

平成26年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「屋外移動ロボットのリアルタイム自己位置認識用3次元
レーザセンサの開発」

研究開発成果等報告書

平成26年 9月

委託者 関東経済産業局

委託先 株式会社つくば研究支援センター

目 次

| | |
|--|----|
| 第1章 研究開発の概要 | 4 |
| 1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標 | 4 |
| 1-2 従来技術 | 5 |
| 1-3 試作したセンサの概要 | 5 |
| 1-4 研究体制 | 8 |
| 1-5 事業化体制 | 14 |
| 1-6 特許 | 15 |
| 1-7 学会発表 | 17 |
| 1-8 研究開発の連絡窓口 | 18 |
| 第2章 研究課題 | 19 |
| 2-1 研究課題概要 | 19 |
| 2-2 広域・高速・高精度を実現する Time of Flight 測定系の開発 | 19 |
| 2-2-1 レーザ発光回路 | 19 |
| 2-2-2 広帯域受光回路 | 19 |
| 2-2-3 ダブルスライス回路 | 20 |
| 2-2-4 制御回路 | 20 |
| 2-2-5 距離演算回路 | 22 |
| 2-2-6 レーザ安全 | 23 |
| 2-3 信頼性の高い小型軽量な3次元走査方法の開発 | 24 |
| 2-3-1 投受光系光学ユニットの開発 | 24 |
| 2-3-2 共振ミラーの開発 | 30 |
| 2-3-3 非接触給電回路の開発 | 32 |
| 2-3-4 3次元走査方式の開発 | 33 |
| 第3章 大容量の3次元データを効率よく通信できるコマンド体系の開発 | 35 |

| | | |
|-----|------------------------------------|----|
| 3-1 | プロトコルの開発 VSSP Ver1.1..... | 35 |
| 3-2 | 幅広いユーザに使い易いアプリケーションインタフェースの開発..... | 36 |
| 第4章 | センサの試作評価..... | 37 |
| 4-1 | 試験結果報告..... | 37 |
| 第5章 | センサの総合評価..... | 38 |
| 5-1 | ロボット搭載評価..... | 38 |
| 5-2 | つくばチャレンジ報告..... | 38 |

第1章 研究開発の概要

1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

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世界初の小型軽量で低コストの3次元レーザセンサの開発を行った。

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。そこで、本研究開発では安定して信頼性が高く、かつ小型軽量で低コストのセンサを開発する。併せて、ロボットが3次元センサの大容量データを容易に使用可能とするインターフェースやドライバ等の通信ソフトウェアを開発する。

本研究開発で目標とする3次元形状認識センサの目標は以下のとおり。

- ・検出距離が20m程度以上で、分解能精度が1cmのオーダーであること。
- ・リアルタイムでデータ処理を行うため、走査時間が500msec以下であること。
- ・小型、軽量、省電力であること。
- ・各種ロボットに搭載可能なコストであること。
- ・ロボットの振動や太陽光等に対して耐性があること。
- ・大容量の3次元データを効率よく通信でき、ユーザ(ロボット)側が容易に使いこなせること。

上記目標を達成するためには、以下の研究課題を解決しなければならない。各プロジェクトで実施した研究課題を、以下に列挙する。

- ①広域・高速・高精度を実現する Time of Flight 測定系の開発
- ②信頼性の高い小型軽量な3次元走査方法の開発
- ③大容量の3次元データを効率よく通信できるコマンド体系の開発
- ④センサの組み上げ及び評価
- ⑤センサの総合的評価

上記開発目標に対して実現した内容を表1-1に示す。

検出精度は10mmに届かなかった。開発過程でユーザより距離に関しては生データを出し、精度を上げることは研究開発にしたいと要望があり、あえて生値を出すことにした。精度を上げる環境フィルタはロボット側に搭載できるようライブラリーとして提供する。

重量は共振ミラーによる音の発生と内部温度上昇による放熱のためプラスチック化が難しく、実現ができなかった。軽量化を図るには上記の問題をロボット側で対応する必要がある。大きな用途であるヘリコプター搭載の3Dセンサは、この問題は容易に解決できる。その他の用途では重量には大きな不具合が無く、音の発生をできるだけ小さくして欲しいとの要求が高かった。

