

令和 4 年 6 月 23 日現在

機関番号：33924

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2018～2021

課題番号：18H05897・19K21072

研究課題名（和文）全天候型自動運転のためのミリ波レーダを用いた高精度な環境理解手法の研究

研究課題名（英文）Research of precise environmental perception method using millimeter-wave radar for all-weather autonomous driving

研究代表者

秋田 時彦（Akita, Tokihiko）

豊田工業大学・工学（系）研究科（研究院）・特任上級研究員

研究者番号：20564579

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,300,000円

研究成果の概要（和文）：ミリ波レーダを用いて走行環境を頑健に認識する手法を創出し、その有効性を実環境データにて示した。

双方向LSTMと時系列反射マップを用いて車、自転車、人をレーダ反射信号のみから識別する手法を構築し、各種手法に対してより高精度に識別できることを示した。

市街地の各種駐車シーンにおいて、車やフェンス、縁石などの障害物の種別と形状を推定する独自の深層学習ネットワークを構築し、実環境にて計測したデータを用いて、高精度に推定できることを示した。未学習データに対する汎化性を向上させるため、車両形状知識を用いたモデルとVAEを用いて学習済データを判別する手法を創出し、最大輪郭誤差を抑制できることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ミリ波レーダは、照明や天候など悪環境下で頑健に走行環境認識が可能である。しかし、分解能が低くノイズが多いと言う課題があり、物体の種別識別や形状推定が困難である。独自の深層学習構成を創出してこの課題を改善し、高精度にこれらの機能が実現できることを定量的に示した。

深層学習は、学習データに類似した入力に対しては高精度に認識可能であるが、未学習の入力では認識結果が予想外に逸脱することが課題である。これに対して、未学習データを判定して修正する手法を創出し、大きな誤差を抑制できることを定量的に示した。

上記研究成果は、どのような環境でも高い安全性が要求される自動運転や高度運転支援システムの実現に寄与でき

研究成果の概要（英文）：A robust recognition method of the driving environment using millimeter-wave radar was created, and its effectiveness was shown using real-world data.

Using bidirectional LSTM and time-series reflection maps, we constructed a method to classify cars, bicycles, and pedestrians from radar reflection signals only, and showed that it can classify them with higher accuracy than various other methods.

We constructed an original deep learning network to estimate the type and shape of obstacles such as cars, fences, and curbs in various parking scenes in urban areas, and showed that it can estimate them with high accuracy using data measured in real environments. To improve generalizability to untrained data, we created a method using a model with vehicle shape knowledge and VAE to discriminate trained data, and showed that the maximum outline error can be suppressed.

研究分野：情報科学：自動運転の環境認識

キーワード：ミリ波レーダ 深層学習 LSTM CNN VAE クラス識別 形状推定 駐車

1. 研究開始当初の背景

(1) カメラやLiDAR(レーザレーダ)に比べ、ミリ波レーダは照明や天候などの悪環境下でも周辺障害物の認識性能への影響を受けにくい。これは、どのような環境でも安全性を必要とされる自動運転や高度運転支援システムには必須の要件である。しかし、分解能が低くノイズが乗りやすいと言う課題があり、実現が難しい。特に、ミリ波レーダのみによる物体の種別識別や障害物の形状推定は必要とされる機能であるが、センサ特性から特に難易度の高い問題である。

(2) 深層学習を用いて高精度な環境認識が実現できることが知られているが、ミリ波レーダを用いたこれらの機能実現の研究はまだ十分に行われておらず、その実現精度や課題などが明らかになっていない。

2. 研究の目的

(1) 前述の課題に対して、ミリ波レーダのみによる物体の種別識別や障害物の形状推定を高精度に実現する。

(2) 深層学習を用いたこれらの実現において、達成可能な精度やその課題を明確にし、改善手法を創出する。

3. 研究の方法

物体種別識別及び車両形状推定の深層学習アルゴリズムを創出し、ミリ波レーダシミュレータにより生成した各データセットに対して学習及び評価を行い、アルゴリズムを改良する。その後、実験車にて評価用ミリ波レーダを搭載し、各種正解値生成用センサと共にレーダ反射を市街地にて計測して実環境データセットを生成する。このデータセットを用いて、深層学習アルゴリズムを調整する。

