

公共財団法人 国土地理協会  
2022 年度 学術研究助成

助成調査・試験研究完了報告書

申請課題

低価格レーザーキャナーを用いた簡易型 3D マッピングシステムの構築と  
地理学での展開

濱 侃 千葉大学大学院園芸学研究院・助教

中田 高 広島大学大学院人間社会科学研究科・名誉教授

## 1. はじめに

近年、VR（バーチャルリアリティ）等のデジタル空間に関わる技術が急速に普及・発展しデジタル空間情報の活用が進む中、3次元（3D）マッピング技術の必要性は益々高くなっているが、このような技術は専門性が高く、誰でもが簡単に使えるものとはなっていない。フィールドワークを行う地理学研究者の多くが、詳細かつ正確な地図を安く簡単に作成する方法を模索していると考えられる。近年では、ドローンやレーザースキャナ（LiDAR）を使った方法が普及してきたが、様々な規制や高価格といった問題があり、誰でもが安易に利活用することは困難であった。現地調査において事物の3Dマッピングが容易にできれば、その波及効果は計り知れない。自然地理学が対象とする事物以外でも、集落・街並みや世界遺産などの3D化と地図化が可能となるなど、その適用範囲は多岐にわたる。本報告では、低価格な簡易型3Dマッピングシステムを紹介しその普及を図りたい。

### 1.1 研究の目的

本研究の目的は、低価格LiDARを用いた簡易型3Dマッピングシステムの構築し、これを様々な地理学の調査研究に広く活用できるように普及することである。これまで、地理学が対象とするもの（例えば地形や植生）の3D情報の計測にLiDARが用いられることはあった。しかし、機材そのものが数千万円から数百万円と高額であり、研究者個人が容易に購入・使用できるものではなかった。

近年、自動車の自動運転のためのLiDARの大量生産に伴ってセンサーの急激な低価格化と同時に、LiDARで得られる点群情報のマッピング技術が急速に発展している。その結果、研究者個人レベルで購入・活用し、LiDARを用いた3D画像や地図が作成できる環境が整いつつある。これは、迅速かつ簡易な地形計測を可能とするだけに留まらず、従来多大な労力と時間を要していた測量調査の劇的な省力化を可能とする画期的な技術革新である。一方、簡易LiDARを活用するためには計測システムの構築に専門性が必要であるため、現段階では誰もが容易に利用できるものではなく、その導入・普及にはいくつかの障壁が存在する。

そこで、本研究はその隘路を切り開くために、以下の目的を設定した。

- ① 計測システムを携行し研究対象事物にレーザーを照射するだけで、容易に3Dマッピングが可能な簡便な低価格システムを構築する。
- ② 実際の地形計測や事物の3Dマッピングに利用し、その有効性の検証と効率的な活用法を確立する。
- ③ 機材の小型化・軽量化を図り計測をより効率的に行うために、マイクロ・コンピューターであるRaspberry Pi 4を用いたシステムを開発する。

### 1.2 研究の方法

研究目的を達成するために、容易に3Dマッピングを行うことを可能とする簡便な低価格システムの構築を行った。計測システムに用いるLiDARは、自動車などの自動運転のために開発・販売されている安価なLiDARであるLivox社のAviaを用いた。このLiDARは高価格LiDARに匹敵する1秒間に24万点の点群データが取得可能なもので、これを高性能ノートPCに接続し、マッピング用の

SLAM(Simultaneous Localization and Mapping)によってリアルタイムで3D マッピングを行った。計測には、PC の OS は Linux 系のシステムである Ubuntu をインストールしたものをを用いた。調査地ではこの計測システムを手持ちで任意に移動しながらレーザー光を照射し点群を取得し 3D マッピングを行う。取得した点群データの処理は、CloudCompare を利用した。さらに、DEM や DSM に変換し、GIS ソフトで加工して目的に応じた地図作成を行った。

地理学分野では、ドローンの撮影画像の解析による 3D マッピングとその利用が進んでいるが、法的規制が進む中でドローンの運用は人口集中地区での規制を始め利用が困難となりつつある。本研究で紹介する LiDAR 計測システムは法的な制約もなく、持ち歩くだけで詳細な 3D マッピングが可能である。この中で低価格 LiDAR の出現は、誰でもが容易に活用できるマッピングシステムの構築を可能とし、このシステムの普及は地理学の諸分野の地域調査研究に画期的な変化をもたらすと期待される。

## 2. 計測システムとデータ処理

### 2.1 ハードウェアの構成

写真1には筆者らが組み立てた計測システムを示す。本システムは、LiDAR 本体 (Livox Avia), PC (OneGx1 Pro), Livox converter, M12 通信ケーブル, イーサネット USB Type-C 変換アダプタ, イーサネットケーブル (カテゴリ5e 以上のもの), 電源ケーブル, 3 セル Lipo バッテリーで構成されている。このうち、Livox converter, M12 通信ケーブル, 電源ケーブルは Livox Avia の付属品である。Lipo バッテリーと接続するために、電源ケーブルの片方は XT60 コネクタを半田付けしている。システム全体の価格は 20 万円弱で、そのうち 16 万円は LiDAR 本体が占める。

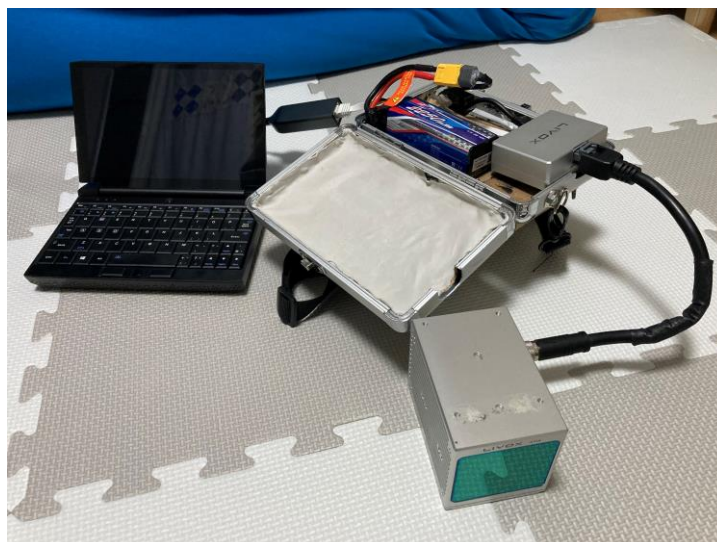


写真1 低価格 LiDAR を用いた計測システム。

LiDAR の計測データは PC に保存され、後述する 2 つのいずれかの手法で 3D のマッピングが可能である。現場では、この計測システムを持って歩くだけで、野外屋内問わずに 3D マッピングができる。感覚としては現地をスキャンするイメージで、現地の事物を 3D の点群データとしてデジタル化して記録しておくことができる。あとは、この 3D の点群データから色々なデータ (例えば、建物の大きさ、地形の高低差など) を抽出することができる。

### 2.2 マッピングシステムの準備

本研究で構築したマッピングシステムで使用する OS (オペレーティングシステム) は、Windows システムではなく Ubuntu を使用する。Ubuntu 上で SLAM を行い、LiDAR で取得したデータの 3D マッピングを行う。以降は Ubuntu の OS のインストール手順および SLAM のインストール手順を紹介する。

### 2.2.1 Ubuntuのインストール

Windows10にはLinuxを使えるWSL (Windows Subsystem for Linux) という機能がある。しかし、LiDARのデータをマッピングするシステムがうまく動作しなかったため、本研究ではWindows10をインストールしているPCに追加でUbuntu18.04またはUbuntu20.04をインストールした。なお、NVIDIAのグラフィックボードを搭載している場合、Ubuntuの起動画面が正しく表示されずインストールできない可能性があるがその対処法については後述する。

まずは、UbuntuのOSをダウンロードする。この作業はWindows10を起動して行う。なお、Ubuntu18.04は有志による日本語版もあるが英語版 (Ubuntu-18.04.5-desktop-amd64.iso もしくは ubuntu-20.04.5-desktop-amd64.iso) をダウンロードすることを推奨する。ダウンロードしたisoファイルはDVDかUSBメモリに記録する必要がある。DVDに記録する場合は空のDVDをセットし、isoファイルを右クリック→「ディスクイメージの書き込み」から作成する。USBメモリに記録する場合はRufus (<https://rufus.ie/ja/>) を使用すると良い。

Ubuntuをインストールする予定のPCはあらかじめ、インストール予定のドライブに空き容量があるか確認しておく必要がある。なおLiDARで取得するデータを外部ストレージに保存するつもりであれば推奨環境である25GB程度の容量があれば問題ないが、もっと大きい容量を確保しておくことを推奨する。なお、このときパーティションの分割を行う必要はない。

Ubuntuのインストールは以下の手順で行う。

- DVDもしくはUSBメモリをPCに挿入し、PCの電源を入れる。メーカーのロゴが表示されたらBIOS起動キー (だいたいF2かDeleteあたり) を押してBIOSに入る。
- 普通にWindowsが立ち上がってしまう場合は[電源とスリープ]→[電源の追加設定]→[電源ボタンの動作の選択]から高速スタートアップを無効化する。
- BIOSを開くと[Boot]の項目があり、そこでDVD/USBメモリの起動順位を一番上にする、もしくはブートデバイスとして選択することでUbuntuを起動する。
- うまく起動しない場合は[Fast Boot], [Secure Boot]の設定を無効化する。
- 起動後、[インストールする]をクリックして設定を進める。インストールの種類では必ず[Ubuntuをwindowsとは別にインストール]とすること。[ディスクを削除してUbuntuをインストール]を選択するとPCの全データが消去されるので注意する。
- Ubuntuに割り当てるディスク容量は最低25GB程度あれば大丈夫であるが、余裕があれば多めにしておくことを推奨する。
- 設定が終了すると再起動してインストールが完了する。

