

令和 4 年 6 月 9 日現在

機関番号：24402

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K12171

研究課題名（和文）路面情報を利用した移動ロボットの高精度屋外環境ナビゲーション

研究課題名（英文）Outdoor environment navigation for mobile robots using road surface information

研究代表者

田窪 朋仁（Tomohito, Takubo）

大阪市立大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号：80397695

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：目的位置までの移動ロボットの経路を、路面状況を考慮し目的位置までの移動経路を最適化する技術を開発した。3次元のレーザーセンサからデータを取得し地面形状の地図を生成する手法、および地形地図上での最適軌道生成手法を開発することで、目的位置までの詳細な経路計画を人が行うことなく、自動的に地面形状を評価して目的位置までの最適な経路を生成することが可能となった。作成した地面形状の地図をGNSS（Global Navigation Satellite System）基準で活用を行うために、移動ロボットに複数のRTK-GPSを装着することで、ロボットの位置・姿勢を管理するシステムの開発を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

自動車のように専用の道路が整備されている環境と異なり、人間とロボットが共存する環境を走行する自律移動ロボットはロボット自身の移動能力を考慮した経路を選択し、目的位置まで移動する能力が必要となる。本研究で開発した地面形状を3次元地図にデータ化した地面形状マップを用いることで、移動ロボットは走行可能な地形を事前情報として備えることができ、目的位置までの経路をロボット自身が走行可能な範囲で最適な経路として探索することが可能となる。地面形状マップがGPS基準の地図と整合性のある情報として公開することができれば、将来的にロボット共通の地図として活用するだけでなく、車いすユーザへの情報提供も可能になる。

研究成果の概要（英文）：A method has been developed to optimize the path planning for a mobile robot, taking into account the road surface conditions. This method enables the automatic generation of the optimal route to the target location by evaluating the ground profile, so that a human operator doesn't need to plan the detailed route to the target location. In order to utilize the generated ground profile maps based on the GNSS (Global Navigation Satellite System) standard, we developed a system to manage the robot's position and posture by attaching multiple RTK-GPSs to the mobile robot.

研究分野：自律移動ロボット

キーワード：自律移動ロボット 3次元地図 GPS

### 1. 研究開始当初の背景

車輪型移動ロボットの制御手法や目的位置までのナビゲーション、自己位置の認識と地図生成 (SLAM) に関する課題は古くから行われているが、屋外環境での自律走行は実用的な技術になっていない。その理由として、屋外環境では見た目や形状が変化しないランドマークとなる地形や標識が見つかりにくいことや、平坦な地形が存在せず、地形の高低差や天候・季節による路面状態の変化が、理想的な走行環境モデルの仮定から大きく逸脱してロボットのナビゲーションに大きな障害を与えることにある。前者は、GPS の利用、地磁気情報の分布の利用などで解決する手法が提案されているが、後者に関しては、地形情報から種々のロボットにとって最適な経路を生成する課題は取り扱われていない。現在主流の技術は、事前に 2 次元や 3 次元の環境地図情報を構築しておき、実走行時の計測情報から事前作成の地図上のどの位置に存在しているか推測する自己位置推定と路面が平坦であると仮定した事前の経路計画だけで対応しており、走行中に地面の凹凸や障害物を発見したときは、一時的な回避行動による経路修正を行うだけとなっている。しかし、屋外自律移動ロボットの大会である「つくばチャレンジ」において、同様の手法を用いただけでは総延長 2 Km 以上のコースを完走するロボットは少数しか存在せず、比較的小型なロボットで参加するチームほど、小さな段差に乗り上げたり、タイヤのスリップなどにより自己位置を見失うなどのトラブルで完走することができていない。路面の状況を考慮しない走行経路の作成には、実際に一度走ったことのある経路を追従する経路生成手法や、人が直接歩いたことのある経験から手動で経路を設定する方法でロボットの走行経路を決定しており、不測の事態に対応できず信頼性の低い大変不安定な方法となっている。したがって、人による経験則による経路計画から脱却し、確実に目的位置までロボットを誘導するための技術として、路面の状況とロボットのモデルを考えた経路計画やナビゲーションを自動で生成可能とする技術が求められている。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、ロボットの特性に合わせて、路面状況を考慮した目的位置までの移動経路を最適化する技術を開発し、人が手動で行っていた目的位置までの経路計画作業から解放し、短時間かつ確かなナビゲーション軌道を生成する手法を確立することにある。

