

共振ミラー方式三次元測域センサによる移動ロボットの環境認識

○ 佐々木 孔明 ^{†1}, 大矢 晃久 ^{†1}, 坪内孝司 ^{†1}

Environmental Recognition using 3D LIDAR with Resonant Mirror for Mobile Robots

○ Komei SASAKI ^{‡1}, Akihisa OHYA ^{‡1}, Takashi TSUBOUCHI ^{‡1}

Abstract— This paper describes measurement results from a prototype 3D LIDAR developed by Hokuyo Automatic Co., LTD. We took measurements of indoor and outdoor environment using the 3D LIDAR mounted on a mobile robot. We present how objects such as humans, trees, and ground appear in the laser measurement.

1. はじめに

移動ロボットが周辺環境の三次元形状を取得する方法は様々提案されている．現在使われている三次元形状を計測するセンサとして，Velodyne 社の HDL-32ELIDAR(以下 HDL-32E) が挙げられる [1]．このセンサは，32 個のレーザー距離センサを水平方向に回転させることで水平全方位 360 [度] と垂直視野 41.3 [度] の三次元形状の計測を実現している．最大計測距離は 70 [m] と広範囲であり，防塵防滴仕様と非常に高性能である．しかし HDL-32E の重量は 1.2 [kg] と重く，価格も数百万円と非常に高価であるため，小型の移動ロボットに搭載することは難しい．そのため，移動ロボットが屋内外の三次元形状を計測するための小型センサは大いに必要とされている．現在，北陽電機株式会社では，三次元形状を計測可能な小型で安価な三次元測域センサを開発中である [2]．

2. 関連研究

移動ロボットが三次元形状を計測し，障害物回避や物体認識に使用する研究は盛んに行われている．三次元点群を利用する研究として，菊池らは HDL-32E を利用して計測した点群をクラスタリングし，点群の高さや横幅から着座状態の人間を検出する研究を行っている [3]．この研究では，三次元形状を獲得するのに高価な HDL-32E を必要としている．また，西川らは二次測域センサをピッチ方向に揺動させることで三次元形状を計測し，障害物を検出する研究を行っている [4]．この研究では，二次測域センサを揺動させるためにロボットを停止させる必要がある．本研究では，安価かつロボットを停止させることなく三次元形状を計測可能な北陽電機社製の三次元測域センサを使用することでこれらの問題を解決する．本稿では，三次元測域センサを移動ロボットに搭載し，屋内外様々な環境で計測を行った結果を述べる．

3. 三次元測域センサ

3.1 試作機の仕様

本章では，三次元測域センサ試作機の仕様について述べる．Fig. 1 に三次元測域センサと二次元測域センサ"UTM-30LX"との比較を示す．三次元測域センサはレーザー発光部，受光部，共振ミラーが黒色のカバーで覆われている．前面には起動状態，通信状態によって点灯状態が変化する LED が 4 つ付いている．センサ後部はアルミケースとなっており，電源回路，センサ制御回路が入っている．通信用ケーブルとして，



Fig. 1 UTM-30LX(left) and 3D LIDAR (right)

Table 1 Specification of 3D LIDAR

Size	H110×W70×D95 [mm]
Weight	730 [g]
Detection Range	20 [m]
Horizontal Range	210 [deg]
Vertical Range	40 [deg]
	Upward:35 [deg]
	Downward:5 [deg]
Scanning Rate	53280 [pt/s]
Horizontal Scanning Speed	50 [ms]
Vertical Scanning Speed	0.84 [ms]

電源供給用ケーブル，100baseTXEthernet ケーブル，用途未定の通信用ケーブルの 3 本がアルミケース上部から垂直に出ている．Table 1 に三次元測域センサの仕様を示す．有効計測範囲は 20[m] であり，水平方向の走査範囲は 210[deg]，垂直方向の走査範囲は上方向に 35[deg]，下方向に 5[deg] の合計 40[deg] である．

