

降雨を考慮した 3D-Lidar による安定した 自律移動ロボットのための環境認識アルゴリズムの開発

Development of Navigation Environment Recognition Algorithm
for Stable Autonomous Mobile Robot using 3D-Lidar Considering Rain Conditions

内田利紀

Riki Uchida

指導教員 小林一行 教授

法政大学大学院理工学研究科システム理工学専攻修士課程

For autonomous mobile robots to move safely, it is important that they have a stable recognition of their environment. Most autonomous mobile robots use LiDAR (Light Detection and Ranging) to sense the environment. Under normal weather circumstances, this LiDAR can assess the environment stably and accurately. However, in rainy weather, it has the problem of recognizing raindrops as objects. When an autonomous mobile robot uses LiDAR to detect obstacles in rainy weather, the laser emitted from LiDAR may hit raindrops and misdetect them. In this paper, 3D LiDAR is used to investigate the effect of rain on sensors and how the robot can navigate autonomously in the rain to enable an autonomous mobile robot in a rainy environment.

Key Words : Autonomous mobile robot, 3D-Lidar, Navigation, rainy environment

1. はじめに

近年ではセンサなどを用いて目的地まで走行する自律移動ロボットが、倉庫や病院などで活躍している。また2021年に開催された東京オリンピック[1]や2020年頃から流行している新型コロナウイルス感染拡大防止に伴い、宅配ロボットとしても期待されていることから[2]、普及率や有効性、将来性も高いと考えられている。

そんな自律移動ロボットのロバストな屋外ナビゲーションを実現するには、安定したセンシングと制御を行なう必要があるに加え、天候を考慮する必要がある。周辺環境認識センサとしては、カメラが考えられる[3]。しかし、ナビゲーション中に天候や日照方向が変化すると、環境認識に誤りが生じる可能性がある。そのため、研究用の移動ロボットでは、カメラに加えて、太陽光の影響を受けにくく、センチメートルオーダーの精度で環境を認識できるLiDARを使用するケースが多い[4, 5]。

しかし、LiDARは精度が高いため小さな雨粒でも障害物として認識してしまい、誤った環境認識をする可能性がある。降雨環境で3D-LiDARを使用する場合、雨粒問題による環境認識失敗の2つのケースを考慮する必要がある[6]。雨粒問題による環境認識失敗の2つのケースとは、(i)雨粒が検出面に付着してしまう場合と(ii)雨粒が障害物として認識された場合である。

(i)の場合、雨粒が検出面に付着してしまうとセンサが正常に機能しなくなる。そのため、物理的な付着を防ぐ

ためにセンサ表面の近くにレインフードを設置することで、雨粒が表面に付着するのを防ぐという解決策がある[7, 8]。

(ii)の場合、多くの研究者の話題のポイントの一つとされており、多くの結果が発表され、実施されている。例えば、実際に雨が降っている状況では、雨粒による環境認識の失敗により、ロボットが停止動作や回避行動を頻繁に繰り返したりすることがある[9, 10]。Fig.1(a)の左側に晴天時に走行した環境、右側にロボットが走行した軌跡を示す。またFig.1(b)に雨天時に走行させた環境、右側にロボットが走行した軌跡を示す。

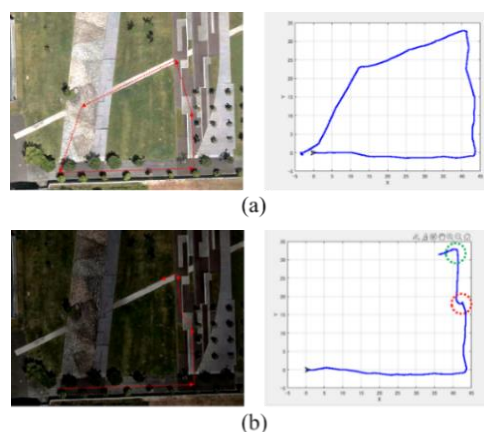


Fig.1 Comparison of driving route trajectories in sunny and rainy weather

Fig.1 (a)の晴天環境での走行は、急な停止動作や回避動作はなく完走することができた。しかし、Fig.1 (b)の降雨環境で走行させた際には、直線での急な停止動作や Fig.1 (b)の赤丸の地点で不必要な回避行動をとったのに加え、障害物がない地点での急停止も確認された。このように雨は環境認識に大きく影響を及ぼすため、降雨環境での自律走行は検討すべき問題である。

