

令和元年6月17日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2016～2018

課題番号：16H02843

研究課題名（和文）自動運転に関する都市部における全環境を考慮した統合的研究

研究課題名（英文）Research on Automated Driving in Urban Scenarios in Multiple Environments

研究代表者

上條 俊介（Kamijo, Shunsuke）

東京大学・大学院情報学環・学際情報学府・准教授

研究者番号：70334357

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,500,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、まず、3D-GNSS技術、IMU、Visionセンサーの統合技術を開発し、都市部において1.5m以内の位置推定精度を達成した。次に、高架下では構造物のパターンが単調のため、LiDARで位置決定を行うのが困難な場合がある。本研究では、トポロジー情報のみから構成される地図とIMUの情報から測位が可能であることを示した。最後に、航空写真上にSLAMデータを自動アラインメントし、絶対精度25cm程度のデジタル地図を自動生成する技術を開発した。さらにベクターフォーマットにより地図を構成する方法を提案し、point cloudと同等の位置推定精度を保てることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

自動運転の研究は国際的な競争と共同研究の両立が重要である。これまでの研究は、自身によるデモを主目的としたものが多いが、今後の自動運転の国際的普及には、科学的な見地からの技術標準化が不可欠である。本研究では、self-localizationを目的として、様々な劣悪な環境でのセンシングとデジタル地図の在り方について、自ら提案し可能性を検証したものである。本研究の成果は学術的にも社会的にも先進性が評価されてつつある。

研究成果の概要（英文）：An integration method of 3D-GNSS, IMU, and Vision sensor was developed in this research. This method has been proved to achieve 1.5m for positioning accuracy in urban canyon. Positioning method under the bridge of Metropolitan Expressway was developed. In this scenario, GNSS is invisible and face the difficulty of localization because of monotonous scape of the structures. Automated method for map creation was developed with automated alignment method of SLAM data to airborne images. Such the created digital map achieved 25cm level accuracy in absolute coordinate. Finally, we proposed the specific vector data format of the digital map for autonomous driving, and proved that it maintain the equivalent accuracy of localization compared with the case employing point cloud data format.

研究分野：知能情報処理

キーワード：自動運転 デジタル地図 統合センシング

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

自動運転において、自車両の位置を特定する self-localization 技術では、Velodyen 等のような 360 度スキャン型の LIDAR を活用して三次元計測を行う研究が多く行われ、高精度な localization を行う技術として評価を得ている。将来の自動運転において、LIDAR を中心としてシステムが普及することは確実と思われるが、いくつかの課題が見えている。現在は、あらかじめ計測された距離データの point cloud をレファレンスとして、実走行で得られた point cloud との比較を行う技術が主流であるが、point cloud として三次元地図はデータ量が膨大という問題がある。また、active sensor は、コストや消費電力に課題があり、自動ブレーキ用の Radar のようにセンサー間の干渉という課題もすでに顕在化している。

車載カメラを活用した self-localization の研究も多く行われている。路面表示や市街地の建造物の画像を認識することで地図上のマッチングを行う技術が開発されている。また、ステレオ画像の feature point の depth 情報と回転の移動量から車両の回転角度を推定する visual odometry 技術が研究され、交差点の右左折時のようにレーン認識が困難な状況での self-localization の精度向上に貢献している。

2. 研究の目的

本研究代表者等が開発した三次元地図データとレイトレーシング法を GNSS 信号解析に適用し、一ツ橋付近(middle urban canyon)および新宿付近(deep urban canyon)のテストベッドにおいて、3m 測位精度の実現を目指す。一ツ橋付近では GPS 衛星信号のみを用いても実現可能と試算されるが、新宿付近では準天頂衛星および GLONASS の信号を併せたマルチ GNSS 手法により目標の測位精度を実現する。次に、この GNSS 技術、車載の CAN データや Gyro といった IMU センサー、車載カメラによるレーンキープ技術のフュージョンにより 1.5m 程度の測位精度を 95~98%のカバー率で実現する。IMU による推定は精度が高い一方で、エラーの蓄積による劣化がある。一方、GNSS の測位エラーには蓄積による劣化がないため、これらをカルマンフィルターで統合することで、精度の高い測位が可能になると期待される。

