

令和 4 年 6 月 9 日現在

機関番号：12201

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K12037

研究課題名（和文）屋内での移動端末の高精度位置推定に関する研究

研究課題名（英文）Research on highly accurate indoor positioning system for mobile terminals

研究代表者

藤井 雅弘（Fujii, Masahiro）

宇都宮大学・工学部・准教授

研究者番号：20366446

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、測域センサーによって計測された屋内構造物までの距離情報と、加速度とジャイロセンサーにより計測された端末姿勢情報と、屋内三次元地図情報を統合することで屋内での位置推定を行うシステムを開発し、その推定精度を評価した。位置推定のために、グリッド探索とパーティクル探索アルゴリズムを開発し、数値計算実験と実装した装置による歩行実験の結果から、1メートル以下の誤差での位置推定を実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題では、測位衛星の信号が届きにくい屋内での位置推定について取り組んだ。屋内での高精度な位置推定は、工場などでの生産性向上のための動線分析などに利用できる。本提案手法では、歩行者が測域センサーと加速度、ジャイロセンサーを融合した装置を装着し、歩行した際のセンサー情報と国内の三次元地図情報を統合させ位置推定を行うという、他の例のない画期的な手法を採用した。この手法では、無線LANなどの他のシステムに依存せず、地図情報が利用できる場所であればどこでも位置推定が可能であることが利点としてあげられる。

研究成果の概要（英文）：In this research project, we developed an indoor positioning system by combining distance information measured by range sensor, posture information measured by acceleration and gyro sensors, and indoor three-dimensional map information, and evaluated the estimation accuracy. We developed a grid and particle search algorithms for the proposed positioning system. By numerical experiments and walking experiments with the implemented system, we showed that the proposed system could achieve position estimation with an error of less than 1 meter.

研究分野：位置情報システム

キーワード：位置推定 測域センサー 姿勢センサー 三次元地図情報 グリッド探索 パーティクル探索

### 1. 研究開始当初の背景

位置情報システムは社会基盤を支える重要な技術であり各方面で整備が進められ始めていた。例えば、次世代の自動走行システムの実現のためには高精度な位置情報システムが必要とされており、地理空間情報、測位技術、センサーによる環境認識技術など様々な研究・開発が進められていた。一方で、歩行者が保持するスマートフォンのようなモバイル機器においてもナビゲーションやアミューズメントサービスだけでなく、交通弱者の安全・安心を守るために期待が高まっている歩車協調ネットワーク構築のための基盤技術として位置情報システムの重要性が認識され始めていた。位置情報システムの目標は、様々な環境でシームレスな位置推定を行うことである。屋外ではGPS (Global Positioning System) に代表されるGNSS (Global Navigation Satellite System) や整備されつつある詳細な地理情報システムが利用可能である。しかしながら、屋内においてはGNSSの利用は困難な場合が多く、位置推定アプリケーションに適したシステム設計が必要とされ始めていた。

### 2. 研究の目的

本研究課題では、LIDAR (Light Detection And Ranging)と IMU (Inertial Measurement Unit) を搭載したモバイル端末をスマートフォンやスマートウォッチのように歩行者が身につけて通常歩行する状況を想定し、端末姿勢の自由度の高い状況での位置推定を行う。これまでのモバイル端末の向けの位置推定方式では屋外ではGNSSを利用し、GNSSが利用困難な屋内では設置されている無線LAN (Local Area Network) などの無線機の信号を用いるインフラ依存型のものが多い。例えば、無線LANの受信電波強度を拠り所として瞬時の受信電波強度を用いて距離推定を行い三角測量の原理に基づき位置推定を行う場合、受信電波強度の変動によりその推定精度が大きく劣化する可能性がある。また、このような位置推定方式は送受信器が見通し内に存在する事が前提となっているが、障害物による見通し外においても電波の回折により無線信号は到達する事ができるので、電波の到達性が逆効果となり距離推定に誤差を引き起こす。これはGNSSでの測位誤差要因と同様に無線通信路のマルチパス伝搬に起因する本質的に不可避の問題である。