4. 研究成果

3部に分けて成果を報告する。

(1) 移動体の種別識別

ミリ波レーダの反射情報のみから、走行環境に現れる代表的な移動体である車、自転車、歩行者を高精度で識別できることを示した。また、そのための識別器と特徴量を各種比較し、最も高精度な組合せを明らかにした。

76GHz帯の評価用ミリ波レーダを実験車の前方に搭載し、図1のサンプル写真の様に、検出対象の車、自転車、歩行者を同様の10km/h以下の速度でランダムに移動させ、その反射波を計測した。この中の反射強度のピーク位置を中心に矩形領域(2.5×5m)を抽出し、グリッドマップに変換した。連続したフレーム間で対応するグリッドマップを抽出し、連続10フレームのグリッドマップ列を生成し、周辺駐車車両も含め合計11556セットのデータを作成した。このグリッドマップとその位置を特徴量として、識別器により検出対象物の種別を推定した。ここで、特徴量として、グリッドマップをそのまま使った配列、最大反射強度や平均反射強度、周囲長などの10個の形状特徴量に変換した数値列、最大反射強度のみ、の3種類を評価した。識別器は、時系列データの識別に優れるLSTM(Long



図1 自転車評価シーンのサンプル写真

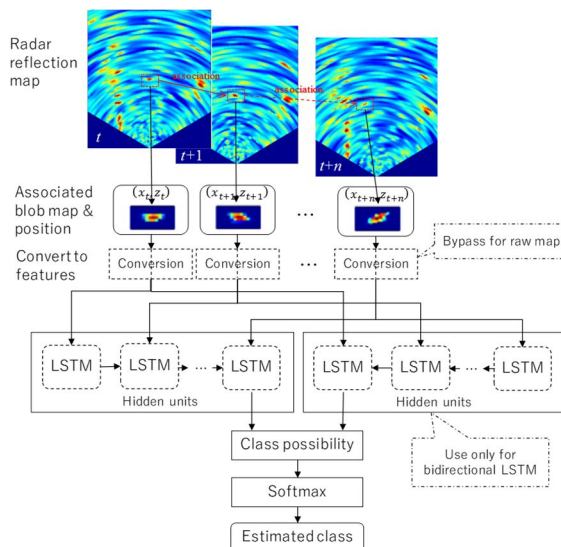


図2 連続ミリ波レーダ反射マップを用いた識別器の構成

表1 識別精度評価結果

特徴量	識別器	精度 (%)
グリッドマップ	双方向 LSTM	97.95
グリッドマップ	LSTM	92.95
形状特徴量	双方向 LSTM	89.36
形状特徴量	LSTM	86.84
最大反射強度	双方向 LSTM	66.11
最大反射強度	LSTM	61.59

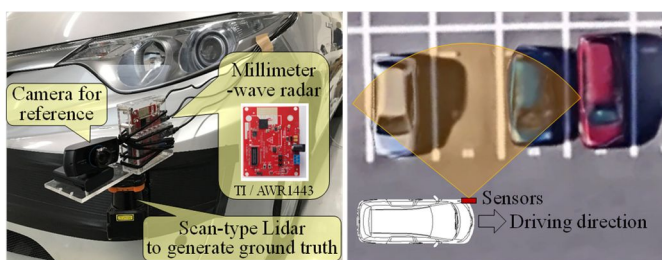
Short Term Memory)と双方向 LSTM を選定した。反射マップからピーク周辺のグリッドマップ抽出、特徴量への変換、LSTM を用いた種別識別の全体構成を図 2 に示す。合計 6 種類の特徴量と識別器の組合せに対して、駐車車両を加えた 4 種類の検出対象物に対する識別精度を定量評価した。表 1 の評価結果に示す通り、グリッドマップと双方向 LSTM の組合せが最も精度が高く、精度 97.85%が得られた。

(2) 駐車シーンにおける障害物形状推定

走行中にミリ波レーダ反射波を蓄積した反射マップから、駐車シーンにおける各種駐車車両、縁石、フェンスなどの障害物の位置と形状を高精度に推定する手法を創出し、実環境にて計測したデータを用いてその精度を示した。また、従来手法との定量比較を行い、より高い精度が実現できることを示した。

