

小型3D測域センサの開発と性能確認

○ 竹川 博夫, 木元 克美, 森 利宏 (北陽電機株), 大矢 晃久 (筑波大学), 油田 信一 (芝浦工業大学)

Development of Small Size 3D LIDAR and Performance Assessment

○Hiroo TAKEGAWA, Katsumi KIMOTO, Toshihiro MORI (Hokuyo Automatic Co.,LTD.), Akihisa OHYA(University of Tsukuba), and Shin'ichi YUTA (Shibaura Institute of Technology)

Abstract: We developed a small, lightweight and low cost 3D LIDAR characterized by the three-dimensional scan using a small resonant mirror and a one-axis scanner. We explain about the optical structure, the system configuration, and performance assessment, such as measurement accuracy, of this sensor.

1. 緒言

ロボットは環境マップ上で定められた経路を正しく安全に自律移動するために、家庭内や屋外の作業場、あるいは災害現場等の整備されていない多様な環境条件下においても、空間を正確に認識できる3次元センサが求められている。

現在、市場で入手できる3次元の距離画像を高速に検出するセンサはVelodyne社のHDL-32Eがある。水平方向360度 垂直方向42度のエリアと80mまでの距離を計測するセンサである[1]。しかし、このセンサは無人自動車の自律走行用に開発されたため、価格が高く小型ロボットには搭載できない。そこで、厳しい環境で稼動する各種ロボットが実時間で環境認識に使用できる小型軽量で低コストの3次元測域センサの開発をおこなった[2]。

この論文では、開発したセンサの光学構造、システム構成と性能評価について説明し、最後に今後の課題について論じる。

2. 光学構造

2.1 3次元走査方法

通常の2次元走査型の測域センサは、一軸モータの回転により、容易に180度以上の水平走査を実現している。この2次元走査方法の単純性および利点を維持して、Fig.1に示すように、水平走査モータの上に共振ミラー(ReM:Resonant Mirror)を配置することで3次元走査を可能にした。共振ミラーは、それ自身が非常

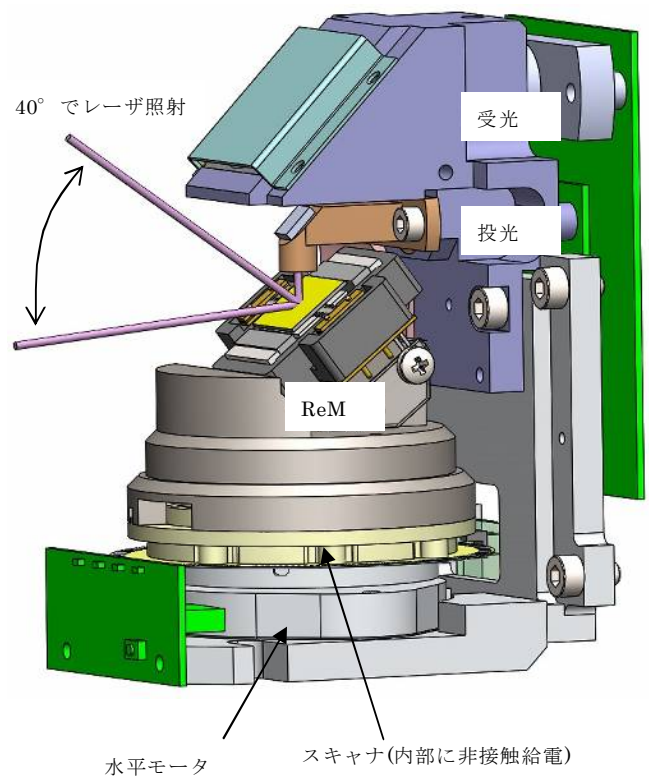


Fig.1. 3次元走査光学ユニット

に小型軽量であるため、従来の水平走査モータで動作可能である。

また、回転体に固定する共振ミラーに電力を供給するため、非接触給電モジュールをスキャナ内部に組み込んだ。これにより、共振ミラーの電源線がモータの回転を妨害することはない。