本研究の目的を達成するために、地面形状の地図を生成する手法、地形地図上での最適軌道生成手法を開発し、目的位置までの詳細な経路計画を人が行うことなく、自動的に地面形状を評価して目的位置までの最適な経路を生成することを目的とする。また、作成した地面形状の地図を GNSS (Global Navigation Satellite System) 基準で活用を行うために、移動ロボットに複数の RTK-GPS を装着し、ロボットの位置姿勢を管理するシステムの開発を行う。

### 3. 研究の方法

#### (1) 地形地図生成

利用する曲面地図は、三角ポリゴンのメッシュを用いて路面だけでなく壁面や障害物などの 3 次元形状を表現する。このメッシュマップの中に含まれる距離情報を用いて、経路計画を行う。メッシュマップの構造を図 1 に、メッシュマップの構築例を図 2 に示す。メッシュマップは、3D LIDAR の計測データから点群地図を作成後に構築する。点群データ中の点を用いて、面の形状の特徴を表すための「頂点」を算出し、その頂点の間を辺でつなぎ合わせることで曲面地図を構築する。

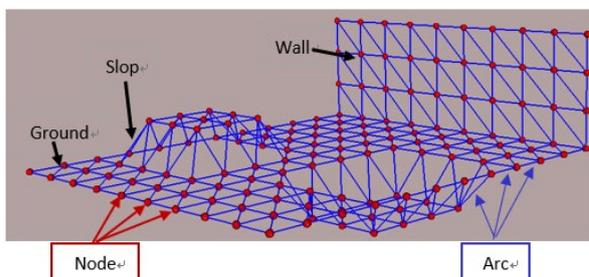


図 1 メッシュマップの構造

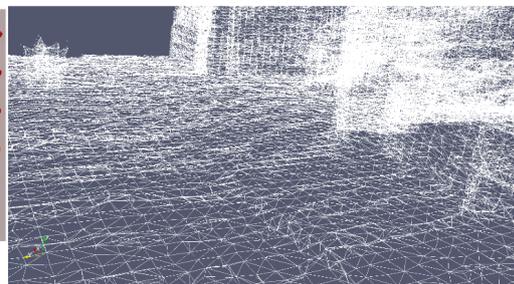


図 2 メッシュマップの構築例

3 次元地図を作成する場合、屋外で人などが混在している環境では正確な地面形状を取得することができない。そこで、図 3 に示すように移動ロボットに全周囲を撮影可能な 360 度カメラを搭載し、画像中に写った人などの移動物体を抽出し、同じ場所に計測される 3D-LiDAR の点群を除去する手法を導入する。図 3 右に具体的に人物の領域が特定された後の点群の処理の手順を示す。移動体の点群の領域を画像中で計測された上下左右の画角から移動体の領域として抜き出したものが「移動体点群」となり、それを除去した点群が「移動体除去点群」となる、移動体