この中で、深層学習に重要な、障害物の正解形状を合理的に生成する方法を構築し、形状精度を定量的に評価する指標を創出した。

79GHz 帯のミリ波レーダを図 3 の通り実験車の左コーナーに搭載し、駐車シーンをスキャンして反射波を計測した。図 4 の (b) の駐車シーンに対する 1 回の計測で得られる反射マップを (a) に示す。これを自車の移動量を補正して蓄積し、(c) の蓄積反射マップを得た。



(a)ミリ波レーダ計測システム (b)駐車シーン計測イメージ
図 3 計測システムと駐車シーン計測状況

これに対応した正解形状データを生成するために、同時に計測した LiDAR 点群を同様に蓄積して蓄積点群を得た。図 5 に示す様に、この点群に凸包曲線と矩形を組み合わせて、車両の正解形状を生成した。LiDAR 点群の立体物を除いたミリ波レーダ反射から半自動で低背の縁石の正解形状を生成し、これらを組合せて駐車シーンの障害物正解形状データを生成した。市街地の駐車場や路上駐車シーンを計測し、676 枚のデータを生成した。



(a)レーダ反射強度マップ (b)カメラ画像 (c)蓄積反射マップ
図 4 並列駐車シーンにおけるレーダ反射と対応画像

蓄積反射マップを入力として駐車シーンの障害物正解形状を推定する図 6 に示す 24 層の深層学習ネットワークを試行錯誤により創出した。このネットワークを、生成したデータセットの任意に抽出した 80% のデータで学習し、残りの 20% で評価を行った。



(a)LiDAR 点群からの輪郭推定 (b)生成された車両形状
図 5 並列駐車車両の正解形状生成

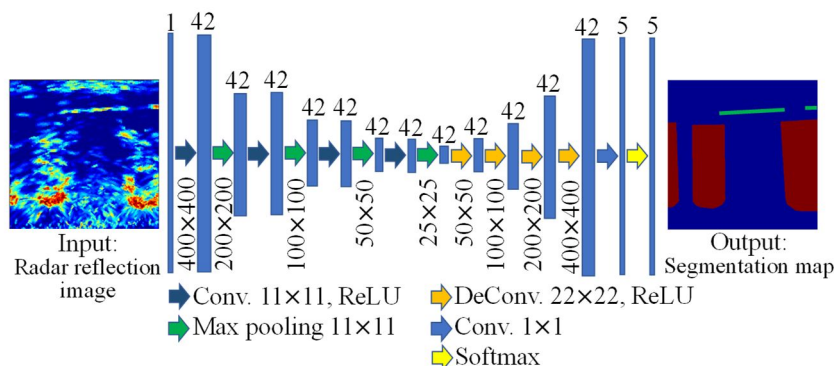


図 6 駐車シーンを推定する深層学習ネットワークの構造

評価指標として、一般的な精度、IoU、BF スコア以外に最大近傍輪郭誤差として図 7 に示すハウスドルフ距離を用いた。

その評価結果を表 2 に示す。従来手法として SegNet と U-Net の評価値と比較した。全ての評価指標において、本手法が最も良好であることを確認した。これらの推定結果のサンプル画像を図 8 に示す。創出手法では正解形状がほぼ崩れることなく推定できているが、従来手法では大きく形状が崩れていることが分かる。これにより創出した手法の優位性を確認でき、駐車シーンにおける障害物の形状推定が高精度に実現できることを示した。

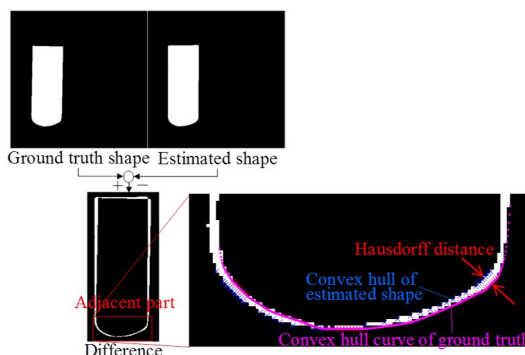


図 7 駐車車両に対する最大近傍輪郭誤差の計算方法

表 2 識別精度評価結果

	精度	IoU	BF スコア	最大近傍輪郭誤差
創出手法	0.9726	0.7441	0.7436	6.9 ± 4.9 cm
SegNet	0.9294	0.5490	0.6280	10.1 ± 6.9 cm*
U-net	0.9356	0.6741	0.6088	15.0 ± 5.6 cm*