価格はプロトタイプで試供するユーザに対する価格であり、量産時には主要部品を金型化しコストダウンを図り、目標値を実現する。

| 項目 | 目標 | 実現した仕様 |
|-----------|-----------|------------------------------|
| 検出精度 | 10mm | 20mm(10m 以下) 40mm(30m 以下) |
| 検出距離 | 20m | 30m |
| 走査時間 | 500ms | 50～200ms |
| 形状 重量 | 200g | 780g |
| コスト | 100,000 円 | 700,000 円(プロトタイプ販売予定価格) |
| 3D データの送信 | リアルタイム通信 | VSSP による通信 |

表 1-1

1-2 従来技術

3次元の距離画像を高速に検出する技術で有名なのは Verdyne 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。しかしこのセンサは高速に移動する車の自動運転用に開発されたため、ロボットに使用するには以下の欠点がある。

- ・重量が大きく小型のロボットに搭載できない。
- ・3次元データの解像度が固定なので特定の用途にしか使えない。
- ・32個の投受光ユニットを精度良く角度調整する必要があり、生産性が悪くコストダウンが困難。
- ・非常に高価で軍事用にしか使われていない。
- ・出力される大容量の3次元データ処理に高度な技術が必要。



図 1-1 Verdyne 社の 3D センサ HDL-32E

Verodyne 社のセンサは価格が高くて、主に軍事用にしか使われていない。開発したセンサは価格帯が違うため、現在では比較対象にはなっていない。しかし研究分野では屋外自律移動ロボットに多く使われだしたため、本研究の 3D センサも同様な要求が出てくると予測される。特に検出距離の要求が強く、3D センサの今後の大きな課題と考えている。

1-3 試作したセンサの概要

試作したセンサのスペックを表 1-2 に、形状を図 1-2、図 1-3 に示す。支援事業終了後プロトタイプを発売し、多くの研究者からの意見を聞き、来年度の量産機器の販売につなげたい。

| 項目 | 内容 |
|----------|--|
| 名称 | 3次元測域センサ (3D LIDAR) |
| 型式 | YVT-X001 |
| 光源 | Laser diode Wave length=905nm(Class1) |
| 電源 | 10 to 30VDC(12v 700mA 24v 350mA) |
| 水平走査角度 | 210度 ピッチ6度 |
| 垂直走査角度 | 40度 分解能60SPOT |
| インターレース | Up to 4field |
| 検出距離 | Min8m(黒紙 反射率10%) Min25m(白紙) |
| 繰り返し精度 | ±40mm(白紙8m以下) ±100mm(白紙20m以下) |
| 検出エコー数 | UP to 3 echoes (1st, 2nd, 3ed, Last echoe) |
| 水平走査速度 | 20Hz |
| 垂直走査速度 | 1200Hz |
| 水平走査エラー | 0.2% (100μ s/50ms) |
| インターフェース | Ether net(TCP/IP) 100MBPS |
| 構造 | IP67(無通電) 水中使用不可 |
| 重量 | Approx 700g |
| 大きさ | 70mm×106mm×95mm(W×D×H) |
| 温度/湿度 | -10~50°C 85%以下(結露をしないこと) |
| ジャイロ | InvenSense MPU-9250#1 |
| 通信プロトコル | VSSP 1.0 |