その解決策の 1 つとして、雨粒の大きさが環境認識される移動物体に比べて相対的に小さいことに着目し、雨粒を他の物体と区別する手法として、クラスタリング法が挙げられる。しかし、この方法では、ナビゲーションのために回避しなければならない小さな物体と無視できる雨粒を区別することができない[11]。

また、マルチエコー機能を有する LIDAR を用いて、雨が LIDAR に及ぼす影響を軽減する研究が行われている[12]。この研究では LIDAR のマルチエコー機能によって雨や霧の奥にある物体を検出できる場合があることが示されている。しかし、マルチエコーによって読み取ることのできる反射波の数が限られているために、反射波のすべてが雨や霧によるものである場合もある。また、複数の反射波のうちの後方部分のみを使用して雨の影響を除去しようとした場合、障害物が検出されている可能性のある周辺情報も除去してしまう可能性が考えられる。これらの問題が生じるため、マルチエコー機能を有する LIDAR を使用するだけでは雨の影響を除去できない。

上記のような問題が挙げられているため、本研究では、3D-LiDAR が受ける雨粒の影響を軽減し、降雨環境での安定した走行を可能にするシステム開発および検証を行ない、提案手法の有効性を確認した。

2. 提案するセンサ構成とロボット

Fig.2 に提案するアルゴリズムに必要なセンサの構成と移動ロボットの構成を示す。

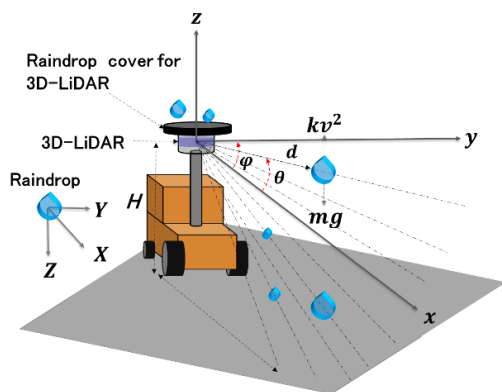


Fig.2 Proposed sensor configuration and robot

Fig.2 に示すように、3D-LiDAR は移動ロボットの上部に取り付けられており、周囲 360° を死角なく水平に観測することができる。また、3D-LiDAR にレインカバーを使用することで、センサ表面への雨粒の物理的な付着を軽減することができる。座標を算出するための変数を以下に示す。

$[x, y, z]^T$: 3D-LiDAR の中心を原点とした場合の座標
 $[X, Y, Z]^T$: 正の下向き垂直速度で落下する雨粒の座標
 d : 3D-LiDAR の原点から特定の雨粒までの距離
 θ : 3D-LiDAR で見た雨粒の仰角方向[度]
 φ : 3D-LiDAR で見た雨粒の方位角 [度]
 H : 地面から 3D-LiDAR までの高さ
 L : センサが検知した対象物までの水平距離
 m : 雨滴の質量
 g : 重力加速度
 k : 空気抵抗係数
 v : 雨粒の落下速度
 r : 雨滴の半径
 t : 時間
 C_D : 抗力係数 (球形)
 ρ : 水の密度
 ρ_a : 空気密度

