

## Active Scan LIDAR を用いた歩行者検出のための効率的スキャン手法

山本 大貴† 新村 文郷† 出口 大輔† 川西 康友† 井手 一郎† 村瀬 洋†  
†名古屋大学

E-mail: yamamotot@murase.m.is.nagoya-u.ac.jp

### Abstract

近年、対歩行者交通事故の削減を目的として、LIDAR (Light Detection And Ranging) を利用した歩行者検出技術への期待が高まっている。交通事故を防ぐためには、近辺から遠方までの歩行者を正確に検出する必要がある。しかし、現在広く用いられている LIDAR は空間的に一定間隔で LASER 光を照射する方式のため、遠方の歩行者から取得できる点群の解像度が低下するという問題がある。

近年、図 1 に示すような、LASER 光の照射方向を瞬時かつ任意方向に制御可能な Active Scan LIDAR の開発が進められており、遠方の歩行者に対しても高密度なスキャンが可能になることが期待されている。しかし、歩行者から効率よく距離データを得るためのスキャン手法については検討されていない。

そこで本発表では、Active Scan LIDAR を用いた歩行者検出の実現に向けて、歩行者の形状に基づいた歩行者尤度推定による効率的なスキャン手法を提案する。

提案手法の有効性を確認するために、KITTI データセット [1] を用いた Active Scan LIDAR のシミュレーション実験を通して手法の性能評価を行った。その結果、観測範囲全体を一樣にスキャンする比較手法と比較し、歩行者を効率的にスキャンできることを確認した。

### 1 はじめに

近年、交通事故による負傷者数および死亡者数はともに減少傾向にあるが、依然として多くの人が亡くなっている [2]。また死亡者数のうち、歩行者が全体の 3 割以上を占めていることから、交通事故による死亡者数をさらに減らすためには、対歩行者事故を減らすことが重要である。そのため、車両周囲に存在する歩行者を検出し、運転者に歩行者の存在を知らせるシステムの開発が求められている。近年、車両周辺環境を認識するための車載センサとして LIDAR が注目されており、歩行者検出に利用する試みも広く行われている [3, 4, 5]。現在広く用いられている LIDAR は、鉛直方向に複数

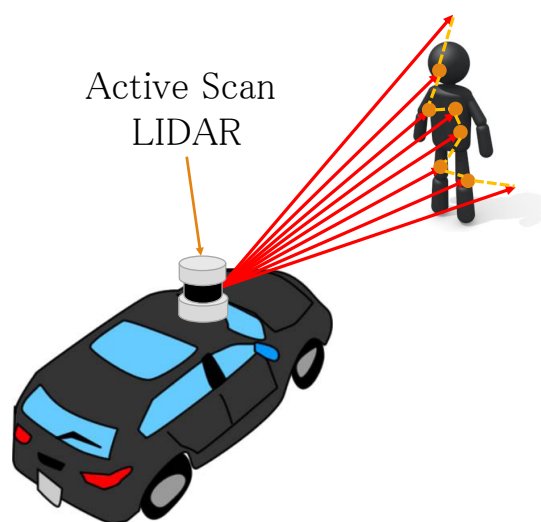


図 1 Active Scan LIDAR による点群スキャンの概要。

の LASER 光照射口を持ち、センサを水平方向に回転させながら LASER 光を照射することで 3 次元データを取得する。LASER 光照射口の数に基づき LIDAR を分類すると、照射口の数が多い高解像度 LIDAR と、少ない低解像度 LIDAR に分類される。

Kidono ら [3] は、高解像度 LIDAR を用いて、比較的遠方の歩行者でも検出可能なスライス特徴量と反射強度の分布に関する特徴量を組み合わせた歩行者識別手法を提案している。スライス特徴量は、LIDAR により計測された 3 次元点群を高さ毎にスライス状に分割し、分割した点群の形状の組み合わせにより歩行者の全身形状を表現する特徴量である。また、反射強度の分布に関する特徴量は、物質毎に反射強度の分布が異なるという性質に基づいて、非歩行者の誤検出を削減するために用いられている。これらの特徴量は比較的遠方の対象に対しても特徴をとらえることが可能であることから、これら 2 つの特徴を組み合わせることで、比較的遠方の歩行者に対しても検出精度を向上させることに成功している。しかし、さらに遠方のより低解像度に観測される歩行者については、各特徴量が歩行者を適切に表現できないため、依然として検出精度が低い。

一方、建部ら [4] は、低解像度 LIDAR を用いて、複

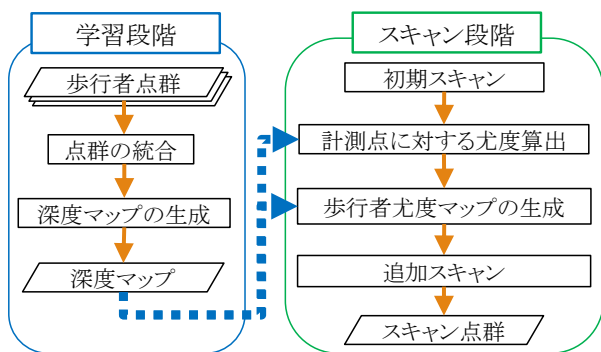


図 2 提案手法の処理手順 .