LIDAR を活用した測位は、すでに高い評価を得ている。本研究では、こうした LIDAR の確実性を前提としつつ、実環境での有効場面、非有効場面を明らかにするためのフィードデータの収集を行う。例えば、都市部では交通が密で、トラックやバス等の周辺車両の遮蔽により LIDAR 計測が有効でない場面が想定される。例えば、path planning のタスクでは、走行車線を推定するための測位精度（車線横断方向の lateral 測位）と、交差点や車線変更点に対する位置関係を推定するための測位精度（車線に沿った方向の longitudinal 測位）が要求される。周辺車両による遮蔽では、lateral と longitudinal の両方の側に問題が生じることが想定されるが、この場面では、先日の GNSS、IMU、車載カメラのフュージョンにより測位の連続性をキープすることができる。これにより、全シナリオにおける 99%以上の測位カバー率を実現する。

最後に、point cloud を抽象化した三次元デジタル地図の自動生成技術にかんする研究を行う。計測は、MMS(Motion Mapping System)といわれるレーザー計測車両から得られた point cloud と航空測量から得られた point cloud を統合する技術を開発する。また、抽象化の根拠データとして、国土院が発行する二次元デジタル地図における建造物境界線データを活用する。この三次元地図は、LIDAR 計測のレファレンスとしてだけでなく、本研究代表者が開発した三次元 GNSS 測位にも活用可能な技術を目指す。LIDAR 計測および三次元 GNSS の両者に共通した技術特徴として、例えば 1m 以下の分解能の細かい形状は必要ないが、構造物の位置精度は 10cm 程度以下が必要であると考えられる。

3. 研究の方法

自動運転の self-localization には、走行する車線を特定するために 1.5m 程度の lateral 測位精度が必要である。本研究では、車載の CAN(Car Area Network)や Gyroscope 等の IMU(Inertial Motion Unit)から得られる情報と 3D-GNSS 技術を融合して、1.5m 以内の測位精度を達成する。これは、例えば USDOT がミシガン州で行った connected vehicle 実証実験において、open sky の環境で確認された性能を urban canyon において保障するレベルと考えられる。CAN データは速度、加速度、Gyroscope は角速度等の情報が高精度に取得できる反面、誤差蓄積によるドリフトが発生する。これに対し、GNSS 測位は IMU に比べてランダム誤差が大きいが、誤差のフィルター機能を付加しない状態では誤差の蓄積が発生しない。GNSS 測位を観測量とし、IMU データを状態遷移とする Kalman filter や particle filter により、それぞれに特異な誤差をキャンセルできる。本研究では、自動車用途に普及している、安価な MEMS 振動型 Gyroscope を活用することができ、角速度検出範囲が 100~500dps(degree per second)、バイアス安定性が 5 degree/hour 程度の一般的なものを使用する。

本研究では、様々な周辺環境シナリオにおける self-localization を想定した。例えば、高速道路の高架下では、GNSS 信号の直接波が全く届かず GNSS 測位が不可能である。また、高架下では、建物や道路の支柱など同様の景色が繰り返すため、longitudinal 方向の位置同定の精度が著しく低下する。この問題を解決するためには、車載カメラによるレーン識別およびレーンキープ機能を基本として、IMU と車載カメラによる路面標示認識を組み合わせた longitudinal 方向の位置同定を組み合わせたことが考えられる。本研究では、都市部の高架下の環境で、どの程度の self-localization が可能か検証する。

最後に、自動運転に活用可能な三次元地図の自動生成技術の研究を行う。これまで LIDAR を用いた自動運転の研究では、自作の point cloud をレファレンスとしたマッチングが主体であった。しかし、自動運転の普及に向けて三次元地図データベースを整備する場合、point cloud はデータ量が膨大であり、三次元データの抽象化が不可欠であり、デジタル地図の専門家による検討が始まっている。本研究では、compact かつ comprehensive という概念に基づき、LIDAR を活用した self-localization にとって必要十分なデータフォーマットを検討する。