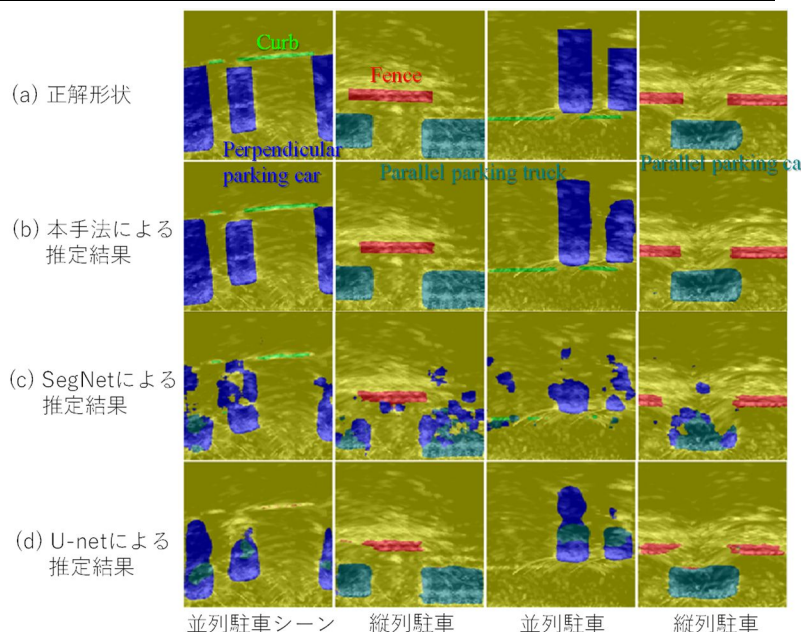


図 8 各種駐車シーンにおける形状推定結果の例

(3) 未学習データに対する誤差低減

実環境では無数のバリエーションがあり、全てのデータを計測することは難しい。深層学習では、未学習データに対して誤差が大きくなる汎化性の課題がある。これに対して、検出対象のモデル知識を組合せることでこの課題を改善できる。この概念図を図 9 に示す。本研究では、深層学習に人の知識や学習データの知識を組合せた。

対象物の車両形状に対し、前面輪郭をベジェ曲線で表し、後部輪郭の矩形輪郭と組合せ、最小の 9 個の形状パラメータで車両形状を表現し、図 10 に示す深層学習ネットワークで推定することで、形状崩壊を抑制する。さらに未学習データに対する推定誤差を抑制するため、図 11 に示す、信頼性を推定して必要に応じて誤差を修正する構成を創出した。これは、学習データ

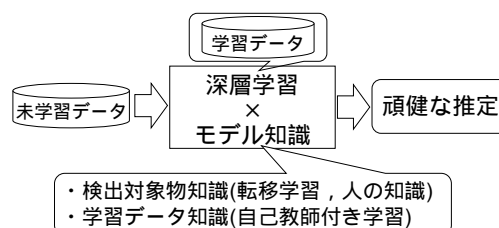


図 9 モデル知識を用いた汎化性の向上

に対しては高精度に推定可能であることを利用している。学習データを生成モデルのVAE(Variational Auto Encoder)を用いて自己教師あり学習を行い、生成誤差の大きい反射マップは未学習データでパラメータ推定の信頼性が低い、つまり誤差が大きい可能性があるとして、一部のパラメータを人手による大きな誤差が発生しないパラメータ推定モデルによる結果に切り替える。これにより、未学習のデータに対しても形状崩壊が生じず、大きな形状推定誤差の無い車両形状推定が実現できる。

