

LiDARの測定データ間の差分を圧縮することによる 送信時のファイルサイズの削減

山本 真也¹ 大沢 恭平² 串田 高幸¹

概要: 人手不足と労働生産性向上のために、自律走行搬送ロボットの導入が進んでいる。ロボットは複雑で動的な環境に適応し、回避するシステムが必要である。この問題に対し、ロボットはLiDARと呼ばれるセンサーを搭載している。LiDARセンサーは、角度と距離を測定したデータ（測定データ）を出力する。本稿で用いるLiDARセンサーは1[s]あたり約178[KB]の測定データを出力する。このデータ量を送信するには時間を要するため、データ量の削減が課題として挙げられる。本稿では、LiDARセンサーで取得した測定データ間の差分を用いた可逆圧縮手法を提案する。処理を行う測定データと直前の測定データを比較し、角度の差分と距離の差分を出力する。角度の差分と距離の差分でそれぞれ異なるルールにもとづいてバイナリに変換する。評価は東京工科大学の研究棟A910、研究棟A4階ラウンジ、研究棟A9階廊下でLiDARデータを収集し、提案手法で圧縮を行い圧縮率を評価する。研究棟A910では、移動中に取得したデータは平均で約11.16[MB]から約798.78[KB]へ圧縮され、圧縮率は約6.98[%]、移動せずに取得したデータは約11.43[MB]から約813.80[KB]へ圧縮され、圧縮率は約6.95[%]となった。研究棟A4階ラウンジでは移動中のデータが約21.55[MB]から約1.52[MB]へ圧縮され、圧縮率は約7.07[%]、移動せずに取得したデータは約22.83[MB]から約1.61[MB]へ圧縮され、圧縮率は約7.06[%]となった。研究棟A9階廊下では、移動中のデータが約13.21[MB]から約912.61[KB]へ圧縮され、圧縮率は約6.74[%]、移動せずに取得したデータは約12.92[MB]から約886.85[KB]へ圧縮され、圧縮率は約6.70[%]となった。

1. はじめに

背景

ロボットの自律移動技術の進歩により、製造、倉庫、医療、農業、レストランで支援を行うサービスロボットが提案されている[1-3]。飲食業界では、人手不足や労働性向上のために、ロボットの導入が進んでいる。例として、レストランでは配膳を行うロボットが活用され、注文を受けて料理を届けるサービスの自動化が行われている[4,5]。レストランの賑やかで動的な環境では、テーブルや椅子、顧客、他のロボットが障害物として常に存在する。ロボットは複雑な環境に迅速な適応し回避が行えるシステムが必要である[6,7]。この問題に対し、ロボットにLight Detection and Ranging (LiDAR) センサーや超音波センサーを使用して障害物の位置を特定する方法がある[8-11]。LiDARセンサーはレーザーパルスを発射し、パルスの反射がセンサーの受信機に到達するまでの時間を測定する[12]。この時間

に光速を掛けると、往復の移動距離が測定され、その数値を2で割ると、センサーとターゲット間の距離が算出される[13]。LiDARセンサーはターゲットまでの距離や方向、速度に関する情報を高精度で取得することができる[14]。

超音波センサーは、超音波をターゲットに向かって発射し、反射して返ってくる時間を測定する[11]。この時間に音速を掛けた値を2で割ることで、センサーとターゲット間の距離を計算する。LiDARセンサーと比べ費用対効果に優れているが、素早く動いている物体を検出することが難しく、検知範囲が約4[m]と制限がある[15]。加えて、温度やターゲットとの角度も超音波センサーに影響を与えるため、距離測定に超音波センサーのみを使用するのは困難である[16]。

LiDARセンサーは短時間で大量のデータを取得するため、データの送信には多くの通信リソースを消費する[12]。クラウドコンピューティングのネットワークリソースを活用することで、通信時に迅速なデータ処理が可能になる[17]。ネットワークリソースを利用することに加えて、LiDARから得られるデータに圧縮技術を適用する方法がある[18]。例として、オープンソースで利用可能なLASzip, PCL(Point Cloud Library), Draco, G-PCC, V-PCC, RLE

¹ 東京工科大学コンピュータサイエンス学部
〒192-0982 東京都八王子市片倉町1404-1

² 東京工科大学大学院バイオ・情報メディア研究科コンピュータサイエンス専攻
〒192-0982 東京都八王子市片倉町1404-1

と呼ばれるツールや圧縮技術が挙げられる [19–21].

