

平成 30 年 5 月 28 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26249029

研究課題名(和文) 高密度レーザスキャナを搭載した群ロボットによるジオメトリビッグデータの取得と活用

研究課題名(英文) Acquisition and application using geometry big data by multiple robots with high-resolution laser scanner

研究代表者

倉爪 亮 (Kurazume, Ryo)

九州大学・システム情報科学研究所・教授

研究者番号：70272672

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 31,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、群ロボットを用いた多地点広域レーザ計測技術と地上固定式高密度レーザスキャナを組み合わせ、数兆個の点群からなるジオメトリビッグデータを自動収集する群ロボットシステムCPS-VIIIを開発した。計測実験の結果、親ロボットの総移動距離270.1mに対する位置誤差は0.023m(距離誤差の0.0085%)であった。また福岡市を対象とした大規模なジオメトリビッグデータの取得を行い、静的高密度および動的低密度のジオメトリビッグデータを取得し、Webで一般公開した。さらに、自動運転車両や移動ロボットのための空間・路面認識手法の開発を行い、CNNを用いた高精度な空間・路面種別の識別手法を開発した。

研究成果の概要(英文)：In this research, we developed a 3D scanning system using multiple robots named CPS-VIII, which combines the laser measurement technique using multiple robots called CPS-SLAM and a high-precision 3D laser scanner. This system is able to acquire geometrical big data consisting of trillions of 3D points. The experimental results showed that the accuracy for CPS-VIII is 0.0085% of the distance traveled, which means the error is 0.0231 m after the robot moved 270.1 m. In addition, we developed large-scale geometrical big data of urban area and surrounding area of Fukuoka city and provided them on the web. Furthermore, we developed space/road categorization techniques for autonomous vehicles and mobile robots, and proposed high precision recognition techniques using convolutional neural networks and the combination of multiple machine learning techniques.

研究分野：ロボット工学

キーワード：知能ロボティクス レーザ計測 ビッグデータ 環境モデリング 空間知能化

1. 研究開始当初の背景

ジオメトリデータとは、土木建築分野では建築物の構造データや地形の形状データを指す。建築物のジオメトリデータは通常、建築系 CAD を用いて設計、製作され、地形データはトランシットやトータルステーションを用いた直接測量により計測される。しかし近年、既存建築物の現況図作成や、地形を離散点でなく連続面として高密度に得たい場合、あるいは災害地や急傾斜地など、直接計測が困難な場所では、レーザスキャナによる計測が行われるようになりつつある。

レーザスキャナによる計測は、静止した 1 点ないしは数点から離散的に行う地上固定式 (3 次元レーザスキャナ) と、航空機や車両にレーザスキャナを搭載し、移動しながら連続的に行う移動式 (航空レーザ測量、モバイルマッピング) に分けられる。地上固定式には 2 軸スキャン機構を有するエリア計測型レーザスキャナが用いられる。この方式では、2~300m 程度の範囲で 1cm 間隔・精度の高密度、高精度な形状データが得られるが、1 視点からの視野範囲は狭く、計測範囲の拡大には基準点やレーザスキャナをその都度人手で移動し、設置、据付調整する必要がある。一方、移動式は 1 軸回転機構を有するライン計測型レーザスキャナにより移動しながら計測を行うもので、数 km の範囲を数 10 分程度で計測できる。しかし、点群密度は地上固定型に比べて低く、一般に 50~60cm 間隔程度である。また精度も移動体の測位精度に依存し、通常用いられる GPS、IMU 併用型では高さ方向に 15cm、水平方向に 0.5~数 m の誤差が生じる。

一方、研究代表者らはこれまで、配膳やモノの受け渡し、付き添いなど、人と共生し実世界で軽作業を行う生活支援ロボットの研究開発を行ってきた。特にサービスを行う環境に多数のセンサを埋め込み、センサ群とロボットを情報ネットワークで結ぶことでロボットの環境適応能力を拡大する「環境情報構造化」を提案し、科学技術振興調整費ロボットタウンの実証的研究 (平成 17~19 年度) や経済産業省次世代ロボット知能化技術開発プロジェクト (平成 19~23 年度) などの先駆的なプロジェクトを通して、環境情報構造化の実証的研究を推進してきた。また、生活支援ロボットが環境内を安全に移動するには正確な環境地図が必要不可欠であることから、これまでに環境計測用レーザスキャナと測量機器 (トータルステーション)、移動ロボットを組み合わせ、作業環境の 3 次元形状地図を自動獲得するシステムを開発している。これは移動ロボットの高精度な位置同定手法である「群ロボットによる協調ポジショニングシステム (CPS)」を利用し、レーザスキャナや測量機器を搭載した親ロボットと、ミラーを搭載した子ロボットが交互に移動、レーザ計測を繰り返すことで、測量精度で広域な 3 次元地図を作成するシステム