### 2.2.2 SLAMのインストール (Livox Avia用)

Ubuntuを起動後、端末 (ターミナル) を開き (ショートカットキー: ctrl+Alt+T) 以下のコマンドを入力し、実行 (Enter) を繰り返す。なお、有線LANを使ったほうが、通信が安定するため作業がスムーズに進行することが多い。

まず ROS Melodic (Ubuntu18.04 を使用する場合) をインストールする。

- `sudo sh -c 'echo "deb http://packages.ros.org/ros/ubuntu $(lsb_release -sc) main" > /etc/apt/sources.list.d/ros-latest.list'`
- `sudo apt install -y curl`
- `curl -sSL 'http://keyserver.ubuntu.com/pks/lookup?op=get&search=0xC1CF6E31E6BADE8868B172B4F42ED6FBAB17C654' | sudo apt-key add -`
- `sudo apt update`
- `sudo apt upgrade`
- `sudo apt install -y ros-melodic-desktop-full`
- `sudo apt install python-rosdep`
- `sudo rosdep init`
- `rosdep update`
- `cd`
- `echo "source /opt/ros/melodic/setup.bash" >> ~/.bashrc`
- `source ~/.bashrc`
- `sudo apt install -y python-rosinstall python-rosinstall-generator python-wstool build-essential python-catkin-tools`

Ubuntu20.04 を使用する場合は ROS Melodic ではなく ROS Noetic をインストールする。

- `sudo sh -c 'echo "deb http://packages.ros.org/ros/ubuntu $(lsb_release -sc) main" > /etc/apt/sources.list.d/ros-latest.list'`
- `sudo apt install curl # if you haven't already installed curl`
- `curl -s https://raw.githubusercontent.com/ros/rosdistro/master/ros.asc | sudo apt-key add -`
- `sudo apt update`
- `sudo apt install ros-noetic-desktop-full`
- `echo "source /opt/ros/noetic/setup.bash" >> ~/.bashrc`
- `source ~/.bashrc`
- `sudo apt install python3-rosdep python3-rosinstall python3-rosinstall-generator python3-wstool build-essential`
- `sudo rosdep init`
- `rosdep update`

Point Cloud Library をインストールする。

- `sudo apt install libpcl-dev`
- `sudo apt install cmake`

Eigen をインストールする。

- `cd`
- `git clone https://gitlab.com/libeigen/eigen.git`

OpenCV をインストールする。

- `sudo apt-get install libopencv-dev python3-opencv`

Livox SDK をインストールする。

- `cd`
- `sudo apt install cmake`
- `git clone https://github.com/Livox-SDK/Livox-SDK.git`
- `cd Livox-SDK`
- `cd build && cmake ..`
- `make`
- `sudo make install`

livox\_ros\_driver をインストールする。

- `cd`
- `git clone https://github.com/Livox-SDK/livox_ros_driver.git ws_livox/src`
- `cd ws_livox`
- `catkin_make`
- `source ./devel/setup.sh`

FAST-LIO (Wu *et al.*, 2022) をインストールする。

- `cd`
- `mkdir -p catkin_ws/src`
- `cd ~/catkin_ws/src`
- `git clone https://github.com/hku-mars/FAST_LIO.git`
- `cd FAST_LIO`
- `cd include`
- `git rm -r ikd-Tree`

- `git submodule add https://github.com/hku-mars/ikd-Tree`
- `cd ikd-Tree/ikd-Tree`
- `mv *.* ../`
- `cd ~/catkin_ws`
- `catkin_make`
- `source devel/setup.bash`

なお、初期設定では LiDAR で取得した生データ (bag ファイル) を保存する設定にはなっていない。  
bag ファイルを保存するためには、以下の設定を変更する必要がある。

- 任意の場所に点群データの保存場所を作る(例: /home/<ユーザー名>/testfiles)。
- ~/catkin\_ws/src/livox\_ros\_driver/launch/livox\_lidar\_msg.launch を開く

11 行目を以下のように変更する:

- `<arg name="rosbag_enable" default="true"/>`

39 行目を以下のように変更する:

- `<node pkg="rosbag" type="record" name="record" output="screen" args="-a -O /home/<ユーザー名>/testfiles/test.bag"/>`

LiDAR と PC を接続してデータを保存するためには、有線 LAN 設定の設定を変更する必要がある。

- アドレス: 192.168.1.50
- ネットマスク: 255.255.255.0
- ゲートウェイ: 192.168.1.1

LiDAR は撮影モードが設定可能で、以下のファイルの中身を書き換えることで撮影モードを変更できる。

- catkin\_ws/src/livox\_ros\_driver/config にある livox\_lidar\_config.json を開く。
- “return\_mode”の数字を変更
  - 0: single first return
  - 1: strongest single return
  - 2: dual return
- "imu\_rate": 1

Nvidia グラフィックボードを搭載している PC で Ubuntu のインストールを行う際、Ubuntu のインストールメディアを起動しようとするとき黒い画面に線や壊れた文字のようなものが表示されたとき動かなくなってしまうことがある。これはグラフィックボードのドライバが正常に動作していないためである。このような場合は以下の手順でインストールを行う。

- BIOS から Ubuntu のインストールメディアを起動する際に立ち上げる方法を選択する画面が現れる。その時、[Install Ubuntu]を選択した状態で”E”キーを押し、起動コマンド編集画面に入る。
- “quiet splash”と書かれている部分を”nomodeset”に書き換え、F10 を押して起動する。画面が表示されるようになるので、インストールを進める。
- 解像度が最適化されていないため設定画面が見切れてしまうことがある。このとき Windows キーを押しながらウィンドウをドラックすると端まで表示させることができる。
- インストールが完了し再起動した後も同様に”E”キーを押しして起動コマンド編集画面に入り、“quiet splash”と書かれている部分を”nomodeset”に書き換え、F10 を押して起動する。

以上の作業を終えたのち、以下のコマンドを実行してドライバを更新する。

- `sudo apt update`
- `sudo apt upgrade`
- `sudo ubuntu-drivers autoinstall`

起動コマンドを変更せず再起動し、正常に表示されていることを確認する。

## 2.3 マッピング処理

LiDAR でのマッピングは、リアルタイムで行う方法と現地で bag ファイルの取得のみを行い、その bag ファイルを後処理でマッピングする方法の 2 通りの方法がある。前者のリアルタイム処理のメリットは、マッピング成果を確認しながら作業できるため、データの取りこぼし等が発生しにくい点がある。ただし、マッピングを行う SLAM のアルゴリズムは日進月歩であるため、リアルタイム処理でマッピングのコツをつかんだ場合は、後者である後処理マッピングを推奨する。そうすることで、新しいアルゴリズムが発表された際にそのアルゴリズムを使用することができるためである。

### 2.2.1 リアルタイム処理

LiDAR センサー (Avia) が起動していることを確認したのち、端末 (ターミナル) を使い、以下のコマンドを実行する。

- `cd ~/catkin_ws/src`
- `source ~/catkin_ws/devel/setup.bash`
- `roslaunch fast_lio mapping_avia.launch`

コマンドの実行後、マッピング成果を表示する `rviz` が立ち上がる。ここで、端末に `ctrl+Z` を入力しプロセスを一時停止する。その後、水準器とコンパスを使用して LiDAR センサーを水平かつ真東にむけ、以下のコマンドを実行する。

- `roslaunch livox_ros_driver livox_lidar_msg.launch`

マッピングが開始し、`rviz` にその様子が描画される。

マッピングを終了する場合は端末に `Ctrl+C` を入力する。その後、端末を閉じると、2.2.2 で設定した場所に bag ファイルが保存され、マッピングの成果物である点群データ (pcd ファイル) は、`/home/ユーザー名/catkin_ws/src/FAST_LIO/PCD` に保存される。なお、いずれのファイルも新しく計測を開始す



ると上書きされるため、続けて計測する場合は別のフォルダへの移動や名前の変更を忘れないように注意する必要がある。

### 2.2.2 後処理

基本的にはリアルタイム処理と作業は変わらないが、現地では `rviz` を立ち上げないでデータ取得を行う。まず端末を使い、以下のコマンドを実行する。

- `cd ~/catkin_ws/src`
- `source ~/catkin_ws/devel/setup.bash`
- `roslaunch livox_ros_driver livox_lidar_msg.launch`

これで計測が開始される。計測を終了する場合は端末に `Ctrl+C` を入力する。その後、`bag` ファイルを用いてマッピングを行う。端末を使い、以下のコマンドを実行する。

- `cd ~/catkin_ws/src`
- `source ~/catkin_ws/devel/setup.bash`
- `roslaunch fast_lio mapping_avia.launch`

コマンドの実行後、マッピング成果を表示する `rviz` が立ち上がる。ここで、端末に `ctrl+Z` を入力しプロセスを一時停止する。その後、以下のコマンドを実行し、取得した `bag` ファイルを再生する。

- `rosbag play ○○○.bag`

○○○の部分は取得した `bag` ファイルのファイルパスを入力する。すると、マッピングが開始し `rviz` にその様子が描画される。マッピングを終了する場合は端末に `Ctrl+C` を入力する。その後、端末を閉じると、マッピングの成果物である点群データ (`pcd` ファイル) は、リアルタイム処理と同様で `/home/ユーザー名/catkin_ws/src/FAST_LIO/PCD` に保存される。なお、リアルタイム処理と同様にマッピングを開始すると自動で上書きされるため、続けてマッピングする場合は `pcd` ファイルの上書きに注意が必要である。

