

令和 3 年 6 月 14 日現在

機関番号：82626  
研究種目：若手研究  
研究期間：2018～2020  
課題番号：18K18072  
研究課題名（和文）人と共生するパートナーモビリティの開発

研究課題名（英文）Toward partner mobility vehicles

研究代表者

大石 修士 (Oishi, Shuji)

国立研究開発法人産業技術総合研究所・情報・人間工学領域・研究員

研究者番号：30759618

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）：パーソナルモビリティは、生活に密着した個人移動手段として大きなメリットを有する一方、その知能化に向けては実環境において頑健に動作する高度な環境認識機能が必要となる。そこで本研究では、自律パーソナルモビリティの普及に向けた技術開発に取り組んだ。具体的には単眼カメラによる地図生成や自己位置同定、LiDARを利用した広域地図生成や歩行者認識・他者へ配慮した社会的経路計画、また力覚ジョイスティックを用いた運転操作支援システムについて研究を進め、実世界で機能するパーソナルモビリティに必要な種々の技術を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

安全なパーソナルモビリティの開発には、自律化や運転補助のための高度な知能化が鍵となる一方、普及に向けたセンサコストの低減も重要な課題となる。本研究では、単眼カメラのような簡素なセンサを主とする、高精度・高頑健性な自己位置同定や3次元環境復元手法の開発を行い、自律モビリティの基礎となる機能を実現した。また、インフラとしての広域3次元地図生成や、人との関係を考慮した移動計画・操縦インタフェースにも取り組み、人の移動を支援するパーソナルモビリティの導入に向けた技術開発を行った。

研究成果の概要（英文）：Whereas personal mobility vehicles have great merits as a means of personal transportation in our daily lives, various functions are required to make them autonomous in the real world.

In this research, we have developed technologies for the widespread use of autonomous personal mobility.

Specifically, we have studied 3D reconstruction and localization with a monocular camera, 3D mapping with a LiDAR, pedestrian detection and social path planning, and driving support system using a force-feedback joystick.

研究分野：ロボットビジョン

キーワード：Localization Navigation Pedestrian detection SLAM

## 1. 研究開始当初の背景

"2025 年問題" を目前に控え、AI やロボット技術による社会変革や生活支援は焦眉の急であり、政府の第 5 期科学技術基本計画においても超スマート社会 Society5.0 の実現に向けた中核として位置づけられている。人の社会的活動の中心である"移動" については、その支援を目的とした自動車の自律運転技術開発が各自動車メーカーや大学を中心に広く進められている。

一方で、“ラストワンマイル” の言葉で知られる通り、車いすのような小型で日常生活空間を自由に移動できるパーソナルモビリティに、長距離移動を支援する自動車に対する相補的な役割が期待されている。個人移動手段として自律移動システム(パーソナルモビリティ)を発展させることができれば、買い物難民や高齢者等の交通弱者の移動支援に大きく貢献できる一方、個人所有に向かない高いコストや多様な生活環境での頑健な環境認識技術が求められるなど、普及に向けた障害も大きい。さらに、「人が生活する」という向きの強い環境における"移動"には社会性が求められる。障害物にぶつからずに進むだけでなく、周囲の人々の動きや行動を考慮して自身の動線を機敏に修正し目的地へ向かうような、“人らしい” 振る舞いが好ましく、安全性に加え社会性を考慮した移動や搭乗者への支援が重要となる。

## 2. 研究の目的

本研究では、街中のような実環境においても頑健に機能する自律移動制御技術や環境認識技術を開発し、移動弱者の支援を行う「パートナーモビリティ」を実現する。また、“人が人を気遣う”ように、単に安全な経路を辿るだけでなく、周囲の人々への心理的な負荷を考慮した社会的な振る舞いを実装する。さらに、手動操作時も搭乗者への補助を図るなど、利便性・安全性向上のための技術開発と同時に、他人や搭乗者との関係や調和にも焦点を当てた支援を目的とする。

## 3. 研究の方法

下記の項目について研究を遂行した。具体的には、単眼カメラによる自律移動に向けて(1)(2)(3)に、周囲物体の形状復元や識別、社会的な振る舞いの実装に向けて(4)(5)に取り組んだ。