Fig.3 は、3D-LiDAR のセンサ座標の全体像である。

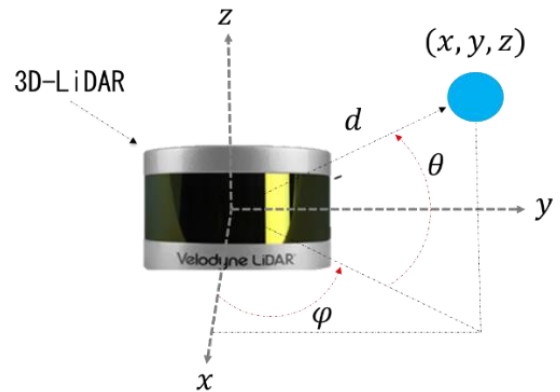


Fig.3 Coordinate system of 3D-LiDAR sensor

Fig.3 に示すように、x 軸の正方向は 3D-LiDAR の正面方向、y 軸の正方向は左方向、z 軸の正方向は上方向を示している。3D-LiDAR の原点からのセンサは、対象物までの相対距離の情報を球座標として取得する。取得した 3D-LiDAR のデータをもとに、検出した物体の位置の直交座標をローカル座標として式 (1) で算出することができる。

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = d \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \varphi \\ \cos \theta \sin \varphi \\ \sin \theta \end{bmatrix} \quad (1)$$

3. 雨粒と降雨環境の定義

空から落ちてくる雨粒は、鉛直下向きには重力の影響を受け、上向きには空気抵抗の影響を受ける。したがって、第 2 章で定義した変数を用いると、落下する雨粒の運動方程式は式 (2) のようになる。

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} = mg - k \left(\frac{dz}{dt} \right)^2 \quad (2)$$

式(2)を初期条件と合わせて解くと、式(3)が得られる。

$$v(t) = \sqrt{\frac{mg}{k}} \tanh \sqrt{\frac{kg}{m}} t \quad (3)$$

十分な時間が経過する、重力と空気抵抗のバランスが均等になり、式 (3) は式 (4) になる。

$$v(t) \cong v(\infty) = \sqrt{\frac{mg}{k}} \quad (4)$$

$v(\infty)$ を雨粒の終端速度と呼ぶ。式(4)は、 $m = \frac{4\pi r^3}{3}\rho$ と $k = \frac{\pi r^2}{2}C_D\rho_a$ を用いて変形すると、式(5)のようになる。

$$v(\infty) = \sqrt{\frac{4\pi r^3\rho}{3} \frac{2g}{C_D\rho_a\pi r^2}} = \sqrt{\frac{8\rho g}{3C_D\rho_a}} r \quad (5)$$

式(5)は $g = 9.8, C_D = 0.5, \rho = 997, \rho_a = 1.21$ のとき、式(6)になる。

$$v(\infty) = 207.5\sqrt{r} \quad (6)$$

得られた式(6)から、雨粒の終端速度は雨粒の半径の平方根に比例することがわかる。Fig.4 は、雨粒の終末速度と雨粒の半径の関係を示したものである。

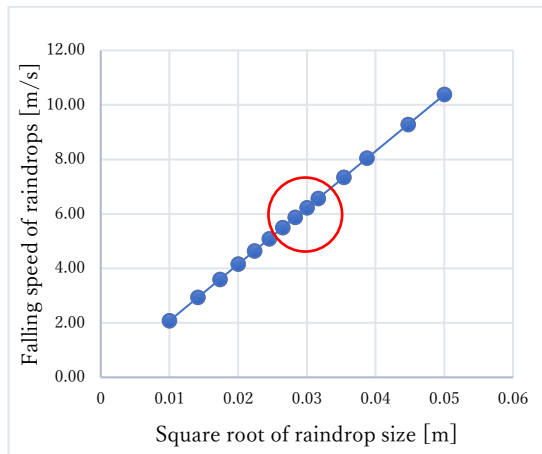


Fig.4 Relationship between the falling velocity of raindrops and the square root of the radius of raindrop

