

令和 5 年 6 月 22 日現在

機関番号：34428

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K14854

研究課題名（和文）AIを活用した供用性の高い屋内電子地図データの生成と位置測位システムの開発

研究課題名（英文）Generation of usable indoor electronic maps using AI and development of positioning system

研究代表者

塚田 義典 (Tsukada, Yoshinori)

摂南大学・経営学部・准教授

研究者番号：50622643

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、モバイル端末を用いた屋内地図生成のための点群データの簡易計測手法、バリア情報を保持した屋内地図の生成技術、点群データを用いた屋内位置測位技術の3つを考案した。そして、大学構内等での実証実験により、廉価な計測機器を用いた屋内地図の生成と点群データによる屋内位置測位が可能なることを明らかにした。今後は、より広範囲で人などの移動体が存在する環境下での実証実験や、実用化の観点から、リアルタイム処理の実装と位置合わせ処理の高速化について検討する予定である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果は、国土交通省が推進する3D都市モデルの整備、活用及びオープンデータ化の施策の推進及び高度化に寄与する。特に、実証実験により、安価なモバイル端末でバリア情報を保持した屋内地図の生成が可能なることを示した点に意義がある。今後は、深層学習による点群データの地物抽出技術を活用し、屋内空間を地物ごとにラベリングすることで、ボクセル自体にスロープであることや勾配の情報を付与することを目指す。さらに、より広範囲で移動体が含まれる環境下においても、良好な精度で屋内空間を生成可能な技術に洗練する予定である。

研究成果の概要（英文）：In this study, we developed three methods for indoor map generation using an inexpensive LiDAR scanner, indoor map generation with barrier information, and indoor positioning using point cloud data. Through demonstration experiments, we have shown that the indoor map generation and indoor positioning are feasible. In the future, we plan to conduct experiments in the presence of moving objects, implement real-time processing, and accelerate the positioning process.

研究分野：Civil Engineering Informatics

キーワード：屋内地図 点群データ SLAM 屋内位置測位

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

2020年東京オリンピック・パラリンピック競技大会が開催されるまでには、屋内外の測位環境・技術の進展などにより、測位衛星の信号が届かない屋内においても高精度な測位環境が整備された社会（高精度測位社会）の実現が見込まれている。国土交通省では、これらを契機として、訪日外国人・高齢者・障害者を含む誰もが屋内・屋外を問わずシームレスに目的地へ円滑に移動できる社会の実現を目指し、「高精度測位社会プロジェクト」を実施している。2017年3月には、民間サービスの創出を目的として、新宿駅周辺の屋内地図がオープンデータ化された。しかし、屋内地図の生成には、多大な時間と労力を要する。また、位置測位には大量のWi-Fi基地局やビーコンを設置する必要があり、サービス提供のための運用コストが常に発生する。そのため、オープンデータ化に向けた取り組みは、都市部の限定的な試行に留まっているのが実状である。

2020年度には、国土交通省が国土のデジタルツイン環境整備を目指し、Project PLATEAU（以下、「PLATEAU」とする。）が立ち上がった。2022年度には、航空LP（Laser Profiler）で収集された点群データやオプティックカメラの画像等の航空測量成果を基に全国56都市の3D都市モデルの整備を完了し、オープンデータとして公開している。このようなデジタルツインの構築は急速に進んでおり、近年では静岡県や東京都等の地方公共団体も独自でデジタルツインの構築を進め、オープンデータとして公開している。しかし、現状の3D都市モデルは、地形と建築物外形で構成されており、建築物内の詳細な形状までは表現されていない。屋内空間の3Dモデルは、標準仕様化に向けた検討が進められているものの、形状の多様さやデータ加工の難しさ、何より整備対象の体積が圧倒的多量であることから整備が進んでいない。そのため、屋内空間の3Dデータを効率的に計測し、3Dモデルを簡易に整備可能な技術の開発が切望される。特に我が国では、体の不自由な方を含む障害者や高齢者等の自律的な移動を支援するための法律等を制定し、バリアフリーの整備を推進している。そのため、建築物内の段差等の移動を阻害しうるバリア情報等を付与した屋内空間の情報を3D都市モデルに追加できれば、デジタルツイン上で人流予測や災害時の避難経路のシミュレーション等の様々なユースケースの創出やデジタルツイン環境のさらなる用途拡大が期待できる。