表 1-2 3D センサスペック



図 1-2 3D センサ鳥瞰図

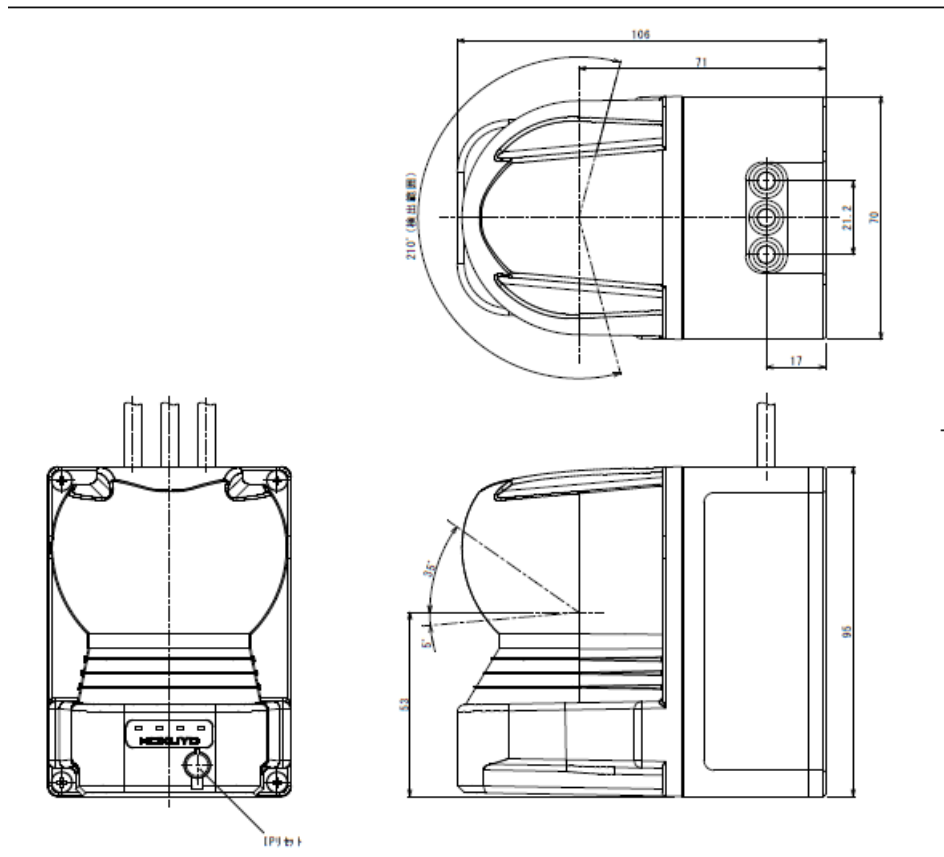


図 1-3 3D センサ外形図

添付資料1「3D センサの仕様書・外形図」参照。

1-4 研究体制

本支援事業は図 1-4 に示す体制で実施した。

実施した研究開発の課題 5 項目を、その内容に従い、各研究機関で実施した。

- ①広域・高速・高精度を実現する Time of Flight 測定系の開発
- ②信頼性の高い小型軽量な 3 次元走査方法の開発