### 2.2.3 解析環境の違いとマッピング結果

マッピングで生成される点群の量 (密度) は PC の CPU の性能が高いほど多くなる。同じ `bag` ファイルを用いて、様々な PC でマッピングを行った例を示す。PCD (Point Cloud Data) ファイルサイズが大きいほど点群の量が多いことを示している。

- ノート PC(Core i5 7300U)で実行→ PCD ファイルサイズ 150MB
- デスクトップ PC(Core i7 4770)で実行→ PCD ファイルサイズ 290MB
- デスクトップ PC(Core i9 9900k)で実行→ PCD ファイルサイズ 350MB

その他にも `bag` の再生速度を変化させ、疑似的にゆっくり移動したことにするとマッピングで生成される点群の量 (密度) は多くなった。再生速度の変更は実行時末尾に `-r <実行速度>` を追加するだけで行うことができる。

- `rosbag play ○○○.bag -r 0.5`

この場合、再生速度は 0.5 倍になる。再生速度を複数段階で変化させた際の PCD ファイルのファイルサイズを以下に示す。

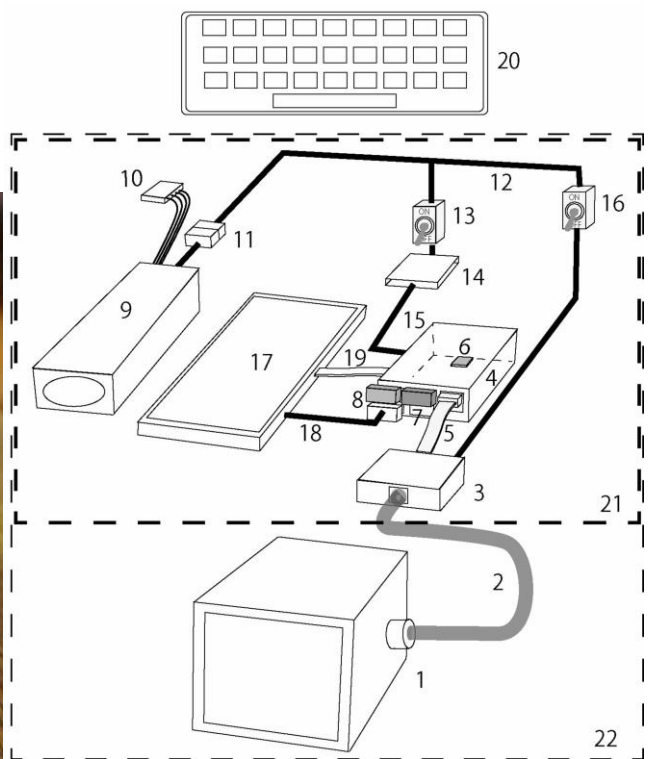
- 通常速度で実行→ PCD ファイルサイズ 463MB
- 0.5 倍速で実行→ PCD ファイルサイズ 758MB
- 2.0 倍速で実行→ PCD ファイルサイズ 341MB

## 2.4 Raspberry Pi4 を用いた小型モバイル LiDAR の製作

日常的に使用しているノート PC をフィールドで酷使することに躊躇する人は少なくないと考えられる。また、簡易モバイル LiDAR 計測のために高性能ノート PC を購入することは経済的な負担が増す。ノート PC に代えてマイクロ・コンピューターである Raspberry Pi 4 を用いたさらに小型軽量化した計測システムを開発した (写真 2, 第 1 図)。総重量は約 1300 グラムであり、小型ノート PC の重量程度である。



写真 1 RasPi LiDAR の外観



第 2 図 RasPi LiDAR の構成

1 LiDAR センサー, 2 LiDAR ケーブル, 3 Ether コンバーター, 4 シングルボード・コンピューター (Raspberry Pi 4), 5 Ether ケーブル, 6 プログラム収納用 Micro SD カード, 7 データ保存用 USB メモリー, 8 キーボード用 WiFi レシーバー, 9 3S LiPo バッテリー, 10 バランス充電用プラグ, 11 バッテリー接続プラグ, 12 パワーケーブル (11. 1V), 13 シングルボード・コンピューター用電源供給スイッチ, 14 DC-DC 電圧降下装置, 15 5V 電源ケーブル, 16 LiDAR センサー電源供給用スイッチ, 17 モニター, 18 モニター用電源ケーブル, 19 HDMI ケーブル, 20 WiFi キーボード

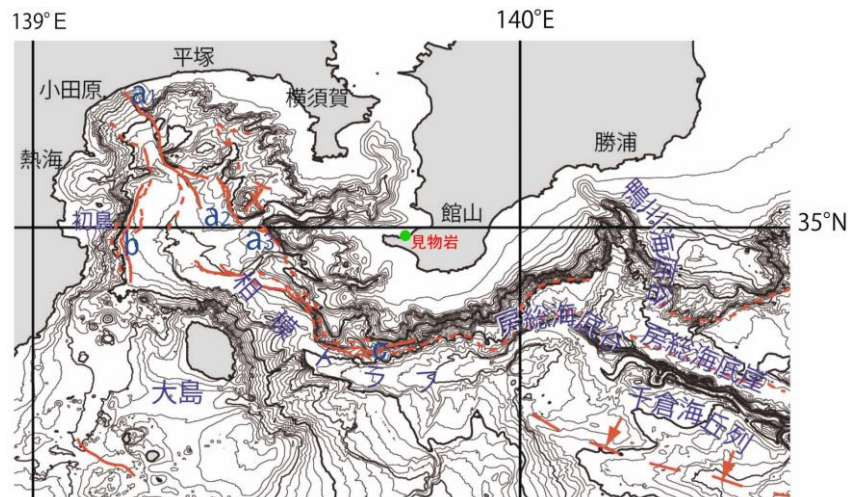
取得したデータを高性能 PC によって後処理する必要があるが、フィールドでの操作性は高く、効率的な計測が可能となった。

### 3. 簡易モバイルLiDARを用いたフィールド・マッピングの事例（地形・自然災害）

構築した計測システムを用いて実際の事物を計測した事例を紹介する。なお、SLAM を用いたマッピングで得られた PCD ファイルは、フリーソフトウェアである CloudCompare を用いて点群の処理および解析を行った。

#### 3.1 房総半島南部の地震隆起海岸の計測

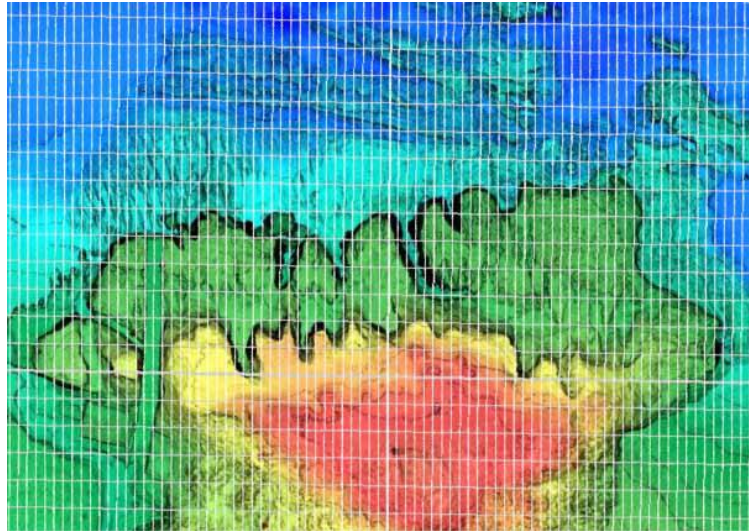
房総半島南部は太平洋プレート、フィリピン海プレート、北アメリカプレートの三重会合点に近く、地震活動が活発な地域である。相模トラフから房総海底谷に沿ってフィリピンプレートと北アメリカプレートの境界が位置しており、それらの北縁に沿って大規模な海底活断層が発達する（第 2 図）。これらの活断層の繰り返し活動によって世界でも有数の完新世の地震性隆起段丘が発達している（中田ほか, 1980 ほか）。これらの段丘は 4 段に区分され、それぞれ沼 I 面－IV 面の 4 面に区分されている。



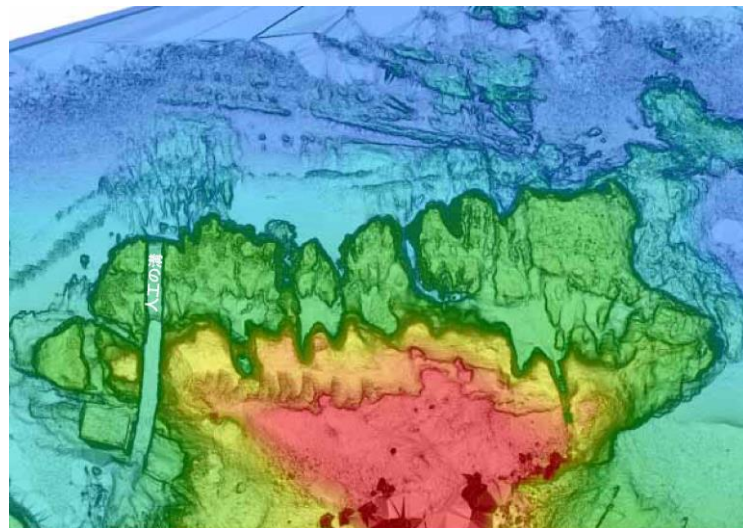
第 2 図 房総半島に影響を及ぼす海底活断層と見物岩に位置  
泉ほか（2013）に加筆