2. 研究の目的

本研究は、Apple社 iPad LiDAR や Velodyne 社 VLP-16 等の廉価な計測機器を用いた地図生成技術と、点群データによる屋内位置測位技術の開発を目的とする。そして、大学構内等での実証実験により精度を確認し、実用性や課題を明らかにする。

3. 研究の方法

(1) モバイル端末を用いた屋内地図生成のための点群データの簡易計測手法の考案

本研究では、Apple社の11インチiPad Pro（第2世代）（以下、「端末」とする。）と3D Scanner App（以下、「本アプリ」とする。）を用いて、LiDARの精度検証および屋内での最適な計測手法を考案する。本アプリは、LiDARで取得した点群データに加えて、画像データや計測時のカメラ姿勢等の情報が記録されたJSONファイル等を出力できる。本研究では、端末のLiDARの精度検証、端末の動きの計測精度への影響および端末の角度の精度検証への影響を検証し、結果に基づいて簡易計測手法を考案する。

(2) バリア情報を保持した屋内地図の生成技術の考案

本研究では、可搬型端末を用いて取得した点群データをボクセル化することで、バリア情報を保持した屋内地図を生成する。屋内空間のバリアを判定可能な3Dモデルが生成できれば、3D都市モデルの高度化に加え、屋内での移動支援サービスや屋内地図作成の際の原典データとしての活用が期待される。屋内空間におけるバリアはさまざまであるが、本研究では点群より判定可能な物理的なバリアに注目し、その中でも屋内の床面に存在する段差に対するバリアを判定対象とする。スロープやエスカレータ、点字ブロック等のバリアフリー地物に関しては、点群をボクセル化する段階で段差や床面との判別が困難となることから、本研究では計測の対象外としている。国土交通省の「歩行空間ネットワークデータ等整備仕様」では、段差の高さを「2.00cm以下」と「2.00cmより大きい」の2種類で区分しており、「2.00cmより大きい」段差は車椅子の走行に支障があると記されている。また、施設の出入口の段差が概ね2.00cm以下である場合に「バリアフリー化されている出入口」と表現している。そのため、本研究で判定対象とするバリアは、高さ2.00cmより大きい床面の段差と定義する。提案手法は、取得した点群のみを用いて3Dモデルを生成可能である。処理手順は、点群のスミージング処理とボクセル化処理に大別される（図-1）。可搬型端末で取得した点群をボクセル化する際、スミージング処理を適用し、床面付近に発生している点群のノイズおよび2.00cm以下の段差を平滑化する。そのため、ボクセルモデル上では、2.00cmより大きい段差のみが、段差として表現される。

スミージング処理では、可搬型端末で取得した点群を正確にボクセル化可能な状態に編集する。具体的には、まず、アプリより取得した点群をLAS形式でCloudCompareに読み込み、床面が水平になるように点群の傾きを調整する。次に、取得した点群の床面付近に発生しているノイズを平滑化するため、CloudCompareの機能を使用し取得した点群の床面の高さを計測する。

そして、バリアの閾値に基づき、床面の高さから $\pm 2.00\text{cm}$ 以内に存在する点を床面で発生したノイズと判断し平滑化する。最後に、平滑化した床面の高さを最下層として、床面より上部に存在する点群をボクセルサイズに合わせ階層分割し、層ごとに点群を平滑化する。本研究では、ボクセルサイズを 2.00cm に設定しているため、床面の高さからバウンディングボックスの高さ方向の最大値までを 2.00cm ごとに階層分割し、それぞれの層に含まれる点群の高さを層の高さの最小値に一致させることで層ごとに点群を平滑化する(図-2参照)。スムージング処理によって点群の見た目の品質は一時的に低下するが、ボクセル化によって点同士の隙間を補完できるため、ノイズの影響を受けずにバリアを正確に表現可能である。