- ③大容量の 3 次元データを効率よく通信できるコマンド体系の開発
- ④センサの組み上げ及び評価
- ⑤センサの総合的評価

各研究課題について①、②、③、④は主に北陽電機が実施し、③、⑤課題は筑波大学及び芝浦工業大学が実施した。プロジェクトの管理はつくば研究支援センターが行った。管理機関が主体となつて行う事業の推進委員会を年 2 回、研究機関が主体となつて行う技術検討会議を 3~4 回行った。

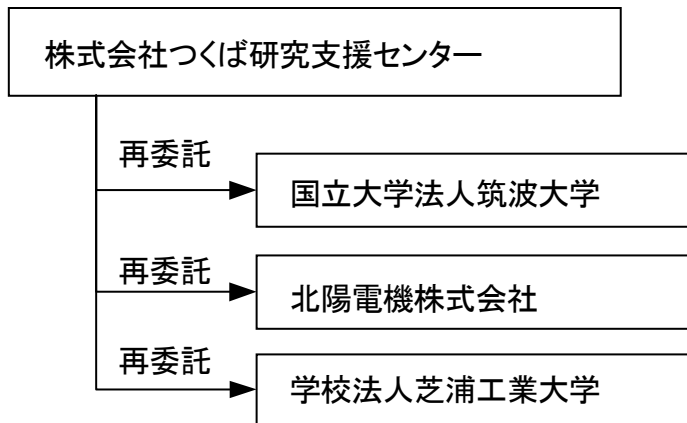
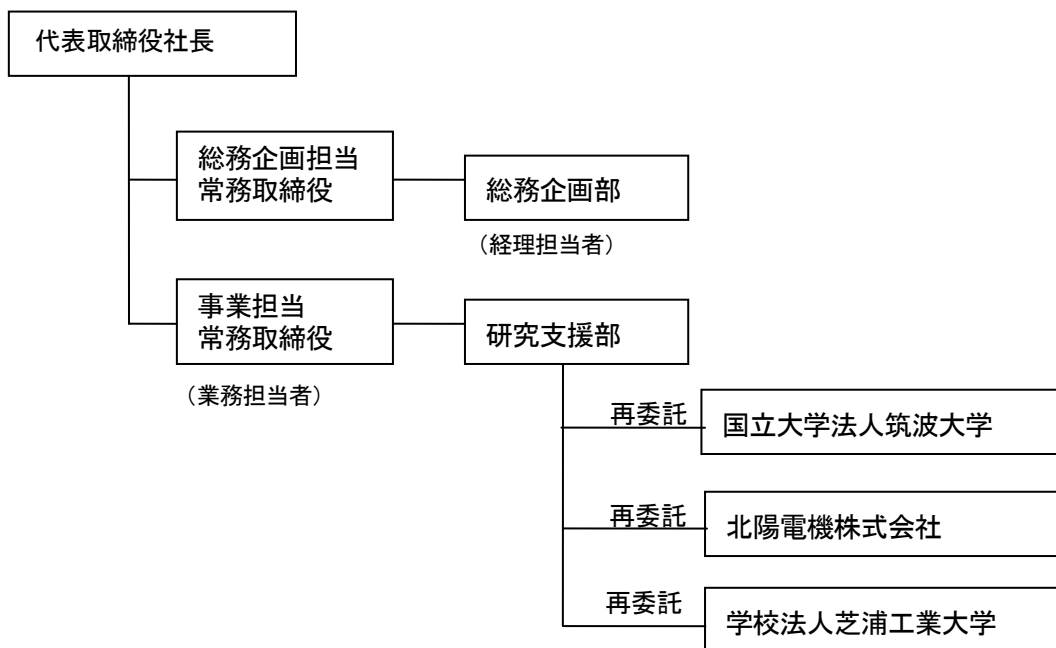