- (1) 見えに基づく位置推定とナビゲーション
- (2) 単眼カメラによる超頑健な 6 自由度位置同定
- (3) 単眼カメラや LiDAR を用いた地図生成
- (4) 非剛体変形による全周形状推定
- (5) 歩行者検知および社会性を考慮した経路計画

## 4. 研究成果

### 【(1) 見えに基づく位置推定とナビゲーション】

近年の自動運転の基礎として、事前に生成した 3 次元地図と走行時に得られる局所幾何形状との照合による高精度な自己位置同定が広く研究されているが、位置同定が必要な車両毎に数十万~数百万円の高価な 3 次元レーザスキャナを搭載することはコストの観点から好ましくない。そこで、安価なデジタルカメラを用いた簡素で頑健な自己位置推定およびナビゲーション手法の実現のため、画像系列に基づく新たな View-based navigation 手法を開発した。画像比較に基づく自己位置推定では季節や天候による見えの変化が大きな問題となるが、大域特徴量である HOG による特徴記述や DP Matching による系列対応付け、マルコフ位置推定等を利用することで、見えの変化に頑健で高精度な位置推定を実現した。また、全方位画像に対する学習画像の走査を導入することで、全方位カメラのみでのナビゲーションシステムを開発した。

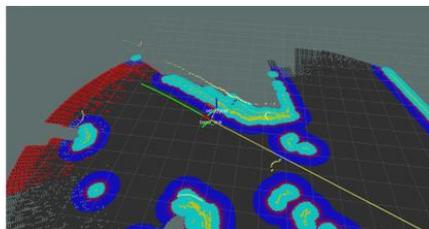


(a) Mobile robot navigating itself to a destination.

(b) Input image and selected moving direction.



(c) Estimated location (The best matched image in the training sequence).



(d) Local path planning along with the direction to move.

### [画像系列上での位置同定と移動方向推定(Navigation)]

#### 【(2) 単眼カメラによる超頑健な 6 自由度位置同定】

(1)では、事前に作成した動画地図に対する 1 次元位置同定、およびその経路を辿るためのナビゲーション技術を開発した。より一般的な自律移動システムの構築に向けて、センサ特性やモダリティを超えた頑健な見えの比較に基づく 6 自由度位置推定に取り組んだ。LiDAR のような能動的なセンサに比べ、カメラの見えに基づく位置同定は環境変化やセンサ特性の差異が位置推定精度に大きな影響を及ぼす。本研究では、対象環境を事前にモデリングした 3 次元地図に対し、単眼カメラから得られる画像が合致する位置姿勢を探り、高精度な位置同定を可能とした。具体的には、地図内でのレンダリング画像と現在のカメラ画像の正規化情報距離(NID)を最小化することで、直接輝度値を比較するフォトメトリックな手法に比べ顕著な頑健性を獲得している。同時に、位置同定問題を、Keyframe ベースの局所トラッキング問題に落とすことで、レンダリングや関連する事前処理の負荷を大幅に低減し、リアルタイムな 6 自由度位置推定を実現した。



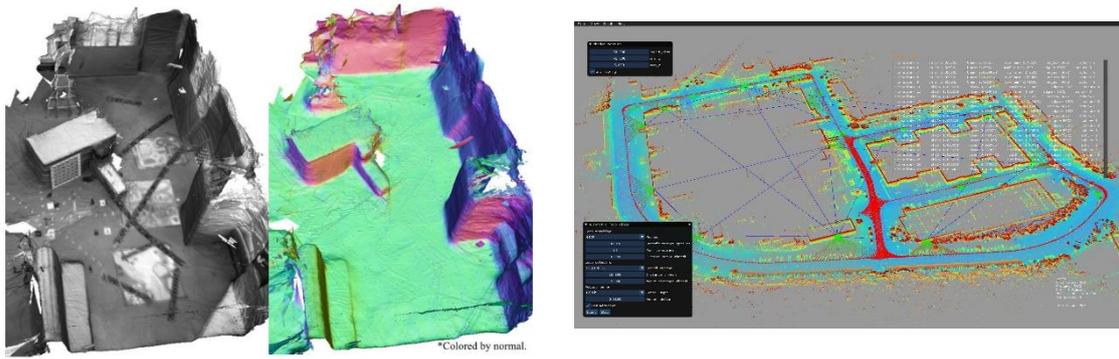
[単眼カメラによる異種センサ間での 6 自由度位置同定(可視光カメラ 対 赤外光地図)]