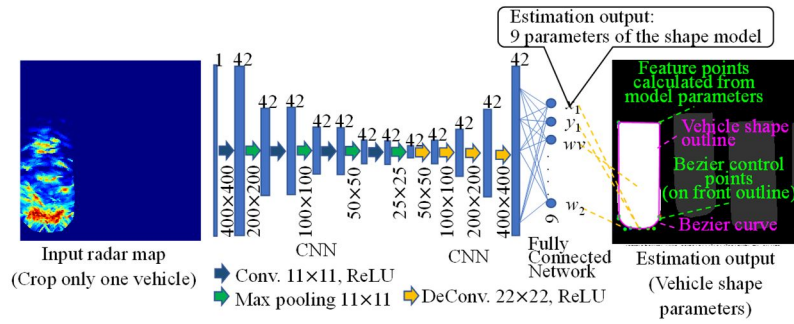


図 10 形状パラメータ推定深層学習ネットワーク

一部のパラメータを人手による大きな誤差が発生しないパラメータ推定モデルによる結果に切り替える。これにより、未学習のデータに対しても形状崩壊が生じず、大きな形状推定誤差の無い車両形状推定が実現できる。

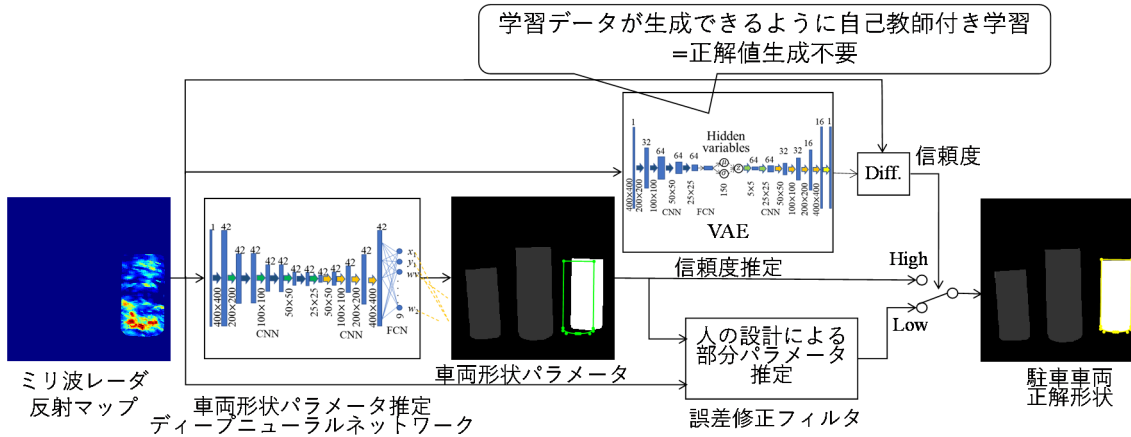


図 11 形状パラメータ推定結果の信頼性推定および誤差修正モデル全体構成

これを実環境にて計測した 754 台の車両データを用いて評価した。任意に抽出した 80%のデータを学習データとして、VAE に学習させ、残りの 20%の評価データで信頼性評価および修正を行った。この信頼度判定による修正結果を表 3 に示す。この評価指標は、最大近傍輪郭誤差の平均、標準偏差、最大値とした。平均は若干低下したが、最大誤差が抑制できた。パラメータ推定誤差が大きかったデータへの修正効果を図 12 に示す。前面の輪郭誤差が修正されて小さくなった。この構成により、汎化性が改善できることを示した。

