

低解像度 LIDAR を用いた歩行者検出のための特徴量に関する検討

市川 善規[†] 出口 大輔^{††} 井手 一郎[†] 村瀬 洋[†]

三澤 秀明^{†††} 酒井 映^{†††}

[†] 名古屋大学 大学院情報科学研究科, 〒464-8601 愛知県名古屋市千種区不老町

^{††} 名古屋大学 情報連携統括本部, 〒464-8601 愛知県名古屋市千種区不老町

^{†††} 株式会社デンソー, 〒448-8661 愛知県刈谷市昭和町 1-1

E-mail: [†]ichikaway@murase.m.is.nagoya-u.ac.jp

あらまし 近年、車両の周囲環境を認識するためのセンサとして LIDAR (LIght Detection And Ranging) が注目されており、前方車両への衝突回避等を実現するシステムの実用化が進んでいる。また、このような LIDAR を歩行者検出に利用しようという試みもいくつかなされている。しかしながら、従来研究の多くは高解像度な LIDAR を前提として歩行者検出が行われており、高解像度 LIDAR は高価なことから一般車両への搭載が難しいという問題が存在する。そのため、より安価な低解像度 LIDAR を用いた歩行者検出への期待が高まっている。そこで本報告では、低解像度 LIDAR を用いた歩行者検出の実現を目指し、低解像度 LIDAR に対応可能な特徴量の検討を行ったので報告する。実環境で収集したデータを用いた実験の結果、提案する特徴量を複数組み合わせることで高精度な歩行者検出が可能であることを確認した。

キーワード 歩行者検出, LIDAR, 低解像度

A study on features for pedestrian detection using a low resolution LIDAR

Yoshinori ICHIKAWA[†], Daisuke DEGUCHI^{††}, Ichiro IDE[†], Hiroshi MURASE[†],

Hideaki MISAWA^{†††}, and Utushi SAKAI^{†††}

[†] Graduate School of Information Science, Nagoya University Furo-cho, Chikusa-ku Nagoya-shi, Aichi,
464-8601 Japan

^{††} Information and Communications Headquarters, Nagoya University Furo-cho, Chikusa-ku Nagoya-shi,
Aichi, 464-8601 Japan

^{†††} DENSO CORPORATION, 1-1, Showa-cho, Kariya-shi, Aichi, 448-8661 Japan

E-mail: [†]ichikaway@murase.m.is.nagoya-u.ac.jp

Abstract In recent years, LIDAR (LIght Detection And Ranging) is focused as a sensor for recognizing surrounding environment around the vehicle. It is now used for some commercial products such as collision avoidance systems. In addition, some research groups have tried to use LIDAR for pedestrian detection. However, most of them used high resolution LIDAR for pedestrian detection, and it is quite expensive to be equipped into consumer products. Therefore, demand for pedestrian detection using low resolution LIDAR is increasing. To solve this problem, this report proposes novel features for detecting pedestrians by using low resolution LIDAR. We conducted experiments using data obtained in an actual environment. Experimental results showed that the proposed method could detect pedestrians accurately from low resolution LIDAR data.

Key words Pedestrian detection, LIDAR, low resolution

1. ま え が き

交通事故死亡者数は近年減少傾向にあるものの、依然として年間 4000 人以上が交通事故で亡くなっている [1]。交通事故に占める死亡事故の割合を見ると、人対車両の事故が全体の 3 分の 1 以上を占めている [2]。このような人対車両の事故の低減を目指し、歩行者を検出してドライバーにその存在を警告するシステムに対する需要が高まっている。