本研究課題では特に屋内における新しい位置推定方式を検討し、さらに統合された位置情報基盤を構築する。まず、屋内を歩行する歩行者が保持する姿勢自由度の高いモバイル端末を想定し、LIDARとIMUを組み合わせた新しい位置推定方式を開発する。自動車や航空機のように比較的姿勢の安定した移動体と異なり、歩行者の保持するモバイル端末は様々な保持状態、保持姿勢をとりうる。このように姿勢自由度の高い歩行者保持のモバイル端末において搭載されたIMUを用いて正確に姿勢を計測する必要がある。さらに同じくモバイル端末に搭載されたLIDARを用いて周辺の壁などの反射面からのレーザ光の反射によりその距離を計測する。この時、モバイル端末は姿勢自由度が高いため、壁面だけでなく床面、天井面など様々な反射面が想定され、屋内の地理情報システムとモバイル端末の姿勢を考慮した測距情報を適切な推定規範に基づき整合させ位置推定を行うアルゴリズムの開発を行う。このためにはより精度の高い地理情報システムの構築が必要であるが、この構築のためにさらにモバイル端末に天球カメラを搭載し、ビジョンセンサーで撮影した情報とIMUとLIDARによる観測情報を統合して、容易に地理情報システムを生成する機構を開発する。

### 3. 研究の方法

本研究課題では、まず、屋内に設置された無線LAN等のインフラに依存しない形態での自律型の位置推定方式の研究に取り組む。このために、図1に示すようなプロトタイプを実装する。LIDARは中心で回転するレーザ照射器から全方位にレーザ光を照射し、周辺の反射物等で反射したレーザ光を受光し、その時間差に基づく経路長から、照射器から反射体までの距離を計測可能である。近年、測域センサーと言う名称でも認知され、小型化、高性能化が進んでいる。これまでLIDARはインフラシステムの一つとして設置されたり、自動走行の実験車両などの比較的姿勢の安定している移動体に搭載されたりしつつあるが、歩行者が身につけるようなモバイル端末への搭載事例はまだない。歩行者が身につけたモバイル端末の場合、その姿勢が歩行動作によって変化するので、それを追従するためにIMUを用いて高精度な姿勢推定を行う。IMUにより計測されたモバイル端末の姿勢情報と、モバイル端末と一致す

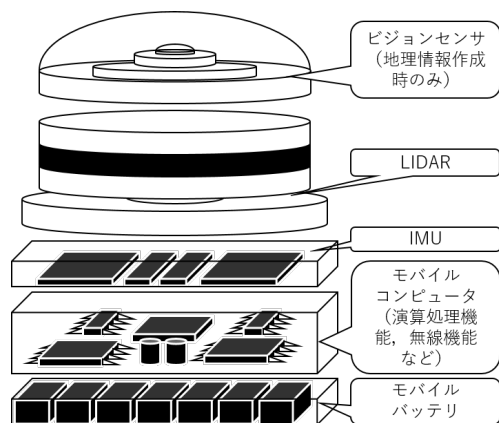


図1 提案装置のプロトタイプ

る姿勢にある LIDAR により計測された LIDAR 姿勢の水平面上にある反射面との距離情報を得ることができる。このシミュレートモデルを図 2 に示す。この距離情報とモバイル端末の位置を整合させるためには反射面の情報が必要である。反射面の情報は、あらかじめ用意されている地理情報システムから幾何的に得ることが可能である。次に、地理情報システムの生成手法について検討を行う。地理情報システムが未整備の箇所においては、図 1 のビジョンセンサを用いて容易に地理情報を生成するシステムを開発する。ビジョンセンサとして天球カメラを用いて、撮像画像と LIDAR と IMU と連結させて、短時間の撮像で自動的に地理情報を生成可能なシステムを実装する。

