザ測量から構築された DEM (数値標高モデル) による PIV (Particle Image Velocimetr) 手法や、3D-GIV (Geo-morphic Image Velocimetry) 解析を用いて土砂移動の解析を行っている事例もあるが [4]、航空レーザ測量は時間等のコストが高いため災害直後の救助段階での利用が困難である。さらに、主な適用例が地すべり等の広範囲であり、土石流等の中範囲への適用例が少ない。また、植生やマッチングエラーの影響を受けやすい。

1.3 本研究の目的

これらの手法では通常航空レーザ測量によって得られた DEM 等を用いる。航空レーザ測量は時間等のコストが高いため災害直後の救助段階での利用が困難である。

以上を踏まえ、本研究では土石流における災害後空撮画像と災害前の国土地理院 DEM[5] を入力とし、地形情報と画像情報を用いることによって半自動的に土砂量と土砂移動の推定を行う。

1.4 本論文の構成

本論文の構成を以下に示す。

第 1 章では本研究の背景、関連研究、及び目的について述べた。

第 2 章では本研究の提案手法について述べる。

第 3 章では実験方法及び実験結果について述べる。

第 4 章ではまとめとして結論及び今後の課題について述べる。

第2章 手法

2.1 概要

提案手法概要図を図 2.1 に示す。まず、災害後空撮画像の三次元復元を行うことによってオルソ画像（直下視点画像）と DSM（数値標高モデル）の作成を.....

提案手法では、入力として災害後空撮画像、国土地理院 DEM を利用し、土砂量図と土砂移動図を出力とする。

2.2 入力データ

入力画像の特徴等...

2.3 三次元復元

まず、災害後空撮画像の三次元復元を行うことによってオルソ画像（直下視点画像）と DSM（数値標高モデル）の作成を行う。三次元復元とは複数枚画像を用いて被写体の形状や距離等の 3 次元情報を復元する処理である。オルソ画像は、三次元復元によって得られた三次元モデルを真上から投影した状態の各画素を取得することによって得る。DSM は三次元モデルを真上から投影した状態の数値標高モデルの各標高値を取得することによって得る。本手法では復元精度の高い Agisoft 社の Metashape[6] を利用する。

その後、災害後空撮画像によって得られた DSM は国土地理院 DEM に比べ空撮画像の撮影範囲分のみであり領域が狭いため、災害後 DSM と同範囲を抽出することによって無駄な領域を削除する。この処理によって、後述の災害後 DSM の標高値の正規化処理において国土地理院の DEM の最大標高を基準とした正規化処理が可能となる。

また、災害前後での標高値モデルは解像度が異なるため、最も滑らかな画素補間手法であるバイキュービック法 [7] を用いることによって解像度を統一する。一般的には国土地理院 DEM は解像度が粗いため、この手法を用い国土地理院 DEM を拡大する。

最後に、後述の処理で色相と水平座標の距離が近い領域単位での処理を行うため、オルソ画像に対し Mean-Shift 法 [8] による領域分割を行う。また、この処理に