#### 【(3) 単眼カメラや LiDAR を用いた地図生成】

(2)に記述した自己位置同定には、対象環境をモデリングした 3 次元地図が必要となる。そこで、まず単眼カメラを用いた高密度な点群生成が可能な Visual SLAM 手法を開発した。従来の画像特徴量を利用した特徴点対応を求める方法とは異なり、最初に連続する入力画像間の大まかなオプティカルフローを求め、そのフローを初期値とする画像間の極値の対応付けを行うことで、対応点計算の低コスト化および対応点数の向上を図った。また、軽量の Bundle adjustment 手法を新たに提案し、上記の対応点計算と組み合わせることで、非常に密な 3 次元復元を実現した。

また、LiDAR による広域地図の生成にも取り組んでいる。広域地図では累積誤差による不整合

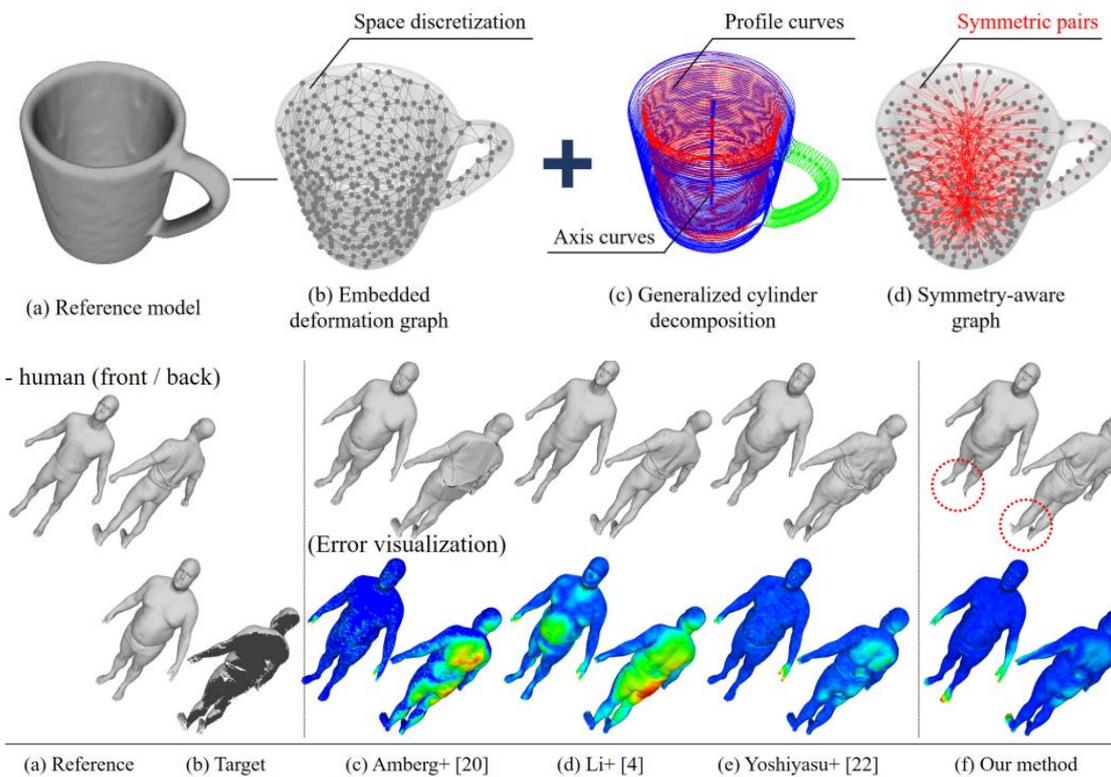
が問題となるが、その手動修正が可能なインタラクティブなツールを開発するなど、より手軽で高精度な地図生成を実現した。



[Visual SLAMによる高密度地図 / 高精度化に向けたインタラクティブな地図修正]

【(4) 非剛体変形による全周形状推定】

周囲物体の形状計測に向けて、モビリティ搭載のセンサから得られる部分的な観測形状に対し、既知の3次元メッシュを非剛体変形させることで全周形状を推定する手法を構築した。具体的には、基礎となるモデルの一般化円筒分解を介して対称性を含んだ Deformation graph を構築し、その内在的な対称性を保持しつつ観測に合わせて非剛体変形させることで、より自然な形状補間が可能であることを示した。