図 1-4 研究実施体制

1-4-1 管理体制

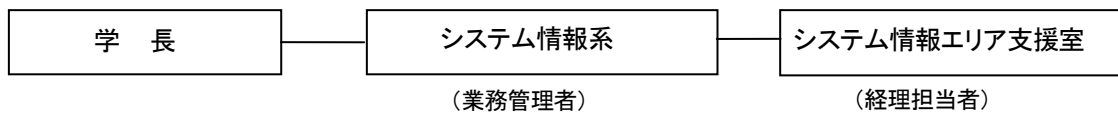
①事業管理機関

[株式会社つくば研究支援センター]

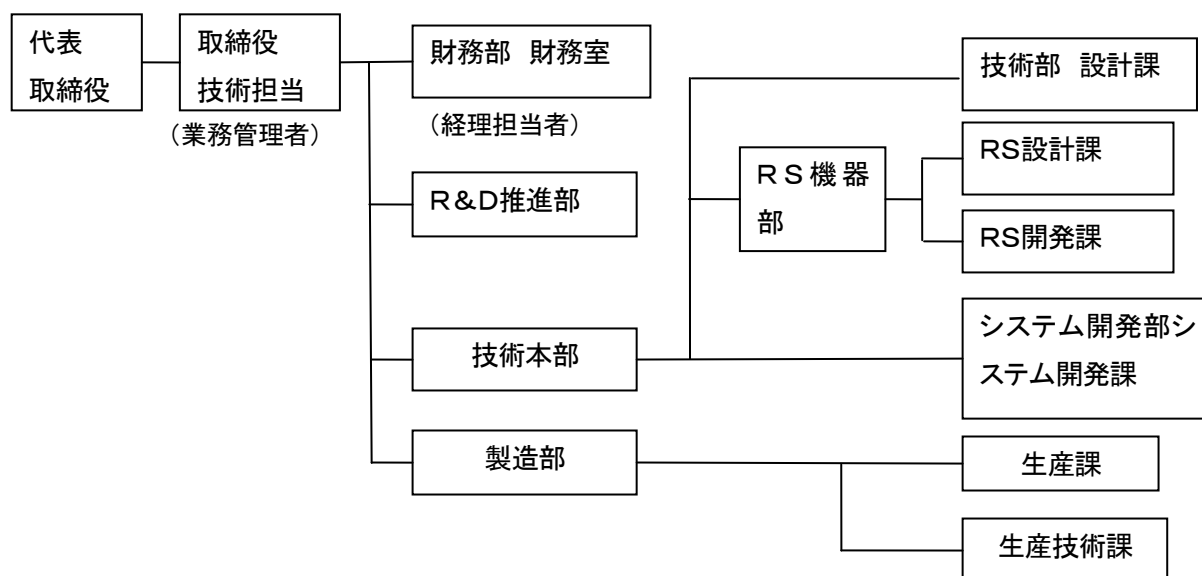


② 再委託先

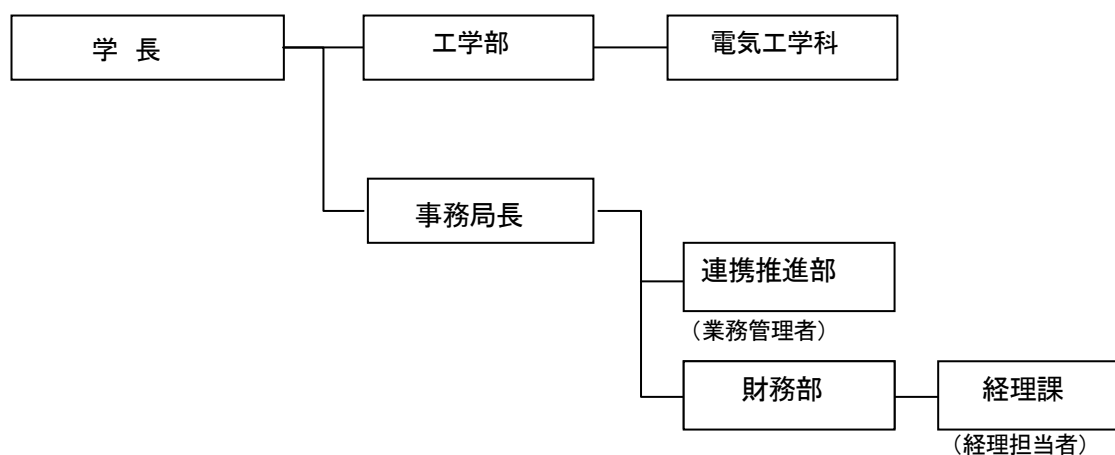
[国立大学法人筑波大学]



[北陽電機株式会社]



[学校法人芝浦工業大学]



1-4-2 管理員及び研究員

(事業管理機関)株式会社つくば研究支援センター

管理員

| 氏名 | 所属・役職 |
|-------|---------|
| 高田 青史 | 研究支援部次長 |
| 永岩 良教 | 研究支援部 |
| 早瀬 昌輝 | 研究支援部 |

(再委託先)

(研究員)

国立大学法人筑波大学

| 氏名 | 所属・役職 |
|-------|------------|
| 大矢 晃久 | システム情報系 教授 |
| 坪内 孝司 | システム情報系 教授 |

北陽電機株式会社

| 氏名 | 所属・役職 |
|---------------|------------------------|
| 森 利宏 | 取締役 技術担当 |
| 浅田 規裕 | 顧問 |
| 嶋地 直広 | R&D 推進室 室長 |
| 上谷 敏寛 | 技術本部 RS 機器部 部長 |
| 竹川 博夫 | 技術本部 RS 機器部 RS 開発課 主任 |
| 山本 明人 | 技術本部 RS 機器部 RS 設計課 主任 |
| 西村 健太郎 | 技術本部 RS 機器部 RS 開発課 |
| 木元 克美 | 技術本部システム開発部 システム開発課 主任 |
| カルバヨ アレックサンダー | 技術本部システム開発部 システム開発課 主任 |
| 佃 真一 | 技術本部 技術部設計課 課長 |
| 加藤 千昌 | 技術本部 技術部設計課 主任 |
| 杉田 正 | 製造部生産課 課長 |
| 岩崎 一成 | 製造部生産技術課 |
| 灰山 祥平 | 製造部生産技術課 |

学校法人芝浦工業大学

| 氏名 | 所属・役職 |
|-------|--------------|
| 油田 信一 | 工学部 電気工学科 教授 |
| 安藤 吉伸 | 工学部 電気工学科 教授 |
| 吉見 卓 | 工学部 電気工学科 教授 |

1-4-3 経理担当者及び業務管理者の所属、氏名

(事業管理機関)

株式会社つくば研究支援センター

(経理担当者) 総務企画部 課長 沼田 きみ江

(業務管理者) 常務取締役 一條 久夫

(再委託先)