近年、上述のようなシステムの研究開発が盛んに行われており、その中でも LIDAR (LIght Detection And Ranging) を用いた車両周囲環境認識の技術が注目されている。LIDAR は対象範囲に LASER 光を照射し、その反射光を解析することで対象までの距離や反射特性を計測するセンサである。このセンサを利用することにより、前方車両への衝突回避や衝突の衝撃緩和を実現するシステムの実用化が進んでいる。一方、このような LIDAR を歩行者検出に利用しようという試みもいくつかなされている [3]~[6]。Premebida ら [3] は、歩行者候補までの距離や計測点の個数といった 15 種類の特徴量を用い、歩行者かどうかを識別する手法を提案している。Navarro-Serment ら [4] は、歩行者候補を構成する点群の分布を正規化ヒストグラムを用いて表現する手法を提案している。ここでは、平面上に投影した歩行者候補点群を歩行者の上半身・右脚・左脚に相当する部分に分類し、各部分に対して共分散行列を求めたものを歩行者識別の特徴量としている。これらの特徴量の計算には高解像度 LIDAR から得られる高密度な歩行者点群データが必要であり、低解像度 LIDAR に対してそのまま適用することはできない。Kidono ら [5] は、遠方の歩行者の検出精度向上を目的とし、スライス特徴量と反射強度の分布を用いた歩行者識別手法を提案している。スライス特徴量は歩行者の全身の大きな形状を表現する特徴量であり、また物質による反射強度の分布の違いを考慮することで誤検出の抑制を行っている。これらの特徴量を用いることにより、文献 [3], [4] よりも低解像度な歩行者を検出することが可能であることを示している。しかしながら、本研究で対象とするような鉛直方向の解像度が数ライン程度の超低解像度 LIDAR においては、歩行者の特徴を適切に捉えることは困難である。

そこで本報告では、鉛直方向の解像度が数ライン程度の超低解像度 LIDAR でも利用可能な特徴量の検討を行った結果を紹介する。以降、2. において本報告で提案する低解像度 LIDAR を用いた歩行者検出手法の詳細を述べる。次に、3. において提案手法の有効性を確認するために行った実験について述べる。そして、4. にて結果について考察を行い、最後に 5. でまとめる。

2. 低解像度 LIDAR を用いた歩行者検出

図 1 に提案手法の処理の流れを示す。提案手法は、(1) 識別器の構築、(2) 歩行者検出、の 2 つの段階に分けられる。前者は事前処理であり、歩行者検出を行う前に一度だけ行う。

識別器の構築では、学習用の歩行者／非歩行者点群を用いて識別器を構築する。学習用点群として、歩行者点群 (Positive Sample) と非歩行者点群 (Negative Sample) を用意する。そ

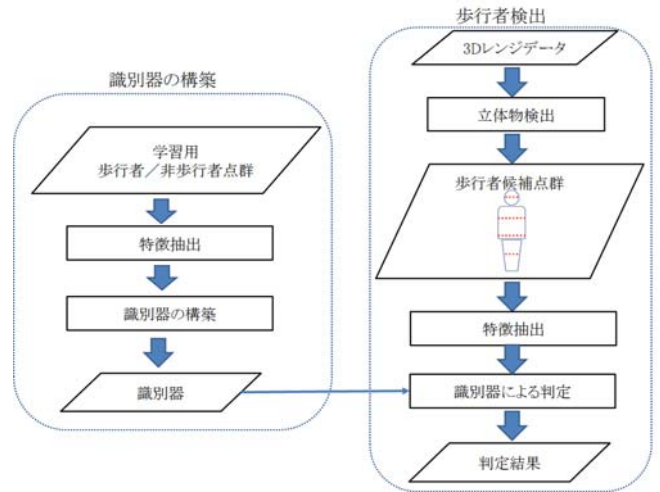


図 1 提案手法の処理手順

して、各点群から形状や反射特性に関する特徴量を抽出し、それらを用いて歩行者かどうかを識別する識別器を構築する。

歩行者検出段階では、LIDAR から取得したデータから歩行者候補点群を抽出し、候補点群が歩行者か否かを判定する。まず、LIDAR から得られる 3D レンジデータに Ogawa ら [7] の立体物検出・追跡アルゴリズムを適用することで、歩行者候補点群を得る。次に、識別器の構築時と同様に各歩行者候補点群から特徴量を抽出する。最後に、その特徴量を識別器に入力することで、歩行者か否かを判定する。以降では、低解像度 LIDAR による歩行者検出のための特徴量と識別器について述べる。