[Deformation graph 生成および基礎モデルからの欠損修復例]

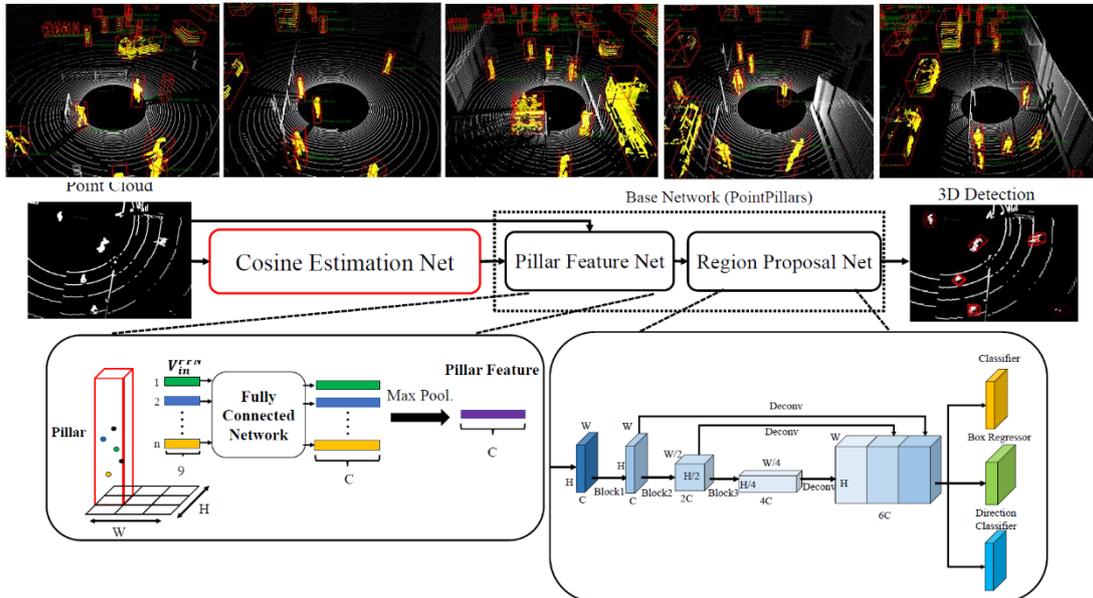
【(5) 歩行者検知および社会性を考慮した経路計画】

市街地等におけるパーソナルモビリティの自律移動のための人検知システムを構築した。道路シーンにおける物体認識研究は盛んに行われているが、電動車椅子の走行環境のような比較的近距离における安定的な人検知は未成熟であった。本年は、シミュレータを利用したパーソナルモビリティのためのデータセット生成、および多様なレーザスキャナで安定して動作する人検知アルゴリズムを開発した。更に、検知された周囲人物の位置・速度を考慮した Social force model に基づき、人混みにおいても他者へ威圧感を与えないような移動経路生成を可能とした。

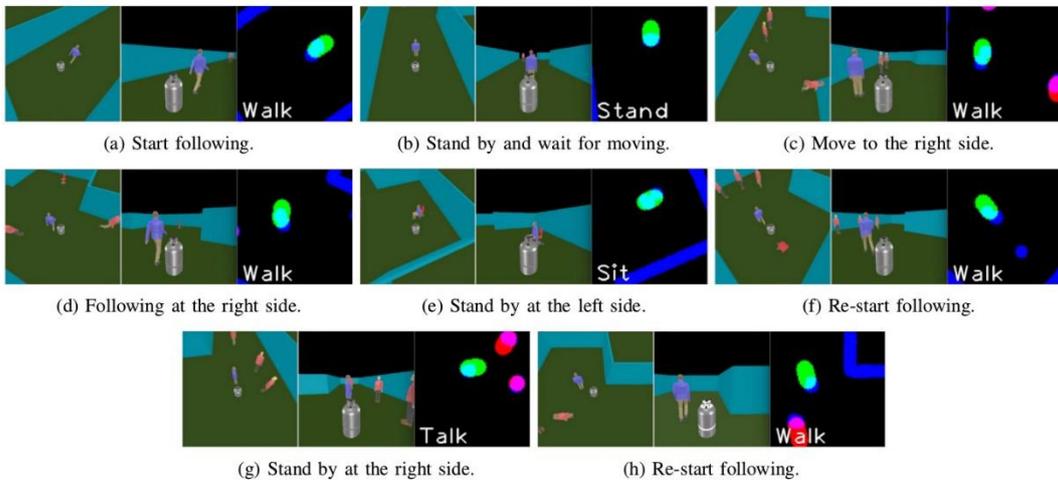
また、Side-by-Side な移動シーンを想定し、対象人物への適応的な付き添い行動の生成手法の開発にも取り組んでいる。まず、対象人物の位置姿勢に基づいて状態を walking, standing,