歴史時代にも、房総海底谷北縁の活断層（c）の活動によって 1703 年元禄地震（M7.9–8.2）が、相模トラフの北縁に沿って発達する活断層（a1-a3）の活動によって 1923 年の大正関東地震（M7.9）が発生し、沼 IV 面が形成されたと推定される。

今回、計測事例とした見物岩は館山市見物の海岸の露出する岩体で大きく 2 段の段丘が発達している。この岩体について、宍倉ほか（2014）は詳細な地上型レーザースキャナーを用いて地形計測を行っている。数百万円以上すると推定される機材を用いて数日間かけて計測した結果が第 3 図である。宍倉ほか（2014）は、生物遺骸群集の年代と高度分布から、高位の段丘が元禄地震、低位の段丘が大正地震に関連して形成されたとしている。一方、地元住民の証言では低位の段丘は大正地震より前の時代に既に陸化していたということで、元禄地震に関連するものという見解もある。

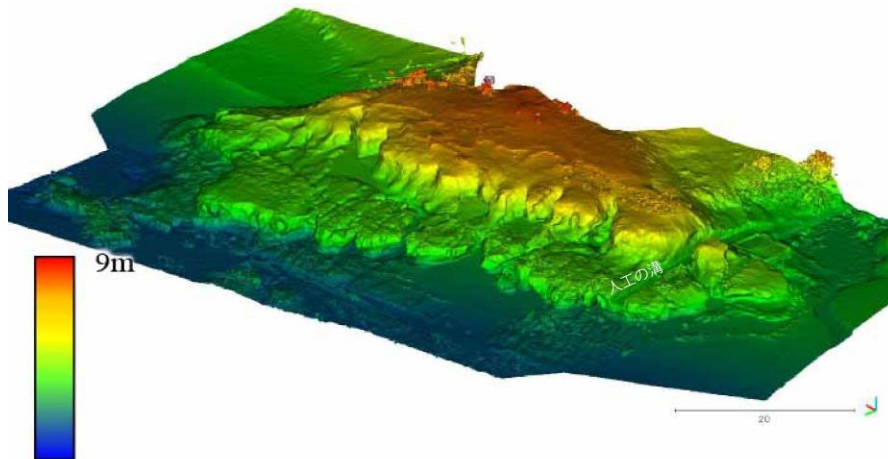


第3図 宍倉ほか (2014)による見物岩の精密地形測量結果



第4図 本研究の簡易モバイル LiDAR による見物岩の地形測量結果

我々が計測した結果が第4図である。これは、宍倉ほか (2014) の計測結果 (第3図) と比較しても精度と詳細さにおいて遜色のないものである。安価でハンディな機材を一人で持ち歩き、要した計測時間は15分に過ぎず、短時間・低コストであり圧倒的に省力化を実現している。

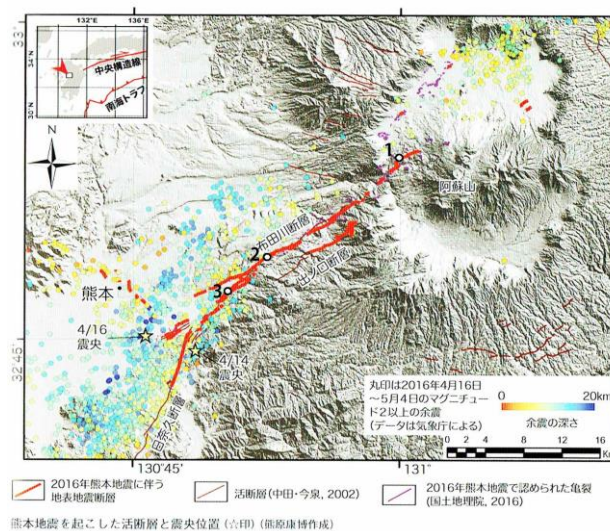


第5図 本研究による見物岩の3D画像

図の右・低位段丘面を横切る排水路と思われる掘削跡

低位段丘面には、背後の川の排水路と思われる人工的な溝が刻まれており（第5図）、溝の底面は現海面の高潮位よりも高い位置にある。このことは、低位面が地震によって隆起する以前に溝が掘られていたこと、すなわち大正地震の前に低位段丘が陸化していたことを示すもので、低位段丘が元禄地震による隆起、高位段丘はそれ以前の地震によるものと考えられる。

### 3.2 熊本地震の地震断層

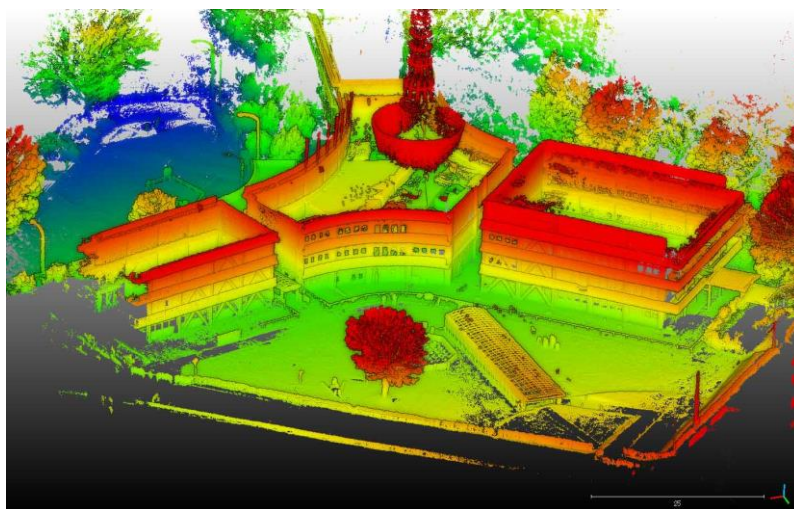


第6図 熊本地震の地震断層と本研究の簡易モバイル LiDAR 計測場所

1：東海大学旧校舎 2：塩井神社 3：平田地区活断層図（熊原原図）（鈴木ほか，2022）に加筆

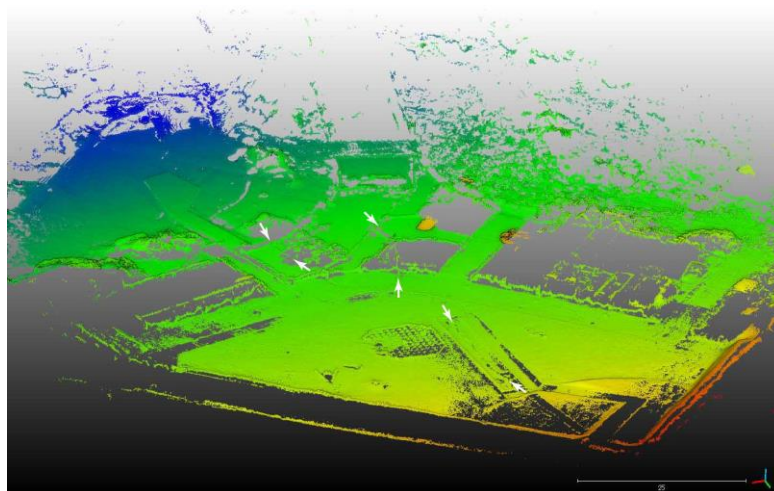
南阿蘇村の旧東海大学農学部校舎は新たに現れた地震断層によって大きな被害を受け、廃校に追いやられた。校舎を破壊した地震断層と破壊された校舎がほぼ原状のまま保存されており、この地震断層では80cmの右横ずれ変位が記録されている（Kumahara *et al.*, 2022）（第7図）。地震断層については、岩佐ほか（2022）によって我々が使用している LiDAR と同種の機器で計測を行っている。我々は地震断

層と破壊された校舎を一緒に計測し、点群データ処理ソフトである CloudCompare を用いて地上部分を取り除くことによって校舎を破壊した地震断層を連続的に追跡することができた（第 8 図）。