を除去した点群を重ね合わせていくことで「移動体除去点群地図」が作成される。

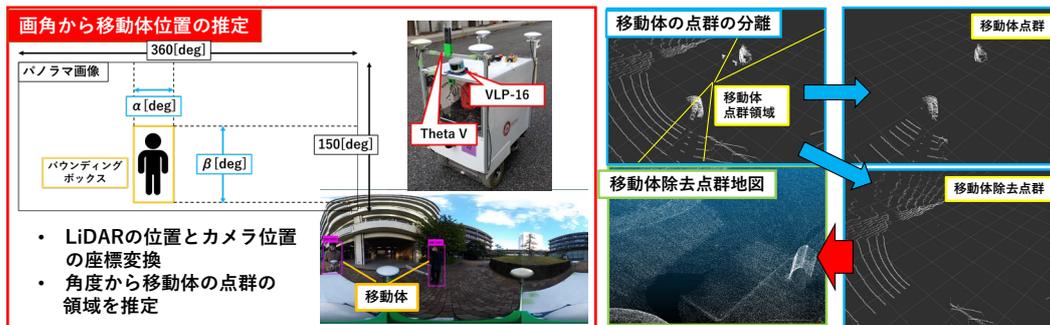


図3 全周囲カメラを用いた移動物体検出

(2) 地形地図上の最適軌道生成

図4に示す地形情報を含むメッシュマップは、ロボットのサイズや地形情報を考慮した起伏コストや距離コストを計算することで、最適な経路を計画する。まず、起伏コストの計算は、最小二乗平面を利用しコスト計算を行う。近似平面方程式は $(ax+by+cz+d=0)$ とし、式(1)と式(2)により投影領域内の各点から近似平面までの距離の分散値を算出し、算出した分散値を起伏コストとしてメッシュマップの各頂点に記憶する。ここで、 $D_i$ は個々点と近似平面の距離、 $\mu$ は距離の平均値、 $S^2$ は不変分散である。

$$D_i = \frac{|ax_i + by_i + cz_i + d|}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \quad (1)$$

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (D_i - \mu)^2 \quad (2)$$

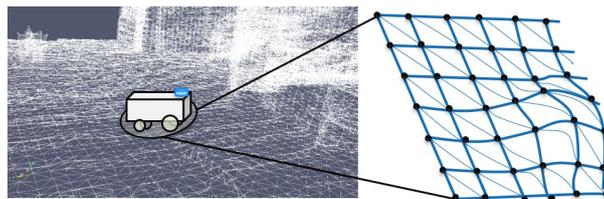


図4 コストマップの計算

起伏コストを用いたグラフ探索は、起伏コストを含むマップから Undulation Cost (UC) グラフに変換することで、グラフ探索で走行安定性を考慮した経路計画を行う。起伏コストを辺の長さに変換することで、グラフ探索を適用できる。UC グラフへの変換の例を図5に示す。図5 (a)の起伏コストを含むマップにおいて、 $P_1$ の起伏コストは12であり、 $P_2$ から $P_1$ に移動する際の、目的地 $P_1$ の起伏コストを辺の長さに変換することで、図5 (b)のような UC グラフを作成する。UC グラフにおいて、Dijkstra's Shortest Paths などのグラフ探索手法を利用する経路計画を行う。

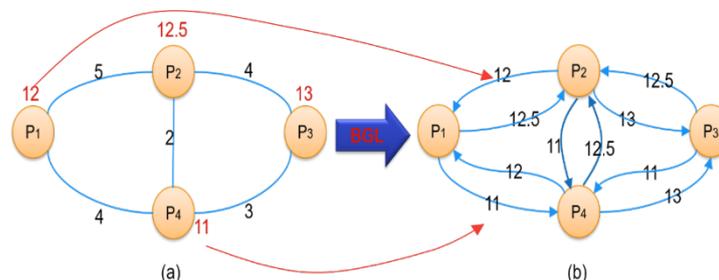


図5 UC グラフを用いたパスプランニング

(3) 複数 RTK-GPS を用いた移動ロボットの位置・姿勢推定

移動ロボットで計測した3次元地図や内部のIMUセンサなどでは計測誤差により実際の地形とはことなる3次元地図を構築してしまうことがある。そこで、移動ロボットに取り付けた複数台のGNSS受信機を用いた移動ロボットの位置・姿勢を推定手法を用いる。システム概念図を図6に示す。RTK-GNSS Kinematic 測位を移動ロボットに取り付けた2台の受信機で独立して行い、ロボット前方に取り付けた受信機の測位結果を用いて位置推定を行いながら、移動ロボットの前方と後方のアンテナ位置から移動ロボットの姿勢のうち yaw 角を推定する。