3.2 三次元点形状得原理

三次元測域センサは，赤外線レーザーを発光し，反射光が戻ってくるまでの時間を計測することで物体までの距離を計測する．Fig. 2 に，レーザー光による走査の軌跡を示す．上下に振動する共振ミラーでレーザー光を反射させ，垂直方向の走査を行う．共振ミラーは 1200 [fps] で上下に走査している．共振ミラーが 1 回振動する間に 74 回レーザーが発光し距離を計測する．共振ミラーが垂直方向の走査を行いながら，同時にモータによって水平方向に 20 [fps] で回転する．これにより，三次元形状の計測を実現している．三次元測域センサでは，一点の計測のことをスポット，一回の垂直走査のことをライン，一回の水平方向の走査をフィールドと呼ぶ．

^{†1} 筑波大学 大学院 システム情報工学研究科

^{‡1} Graduate School of Systems and Information Engineering,
University of Tsukuba

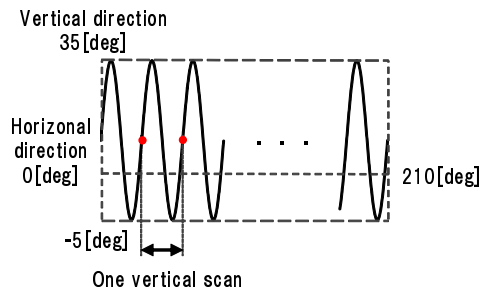


Fig. 2 Trace of the scanning laser



Fig. 3 The Mobile robot

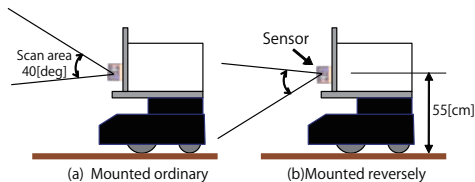


Fig. 4 Measuring range of 3D LIDAR

3.3 インタレース機能

垂直方向と水平方向の走査の時間は同期しており、三次元測域センサは毎回同じ方向しか計測しない。三次元測域センサをには、水平方向の走査速度を変化させ、垂直方向の走査の位置をフィールド毎に変化させる機能がある。これをインタレース機能と呼ぶ。本センサでは、インタレース無し、もしくはインタレース 2, 3, 4 の 4 種類を選択することができる。インタレースを 2 に設定すると、共振ミラーが 60 と 1/2 回振動する間に水平方向に 1 回転する。この時、水平方向に同じ位置に戻ってきた時、共振ミラーは 1/2 回分振動した位置にいる。そのまま水平方向に走査することで、直前の水平方向の計測と違う方向を計測できるようになる。同様に、インタレースを 4 に設定すると、共振ミラーが 60 回と 1/4 振動する間に水平方向に 1 回転する。水平方向に同じ位置に戻ってきた時、共振ミラーは 1/4 回分振動した位置にあり、更に水平方向に 3 回走査することで、各水平方向の走査毎に違う方向を計測できるようになる。この時、共振ミラーの周期が元に戻るまでの水平方向の走査のことをフレームと呼ぶ。

4. 三次元形状計測実験

本章では、ロボットに搭載した三次元測域センサを用いて三次元形状の計測を行った結果について述べる。Fig. 3 に実験に使用したロボットの全体図を示す。ロボットの走行系は独立 2 輪駆動式であり、動輪 2 輪、従輪 1 輪の合計 3 輪を備えている。ロボットの大きさは幅 50 [cm] 縦 65 [cm] 高さ 86



Fig. 5 Experimental environment (Human and bicycle)

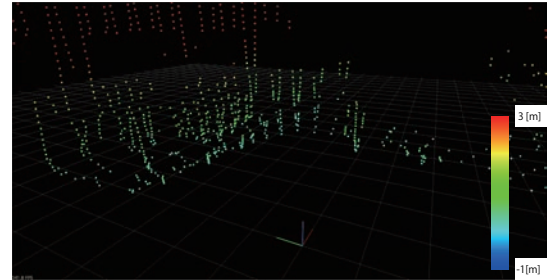


Fig. 6 Result of measurement human and bicycle (interlace1)

