

令和 5 年 6 月 21 日現在

機関番号：13904

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K11771

研究課題名（和文）セマンティック情報付加によるクラウド型位置推定システムの高精度・大規模化

研究課題名（英文）Accuracy improvement and scaling-up of cloud-based localization system by appending semantic information

研究代表者

高橋 淳二（TAKAHASHI, Junji）

豊橋技術科学大学・工学（系）研究科（研究院）・准教授

研究者番号：20456685

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）：本研究では、これまでに構築してきたクラウド型位置推定システム（UMap）において、(1)DeepLabV3+を用いたクエリ画像の属性推定、(2)3D-CADレイヤを分けを利用した属性つきDB画像作成、(3)画像の面線属性を考慮した類似度計算式による照合アルゴリズムの開発、(4)アルゴリズムのGPUコンピューティング実装、(5)検証用実データセットの作成と検証、を行った。検証実験の結果、理想属性のクエリ画像で70%ile誤差0.313m、SS属性クエリ画像で70%ile誤差0.413m、属性なしクエリ画像で70%ile誤差9.77mと、提案・開発した手法により精度が大幅に向上することを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

クラウド型位置推定システムは、物理的なインフラを環境に敷くことなく、また、移動体にカメラを搭載するだけで精度のよい位置情報を提供する技術であり、産業圏、生活圏を問わずあらゆる場所の情報化を助ける。今回は、カメラで取得した画像にDeepLabV3+を用いた意味づけを行い、先行開発した幾何学情報による照合処理と統合し、劇的な性能向上を達成した。計算時間やGPUメモリ容量など実用的な要求仕様で実際に利用することができ社会的意義は大きい。移動ロボットAMRの位置推定では、2D-LiDARとホイールオドメトリによる方法が主流となっているなか、本研究では全く別のアプローチをとっており学術的意義も大きい。

研究成果の概要（英文）：In this research, I improved the cloud-based localization system (UMap) that I have developed so far. In particular, I developed (1) Semantic segmentation method for query image using DeepLabV3+, (2) DB-image with attribute information using the layer of 3D-CAD, (3) new matching algorithm considering the attribute on line and surface in the image. I also have implemented them on GPU computing device, and conducted experimental evaluation with real dataset. The results show that 0.313m error at 70%ile, 0.413m error at 70%ile, and 9.77m error at 70%ile, in the case of ideal attribute, SS-attribute, and conventional method, respectively; that the proposed method dramatically improve the performance.

研究分野：ロボティクス

キーワード：セマンティック情報 ワンショット位置推定 属性付きランドマーク 線分属性 面属性 3Dモデルを利用する位置推定 6自由度位置推定

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、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

知能ロボット技術や IoT 技術の発展により、工場や物流倉庫などの生産者サイドで実現されてきた自動化や効率化の技術が生活者サイドへと浸透し、万人の生活の質を向上することが期待されるようになってきた。一方で、人の生活する空間は生産現場のようにロボットや IoT 技術のためのインフラを敷くことが難しく、その結果としてロボット単体でなすべき機能が増加することにより単体価格の高騰や大型化といった傾向や、IoT 技術であれば吸い上げた情報の発生源が不明瞭なことによりデータを十分に活かすことができない、という問題が生じていた。物理的なインフラなしで精度よくリーズナブルに位置推定を行える技術が求められている。

位置推定において、ロボットやデバイスが稼働するエリアで事前にセンシングを行い、データを保存・データベース化することでマップを構成する方法がある。センシングの対象には地磁気や Wi-Fi 信号などもあるが、やはり視覚データと照合可能な事前マップは精度が高く、地理情報 (ジオタグ) を含むデータベース画像からクエリ画像を検索する手法や、高速検索への対応を意図したコンパクトな画像記述子が提案されてきている。しかし、推定精度は 5~10m オーダーで 6 DoF の位置推定はできないという欠点がある。3 次元データを利用するものとして SfM により再構成された 3 次元点群を 3D マップとし、クエリ画像の特徴点と 3 次元点群の対応を PnP 問題として解き位置を推定する手法、高精細 3D レーザ測定器を用いて 3D マップを構成する手法も提案されているが、前者はテクスチャのない箇所では機能せず、後者は計測装置が高額なためシステム全体の費用コストが大きくなるという問題があった。