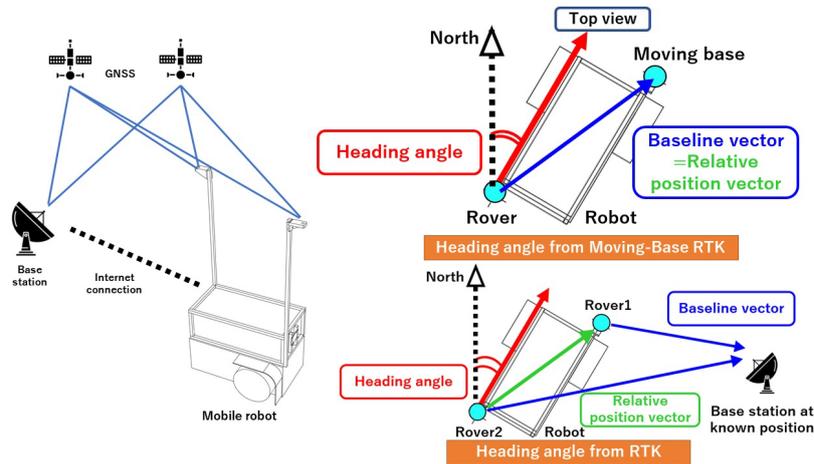


図6 複数台 RTK-GNSS を用いた位置・姿勢推定

一方、RTK-GPS の計測では、間違った位置を正確な位置と誤判断してしまう場合がある。そこで、移動ロボットに搭載されたアンテナの相対位置情報は、測定が容易でありロボットの動きに影響されないという特徴を持つことから、各アンテナで個々に算出した RTK 測位結果を用いて測定したアンテナの相対位置の測定誤差を入力とし、各アンテナの RTK 測位結果の信頼度を算出するシステムをロジスティック回帰による分類器を実装する。

#### 4. 研究成果

##### (1) 地形地図生成と最適軌道生成

経路の生成と生成された経路を用いた実機実験を行う。まず、障害物、坂面や段差などの様々な三次元地形が含まれるメッシュマップにおいて、提案手法による経路生成が可能かを確認する。また、理学部と工学部の間の場所に対応するメッシュマップを用いて経路を生成し、経路の短縮、平滑化、ダウンサンプリングなどの結果を詳しく紹介する。理学部と工学部の間の場所において、生成された経路を用いた実機実験を行い、自律的にナビゲーションができることを確認することによって、提案手法の有効性を検証する。本研究では、提案手法により生成した経路を評価することを目指した自律走行実験を行う際に、自律ナビゲーションシステムである Autowar を利用する。Autowar は、名古屋大学を中心に開発され、自動運転車向けのオープンソースであり、移動ロボットの自律走行にもよく活用されている。提案システムを用いて大学内の地図を作成し目的位置までの経路計画を行う実験を行った。図7に構成したメッシュマップを示す。

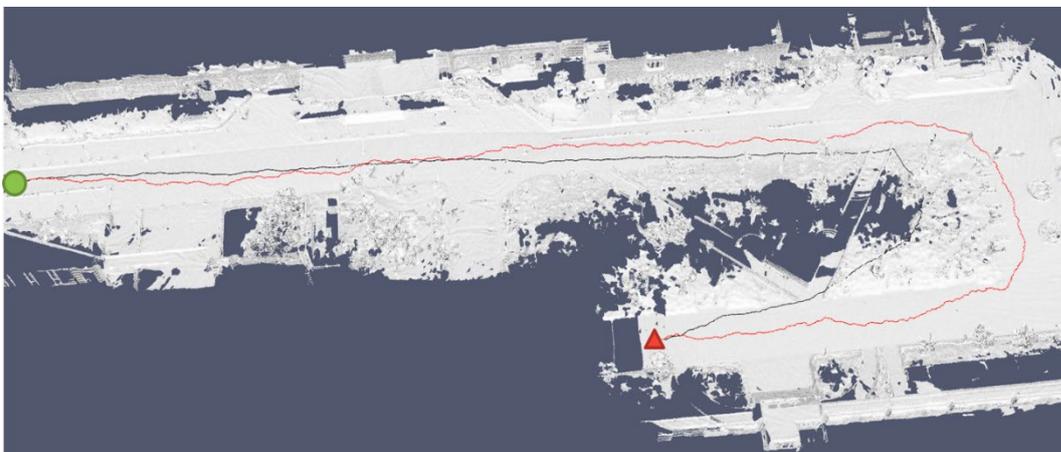


図7 構築した3次元地図

地形データのコストだけを参照して経路計画を行った場合は、走行できないような場所を経路として生成してしまっているが、提案手法を用いた経路生成では、平坦な地形を通るような経路が生成されていることが確認できる。