数の時刻に観測された同一対象物の点群を統合して用いる複数フレーム特徴量により、低解像度で観測された歩行者の検出率向上を図っている。この手法では、複数フレームの統合により点群の解像度を高めるとともに、フレーム間における特徴の時間変化を表現することで、低解像度で観測された歩行者の検出精度向上に成功している。しかし、歩行者が低解像度で観測されるほど検出精度が低下する傾向が見られるため、この手法でも点群データは可能な限り高解像度であることが望ましい。

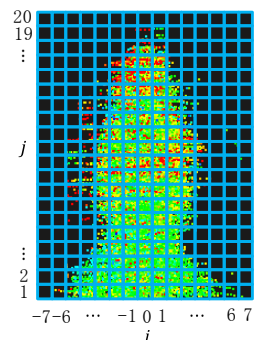
近年、LASER 光の照射方向を瞬時かつ任意方向に制御可能な Active Scan LIDAR (図 1) の開発が進められており、遠方の歩行者に対しても局所的に高密度なスキャンが可能になることが期待されている。しかし、歩行者から効率よく(少ない LASER 光の照射数で歩行者の体全体から)距離データを得るためのスキャン手法は、いまだ確立されていない。そこで本発表では、Active Scan LIDAR を用いた歩行者検出の実現に向けた効率的なスキャン手法の実現を提案する。少ない LASER 光の照射数で歩行者をスキャンするためには、計測した点の中から、最も歩行者らしい計測点付近にスキャンを集中させればよい。そのため、粗な点群から歩行者が存在する可能性が高い位置を推定し、その歩行者尤度に基づいてスキャン位置を決定するスキャン手法を提案する。

## 2 歩行者尤度に基づくスキャン手法

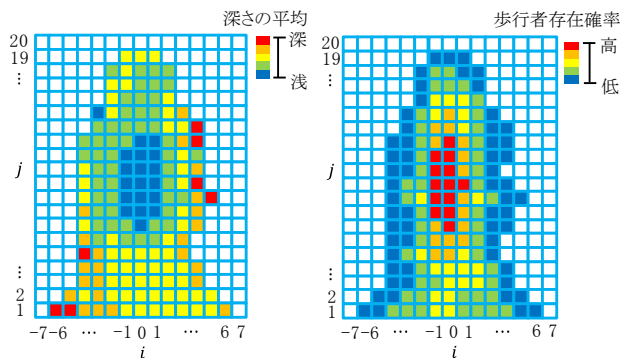
図 2 に提案手法の処理手順を示す。提案手法は、事前に歩行者点群から深度マップを生成する学習段階と、Active Scan LIDAR により歩行者を効率的に計測するスキャン段階の 2 段階から構成される。

### 2.1 学習段階

学習段階では、歩行者の形状および歩行者存在確率を表現するための深度マップを生成する。事前処理として、従来の高解像度な一様スキャン型 LIDAR を用いて歩行者を高密度にスキャンし、多数の歩行者点群を



(a) 領域分割 .



(b) 歩行者形状 .

(c) 歩行者存在確率 .

図 3 深度マップの生成 .

用意する。ここで、LIDAR により取得される 3 次元点群の座標系については、LIDAR の中心を原点とし、車両の進行方向に対して左右方向を  $x$  軸、鉛直方向を  $y$  軸、前後方向を  $z$  軸と定める。

まずはじめに、歩行者点群の統合を行う。ここでは、各歩行者点群内の鉛直方向 ( $y$  軸) に関して最も値が小さい点を  $y = 0$ 、奥行き方向 ( $z$  軸) において最も値が小さい点を  $z = 0$  とし、歩行者点群全体を平行移動することで歩行者位置の正規化を行う。次に、正規化歩行者点群に対し、 $x$  軸方向に 150 cm、 $y$  軸方向に 200 cm の領域に含まれる点を抽出する。最後に、これらを重ね合わせることで歩行者点群を統合する。

次に、統合した歩行者点群を用いて深度マップを生成する。図 3 に深度マップ生成の様子を示す。まず、統合した歩行者点群の領域を  $x$  軸方向に 15 分割、 $y$  軸方向に 20 分割し、局所領域  $(i, j)$  ( $i = -7, -6, \dots, 6, 7$ ,  $j = 1, 2, \dots, 20$ ) を得る。ここで、 $i, j$  は各局所領域の位置を表す。また、各局所領域の大きさは  $W = 10$  cm 四方とする。次に、各局所領域に属する点の深さの平均  $d_{i,j}$  と含まれる点の数  $n_{i,j}$  を求める。ただし、 $n_{i,j} < 10$  の場合は信頼度が低いと考え、「深さ情報なし」として扱い、 $d_{i,j} = \infty$ ,  $n_{i,j} = 0$  とする。全局所領域について  $d_{i,j}, n_{i,j}$  を算出した後、式 (1) により各局所領域の歩行者存在確率  $l_{i,j}$  を求める。

$$\ell_{i,j} = \begin{cases} \frac{n_{i,j}}{\sum_{k,\ell} n_{k,\ell}} & \text{if } n_{i,j} \geq 10 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

そして,  $d_{i,j}$  と  $\ell_{i,j}$  を各局所領域の特徴量とする. このようにして, 歩行者の形状と各局所領域の歩行者存在確率を表現する深度マップを生成する.