課題

LiDAR は周囲の環境をスキャンし、角度と距離が示された測定データを出力する。本稿で用いる RPLiDAR C1 では、測定データを 1[s] あたり約 178[KB] 出力する。データのサイズが大きくなると送信にかかる時間が増加し、リアルタイム性が求められる状況では悪影響を及ぼす可能性がある [12, 22–24]。図 1 は送信時間が増加した際の影響を示す。

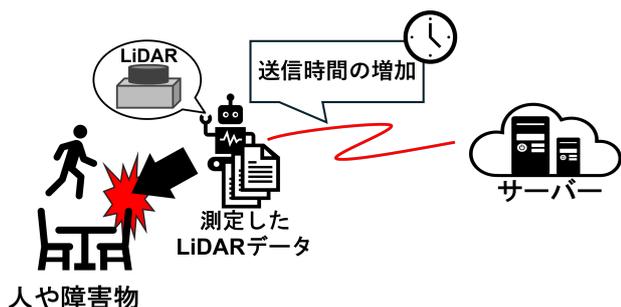


図 1: 送信時間が増加した際の影響

ロボットが人や障害物を避ける際に影響を受け、迅速な対応ができなくなる。

各章の概要

第 2 章では、本稿の関連研究を説明する。第 3 章では、本研究の提案手法を説明する。第 4 章では、提案手法の実装を説明する。第 5 章では、実験環境と実験の結果の分析を説明する。第 6 章では、提案、実験、評価が本研究の課題を解決しているかを議論する。第 7 章では、本稿のまとめを行う。

2. 関連研究

LiDAR センサーが生成する点群データに対し、連続したデータ間で生じる繰り返しや変化の少ない部分を活用した非可逆圧縮を提案する研究がある [25]。この手法では、空間を 8 つの等しいサイズの立方体に分割し、点群データを効率的に表現する「オクツリーデータ構造」が利用されている。この構造は、点群データを管理し、分割された空間の関連性を保持する役割を果たす。分割された各空間内で重複する点を特定し、それらを抽出することでデータの冗長性を圧縮に活用している。ただし、この手法は主に物体の少ない静的環境に適しており、動的環境や変動の多いデータでは、差分が増えるため圧縮効率が低下する。

LiDAR データのロスレス圧縮ツールとして、LAS 形式の点群データを LAZ 形式に変換する「LASzip」を提案する研究がある [19]。LiDAR から取得した点群データを専用の

ツール、ソフトウェアを使用して LAS 形式のデータを LAZ 形式のデータに圧縮する。LAS 形式は ASPRS (*American Society for Photogrammetry and Remote Sensing*) が策定した標準フォーマットである。「LASzip」はこのデータを冗長性の削除やランレングスエンコーディングを用いることによって、ロスレス圧縮を行う。この手法では、事前に特定のツールを準備する必要がある。

LiDAR が出力する点群データを距離画像に変換し、既存の画像、ビデオ圧縮アルゴリズムを用いてデータ量を削減する手法を提案している [26]。圧縮アルゴリズムには MPEG や JPEG を使用している。この研究では点群データの圧縮において画像圧縮技術は有効であると示されている。しかし、MPEG や JPEG を使用する非可逆圧縮では、一部のデータが失われるため、品質の低下が生じる。この研究では、非可逆圧縮の適用範囲は特定のアプリケーションに依存するとされているが、具体的な適用例が挙げられていない。そのため、品質低下が許容される範囲について、具体的な基準が不明である。

3. 提案

本稿では、測定データ間の角度の差分（以下、角度差）と距離の差分（以下、距離差）を用いた、LiDAR データの可逆圧縮方法を提案する。

提案する手法について、以下の 4 つの項目で説明する。

- 各測定データ間の角度と距離の差分計算
- 角度差の差分と距離差の出力
- 出力データのバイナリ変換と送信
- 解凍方法

提案方式

- 各測定データ間の角度と距離の差分計算

LiDAR センサーの出力を一部抜粋したものを出力結果 1 に表す。

出力結果 1: LiDAR データ (一部抜粋)

```
1 Ultra simple LIDAR data grabber for SLAMTEC
  LIDAR.
2 Version: 2.1.0
3 SLAMTEC LIDAR S/N:
  B5F6E1F4C2E398C0BCEA9AF33B2D4806
4 Firmware Ver: 1.01
5 Hardware Rev: 18
6 SLAMTEC Lidar health status : 0
7 theta: 0.26 Dist: 01206.00 Q: 47
8 theta: 0.84 Dist: 01207.00 Q: 47
9 theta: 1.41 Dist: 01208.00 Q: 47
10 theta: 1.98 Dist: 01208.00 Q: 47
11 theta: 2.54 Dist: 01209.00 Q: 47
12 theta: 3.12 Dist: 01210.00 Q: 47
13 ...
14 ...
```

LiDAR センサーの出力について説明する。1 行目から 6 行目にはヘッダー情報が記録される。このヘッダー情報には、LiDAR センサーのバージョンやハードウェアの詳細、システムのステータス情報が含まれている。ヘッダー情報の後に、実際に LiDAR センサーが測定したデータが続く。データには、「theta」、「Dist」、および「Q」の 3 つのパラメータが出力される。「theta」は LiDAR センサーから発射されるレーザーの方向を示す。「Dist」は LiDAR センサーから物体までの距離を示す。「Q(quality)」は測定品質を表している。本稿で使用した LiDAR センサーは、「Q」の値はほとんど変化せず基本的に同じ値を出力する。「Dist」が正しく取得できていない場合、「Q」の値は 0 を出力する。