##### (2) 複数 RTK-GPS を用いた移動ロボットの位置・姿勢推定

大阪市港区に位置する八幡屋公園で同じ経路を3周して収集した実験データ A、大阪市立大学工学部構内で同じ経路を4周して収集した実験データ B の2種類のデータを収集してロジスティック回帰でデータの学習を行った。各データについて、1周分のデータで精度評価、残りの周回のデータで回帰パラメータの学習に用いる交差検証を行う。

実験データ A の実験環境を図8の左に示す。実験環境のうち、区域 A, B, C は周囲の環境に応じて分けられたもので、区域 A, B は上空に樹木が多く RTK 測位結果が不安定になりやすい環境である。区域 C は上空の障害物が少なく RTK 測位結果が安定しやすい環境であり、計測開始お

よび計測終了地点を区域C内に設定した。実験で収集したRTK測位データについて提案手法とRatioテストとの比較を表1に示す。実験データBの環境を図8右に示す。区域A,Bは建物が近くにあり、測位信号のマルチパスが生じやすいと考えられるRTK測位結果が不安定になりやすい環境である。区域Aは2階建ての建物が付近にある環境である。区域Bは1階建ての建物が付近にある環境である。実験で収集したRTK測位データについて提案手法とRatioテストとの比較を表2に示す。

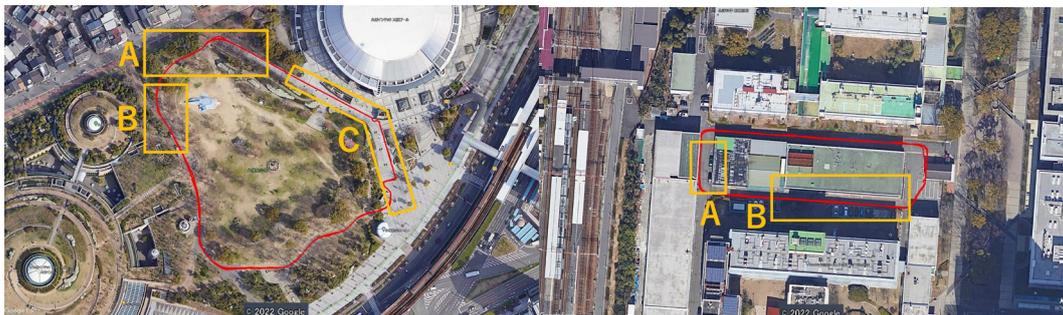


図8 八幡屋公園(左)と大学キャンパス(右)

表1 実験データAの結果

アンテナ	1	2	3	4
提案手法	0.6739	0.5216	(1.1789)	0.6459
Ratio Test	0.5949	1.1265	6.992	1.8577

表2 実験データBの結果

アンテナ	1	2	3	4
提案手法	0.1267	0.0401	0.0591	0.0492
Ratio test	0.1286	0.0559	0.1314	1.3575

基準となるデータはRTK測位アルゴリズムを改善したソフトウェアRTKLIB demo5を使用して測定した。評価方法は、各周回について、評価データのうちFix解と判断したデータに関して、基準データとの測定誤差のRMSEの平均値を採用した。実験データA、および実験データBの双方の結果から提案手法によりMiss Fixを判別し除去することで、Fix解の精度が向上することが確認できる。ただし、実験データAのアンテナ3に関して、2周目と3周目にはFix解と判断した解がなかったためRMSEの値は参考値となる。

図9、10に実験時に計測したGPSの移動軌跡を示す。0.25m以上の真値からずれて計測されたときにFixと判定されたものをMissFixとしており、単純なRatioテストでは判定できなかったMissFixが提案手法により除去されていることが確認できる。