## 2.2 スキャン段階

本節では, Active Scan LIDAR を用いて, 学習段階において生成した深度マップにより歩行者のスキャンを行うスキャン段階の処理について述べる. スキャン段階は以下の4つの処理から構成される.

- 処理1: 初期スキャン
- 処理2: 深度マップを利用した歩行者尤度の算出
- 処理3: 歩行者尤度マップの生成
- 処理4: 歩行者尤度マップに基づく追加スキャン
- 処理5: 処理2, 3, 4の繰り返し

まず, 2.2.1 で初期スキャンについて述べる. 次に, 2.2.2 で深度マップを利用した歩行者尤度算出と歩行者尤度マップの生成について述べる. 最後に, 2.2.3 で歩行者尤度マップに基づく追加スキャンについて述べる.

以下の説明では, 初期スキャンにより計測された点の集合を  $\mathcal{P}_0$ ,  $m$  回目の追加スキャンにより計測された点の集合を  $\mathcal{P}_m$  ( $m = 1, 2, \dots$ ) とする. また,  $m$  回目のスキャンまでに得られたすべての計測点の集合を  $\mathcal{S}_m = \mathcal{P}_0 \cup \mathcal{P}_1 \cup \dots \cup \mathcal{P}_m$  とする.

### 2.2.1 初期スキャン

本節では, スキャン段階の最初の処理である初期スキャンについて述べる. 初期スキャンの目的は, 少数の LASER 光で歩行者を見つけ, 歩行者のおおまかな形状をスキャンすることである. 具体的には, 高さ  $h$  の位置で水平方向に一定間隔で  $N$  本の LASER 光を照射する. これにより, 高さ  $h$  の位置については水平方向に比較的高密度な点群を得る.

### 2.2.2 歩行者尤度算出および歩行者尤度マップの生成

本節では, 追加スキャン範囲を決定する際に用いる歩行者尤度の算出と歩行者尤度マップの生成方法について述べる.

まず,  $m$  ( $= 0, 1, 2, \dots$ ) 回目のスキャンにおいて, 得られる計測点  $p \in \mathcal{P}_m$  を考える. ここで, その要素を  $p = (p_x, p_y, p_z)$  と表す.

次に, 深度マップ上において  $p$  が含まれる局所領域  $(0, \hat{j})$  を求める.  $\hat{j}$  は  $p_y$  を用いて式 (2) のように計算される.

$$\hat{j} = \left\lfloor \frac{p_y}{W} \right\rfloor \quad (2)$$

ただし,  $\lfloor \cdot \rfloor$  は床関数を表し, 整数全体の集合を  $\mathbb{Z}$  とすると, 式 (3) により定義される.

$$\lfloor x \rfloor = \max\{n \mid \forall n \in \mathbb{Z}, n \leq x\} \quad (3)$$

また,  $p$  に対する周囲点の集合  $\mathcal{N}(p)$  を次式 (4) により求める.

$$\mathcal{N}(p) = \{q \mid q \in \mathcal{S}_m, \begin{aligned} &|q_x - p_x| \leq 75, \\ &0 \leq q_y \leq 200, \\ &|q_z - p_z| \leq 100 \end{aligned}\} \quad (4)$$

また式 (5) と式 (6) により,  $p$  の周囲に存在する点  $q$  が属する局所領域  $(i, j)$  を求める.

$$i = \left\lfloor \frac{q_x - p_x}{W} \right\rfloor \quad (5)$$

$$j = \left\lfloor \frac{q_y}{W} \right\rfloor \quad (6)$$

次に,  $p$  に対する全周囲点  $q$  を基に  $p$  における歩行者尤度  $f(p)$  を式 (7) により算出する.

$$f(p) = \frac{1}{|\mathcal{N}(p)|} \sum_{q \in \mathcal{N}(p)} g(p, q) \quad (7)$$

ただし,  $|\mathcal{N}(p)|$  は  $\mathcal{N}(p)$  の要素数を表す. また,  $g(p, q)$  は, 局所領域  $(0, \hat{j})$  と  $(i, j)$  の深さの値をそれぞれ  $d_{0, \hat{j}}$ ,  $d_{i, j}$  とすると, 平均を  $\mu = d_{i, j} - d_{0, \hat{j}}$ , 分散を  $\sigma^2$  とした正規分布を用いることで, 式 (8) により計算される.

$$g(p, q) = \begin{cases} \exp\left(-\frac{((q_z - p_z) - \mu)^2}{2\sigma^2}\right) & \text{if } d_{0, \hat{j}} \neq \infty \text{ and } d_{i, j} \neq \infty \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

以上の処理を,  $\mathcal{P}_m$  に含まれる全ての計測点に適用した後, 各計測点  $p$  の正規化歩行者尤度  $F(p)$  を算出する.

$$F(p) = \frac{f(p)}{\sum_{p \in \mathcal{P}_m} f(p)} \quad (9)$$

図 3(c) に示した深度マップに対して式 (9) の値で重み付けしたものを重ね合わせることで, 歩行者尤度マップを生成する. なお, 歩行者尤度マップはセルに分割されており, 各セルは1度単位で表現される.

