

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	4
1.1	背景	4
1.2	先行研究	5
1.2.1	前後 DEM を用いた土砂移動解析	5
1.2.2	前後空撮画像マッチングによる土砂移動解析	5
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	5
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	5
1.2.5	SAR 画像を用いた広域の地表面の変動解析手法	6
1.2.6	数値地形画像マッチング手法	6
1.3	本研究の目的	6
1.4	本論文の構成	6
第2章	手法	7
2.1	概要	7
2.2	入力データ	7
2.3	三次元復元	7
2.3.1	写真のアラインメント	8
2.3.2	高密度クラウド構築	8
2.3.3	メッシュ構築	9
2.3.4	テクスチャ構築	9
2.3.5	Z 軸指定	9
2.3.6	オルソモザイク構築	9
2.3.7	DEM 構築	10
2.4	災害前 DEM の前処理	10
2.4.1	リサンプリング	10
2.4.2	災害前 DEM の切り抜き	11
2.4.3	傾斜度・傾斜方位の算出	11
2.5	領域データの抽出	12
2.5.1	オルソ画像の領域分割	12
2.5.2	領域データの算出	13
2.5.3	or カラーラベリング	13

2.6	災害後 DSM の前処理	13
2.6.1	ジオリファレンサ	14
2.6.2	建物領域の検出	14
2.6.3	建物領域の標高値補正	14
2.6.4	災害後 DSM の正規化	15
2.7	土砂領域のマスク画像作成	15
2.7.1	L*a*b*表色系	15
2.7.2	土砂候補領域検出	16
2.7.3	植生領域検出	16
2.7.4	統合処理による土砂領域検出	16
2.7.5	土砂領域検出結果の二値化処理	16
2.7.6	土砂領域のマスク画像作成	16
2.8	土砂量推定	16
2.9	土砂移動推定	17
第 3 章	実験	18
3.1	実験環境	18
3.2	入力データ	18
3.3	実験結果	18
3.3.1	入力データ	18
3.3.2	三次元復元	19
3.3.3	災害前 DEM の前処理	19
3.3.4	領域データの抽出	19
3.3.5	建物領域の標高値補正 or 災害後 DSM の前処理	19
3.3.6	土砂領域のマスク画像作成	19
3.3.7	土砂量推定	19
3.3.8	土砂移動推定	19
3.4	精度評価	19
3.5	考察	20
第 4 章	まとめ	23
4.1	結論	23
4.2	今後の課題	23
4.2.1	1 つ目	23
4.2.2	2 つ目	23
4.2.3	3 つ目	23
	対外発表	24
	参考文献	25

第1章 はじめに

1.1 背景

TODO: 文献の URL が違いそうなので直す近年、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ー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最終出力結果とする。

2.2 入力データ

入力データの特徴等...

- 複数枚の災害後空撮画像，直下視点が望ましい，季節は植生が緑が良いかも，災害前 DEM が整備されている，視差が得られるように，
- 災害前 DEM，5m メッシュが望ましい，

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

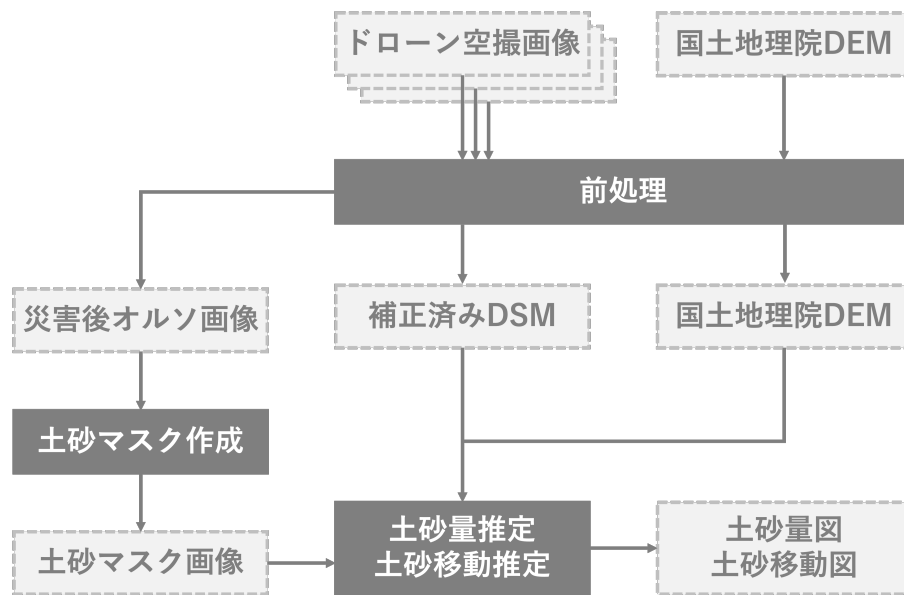


図 2.1: 提案手法概要図

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: アラインメント?アライメント?使ってる Metashape の名称に合わせる