第 7 図 簡易モバイル LiDAR で計測した東海大学旧校舎の 3D 画像

画像は東から西を見た図。地震断層は中央下部の細長覆屋から校舎に延びている。校舎は倒壊を防ぐために地震後に 3 分割されている。

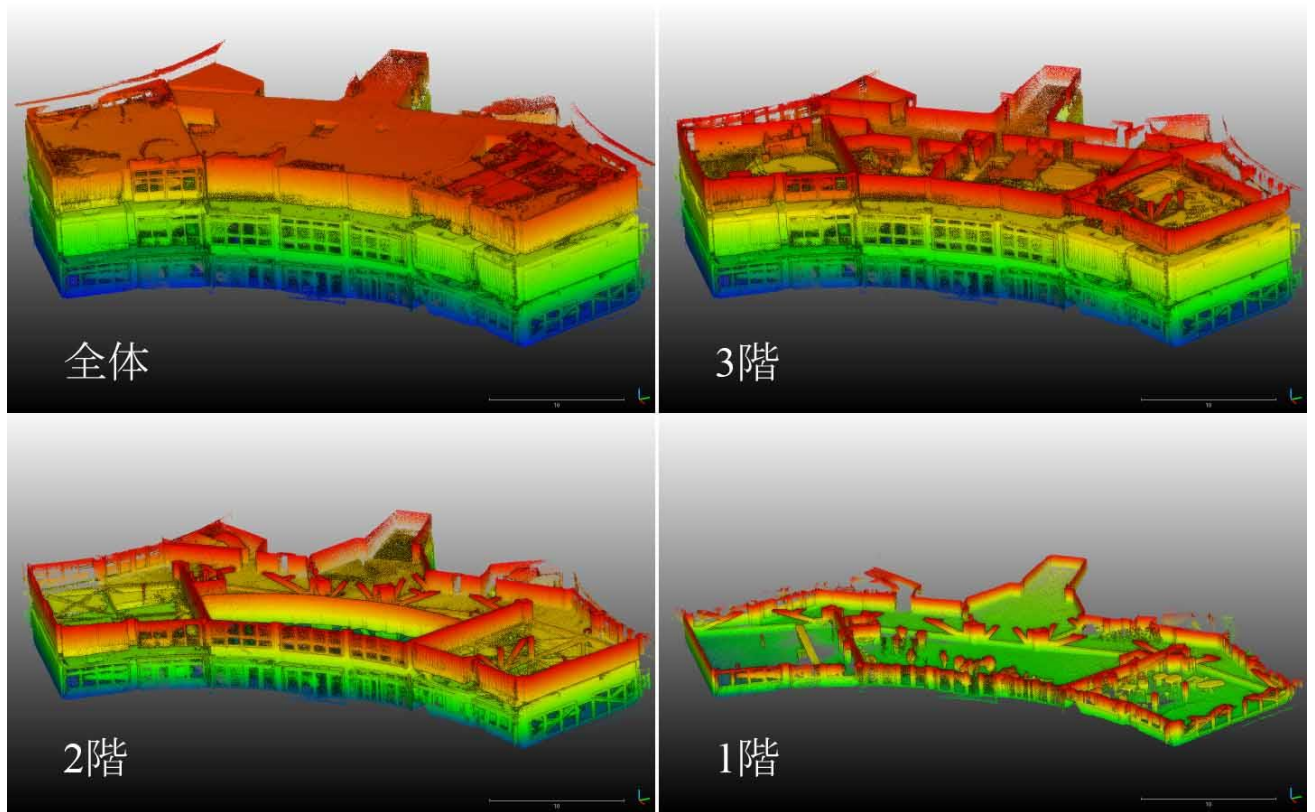


第 8 図 第 7 図から地面出しを行った図

細長い覆屋の下の地震断層や校舎の床に現れた地震断層を認めることができる。

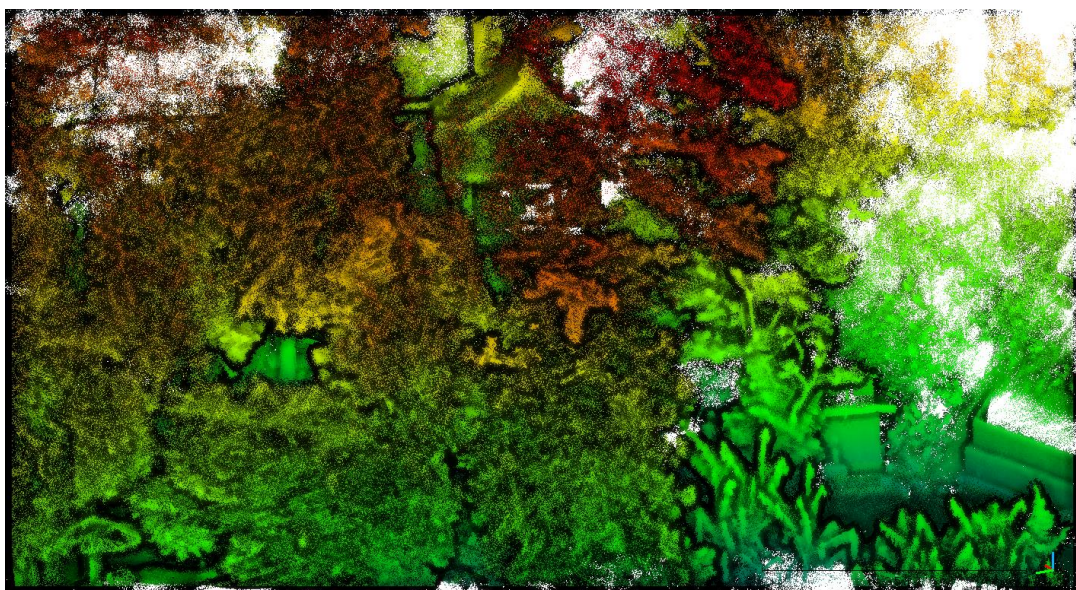
矢印が地震断層の位置

また、破壊された 3 階建ての校舎の内部を相対的に近接する事物の計測に適した Livox Mid-360 を用いて計測し、階層ごとに被害状況を把握することができた（第 8 図）。

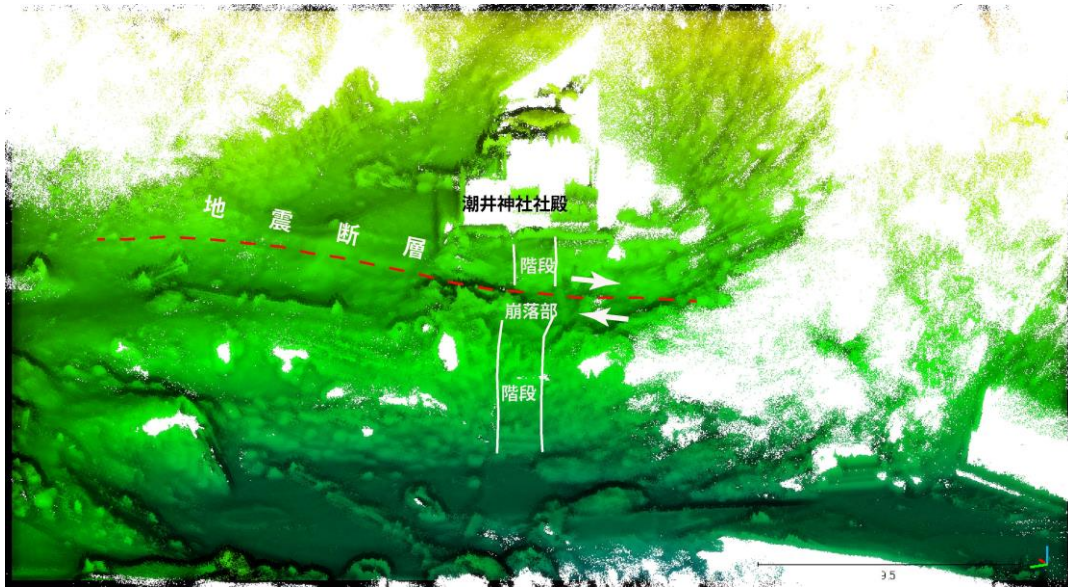


第 9 図 Livox Mid-360 で計測した校舎の内部と各階の底面図層の位置

益城町杉堂の潮井神社周辺は国の天然記念物に指定され、保存のための整備が行われる予定になっている。ここでは、神社の参道が地震断層の南上り 15cm、右横ずれ 210cm に及ぶ大きなずれ (Kumahara *et al.*, 2022) によって破壊され、断層直上にあった大木が転倒している。神社周辺は木々が生い茂り、LiDAR で計測した画像では、地表を見ることが困難である (第 10 図)。



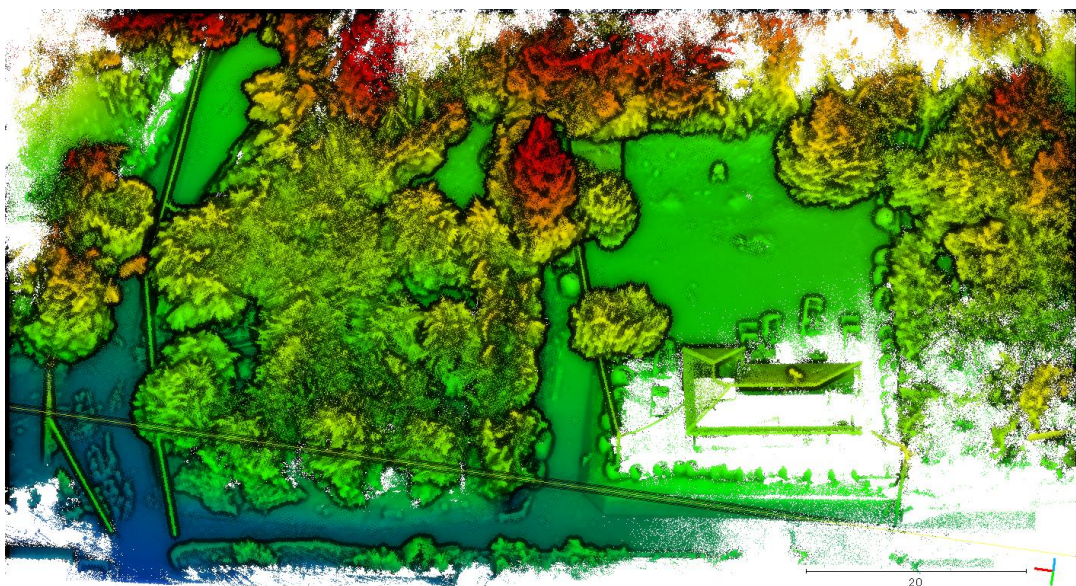
第 10 図 潮井神社周辺の簡易モバイル LiDAR 計測画像  
木々に覆われて地面がよく見えないため、地震断層の観察が困難