本稿で使用する LiDAR センサーでは、「theta」は 0.01 度刻みで、「Dist」は 1[mm] の精度で出力する。取得した LiDAR データから各測定データの「theta」と「Dist」の値のみを取得する。

次に、各連続する測定データ間の角度差および距離差を計算する。図 2 に角度差の出力例を示す。

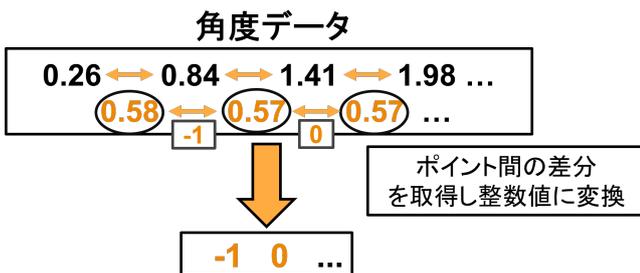


図 2: 角度差の出力

角度差は、取得した測定データの角度から直前の測定データの角度を引いて求める。加えて、取得した角度差同士でもう一度差分を取得する。取得した角度差は整数形式で表現する。理由としては、少数をバイナリに変換する際に、丸め誤差が発生してしまい正確に表現できないためである。LiDAR データが 0.01 度刻みで「theta」を取得するため、整数に変換する際には「theta」に 100 を乗算する。

図 3 に距離差の出力例を示す。

距離差は、取得した測定データの距離から直前の測定データの距離を引き、符号付き整数で表現する。

● 角度差の差分と距離差の出力

最初の測定データは初期値として扱い、それ以降の計算の基点とする。続いて角度差と距離差を出力する。これ以降は角度差の差分と距離差を出力しバイナリに変換していく。図 4 は、出力結果 1 において差分を計算し出力した結果である。初期値は出力結果 1 では角度が 26、距離が 1206 となる。角度差と距離差はそれぞれ 58 と 1 を出力し、角

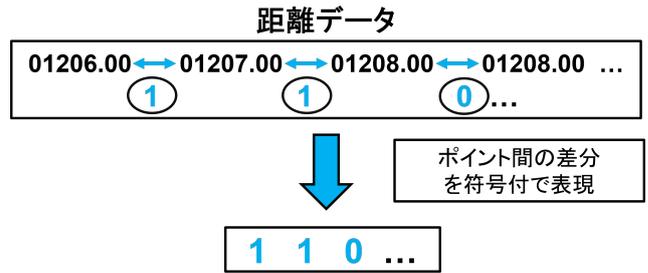


図 3: 距離差の出力

度差の差分と距離差は-1 と 1 が出力される。それ以降は角度差の差分と距離差が継続的に出力される。

角度と距離の初期値、角度差と距離差、角度差の差分と距離差の順で出力されるのは角度で差分の差分を取得しているためである。初期値を基準に差分を加算し、さらに差分の差分を反映することで、元のデータに解凍することができる。

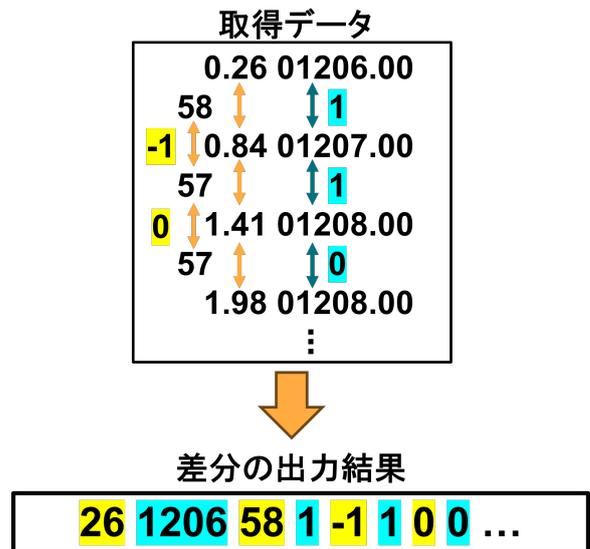


図 4: 角度差と距離差の出力

● 出力データのバイナリ変換と送信

LiDAR データ一周分の差分を計算し、出力した差分データをバイナリに変換しサーバーへ送信する。また、次の一周の測定データから差分計算、バイナリ変換、送信を繰り返す。差分計算したデータを送信する際に、決められたビット数でバイナリデータにエンコードする。エンコードする際に先頭に判定ビットとして 1 ビットを追加し、角度と距離はそれぞれ異なるルールでバイナリに変換する。

図 5 に角度と距離のデータにおける判定ビットの処理について示す。角度データは 9 ビットまたは 3 ビットで表現し、判定ビットを加えて合計 10 ビットまたは 4 ビットで表現する。9 ビットで表現する理由は以下の 3 つである。1 つ目に、本稿で使用する LiDAR センサーは標準ステップ