である。本システムは、詳細で広域な 3 次元環境地図が半自動的に得られ、これまで太宰府天満宮の 3 次元地図や九州大学構内地図などの獲得に成功している。

2. 研究の目的

構築したシステムは、上述した地上固定式と移動式レーザ計測の両方の特性を併せ持つ。すなわち、地上固定式で用いられるエリア計測型レーザスキャナを搭載した移動可能なロボット群である。このロボット群は親子型であり、親ロボットは 3 次元レーザスキャナとトータルステーション (TS) を、子ロボットは測量用ミラーを搭載している。レーザ計測は、搭載した TS により測量精度で定位された複数地点から行い、計測終了後は親子が TS で相互に位置同定しながら次の計測位置まで移動する。また測位のための測量作業や水準調整などは TS やオートレベルにより自動で行われ、地上固定式レーザスキャナの問題である移動や据付調整の手間は無い。しかし本システムのレーザスキャナは、工業用ライン計測型レーザスキャナと回転テーブルを組み合わせた装置であり、点群密度は 100 cm²/点程度であった。またレーザによる全周計測に 2 分程度の静止が必要で、取得可能な情報も点群のみであり、計測時間、データの多様性 (モダリティ) に課題があった。

そこで、上記システムを土木建築分野で用いられる地上固定式高密度レーザスキャナに置き換え、さらに高速レーザや全方位カメラを搭載すれば、移動式レーザスキャナの機動性と地上固定式の点群密度、精度を兼ね備えた高精細マルチモーダル環境計測システムが実現できる。これにより、例えば屋内であればドアノブの正確な位置形状、コンセントやスイッチの位置、あるいは屋外では走行の妨げとなる小さな段差など、従来システムとは桁違いの超高精細なロボット用地図が取得できる。

さらに計測される点群データ量は、1 回の計測で 20 億点、60 ギガバイト以上であり、移動と計測を自動で繰り返せば数十テラ~ペタバイトのデータが収集できる。これは、数兆~数百兆点の点群データからなるジオメトリ・ビッグデータである。従来のビッグデータ解析では、ジオメトリデータは車載器位置情報からの渋滞予測などで用いられる道路や交差点の位置データであった。一方、本システムでは、例えば小石や樹木の葉、電線、亀裂や陥没など、実物体の一つひとつの位置、形状が、より詳細な点群データとして正確に記録されている。この巨大なビッグデータを研究代表者らの点群処理技術を活用して解析、利用することで、ジオメトリ・ビッグデータは新たな情報資源となる。

そこで本研究では

- ・従来システムを拡張したジオメトリ・ビッグデータが取得可能なハードウェア開発

・環境情報構造化のためのジオメトリ・ビッグデータの記録，処理，伝送手法
 ・ジオメトリ・ビッグデータ・アプリケーションの提案と実証
 を実施し，ジオメトリ・ビッグデータの取得（入口）から加工，応用（出口）まで一連の処理について研究を行った。

3. 研究の方法

本研究は，上記システムと土木建築分野で用いられる地上固定式高密度レーザスキャナを組み合わせた，ペタバイト級のジオメトリ・ビッグデータが取得可能なロボット群の開発と，ジオメトリ・ビッグデータの利活用法の提案を目的とする．そこで以下の4項目を研究目標として選定し，ジオメトリ・ビッグデータの取得（入口）から記録，加工，応用（出口）まで，一連の処理を実現するシステムの開発を行った．

- ①ジオメトリ・ビッグデータ取得のためのハードウェア開発
- ②環境情報構造化のためのジオメトリ・ビッグデータの記録，処理，伝送方法
- ③計測高速化，高精度化，モダリティの向上
- ④ペタバイト級のジオメトリ・ビッグデータを用いたアプリケーションの提案と実証