sitting, talking の4状態に分類し、各状態に対して深層強化学習を用いて事前に訓練された位置取りを行う。深層強化学習には、人物情報付き距離変換局所地図を用いることで効果的な学習を実現し、シミュレーションおよび実環境における実験を介し、提案手法の有効性を示した。

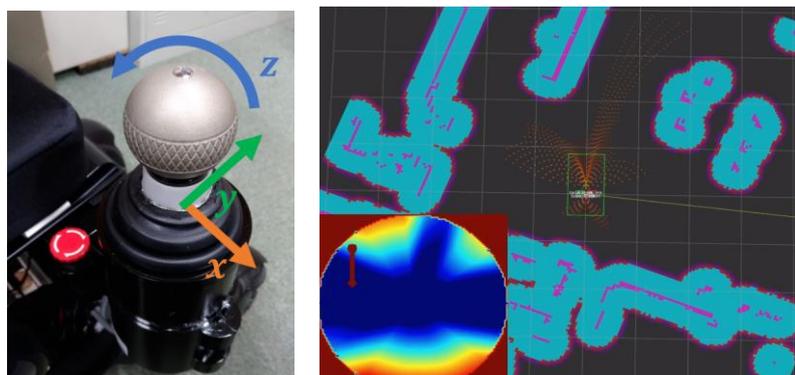
さらに、手動操作時にも安全な移動が可能なよう、力覚提示ジョイスティックを利用した操作支援システムを開発した。具体的には、レーザスキャナやカメラの計測データから複数のコストマップを生成し、合算したコストマップ上でDWAを利用した操作量評価を行うことで、搭乗者のジョイスティック操作に抵抗・誘導の力覚を提示する操作支援システムを実装した。これによりユーザの操作に対する安全性の担保を実現し、またセマンティックな要素を考慮したより高度な操作支援への拡張も期待される。



[歩行者空間におけるシミュレーションデータ生成と人検知ネットワーク構築]



[対象者の状態に応じたポジショニング]



[力覚提示ジョイスティックによるモビリティの手動操作支援]