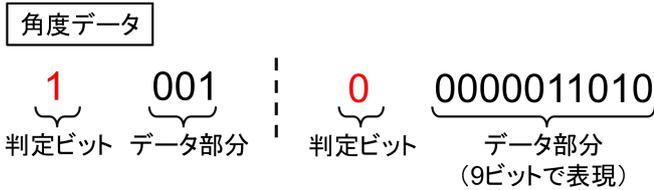


図 5: 判定ビットを用いたビット変換

角が 0.72 度であり、整数に変換すると 72 になる。これにより、0 から 72 の範囲の値を表現できる必要がある。2 つ目に、角度差の差分においては負数が含まれるため、符号付き整数として表現する必要がある。3 つ目は範囲を超えた値に対処するためである。0 から 72 の範囲かつ、負数を含めれば 8 ビットで表現ができる。しかし実測値には、8 ビットの範囲では表現できない値が出力される場合があるため 9 ビットで表現する。

3 ビットで表現する理由としては、角度差の差分において -4 から 3 の範囲で表現できる値が多く出力されるためである。3 ビットで表現する有効性を検証するために、LiDAR センサーで 30[s] 計測した LiDAR データを 5 つ用意した。LiDAR データはそれぞれ約 5.4[MB] である。それらのデータを 2 ビットから 8 ビットで圧縮処理を行った。その結果、どの LiDAR データにおいても、3 ビットで表現した場合に圧縮率が最も高かった。表 1 に 5 つのデータを 2 から 8 のビット幅で圧縮した際の結果を表示する。

表 1: 角度差のビット幅による平均圧縮率の比較

| ビット数 | 平均圧縮率 [%] |
|-------|-------------|
| 2 ビット | 6.95 |
| 3 ビット | 6.92 |
| 4 ビット | 7.13 |
| 5 ビット | 7.33 |
| 6 ビット | 7.54 |
| 7 ビット | 7.79 |
| 8 ビット | 8.10 |

3 ビットで表現できる値は先頭に判定ビットとして 1 を追加し、それ以外の値に判定ビットとして 0 を追加する。

距離データは 15 ビットで表現する。15 ビットで表現する理由としては以下の 2 つである。1 つ目は、本稿で用いる LiDAR センサーが最大で半径 12[m] の範囲で測距できるためである。出力される最大値としては 12000 が出力される。したがって 0 から 12000 の範囲で表現できる必要がある。2 つ目に、距離差の表現において負数が含まれるためである。以上の理由で 15 ビットで表現する。なお、使用する環境によって、12000 が必ず測定されるわけではない。測定された LiDAR データの最大値にもとづくビット表現により、15 ビットよりも少ないビット数で表現できる。

● 解凍方法

図 5 に圧縮データの解凍について示す。送信されたデー

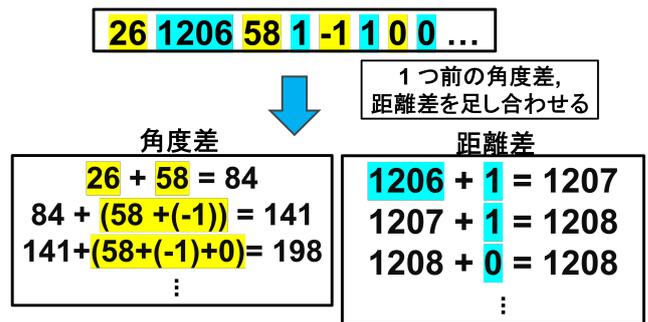


図 6: 圧縮データの解凍

タを解凍する際は、判定ビットにもとづいて解凍を行う。圧縮されたデータは角度に関するデータと距離に関するデータが交互にエンコードされている。角度、距離の順番を用いて、判定ビットが 0 の時の処理を切り替える。デコード後は、差分を足し合わせて値を戻していく。初期値は処理を行わずそのまま出力する。図 5 では 26 と 1206 が初期値にあたる。次に 2 個目の測定データを計算する。ここではそれぞれの初期値と差分を足し合わせ出力する。それ以降は 1 つ前の測定データと差分を足し合わせ、値を圧縮前に戻す。角度の復元では、角度差の差分を用いるため、1 つ前の測定データと差分の累積を足し合わせ復元する。

ユースケース・シナリオ

飲食店で利用されるケータリングロボットを想定する。配膳を行うロボットには、人や障害物を検知して回避するために LiDAR を搭載する。LiDAR データを処理して回避の判断やモニタリングを行うためにサーバーにデータを送信することを想定する。LiDAR センサーは短時間で膨大なデータを生成する [12]。データ量が大きいと送信や処理に時間がかかり、障害物の検知や回避が遅れてしまう。提案手法を適用することで、生成された LiDAR データを圧縮し、通信にかかる時間を短縮することができる。

図 7 はユースケース・シナリオの概要図を示す。

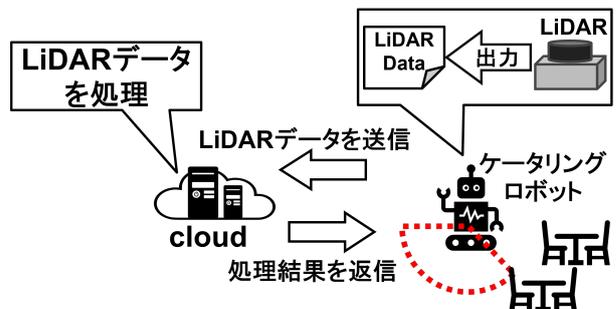


図 7: ユースケース概要図

4. 実装

圧縮を行うソフトウェア「LiDARcomp」と解凍を行うソフトウェア「LiDARdecomp」はPythonを用いて実装する。図8は実装したソフトウェアの概要図である。この