4. 研究成果

1) センサー統合による都市部における self-localization

まず、都市部の高層ビル街での self-localization の結果を示す。三次元地図を活用した 3D-GNSS、IMU、車載カメラを統合したシステムを開発した。本研究では、中規模の urban canyon として皇居の北側の一ツ橋地区を、大規模な urban canyon として新宿副都心を選んで実験を行った。図 1 は、走行実験結果のプロットである。

新宿副都心のような大規模な urban canyon を評価対象とすることは、技術の限界を正当に評価する上で重要であるが、先例のない研究成果とすることができた。

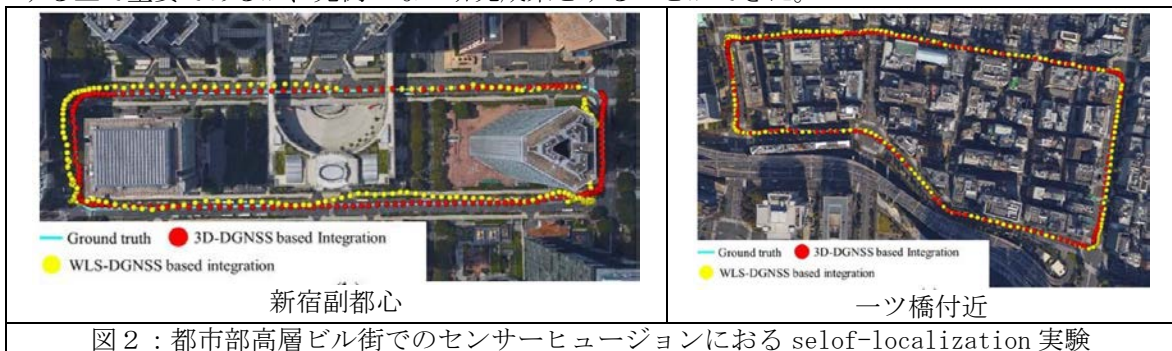


図 2 : 都市部高層ビル街でのセンサーヒュージョンにおける self-localization 実験

Positioning methods	Positioning error mean (m)	Positioning error std. (m)	Occupied lane recognition rate
Middle urban: Hitotsubashi area			
WLS-DGNSS&IMU&speedometer & Lane detection integration	2.21	1.84	49.7%
3D-DGNSS&IMU&speedometer & Lane detection integration	0.75	0.67	94.8%
Deep urban: Shinjuku area			
WLS-DGNSS&IMU&speedometer & Lane detection integration	5.81	4.13	26.4 %
3D-DGNSS&IMU&speedometer & Lane detection integration	0.97	1.06	90.2 %