2.3.1 写真のアラインメント

入力画像に対して特徴点の検出を行い，特徴マッチングを行うことで疎な点群の復元を行う．植生や水域等の特徴の少ない領域が原因でマッチングに失敗する場合があるため，失敗した画像を除去し再度処理を行う．また，精度を指定することが可能であり，精度を下げると入力画像の解像度を下げることによって処理時間を短縮する．提案手法では「高」（最大精度.... 最高かも）を指定し，その他の項目では既定値にて処理を行う．本処理の設定値を図??に，2.2 節を用いた時の処理結果を図??に示す．

2.3.2 高密度クラウド構築

2.3.1 項によって得られた点群と入力画像より法線を算出し，密な点群を生成する．精度を指定することが可能であり，後述の 2.3.7 項の精度に影響する．また，

深度フィルタによって外れ値の除去を行うことができる。提案手法では「高」に設定し、その他の項目では既定値にて処理を行う。本処理の設定値を図??に、2.3.1項の処理結果を用いた時の処理結果を図??に示す。

2.3.3 メッシュ構築

2.3.2 項によって得られた点群からポリゴンメッシュの構築を行う。三次元点群から三次元モデルを復元することによって、後述の 2.3.5 項の処理が用意になる。本処理の設定値を図??に、??項の処理結果を用いた時の処理結果を図??に示す。

2.3.4 テクスチャ構築

2.3.3 項によって生成元の点群の色が割り当てられるが、頂点の色のみが対象であるため解像度が低い。そのため、本処理によって入力画像のテクスチャを生成したメッシュに貼り付ける。本処理の設定値を図??に、2.3.3 項の処理結果を用いた時の処理結果を図??に示す。

2.3.5 Z 軸指定

おれのは直下視点だから別話,,,
やり方書く（変な処理だったら消して良いかも～）本処理の処理結果を図??に示す。

ここまでで構築した三次元モデルが直下視となるよう、Metashape 上にて回転を行う。ヘリコプター撮影映像が鳥瞰視点であるため、正しい Z 軸を Metashape 上で推定することは困難である。したがって本研究では、手動による回転を行う。これにより奥行きが標高値へと変換できるため、DEM データの構築とオルソモザイク画像の構築を行うことができる。処理結果を図 2.9 に示す

2.3.6 オルソモザイク構築

2.3.4 項 or 2.3.5 項によって得られた直下視点の三次元モデルを投影することによって擬似的な直下視点画像（オルソモザイク画像、以降、オルソ画像）を構築する。プロジェクション面に「現在のビュー」を指定し、オルソ画像を出力する。本処理の設定値を図??に、2.3.5 項の処理結果を用いた際の処理結果を図??に示す。

2.3.7 DEM構築

2.3.6 項と同様，プロジェクション面に「現在のビュー」を指定することで直下視の投影方向にてDEMデータの構築を行う．ここで，ソースデータに「高密度クラウド」を指定することで，より精度の高いDEMデータを構築することができる．一般的な測量手法では，地上基準点（GCP）やExifタグによりスケールや位置情報を埋め込むが，本研究でのヘリコプター空撮画像ではこれらが利用できないため，得られる標高値はモデル内での相対的な値となる．本処理の設定値を図??に，2.3.5 項の処理結果を用いた際の処理結果を図??に示す．また，処理名称は「DEM構築」であるが，本研究では植生や建物の標高値を含まない標高値モデルのことをDEM（Digital Elevation...，どっかで前述してあれば良い，多分入力データでして），植生や建物の標高値を含む標高値モデルのことをDSM（Digital Surface Model）と呼ぶ．

2.4 災害前DEMの前処理

2.4.1 リサンプリング

2.8 節にて災害前後の標高値差分を取る際に，災害前後の標高値モデルの解像度が異なるためリサンプリング処理によって解像度を統一する．本研究では災害前の標高値モデルに国土地理院提供のDEM，災害後の標高値モデルは2.3.7 項にて出力したDSMを用いる．国土地理院提供のDEMのメッシュ解像度は5m，或いは10mであり，本研究で用いるDSMのメッシュ解像度は数十cm～XXm（TODO: 調べる）であるため，災害前標高値モデルに対しバイキュービック補間[7]を行い拡大することによって解像度を統一する．バイキュービック法（TODO: 後で修正）は最も滑らかな画素補間法であり，以下の手順によって算出できる．