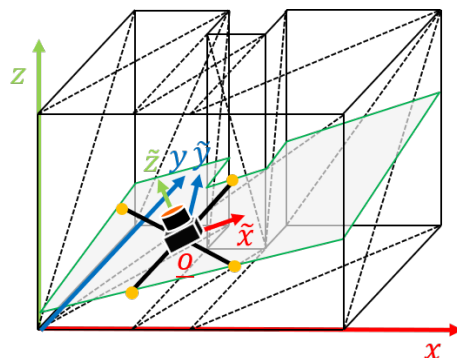


図 2 モバイル端末の姿勢と LIDAR による距離測定シミュレーション

図 3 に提案システムの全体像を示す。本提案システムでは歩行者の腕部に装置を装着し、歩行することを想定する。この際、歩行者の歩行動作にともない、装置の位置と姿勢は時々刻々と変化する。この時、装置の IMU を構成する加速度、ジャイロセンサーの計測値は、図 2 中の  $\tilde{x}-\tilde{y}-\tilde{z}$  からなる装置の座標系で計測される。加速度とジャイロセンサーの計測値を用いて、部屋の座標系  $x-y-z$  に対する相対的な回転を IMU により算出する。LIDAR により測距可能な面は図 2 の緑線で示した面であるので、IMU により計測した装置の姿勢情報により測距値を補正する。この姿勢情報に基づき補正された測距面での測距値を部屋の構造情報と整合させることで端末位置  $O$  を推定する。しかしながら、この位置推定問題は閉じた形で解を与えることが困難である。そこで、位置推定対象をグリッドに区切って候補点として、その候補点の中から測距値と部屋構造情報の最も整合する候補点を推定位置とするグリッド探索アルゴリズムを検討する。しかしながら、グリッド探索はその測位精度がグリッド幅によって支配されるという欠点が存在する。また、各グリッドから最も整合性の高い候補点を推定位置とするため、姿勢推定や測距の際の誤差に起因して、大きな測位誤差を引き起こすことが懸念される。そこで、歩行者の移動モデルを位置推定システムに取り込み、パーティクルフィルタの概念を導入したパーティクル探索アルゴリズムの開発を行う。これらの推定アルゴリズムの精度と数値計算シミュレーションを用いて評価し、そのパラメータなどの調整を行う。その後、実装した装置を歩行者の腕部に装着し、歩行実験を行い位置推定で精度の評価を行う。

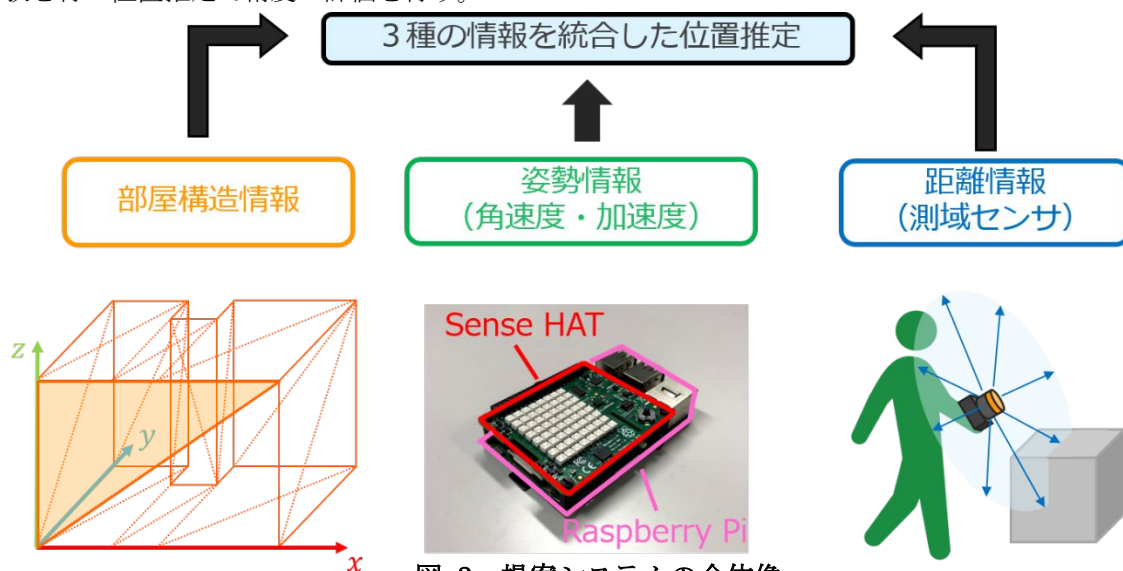


図 3 提案システムの全体像

#### 4. 研究成果

図 4 に作成した装置のプロトタイプとその装着例を示す。IMU としての姿勢センサーは図 3 で示す Raspberry Pi のアドオンボードの Sense HAT を使い、LIDAR は図 4 のオレンジの部分の北陽電気社製の測域センサーを用い、3D プリンタで自作した治具によりこれらを一体化したプロトタイプを作成した。

図 5 にグリッド探索アルゴリズムを実行した際の推定の様子を観察するためのアプリケーションの例を示す。歩行者の歩行動画と連動して、グリッド探索での位置と真の位置の比較、グリッド探索