上記を背景に、提案者は環境に物理的なインフラを設置せず、事前構築した 3D マップとの視覚情報の照合により位置を推定する、サーバ・クライアント型の位置推定技術 (Universal Map: UMap) を開発してきた。実機検証では、条件が整った環境であれば 80%ile 誤差 0.3m という性能であったが、画像の線分という幾何学的な情報のみを利用した照合法であるため、壁の線分とドアの線分との見分けがつかず、まったく異なった位置の DB 画像が最類似画像として検出されてしまう、いわゆる誤マッチングの問題が多発し、位置推定性能が向上しにくいという問題があった。

2. 研究の目的

これまで構築してきた 3D CAD マップにセマンティック情報を付与し、また、画像クエリにセマンティックセグメンテーションをかけることで、幾何学情報とセマンティック情報の両方を利用する超高速 (< 1.0 s) な類似画像検索手法を開発する。

3. 研究の方法

研究目的を達成するために、(1) セマンティック情報を含む 3D マップの作成と DB 画像への属性情報のコーディング、(2) 機械学習手法を用いたクエリ画像の領域分割と線分カテゴリー、(3) 面・線分幾何学情報とメタ情報を利用した類似画像検索手法の開発、(4) 実際の建築物の 3D モデル作成と検証用データの作成、評価実験、を実施する。

4. 研究成果

(1) セマンティック情報を含む 3D マップの作成と DB 画像への属性情報のコーディング

セマンティック情報を含む 3D マップの作成には、3D-CAD 作成時のレイヤ分けをそのまま利用し、レイヤ (属性) ごとの PLY データを出力し、それを Data Base Image Generator (DBIG) で属性ごとに読み込みことにより実現した。その後、属性ごとに PLY ファイルを DBIG に読み込み属性付き DB 画像を生成する。データ容量を抑える観点から従来手法と同じグレースケールで DB 画像を作成することが望ましく、8bit グレースケール画像のピクセル濃度値を表 1 に示すルールで設定することで属性のコーディングを実現した。

表 1 鹿児島大学機械工学 2 号棟をフィールドとした際の各属性の画素値

属性 No.		0	1	2	3	4	5	6	7
属性名		ノイズ	壁	天井	床	ドア	階段	窓	エレベーター
P^D	膨張部	-	18~30	34~46	50~62	66~78	82~94	98~110	114~126
	実線部	-	31	47	63	79	95	111	127
	面	0	16	32	48	64	80	96	112
P^q	線	-	17	33	49	65	81	97	113
	面	0	16	32	48	64	80	96	112
属性 No.		8	9	10	11	12	13	14	15
属性名		非常口マーク	消火栓扉	-	-	-	-	-	-
P^D	膨張部	130~142	146~158	162~174	178~190	194~206	210~222	226~238	242~254
	実線部	143	159	175	191	207	223	239	255
	面	128	144	160	176	192	208	224	240
P^q	線	129	145	161	177	193	209	225	241
	面	128	144	160	176	192	208	224	240

(2) 機械学習手法を用いたクエリ画像の領域分割と線分カテゴリズ

クエリ画像のピクセルの属性(床、壁、天井、ドア、防火扉 etc)を判定する手法として DeepLabv3+ を利用した。モデルの実装・学習には Tensorflow を、ネットワークバックボーンモデルには Xception_65 を使い、学習効率を上げるために PASCAL VOC でタセットにて事前学習済みのモデルにより転移学習を行い、最後に LabelMe で作成した実環境に特化した学習データを用いて学習し、属性判定器を構成した。