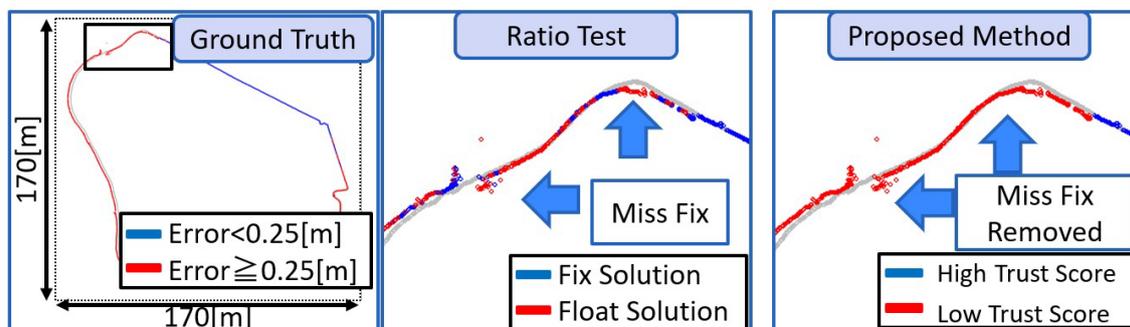


図9 実験結果Aの移動軌跡の比較

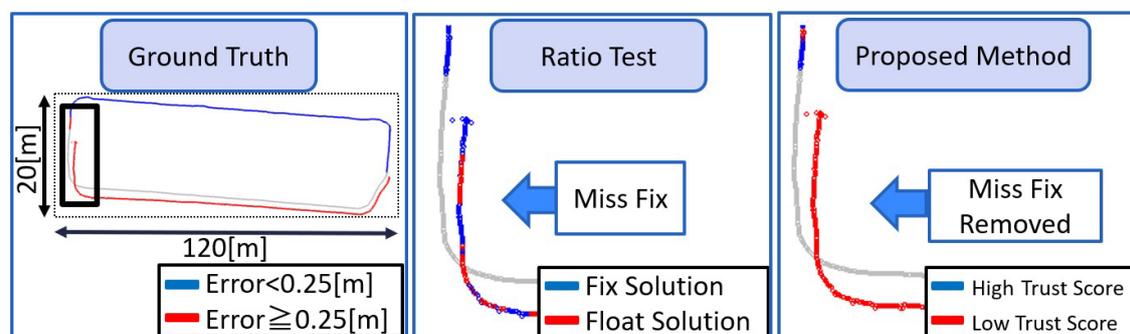


図10 実験結果Bの移動軌跡の比較

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Hisashi Date and Tomohito Takubo	4. 巻 32
2. 論文標題 Special Issue on Real World Robot Challenge in Tsukuba and Osaka	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Robotics and Mechatronics	6. 最初と最後の頁 1103
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.20965/jrm.2020.p1103	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 1件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 佐藤雅也, 田窪朋仁, 上野敦志
2. 発表標題 複数RTK-GNSSを用いた自律移動ロボットの位置姿勢推定
3. 学会等名 第21回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 陳力, 田窪朋仁, 上野敦志
2. 発表標題 3次元地形を表現する曲面地図を用いた経路計画
3. 学会等名 第20回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田窪朋仁, 青柳誠司, 井上雄紀, 今津篤志, 生駒京子
2. 発表標題 大阪市実証事業「中之島チャレンジ2019」の報告
3. 学会等名 第20回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田窪朋仁、生駒京子
2. 発表標題 自律走行ロボット技術開発実証事業「中之島チャレンジ」の紹介
3. 学会等名 つくばチャレンジシンポジウム2019（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Masaya Sato, Tomohito Takubo, Atsushi Ueno
2. 発表標題 Position and orientation estimation method using independent RTK-GNSS measurements
3. 学会等名 The 7th International Conference on Advanced Mechatronics (ICAM2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 蒔田大悟, 田窪朋仁, 上野敦志
2. 発表標題 全周囲カメラを利用した移動体除去メッシュマップを用いた経路計画
3. 学会等名 第22回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI2021)
4. 発表年 2021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
---------	---------