表 1 : センサー統合による self-localization の評価結果

2) 位置同定困難なシナリオにおける実験

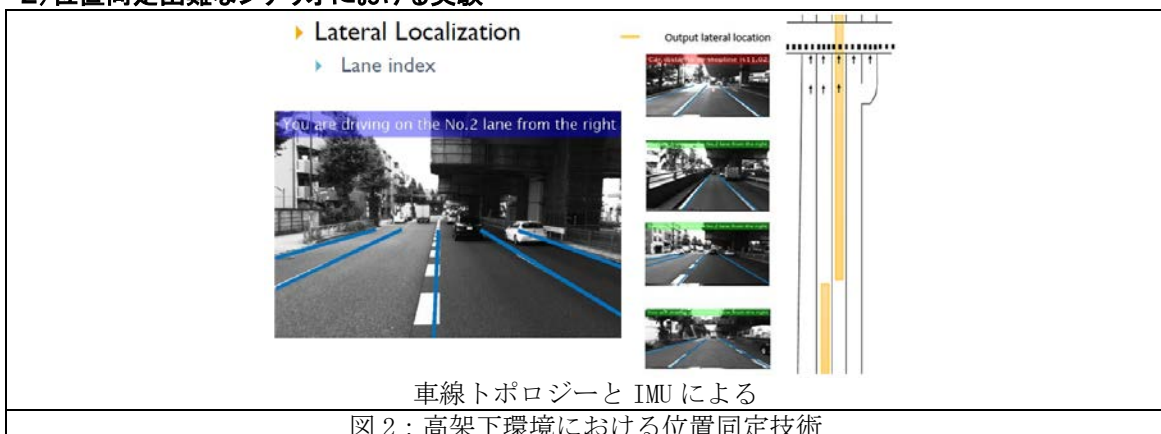


図 2 : 高架下環境における位置同定技術

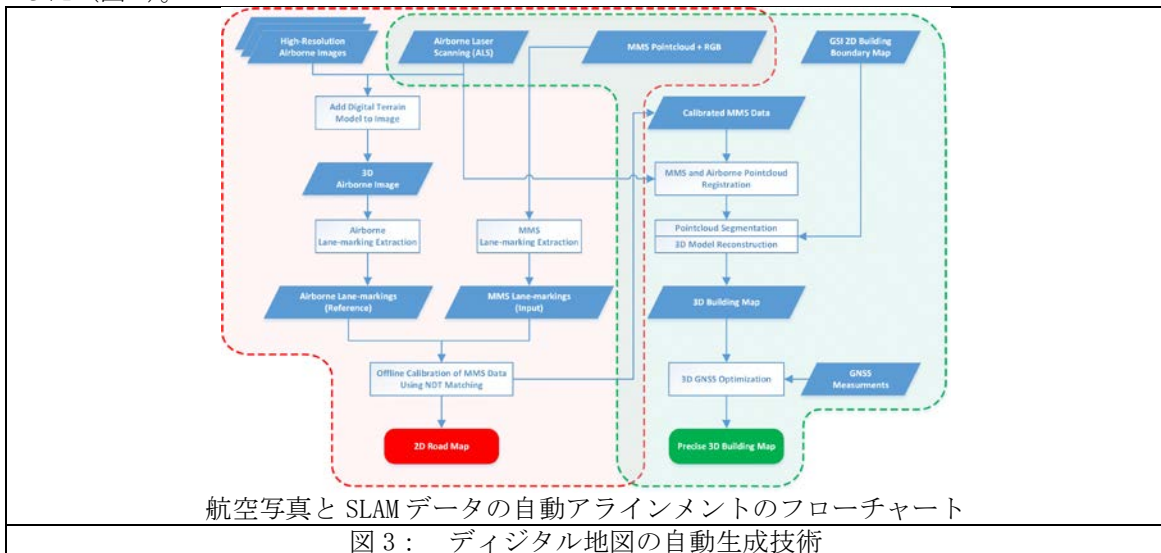
首都高速道路の高架下として、self-localization の研究を行った。高架下は GNSS 信号の直接波を受信することができないため、GNSS 測位が不可能となる。また、橋の支柱や路側の建造物等、LiDAR で観測できる範囲の構造が単調であるため、特に longitudinal 方向の位置同定が困難である。

本研究では、あえて LiDAR を使用せず、lateral 方向の位置同定を車載カメラで行い、longitudinal 方向の位置同定を IMU センサー (加速度センサー) によって行う方法を開発した。一般に IMU センサーの誤差蓄積を軽減するためには誤差をリセットする方法が必要であるが、

本研究では画像センシングにより停止線や矢印の路面サインを検出し、その路面情報の位置情報から車両の longitudinal 方向の位置を正確に知ることで、IMU センサーの誤差蓄積を軽減する方法を開発した。本研究では、約 3km の区間の車線トポロジー地図を作成した。車線トポロジー地図では、lateral 方向へは車線構成の情報のみを残し、実座標の情報を捨象した。longitudinal 方向へは、路面標示の座標を事前走行で計測したものをプロットした (図 2)。