国立大学法人筑波大学

(経理担当者) システム情報エリア支援室 外部資金係長 野瀬 正樹

(業務管理者) システム情報エリア支援室 システム情報係長 高木 英明

北陽電機株式会社

(経理担当者) 財務部 財務室長 並川 高明

(業務管理者) 取締役 技術担当 森 利宏

学校法人芝浦工業大学

(経理担当者) 財務部 経理課長 神谷 優子

(業務管理者) 連携推進部長 丁 龍鎮

1-4-4 他からの指導・協力者

研究開発推進委員会 委員

| 氏名 | 所属・役職 | 備考 |
|-------|---|--------|
| 大矢 晃久 | 国立大学法人筑波大学 システム情報系 教授 | PL |
| 森 利宏 | 北陽電機株式会社 取締役 技術担当 | SL |
| 油田 信一 | 学校法人芝浦工業大学 電気工学科 教授 | |
| 坪内 孝司 | 国立大学法人筑波大学 システム情報系 教授 | |
| 安藤 吉伸 | 学校法人芝浦工業大学 電気工学科 教授 | |
| 吉見 卓 | 学校法人芝浦工業大学 電気工学科 教授 | |
| 嶋地 直広 | 北陽電機株式会社 R&D 推進室 室長 | 委 |
| 木元 克美 | 北陽電機株式会社 技術本部 システム開発部 システム開発課 主任 | 委 |
| 一條 久夫 | 株式会社つくば研究支援センター 常務取締役 | |
| 高田 青史 | 株式会社つくば研究支援センター 研究支援部次長 | |
| 永岩 良教 | 株式会社つくば研究支援センター 研究支援部 | |
| 早瀬 昌輝 | 株式会社つくば研究支援センター 研究支援部 | |
| 宮下 敬宏 | 株式会社国際電気通信基礎技術研究所 社会メディア総合研究所 研究企画部長 | アドバイザー |
| 渡辺 敦志 | 株式会社国際電気通信基礎技術研究所 知能ロボティクス研究所 音環境知能研究室 専任研究員 | アドバイザー |

| | | |
|-------|---|--------|
| 高川 夏生 | 株式会社ダイフク FA&DA 事業部生産本部 主任技師 | アドバイザー |
| 竹内 啓五 | 清水建設株式会社 技術研究所主任研究員 | アドバイザー |
| 新美 繫樹 | アイシン精機株式会社 電子系企画・開発部 主査 (兼)開発グループ グループマネージャ | アドバイザー |
| 高岡 豊 | トヨタ自動車株式会社 パートナーロボット部 先行開発室 第 1先行開発 G 主任 | アドバイザー |
| 足立 勝 | 株式会社安川電機 技術開発本部 開発研究所 ロボット 技術グループロボット知能化技術チーム 技術担当課長 | アドバイザー |
| 矢野 寛 | 三菱電機特機システム株式会社 東部事業部 電子応用機 器事業推進室 新事業推進担当部長 | アドバイザー |
| 吉田 智章 | 学校法人千葉工業大学 未来ロボット技術研究センター 上席研究員 | アドバイザー |
| 鶴賀 孝廣 | つくば市 国際戦略総合特区推進部 科学技術振興課 コ ーディネーター | アドバイザー |

1-5 事業化体制

本支援事業を始めるとき、3D レーザレンジセンサの実用化に積極的な研究機関、企業に事業化支援のための評価を依頼した。それぞれの機関は数年前から北陽電機の2次元距離センサ URG を積極的に使用し、いろいろなアプリケーションを開発し、それぞれ実績の高い機関である。各機関からの要望と我々が開発を目指す仕様の一致点を見出せた機関を支援企業としてアドバイザ契約を行い、発売前にセンサを提供し、事前評価を行うと共に、問題点の抽出と解析を依頼した。各分野に対する支援していただいた企業の一覧表を表 1-3 に示す。

| 業界 | 用途 | アドバイザ |
|-----------|---|--|
| パーソナルロボット | 3次元形状認識 ロボットの自己位置認識 MAP作成とナビゲーション | つくば市 トヨタ自動車株式会社 株式会社安川電機 三菱電機特機システム株式会社 株式会社国際電気通信基礎技術研究所(ATR) |
| 搬送業界 | 自動搬送 3次元安全センサ機器 | 株式会社ダイフク |
| 建築・土木業界 | 建築・構造物計測センサ 設備メンテナンスロボット | 清水建設株式会社 千葉工業大学未来ロボット技術研究センター(fuRo) |
| 自動車業界 | 運転支援機器用センサ | アイシン精機株式会社 |
| 鉄道業界 | 駅ホーム柵センサ | |
| リテール業界 | 人数カウンタ 高性能自動ドアセンサ | 株式会社国際電気通信基礎技術研究所(ATR) |
| セキュリティー業界 | 進入警報センサ 共連れ検知センサ | 株式会社国際電気通信基礎技術研究所(ATR) |

表 1-3 アドバイザ機関

1-6 特許

本支援事業内で所得した特許を以下に示す。特許は 3D センサの基本特許と 3D センサに使用した共振ミラー(ReM)の形状材料に関する特許、形状デザインに関する意匠である。特許及び意匠は日本を始め米国、欧州、中国の 4 エリアで所得した。日本に出願した内容と海外の出願状況を表 1-4 に示す。