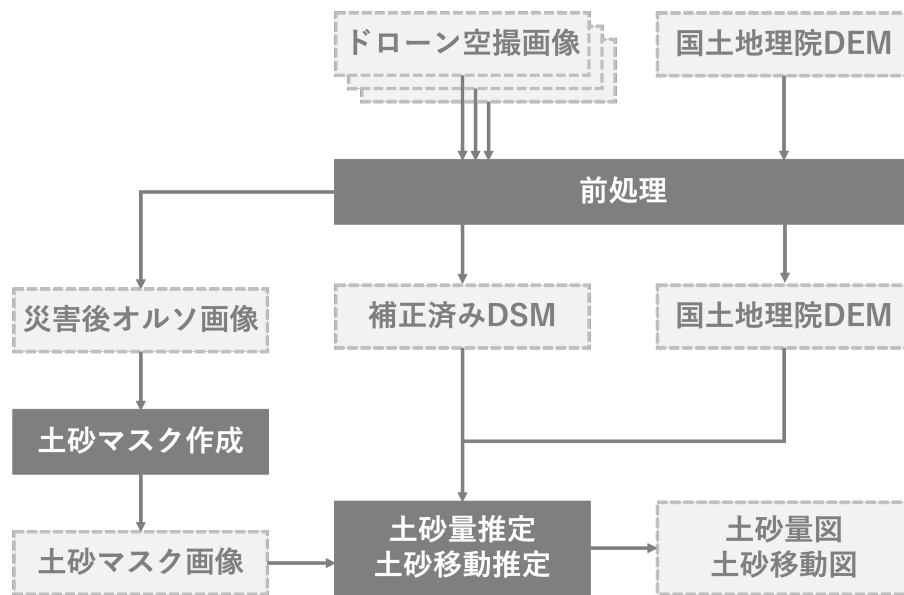


図 2.1: 提案手法概要図

よって空撮画像の撮影機器や画像上の細かい地物による色や輝度のばらつきを抑制する。

TODO: Mean-Shift 法書く

2.3.1 写真のアライメント

2.3.2 高密度クラウドの構築

2.3.3 メッシュの構築

2.3.4 テクスチャの構築

2.3.5 オルソ画像の作成

2.3.6 DSM の作成

2.4 災害前 DEM の前処理

2.4.1 リサンプリング

災害後 DSM 領域の抽出も一緒に

2.4.2 災害前 DEM の正規化

次に、三次元復元によって得られた DSM は基準となる標高値を持たないため、国土地理院 DEM と水平位置を対応付け、式 2.1 を適用することによって標高値を正規化する． x は正規化前の DSM の標高値， x' は正規化後の DSM の標高値を示す．

$$x'_i = \frac{x_i - \min(x)}{\max(x) - \min(x)} \times \max(DEM) \quad (2.1)$$

2.4.3 災害前 DEM の切り抜き

2.4.4 傾斜度データの作成

2.4.5 傾斜方位データの作成

2.5 領域データの抽出

2.5.1 オルソ画像の領域分割

2.5.2 カラーラベリング

2.6 建物領域の標高値補正

2.6.1 建物領域の検出

DSM は建物・樹木等を含む標高値であることに對し、DEM は建物・樹木等の地表物の高さを含まないため、単純に災害前後の標高値差分を取った場合にずれが生じる．よって、ここでは建物領域の標高値補正を行う．植生領域については、2.7.2 項にて除去を行う．

2.3.5 節で得たオルソ画像の各領域に対し円形度式 2.2 による閾値処理を行うことによって、建物候補領域を抽出する． S は領域の面積， L は領域の周囲長， C は円形度を示す．

$$C = \frac{4\pi S}{L^2} \quad (2.2)$$

その後、テクスチャ特徴による分類を行うことによって建物領域を抽出する．建物領域の屋根部分は均一であるという特徴を持つため、ある領域内の画素の不均一性を示す指標である異質度 (dissimilarity) [9] を導入する．異質度式 2.3 による閾値処理を行うことによって、建物領域を抽出する． $P(i, j)$ は (i, j) における画素値， $dissimilarity$ は異質度を示す．

$$dissimilarity = \sum_{i=0}^{255} \sum_{j=0}^{255} (i, j) |i - j| \quad (2.3)$$

その後、抽出した建物領域に隣接する地表面領域の標高値を用いて建物領域の全画素の標高値を地表面領域の平均標高値に変換することで、建物領域の標高値を除去する。あと国土地理院マスク..

2.6.2 隣接地表面領域の抽出

2.7 土砂領域のマスク画像作成

2.7.1 土砂候補領域検出

オルソ画像中の土砂領域・植生領域はそれぞれ赤色味・緑色味が強くなる傾向がある。本研究では人間の色覚に類似した $L^*a^*b^*$ 表色系を用い、赤色味の強い画素では a^* 値が高く、緑色味の強い画素では a^* 値が低いという特徴を利用した閾値処理によって土砂候補領域・植生領域の検出を行う。