2.1 歩行者候補点群からの特徴量抽出

本節では、歩行者候補点群から抽出する特徴量について述べる。提案手法で用いる特徴量の一覧を表 1 に示す。また、表 1 には物体を捉えた LIDAR のライン数 (以下、構成ライン数と呼ぶ) を n とした場合の特徴量の次元も示している。

本報告では大きく分けて、形状に関する特徴量 ($f_1 \sim f_6$)、構成ラインに関する特徴量 (f_7, f_8)、反射特性に関する特徴量 ($f_9 \sim f_{17}$)、の 3 種類の特徴量を検討する。以下で、各特徴量の具体的な計算手順を述べる。

2.1.1 形状に関する特徴量

a) スライス特徴量 f_1

スライス特徴量は、遠方の低解像度で観測された歩行者の認識精度向上を目的として Kidono らが提案した特徴量である [5]。図 2 に構成ライン数が 3 の場合のスライス特徴量の計算方法を示す。スライス特徴量の計算においては、まず入力点群を道路面に投影し、投影後の点群に対して主成分分析を行う。次に、ライン毎に点群を分割し、各ラインの点群に対して外接矩形を求める。ここで、矩形の各辺を第 1 主軸もしくは第 2 主軸に平行になるようにとる。最後に、得られた矩形の 2 辺の長さを求め、各ラインで得られたものを連結することで 1 つの特徴ベクトルとする。得られる特徴ベクトルの次元は、各物体の点群を構成するライン数によって変化し、構成ライン数が n 本の場合はライン j ($j=1, 2, \dots, n$) から w_{j0}, w_{j1} の 2 つが得られ、全体として $2n$ 次元の特徴ベクトル f_1 が得られる。

表 1 特徴量の一覧と次元数

	特徴量	次元
$\mathbf{f}_1$	スライス特徴量	$2n$
$\mathbf{f}_2$	スライス特徴量の相対位置	$4(n-1)$
$\mathbf{f}_3$	重心の相対位置	$2(n-1)$
$\mathbf{f}_4$	2 次曲線の係数	8
$\mathbf{f}_5$	輪郭長	4
$\mathbf{f}_6$	面積	1
$\mathbf{f}_7$	構成ラインパターン	6
$\mathbf{f}_8$	ライン数及びその平均	2
$\mathbf{f}_9$	正規化反射強度の最大値	1
$\mathbf{f}_{10}$	正規化反射強度の平均	1
$\mathbf{f}_{11}$	正規化反射強度の分散	1
$\mathbf{f}_{12}$	反射強度の最大値	1
$\mathbf{f}_{13}$	反射強度の分散	1
$\mathbf{f}_{14}$	高域パルス幅の最大値	1
$\mathbf{f}_{15}$	高域パルス幅の分散	1
$\mathbf{f}_{16}$	低域パルス幅の最大値	1
$\mathbf{f}_{17}$	低域パルス幅の分散	1

図 2 スライス特徴量 $\mathbf{f}_1$

表 2 ライン数別の歩行者／非歩行者数

ライン数	3	4	5	6
歩行者	1,052	5,138	6,929	8,128
非歩行者	14,191	15,990	15,105	25,204

ネルを用いた。

3. 実験

本節では、提案手法の有効性を確認するために行った実験について述べる。

3.1 実験手順

本実験では 6 ラインの低解像度 LIDAR を用い、実環境でデータ収集を行った。得られたデータに対して Ogawa ら [7] の立体物検出・追跡アルゴリズムを適用し、歩行者と非歩行者が含まれる点群データを手法の入力として用いた。実験に用いたデータをライン数別に集計した結果を表 2 に示す。