(1) センサの基本特許

出願日:平成 24 年 12 月 3 日

出願番号:特開 2012-263937

発明の名称:偏向装置、光走査装置及び走査式測距装置

出願人:北陽電機株式会社

発明者:森 利宏

浅田 規裕

高井 和夫

(2) ReM の特許

出願日:平成 26 年 2 月 26 日

出願番号:特願 2014-035171

発明の名称:金属弾性部材、微小機械装置、微小機械装置の製造方法偏向装置

出願人:北陽電機株式会社

発明者:浅田 規裕

(3) 意匠

出願日:平成 26 年 7 月 18 日

出願番号:意願 2014-15682

発明の名称:光電センサ

出願人:北陽電機株式会社

発明者:佃 真二

加藤 千昌

サポイン支援事業に係る産業財産権の出願状況(平成26年8月19日時点)

テーマ:屋外移動ロボットのリアルタイム自己位置認識用3次元レーザーセンサの開発

| 出願国 | 種類 | 発明等の名称 | 出願日 | 出願番号 | 優先権主張 |
|-----|----|---------------------------|-----------|----------------------|-------------------|
| 日本 | 特許 | 偏向装置、光走査装置及び走査式測距装 | H24.12.3 | 特願 2012-263937 | (なし) |
| 米国 | 特許 | 偏向装置、光走査装置及び走査式測距装 | H25.2.25 | US13/775,927 | 特願 2012-263937 |
| 欧州 | 特許 | 偏向装置、光走査装置及び走査式測距装 | H25.11.18 | EP13193378 | 特願 2012-263937 |
| 中国 | 特許 | 偏向装置、光走査装置及び走査式測距装 | H25.12.2 | CN20131062854 0.X | 特願 2012-263937 |
| 日本 | 特許 | 金属弾性部材、微小機械装置、微小機械装置の製造方法 | H26.2.26 | 特願 2014-035171 | (なし) |
| 米国 | 特許 | 金属弾性部材、微小機械装置、微小機械装置の製造方法 | H26.6.30 | US14/318,765 | 特願 2014-035171 |
| 欧州 | 特許 | 金属弾性部材、微小機械装置、微小機械装置の製造方法 | H26.7.3 | EP14175554.6 | 特願 2014-035171 |
| 中国 | 特許 | 金属弾性部材、微小機械装置、微小機械装置の製造方法 | H26.7.27 | CN20141035993 7.8 | 特願 2014-035171 |
| 日本 | 意匠 | 光電センサ | H26.7.18 | 意願 2014-15682 | (なし) |
| 欧州 | 意匠 | 光電センサ | H26.9 予定 | (出願準備中) | 意願 2014-15682 |
| 米国 | 意匠 | 光電センサ | H26.9 予定 | (出願確認中) | 意願 2014-15682 |
| 中国 | 意匠 | 光電センサ | H26.8.12 | (確認中) | (なし:直接出願) |

注:上記特許・意匠の出願人はすべて北陽電機株式会社。

表 1-4 所得特許一覧表

1-7 学会発表

3D センサの社外発表は以下の3箇所で行った。

- ① ROBOMECH2014 5月25日(日)~29日(木) 富山国際会議場
機器展示
- ② ICRA 2014 5月31日~6月6日 Hong Kong Convention Center
学会発表 機器展示
- ③ IROS2014 9月14日~18日 Chicago
機器展示

ICRA 2014では北陽電機の本元がDevelopment of Small Size 3D LIDARで発表を行った。

機器展示は(株)Doog 大島氏から貸与されたカルガモロボット(人の後を付いて行くロボット)に3D センサをつけ、3D データを無線LANでパソコンに送信し、パソコンの画面に表示した。その様子を図1-5に示す。繊細な3D データがリアルタイムに表示され好評であった。