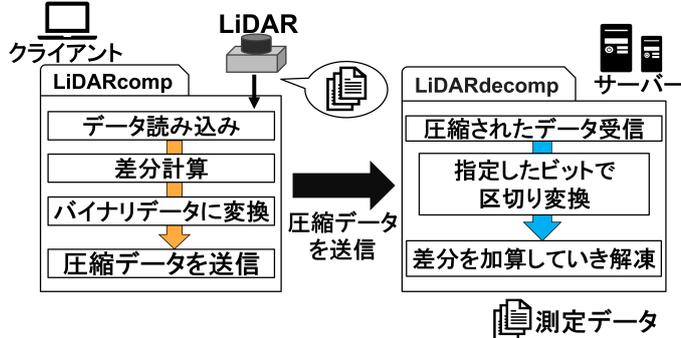


図 8: 提案の実装図

ソフトウェアでは、LiDAR データから、「theta」 と 「dist」 の値を取得し測定データ間の角度差の差分と距離差を計算する。計算した角度差の差分と距離差をバイナリに変換し送信する。バイナリに変換する際に、角度差の差分では、判定ビットの1ビットに加え3ビットまたは、9ビットで値を表現する。距離差では、15ビットで値を表現する。

また、SLAMTEC 社の RPLiDAR C1 を用いて LiDAR データを取得する。LiDAR データを取得するにあたって SLAMTEC 社の SDK を使用した*1。

5. 評価実験

評価実験は東京工科大学の敷地内で行う。以下の環境で LiDAR センサーが移動しながら取得した場合と、LiDAR センサーを移動させずに設置して取得した場合で LiDAR データを取得する。取得したデータを提案手法で圧縮し圧縮率を評価する。圧縮率は、圧縮後のサイズを圧縮前のサイズで割り、100 を乗算し [%] で表す。LiDAR センサーを移動させずに設置してデータを取得する際は、移動しながら取得した際にかかった時間を計測して、その時間でデータを収集する。

● 研究棟 A910

図9に実験ルートと環境を示す。

椅子と机の間を蛇行するように移動しデータを取得する。この環境では狭い空間かつ障害物の数が他の環境よりも多い特徴がある。

● 研究棟 A 4 階 ラウンジ

図10に実験ルートと環境を示す。

円形の部屋を一周しデータを取得する。この環境では他の環境と比べて広い空間であり、学生が自由に利用できるスペースのため、人通りが多い特徴がある。

● 研究棟 A 9 階 廊下

図11に実験ルートと環境を示す。

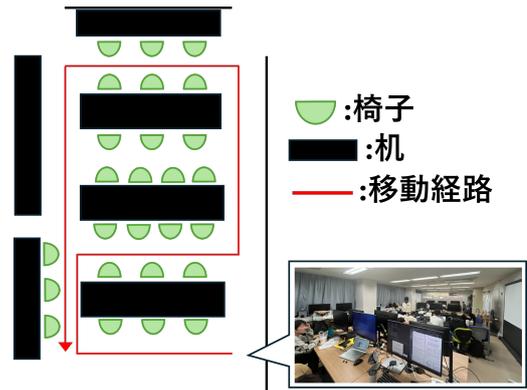


図 9: 研究棟 A910 での実験ルート

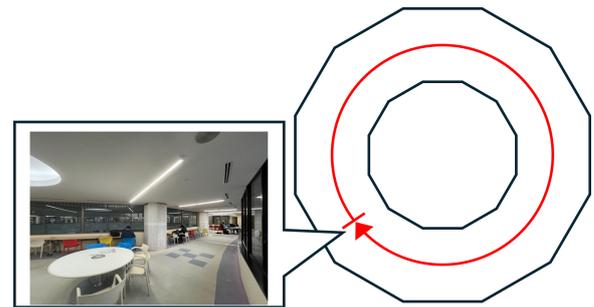


図 10: 研究棟 A 4 階 ラウンジでの実験ルート



図 11: 研究棟 A 9 階 廊下での実験ルート

研究棟 A9 階廊下を直進しデータを取得する。この環境では他の環境と比べ障害物が少ない特徴がある。

実験環境

評価実験は図12の環境で行う。

● LiDAR

SLAMTEC 社の RPLidar C1 を使用し LiDAR データを取得する。研究棟 A910, 研究棟 A4 階ラウンジ, 研究棟 A9 階廊下の3種類において LiDAR データの取得を行う。