Fig.4 に示すように、雨粒の半径が雨と霧雨の境界である 0.1 [mm] のとき、終端速度は約 2.0 [m/s] である。また、雨粒の最大終端速度は雨粒の半径が 2.5 [mm]のときの約 10.3 [m/s]である。赤丸で囲まれている雨粒の大きさが一般的な雨粒であり落下速度である。Table.1 に降水量に対する雨の種類を示す。

Table.1 Type of rain for precipitation

降水量	雨の種類
1 [mm/h]未満	霧雨
1~2 [mm/h]	雨と認識でき傘が必要
3 [mm/h]	本格的な雨

Table.1 に示すように、降水量 1 [mm/h]以上の雨が一般的な雨とされており、Fig.4 にある赤丸の中にある雨粒の速度は、降水量 1~3 [mm/h] 時の速度である。

4. 仮定と問題

提案するアルゴリズムを用いて、雨粒の影響を軽減し降雨環境で走行を行なうために、以下の仮定を設ける。

A1) 雨粒の大きさは半径 1[mm], 降雨量 1~3[mm]程度とする。

A2) 深い水たまりなどが無い路面状況とする。

A1 は検証する環境が一般的な降雨環境のときを想定しているため設けた。また、A2 は検証に使用する移動ロボットが段差や水溜りの影響により走行ができないことを防ぐため設けた。以上の仮定のもと、以下の問題を考える。

P1) 雨によるセンサへの影響をどのように軽減するか。

5. 提案するアルゴリズムの概要

本章では、雨粒の影響を軽減するためのアルゴリズムを説明する。Fig.5 に、雨粒の影響を軽減するためのアルゴリズムの概要図を示す。

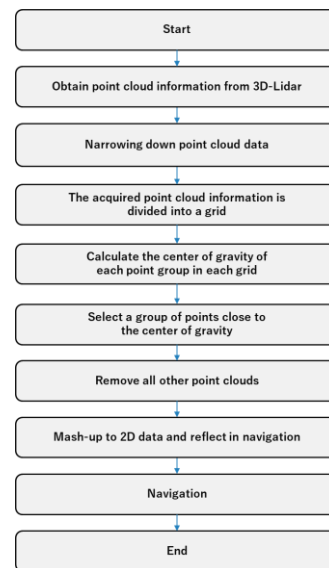


Fig.5 Overview of Reducing Raindrop Effects

はじめに点群情報の取得を行なう。取得した点群情報のロボットの周囲 5 [m]の範囲に対して、処理をかけることで障害物として認識される可能性がある雨粒の影響を軽減する。その後、処理をかけた点群情報を 2 次元データに変換し、ナビゲーションに用いることで降雨環境での安定した走行を行なう。

(1) データの取得

はじめに、3D-LiDAR から周辺環境を点群情報として取得する。Fig.6 に 3D-LiDAR のセンサから PC に点群情報を送信するまでのイメージ図を示す。

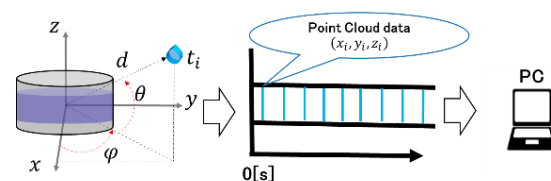


Fig.6 Diagram of how point cloud information is transmitted from the 3D-LiDAR sensor to the PC

Fig.6 に示すように、3D-LiDAR から照射されるセンサによって 3D-LiDAR の原点から物体までの距離、3D-LiDAR から見た仰角、方位角情報を(1)の式によって XYZ 座標に変換し、PC に点群情報を送信する。