最大近傍輪郭誤差	平均 ± 標準偏差	最大値
修正前	8.5 ± 5.5 cm	39.0 cm
修正後	10.6 ± 4.6 cm	23.3 cm

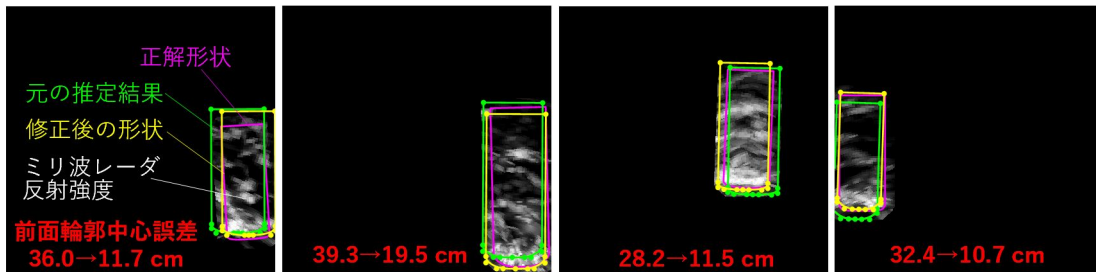


図 12 パラメータ誤差修正効果の例

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2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 秋田 時彦、三田 誠一	4. 巻 52
2. 論文標題 ミリ波レーダによる深層学習を用いた駐車場環境の復元	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 自動車技術会論文集	6. 最初と最後の頁 113 ~ 118
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11351/jsaeronbun.52.113	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 Akita Tokihiko, Kyutoku Haruya, Akamine Yusuke	4. 巻 13
2. 論文標題 Error Correction Method for Untrained Data to Estimate Accurate Parking Vehicle Shape by Millimeter-Wave Radar with Deep Learning	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Journal of Automotive Engineering	6. 最初と最後の頁 97 ~ 102
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20485/jsaeijae.13.2_97	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27件（うち招待講演 13件 / うち国際学会 17件）

1. 発表者名 秋田 時彦
2. 発表標題 IEEE IV21参加報告（環境認識技術に関する調査）
3. 学会等名 IEEE ITSS名古屋チャプタ2021年度第2回講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tokihiko Akita, Haruya Kyutoku, Ukyo Tanikawa, Yusuke Akamine
2. 発表標題 Error Mitigation for Untrained Data in Parking Vehicle Shape Estimation by Deep Learning Using Millimeter-Wave Radar
3. 学会等名 The 6th International Symposium on Future Active Safety Technology toward Zero Accidents (FAST-zero '21) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tokihiko Akita, Haruya Kyutoku, Ukyo Tanikawa, Yusuke Akamine
2. 発表標題 Error mitigation for untrained data utilizing generative model in vehicle shape estimation with millimeter-wave radar by deep neural network
3. 学会等名 The 32nd IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV21) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 秋田 時彦, 久徳 遙矢, 谷川 右京, 赤峰 悠介
2. 発表標題 深層学習を用いたミリ波レーダによる駐車車両形状推定の安定化 - 未学習データに対する推定誤差の抑制 -
3. 学会等名 自動車技術会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 秋田 時彦
2. 発表標題 自動車の環境認識における機械学習, AI技術 - カメラ・ミリ波レーダによる走行環境認識 -
3. 学会等名 日本機械学会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tokihiko Akita
2. 発表標題 Error Reduction for Untrained Data in Vehicle Shape Estimation by Deep Neural Network Using Millimeter-Wave Radar
3. 学会等名 ScaleUp 360° Advanced Driver Assistance Systems Europe (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 秋田時彦
2. 発表標題 自動運転・運転支援のための走行環境認識技術 カメラおよびミリ波レーダによる認識
3. 学会等名 2021年度自動車・モビリティフォトンクス研究会 第2回討論会(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tokihiko Akita
2. 発表標題 Error Reduction for Untrained Data in Vehicle Shape Estimation by Deep Neural Network Using Millimeter-Wave Radar
3. 学会等名 ScaleUp 360° OSS.5 (Functional, operational and System Safety for L5 Autonomous Driving) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tokihiko Akita, Seiichi Mita
2. 発表標題 Driving environment recognition with millimeter - wave radar applying deep neural network - Object classification & tracking including a parking scene reconstruction
3. 学会等名 ScaleUp 360° Automotive AI USA (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tokihiko Akita, Seiichi Mita
2. 発表標題 Driving environment recognition with millimeter - wave radar applying deep neural network - Object classification & tracking including a parking scene reconstruction
3. 学会等名 ScaleUp 360° Automotive AI Europe (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 秋田 時彦
2. 発表標題 IEEE ITSC参加報告（環境認識関連）
3. 学会等名 IEEE ITSS名古屋チャプタ2020年度第2回講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 秋田 時彦, 三田 誠一
2. 発表標題 ミリ波レーダによる深層学習を用いた駐車場環境の復元
3. 学会等名 自動車技術会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 秋田時彦
2. 発表標題 全天候型自動運転のためのミリ波レーダによる深層学習を用いた走行環境認識
3. 学会等名 日本機械学会年次大会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 安藤 璃功, 久徳 遙矢, 道満 恵介, 目加田 慶人, 秋田 時彦