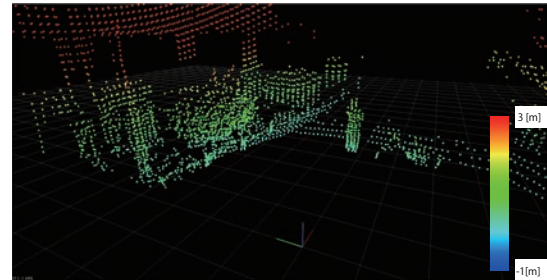


Fig. 7 Result of measurement human and bicycle (interlace4)

[cm] であり、重量は 38 [kg] である。Fig. 4 のように、三次元測域センサをロボット中心から前方に 15 [cm]、高さ 55 [cm] の位置に固定した。三次元測域センサは、上下方向の走査範囲が異なるため、取り付ける向きによって計測対象を変更できるようにした。本実験では、Fig. 4 の (a) ように上下順方向に固定することで主に上方向を計測する実験と、Fig. 4 の (b) ように上下逆方向に固定することで主に下方向を計測する実験を行った。なお、今回実験に使用した三次元センサ試作機では、センサ近傍にノイズを検出してしまふ。本章で示す実験結果は、すべてノイズを表示していない実験結果である。

4.1 人物計測実験

三次元測域センサを上下順方向に固定し、人間と自転車を計測する実験を行った。Fig. 5 に実験環境を示す。ロボットの前 4 [m] の位置に人間と自転車を配置し、三次元測域センサで計測を行った。Fig. 6 にインタレースを 1 に設定した場合の計測結果を、Fig. 7 にインタレースを 4 に設定した場合の計測結果を示す。Fig. 6 よりインタレースを 1 に設定した場合、4[m] 先の人間は 1 ラインでしか計測されないことがわかった。自転車も計測できているが、計測点は少なく、車輪の位置を特定することは難しい。Fig. 7 よりインタレースを 4 に設定した場合、人間の膝より上の形状がはっきりと計測されている。自転車も計測点が増え、形状がより判断できるようになった。



Fig. 8 Experimental environment (street trees)



Fig. 11 Experimental environment (corridor)

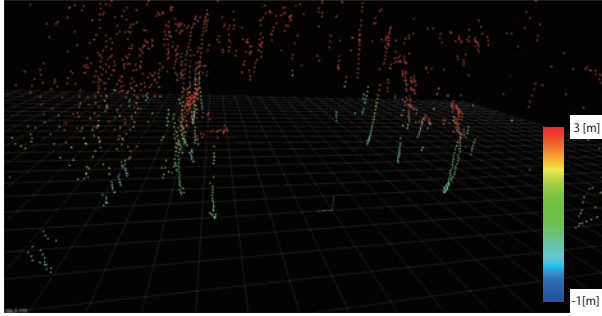


Fig. 9 Result of measurement street trees (interlace1)

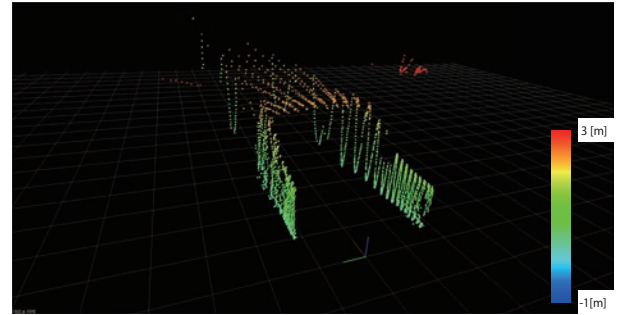


Fig. 12 Result of measurement corridor (interlace1)