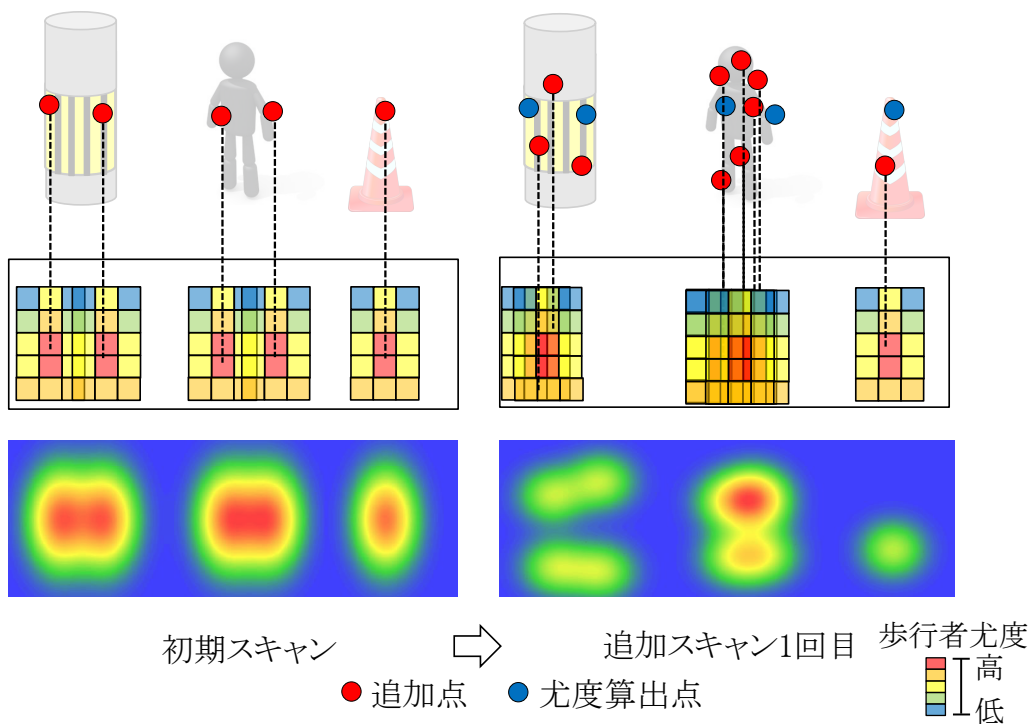


図 4 追加スキャンによる計測点と歩行者尤度マップの変化。

### 2.2.3 歩行者尤度マップに基づく追加スキャン

本節では、歩行者尤度マップに基づく追加スキャンの手順について述べる。以下では、説明の簡略化のため、1本のLASER光の追加照射位置を決定する方法についてのみ述べる。まず、歩行者尤度マップの各セルの重みに従って、追加スキャン位置を表すセルを確率的に選択する。次に、選択したセルの中心に対応するようにLASER光を照射する。

上記の処理を  $N$  回繰り返すことで、1回分の追加スキャンを行う。これにより、図4に示すように歩行者尤度マップを更新しながら、点群を逐次増やすことができる。

## 3 実験

2節で提案したActive Scan LIDARを用いた歩行者検出のための効率的なスキャン手法の有効性を確認するために行った評価実験について述べる。

### 3.1 データセット

現在、動的にスキャン位置を制御可能なActive Scan LIDARはまだ開発中のため、高解像度の一樣スキャン型LIDARにより取得された点群データを利用し、Active Scan LIDARの機能を模擬した。具体的には、KITTI公開データセット [1]に含まれる高解像度LIDAR (Velodyne LiDAR) の3次元点群データを用いて、データセットを生成した。このデータは、歩行者や他の車両などが存在する自車両の周囲をLIDARにより計測し

表 1 歩行者までの距離別の点群データ数

距離	データ数
0 m - 10 m	334
10 m - 20 m	172
20 m - 30 m	94
計	600

た点群データである。本実験では、KITTI公開データセットから車両前方30m以内に存在する歩行者(遮蔽なし)を1人含む点群データを選択し、車両前方の点群データを切り出したものをデータセットとした。なお、歩行者が存在する領域には歩行者ラベルが付与されている。表1にデータセットに含まれる点群を歩行者までの距離別に集計した結果を示す。

### 3.2 実験方法

3.1項で紹介したデータセットを利用し、Active Scan LIDARを模したスキャン実験を行った。本実験では、2節で説明した提案手法と、観測範囲全体に一樣スキャンを反復する比較手法を適用した。1回のスキャンで照射するLASER光の照射数は  $N = 100$ ,  $N = 200$  の2つの値を用い、初期スキャンも含めて、 $N = 100$  においては10回、 $N = 200$  においては5回のスキャンを行い、LASER光総照射数を  $N_{\max} = 1,000$  とした。また、提案手法における初期スキャンの高さは、地面を基準として  $h = 100$  cm とした。また、式(8)において、 $\sigma = 5$  cm とした。

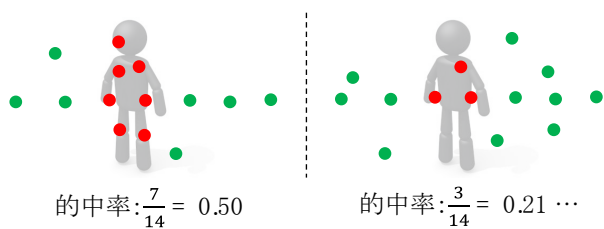


図 5 的中率の概念 .