歩行者候補点群を構成するライン数毎に分割し、それぞれに対して 5 分割交差検定法により性能を評価した。本実験では、性能の評価指標に AUC (Area Under the Curve) を用いた。

点群を構成するライン数と有効な特徴量の関係を調査するために、変数増加法により有効な特徴量の調査を行った。具体的には、各特徴量のみでの精度評価を行い、最も良い結果が得られた特徴量を選択する。次に、この特徴量に新たに別の特徴量を 1 つ追加し、最も高い性能が得られる特徴量の組み合わせを求める。特徴量を追加しても精度向上が得られなくなるまで、この特徴量を追加する操作を繰り返し行った。

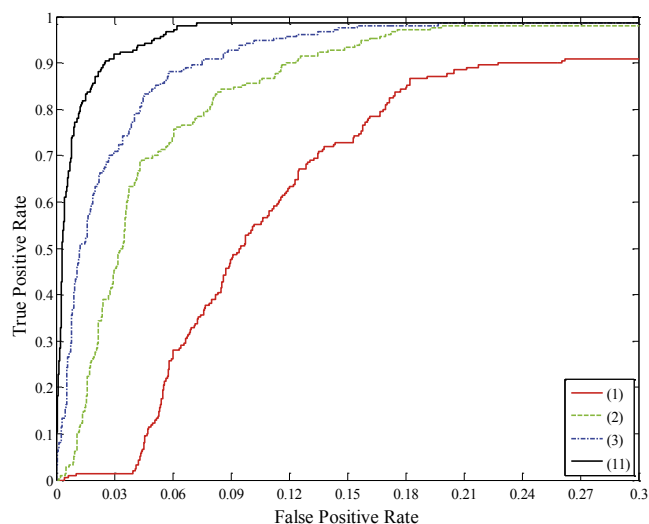
3.2 実験結果

点群を構成するライン数が 3 本、4 本、5 本の場合に変数増加法によって選ばれた特徴量を表 4 に示す。また、対応する ROC 曲線を図 7 に示す。なお、図中の凡例に示している括弧付の数字は表 4 の特徴量の組み合わせを示している。

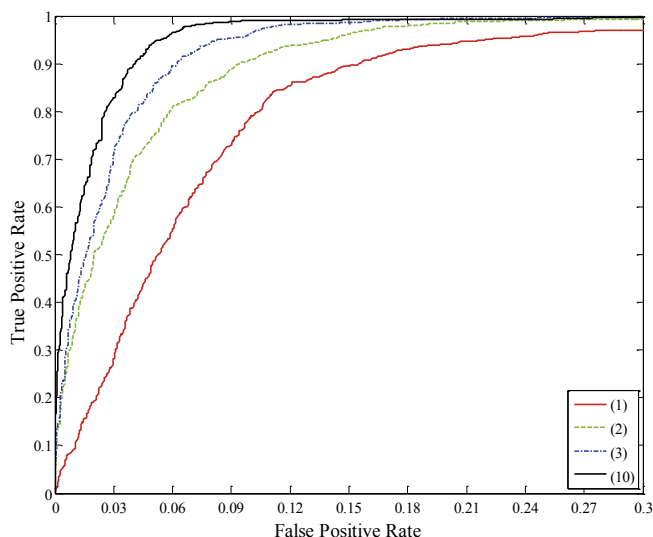
4. 考察

表 4 から分かるように、本報告で検討した特徴量を複数組み合わせることで使用することにより、AUC が 0.983 以上という非常に高い精度が得られることを確認した。また図 7 に示されるように、誤検出 (False Positive) を大幅に削減することも可能であった。これらのことから、本報告で提案した特徴量は低解像度 LIDAR に対して有効に動作することが分かる。