図 1 LabelMe を用いた学習データ作成

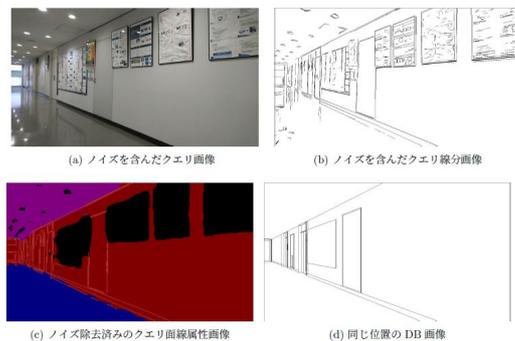


図 2 クエリ画像への属性付与の様子

DeepLabv3+は各ピクセルの属性を出力するものであり、ここからさらに線分を検出して、その線分に対して顕著性に基づいてどちらの属性を設定するかを判定するアルゴリズムを作成した。例えばドアの稜線はドアと壁の間にでてくるが、ドアの方がより出現回数が少ないことから、ドアの稜線の線分属性は“ドア”と設定している。また、斜めの線分に対してはプレゼンハムのアルゴリズムを用いてピクセルの属性を決定した。

(3) 面・線分幾何学情報とメタ情報を利用した類似画像検索手法の開発、

クエリ画像と DB 画像の面属性・線属性を考慮した類似度評価関数を開発した。DB およびクエリ面線属性画像における各ピクセルの属性番号 A と度数 G をそれぞれ次式のように定義する。

$$A_{x,y}^D = P_{x,y}^D / d, \quad A_{x,y}^q = P_{x,y}^q / d \quad (2.5)$$

$$G_{x,y}^D = P_{x,y}^D \bmod d, \quad G_{x,y}^q = P_{x,y}^q \bmod d \quad (2.6)$$

ここ、x, y はピクセルの座標(x, y)を示す。また、度数 G は 0 ならば面、1 ならばクエリ線分、2 ~ d - 2 ならば DB の勾配膨張部分、d - 1 ならば DB 実線部を意味する。線分の類似度と面の類似度をそれぞれ求め、それら 2 つを足し合わせて最終的な類似度を算出する。線類似度 SI と面類似度 Ss をそれぞれ以下の式で定義する。

$$S_l = \frac{\sum_{x,y} \{same(A_{x,y}^D, A_{x,y}^q) * (G_{x,y}^D * G_{x,y}^q) * w_l(A_{x,y}^q)\}}{\sum_{x,y} \{same(G_{x,y}^D, d-1) * w_l(A_{x,y}^D) + G_{x,y}^q * w_l(A_{x,y}^q)\} * (d-1)} \quad (2.7)$$

$$S_s = \frac{\sum_{x,y} same(P_{x,y}^D, P_{x,y}^q) * w_s(A_{x,y}^q)}{\sum_{x,y} \{same(G_{x,y}^q, 0) - same(P_{x,y}^q, 0)\} * w_s(A_{x,y}^q)} \quad (2.8)$$

$$same(a, b) = \begin{cases} 1 & (a = b) \\ 0 & (a \neq b) \end{cases} \quad (2.9)$$

$$S = \alpha S_l + (1 - \alpha) S_s \quad (2.10)$$

ここで、係数 α は S_l と S_s の比率を表し、通常 $\alpha = 0.5$ で設定する。照合の結果、 S が最大となった DB 面線属性画像の位置情報をクエリ画像撮影視点として推定する。

(4) 実際の建築物の3Dモデル作成と検証用データの作成、評価実験

評価実験は、青山学院大学0棟(図3)と鹿児島大学機械工学2号棟(図4)との2か所で実施した。位置推定結果のグラフをそれぞれ図5、6に示す。また、比較のために機械工学2号棟で撮影したクエリ画像の属性なしで照合した場合(図7)と属性ありで照合した場合(図8)を掲載する。