2. 発表標題 ミリ波レーダを用いた自車位置推定に関する初期検討
3. 学会等名 2020年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tokihiko Akita, Seiichi Mita
2. 発表標題 Accurate Parking Scene Reconstruction using High-Resolution Millimeter-Wave Radar
3. 学会等名 The 23rd IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Haruya Kyutoku, Tokihiko Akita, Seiichi Mita
2. 発表標題 Ego-Localization Robust for Illumination Condition Changes Based on Far-Infrared Camera and Millimeter-Wave Radar Fusion
3. 学会等名 The 23rd IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tokihiko Akita, Seiichi Mita
2. 発表標題 Object recognition and tracking utilizing millimeter-wave radar by deep neural networks
3. 学会等名 The GPU Technology Conference (GTC) Silicon Valley (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tokihiko Akita, Seiichi Mita
2. 発表標題 Driving environment recognition with millimeter - wave radar applying deep neural network - Object classification & tracking including a parking scene reconstruction
3. 学会等名 ScaleUp 360 ° Automotive AI USA (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tokihiko Akita, Seiichi Mita
2. 発表標題 Driving environment recognition with millimeter - wave radar applying deep neural network - Object classification & tracking including a parking scene reconstruction
3. 学会等名 ScaleUp 360° Virtual Sensor & Radar Systems Europe (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tokihiko Akita, Seiichi Mita
2. 発表標題 Application of deep learning to environmental recognition with millimeter wave radar - Object classification & tracking and parking scene reconstruction -
3. 学会等名 ScaleUp 360° Automotive Imaging Systems Europe (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tokihiko Akita, Seiichi Mita
2. 発表標題 Parking scene reconstruction by milli-meter-wave radar applying deep neural network
3. 学会等名 The Virtual Sensor Show and Congress (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tokihiko Akita, Seiichi Mita
2. 発表標題 Classification of traffic participants and reconstruction of parking scenes utilizing millimeter-wave radar
3. 学会等名 ScaleUp 360° Auto Vision 2020 digital summit on Sensor Fusion & Computer Vision for L4+ driving (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tokihiko Akita, Seiichi Mita
2. 発表標題 Object Tracking and Classification Using Millimeter-Wave Radar Based on LSTM
3. 学会等名 The 22nd IEEE International Conference on Intelligent Transportation Systems (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tokihiko Akita, Seiichi Mita
2. 発表標題 Classification of Objects in Driving Scenes by Millimeter-wave Radar applying Machine Learning
3. 学会等名 The 5th International Symposium on Future Active Safety Technology toward Zero Accidents (FAST-zero '19) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 秋田時彦, 三田誠一
2. 発表標題 深層学習を用いたミリ波レーダによる物体検出 - 物体種別識別の可能性に関する調査 -
3. 学会等名 自動車技術会春季学術講演会 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 秋田時彦
2. 発表標題 FAST-zero, IEEE ITSC参加報告 (環境認識関連)
3. 学会等名 IEEE ITSS名古屋チャプタ2019年第2回講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 久徳 遙矢, 秋田 時彦, 三田 誠
2. 発表標題 ミリ波レーダによる歩行者識別器の車両周辺環境の違いに応じた信頼度推定に関する初期検討
3. 学会等名 第22回画像の認識・理解シンポジウム(MIRU2019/The 22nd Meeting on Image Recognition and Understanding)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計3件

1. 著者名 秋田時彦, 三田誠一	4. 発行年 2020年
2. 出版社 エヌ・ティー・エス	5. 総ページ数 14
3. 書名 自動運転のための高精度センシング技術	

1. 著者名 秋田時彦, 三田誠一	4. 発行年 2020年
2. 出版社 自動車技術会	5. 総ページ数 6
3. 書名 自動車技術Vol.74 No.10	

1. 著者名 秋田時彦, 三田誠一	4. 発行年 2019年
2. 出版社 技術情報協会	5. 総ページ数 8
3. 書名 車載テクノロジー2019年7月号	

〔産業財産権〕

〔その他〕

豊田工業大学研究者情報システム / 秋田
<https://ttiweb.toyota-ti.ac.jp/public/user.php?s=1&id=5081&t=1>
豊田工業大学 スマートビークル研究センター 研究室情報
<http://ttiweb.toyota-ti.ac.jp/public/labo.php?s=1&id=2474>

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