共振ミラーが一定の振幅角度で振動する駆動周波数は周囲環境条件により変化するので、任意に選択することが出来ない。従って、毎回の水平スキャンで同じ

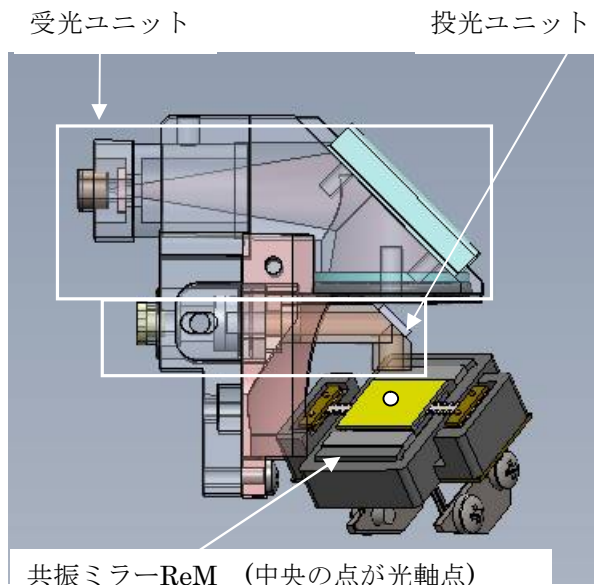


Fig.2 投受光ユニット

方向にレーザを発光させる為に、水平走査スキャナの方を共振ミラーの垂直走査と同期するように制御する。

2.2 レーザ投受光ユニット

本センサは通常の2次元走査型の測域センサと同様に、1対のレーザ投光器および受光器を持っている。レーザ投光器及び受光器はセンサの裏側に配置されておりその回路基板は Fig.1 の右奥の部分で示される。

投光器から照射されたレーザビームは、共振ミラーの上方に設置された小さな鏡によって下向きに反射して折り曲げられ、さらに共振ミラーで反射され、投光信号として出力される。

レーザビームは環境からセンサに戻り、再び共振ミラーで反射され、Fig.2 に記す投光ユニット上部の受光ユニットへ入光する。受光レンズで集光され、受光ミラーによって折り曲げられて受光素子に導かれる。

検出分解能を制限するレーザー・パルス間隔及びレーザーパワーは、クラス 1 レーザー安全基準によって決定される。

2.3 共振ミラーユニット (ReM)

2.3.1 共振ミラーの概要

3D 測域センサのための共振ミラーユニット(ReM)を開発した。このユニットはミラーサイズや共振周波数をセンサの要求事項を基に独自に開発された。

垂直走査範囲はミラー振動の振幅によって決定され、

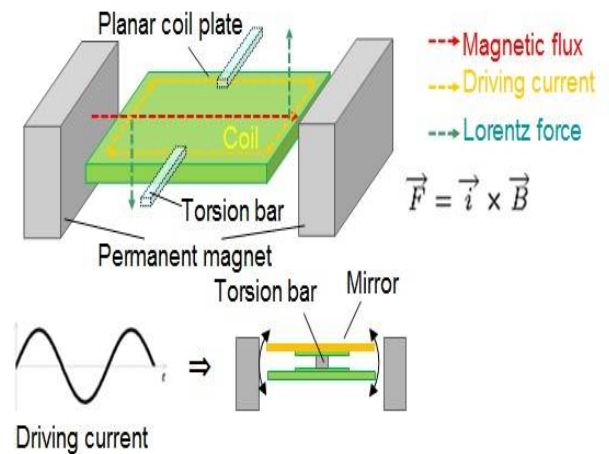


Fig.3 共振ミラーの動作原理

それは、駆動電流の大きさと周波数に依存する。さらに共振周波数特性は温度によって変わるため、一定の振幅を得るためには駆動周波数を温度変化に追従させて制御しなければならない。

共振ミラーユニットが回転する軸の上にあるので、ミラー角度は共振ミラーユニットから定量的に取得することが困難である。そこで、直接ミラーの角度振幅を検知するのではなく、後述するように、センサの背面側で測定パターンのデータを計測して、振幅を評価する手法を採用した。

2.3.2 共振ミラーの原理と構造

共振ミラーは、ねじり梁(Torsion bar)で光学ミラーやプリント基板にエッチングで生成したコイル(Planar coil plate)を支持し、周囲には磁石を配置した Fig.3 の構造を持っている。