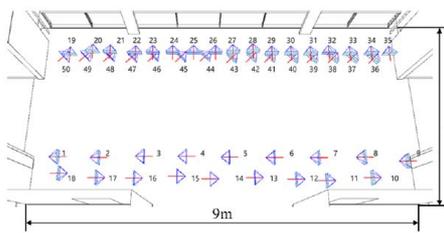


図3 青山学院大学0棟

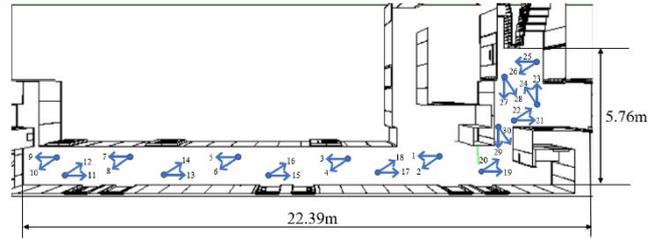


図4 鹿児島大学機械工学2号棟

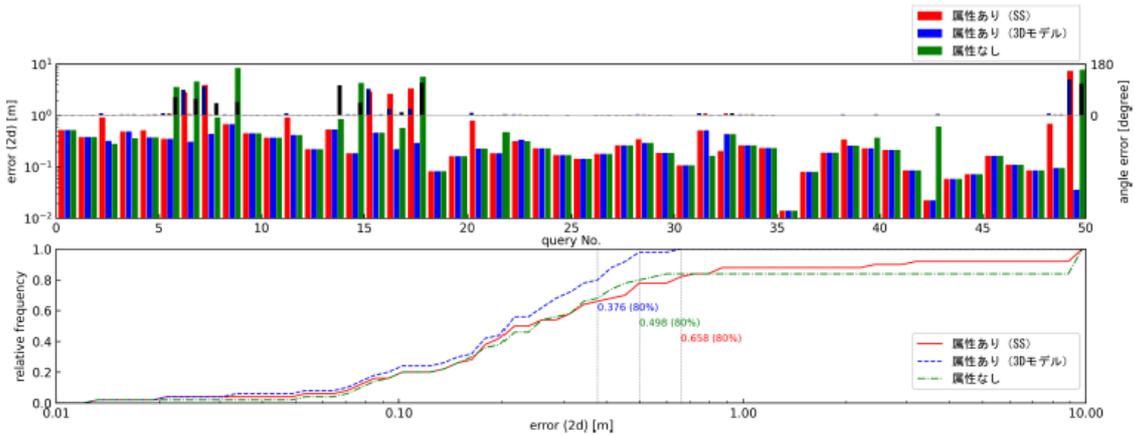


図5 青学0棟における照合手法の違いによる位置推定精度の比較

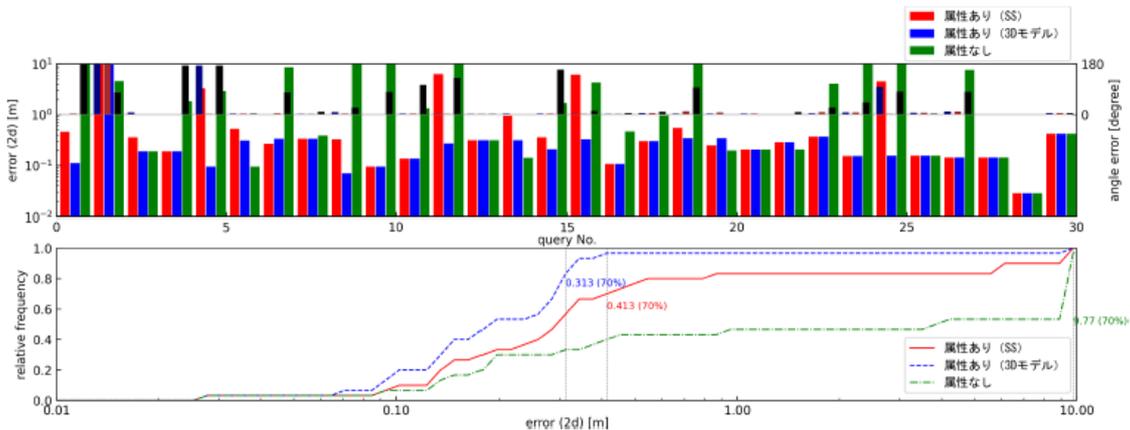


図6 機械工学2号棟における照合手法の違いによる位置推定精度の比較

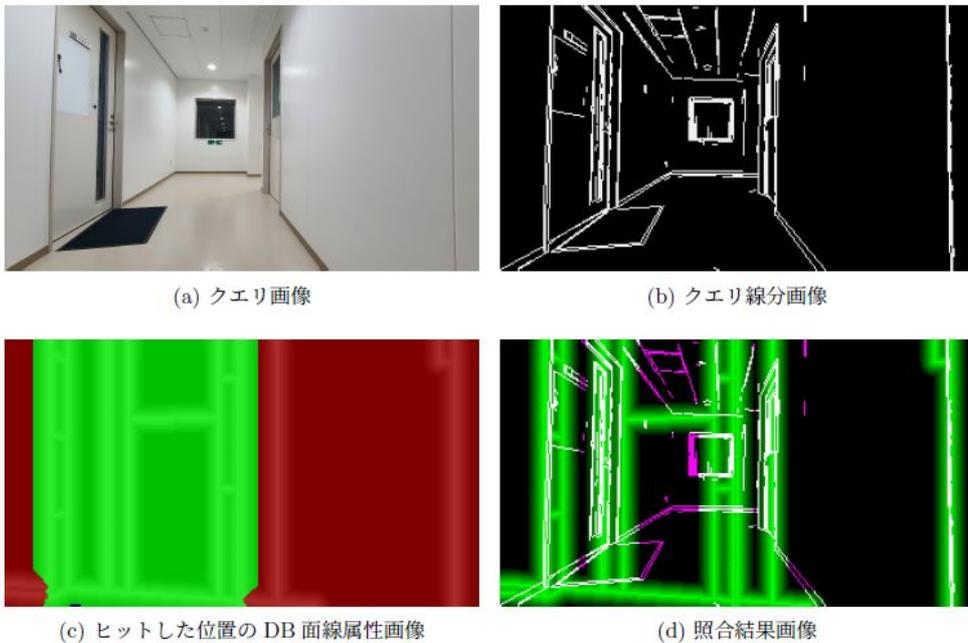


図7 機械2号棟におけるクエリ画像No.7の属性なしでの照合結果

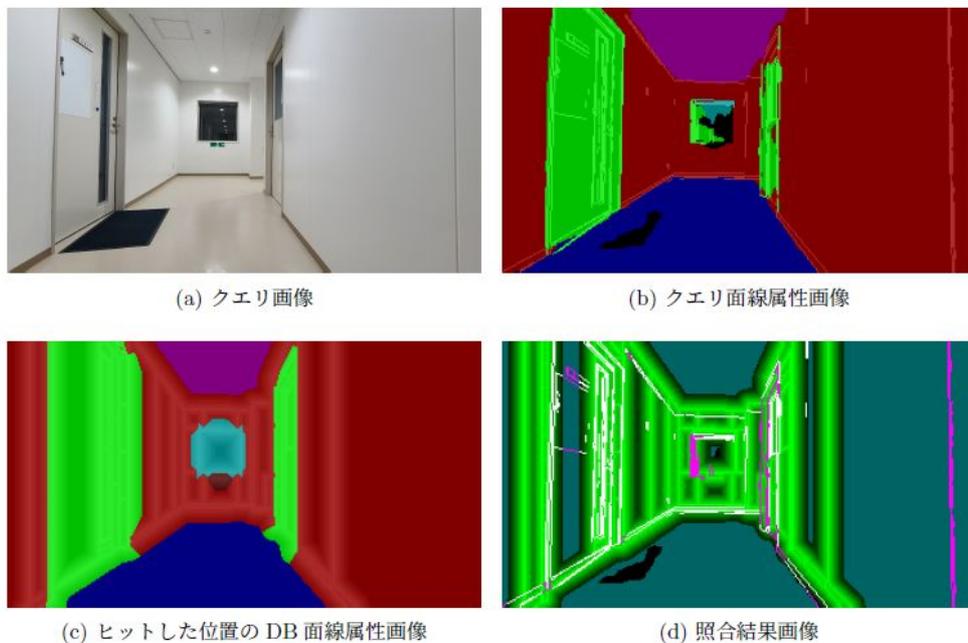


図8 機械2号棟におけるクエリ画像No.7の属性あり(SS)での照合結果

まず、位置推定性能の評価について考察する。青学0棟のデータセットを用いた結果(図5)ではもともとの位置推定精度がよかったためそれほど大きな性能の向上は確認できない。一方、鹿児島大学機械工学2号棟のデータセットを使った実験結果(図6)からは、従来手法に比べて劇的に性能が向上していることを確認できる。属性あり(SS)は、DeepLabv3+を用いた属性推定を用いたもので、属性あり(3Dモデル)は属性推定が100%成功した場合の理想状態での実験結果である。従来手法と属性あり(SS)の比較では、前者が70%ile 誤差9.7mだった位置推定性能は、後者(提案手法)で70%ile 誤差0.41mへと大幅に向上したことが確認できる。