図 4 装置のプロトタイプと装着例

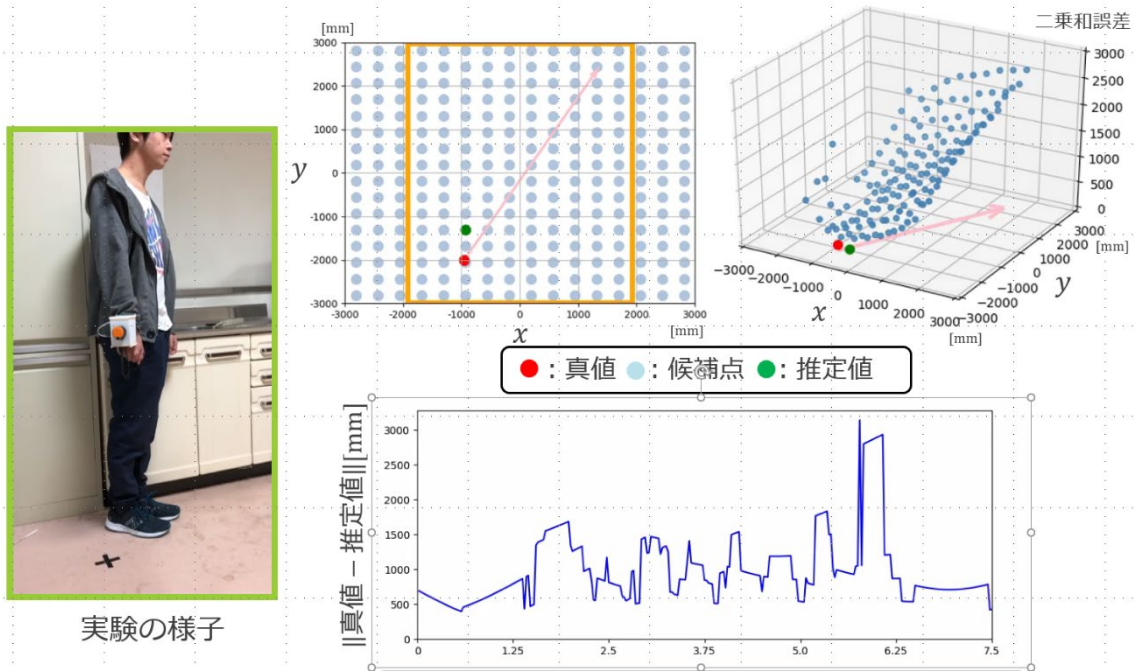


図 6 グリッド探索実験の様子

のための評価関数と各時刻での計測誤差の表示可能なアプリケーションを開発した。この歩行実験における位置推定誤差の平均値は約 989 mm となり、1 m 以下での位置推定が可能である。しかしながら、所々で大きな位置推定誤差が発生している。グリッド探索では、各時刻で独立に探索を行っており、時系列での歩行者の移動を考慮していない。IMU や LIDAR で姿勢や測距の誤差が発生した場合、前時刻と大きく離れた候補点を推定位置としてしまう場合が発生し、これが平均の推定誤差を引き上げている。

そこで、パーティクルフィルタの原理を本提案システムに導入したパーティクル探索アルゴリズムについて検証を行った。まず、実験環境に近い環境を想定した数値計算実験によってパーティクル探索のパラメータを評価した。図 6 にパーティクル探索による位置推定誤差を評価した。パーティクル探索は時系列での位置の仮説検証の繰り返しを行うため、推定開始直後は推定誤差が比較的大きいが、時刻が進むと収束していく性質が観測できる。この数値計算実験では、姿勢推定や測距推定に誤差が含まれない理想的な状況で評価を行っているため、おおむね 50 mm 以下の誤差で位置推定が可能となっている。

次に、実環境での歩行実験での姿勢推定、測距情報を用いて、位置推定アルゴリズムにパーティクル探索を用いた場合の評価を行った。図 7 に評価のための作成したアプリケーションを示す。パーティクル探索では、推定空間にパーティクルは散布し、その事前確率をもとに推定位置を絞り込む手法である。表 1 に同じ計測データを用いた場合でのグリッド探索と比較したパーティクル探索の平均位置推定誤差の結果を示す。結果より、パーティクル探索では大幅に位置推定で精度を改善でき、比較的推定が難しい歩行時でも平均推定誤差 1 m 以下を達成している。停止時であれば、さらに小さな位置推定誤差を達成可能である。これに対して、この環境での実験では、グリッド探索では位置推定誤差 1 m 以下を達成できなかった。

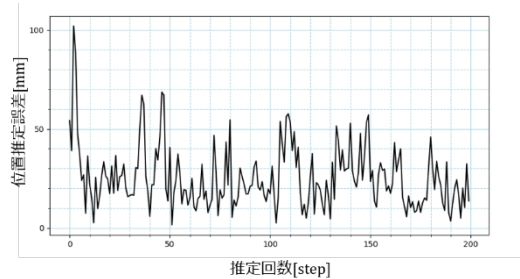


図 5 パーティクル探索での位置推定誤差 (数値計算)