ねじり梁はねじれ運動すると同時にコイルに電流を流す通路となる。コイルの周りには磁石が配置され、電流が流れるとローレンツ力が働き、コイルが傾く。ミラーとコイルとねじり梁の形状と重量で決まる共振周波数で電流を制御すると、小さなエネルギーで大きな振幅を持った共振ミラーが実現できる。

今回開発した共振ミラーはねじり梁には市販の SUS304 が使われており、シリコンウエファーを使った MEMS に比べミラー面積の大きな ReM を安価に作ることができる。

2.3.3 共振ミラーの特性

試作した ReM の特性を Fig.4 に示す。共振点の設計値

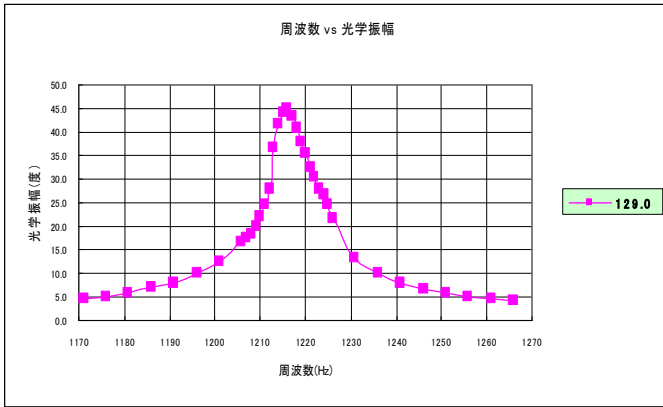


Fig.4 共振ミラーの共振特性

Sample No.301

経過時間	温度	-10°C	25°C	50°C
0		1236	1227.5	1221
5		1234.5	1226	1219.5
10		1234	1225.5	1218.5
15		1234	1225	1218
30		1234	1225	1217
45				1216.5
60				1216.5
	(min)	(Hz)	(Hz)	(Hz)

Table 5 ReM 共振周波数の変化温度

は1219Hzで、製作したReMは1210~1220Hzになるように試作している。若干低めに出るのは主に接着剤の塗布量である。

制御は共振点より高めの1220Hz近辺でおこなっている。振り角度検出システムにより、40度を超えると周波数を上げ（共振点から遠くする）、下がると周波数を下げ（共振点に近づける）、絶えず40度で振るようにコントロールしている。

Table 5に示すように、ReMは周囲温度が上がると共振周波数が-8Hz（50°C）下がると9Hz（-10°C）変化する。追従する周波数が1228Hz以上になると、レーザー安全クラス1オーバになるため、センサが停止する。

3. システム構成

3.1 制御回路

制御回路は部品点数を削減するため、従来のADコンバータとASICの組み合わせ方式からFPGA方式に変更した。

CPUは計算能力が高く且つ周辺回路が内蔵されてい

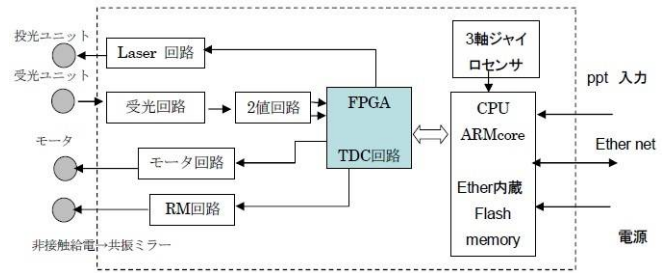


Fig.6 制御回路構成図

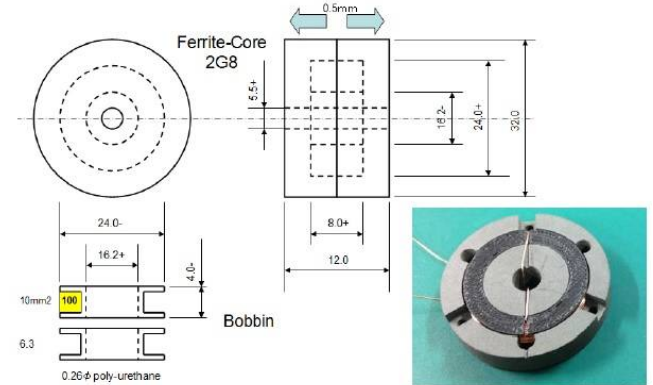


Fig.7 非接触給電コイル 外観図

るARM Cortex-M4マイコンを採用し、Fig.6に示すような簡潔な構成となった。FPGAには距離演算以外にFig.6に示すモータコントロール回路、共振ミラーを制御するReM同期回路を内蔵し、CPUの負荷を減らすと共に、回路の削減を行なった。