また、撮影地点が同じクエリ画像で属性なし(従来手法)の場合(図7)と属性あり(提案手法)の場合(図8)を比較すると、誤マッチングを回避できていることを確認できる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1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 Junji Takahashi, Kawabe Masato, Seiya Ito, Naoshi Kaneko, Wataro Takahashi, Toshiki Sakamoto, Akihiro Shibata, and Yong Yu	4. 巻 32
2. 論文標題 Image-retrieval Method Using Gradient Dilation Images for Cloud-based Positioning System with 3D Wireframe Map	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Sensors and Materials	6. 最初と最後の頁 611-623
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.18494/SAM.2020.2678	査読の有無 有
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14件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 赤城晃、高橋 淳二、余 永
2. 発表標題 UMapクライアントモジュールを用いた障害物体の常時定位と占有地図の自動更新
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
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山下 和也、高橋 淳二、余 永
2. 発表標題 徘徊者対応のための屋内位置情報共有システム
3. 学会等名 計測自動制御学会 計測部門スマートセンシングシステム部会研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 井手 駿太、高橋 淳二、余 永
2. 発表標題 SLAMにおける誘拐・退化問題へのMapの適用の提案
3. 学会等名 計測自動制御学会 計測部門スマートセンシングシステム部会研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉原 聖人、高橋 淳二、余 永
2. 発表標題 LiDAR点群計測に基づくUMapのための効率的な3Dモデル構築, SICE 計測部門スマートセンシングシステム部会研究発表会
3. 学会等名 計測自動制御学会 計測部門スマートセンシングシステム部会研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中洲賢太郎、高橋淳二、柴田晃宏
2. 発表標題 UMapに供する3Dデータ作成におけるCAD・BIM・LiDARの比較検証
3. 学会等名 第61回 日本建築学会九州支部 研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 平山 遼、高橋 淳二、余 永
2. 発表標題 異種データ間類似度計算に基づく汎用型全地球画像データベースの構築
3. 学会等名 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 森 瑛司、高橋 淳二、余 永
2. 発表標題 意味特徴の利用による画像検索に基づく位置推定手法の精度向上
3. 学会等名 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 渡瀬 渉太、高橋 淳二、余 永
2. 発表標題 セマンティックセグメンテーションに基づく線分の属性判定と画像をクエリとする位置推定手法への応用
3. 学会等名 第37回人間情報学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 井手 駿太、高橋 淳二、松崎 健一郎
2. 発表標題 LiDAR位置推定のUMapの利用による初期位置設定の自動化
3. 学会等名 計測自動制御学会スマートセンシングシステム部会研究発表会2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 占部 俊智、高橋 淳二、松崎 健一郎
2. 発表標題 UMapの可用性調査のための屋内画像の相互類似度評価法
3. 学会等名 計測自動制御学会スマートセンシングシステム部会研究発表会2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大原 功聖、高橋 淳二、松崎 健一郎
2. 発表標題 UMap夜間利用のため移動ロボットカメラ露光調整法
3. 学会等名 計測自動制御学会スマートセンシングシステム部会研究発表会2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 渡瀬 渉太、高橋 淳二
2. 発表標題 事前に用意した属性付きDB画像とクエリ画像の意味推論を用いての画像検索に基づく位置推定
3. 学会等名 第23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 2022年

1. 発表者名 山下 和成、高橋 淳二
2. 発表標題 福祉サービス効率化に向けた複数移動体位置共有システム
3. 学会等名 第23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 2022年

1. 発表者名 安倍 高士、高橋 淳二
2. 発表標題 透視投影モデルに基づいたクエリ派生手法による 定位技術UMapのDB画像削減
3. 学会等名 第23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 2022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
研究分担者	柴田 晃宏 (SHIBATA Akihiro) (10447550)	鹿児島大学・理工学域工学系・准教授 (17701)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究分担者	余 永 (YU Yong) (20284903)	鹿児島大学・理工学域工学系・教授 (17701)	

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