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3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 Shuji Oishi, Yasunori Kawamata, Masashi Yokozuka, Kenji Koide, Atsuhiko Banno, Jun Miura	4. 巻 5
2. 論文標題 C*: Cross-Modal Simultaneous Tracking and Rendering for 6-DoF Monocular Camera Localization Beyond Modalities	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Robotics and Automation Letters	6. 最初と最後の頁 5229 ~ 5236
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LRA.2020.3007120	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 Kenji Koide, Jun Miura, Masashi Yokozuka, Shuji Oishi, Atuhiko Banno	4. 巻 6
2. 論文標題 Interactive 3D Graph SLAM for Map Correction	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Robotics and Automation Letters	6. 最初と最後の頁 40 ~ 47
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LRA.2020.3028828	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 Oishi Shuji, Inoue Yohei, Miura Jun, Tanaka Shota	4. 巻 112
2. 論文標題 SeqSLAM++: View-based robot localization and navigation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Robotics and Autonomous Systems	6. 最初と最後の頁 13 ~ 21
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.robot.2018.10.014	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18件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 Takahiro Shimizu, Kenji Koide, Shuji Oishi, Masashi Yokozuka, Atsuhiko Banno, Motoki Shino
2. 発表標題 Sensor-independent Pedestrian Detection for Personal Mobility Vehicles in Walking Space Using Dataset Generated by Simulation
3. 学会等名 25th International Conference on Pattern Recognition (ICPR2020) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 清水崇博、小出健司、大石修士、横塚将志、阪野貴彦、小竹元基
2. 発表標題 パーソナルモビリティのためのLIDARの反射強度特性に依存しない歩行者認識手法の提案
3. 学会等名 第26回ロボティクスシンポジア
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 清水崇博、小出健司、大石修士、横塚将志、阪野貴彦、小竹元基
2. 発表標題 周辺歩行者への影響を抑制した自律移動体の経路計画手法の提案
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(SI2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shuji Oishi, Yasunori Kawamata, Masashi Yokozuka, Kenji Koide, Atsuhiko Banno, Jun Miura
2. 発表標題 C*: Cross-Modal Simultaneous Tracking and Rendering for 6-DoF Monocular Camera Localization Beyond Modalities
3. 学会等名 2020 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大石 修士, 川又 康了, 横塚 将志, 小出 健司, 阪野 貴彦, 三浦 純
2. 発表標題 正規化情報距離を用いたマルチモーダルな6自由度単眼カメラ位置同定
3. 学会等名 第25回ロボティクスシンポジア
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 横塚 将志, 小出 健司, 大石 修士, 阪野 貴彦
2. 発表標題 局所正規分布近似ICP の安定化による実時間3D LiDAR-SLAM
3. 学会等名 第25回ロボティクスシンポジア
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小出 健司, 三浦 純, 横塚 将志, 大石 修士, 阪野 貴彦
2. 発表標題 地図修正のためのインタラクティブ3D Graph SLAM
3. 学会等名 第25回ロボティクスシンポジア
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大石 修士, 横塚 将志, 小出 健司, 阪野 貴彦
2. 発表標題 パーソナルモビリティの安全な操作に向けた反力呈示運転支援システム
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス 講演会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大石 修士, 横塚 将志, 阪野 貴彦
2. 発表標題 対称性保持非剛体ICPによる全周形状復元
3. 学会等名 第37回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shuji Oishi, Masashi Yokozuka, Atsuhiko Banno
2. 発表標題 As Symmetric As Possible : Shape Completion with Non-Rigid Registration Leveraging Generalized Cylinder Decomposition
3. 学会等名 2019 IEEE-RAS 19th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yoshiki Kohari Jun Miura Shuji Oishi
2. 発表標題 Generating Adaptive Attending Behaviors using User State Classification and Deep Reinforcement Learning
3. 学会等名 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yoshiki Kohari, Jun Miura, Shuji Oishi
2. 発表標題 CNN-based Human Body Orientation Estimation for Robotic Attendant
3. 学会等名 IAS-15 Workshop on Robot Perception of Humans (RPH2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masashi Yokozuka, Shuji Oishi, Thompson Simon, Atsuhiko Banno
2. 発表標題 VITAMIN-E: Visual Tracking And Mapping with Extremely Dense Feature Points
3. 学会等名 2019 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 横塚 将志, 大石 修士, Thompson Frank Simon, 阪野 貴彦
2. 発表標題 単眼カメラによる密な特徴点追跡及び地図生成
3. 学会等名 第24回ロボティクスシンポジア
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 横塚 将志, 大石 修士, Thompson Frank Simon, 阪野 貴彦
2. 発表標題 一般化ICP とポーズグラフによるオドメトリレス実時間3次元LiDAR SLAM
3. 学会等名 日本ロボット学会学術講演会2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 川又 康了, 大石 修士, 三浦 純
2. 発表標題 反射強度付き3次元地図を用いた単眼カメラの自己位置推定
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 藤本 宥紀, 大石 修士, 三浦 純
2. 発表標題 ステレオカメラによる移動量推定と障害物検出
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 眞野 千輝, 増沢 広朗, 三浦 純, 大石 修士
2. 発表標題 移動ロボットのための深層学習を用いた道路境界推定
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2018
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>第25回ロボティクスシンポジウム優秀賞 <a href="http://www.robotics-symposia.org/">http://www.robotics-symposia.org/</a></p> <p>第26回ロボティクスシンポジウム学生奨励賞 <a href="http://www.robotics-symposia.org/26th/">http://www.robotics-symposia.org/26th/</a></p> <p>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 優秀講演賞 <a href="https://www.sice-si.org/conf/si2020/">https://www.sice-si.org/conf/si2020/</a></p> <p>日本ロボット学会学術講演会 第1回優秀講演賞 <a href="https://www.rsj.or.jp/info/awards/category/yke/">https://www.rsj.or.jp/info/awards/category/yke/</a></p>
---

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