3.2 非接触給電

非接触給電は1次側のコイルが中空モータの軸から線を出し、制御回路に接続する。2次側コイルは共振ミラーに1200Hzのサイン波を直接給電する。

Fig.7に構造図と外観を示す。非接触給電の効率は軸に使用する磁性体の材料と巻き線数及び銅損で決まる。磁性体は純鉄から低周波フェライトコア2G8に変更し、形状を少し大きくし、巻線を多くできるように改善した。140ターン以上巻けば磁気成分は十分な特性が得られるが、その場合、銅線のインピーダンス（銅損）が大きくなるので、φ0.25の径の銅線100ターン巻きで製作した。この場合でも70%以上の効率を確認した。

3.3 共振ミラー制御

3.3.1 共振ミラーの振幅制御

センサの検出エリア外の背面に置かれた白黒パターン(Fig.8)にレーザーが照射されると、検出したレーザーの光強度は白が高く、黒が低くなる。この強度信号の時

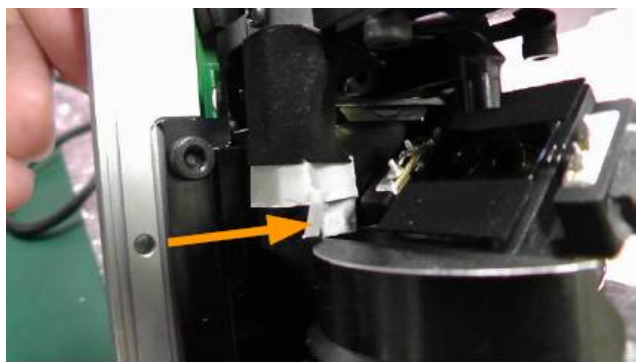


Fig.8 背面基準反射板(白黒パターン)

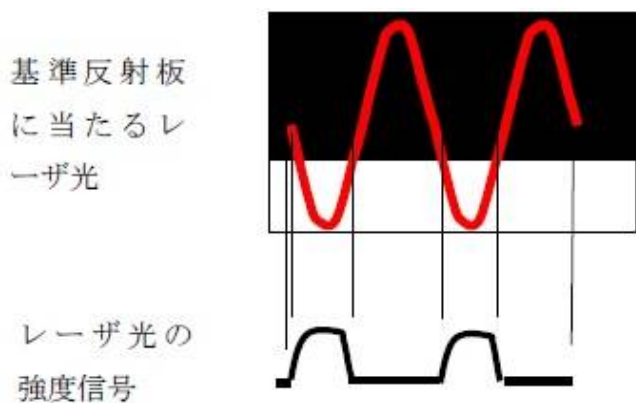


Fig.9 背面基準反射板からの信号

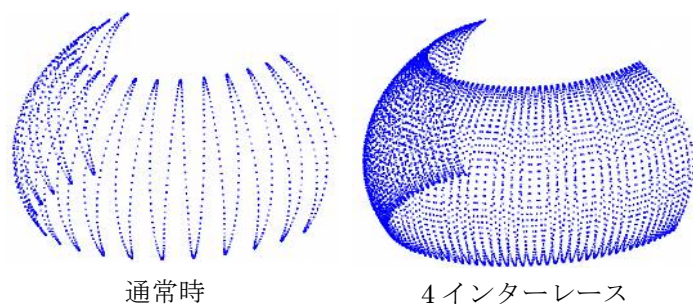


Fig.10 センサの計測点群イメージ

間幅が設計された値になるように、共振ミラーの振り角度であるレーザーのライン走査とモータの回転走査の位相を調整する。白パターン反射の幅は振幅に依存し、光強度の立ち上がり波形の位置は位相に依存する。