● サーバー

サーバーには、Ubuntu24.04LTS をインストールした仮想マシンを使用する。受信したデータを保存するデータベースには MongoDB を使用する。

*1 https://github.com/Slamtec/rplidar_sdk

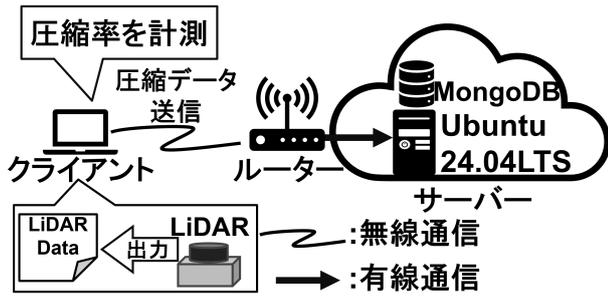


図 12: 評価実験の環境

● クライアント

クライアントには、Dell 社の「Inspiron 5402」を用いて LiDAR が生成したデータをサーバーに送信する。データの送信には、Wi-Fi を利用する。

● Wi-Fi ルーター

Wi-Fi ルーターとして、ASUS 社の「ASUS TUF-AX5400」を使用する。Wi-Fi ルーターとサーバーは 1[Gbps] 対応のケーブルで有線接続されている。

実験結果と分析

各環境で、センサーを移動しながら取得する場合と移動しないで取得する場合の両方で 5 回ずつ測定を行う。

● 研究棟 A910

図 13 に圧縮結果を表示する。移動しながらデータを取

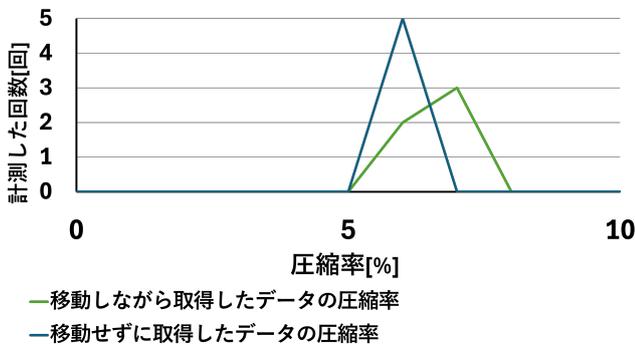


図 13: 研究棟 A910 で取得したデータの圧縮率

得した場合の圧縮前の平均サイズは約 11.16[MB] で圧縮後の平均サイズは約 798.78[KB] となった。圧縮率は平均で、約 6.98[%] となった。移動しないでデータを取得した場合の圧縮前の平均サイズは約 11.43[MB] で圧縮後の平均サイズは約 813.80[KB] となった。圧縮率は平均で、約 6.95[%] となった。

● 研究棟 A 4階 ラウンジ

図 14 に圧縮結果を表示する。

移動しながらデータを取得した場合の圧縮前の平均サイズは約 21.55[MB] で、圧縮後の平均サイズは約 1.52[MB] となった。圧縮率は平均で、約 7.07[%] となった。移動しないでデータを取得した場合の圧縮前の平均サイズは約

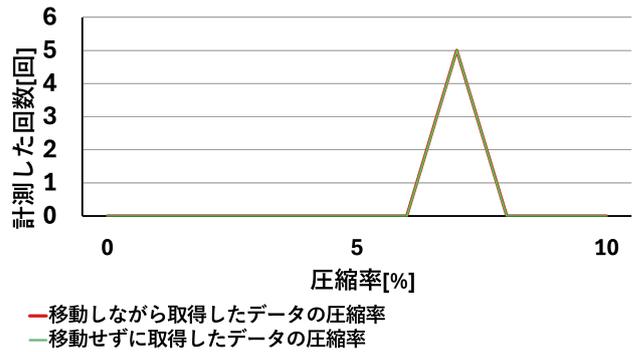


図 14: 研究棟 A ラウンジで取得したデータの圧縮率

22.83[MB] で、圧縮後の平均サイズは約 1.61[MB] となった。圧縮率は平均で、約 7.06[%] となった。

● 研究棟 A 9階 廊下

図 15 に圧縮結果を表示する。

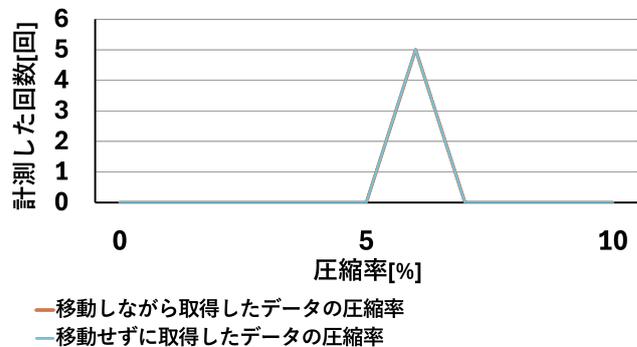


図 15: 研究棟 A 廊下で取得したデータの圧縮率

移動しながらデータを取得した場合の圧縮前の平均サイズは約 13.21[MB] で、圧縮後の平均サイズは約 912.61[KB] となった。圧縮率は平均で、約 6.74[%] となった。移動しないでデータを取得した場合の圧縮前の平均サイズは約 12.92[MB] で、圧縮後の平均サイズは約 886.85[KB] となった。圧縮率は平均で、約 6.70[%] となった。