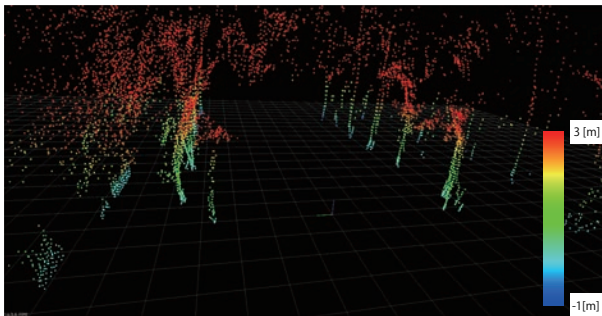


Fig. 10 Result of measurement street tree (interlace4)

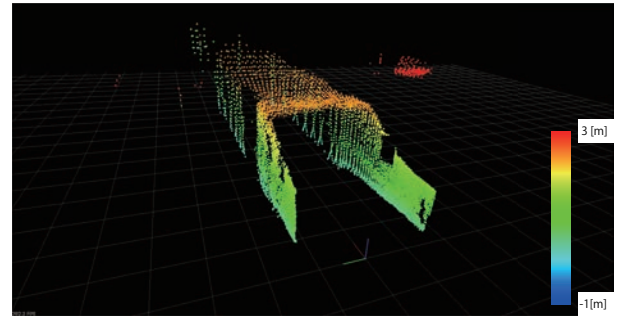


Fig. 13 Result of measurement corridor (interlace4)

4.2 街路樹計測実験

三次元測域センサを上下順方向に固定し、街路樹を計測する実験を行った。Fig. 8 に実験環境を示す。街路樹のある道の中央にロボットを配置し、三次元測域センサで計測を行った。Fig. 9 にインタレースを 1 に設定した場合の計測結果を、Fig. 10 にインタレースを 4 に設定した場合の計測結果を示す。Fig. 9 よりインタレースを 1 に設定した場合、街路樹の幹は 1 ラインでしか計測できていない。Fig. 10 よりインタレースを 4 に設定した場合、木の幹の計測点が増え、太さや形状が認識できるようになった。

4.3 廊下計測実験

三次元測域センサを上下順方向に固定し、廊下を計測する実験を行った。Fig. 11 に実験環境を示す。筑波大学 L 棟 4 階にロボットを配置し、三次元測域センサで計測を行った。Fig. 12 にインタレースを 1 に設定した場合の計測結果を、Fig. 13 にインタレースを 4 に設定した場合の計測結果を示す。Fig. 11 より廊下の天井、両側の壁を計測していることがわかる。Fig. 13 よりインタレースを 4 に設定すると、より高密度に廊下の天井、壁を計測できるようになった。

4.4 人物計測実験

三次元測域センサを上下逆方向に固定し、人間と地面を計測する実験を行った。Fig. 14 に実験環境を示す。ロボットの前方 3 [m] の位置にいる人間を、三次元測域センサで計測を行った。Fig. 15 にインタレースを 1 に設定した場合の計測結果を、Fig. 16 にインタレースを 4 に設定した場合の計測結果を示す。Fig. 15 より、インタレースを 1 に設定すると、3[m] 先の人間は 1 ラインでしか計測されないことがわかった。インタレースを 4 に設定すると、人間の腰より下の形状がはっきりとわかるようになった。

4.5 縁石計測実験

三次元測域センサを上下逆方向に固定し、縁石を計測する実験を行った。Fig. 17 に実験環境を示す。ロボットの前方 1.5 [m] の位置にいる高さ 7 [cm] の縁石を三次元測域センサで計測した。Fig. 18 にインタレースを 1 に設定した場合の計測結果を、Fig. 19 にインタレースを 4 に設定した場合の計測結果を示す。また、Fig. 19 の計測結果のうち、Z 方向 1 [cm] から 10 [cm] の高さにある点のみを表示し、真上から見た結果を Fig. 20 に示す。Fig. 20 より、高さ 7[cm] の縁石を検出していることがわかる。