3.3.2 共振ミラーとモータの制御

モータと共振ミラーの制御は、モータの回転モニターであるエンコーダ板の信号と基準反射板の強度信号の位相をコントロールすることにより制御される。

3.3.3 モータ制御

3次元測域センサの制御で外乱の影響を強く受けるのはモータである。静止状態ではモータ制御誤差は小さいが、振動や衝撃を受けると制御が乱れ誤差が増大

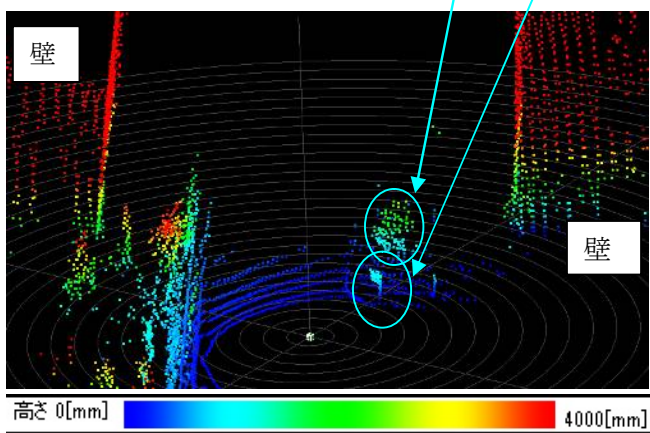


Fig.11 屋外試験データ

する。

また、3D測域センサの静止時の画像の解像度を上げるため、1/4インターレースが使われている。(Fig.10) これを実現するには、回転の安定性をReMの周期の1/4まで高めなくてはならない。この場合の必要なモータ制御の安定性は99.6%、モータ1回転の回転誤差は1.25度、1回転50msで許される誤差は0.2msである。制御の最適化により誤差は0.1ms以下が実現できた。

4. 性能評価

4.1 外乱光試験および屋外試験

直接光及び間接光とも検出距離・精度共顕著な影響はなかった。真夏の屋外でのテストでも、太陽光の影響なく検出が可能であった。

Fig.11は100,000lxの太陽光の元で、屋外の3次元データを取得した。外乱光のもとでも、木や壁を忠実に再現できた。

4.2 雨試験

北陽電機社内環境試験室(幅 2.5m×奥行 10m×高さ 3m)で雨試験を行った。センサは上下逆向き、高さ1mに取り付けた。(赤色の計測点が床付近)

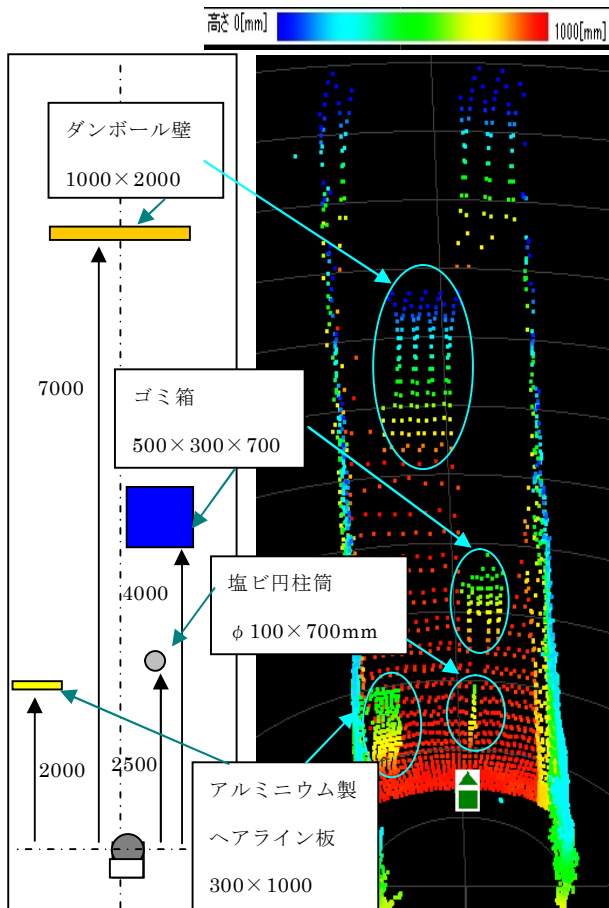
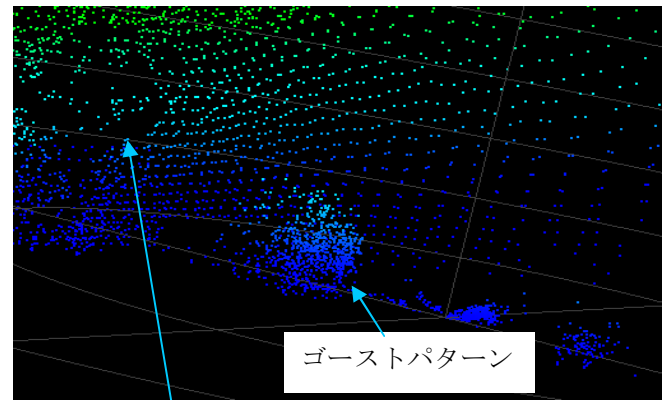