第 11 図 第 10 図から地面出しを行った図  
 神社正面の階段のズレやシートに覆われた低い断層崖を認識できる。

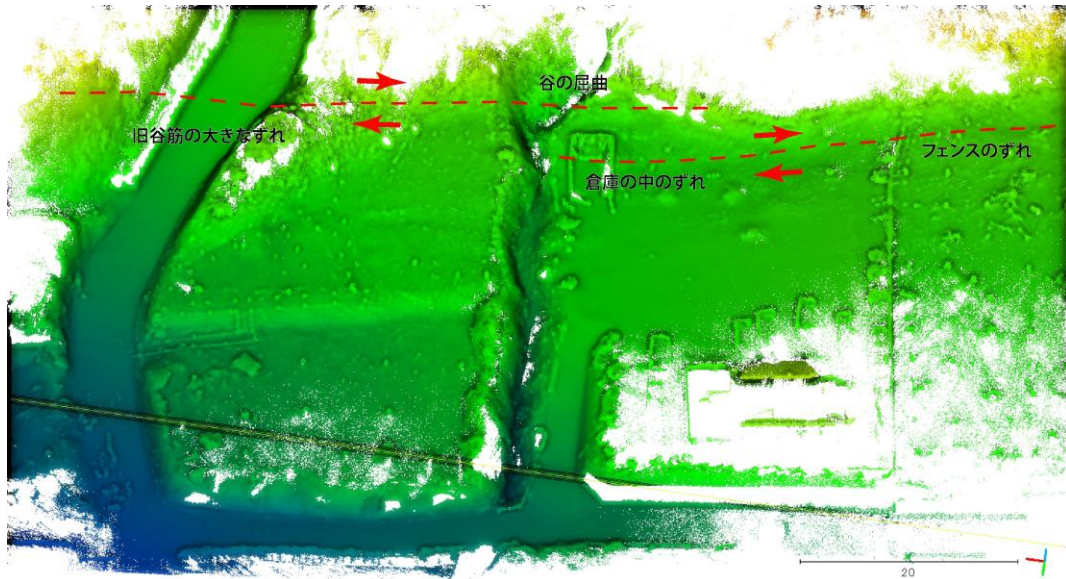
ここでも、CloudCompare を用いて地上部分を取り除き地面出しを行った（第 11 図）。その結果、参道の階段部分の横ずれを確認することができた。縦ずれ変位による小さな崖は、地震直後からシートに覆われている。

益城町平田地区は、地元住民が『熊本地震・平田震災遺構保存会』を結成して地震断層の保存活動に熱心に取り組んでいる地域である。そのため、地震断層による地変がほぼ原状のまま保存されている（第 12 図）。活断層による顕著な河谷屈曲が認められ、その最大変位量は 30m 以上に達する。地震断層は既存の断層崖の基部に沿って出現し、熊本地震に伴う変位量は右横ずれ 115cm、南上り 30cm であった。ここでも植生や建物を取り除き地面出しをした結果、小屋（消防団倉庫）の中に出現した地震断層が現れ、地震断層を連続的に認識することができた（第 13 図）。



第 12 図 平田地区の簡易モバイル LiDAR 計測画像



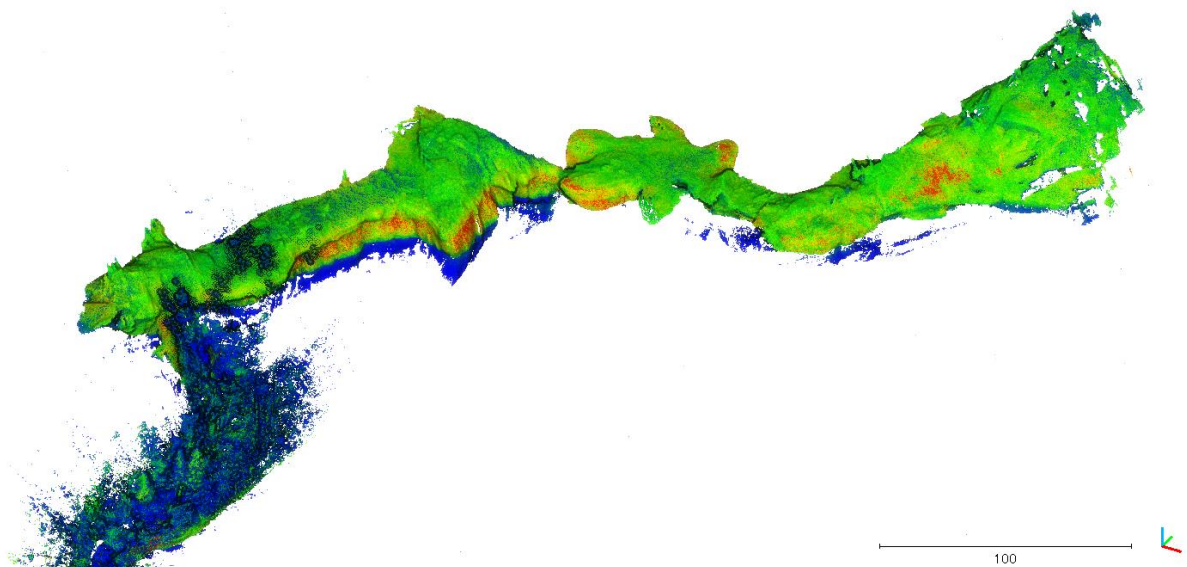


第13図 第12図から地面出しを行った図

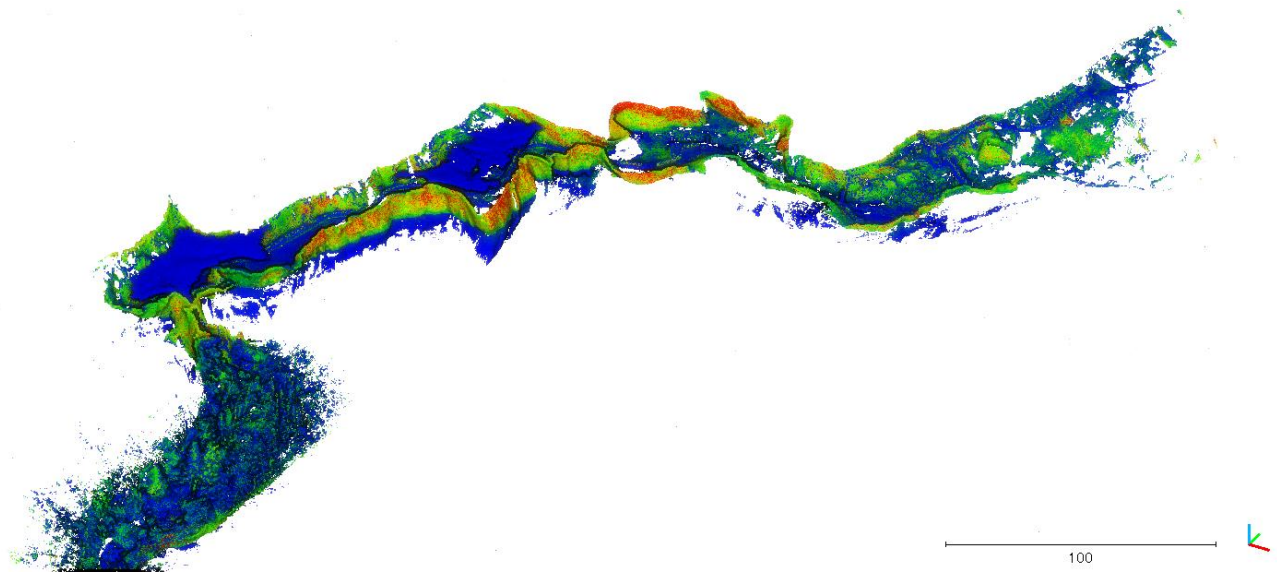
このように、我々が実施したLiDARによる3Dマッピングは、地震に関連する地形の把握に極めて効果的な役割を果たすことが明らかとなった。将来、発生する大地震の際に本調査法が大いに活用されることを期待する。

### 3.3 鍾乳洞調査

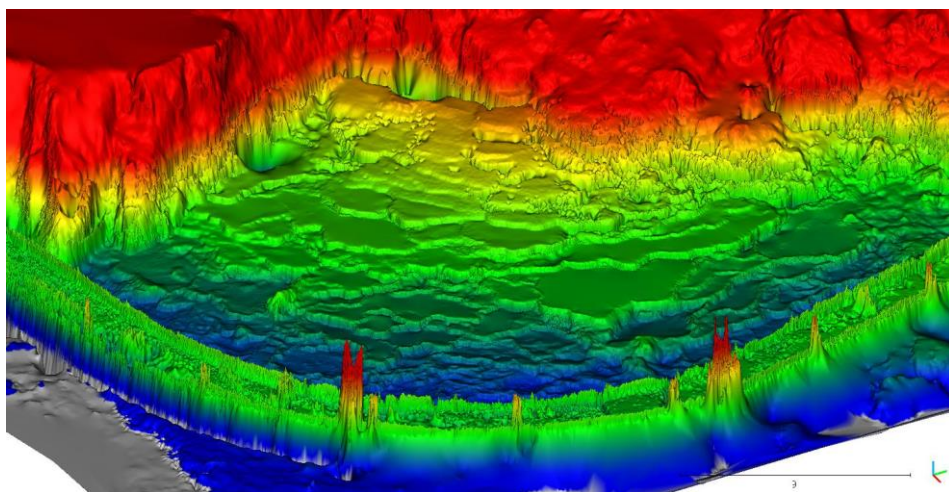
洞窟はGNSSなどの位置情報を必要としない本システムの強みが最も発揮される対象の1つである。そこで、山口県美祢市秋芳町に位置する秋芳洞を事例にLiDARを用いたマッピングを行った。鍾乳洞の入口から計測を開始し、黄金柱までの約700mの距離を往復約20分間計測した。第14図には鍾乳洞でのマッピングデータを示す。入口から連続したマッピングを行うことができ、約20分間の観測で鍾乳洞の内部構造を把握することができた。