Fig. 14 Experimental environment (Human)



Fig. 17 Experimental environment (curb stone)

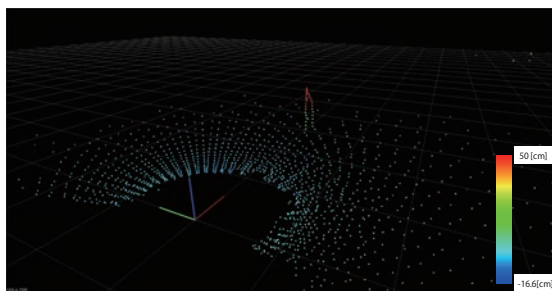


Fig. 15 Result of measurement Human (interlace1)

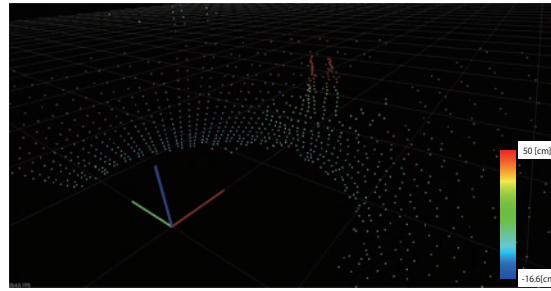


Fig. 18 Result of measurement curb stone (interlace1)

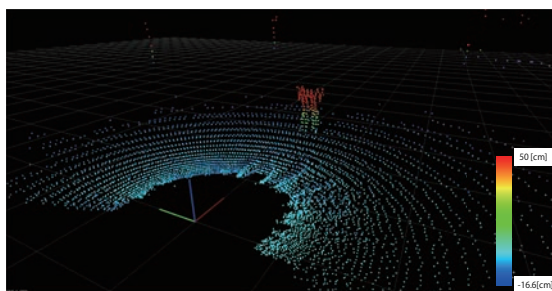


Fig. 16 Result of measurement Human (interlace4)

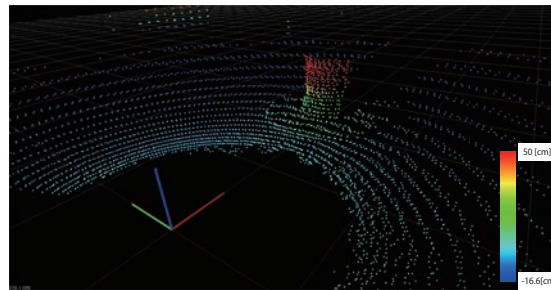


Fig. 19 Result of measurement curb stone (interlace4)

4.6 歩行者専用道路計測実験

三次元測域センサを上下逆方向に固定し、歩行者専用道路を計測する実験を行った。Fig. 21 に実験環境を示す。ロボットを歩行者専用道路の中央に置き、三次元測域センサで計測を行った。Fig. 22 にインタレースを 1 に設定した場合の計測結果を、Fig. 23 にインタレースを 4 に設定した場合の計測結果を示す。Fig. 22 より、インタレースを 1 に設定すると、街路樹の幹は 1 ラインでしか計測できていない。また、右奥にある花壇も十分に計測できていないことがわかる。Fig. 23 より、インタレースを 4 に設定すると、街路樹の太さがわかるようになり、計測結果右奥にある花壇も、より高密度に計測していることがわかる。

4.7 ロボット移動中の計測実験

三次元測域センサを上下逆方向に固定し、ロボットが秒速 0.7[m/s] で移動しながら歩行者専用道路を計測した。Fig. 24 に実験環境を示す。Fig. 25 にインタレースを 4 に設定した場合の計測結果を示す。計測結果は、各フィールド毎にロボットの自己位置推定の結果に基づいて重ねあわせて表示した。移動しながらの計測でも、ロボット前方の人間、街路樹、ベンチの三次元形状を計測できることがわかった。