注目画素の周辺の 4×4 （16）画素に対し式??を適用することによって得られる． x, y を..., i をつづ x とする．

TODO: 後で良さげな式調べる

$$d(x, y) = \begin{bmatrix} h(y_1) & h(y_2) & h(y_3) & h(y_4) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i(-1, -1) & i(0, -1) & i(1, -1) & i(2, -1) \\ i(-1, 0) & i(0, 0) & i(1, 0) & i(2, 0) \\ i(-1, 1) & i(0, 1) & i(1, 1) & i(2, 1) \\ i(-1, 2) & i(0, 2) & i(1, 2) & i(2, 2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h(x_1) & h(x_2) & h(x_3) & h(x_4) \end{bmatrix}$$

$$\begin{cases} x_1 = 1 + x - [x] \\ x_2 = x - [x] \\ x_3 = [x] + 1 - x \\ x_4 = [x] + 2 - x \\ y_1 = 1 + y - [y] \\ y_2 = y - [y] \\ y_3 = [y] + 1 - y \\ y_4 = [y] + 2 - y \end{cases} \quad (2.2)$$

$$h(t) = \begin{cases} (a+2)|t|^3 - (a+3)|t|^2 + 1 & (|t| \leq 1) \\ a|t|^3 - 5a|t|^2 + 8a|t| - 4a & (1 < t \leq 2) \\ 0 & (2 < |t|) \end{cases} \quad (2.3)$$

2.4.2 災害前 DEM の切り抜き

災害前 DEM は... TODO: いらないかも, 実験データ切り抜いて使うなら
災害後 DSM 領域の抽出も一緒に

2.4.3 傾斜度・傾斜方位の算出

TODO: Horn の公式かも XXX の指標として, 2.9 節にて,..... 傾斜度, 傾斜方位を利用する. 傾斜度とは, ある画素の傾斜度を表す指標であり, 傾斜度の値が大きいほど地表が急勾配であることを表す. 傾斜方位とは, 下りの傾斜度が指している方向を表す. 各指標は**式 2.4**, **式 2.5**によって算出される. なお, 傾斜方位は 0° (真北 TODO: $^\circ$ は記号にできるかも) から 360° (真北) で右回りに計算される指標である. $\frac{dz}{dx}, \frac{dz}{dy}$ は 3×3 画素 (9 画素) のメッシュがあった場合に, 中心画素の X 方向と Y 方向の変化率であり, **式 2.6**, **式 2.7**より算出される.

TODO: (もう 1 箇所, バイキュービック法も,) $x_{1.1}$ とか x_8 とかの表記に変える (図もつける) or 式短く小さく

TODO: ArcTan? Atan? TODO: 式あっているか調べる・参考文献掲載

$$slope_{radians} = \frac{180}{\pi} \times atan \sqrt{\left(\frac{dz}{dx}\right)^2 + \left(\frac{dz}{dy}\right)^2} \quad (2.4)$$

$$aspect = \frac{180}{\pi} \times \arctan 2\left(\frac{dz}{dy}, \frac{dz}{dx}\right) \quad (2.5)$$

$$\frac{dz}{dx} = \frac{(d(x+1, y-1) + 2d(x+1, y) + d(x+1, y+1)) - (d(x-1, y-1) + 2d(x-1, y) + d(x-1, y+1))}{8} \quad (2.6)$$

$$\frac{dz}{dy} = \frac{(d(x-1, y+1) + 2d(x, y+1) + d(x+1, y+1)) - (d(x-1, y-1) + 2d(x, y-1) + d(x+1, y-1))}{8} \quad (2.7)$$

図??から図??に DEM から導出した傾斜度と傾斜方向を示す。

2.5 領域データの抽出

本研究では、土砂領域検出及び建物領域検出の際に領域単位で処理を行うため、災害後オルソ画像より領域データを算出する。検出処理では主にピクセル単位、領域単位、メッシュ単位,.. での検出単位が存在する。ピクセル単位での検出の場合... XXX. よって、本研究では領域単位で検出を行う。本節では各領域の領域番号、面積、重心座標、周囲長、輪郭座標... を取得する。