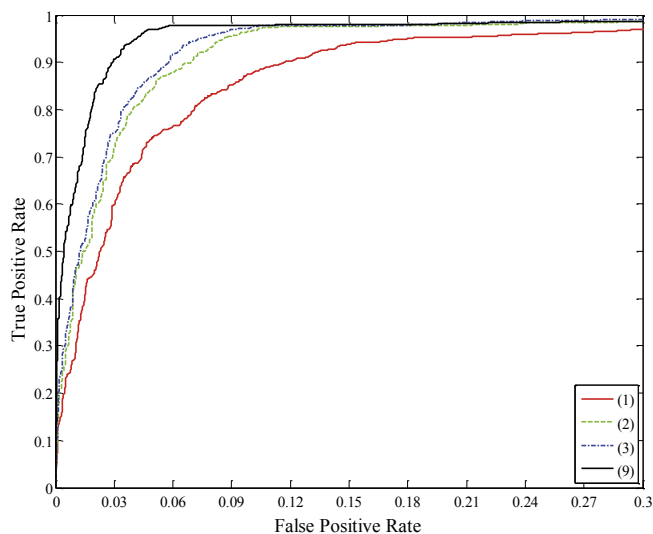
一方、構成ライン数の違いにより、有効な特徴量に違いが見られた。表 3 は変数増加法により選ばれた各構成ライン数における特徴量の順位を示している。表から分かるように、点群を構成するライン数が 3、4 本と少ない場合は輪郭長のような低次元の特徴量が有効であるのに対し、構成ライン数の増加に従ってスライス特徴量やその相対位置といった詳細な形状をとらえる高次元の特徴量が有効であることがわかる。今回の実験では特徴量を逐次的に選択することで変数の組み合わせを調査したが、最適な特徴量の組み合わせが得られていない可能性も存在する。今後は組み合わせの探索方法に関して検討が必要で



(a) 構成ライン数が 3 本の場合



(b) 構成ライン数が 4 本の場合



(c) 構成ライン数が 5 本の場合

図 7 特徴量の組み合わせに対する ROC 曲線

表 3 構成ライン数ごとの有効な特徴量とその順位

順位	3 本	4 本	5 本	6 本
1	正規化反射強度の最大値	輪郭長	スライス特徴量の相対位置	スライス特徴量
2	輪郭長	スライス特徴量の相対位置	構成ラインパターン	重心の相対位置
3	重心の相対位置	反射強度の最大値	面積	反射強度の最大値
4	面積	面積	低域パルス幅の分散	面積
5	正規化反射強度の平均	低域パルス幅の分散	反射強度の最大値	正規化反射強度の平均
6	低域パルス幅の分散	重心の相対位置	スライス特徴量	正規化反射強度の最大値
7	スライス特徴量	構成ラインパターン	重心の相対位置	低域パルス幅の分散
8	構成ラインパターン	正規化反射強度の平均	低域パルス幅の最大値	高域パルス幅の最大値

あろう。

5. む す び

本報告では、低解像度 LIDAR を用いた歩行者検出のための特徴量を検討し結果を紹介した。具体的には、低解像度な歩行者を精度良く検出するために、形状に関する特徴量、構成ラインに関する特徴量、反射特性に関する特徴量、を複数提案した。そして、LIDAR により計測されたデータを構成ライン数毎に分割して識別器を学習し、ライン数別に最適な特徴量を選択することで歩行者検出を行った。実環境で収集したデータを用いた実験により、提案する特徴量を複数用いることで AUC が 0.983 以上となる識別器を構築可能であることを確認した。今後の課題として、時系列情報の利用、大規模なデータを用いた実験、などが挙げられる。

謝辞 日頃より熱心に御討論頂く名古屋大学村瀬研究室 諸氏に深く感謝する。本研究の一部は、科学研究費補助金による。また、本研究では画像処理に MIST ライブラリ (<http://mist.murase.m.is.nagoya-u.ac.jp/>) を使用した。