4. 研究成果

これまでに開発した「群ロボットを用いた多地点広域レーザ計測技術」と地上固定式高密度レーザスキャナを組み合わせ、数兆個の点群からなる巨大なマルチモーダル・ジオメトリデータ（ジオメトリ・ビッグデータ）を自動収集する群ロボットシステム CPS-VIIIを開発した．また見通しの確保や計測精度の低下を防ぎつつ計測を実行する、レーザ観測計画の自動化手法を開発した．屋外環境での計測実験の結果、本システムの計測精度は、親ロボットの総移動距離 270.1m に対して位置誤差が 0.023m、距離に対する誤差の割合が 0.0085%であることが確認された。



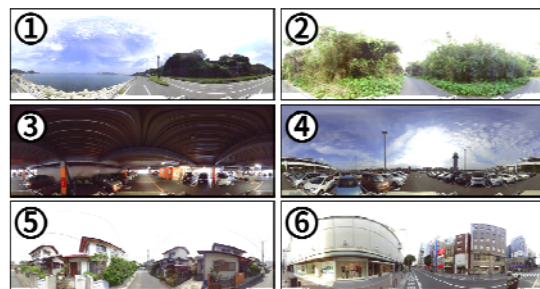
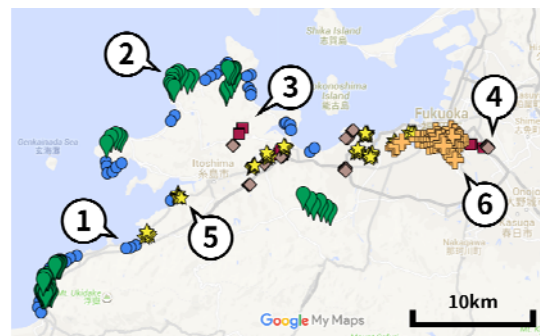
群ロボットシステム CPS-VIII

次に，福岡市都市部および周辺部を対象とした大規模なジオメトリ・ビッグデータの取得を行った．取得した大規模ジオメトリ・ビッグデータは，静的高密度（FARO Focus 3D を使用）および動的低密度（Velodyne HDL-32e を使用）の2種類である．まず，静的高密度ジオメトリ・ビッグデータは，6 カテゴリ（屋



レーザ計測結果の一例（建物）

内駐車場，屋外駐車場，海岸線，森林，住宅街，都市部）からなり，それぞれ7か所の異なる地域から13～17枚の高解像度な全周距離画像，カラー画像，反射率画像を取得した650セットのデータである．一方，動的低解像度ジオメトリ・ビッグデータは，同じく6カテゴリからなり，それぞれ10か所の地域から400～800枚の全周距離画像，カラー画像，反射率画像を取得した，34200セットのデータである．次に，取得した静的解像度および動的解像度の2種類の大規模ジオメトリデータを公開するための専用 Web ページを作成し，外部からダウンロードの要請があれば許可を得て取得できる仕組みを整えた．また主要な国際会議である 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2016)において，このデータベースの詳細と入手方法を発表した．この結果，現在までにフランス，およびオランダの企業から問い合わせがあり，それぞれダウンロードを許可している．



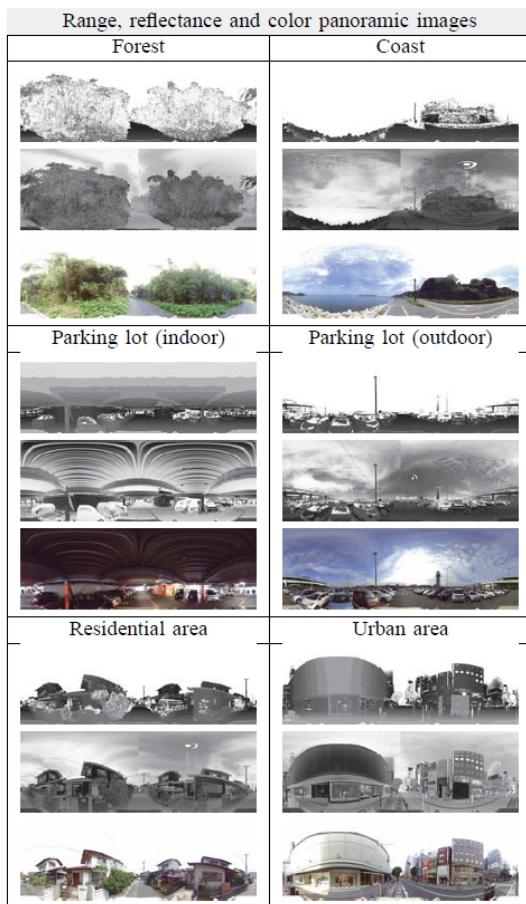
取得したジオメトリ・ビッグデータ

Category	Number of scans by location							Total
	Set1	Set2	Set3	Set4	Set5	Set6	Set7	
Coast	14	14	16	12	17	14	16	103
Forest	16	16	17	18	16	16	17	116
Parking lot (in)	16	16	13	15	17	13	13	105
Parking lot (out)	15	17	16	15	15	14	16	108
Residential area	14	16	14	15	16	15	16	106
Urban area	16	17	16	16	15	16	16	112
Total number of images								650