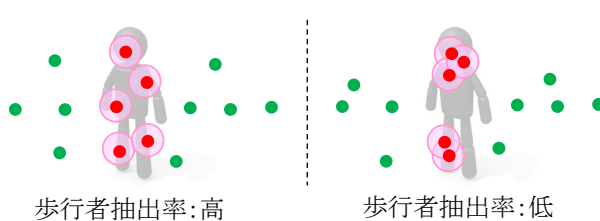


図 7 歩行者抽出率の概念 .

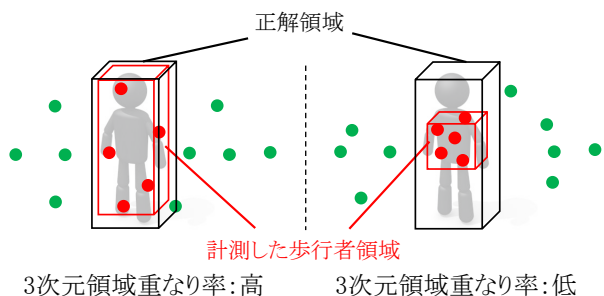


図 6 3次元領域重なり率の概念 .

表 2 評価結果

手法	$N$	$\bar{R}_{hit}$	$\bar{R}_{over}$	$\bar{R}_{ext}$
提案手法	100	7.5%	26.0%	50.2%
	200	5.7%	27.7%	53.6%
比較手法	100	0.3%	3.3%	6.4%
	200	0.4%	4.2%	8.3%

### 3.3 評価方法

各点群データに対する各手法の性能を評価するために、的中率と3次元領域重なり率、歩行者抽出率を評価指標として用いた。図5～図7にそれぞれの評価指標の概念を示す。

まず的中率(図5)は、照射したLASER光のうち歩行者に的中したLASER光の割合を表す指標である。LASER光の照射数を $N_{LASER}$ 、歩行者に的中したLASER光による歩行者計測点の数(的中点数)を $N_{ped}$ とすると、的中率 $R_{hit}$ を式(10)により算出する。

$$R_{hit} = \frac{N_{ped}}{N_{LASER}} \quad (10)$$

的中率が高いほど、周囲に比べて歩行者にLASER光を集中して照射できていることを示す。

次に3次元領域重なり率は、真の歩行者領域に対して、計測できた歩行者領域の割合を表す指標である。計測された歩行者点群を内包する最小の直方体 $V$ の体積を $|V|$ 、事前に正解として与えられている歩行者点群をすべて内包する歩行者領域の直方体 $V_{true}$ の体積を $|V_{true}|$ とすると、3次元領域重なり率 $R_{over}$ を式(11)により算出する。ここで $V$ の定義より、 $V \subseteq V_{true}$ を必ず満たす。

$$R_{over} = \frac{|V|}{|V_{true}|} \quad (11)$$

3次元領域重なり率が高いほど歩行者の体全体を広くスキャンできていることを示す。

最後に歩行者抽出率は、歩行者を構成する全点数のうち計測した点の割合を表す指標である。歩行者計測点の数を $M_{ped}$ 、歩行者点の総数を $N_{sum}$ とすると、歩行者抽出率 $R_{ext}$ を式(12)により算出する。ただし、あ

る1点が計測されたとき、その周囲10cmの範囲内の点も計測されたものとする。

$$R_{ext} = \frac{M_{ped}}{N_{sum}} \quad (12)$$

歩行者抽出率が高いほど歩行者の体全体を細かくスキャンできていることを示す。

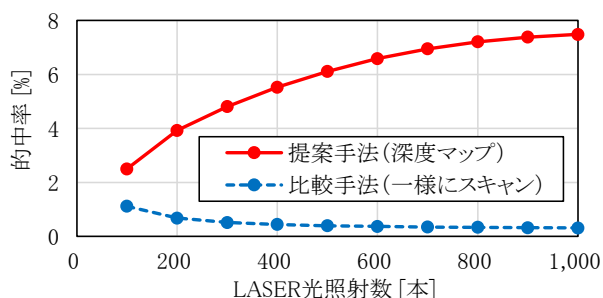
以上の各評価指標は全て値が高いほど歩行者を効果的にスキャンできていることを意味する。さらに、LASER光の照射数が少なければ、歩行者を効率的にスキャンできていることを意味する。

評価には2分割交差検証法を用いた。すなわち、データセットを2分割して、片方を評価データ、もう片方を学習データに分割して評価した。このとき、距離別の歩行者の割合が等しくなるように分割した。学習データと評価データを入れ替えて2回評価し、各試行で得られた各評価指標の値の平均を求めることで最終的な評価値とした。