(2) 処理する範囲を絞り込み

雨粒による影響を軽減するために、点群の検索範囲の絞り込みを行なう。Fig.7 に 3D-LiDAR が取得した点群情報を示す。

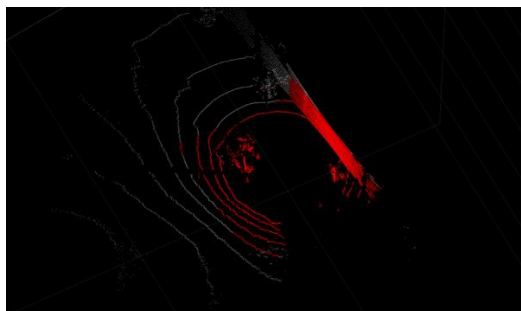


Fig.7 Extraction of raindrop search area

Fig.7 にはグレーの点群と赤色の点群が示されているが、赤色の点群情報が処理範囲の点群である。自律移動ロボットの速度は約 1[km/h]で設定を行っているため遠方の物体より、衝突する可能性のある障害物を検出することが重要である。そのため、ロボットの周囲 5[m]の範囲を処理範囲とし、雨粒の影響を軽減する。点群情報の処理範囲を絞り込むことは、処理に必要な演算量を削減するとともに、点群の処理範囲を狭めることで誤検出の可能性を低減するメリットがある。

(3) 点群を格子状に分割し重心を算出・除去

処理範囲の絞り込みを行なった後、点群情報を縦横 0.3[m]のサイズの格子状に分割する。Fig.8 に格子状に分割した点群情報のイメージ図を示す。

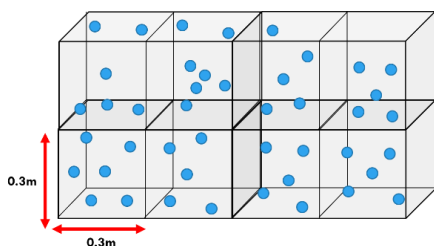


Fig.8 Image of point cloud information divided into a grid

Fig.8 に示すように処理範囲の点群を格子状に分割を行なった後、 n を格子内にある点群数とし、(7)の式を用いて各格子内にある点群の重心座標(x_G y_G z_G)を算出する。

$$\begin{bmatrix} x_G \\ y_G \\ z_G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{x_{n1}+x_{n2}+x_{n3}\dots}{n} \\ \frac{y_{n1}+y_{n2}+y_{n3}\dots}{n} \\ \frac{z_{n1}+z_{n2}+z_{n3}\dots}{n} \end{bmatrix} \quad (7)$$

各格子内の点群の重心座標を算出した後、各格子内にある点群と重心座標が近い点群を抽出する。抽出した点群のみを格子内に残し、その他点群を取り除く。Fig.9 (a) に処理前の点群情報、Fig.9 (b)に処理後の点群情報を示す。

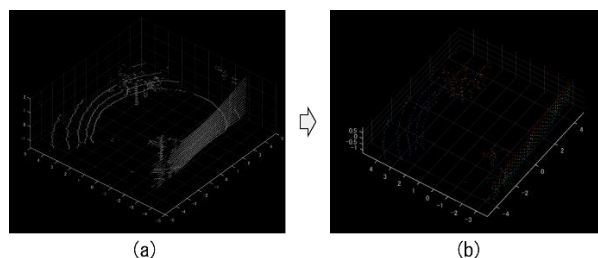


Fig.9 Comparison of point cloud information before and after processing

処理後の結果、回避する必要がある壁や木といった障害物の輪郭を残しつつ、ノイズのような形で検出されやすい雨粒点群を減らすことができる。

(4) 2次元データに変換しナビゲーションに反映

Fig.10 に処理を行なった点群を 2 次元データに変換し環境地図に反映させたものを示す。

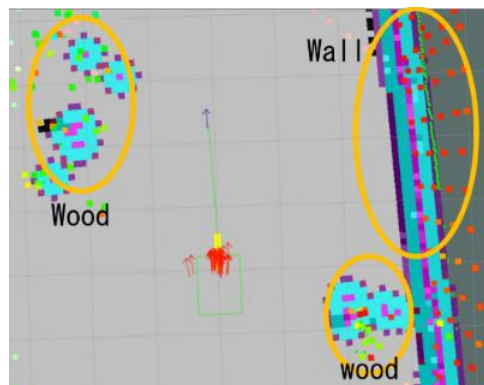


Fig.10 Reflects processed point cloud information by collapsing it into two dimensions