● 分析

提案された圧縮手法を使用した場合、圧縮率は約 7[%] 程になった。これは、提案手法が LiDAR センサー依存の部分である角度データに重きを置いているためである。環境依存である距離データは 15 ビット固定で表現している。そのため、環境が変わったことによる圧縮率の変化に大きな差はなかった。

6. 議論

提案手法では、3 ビット、9 ビット、15 ビットのいずれかでバイナリ処理を行っている。4 ビットから 8 ビット、10 ビットから 14 ビットの範囲を条件分岐として組み込むことでさらに柔軟に圧縮が行える。しかし、これにより判定ビットのビット数が増加するため、状況によっては圧縮効率が低下し、かえってデータ量が増えてしまう場合もある。

提案手法では、距離データはすべて 15 ビット固定で表現している。このアプローチにより、15 ビットで表現できる値よりも小さい値が出力された場合、余ったビットが 0 でパディングされてしまう。つまり、余剰なビットが発生してしまう。距離データは環境に依存するため、角度データを圧縮するように、ビットを決めて圧縮する方法が必ずしも良くなるとは限らない。そこで、距離データから環境の特徴を出力し、圧縮する際にその特徴に合わせてビット数を変えていく。例えば、評価実験の研究棟 A9 階廊下の障害物が少ない環境であれば、壁や障害物が続くため、得られる差分は他の環境に比べて小さい値が続く。このような特徴を捉えることで、環境依存の距離データを柔軟に圧縮することができる。

7. おわりに

本稿では、LiDAR センサーで取得した測定データ間の差分を用いた可逆圧縮手法を提案した。LiDAR センサーが出力する測定データのデータ量の削減を課題として取り上げた。評価実験では、研究棟 A910, 研究棟 A4 階ラウンジ, 研究棟 A9 階廊下の 3 種類において測定データの取集を行う。各環境では、センサーを移動しながら取得する場合と、移動しないで取得する場合の両方で測定を行う。実験結果としては、全ての環境で約 7[%] 程の圧縮率であった。