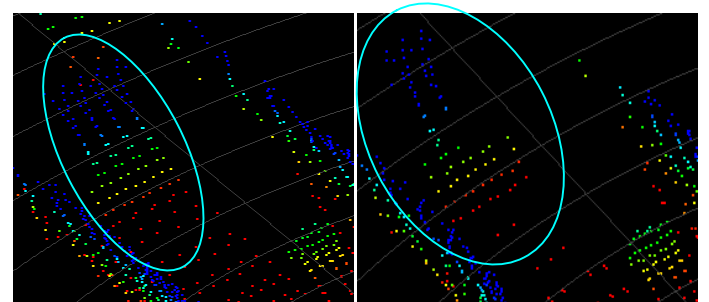
Fig.12 環境試験設置状況



雨 20mm/h

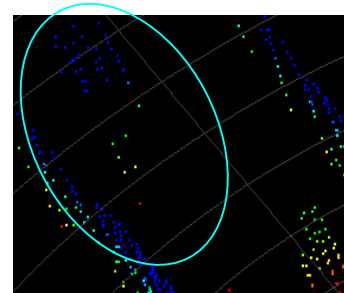
ゴーストにより消えた壁パターン

Fig.14 横視点で見たゴーストパターン発生時



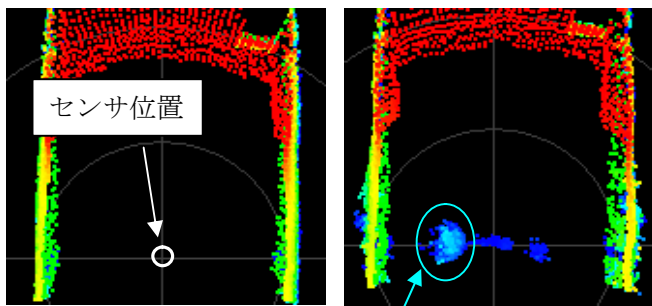
(a)雨 0mm/h

(b)雨 20mm/h



(c)雨 100mm/h

Fig.15 雨による
検出体の消失

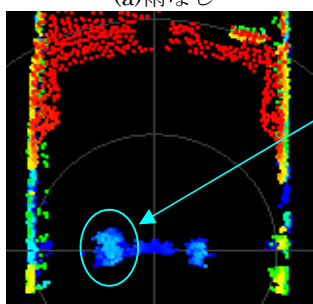


(a)雨なし

(b)雨 20mm/h

ゴーストパターン

Fig.13 上視点で見た
雨の時の信号

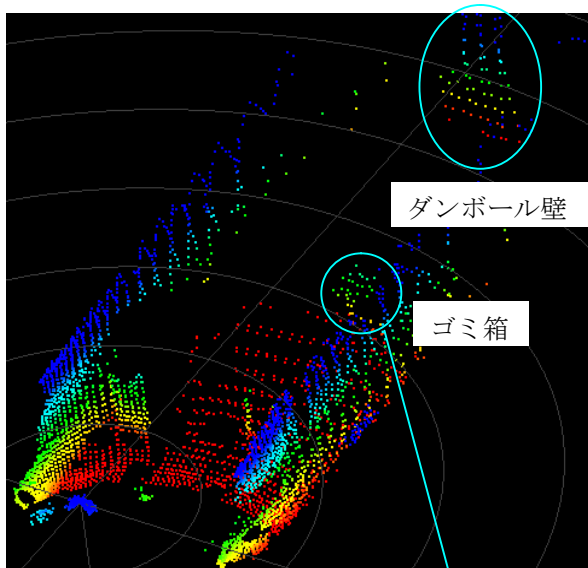


(c)雨 100mm/h

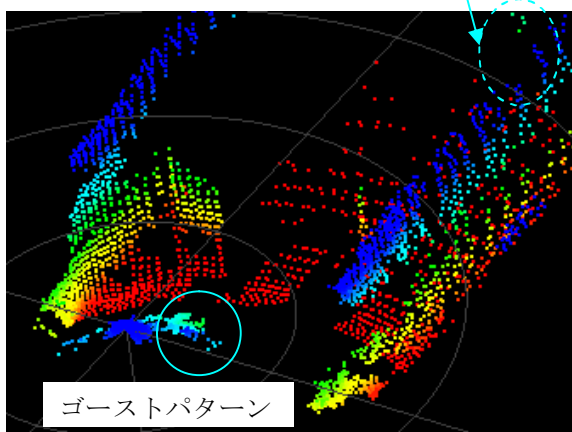
降雨量20mm/h の通常の雨の場合はほとんど影響が無い。100mm/h になると雨を検出することがあるが、メディアフィルタ等の微小物除去フィルタで対策は可能であった。

但し、光学窓についた雨滴の影響は大きい。特に光学窓の表面を流れる水がある場合、検出物が消えることが多くあった。Fig.13の(b)や(c)のように光学窓に付いた水滴と環境試験室の壁がくっつき、ゴーストパターンが現れた。その際の横からの視点では、Fig.14に示すように、奥の壁パターンは消えてしまう。

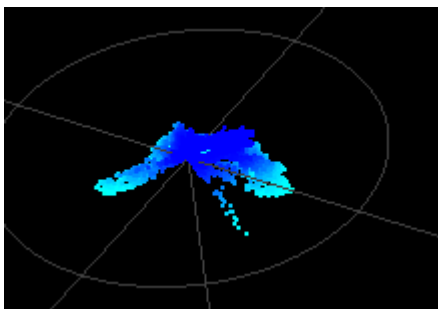
Fig.15では正面のダンボール壁の検出状況を確認したが、(b)20mm/hでは光学窓に水滴が流れたときのみ壁が検出不可となった。(c)100mm/hでは、水滴の影響が大きくほとんど壁が見えなかった。光学窓に直接雨が当たらない対策は必須である。