検出した土砂候補領域より植生領域を除去し、土砂領域として残った領域を二値化することによって土砂マスクを生成する。

2.7.2 植生領域検出

2.7.3 統合処理による土砂領域検出

2.7.4 土砂領域検出結果の二値化处理

2.7.5 土砂領域のマスク画像作成

2.8 土砂量推定

災害後の空撮画像より作成した標高値補正済み DSM と災害前の解像度補正済み国土地理院 DEM の被災前後での標高値差分を求めることにより、災害前後での土砂量変化を算出する。また、2.7 節で作成した土砂マスクの領域に限定して処理を行うことにより、植生領域のずれや誤検出を除去する。

2.9 土砂移動推定

精度評価の際に Mean-Shift 法での領域ベースでの正解データの目視判読による作成は領域数の多さに起因し困難であるため、メッシュベースでの土砂移動推定を行う。今回は地表面での土砂移動が確認できたランドマークの最大移動距離に合わせ、オルソ画像を縦 13 メッシュ、横 12 メッシュに区切った。

土砂移動は一般的に上流から下流へ流下する。また、一般的に災害後には上流領域は土砂崩壊部で侵食が発生し、下流領域には上流より流下した土砂が堆積する。よって、メッシュ中心画素から以下の 4 条件を満たす画素を全て追跡し、メッシュ中心画素から最も距離の遠い画素へ移動線を結ぶことによって土砂移動が発生したと推定する。

- ・ 上流方向から下流方向に沿って傾斜方向が向いている
- ・ 上流画素の標高値が下流画素の標高値より低い
- ・ 画素同士が隣接している
- ・ 侵食領域と堆積領域の組み合わせである

傾斜方向の判別には災害後 DSM より作成した傾斜方向モデルを用い、侵食領域と堆積領域の組み合わせの判別には 2.8 節の土砂量推定結果を用いる。

第3章 実験

3.1 実験環境

3.2 入力データ

本研究では国立研究開発法人防災科学技術研究所様に貸与頂いた平成30年7月豪雨における広島県坂町小屋浦のドローン空撮画像[10]を使用して実験を行った。空撮画像の詳細を表3.1に、国土地理院DEMの詳細を表3.2に示す。

3.3 実験結果

入力画像として267枚のドローン空撮画像と国土地理院DEMを利用した（図2, 図3）。

まず、空撮画像に三次元復元を適用することにより生成した三次元モデルよりDSMとオルソ画像を作成し、標高値補正を行った。標高値補正済み災害後DSMを図4に、オルソ画像を図5に示す。

その後、作成した土砂マスクを図6に示す。

最後に、土砂量図と土砂移動図を図7, 図8に示す。ここで図8の矢印は土砂位の移動方向を示す。

3.4 精度評価

メッシュ毎の土砂移動の方向についての精度評価を行った。

まず、国土地理院の空中写真による被災前後の比較[11]にて目視判読にて土砂マスクの土砂部分に限定し正解データを作成した（図9）。その後、2.9節での土砂移動推定結果による土砂移動方向の角度データと正解角度データを比較することにより精度評価を行った（式4）。answerは正解角度データ、resultは土砂移動推定結果による角度データ、accuracyは精度を示す。

評価した結果、各メッシュの平均精度は0.759であった。

3.5 考察

第4章 まとめ

4.1 結論

本研究では、土石流における災害後空撮画像と災害前の国土地理院 DEM より、半自動的に土砂量と土砂移動の推定を行う手法について提案した。また、実験にて被災後の空撮画像と国土地理院 DEM を利用し、メッシュ単位での土砂移動方向についての精度評価を行った。

4.2 今後の課題

今後の課題として、全体的な精度の向上と 3 次元土砂移動距離の精度評価が挙げられる。

4.2.1 1 つ目

建物領域抽出の手法に関し、エッジ抽出、国土地理院の建物輪郭データ等を併用することによって建物領域抽出の精度向上を目指す。また、土砂移動・土砂量推定において災害後 DSM の標高値補正手法の改善や水平位置補正手法 [12] 等の取り入れによって土砂量の推定を高精度に行い、土砂移動をより正確に推定することを目指す。