Fig.10 から木や壁といった障害物を確認することができる。この変換した情報をナビゲーションに用いることで、雨粒の影響を軽減した環境を構築し、不必要な急停止や回避行動を起こすことなく走行をすることができる。

6. 検証

(1) 検証で使用した環境

提案したアルゴリズムの有効性を確認するために、降水量 1~3[mm/h]の一般的な雨とされる天候の時に、法政大学小金井キャンパスで検証を行なった。Fig.11 (a)に、検証に使用した環境の航空写真、Fig.11 (b)にセンサ情報から作成した走行環境のマップとルートを示す。

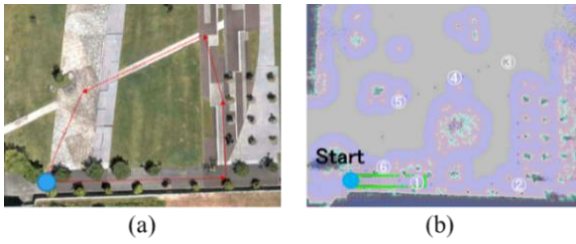


Fig.11 Aerial view of the environment used for verification

Fig.11 (a)に示している青丸の地点から走行を開始し、小道を含むコースを矢印の方向に1周する。機体はセンサから送られてくる情報と事前に作成した走行環境をもとに走行する。本検証では、Fig.11 (b)に示されている青い点を順番に通過しながら走行を行なう。

(2) 検証で使用した機体情報

Fig.12 に、検証で使用した機体の全体図と搭載機器を示す。

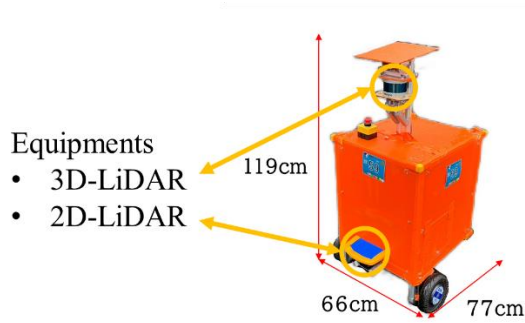


Fig.12 Overall view of the robot used for verification and its on-board equipment

検証に使用した機体は、全長 77 [cm]、全幅 66 [cm]、全高 119 [cm]のサイズである。降雨環境で走行した際にセンサや回路が浸水しないよう、防水対策として外装にプラスチックダンボールを採用している。また、周辺環境を取得するセンサとして、2D-LiDAR、3D-LiDAR を搭載している。Fig.13 に LiDAR への物理的な雨粒の付着を防ぐための雨傘の利用場面を示す。

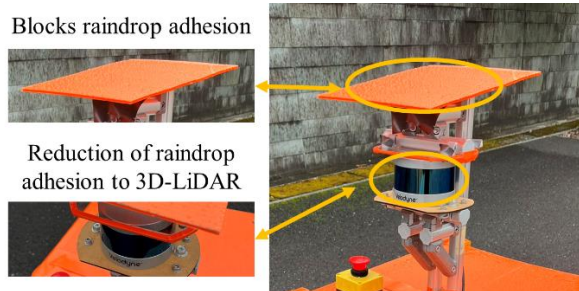


Fig.13 Effects of using rain umbrellas

Fig.13 に示すように、雨傘の装着によって 3D-LiDAR への雨粒の付着を防ぎ、物理的な付着による故障やセンサ機能の低下を軽減できていることがわかる。

(3) 検証結果

Fig.14 に、降雨量 1~3[mm/h]の降雨環境で自律走行を行なった様子を示す。Fig.14 に記載されている①~⑥の番号は、Fig.11 (b)に記載されている番号の位置と一致している。