2.5.1 オルソ画像の領域分割

空撮画像等の土砂領域や植生領域を画素単位で検出することは難しいため、近傍画素との関係性を考慮した領域単位での判別を行う。本研究では Mean-Shift 法 [?] を用いた領域分割を行う。Mean-Shift 法はカーネル密度推定によるクラスタリング手法の一つで、画像の領域分割、動画像における対象物体追跡に用いられる。また、領域分割の代表的な手法である k-means 法 [?] に比べ、クラスタ数を事前に決める必要が無いという利点がある。Mean-Shift 法は、 d 次元空間中の N 個の点群を標本として得られるような確率密度関数 $f(x)$ を考え、その標本点から確率密度関数 $f(x)$ の極大点を探索する手法である。次に、Mean-Shift 法にてカラー画像の領域分割を行う手順について説明する。

1. カラー画像中の各画素の位置を二次元座標 x_i 、その画素値を三次元チャンネル $v_i = (R_i, G_i, B_i)$ とし、画素位置と画素値を結合した 5 次元空間内の点 $z_i = (x_i, v_i)$ を考える。距離と色相が近い画素が 5 次元空間内でクラスタを成しているとし、各画素を Mean-Shift 法でクラスタリングする。

2. すべての z_i に Mean-Shift 法を適用し、収束位置 $z_i^c = (x_i^c, v_i^c)$ を計算する。

3. x_i の画素値を収束位置の画素の値 $v^c = (R^c, G^c, B^c)$ に置き換えることによって領域分割ができる。カーネル密度推定と Mean-Shift 法の計算式を式 2.8 と式 2.9 示す。ただし、式 2.10 を満たすとする。

$$f(x) = \frac{c}{Nh_s^2 h_r^3} \sum_{i=1}^N k(|\frac{x^s - x_i^s}{h_s}|^2) k(|\frac{x^r - x_i^r}{h_r}|^2) \quad (2.8)$$

TODO: 2 行目, 最後の r, 式あってるか確認

$$y_{j+1}^s = \frac{\sum_{i=1}^N g_i^s x_i^s}{\sum_{i=1}^N g_i^s}, y_{j+1}^r = \frac{\sum_{i=1}^N g_i^r x_i^r}{\sum_{i=1}^N g_i^r} \quad (2.9)$$

$$g_i^s = k'(|\frac{y_j^s - x_i^s}{h_s}|^2) k(|\frac{y_i^r - x_i^r}{h_r}|^2), g_i^r = k(|\frac{y_j^s - x_i^s}{h_s}|^2) k'(|\frac{y_i^r - x_i^r}{h_r}|^2) \quad (2.10)$$

なお, 本研究では Mean-Shift 法の特徴量空間に距離を表す画素位置 (x, y) , 色相を表す画素値 (R, G, B) を用いるため 5 次元空間での処理となり, 距離・色相の近い画素群が一つの領域となる. 領域分割の適用例を図??に示す.

また, この際に各領域の座標データをコンピュータ上に保存する... (良い書き方ねえか??) ファイル, テキストファイル, バイナリファイル, イメージデータとして

2.5.2 領域データの算出

2.5.3 or カラーラベリング

通常のラベリング処理では, 類似色の領域が潰れてしまうという欠点がある. ??項にて取得した座標データを利用し, ラベリングテーブルを作成する. 作成したラベリングテーブルより, 領域番号毎に輪郭抽出を行う... 領域毎に以下の処理を行う. 1. 領域の全座標を取得 2. 領域座標よりを用いてその領域の輪郭抽出を行う 3. 輪郭データより面積・周囲長頭を算出 4. ラベリングテーブルに保存... みたいな?

2.6 災害後 DSM の前処理

DSM は建物・樹木等を含む標高値モデルに対し, 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, ここでは災害後 DSM の建物領域に対し標高値補正を行う. 植生領域については, 2.7.3 項にて除去を行う.