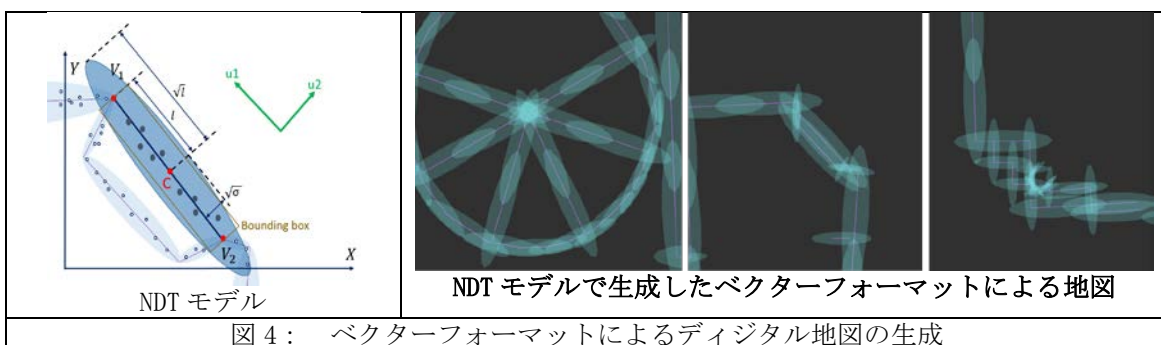
3) デジタル地図の自動生成

自動運転においては、地図の相対精度と絶対精度との両方が議論されるが、相対精度がより重要であり、絶対精度の重要性は低いと言われている。この点から言えば、実験やデモンストレーション上は、SLAM により取得した地図でも差し支えない場合が多い。しかし、今後国際的にデジタル地図を標準化することを考えれば、絶対精度においても同様の精度が要求されることが妥当であると考えられる。我が国の SIP(Strategic Innovation Program)では、こうした議論を取り入れる形で相対精度と絶対精度ともに 25cm 程度をガイドラインすることとなった。一般に SLAM(Simultaneous Localization and Mapping)技術では、つぎはぎ的に地図を生成するため、誤差の蓄積によりデジタル地図の絶対位置精度の誤差が数メートルに及ぶため、SLAM で作成した地図をそのままでは、自動運転の標準地図として活用すること是不適切である。そこで、本研究では、絶対精度 25cm の地図を自動生成する技術を開発した。地球表面の二次元精度を最も正確に反映しているものの一つに航空写真がある。これまで、航空写真の自動解析術について様々な研究が行われてきたが、ビル境界や道路面の抽出の精度向上において決定的な方法は考案されていない。それは、一種の画像処理技術単体での限界と見ることができる。本研究では、SLAM 用車両の LiDAR から得られた反射率情報から路面標示等を分類し、車載カメラおよび航空写真とマッチングを行うことで、同労面やビル境界を安定して検出する技術を開発した (図 3)。



4) デジタル地図のフォーマットに関する考察

これまで、多くの研究やデモンストレーションは、独自に取得した point cloud データを使用するのが一般的であり、標準となるようなデジタルフォーマットの議論はなされていない。本研究では、抽象化された地図によっても self-localization の精度を保つことができるような、抽象化フォーマットを検討した。図 4 に示したように、NDT (Normal Distribution Transform) というベクターに誤差分布を付加したフォーマットを採用し、point cloud データを圧縮することを試みた。その結果、1000~10000 倍程度にデータを圧縮しても、self-localization の精度がほとんど劣化しないことが分かった。また、NDT を planer サーフエスモデルに拡張したフォーマットでも同様の結果が得られた。この結果は、国際会議で論文賞を受賞する等、先駆的な成果として国際的に高く評価された。



5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 11 件)