ボクセル化処理では、3次元の立方体をボクセルに見立てて点群を置き換えることで3Dモデルを生成する。まず、スムージング処理後の点群に対し、Open3Dを使用して点群のバウンディングボックスを取得する。次に、任意のボクセルサイズに合わせて、バウンディングボックス内に隙間なくボクセルを配置する。ボクセルは、3次元の空間に対し点群の存在有無を判定するために使用する仮想的なものである。最後に、バウンディングボックス内の全てのボクセルを参照し、点群が存在する場合のみ、ボクセルサイズに等しい大きさの立方体を配置することで、仮想的なボクセルを、3次元形状を持つボクセルに置き換える。このとき配置する立方体は、8つの頂点と12個のトライアングルメッシュで構成された3Dモデルである。これにより、バウンディングボックス内の点群が存在する空間が3次元形状を持ったボクセルで置き換えられたボクセルモデルが完成する。

(3) 点群データを用いた屋内位置測位技術の考案

本研究では、人がいない条件のもと、提案手法により事前に構築した屋内空間の点群データと、現在取得中の点群データとを位置合わせすることで自己位置を推定する。屋内空間の点群データは、一定標高値以上の点を除去し、Z座標値を0に統一する。このように次元圧縮したデータと、SLAMにより取得中の点群データの位置合わせを試みる。ただし、SLAMの点群データに関しても、上述の手法と同様に次元圧縮する。

位置合わせには、ICPアルゴリズムを用いる。屋内空間の点群データが広大な場合は、任意のサイズに細分化し、分割した点群データ毎にSLAMの点群データとの位置合わせを試みる。位置合わせの結果、点群データの一致率を示す指標であるRMS値が最も小さい結果を採用する。

4. 研究成果

(1) モバイル端末を用いた屋内地図生成のための点群データの簡易計測精度の評価と考察

iPad ProのLiDARの精度検証では、壁面や床面に付けた高さ、幅および奥行きの3方向それぞれ 0.50m の目印を計測対象とする。端末と計測対象との距離を 0.50m 、 1.00m 、 1.50m に変更し、各10回の計測を実施した。データ計測の際には、SLAM処理による補正の影響を排除するため、端末は三脚に固定し検証した。その結果、各距離の3方向全ての計測結果で実測との誤差は 0.03cm 以内であった。このことから、端末と計測対象との距離が 1.50m 以内の場合、距離や計測方向は、精度に影響を与えないことがわかつ

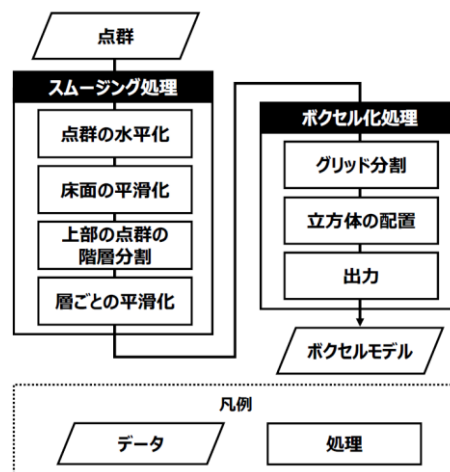


図-1 処理フロー

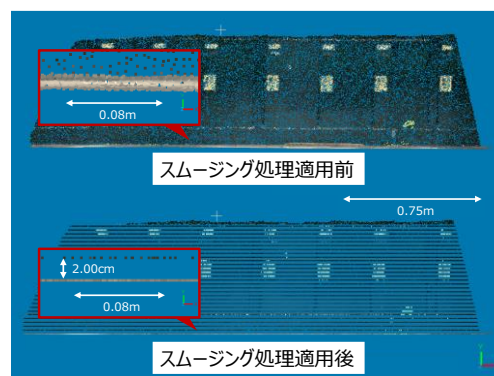


図-2 スムージング処理のイメージ

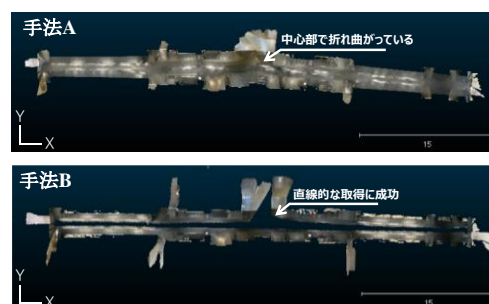


図-3 計測結果



図-4 端末の固定方法

た。

端末の動きの計測精度の検証では、本アプリによる点群の処理精度を検証するため、大学校舎の廊下を対象に、計測時の端末の動かし方を変更して SLAM 機能を作動させ計測した。計測方法は、手で端末を持ち、死角が生まれないように回転させながら、壁全体を満遍なく計測する手法 A と、端末をできるだけ回転させず水平方向の移動のみで壁面を計測する手法 B の 2 通りとする。計測結果を図-3 に示す。手法 A で取得された点群は、廊下の中心部分で折れ曲がっているのに対し、手法 B で計測した点群は、直線的な廊下の形状を正確に表現できている。このことから、本アプリの特性として端末の回転が SLAM による点群の位置合わせに影響し、計測精度が低下することがわかった。