2.6.1 ジオリファレンサ

TODO: オルソ・DEM 項に追記必要かも？後述の処理にて，災害後 DSM と国土地理院の建築物ポリゴンデータ位置合わせ必要... 入力データ節で用いる空撮画像において，位置情報が埋め込まれていない画像群の例が存在する．その場合，オルソモザイク構築項，DEM 構築項で前述したようにオルソ画像や災害後 DSM は位置情報を持たない．そのため，災害後 DSM に位置情報が付与されていない場合，GIS のオープンソフトである QGIS[?] のジオリファレンサ機能を利用して位置合わせを行う．

2.6.2 建物領域の検出

TODO: 凸領域で検出したかった建物領域は直下視点の空撮画像中では単純な形状であることが多い．そのため，2.3.6 節で得たオルソ画像の各領域に対し円形度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．円形度は領域形状の簡易さを表す指標であり，式 2.11 で表される． S は領域の面積， L は領域の周囲長， C は円形度を示す．

$$C = \frac{4\pi S}{L^2} \quad (2.11)$$

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 2.12 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．

TODO: もう少し詳細に

$$dissimilarity = \sum_{i=0}^{255} \sum_{j=0}^{255} (i, j) |i - j| \quad (2.12)$$

TODO: QGIS での処理も書くかもまた，国土地理院の提供する建築物ポリゴンデータ [?] を利用することによって，建物候補領域から建物領域を検出する．建物候補領域の検出結果に建築物ポリゴンデータを重畳し，建物候補領域に建築物ポリゴンデータのピクセルが 50% 以上含まれる場合，その建物候補領域を建物領域として検出する．

2.6.3 建物領域の標高値補正

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．

2.6.4 災害後 DSM の正規化

次に、2.3.7によって得られた DSM はモデル内での相対的な標高値であるため、国土地理院 DEM と水平位置を対応付けし、式 2.13 を適用することによって正規化した絶対的な標高値を与える。 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。

$$x'_i = \frac{x_i - \min(x)}{\max(x) - \min(x)} \times \max(DEM) \quad (2.13)$$

2.7 土砂領域のマスク画像作成

2.7.1 L*a*b*表色系

斜面崩壊・浸水領域での色相や輝度などの特徴を表 2.1 に示す。これらの特徴を用いて各領域の検出を行う。 $x \sim x$ 項に本手法で用いる指標の算出方法と各災害領域について示す。

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。

表??の特徴に従って分類を行うためヒストグラム均一化を行った画像に対し L*a*b*変換 [8] を行う。 L*a*b*色空間とは輝度を L^* 、色相と彩度を示す色度を a^*, b^* で表した色空間である。また、人間の視覚に近い色空間であるため、色情報を用いて分類を行う際に有効な指標である。本研究で用いる画像は現時点では RGB 色空間にて表されているため L*a*b*色空間への変換を行う。 RGB 色空間から L*a*b*色空間への変換式を式 2.14 と式 2.15 に示す。 RGB 色空間はデバイス依存色であり直接 L*a*b*色空間に変換する式は存在しないため、デバイス独立色である XYZ 色空間 [8] に変換してから処理を行う。 XYZ 色空間への変換は 0 から 255 までの 8bit 値を 0 から 1 に正規化し、 $\gamma = 2.2$ に対するガンマ補正を線形の測定値に戻す。 E は R, G, B のいずれかを表し、ダッシュ付きはガンマ補正された値を示す。ただし、式 2.16 を満たすとする。

TODO: a^*, b^* の括弧が一つ多い

$$\begin{cases} L^* = 116 \times f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - 16 \\ a^* = 500 \times \left[f\left(\frac{X}{X_n}\right) - f\left(\frac{Y}{Y_n}\right)\right] \\ b^* = 200 \times \left[f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - f\left(\frac{Z}{Z_n}\right)\right] \end{cases} \quad (2.14)$$

$$\begin{cases} X = 0.412453R + 0.357580G + 0.180423B \\ Y = 0.212671R + 0.715160G + 0.072169B \\ Z = 0.019334R + 0.119193G + 0.950227B \end{cases} \quad (2.15)$$

$$f(t) = \begin{cases} \sqrt[3]{t} & (t > (\frac{6}{29})^3) \\ \frac{1}{3}(\frac{29}{6})^3 t + \frac{4}{29} & (t \leq (\frac{6}{29})^3) \end{cases} \quad (2.16)$$

2.7.2 土砂候補領域検出

斜面崩壊領域は表??に示すように、輝度と色相、彩度に特徴を持つ。よって、これらの特徴を表す $L^*a^*b^*$ 色空間の L^* 値と a^* 値、HSV 色空間の S 値を用いる。ヒストグラム均一化処理後の画像に対し $L^*a^*b^*$ 変換と HSV 変換を行い、これらの指標を用いた閾値処理により斜面崩壊領域を検出する。