(a) 視程 40~50m



(b) 視程 10~20m



(c) 視程 1m

Fig16 霧試験時の計測状況

4.3 霧試験

雨試験と同様の環境下で霧試験を行った。

Fig16 (a) 視程40~50mであれば、7m先のダンボール壁は十分に検出できている。(b) 視程10~20mでは、4m先のゴミ箱は見えなくなり、センサ側面にゴーストパターンが発生する。視程10m以下になると、(c)のよ

うにセンサ周辺1mに霧パターンのみが検出される。霧の現れるパターンは特徴あるため、警報信号を出力することが可能であるが、霧を突き抜けて物を検出することは不可能であった。

5. まとめと今後の課題

今回開発した3次元測域センサは、経済産業省の『戦略的基盤技術高度化支援事業』の支援を受け、北陽電機、筑波大学、芝浦工業大学の3機関で、2年半にわたり開発を行った。

そして、本センサは2014年度のつくばチャレンジに出走する各機関のロボットに提供し、屋外実空間での評価を行っている。その成果を製品に組み入れ、更に問題点を明確にして対策を実施し、より実用化に近いセンサの開発につなげる所存である。

参考文献

- [1] Velodyne Lidar Inc. HDL-32E product web page
<http://velodynelider.com/lidar/hdlproducts/hdl32e.aspx>
- [2] Katsumi Kimoto, Norihiro Asada, Toshihiro Mori, Yoshitaka Hara, Akihisa Ohya, Shin'ichi Yuta: "Development of Small Size 3D LIDAR", Proc. of ICRA 2014, pp. 4620-4626, 2014