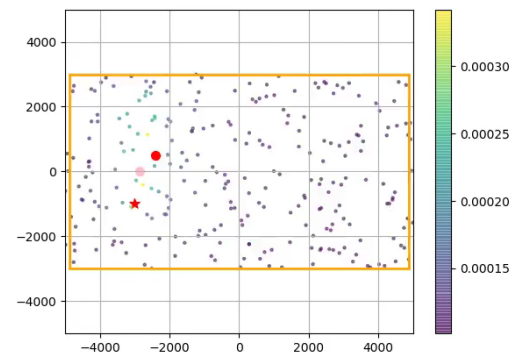


図 7 パーティクル探索実験の様子

表 1 グリッド探索とパーティクル探索の推定誤比較 [mm]

	パーティクル探索	グリッド探索
歩行時	532	2164
停止時	183	1820

図 8 にパーティクル探索のパラメータであるシステム雑音の分散を変化させた際の時刻に対する位置推定誤差の推移の例を示す。上図はパラメータが適切に設定されていないため、パーティクル探索では時間とともに位置推定誤差が増加している。これに対し、下図では適切なパラメータが設定されているため、時刻に対する位置推定誤差の増加は観測されない。このように、パーティクル探索では位置推定におけるパラメータ設定が必要であり、その適切な設定手法に関しては今後の検討が必要である。

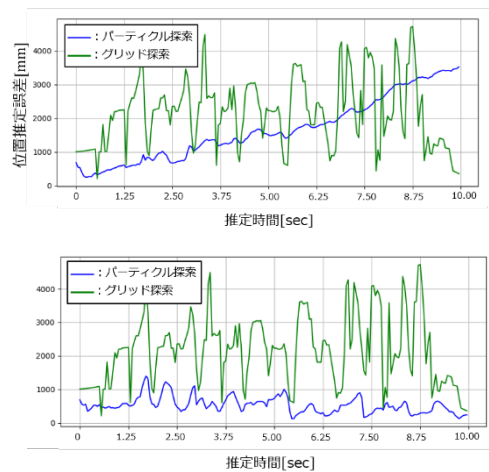


図 8 システム雑音の設定による位置推定誤差の推移

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5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 Inoue Shoma, Fujii Masahiro	4. 巻 1
2. 論文標題 A Study on Indoor 3D Modeling by SOKUIKI Sensor and Omnidirectional Camera	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 2019 IEEE 8th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE)	6. 最初と最後の頁 254-255
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/GCCE46687.2019.9015253	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 Mitsuaki Wada, Masahiro Fujii	4. 巻 1
2. 論文標題 A Study on Indoor Positioning System Based on Sky Area of Sky Plot Mask by Spherical Camera	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 2021 IEEE 10th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE)	6. 最初と最後の頁 41-42
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/GCCE53005.2021.9622016	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 Fumiya Taki, Masahiro Fuji	4. 巻 1
2. 論文標題 A Study on Indoor Positioning Based on Attitude and Distance Estimations by Grid Search with Penalty Term	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 2021 IEEE 10th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE)	6. 最初と最後の頁 93-94
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/GCCE53005.2021.9622103	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 Aoki Ryota, Fujii Masahiro	4. 巻 1
2. 論文標題 A study on Indoor Positioning Based on Attitude and Distance Estimations	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 2020 IEEE 9th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE)	6. 最初と最後の頁 9-10
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/GCCE50665.2020.9291934	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 Matsumoto Takumi, Fujii Masahiro	4. 巻 1
2. 論文標題 A study on estimation of traveling direction for pedestrian dead reckoning by using inertial sensors	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 2020 IEEE 9th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE)	6. 最初と最後の頁 732-733
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/GCCE50665.2020.9291953	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21件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 瀧 郁弥, 藤井雅弘
2. 発表標題 姿勢センサと測域センサを用いた歩行を考慮した屋内位置推定システムに関する一検討
3. 学会等名 電子情報通信学会技術報告
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 和田光彰, 藤井雅弘
2. 発表標題 GNSSのスカイプロットと建物の窓に基づくスカイプロットマスクを用いた屋内位置推定システムに関する一検討
3. 学会等名 電子情報通信学会技術報告
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 井上翔真, 藤井雅弘
2. 発表標題 全天球ステレオカメラによる屋内3次元地図構築に関する一検討
3. 学会等名 情報処理学会第83回全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 瀧 郁弥, 藤井雅弘
2. 発表標題 姿勢センサと測距センサを用いたパーティクルフィルタによる屋内位置推定システムに関する一検討
3. 学会等名 情報処理学会第84回全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 和田光彰, 藤井雅弘
2. 発表標題 GNSSの衛星位置情報に基づくスカイプロットと構造物窓情報に基づくスカイプロットマスクを用いた屋内位置推定システムに関する一検討
3. 学会等名 情報処理学会第84回全国大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Fumiya Taki and Masahiro Fujii
2. 発表標題 A Study on Indoor Positioning Based on Attitude and Distance Estimations by Grid Search with Penalty Term
3. 学会等名 IEEE Global Conference on Consumer Electronics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Mitsuaki Wada and Masahiro Fujii
2. 発表標題 A Study on Indoor Positioning System Based on Sky Area of Sky Plot Mask by Spherical Camera
3. 学会等名 IEEE Global Conference on Consumer Electronics (国際学会)
4. 発表年 2021年