2.7.3 植生領域検出

各不要領域の特徴を式??に示す。... 節と同様にこれらの特徴を用いて各領域の検出を行う。... 項に各不要領域について示す。斜面崩壊は植生を多く含む山間部の斜面にて発生し、土砂に混ざった植生部分を誤検出する可能性がある。（あと普通に繁茂してるやつ）よって、式??で示した植生領域の特徴から、 a^* 値を用いた閾値処理によって植生領域を検出する。

2.7.4 統合処理による土砂領域検出

2.7.5 土砂領域検出結果の二値化処理

2.7.6 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

TODO: 開閉地形等を基準の中心点とできないか

精度評価の際に Mean-Shift 法での領域ベースでの正解データを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

TODO: Python コード, Metashape それぞれ? 本研究における実験環境を表 3.1 に示す.

3.2 入力データ

本研究では災害後空撮画像として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 [?], 国土地理院提供の XXX 航空画像, 災害前 DEM として国土地理院 DEM を使用して実験を行った. 空撮画像の詳細を表 3.2 から表 3.4, 国土地理院 DEM の詳細を表 3.5 から表 ?? に, 基盤地図情報の詳細を表 3.8 から表 3.10 に示す.

参考: 雨宮さん 4 例, 岩下さん 6 例, 中山さん 3 例, 竹内さん 3 例, Ave. 4 例

NOTE: 日時・箇所だけ付番してまとめて良いかも

NOTE: 日時・箇所だけ付番してまとめて良いかも

3.3 実験結果

3.3.1 入力データ

入力データとして利用した空撮画像の一部, 国土地理院 DEM を図 ?? から図 ?? に示す.

表 3.1: 実験環境

CPU	Apple M1
メモリ	16.00GB
OS	macOS Monterey 12.4
使用言語	Python 3.9.1
コンパイラ	??
使用ライブラリ	OpenCV XX, GDAL XX, numpy XXX, mpl(texture) , PyMeanShift XX, scipy
使用ソフト	Metashape XX, QGIS 3.22.13

3.3.2 三次元復元

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。

3.3.3 災害前 DEM の前処理

3.3.4 領域データの抽出

3.3.5 建物領域の標高値補正 or 災害後 DSM の前処理

3.3.6 土砂領域のマスク画像作成

その後、作成した土砂マスクを図 6 に示す。

3.3.7 土砂量推定

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。

3.3.8 土砂移動推定

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 [10] 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??)。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

表 3.2: 空撮画像 (実験 1)

災害名称	
撮影箇所	
撮影機体	ドローン
撮影日時	
使用枚数	
解像度	
提供	国立研究開発法人防災科学技術研究所

とにより精度評価を行った（式 3.1）。 $answer$ 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。

$$accuracy = 1 - \left| \frac{answer - result}{180} \right| \quad (3.1)$$

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

表 3.3: 空撮画像（実験 2）

災害名称	
撮影箇所	
撮影機体	ドローン
撮影日時	
使用枚数	
解像度	
提供	国立研究開発法人防災科学技術研究所

表 3.4: 空撮画像 3

災害名称	
撮影箇所	
撮影機体	ドローン
撮影日時	
使用枚数	
解像度	
提供	国立研究開発法人防災科学技術研究所

表 3.5: 国土地理院 DEM（実験 1）

名称	数値標高モデル？
作成箇所	
作成日時	
解像度	
メッシュサイズ	
提供	国土地理院

表 3.6: 国土地理院 DEM（実験 2）

名称	数値標高モデル？
作成箇所	
作成日時	
解像度	
メッシュサイズ	
提供	国土地理院

表 3.7: 国土地理院 DEM（実験 3）

名称	数値標高モデル？
作成箇所	
作成日時	
解像度	
メッシュサイズ	
提供	国土地理院

表 3.8: 基盤地図情報（実験 1）

名称	基盤地図情報基本項目
作成箇所	建築物の外周線
作成日時	
縮尺	
提供	国土地理院

表 3.9: 基盤地図情報（実験 2）

名称	基盤地図情報基本項目
作成箇所	建築物の外周線
作成日時	
縮尺	
提供	国土地理院

表 3.10: 基盤地図情報（実験 3）

名称	基盤地図情報基本項目
作成箇所	建築物の外周線
作成日時	
縮尺	
提供	国土地理院

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 [11] 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。

4.2.3 3つ目

建物領域の下に存在する土砂土砂量の精度、土砂マスク作成の精度、前後データの解像度差異、建物領域で災害前のデータを使っている DEM が整備されているか SfM で時間がかかること

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>.
- [11] 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