以上より、端末が回転しないように固定して計測することで計測精度が向上するとわかった。そこで、三脚に端末を確実に固定し鉛直方向および水平方向の角度を調節した上で、台車に乗せて移動する計測を実施した(図-4 参照)。計測の対象は壁面に設置された 3 段のロッカー(実測値 7.66m)とする。鉛直方向の角度は、画角内に収めるロッカーの範囲を 3 段階(1 段目のみ、2 段目まで、全体)で調節し検証した。その結果、ロッカー全体が端末の計測範囲内に収まる画角の計測値が 7.50m となり、最も高精度であった(図-5 参照)。また、水平方向の角度は、壁面に対し端末を正面、前後方 45°および 15°の 5 種類の角度で計測を実施した。その結果、台車の進行方向に対して端末を約 10°前方に向けた場合の計測値が 7.67m であり、計測精度が向上することがわかった。このことから、屋内でモバイル端末を用いて計測する場合、鉛直方向は画角内に特徴点が多く写るように角度を調節し、水平方向は進行方向に対して 10°前方に向けると、高精度な計測が可能であることがわかった。

(2) バリア情報を保持した屋内地図の生成技術の精度評価と考察

本実験では、iPad を三脚に固定(図-4 参照)し、台車に乗せて移動することで SLAM を作動させ、アプリによる点群の補正効果を検証する。計測環境の床面には、バリアの判定可否を確認するため、段差を模した木材を設置する。木材は、床面の色に合わせて黒色に塗装し、1 枚の厚みは 1.50cm である。この木材を 1 枚から 4 枚まで積み重ねることで、高さの異なる 4 種類の段差を作成する。本研究では、2.00cm をバリアの閾値に設定しているため、木材を 2 枚以上重ねた場合がバリアとなる。本実験では段差の高さの実測値と、計測値とを比較し点群の計測精度を検証した。ここで計測値とは、モバイル端末で取得した点群から算出した値である。具体的には、アプリより取得した点群を LAS 形式で Cloud Compare に読み込み、床面から選択した任意の 3 点の高さの平均値を床面の高さ、段差上面から選択した任意の 3 点の高さを段差上面の高さとし、両者の差分から算出する。なお、SLAM の精度は常に一定とは限らないため、実験は各段差を 3 回ずつ計測して評価する。

取得した点群を図-6、各計測の計測値を表-1 に示す。図-6 より、点群は、木材の枚数に関わらず、木材の部分を段差として目視確認できることがわかった。表-1 より、段差の高さが 2.00cm に満たない 1 枚の場合では、計測値が実測値に比べわずかに高くなっているものの、3 回の計測すべての計測値が 2.00cm 以下であるため、取得した点群から段差がバリアでないことを判定できる。また、2 枚の場合では、計測値は実測値を超えておらず、全ての計測値が 2.00cm を下回