静的高密度ジオメトリ・ビッグデータ

Category	Number of scans by location										Total
	Set1	Set2	Set3	Set4	Set5	Set6	Set7	Set8	Set9	Set10	
	Coast	511	254	571	221	314	376	872	506	386	
Forest	440	824	980	707	730	720	439	311	797	531	6479
Parking lot (in)	520	357	274	873	583	343	466	592	344	428	4780
Parking lot (out)	874	579	388	370	477	536	581	563	460	617	5445
Residential area	674	787	667	724	563	973	717	720	977	662	7464
Urban area	490	572	587	487	410	566	712	565	606	739	5734
Total scans	3509	3373	3467	3382	3077	3514	3787	3257	3570	3264	34200

動的低密度ジオメトリ・ビッグデータ



動的高密度ジオメトリ・ビッグデータの例
それぞれ上から反射率画像、距離画像、
RGB 画像

またジオメトリ・ビッグデータを用いたアプリケーションとして、リアルタイムで取得される低解像度ジオメトリ・ビッグデータを用いた移動ロボットや自動運転車両のための空間認識手法の開発を行った。開発したシステムは、①空間種別の識別システム、②路

面種別の識別システムの2種類の識別システムである。①については、距離データのみならず、全方位レーザ距離センサから得られる反射率データも用い、深層学習により周囲の空間種別をリアルタイムで識別する手法を新たに開発した。使用したデータ数は34200組であり、識別する空間種別は海岸、森林、屋内駐車場、屋外駐車場、住宅地、市街地の6種類である。実験の結果、距離画像を用いた場合で97.2%、反射強度を用いた場合で95.9%、両者を同時に用い Deep Neural Network で統合した場合で97.9%であり、高精度で空間種別が識別可能であることがわかった。②については、テクスチャ解析のための既存手法である Local Binary Pattern と Support Vector Machine を用いた手法、および深層学習を用いた手法の2種類のシステムを構築した。深層学習で用いた Deep Neural Network は、全結合層2層を含み、全6層からなるニューラルネットワークである。実験の結果、アスファルト、小石、芝生、砂、タイルの5つの異なる路面種別に対して、深層学習を用いた場合で98.2%の精度で路面識別が可能であることが確認された。

またジオメトリ・ビッグデータを用いた屋外での移動ロボットの高速な誘導手法を開発し、実際に屋外での移動実験を行い、ジオメトリ・ビッグデータを用いて実時間で位置同定と誘導が可能であることを確認した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計15件)

① Shuji Oishi, Ryo Kurazume, Manual/Automatic Colorization for Three-Dimensional Geometric Models utilizing Laser Reflectivity, Advanced Robotics, Vol. 28, No. 24, pp. 1617-1635, 2014

②大島 漱一郎, 永倉 翔吾, 鄭 龍振, 岩下 友美, 倉爪 亮, CPS-SLAM による大規模環境のレーザ観測の自動計画手法, 日本ロボット学会誌, Vol. 33, No. 4, pp. 263-274, 2015

③ピョ ユンソク, 辻 徳生, 橋口 優香, 倉爪 亮, 情報構造化環境における没入感 VR インターフェースの開発, 日本ロボット学会誌, Vol. 33, No. 8, pp. 651-654, 2015

④Yoonseok Pyo, Kouhei Nakashima, Shunya Kuwahata, Ryo Kurazume, Tokuo Tsuji, Ken'ichi Morooka, Tsutomu Hasegawa, Service Robot System with an Informationally Structured Environment, Robotics and Autonomous Systems, Vol. 74, No. Part A, pp. 148-165, 2015