第14図 秋芳洞のマッピング成果。色の違いは反射強度を示し、青から赤になるほど反射強度が強いことを示す。向かって左が鍾乳洞の入口で、右が鍾乳洞の奥である。



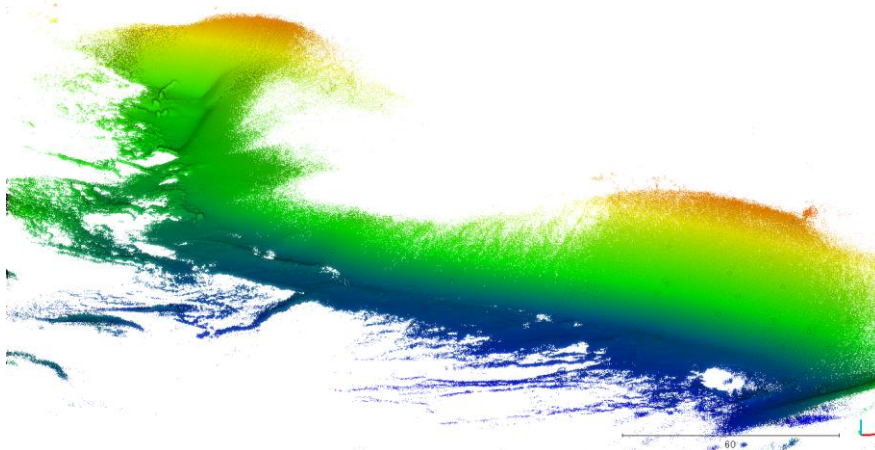
第 15 図 第 14 図の鍾乳洞の天井部を取り除き，内部を見た図



第 16 図 百枚皿の 3D モデル 色の違いは高さを示す。

### 3.4 砂丘調査

本研究で使用している SLAM は，特徴点の移動量から LiDAR の移動量を計算するアルゴリズムである。そのため，特徴点が見つけにくい草原や砂丘などの広大で滑らかな場所は SLAM の弱点であると想定される。そこで，鳥取県鳥取市に位置する鳥取砂丘を事例に LiDAR を用いたマッピングを試みた。計測は鳥取大学乾燥地研究センターから開始し，馬の背と呼ばれる砂丘までの約 3km を連続計測した。取得したデータから後処理でのマッピングも含めて何度か試みたが連続したマッピングを行うことは出来ず，途中で自己位置の計算に失敗した。自己位置の計算に失敗するデータを除外したマッピング結果を第 17 図に示す。当初の想定通り，特徴点の見つけにくい場所は本システムでの計測には適さないことが確認できた。



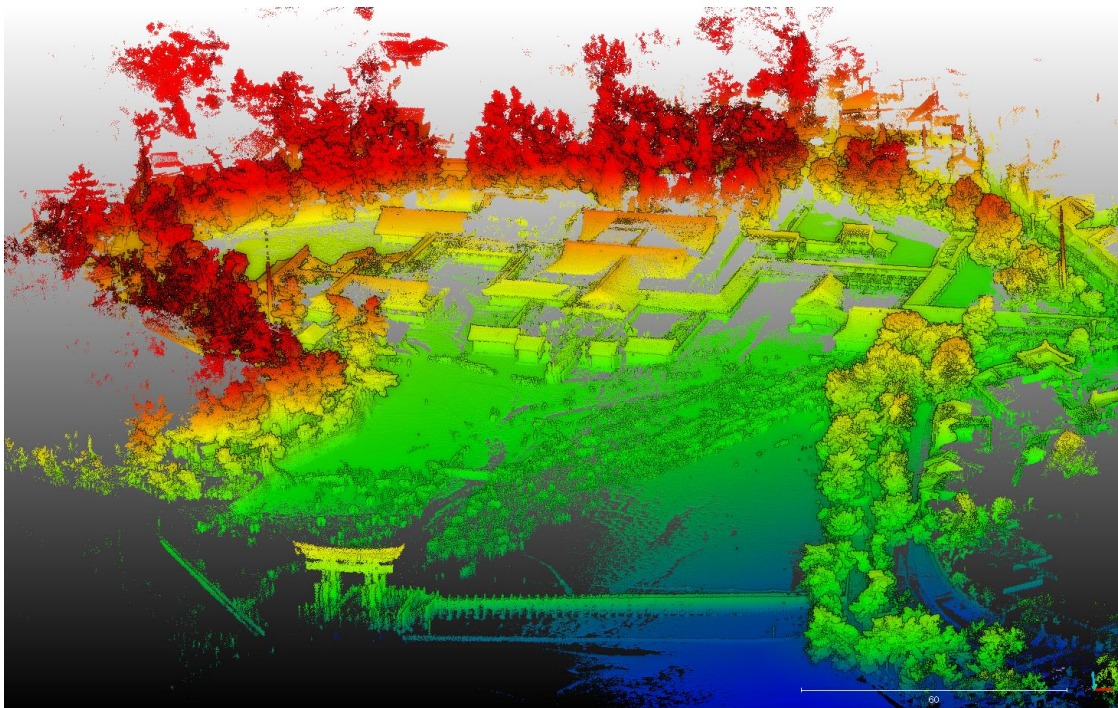
第 17 図 鳥取砂丘に 3D モデル 特徴点が少なく本システムの計測には適していない。

#### 4. 簡易モバイルLiDARを用いたフィールド・マッピングの事例（世界遺産などの例）

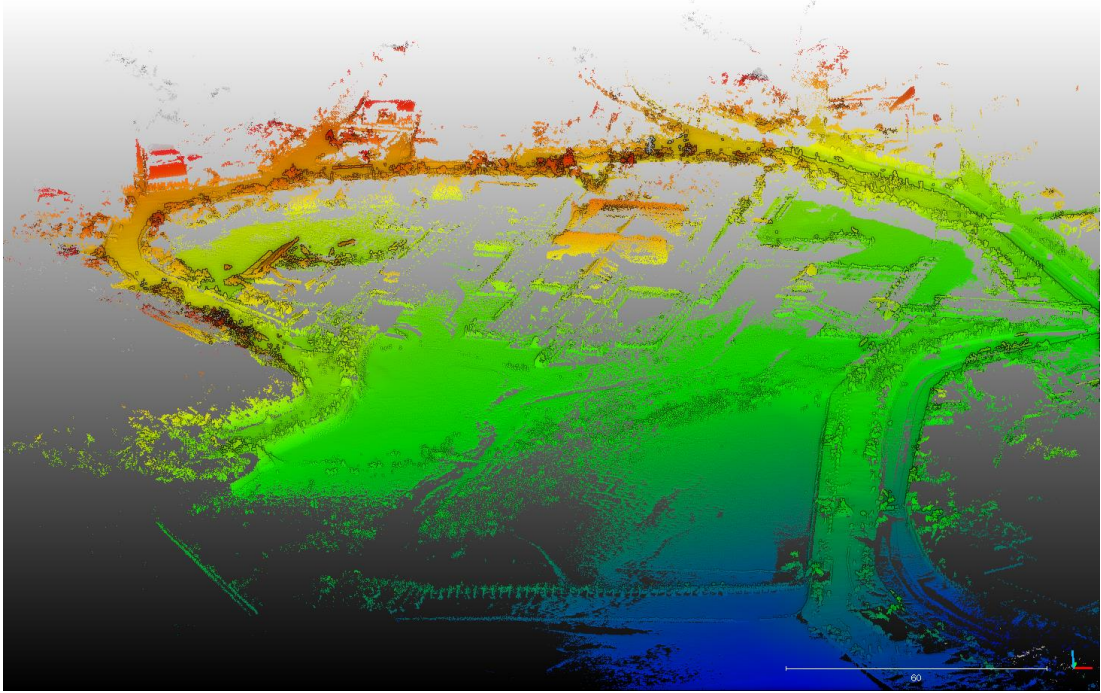
本研究で用いた簡易モバイル LiDAR は世界遺産などの文化財，街並みなどの計測にも大いにその力を発揮する。

##### 4.1 厳島（宮島）

広島県廿日市市に位置する世界文化遺産・厳島神社周辺で計測を行った。干潮時刻を狙い，干潟を重点的に計測した。計測時間は約 20 分で，約 53,000m<sup>2</sup>の面積を計測した。第 18 図は厳島神社周辺のマッピング結果である。計測作業時には広い範囲に多くの修学旅行生が滞留していたが，そのような環境下でもマッピングが可能であるかもテストした。