4.2.2 2 つ目

精度評価に関し、現時点では土砂移動の方向角度のみで精度評価を行っているが、今後は土砂移動の水平距離と垂直距離の精度評価を行う。また、実際の救助活動等で有用となる目標精度を設定しシステム構築を行う。

对外発表

- 室永将門，佐治斉．空撮画像を用いた土砂移動推定．ViEW2022，2022．

参考文献

- [1] (国土交通省?) 気象庁. 大雨や猛暑日など(極端現象)のこれまでの変化. https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/extreme/extreme_p.html#:~:text=%E6%9C%80%E8%BF%9110%E5%B9%B4%E9%96%93%E7%BC%882012%E7%BD%9E,%E5%9B%9E%E6%95%B0%E3%81%AF371%E5%9B%9E%E3%81%A7%E3%81%99%E3%80%82.
- [2] 国土交通省. 令和3年の土砂災害発生件数は972件. https://www.mlit.go.jp/report/press/sabo02_hh_000126.html#:~:text=%E5%9B%BD%E5%9C%9F%E4%BA%A4%E9%80%9A%E7%9C%81%E3%81%A7%E3%81%AF%E6%AF%8E%E5%B9%B4,%E3%82%92%E9%9B%86%E8%A8%88%E3%81%97%E3%81%A6%E3%81%84%E3%81%BE%E3%81%99%E3%80%82&text=%E7%BC%94%E7%BC%92%E9%83%BD%E9%81%93%E5%BA%9C%E7%9C%8C%E3%81%A7%E7%BC%99%E7%BC%97%E7%BC%92,%E3%81%AE%E8%A2%AB%E5%AE%B3%E3%81%8C%E7%94%9F%E3%81%98%E3%81%9F%E3%80%82.
- [3] 鵜殿俊昭, 柴田俊彦, 武田大典. 航空レーザ計測データを用いた七五三掛地すべりの移動状況解析. 写真測量とリモートセンシング, Vol. 49, No. 5, pp. 292–293, 2010.
- [4] 高見智之, 向山栄, 本間信一, 佐藤匠. 多時期 LiDAR-DEM を活用した斜面変動解析と評価. 日本地すべり学会誌, Vol. 56, No. 6, pp. 295–305, 2019.
- [5] 国土地理院. 基盤地図情報ダウンロードサービス. <https://fgd.gsi.go.jp/download/menu.php>.
- [6] Agisoft. Metashape. <https://www.agisoft.com>.
- [7] R. Keys. Cubic Convolution Interpolation for Digital Image Processing. *IEEE Transactions on Acoustics Speech and Signal Processing*, Vol. 29, No. 6, pp. 1153–1160, 1981.
- [8] W. Tao & H. Jin & Y. Zhang. Color image segmentation based on mean shift and normalized cuts. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, Vol. 37, No. 5, pp. 1382–1389, 2007.

- [9] 三浦弘之, 翠川三郎, Soh Hui Chen. 2010 年ハイチ地震における被害地域検出のための高分解能衛星画像のテクスチャ解析. 日本地震工学会論文集, Vol. 12, No. 6, pp. 6.2–6.20, 2012.
- [10] 国立研究開発法人防災科学技術研究所. 被災後正射画像 (広島県安芸郡坂町小屋浦 防災科研 2018/7/10). <https://www.arcgis.com/home/item.html?id=7589c23475c44f5dae7445468b352a10>.
- [11] 国土地理院. 平成 30 年 7 月豪雨に関する情報. <https://www.gsi.go.jp/BOUSAI/H30.taihuu7gou.html>.
- [12] 三浦弘之, 弓真由子. 非線形写像法による航空レーザ測量データの幾何補正とそれに基づく 2014 年広島豪雨災害での崩壊土砂量の推定. 地域安全学会論文集, Vol. 27, pp. 283–291, 2015.

謝辞

本研究を進めるにあたり，熱心なご指導，適切な御助言をいただきました佐治
斉教授に，厚く御礼申し上げます。

また，数々の御意見，御協力をいただきました佐治研究室の皆様に深く感謝い
たします。

以上