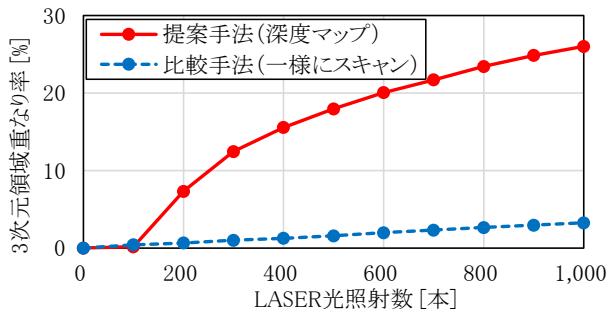
### 3.4 実験結果

表2に、各手法における $N = 100$ 、 $N = 200$ の場合の的中率 $R_{hit}$ の平均 $\bar{R}_{hit}$ 、3次元領域重なり率 $R_{over}$ の平均 $\bar{R}_{over}$ 、歩行者抽出率 $R_{ext}$ の平均 $\bar{R}_{ext}$ を示す。また、図8、図9に各手法によるスキャン毎の各評価指標の平均値の推移を示す。表2において、すべての評価指標において提案手法は比較手法よりも高い値が得られ、歩行者を効率的にスキャン可能であることを確認した。

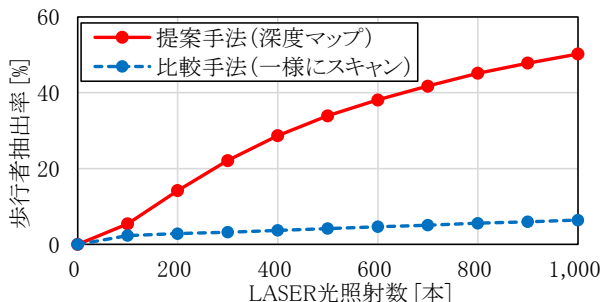
図10に点群スキャン時に撮影された画像と実験に使用した点群データの例を示す。また、図11にこの点群データから提案手法により取得できた点群データを示す。また、これらの図中において、赤点が歩行者に対応する点、白点が歩行者以外に対応する点である。これらの結果より、スキャンを繰り返すことにより歩行者にスキャンが集中していくことを確認できた。



(a) 的中率の推移 .

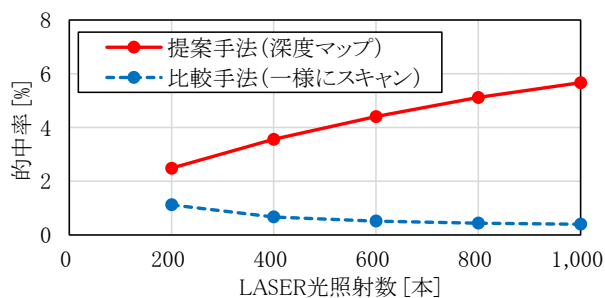


(b) 3次元領域重なり率の推移 .

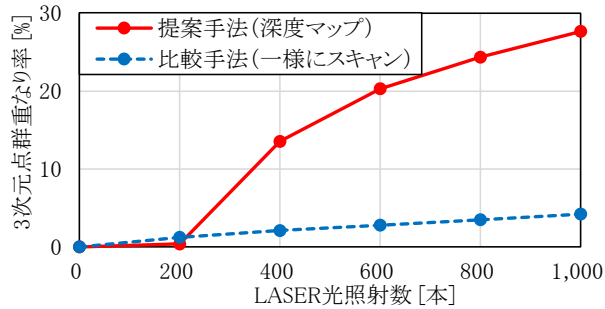


(c) 歩行者抽出率の推移 .

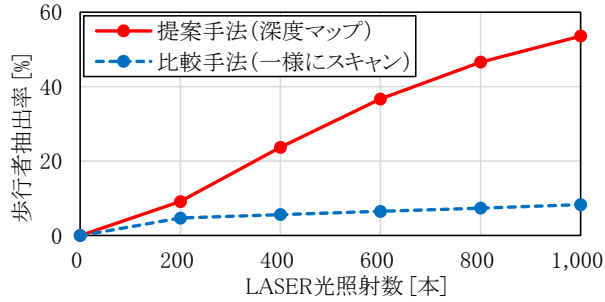
図 8  $N = 100$  における各評価指標の推移 .



(a) 的中率の推移 .



(b) 3次元領域重なり率の推移 .



(c) 歩行者抽出率の推移 .

図 9  $N = 200$  における各評価指標の推移 .

## 4 考察

前節で得られた実験結果をもとに、初期スキャンの効果や、深度マップの効果について考察する .

### 4.1 初期スキャンの効果

提案手法は、初期スキャンにより計測された点を基に計算した歩行者尤度マップを用いて次の LASER 光を照射する . そのため、初期スキャンの最も重要な役割は、すべての歩行者から一定数以上の計測点を得ることである . まず、表 3 に初期スキャンにより少なくとも 1 点以上歩行者を計測できた点群データの数と、1 点も計測できなかった点群データの数を示す . 提案手法は、 $N = 100$ 、 $N = 200$  において初期スキャンにより歩行者を 90% 以上計測可能であった . 一方、比較手法のように全体を一様に初期スキャンする場合は、 $N = 200$  においても 65% 程度しか計測できなかった . 提案手法は、ある高さに限定して初期スキャンを行うため、水平方向の LASER 光の照射密度が高くなり、歩行者を計測できた割合が高くなったと考えられる .