1. 発表者名 和田光彰, 藤井雅弘
2. 発表標題 GNSSのスカイプロットと建物の窓に基づくスカイプロットマスクを用いた屋内位置推定システムに関する一検討
3. 学会等名 電子情報通信学会 ITS研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 瀧 郁弥, 藤井雅弘
2. 発表標題 姿勢センサと測域センサを用いた歩行を考慮した屋内位置推定システムに関する一検討
3. 学会等名 電子情報通信学会 ITS研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 瀧郁弥, 藤井雅弘
2. 発表標題 姿勢センサと測距を用いた屋内位置推定のグリッド探索に関する一検討
3. 学会等名 電子情報通信学会2020年ソサイエティ大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 和田光彰, 藤井雅弘
2. 発表標題 天球カメラによるスカイプロットマスクの空領域を用いた屋内位置推定システムに関する一検討
3. 学会等名 電子情報通信学会2020年ソサイエティ大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 藤井雅弘
2. 発表標題 FTMネットワークの拡張による高精度位置推定に関する一検討
3. 学会等名 電子情報通信学会技術報告
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 青木凌太, 藤井雅弘, 瀧 郁弥
2. 発表標題 姿勢推定と測距情報を用いた屋内位置推定システムの推定精度向上に関する一検討
3. 学会等名 情報処理学会第83回全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 井上翔真, 藤井雅弘
2. 発表標題 全天球カメラと測域センサを用いた三次元地理情報システムに関する一検討
3. 学会等名 第18回情報科学技術フォーラム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 青木凌太, 藤井雅弘
2. 発表標題 姿勢推定と測距情報を用いた屋内位置推定に関する一検討
3. 学会等名 情報処理学会第82回全国大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松本拓真, 藤井雅弘
2. 発表標題 慣性センサーを用いた歩行者の進行方向推定に関する一検討
3. 学会等名 情報処理学会第82回全国大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 瀧郁弥, 藤井雅弘
2. 発表標題 測域センサと姿勢センサを融合した屋内位置推定システムに関する一検討
3. 学会等名 電子情報通信学会 東京支部学生会 第25回研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 和田光彰, 藤井雅弘
2. 発表標題 スカイプロットマスクを用いた屋内位置推定システムに関する一検討
3. 学会等名 電子情報通信学会 東京支部学生会 第25回研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松本拓真, 藤井雅弘
2. 発表標題 慣性センサーを用いた歩行者の進行方向推定に関する一検討
3. 学会等名 第16回学生 & 企業研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 井上翔真, 藤井雅弘
2. 発表標題 測域センサと全天球カメラを用いた屋内3次元地図作成に関する位置検討
3. 学会等名 第16回学生 & 企業研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Inoue Shoma, Fujii Masahiro
2. 発表標題 A Study on Indoor 3D Modeling by SOKUIKI Sensor and Omnidirectional Camera
3. 学会等名 2019 IEEE 8th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE) (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

青木 凌太, "姿勢推定と測距情報を用いた屋内位置推定に関する一検討," 情報処理学会第82回全国大会学生奨励賞 松本 拓真, "慣性センサーを用いた歩行者の進行方向推定に関する一検討," 情報処理学会第82回全国大会学生奨励賞 瀧 郁弥, "姿勢センサと測距センサを用いたパーティクルフィルタによる屋内位置推定システムに関する一検討," 情報処理学会第84回全国大会学生奨励賞
---

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
---------	---------