第 18 図 厳島神社および周辺地域の 3D マッピング画像

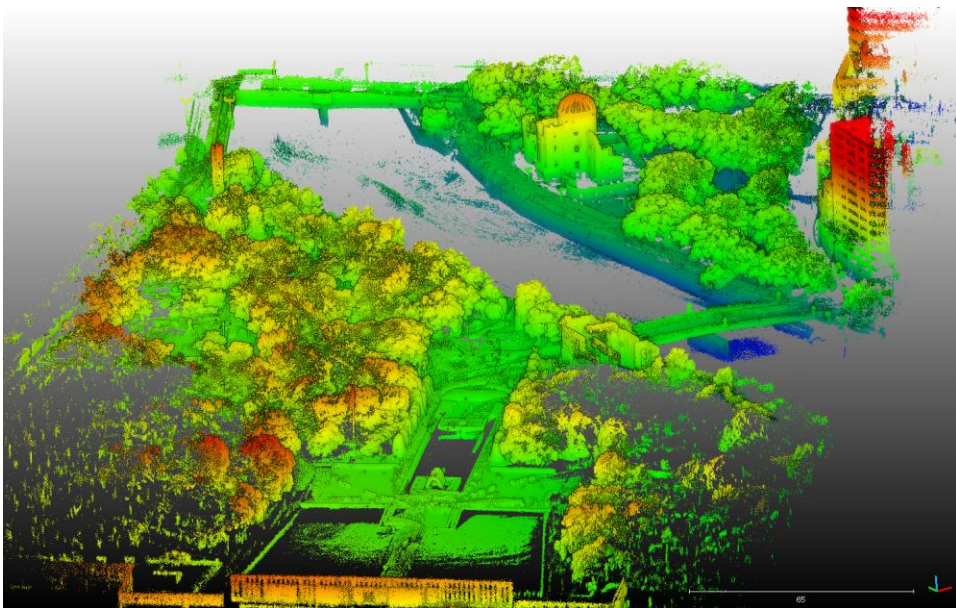


第 19 図 第 18 図から地面出しを行った画像 第 19 図にあった人物や植生が除去されている。

## 4.2 原爆ドームおよび平和記念公園

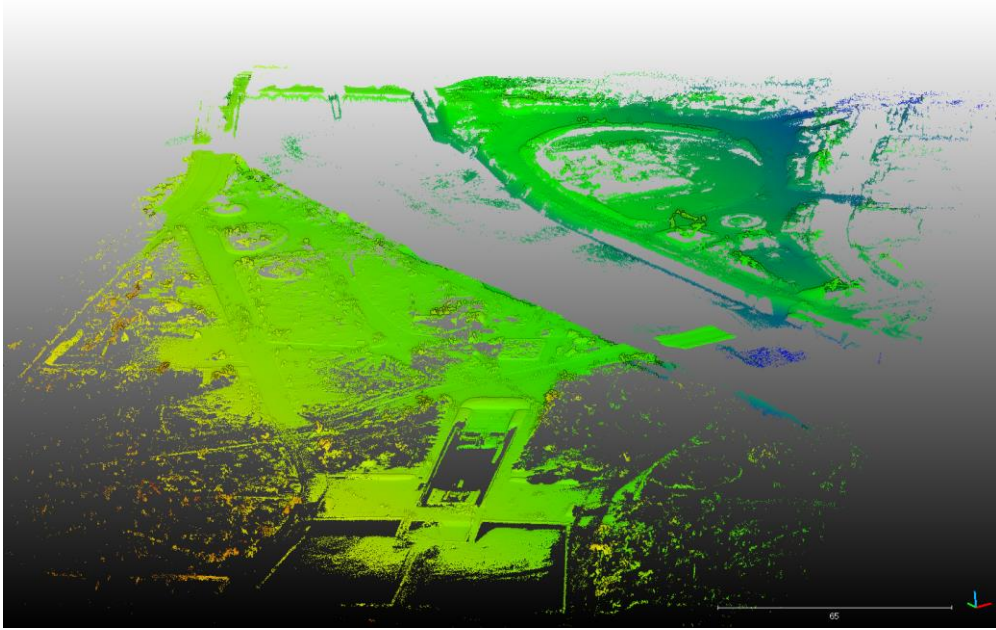
広島県広島市中区に位置する世界文化遺産・原爆ドームおよび平和記念公園で計測を行った。計測時間は約 30 分間の長時間行い、約 155,000m<sup>2</sup>の面積を計測した。

第 20 図に原爆ドームおよび平和記念公園周辺のマッピング結果を示す。原爆ドームから連続して平和記念公園までをマッピングでき、原爆ドーム等の事物の形状もよく再現できている。



第 20 図 原爆ドームと平和公園の計測画像

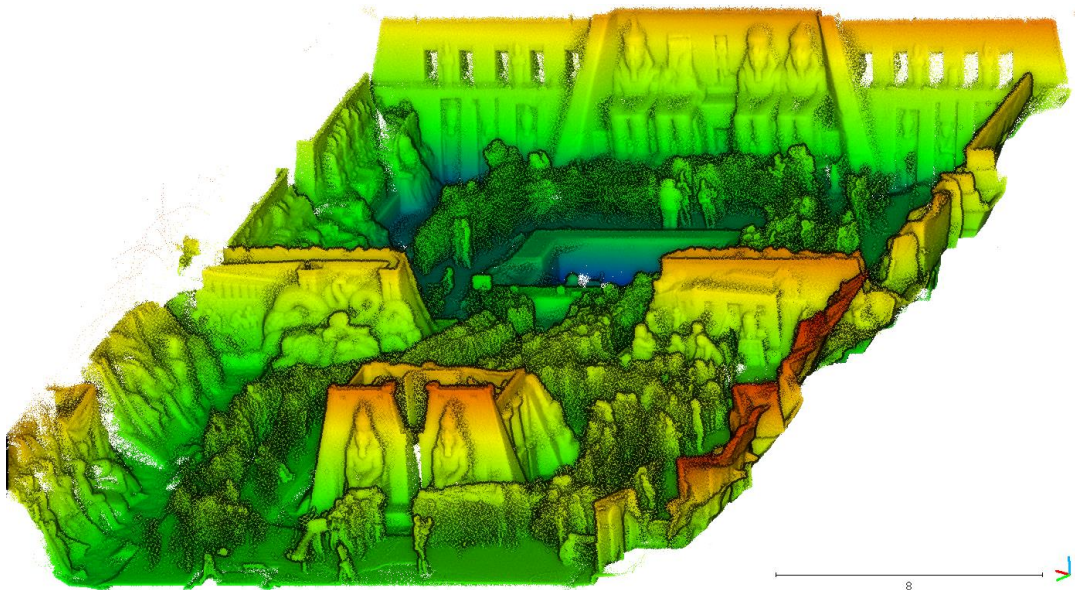
平和記念公園では樹木の下を集中的に歩いて計測し地面情報を詳細に得ることができたため、樹木を除去した画像では樹木の下を明瞭示すことができた (第 21 図)。



第 21 図 第 20 図の地面出しをした画像 樹木下の地形が明瞭に表れている。

#### 4.3 鳥取砂丘 砂の美術館

鳥取県鳥取市に位置する鳥取砂丘砂の美術館において計測を行った。当日はエジプト展が行われており、砂像の形状をどこまで再現できるのか、また屋内かつ観光客がいる中でのマッピングが可能なのか検証した。第 22 図は、展示会場でのマッピングの結果を示す。観光客が多数映り込んでいるが、砂像の形状は問題なく再現することができた。また、砂像は反射強度はほとんど変わらないが、形状的な特徴があるため、砂丘と同じ砂を対象とした計測であっても、SLAM を用いたマッピングが上手くいったと事例と言える。



第 22 図 砂の美術館のエジプト展のマッピング画像

## 5. おわりに

本報告では、これまで数百万～数千万円する LiDAR を用いた計測を、20 万円程度で可能にする計測システムについて紹介し、地形と文化景観の計測事例をいくつか紹介した。我々が提案する簡易モバイル LiDAR によって、价格的な障壁は劇的に低くなった。しかし、運用には Ubuntu を用いるため、ソフトに関してある程度の知識を持たない人にとっては運用に困難を感じるかもしれない。今後、地理学の広い分野で活用できるように本計測システム改善に努めていく予定である。

## 謝辞

本研究は、公共財団法人・国土地理協会の 2022 年度の学術研究助成を受けて実施したものである。記して感謝の意を評したい。計測には、中部大学の杉田 暁氏と広島大学の岩佐佳哉氏も参加された。両氏のご協力とご助言に感謝したい。

## 参考文献

- 岩佐佳哉, 濱 侃, 中田 高, 熊原康博, 後藤秀昭, 山中 蛍(2022) SLAM 技術を用いた低価格モバイル 3D スキャナーによる地表地震断層の数値表層モデルの作成とその有効性, 活断層研究, 第 57 号, 1-14。
- 泉 紀明, 西澤あずさ, 堀内大嗣, 木戸ゆかり, 中田 高, 後藤秀昭, 渡辺満久, 鈴木康弘 (2013) 150m グリッド DEM から作成した相模トラフから三重会合点周辺の 3D 海底地形, 海洋情報部研究報告, 第 50 号, 126-139.
- 中田 高, 木庭 元晴, 今泉 俊文, 曹 華龍, 松本 秀明, 菅沼 健 (1980) 房総半島南部の完新世海成段丘と地殻変動, 地理学評論, 53 卷 1 号 p. 29-44
- 安倉正展, 行谷佑一, 小野尚弥, 神田広信 (2014)房総半島南部見物海岸における精密地形測量と 14C 年代測定, 活断層・古地震研究報告, No. 14.1-38.
- 鈴木康弘, 竹内裕希子, 奈良由美子 (編著): 熊本地震の真実, 明石書店, 178.
- Y. Kumahara, H. Kaneda and H. Tsutsumi(eds.), 2022. Surface Ruptures Associated with the 2016 Kumamoto Earthquake Sequence in Southwest Japan. *Advances in Geological Science*, [https://doi.org/10.1007/978-981-19-1150-7\\_1](https://doi.org/10.1007/978-981-19-1150-7_1)
- Xu, W., and Zhang, F. (2021). Fast-lio: A fast, robust lidar-inertial odometry package by tightly-coupled iterated kalman filter. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 6(2), 3317-3324.
- Xu, W., Cai, Y., He, D., Lin, J., and Zhang, F. (2022). Fast-lio2: Fast direct lidar-inertial odometry. *IEEE Transactions on Robotics*, 38(4), 2053-2073.