また、歩行者の形状などの特徴を得るためには、歩行者に LASER 光を多く照射することも重要である . 表 4 は、初期スキャンにより計測された歩行者 1 人当たりの計測点数を示している .  $N = 100$  を見ると、比較手法と比べて提案手法の計測点数が少ないことが分かる . しかしその差はわずか 0.3 点であった .  $N = 200$  を見ると、提案手法の方が計測点数が多く、差は 1.8 点であった .

以上より、初期スキャンによって確実に歩行者を計測し、かつ、多くの LASER 光を歩行者に向けて照射するためには、観測範囲全体に LASER 光を照射してスキャンするよりも、範囲を限定してスキャンする提案手法が有効であることを確認した .

### 4.2 深度マップの効果

図 9 (a) は、1 回のスキャンに用いる LASER 光照射数  $N = 200$  における的中率の推移を示している . 提案手法の推移を見ると、LASER 光の総照射数の増加にともなって的中率が増加していることがわかる . 一方、比較手法の的中率は減少している . このことから、深度

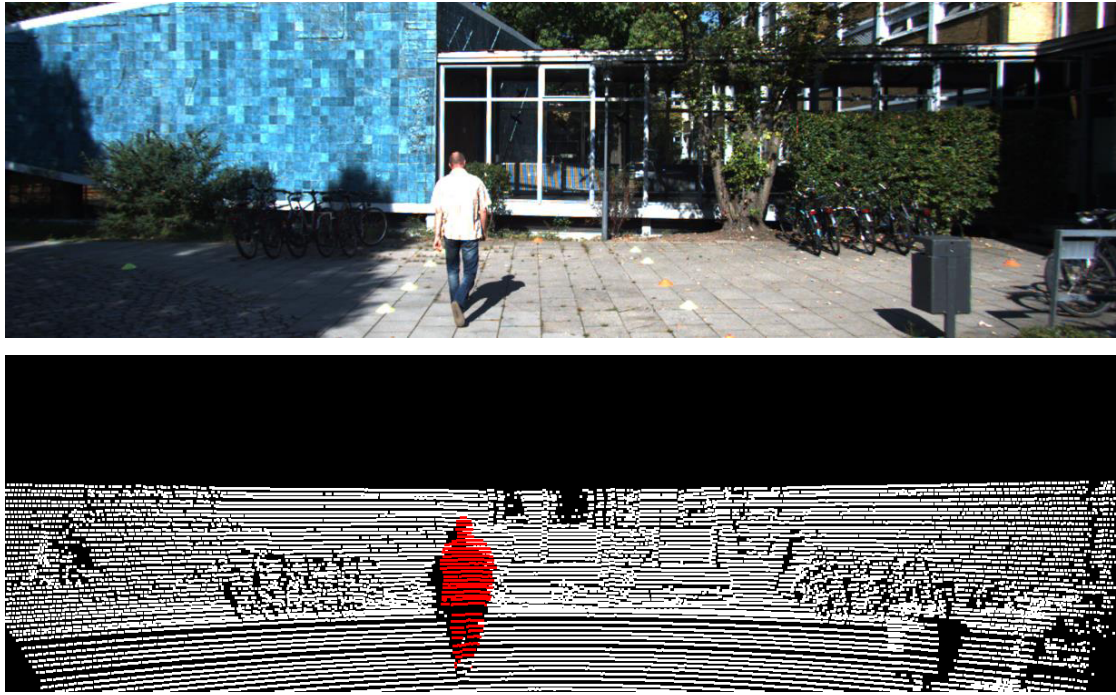


図 10 点群スキャン時に撮影された画像と実験に使用した点群データ.