参考文献

- [1] Guo, P., Shi, H., Wang, S., Tang, L. and Wang, Z.: An ROS Architecture for Autonomous Mobile Robots with UCAR Platforms in Smart Restaurants, *Machines*, Vol. 10, No. 10 (online), DOI: 10.3390/machines10100844 (2022).
- [2] Tallavajhula, A.: Lidar Simulation for Robotic Application Development: Modeling and Evaluation., PhD Thesis, Carnegie Mellon University, USA (2018).
- [3] Ivanov, S. and Webster, C.: Restaurants and robots: public preferences for robot food and beverage services, *Journal of Tourism Futures*, Vol. 9, No. 2, pp. 229–239 (online), DOI: 10.1108/JTF-12-2021-0264 (2023).
- [4] Shimmura, T., Ichikari, R., Okuma, T., Ito, H., Okada, K. and Nonaka, T.: Service robot introduction to a restaurant enhances both labor productivity and service quality, *Procedia CIRP*, Vol. 88, pp. 589–594 (online), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.05.103> (2020). 13th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering, 17-19 July 2019, Gulf of Naples, Italy.
- [5] Seyitoğlu, F., Ivanov, S., Atsız, O. and İbrahim Çifçi: Robots as restaurant employees - A double-barrelled detective story, *Technology in Society*, Vol. 67, p. 101779 (online), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2021.101779> (2021).
- [6] Garcia-Haro, J. M., Oña, E. D., Hernandez-Vicen, J., Martinez, S. and Balaguer, C.: Service Robots in Catering Applications: A Review and Future Challenges, *Electronics*, Vol. 10, No. 1 (online), DOI: 10.3390/electronics10010047 (2021).
- [7] Piazza, E., Lima, P. U. and Matteucci, M.: Performance Models in Robotics With a Use Case on SLAM, *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. 7, No. 2, pp. 4646–4653 (online), DOI: 10.1109/LRA.2022.3151162 (2022).
- [8] Jeyabal, S., Sachinathana, W. K. R., Bhagya, S. M., Samarakoon, P., Elara, M. R. and Sheu, B. J.: Hard-to-Detect Obstacle Mapping by Fusing LIDAR and Depth Camera, *IEEE Sensors Journal*, pp. 1–1 (online), DOI: 10.1109/JSEN.2024.3409623 (2024).
- [9] Jhe-Wei Lin, Cheng-Yan Siao, T.-H. C. R.-G. C.: A Novel Automatic Meal Delivery System, *Intelligent Automation & Soft Computing*, Vol. 29, No. 3, pp. 685–695 (online), DOI: 10.32604/iasc.2021.018254 (2021).
- [10] Qaisar, M. W., Shakeel, M. M., Kedzia, K., Machado, J. M. and Jan, A. Z.: Localization-based waiter robot for dynamic environment using Internet of Things, *International Journal of Information Technology*, (online), DOI: 10.1007/s41870-023-01723-8 (2024). In press.
- [11] Tonmoy, A. B. R., Zinan, M. D. S., Sultan, S. and Sarker, A.: A comparative study on LIDAR and Ultrasonic Sensor for Obstacle Avoidance Robot Car, *2023 International Conference on Advances in Electronics, Communication, Computing and Intelligent Information Systems (ICAECIS)*, pp. 582–587 (online), DOI: 10.1109/ICAECIS58353.2023.10170626 (2023).
- [12] Sato, K., Shinkuma, R., Sato, T., Oki, E., Iwai, T., Kanetomo, D. and Satoda, K.: Prioritized Transmission Control of Point Cloud Data Obtained by LIDAR Devices, *IEEE Access*, Vol. 8, pp. 113779–113789 (online), DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3003753 (2020).
- [13] Behroozpour, B., Sandborn, P. A. M., Wu, M. C. and Boser, B. E.: Lidar System Architectures and Circuits, *IEEE Communications Magazine*, Vol. 55, No. 10, pp. 135–142 (online), DOI: 10.1109/MCOM.2017.1700030 (2017).
- [14] Zhang, R., Li, S., Lu, W., Sun, J., Zhang, Y. and Ge, W.: Coherent heterodyne FMCW lidar based on combined single/double sideband modulation detection technology, *Infrared Physics Technology*, Vol. 137, p. 105181 (online), DOI: <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2024.105181> (2024).
- [15] Gurav, G. and Balakrishnan, P.: Obstacle Collision Warning Using Ultrasonic and LiDAR Sensor Fusion, *2023 IEEE 11th Region 10 Humanitarian Technology Conference (R10-HTC)*, pp. 47–52 (online), DOI: 10.1109/R10-HTC57504.2023.10461728 (2023).
- [16] Kelemen, M., Virgala, I., Kelemenová, T., Mikova, L., Frankovský, P., Lipták, T. and Lőrinc, M.: Distance measurement via using of ultrasonic sensor, *Journal of Automation and Control*, Vol. 3, No. 3, pp. 71–74 (2015).
- [17] Bui, G., Calyam, P., Morago, B., Antequera, R. B., Nguyen, T. and Duan, Y.: LIDAR-based virtual environment study for disaster response scenarios, *2015 IFIP/IEEE International Symposium on Integrated Network Management (IM)*, pp. 790–793 (online), DOI: 10.1109/INM.2015.7140377 (2015).
- [18] Roriz, R., Silva, H., Dias, F. and Gomes, T.: A Survey on Data Compression Techniques for Automotive LiDAR Point Clouds, *Sensors*, Vol. 24, No. 10 (online), DOI: 10.3390/s24103185 (2024).
- [19] Isenburg, M.: LASzip: lossless compression of LiDAR data, *Photogrammetric engineering and remote sensing*, Vol. 79, No. 2, pp. 209–217 (2013).
- [20] Rusu, R. B. and Cousins, S.: 3D is here: Point Cloud Library (PCL), *2011 IEEE International Conference*

- on Robotics and Automation*, pp. 1–4 (online), DOI: 10.1109/ICRA.2011.5980567 (2011).
- [21] Graziosi, D., Nakagami, O., Kuma, S., Zaghetto, A., Suzuki, T. and Tabatabai, A.: An overview of ongoing point cloud compression standardization activities: video-based (V-PCC) and geometry-based (G-PCC), *APSIPA Transactions on Signal and Information Processing*, Vol. 9, p. e13 (online), DOI: 10.1017/AT-SIP.2020.12 (2020).
- [22] Ojanperä, T., Mäkelä, J., Majanen, M., Mämmelä, O., Martikainen, O. and Väisänen, J.: Evaluation of LiDAR data processing at the mobile network edge for connected vehicles, *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, Vol. 2021, No. 1, p. 96 (online), DOI: 10.1186/s13638-021-01975-7 (2021).
- [23] Houshiar, H. and Nüchter, A.: 3D point cloud compression using conventional image compression for efficient data transmission, *2015 XXV International Conference on Information, Communication and Automation Technologies (ICAT)*, pp. 1–8 (online), DOI: 10.1109/ICAT.2015.7340499 (2015).
- [24] Otsu, R., Shinkuma, R., Sato, T. and Oki, E.: Data-Importance-Aware Bandwidth-Allocation Scheme for Point-Cloud Transmission in Multiple LIDAR Sensors, *IEEE Access*, Vol. 9, pp. 65150–65161 (online), DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3075275 (2021).
- [25] Kammerl, J., Blodow, N., Rusu, R. B., Gedikli, S., Beetz, M. and Steinbach, E.: Real-time compression of point cloud streams, *2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp. 778–785 (online), DOI: 10.1109/ICRA.2012.6224647 (2012).
- [26] Tu, C., Takeuchi, E., Miyajima, C. and Takeda, K.: Compressing continuous point cloud data using image compression methods, *2016 IEEE 19th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, pp. 1712–1719 (online), DOI: 10.1109/ITSC.2016.7795789 (2016).