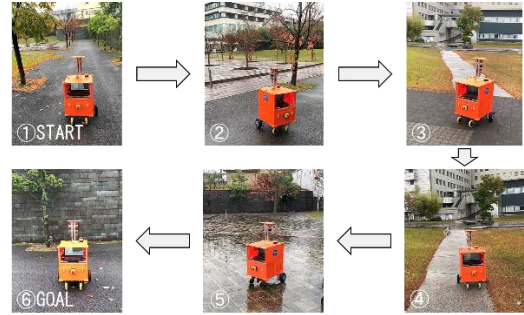


Fig.14 Autonomous driving in a rain environment

提案したアルゴリズムを適用させ走行させた結果、Fig.15 に示すように、指定した走行ルートを完走することができた。

Table.2 に晴天時の走行記録と降雨時に提案したアルゴリズムを適用し、自律走行させたときの結果を示す。

Table.2 Autonomous mobile robot driving results

No	走行環境	走行時間
1	晴天環境	5 分 40 秒で完走
2	晴天環境	5 分 30 秒で完走
3	降雨環境	5 分 28 秒で完走
4	降雨環境	5 分 54 秒で完走
5	降雨環境	6 分 01 秒で完走

Table.2 に示すように、晴天環境で走行したときの走行結果と降雨環境で走行させたときの差は 15~20 秒ほどの差しかなく大きな差がないことがわかる。

Fig.15 (a)に走行中の写真、Fi.15 (b)に Fig.15 (a)の場所で、提案したアルゴリズムを適用した後の点群情報を示す。

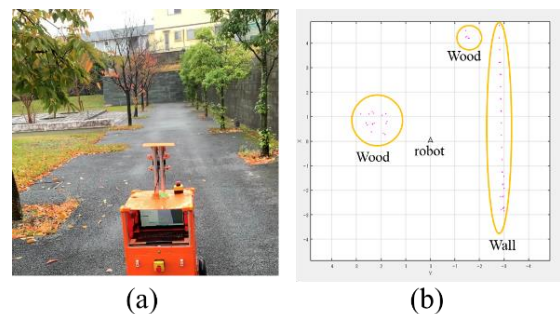


Fig.15 Point cloud information after applying the running photograph and the proposed algorithm

Fig.15 (b)に示すように、障害物である木や壁の点群情報は検出しており、ノイズのような形で検出されやすい雨

粒点群はないのがわかる。提案したアルゴリズムを適用し走行させた結果、不必要な回避動作や停止動作を起こすことなく走行をすることができた。

Fig.16 に縦軸を点群数、横軸を各データとし、青色の折れ線グラフを 3D-LiDAR が取得した点群数、黄色の折れ線グラフを提案したアルゴリズム適用後の点群数としたグラフを示す。

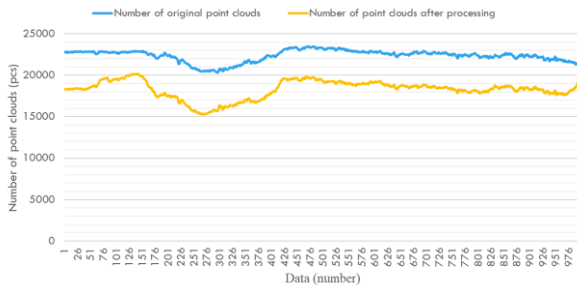


Fig.16 Number of point clouds after applying the proposed algorithm

Fig.16 に示すように、処理後の点群数は元の点群の約 8 割である。Fig.15 からわかるように、処理を行なった範囲内にある障害物情報を残しつつ雨粒のような不必要な点群情報を取り除くことで、降雨環境でも指定したルートを完走することができた。

7. 結論

本研究では、3D-LiDAR を用いた屋外移動ロボットのナビゲーションのための環境検知アルゴリズムを提案した。このアルゴリズムの有効性を確認するために降雨時に学内中庭で移動ロボットを走行させ、この方式をテストした。検証結果から、提案した手法が雨粒の影響を軽減し、降雨環境での安定した走行ができることを確認することができた。