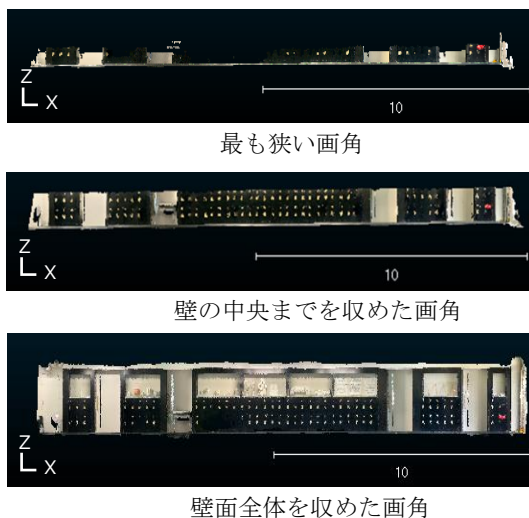


図-5 鉛直方向の角度を変更した計測結果

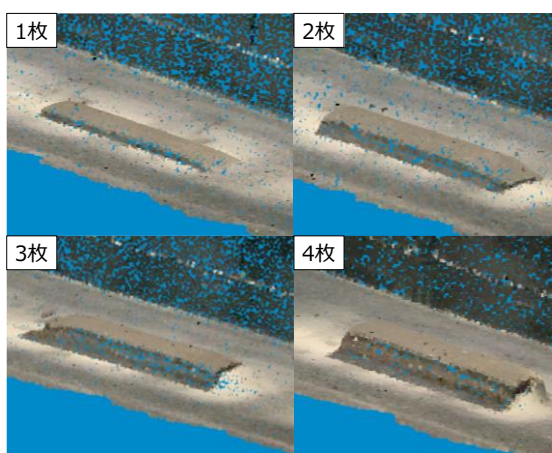


図-6 SLAM を作動させた状態で取得された点群

表-1 計測値および実測値

単位：cm

計測回数	1枚	2枚	3枚	4枚
1回目	1.65	3.22	4.34	5.87
2回目	1.67	3.05	4.58	5.96
3回目	1.81	3.04	4.63	6.08
実測値	1.50	3.00	4.50	6.00

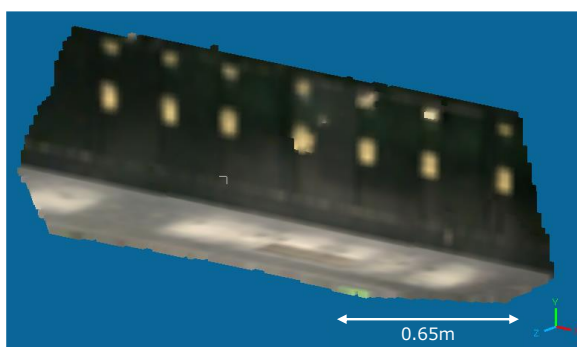
っていることから、取得した点群から段差がバリアであることを判定できる。3枚と4枚の場合では、どちらも明らかにバリアとなる段差であることから、わずかな誤差はみられるものの取得した点群から段差がバリアであると判定できる。以上より、アプリの補正効果は高く、SLAMを作動させることでiPadのLiDARで取得した点群を、屋内空間のバリアを判定可能な精度にまで補正できることがわかった。このことから、可搬型端末のLiDARを用いて計測した点群を基に屋内空間の3Dモデルを生成できる可能性が示唆された。

提案手法により生成したボクセルモデルを図-7に示す。図-7(A)、(B)より、どちらのボクセルモデルも、隙間なくボクセルが敷き詰められており、ボクセルの間から背景が透けている箇所は見当たらない。このため、ボクセル化により、可搬型端末で取得した点群の課題であった点密度の不均一性により背景が透過する課題を解決した。さらに、図-7(C)より、木材が2枚の場合は、床面の木材を設置した部分のみが段差として表現されており、ボクセル化によって床面とバリアとなる段差の両者を正確に表現できた。また、今回ボクセル化の対象としている点群は、木材を一枚設置して計測したため、段差の高さは1.50cmであり床面にバリアは存在しない。そのため、ボクセルサイズが2.00cmのボクセルモデルでは、床面が平面であり、段差の存在しない3Dモデルとなることが望ましい。提案手法によって床面の点群に発生しているノイズによる影響を無効化し、段差の高さに基づいて正確に床面をボクセル化可能であることが分かった。

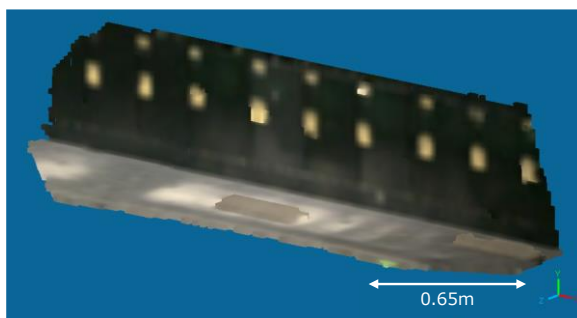
以上より、提案手法を適用することで、可搬型端末で取得した屋内空間の点群のみを用いて、効率的にバリア情報を保持した屋内空間の3Dモデルを生成できることがわかった。また、提案手法で生成したボクセルモデルは視認性が高く、床面のバリアの表現も正確であることから、屋内空間の3D都市モデルの補完に対し、高い有用性が示された。