⑤Hojung Jung, Oscar Martinez Mozos, Yumi Iwashita, Ryo Kurazume, Local N-ary Patterns: a local multi-modal descriptor

for place categorization, *Advanced Robotics*, Vol. 30, No. 6, pp.402-415, 2016

⑥Ryo Kurazume, Souichiro Oshima, Shingo Nagakura, Yongjin Jeong, Yumi Iwashita, Automatic large-scale three dimensional modeling using cooperative multiple robots, *Computer Vision and Image Understanding*, Vol. 157, pp. 25-42, 2017

⑦Hojung Jung, Ryo Kurazume, Yumi Iwashita, Oscar Martinez Mozos, Two-Dimensional Local Ternary Patterns using Synchronized Images for Outdoor Place Categorization, *IEEE International Conference on Image Processing 2014 (ICIP2014)*, pp. 5726-5730, 2014

⑧Hojung Jung, Oscar Martinez Mozos, Yumi Iwashita, Ryo Kurazume, Indoor Place Categorization using Co-Occurrences of LBPs in Gray and Depth Images from RGB-D Sensors, *Fifth International Conference on Emerging Security Technologies (EST2014)*, pp.40-45, 2014

⑨ Yoonseok Pyo, Tokuo Tsuji, Yuuka Hashiguchi, Ryo Kurazume, Immersive VR Interface for Informationally Structured Environment, *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM2015)*, pp.1766-1771, 2015

⑩ Souichiro Oshima, Shingo Nagakura, Yongjin Jeong, Yumi Iwashita, Ryo Kurazume, Automatic planning of laser measurements for a large-scale environment using CPS-SLAM system, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2015)*, pp.4437-4444, 2015

⑪Hojung Jung, Oscar Martinez Mozos, Yumi Iwashita, Ryo Kurazume, The Outdoor LiDAR Dataset for Semantic Place Labeling, *The 2015 JSME/RMD International Conference on Advanced Mechatronics (ICAM2015)*, pp.154-155, 2015

⑫ Yumi Iwashita, Yuki Takefuji, Ryo Kurazume, Stable aerial image registration for people detection from a low-altitude aerial vehicle, *International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC2016)*, pp.4435-4439, 2016

⑬Hojung Jung, Yuki Oto, Oscar Mozos, Yumi Iwashita, Ryo Kurazume, Multi-modal Panoramic 3D Outdoor Datasets for Place

Categorization, 2016 *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2016)*, pp.4545-4550, 2016

⑭ Yumi Iwashita, Mafune Kakeshita, Hitoshi Sakano, Ryo Kurazume, Making gait recognition robust to speed changes using mutual subspace method, *IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2017)*, pp.2273-2278, 2017

⑮Kazuto Nakashima, Seungwoo Nham, Hojung Jung, Yumi Iwashita, Ryo Kurazume, Oscar Mozos, Recognizing Outdoor Scenes by Convolutional Features of Omni-directional LiDAR Scans, 2017 *IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII2017)*, 2017

[学会発表] (計19件)

①小山 翔平, 岩下 友美, 倉爪 亮, クワッドコプタ搭載LRFと単眼カメラによるBaySACを用いた地表面計測, 第15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 SI2014, pp.1M2-2, 2014.12.15 (優秀論文賞)

②近藤 直明, 大石 修士, 岩下 友美, 倉爪 亮, 3次元空間における物体の形状と見えを記述した特徴量の評価実験, 第32回日本ロボット学会学術講演会, pp.1J1-04, 2014.9.4

③大島 漱一郎, 鄭 龍振, 岩下 友美, 倉爪 亮, 高精度レーザスキャナとクワッドコプタを用いたレーザ計測群ロボットシステムの開発, 第32回日本ロボット学会学術講演会, pp.1J3-03, 2014.9.4

④鄭 好政, 岩下 友美, Oscar Martinez Mozos, 倉爪 亮, 2次元 Local Ternary Patternを用いたレーザスキャナによる屋外種別推定, 第32回日本ロボット学会学術講演会, pp.2J2-02, 2014.9.5

⑤大島 漱一郎, 永倉 翔吾, 岩下 友美, 倉爪 亮, 群ロボットによる大規模環境のレーザ観測の自動計画, 第14回建設ロボットシンポジウム, pp.321-330, 2014.8.28 (第14回建設ロボットシンポジウム優秀論文賞)

⑥近藤 直明, 大石 修士, 岩下 友美, 倉爪 亮, レーザスキャナによる3次元形状と見えに基づくセマンティックラベリング, 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会 2014, pp.1P1-V05, 2014.5.26