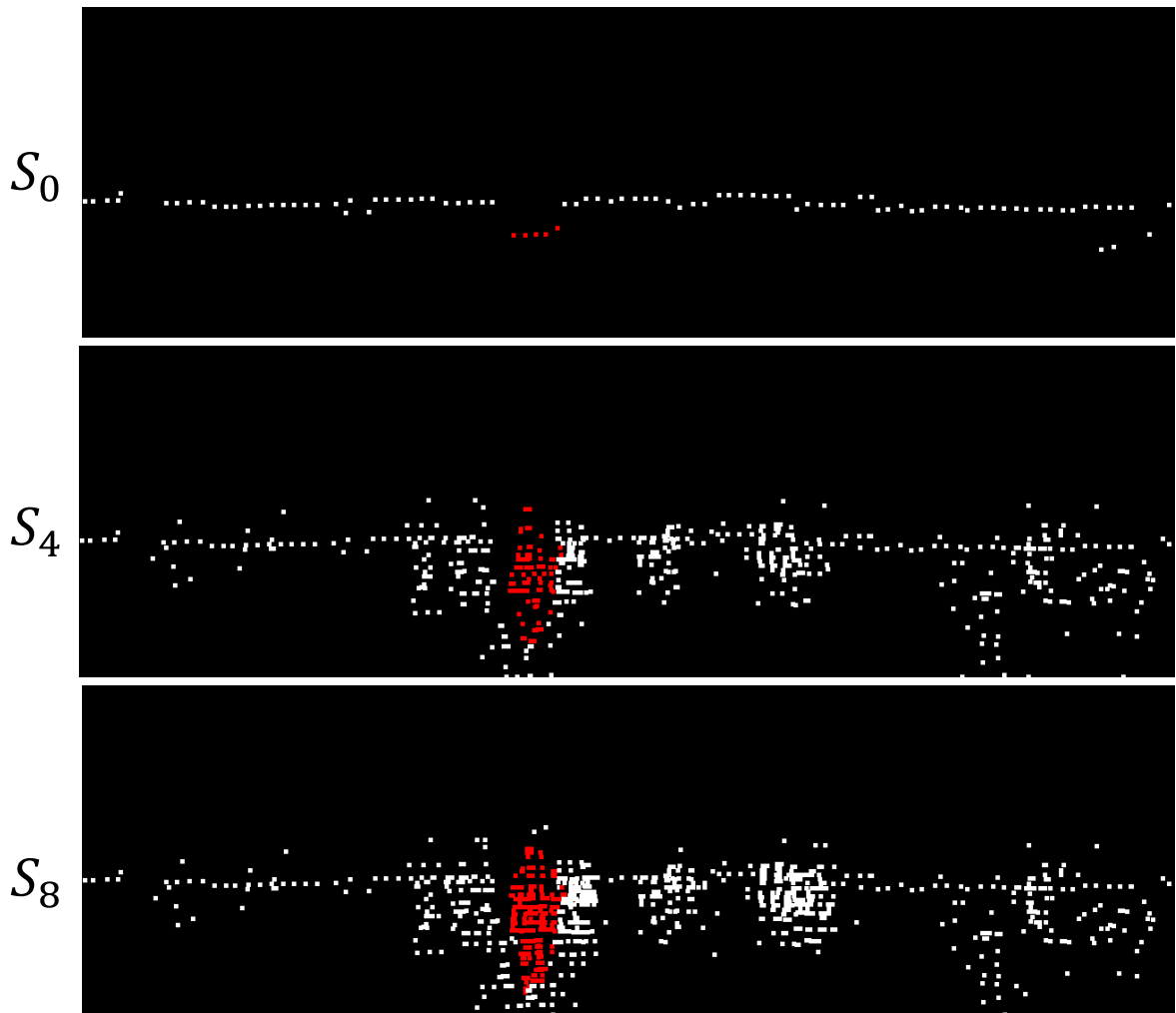


図 11  $N = 100$  において提案手法により取得できた点群データ.

表 3 歩行者を計測できた点群データ数および計測できなかった点群データ数

手法	照射数 $N$	計測	計測 $\times$
提案手法	100	560	40
	200	569	31
比較手法	100	222	378
	200	390	210

表 4 初期スキャンにより計測された歩行者 1 人当たりの計測点数

手法	照射数 $N$	計測点数
提案手法	100	2.7
	200	5.2
比較手法	100	3.0
	200	3.4

マップの利用の効果が見てとれる．提案手法は点群をスキャンした後に深度マップを用いて各点の歩行者尤度を算出し，それに基づいて次のスキャン位置を決定する．これにより，スキャンの繰り返しにともなう的中率が増加したと考えられる．一方，比較手法は何回スキャンしても歩行者ではない点を多数計測するため，的中率が減少したと考えられる．

## 5 むすび

本発表では，Active Scan LIDAR を用いた歩行者検出のための効率的なスキャン手法を提案した．具体的には，歩行者の形状を学習することで，粗な点群から歩行者が存在する可能性が高い位置を推定し，その尤度に基づいてスキャン位置を推定する効率的なスキャン手法を提案した．提案手法の有効性を確認するために，KITTI データセットを用いたスキャンの模擬実験を行った．また，観測範囲全体に一律なスキャンを繰り返す手法と比較した．その結果，スキャン範囲を限定した初期スキャンと，深度マップにより歩行者尤度算出と追加スキャン時の照射位置決定を行う提案手法の有効性を確認した．

今後の課題としては，初期スキャン手法の改良や深度マップの改良，提案手法により得られた点群に対する歩行者検出手法の検討が挙げられる．

謝辞 本研究の一部は，科学研究費補助金による．

## 参考文献

[1] A. Geiger, P. Lenz, and R. Urtasun, "Are we ready for autonomous driving? The KITTI vision benchmark suite," Proc. 2012 IEEE Conf. on Com-

puter Vision and Pattern Recognition, pp.3354–3361, June 2012.

[2] 警察庁, "交通事故統計 (平成 29 年 2 月末)," <http://www.e-stat.go.jp/SG1/estat/Pdfdl.do?sinfid=000031554590>, Mar. 2017. (2017/04/01 参照) .

[3] K. Kidono, T. Miyasaka, A. Watanabe, T. Naito, and J. Miura, "Pedestrian recognition using high-definition LIDAR," Proc. 2011 IEEE Intelligent Vehicles Symposium, pp.405–410, June 2011.

[4] 建部好輝, 出口大輔, 川西康友, 井手一郎, 村瀬洋, 酒井映, "LIDAR による歩行者検出のための複数フレーム特徴量に関する初期検討," 電子情報通信学会技術研究報告, 2016-PRMU-57, Sept. 2016 .

[5] H. Wang, B. Wang, B. Liu, X. Meng, and G. Yang, "Pedestrian recognition and tracking using 3D LIDAR for autonomous vehicle," Robotics and Autonomous System, vol.88, pp.71–78, Feb. 2017.