5. おわりに

本稿では、北陽電機株式会社から提供された三次元測域センサの原理と仕様を述べた。また、三次元測域センサの試作

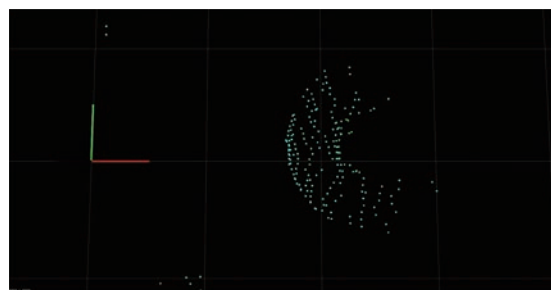


Fig. 20 Result of measurement curb stone (upside)

機を用いて三次元形状を計測し、どのような計測結果が得られるかを述べた。今後は、三次元測域センサを移動ロボットの自律移動に利用していきたいと考えている。

参考文献

- [1] Velodyne LIDAR
<http://velodynelidar.com/lidar/lidar.aspx>
- [2] Katsumi KIMOTO, Norihiro ASADA, Toshihiro MORI, Yoshitaka HARA, Akihisa OHYA, Shin'ichi YUTA: "Development of small Size 3D LIDAR", *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2014.
- [3] 菊池淳, 伊達央, 大川真弥, 滝田好宏, 小林和弘: "三次元 LIDAR を用いた着座状態にある人物の検出", 第 31 回日本ロボット学会学術講演会, 2013.
- [4] 西川徹, 出村公成: "三次元レーザ式測域センサを用いた障害物検出システムの開発", *ロボティクス・メカトロニクス講演会 2014 予稿集*, 2014.



Fig. 21 Experimental environment (plaza)



Fig. 24 Experimental environment (plaza)

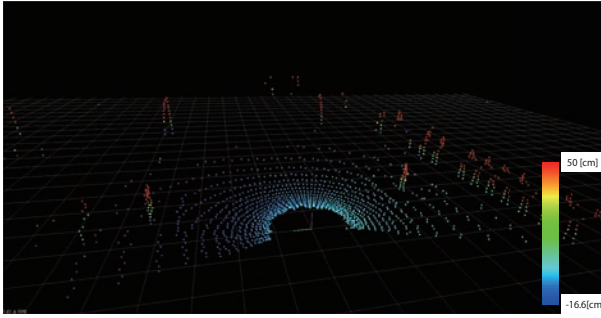


Fig. 22 Result of measurement plaza (interlace1)

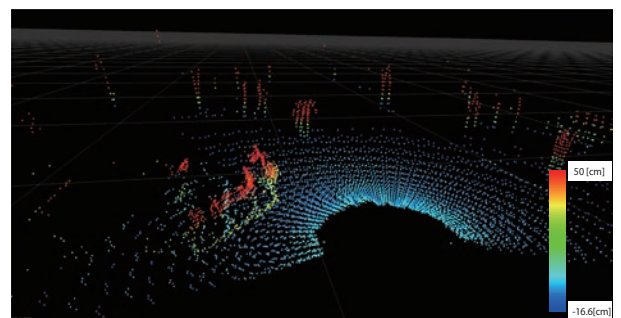


Fig. 25 Result of measurement plaza (interlace4)

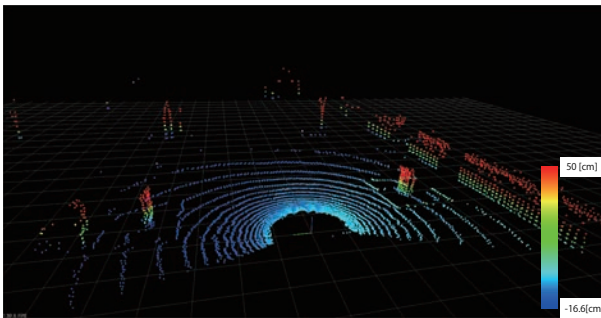


Fig. 23 Result of measurement plaza (interlace4)