(3) 点群データを用いた自己位置推定の考察

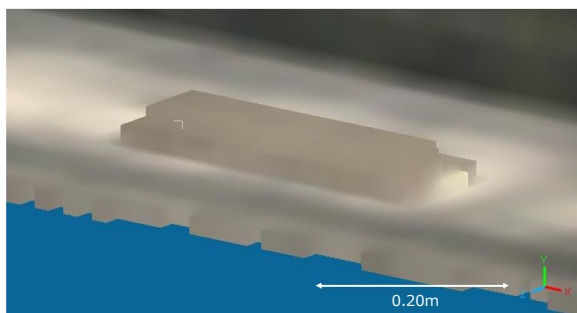
本実験では、大学キャンパス内の廊下を対象に提案手法の有用性を確認する。生成した2次元地図と自己位置の推定結果を図-8に示す。図-8より、実験対象環境の2次元地図が生成でき、計測開始地点(始点)から計測終了地点(現在位置)までの自己位置が推定可能なことがわかった。また、点群データを次元圧縮することにより、壁面部の構成点が残りに、レーザ光が適切に反射せず測距が困難な窓ガラス部や浮遊ノイズの影響が軽減でき、位置合わせによる自己位置推定が良好に機能することが明らかになった。今後は、より広範囲で人などの移動体が存在する環境下での実証実験や、実用化の観点から、リアルタイム処理の実装と位置合わせ処理の高速化についても検討する予定である。



(A) 木材1枚の場合



(B) 木材2枚の場合



(C) 段差部分の拡大図(木材2枚)

図-7 提案手法より生成したボクセルモデル

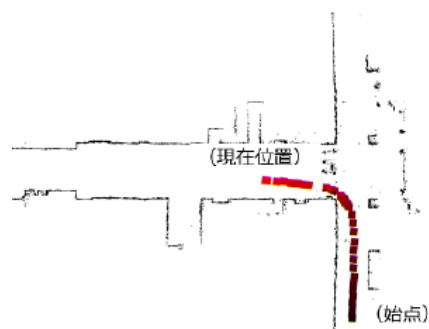


図-8 位置測位結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 IMAI Ryuichi, NAKAMURA Kenji, TSUKADA Yoshinori, KOMIYA Ryo	4. 巻 79
2. 論文標題 BASIC RESEARCH ON CREATION OF INDOOR 3D MODELS BY VOXEL REPRESENTATION USING LiDAR OF PORTABLE TERMINAL	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Japanese Journal of JSCE	6. 最初と最後の頁 1-9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2208/jscej.22-22051	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 小宮涼, 今井龍一, 中村健二, 塚田義典	4. 巻 47
2. 論文標題 LiDAR搭載モバイル端末を用いた屋内空間の点群データからのバリアの判定に関する一考察	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 土木情報学シンポジウム講演集, 土木学会	6. 最初と最後の頁 141-144
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 IMAI Ryuichi, NAKAMURA Kenji, TSUKADA Yoshinori, NIINA Yasuhito, KOMIYA Ryo	4. 巻 -
2. 論文標題 Verification of Registration and Complementation of Point Cloud Data Obtained by Simplified Measurement	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Fifth International Conference on Civil and Building Engineering Informatics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 今井龍一, 中村健二, 塚田義典, 小宮涼
2. 発表標題 モバイル端末搭載のLiDARで計測した点群データの特性分析
3. 学会等名 CSIS DAYS 2022 全国共同利用研究発表大会研究アブストラクト集
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小宮涼, 今井龍一, 中村健二, 塚田義典, 梅原喜政
2. 発表標題 スマートフォンのLiDAR及びカメラで取得した点群データの有用性の検証
3. 学会等名 令和5年度土木学会全国大会第78回年次学術講演会講演概要集
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 小宮涼, 今井龍一, 中村健二, 塚田義典
2. 発表標題 モバイル端末を用いた屋内地図生成のための3次元点群データの簡易計測手法の考案
3. 学会等名 令和4年度土木学会全国大会第77回年次学術講演会講演概要集
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関