- [1] Yanlei Gu, Li-Ta Hsu, Lijia Xie, and Shunsuke Kamiyo, “Accurate Estimation of Pedestrian Orientation from On-board Camera and Inertial Sensors”, IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, Vol. E99-A, No. 1, pp. 271-281, 2016 査読有
DOI: <https://doi.org/10.1587/transfun.E99.A.271>
 - [2] Yanlei Gu, Li-Ta Hsu, Jiali Bao, Shunsuke Kamiyo, “Integrating Global Navigation Satellite System and Road Marking Detection for Vehicle Localization in Urban Traffic”, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2595, pp. 59-67, 2016. 査読有 DOI:10.3141/2595-07
 - [3] Yutaro Wada, Li-Ta Hsu, Yanlei Gu, Shunsuke Kamiyo, “Optimization of 3D Building Models by GPS Measurements”, GPS Solutions, Vol. 21, No. 1, pp. 65-78, 2017. 査読有 DOI: <https://doi.org/10.1007/s10291-015-0504-y>
 - [4] Jingwen Liu, Yanlei Gu, Shunsuke Kamiyo, “Customer Behavior Classification using Surveillance Camera for Marketing”, Multimedia Tools and Applications, Vol. 76, No. 5, pp. 6595-6622, 2017. 査読有 DOI:<https://doi.org/10.1007/s11042-016-3342-1>
 - [5] Yanlei Gu, Li-Ta Hsu, Shunsuke Kamiyo, “Towards lane-level traffic monitoring in urban environment using precise probe vehicle data derived from three-dimensional map aided differential GNSS”, IATSS Research, Vol. 42, No. 4 pp. 1-11, 2018. 査読有 DOI:10.1016/j.iatssr.2018.03.001
 - [6] Yanlei Gu, Li-Ta Hsu, Shunsuke Kamiyo, “Vehicle Localization Based on Global Navigation Satellite System Aided by Three-Dimensional Map”, Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, National Academy Press, No. 2621, pp. 55-61, 2017 査読有 DOI:10.3141/2621-07
 - [7] Mahdi Javanmardi, Ehsan Javanmardi, Yanlei Gu, Shunsuke Kamiyo, “Towards High-Definition 3D Urban Mapping: Road Feature-Based Registration of Mobile Mapping Systems and Aerial Imagery”, Remote Sensing, Vol. 9, No. 10, pp. 1-30, 2017. 査読有 DOI:10.3390/rs9100975
 - [8] Li-Ta Hsu, Yanlei Gu, Shunsuke Kamiyo, “Intelligent Viaduct Recognition and Driving Altitude Determination using GPS Data”, IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, Vol. 2, No. 3, pp. 175-184, 2017. 査読有 DOI:10.1109/TIV.2017.2737325
 - [9] Ehsan Javanmardi, Yanlei Gu, Mahdi Javanmardi, Shunsuke Kamiyo, “Autonomous vehicle self-localization based on abstract map and multi-channel LiDAR in urban area”, IATSS Research, available online, pp. 1-13, 2018 査読有
DOI: 10.1016/j.iatssr.2018.05.001
 - [10] Ehsan Javanmardi, Mahdi Javanmardi, Yanlei Gu, Shunsuke Kamiyo, “Factors to Evaluate Capability of Map for Vehicle Localization”, IEEE Access, Vol. 6, pp. 49850-49867, 2018 査読有 DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2868244
 - [11] Yanlei Gu, Qianlong Wang, Shunsuke Kamiyo, “Intelligent Driving Data Recorder in Smartphone Using Deep Neural Network-Based Speedometer and Scene Understanding”, IEEE Sensors Journal, Vol. 19, No. 1, pp. 287-296, 2019 査読有
DOI:10.1109/JSEN.2018.2874665
- [学会発表] (計 16 件)
- [1] Li-Ta Hsu, Yanlei Gu, and Shunsuke Kamiyo. “Autonomous driving positioning using building model and DGNSS”, IEEE European Navigation Conference (ENC2016), Helsinki, Finland, May, 2016.
 - [2] Jiali Bao, Yanlei Gu, Li-Ta Hsu, Shunsuke Kamiyo, “Vehicle self-localization using 3D building map and stereo camera,” IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV2016), Gothenburg, Sweden, June, 2016.
 - [3] Mahdi Javanmardi, Ehsan Javanmardi, Yanlei Gu, and Shunsuke Kamiyo, “A Novel Approach for Post-Calibration of Mobile Mapping Systems Using Intensity Reflection and Airborne Imagery”, Transportation Research Board 96th Annual Meeting (TRB 2017), Washington, D. C., United States, January, 2017.
 - [4] Yanlei Gu, Shunsuke Kamiyo, “Vehicle Localization based on Three-Dimensional Map Aided Global Navigation Satellite System”, Transportation Research Board 96th Annual Meeting (TRB2017), Washington, D. C., United States, January, 2017.
 - [5] Prarthana Bhattacharyya, Yanlei Gu, Jiali Bao, Shunsuke Kamiyo, “Accurate Localization and Motion Planning for Autonomous Driving at Urban Intersections”, ION Pacific PNT Conference 2017 (PNT2017), Honolulu Hawaii, USA, May, 2017.
 - [6] Yanlei Gu, Shunsuke Kamiyo, “GNSS Positioning in Deep Urban City with 3D Map and Double Reflection”, IEEE European Navigation Conference(ENC2017), Geneva Switzerland, May, 2017.