⑦鄭 好政, モゾスオスカル マルティネス,

岩下 友美, 倉爪 亮, RGB-D センサによる距離と濃淡画像のLBP共起性を利用した空間識別, 第33回日本ロボット学会学術講演会, pp. 1B2-07, 2015. 9. 3

⑧大音 雄輝, 鄭 好政, 岩下 友美, 倉爪 亮, 全周距離画像を用いた屋外環境の種別推定, 第33回日本ロボット学会学術講演会, pp. 2B1-06, 2015. 9. 3

⑨大島 漱一郎, 岩下 友美, 倉爪 亮, 高性能レーザスキャナを搭載した走行・飛行型群ロボットシステムの開発, 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会 2015, pp. 1A1-I05, 2015. 5. 18

⑩Hojung Jung, Oscar Martinez Mozos, Yumi Iwashita, Ryo Kurazume, Indoor place categorization using co-occurrences of LBPs in gray and depth images from RGB-D sensors, The 11th Joint Workshop on Machine Perception and Robotics (MPR15), pp. 03-08, Fukuoka, 2015. 11. 26

⑪中嶋 一斗, Oscar Martinez Mozos, 倉爪 亮, 全周レーザスキャナを用いた屋外環境の種別推定 -幾何・画像特徴量と Deep Neural Network を用いた識別-, 第22回ロボティクスシンポジウム, pp. 337-342, 2017. 3. 15-16

⑫Seungwoo Nham, Akihiro Kawamura, Ryo Kurazume, Real-time immersive VR system of pedestrian flow for large-scale environment, The 12th Joint Workshop on Machine Perception and Robotics (MPR16), P2-13, Osaka, 2016. 11. 12-13

⑬南 承佑, 河村 晃宏, 倉爪 亮, 広域環境における人流データのリアルタイム没入感可視化システム, 第34回日本ロボット学会学術講演会, pp. 2W2-04, 2016. 9. 8

⑭大音 雄輝, 鄭 好政, 河村 晃宏, 岩下 友美, 倉爪 亮, リアルタイム全方向レーザスキャナを用いた屋外環境の種別推定, 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会 2016, pp. 1A2-18b3, 2016. 6. 9

⑮渡邊 裕太, 重兼 聡夫, 河村 晃宏, 倉爪 亮, 環境埋込センサと計測ロボット群によるパーソナルモビリティの屋内外の誘導, 日本機械学会ロボティクスメカトロニクス講演会 2017, pp. 2P2-H07, 2017. 5. 10-13

⑯中嶋 一斗, 岩下 友美, 河村 晃宏, 倉爪 亮, 第四人称キャプション: 相補性を有する分散視覚を用いたヒト-ロボット共生空間の状況記述, 画像の認識理解シンポジウム (MIRU2017), pp. PS1-38, 2017. 8. 8 (MIRU 学生奨励賞)

⑰呉 桐, 中嶋 一斗, 瀬戸口 直輝, 岩下 友美, 倉爪 亮, 正負フレーム間差分を用いた深層学習による歩容認証, 画像の認識理解シンポジウム (MIRU2017), pp. PS1-19, 2017. 8. 8

⑱中嶋 一斗, 河村 晃宏, 倉爪 亮, マルチモーダル全方位画像の共起性と循環性を考慮した畳込み特徴学習による一般屋外環境識別, 第35回日本ロボット学会学術講演会, 1H2-01, 2017. 9. 12-14

⑲Yuuta Watanabe, Akio Shigekane, Kohei Matsumoto, Yongjin Jung, Kazuto Nakashima, Akihiro Kawamura, Ryo Kurazume, Navigation system of personal mobility in informationally structured/unstructured environments, The 13th Joint Workshop on Machine Perception and Robotics (MPR17), Peking, 2017. 10. 16-17

[その他]

ホームページ等

<http://robotics.ait.kyushu-u.ac.jp/~kurazume/research-j.php?content=laser#101>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

倉爪 亮 (KURAZUME, Ryo)

九州大学・大学院システム情報科学研究
院・教授

研究者番号: 70272672

(2) 研究分担者

中澤 篤志 (NAKAZAWA, Atsushi)

京都大学・大学院情報学研究科・准教授

研究者番号: 20362593

河村 晃宏 (KAWAMURA, Akihiro)

九州大学・大学院システム情報科学研究
院・助教

研究者番号: 60706555

諸岡 健一 (MOROOKA, Ken'ichi)

九州大学・大学院システム情報科学研究
院・准教授

研究者番号: 80323806