文 献

- [1] 警視庁, “平成 25 年上半年期の交通死亡事故の特徴及び道路交通法違反取締状況について,” <http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/List.do?lid=000001112442>, Aug. 2013. (2014/9/17 参照)
- [2] 警視庁, “平成 24 年中の交通事故の発生状況,” <http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/List.do?lid=000001108012>, Feb. 2013. (2014/9/17 参照)
- [3] C. Prenebida, O. Ludwig, and U. Nunes, “Exploiting LIDAR-based Features on Pedestrian Detection in Urban Scenarios,” Proc. 12th Int. IEEE Conf. on Intelligent Transportation Systems, pp.1–6, Oct. 2009.
- [4] L. E. Navarro-Serment, C. Mertz, and M. Hebert, “Pedestrian Detection and Tracking Using Three-Dimensional LADAR Data,” Int. Journal of Robotics Research, Vol. 29, No. 12, pp.1516–1528, Oct. 2010.
- [5] K. Kidono, T. Miyasaka, A. Watanabe, T. Naito, and J. Miura, “Pedestrian Recognition Using High-definition LIDAR,” Proc. 2011 Intelligent Vehicles Symposium, pp.405–410, June 2011.
- [6] L. Spinello, M. Luber, and K. O. Arras, “Tracking People in 3D using a Bottom-Up Top-Down Detector,” Proc. 2011 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.1304–1310, May 2011.
- [7] T. Ogawa, H. Sakai, Y. Suzuki, K. Takagi, K. Morikawa, “Pedestrian Detection and Tracking using in-vehicle Lidar for Automotive Application,” Proc. 2011 Intelligent Vehicles Symposium, pp.734–739, June 2011.

表 4 変数増加法によって選ばれた特徴量の組み合わせと精度

(a) 構成ライン数が 3 本の場合

	特徴量	AUC	次元
(1)	正規化反射強度の最大値	0.8645	1
(2)	(1) + 輪郭長	0.9436	5
(3)	(2) + 重心の相対位置	0.9660	9
(4)	(3) + 面積	0.9731	10
(5)	(4) + 正規化反射強度の平均	0.9768	11
(6)	(5) + 低域パルス幅の分散	0.9784	12
(7)	(6) + スライス特徴量	0.9800	18
(8)	(7) + 構成ラインパターン	0.9833	24
(9)	(8) + 反射強度の最大値	0.9836	25
(10)	(9) + 高域パルス幅の最大値	0.9840	26
(11)	(10) + 低域パルス幅の最大値	0.9842	27

(b) 構成ライン数が 4 本の場合

	特徴量	AUC	次元
(1)	輪郭長	0.9201	4
(2)	(1) + スライス特徴量の相対位置	0.9610	16
(3)	(2) + 反射強度の最大値	0.9731	17
(4)	(3) + 面積	0.9772	18
(5)	(4) + 低域パルス幅の分散	0.9804	19
(6)	(5) + 重心の相対位置	0.9814	25
(7)	(6) + 構成ラインパターン	0.9822	31
(8)	(7) + 正規化反射強度の平均	0.9827	32
(9)	(8) + 高域パルス幅の最大値	0.9829	33
(10)	(9) + 正規化反射強度の最大値	0.9831	34

(c) 構成ライン数が 5 本の場合

	特徴量	AUC	次元
(1)	スライス特徴量の相対位置	0.9483	16
(2)	(1) + 構成ラインパターン	0.9701	22
(3)	(2) + 面積	0.9749	23
(4)	(3) + 低域パルス幅の分散	0.9777	24
(5)	(4) + 反射強度の最大値	0.9798	25
(6)	(5) + スライス特徴量	0.9815	35
(7)	(6) + 重心の相対位置	0.9830	43
(8)	(7) + 低域パルス幅の最大値	0.9835	44
(9)	(8) + 正規化反射強度の平均	0.9837	45