- [7] Prarthana Bhattacharyya, Yanlei Gu, Jiali Bao, Liu Xu, Shunsuke Kamiyo, “3D Scene Understanding at Urban Intersection using Stereo Vision and Digital Map”, IEEE Vehicular Technology Conference (VTS2017), Sydney Australia, June, 2017.
- [8] Jiali Bao, Yanlei Gu, Shunsuke Kamiyo, “Vehicle positioning with the integration of scene understanding and 3D map in urban environment”, IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV2017), Redondo Beach, California USA, June, 2017.
- [9] Mahdi Javanmardi, Ehsan Javanmardi, Yanlei Gu, Shunsuke Kamiyo, “Automatic Calibration of 3D Mobile Laser Scanning using Aerial Surveillance Data for Precise Urban Mapping”, IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV2017), Redondo Beach, California USA, June, 2017.
- [10] Ehsan Javanmardi, Mahdi Javanmardi, Yanlei Gu, Shunsuke Kamiyo, “Autonomous Vehicle Self-Localization Based on Multilayer 2D Vector Map and Multi-channel LiDAR”, IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV 2017), Redondo Beach, California USA, June, 2017.
- [11] Ehsan Javanmardi, Mahdi Javanmardi, Yanlei Gu, Shunsuke Kamiyo, “Autonomous Vehicle Self-Localization Based on Probabilistic Planar Surface Map and Multi-channel LiDAR in Urban Area”, IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC2017), Yokohama, Japan, October, 2017.
- [12] Mahdi Javanmardi, Ehsan Javanmardi, Yanlei Gu, Shunsuke Kamiyo, “Precise Mobile Laser Scanning for Urban Mapping Utilizing 3D Aerial Surveillance Data”, IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC2017), Yokohama, Japan, October, 2017.
- [13] Lijia Xie, Yanlei Gu, Shunsuke Kamiyo, “Lane-Level Vehicle Self-Localization in Under-Bridge Environments Based on Multi-Level Sensor Fusion”, IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC2017), Yokohama, Japan, October, 2017.
- [14] Yanlei Gu, Li-Ta Hsu, Shunsuke Kamiyo, “Acquisition of Precise Probe Vehicle Data in Urban City Based on Three-Dimensional Map Aided GNSS”, IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC2017), Yokohama, Japan, October, 2017.
- [15] Ehsan Javanmardi, Mahdi Javanmardi, Yanlei Gu, Shunsuke Kamiyo, “Evaluation of Digital Map Ability for Vehicle Self-Localization”, IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV2018), Changshu, China, Jun. 2018.
- [16] Ehsan Javanmardi, Mahdi Javanmardi, Yanlei Gu, Shunsuke Kamiyo, “Adaptive Resolution Refinement of NDT Map Based on Localization Error Modeled by Map Factors”, 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC2018), Maui, HI, USA, Nov. 2018.

[図書] (計 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 件)
なし

○取得状況 (計 件)
なし

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究分担者
なし

(2)研究協力者
なし

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。