8. 今後の展望

今後の展望として濡れている路面の影響による、タイヤのスリップも考慮する必要がある。本研究では学内中庭の短距離で検証を行ない、指定したルートの走行には成功した。しかし、宅配ロボットとしても活躍が期待されている自律移動ロボットは 30~60 分の走行が求められることもある。長距離の場合、タイヤのスリップによる走行誤差が積み重なり脱輪をしてしまう可能性もあるため、今後の展望として、タイヤのスリップによる走行誤差についての解決策も検討する必要がある。

参考文献

1) 日経クロステック (XTECH) 「投てき種目 [自律走行ロボット] 投てき物の回収をロボットで支援」
<https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/mag/nmc/18/00059/00009/>
 (2023/1/22 閲覧)

2) Impress watch 「ロボットが食事を運ぶ「無人デリバリーサービス」を見てきた」
<https://www.watch.impress.co.jp/docs/news/1270640.html>
 (2023/1/22 閲覧)

3) Ryusuke Miyamoto, Miho Adachi, Hiroki Ishida, Takuto Watanabe, Kouchi Matsutani, Hayato Komatsuzaki, Shogo Sakata, Raimu Yokota, and Shingo Kobayashi, “Visual Navigation Based on Semantic Segmentation Using Only a Monocular Camera as an External Sensor,” J. Robot. Mechatron., Vol.32, No.6, pp. 1137-1153, 2020.

4) Yasuaki Orita and Takanori Fukao, “Robust Human Tracking of a Crawler Robot,” J. Robot. Mechatron., Vol.31, No.2, pp. 194-202, 2019.

5) Naoki Akai, Kenji Yamauchi, Kazumichi Inoue, Yasunari Kakigi, Yuki Abe, and Koichi Ozaki, “Development of Mobile Robot “SARA” that Completed Mission in Real World Robot Challenge 2014,” J. Robot. Mechatron., Vol.27, No.4, pp. 327-336, 2015.

6) Goodin, C.; Carruth, D.; Doude, M.; Hudson, C. Predicting the Influence of Rain on LIDAR in ADAS. Electronics 2019, 8, 89.

7) Shingo Nakamura, Tadahiro Hasegawa, Tsubasa Hiraoka, Yoshinori Ochiai, and Shin’ichi Yuta, “Person Searching Through an Omnidirectional Camera Using CNN in the Tsukuba Challenge,” J. Robot. Mechatron., Vol.30, No.4, pp. 540-551, 2018.

8) Renato Miyagusuku, Yuki Arai, Yasunari Kakigi, Takumi Takebayashi, Akinori Fukushima, and Koichi Ozaki, “Toward Autonomous Garbage Collection Robots in Terrains with Different Elevations,” J. Robot. Mechatron., Vol.32, No.6, pp. 1164-1172, 2020.

9) Yoshihiro Takita, Shinya Ohkawa, and Hisashi Date, “Recognition Method Applied to Smart Dump 9 Using Multi-Beam 3D LiDAR for the Tsukuba Challenge,” J. Robot. Mechatron. Vol.28, No.4, pp. 451-460, 2016.

10) Junji Eguchi and Koichi Ozaki, “Development of the Autonomous Mobile Robot for Target-Searching in Urban Areas in the Tsukuba Challenge 2013,” J. Robot. Mechatron., Vol.26, No.2, pp. 166-176, 2014.

11) Naoki Akai, Yasunari Kakigi, Shogo Yoneyama, and Koichi Ozaki, “Development of Autonomous Mobile Robot that Can Navigate in Rainy Situations,” J. Robot. Mechatron, Vol.28, No.4, pp. 441-450, 2016.

12) 佐藤 功太, 大矢晃久: “マルチエコーを取得可能な測域センサの性質に関する研究: 雨、煙、シャッターがある環境における測定結果,” ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集,1A1-A07, 2012.