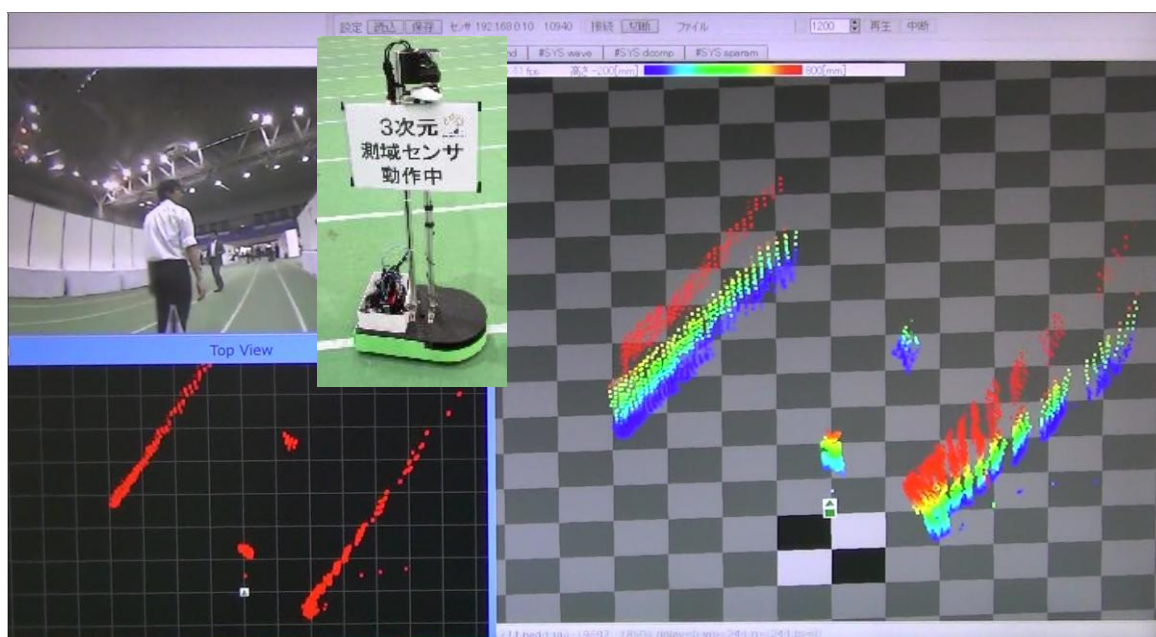


図 1-5 学会機器展示

1-8 研究開発の連絡窓口

(フリガナ): タカタ セイシ

氏名 : 高田 青史

所属組織名 : 株式会社 つくば支援センター

所属役職 : 研究支援部 次長

Tel: 029-858-6000 Fax: 029-858-6014

E-mail: tci-is@tsukuba-tci.co.jp

第2章 研究課題

2-1 研究課題概要

プロジェクトの研究課題は以下の5項目である。

項目ごとの詳細を報告する。

- ①広域・高速・高精度を実現する Time of Flight 測定系の開発
- ②信頼性の高い小型軽量な3次元走査方法の開発
- ③大容量の3次元データを効率よく通信できるコマンド体系の開発
- ④センサの組み立て及び評価
- ⑤センサの総合評価

2-2 広域・高速・高精度を実現する Time of Flight 測定系の開発

3次元レーザセンサの距離演算回路部の開発内容について報告する。そして最後に一般空間で安心して使用するためのレーザ安全設計について述べる。

2-2-1 レーザ発光回路

レーザ光を使用した3Dセンサはレーザ安全クラス1以上のレーザパワーを出すことはできない。検出距離を長くするにはレーザの発光時間をできるだけ短くし、高いレーザ出力を高くする必要がある。標準で使用した高圧MOSドライバからより高速で高耐压のアバランシェトランジスタに変更し、且つ配線長を極限までに短くして従来の発光パルス幅1/2の2.5nsが実現できた。これにより同一条件(18 μ s周期)では2倍のパワーを出すことができる。3Dセンサは2Dセンサに比べ測定点が多いため、パワーよりも分解能を上げることが重要と考え、周期を9 μ sにして演算ポイント数を2倍に上げた。レーザのMTBFはパワーの3乗に比例して短くなる欠点があるが、パワーを同一にすることにより2Dと同じMTBF(1,200,000h)を実現した。

2-2-2 広帯域受光回路

投光パルスが短パルス化すると受光回路の周波数帯域を広くしなければならない。現状の受光アンプと改良した受光アンプの特性を測定した。現状の受光アンプはFEMTの組み合わせのディスクリート部品で構成されているため、FEMTのばらつきが特性に大きく変動を与える。特性を安定させるためできるだけ部品点数を減らした設計を行った。受光アンプの性能を決めるのは初段のトランスインピーダンスアンプのノイズレベルで決められる。新たに採用したアンプAD8015はフォトダイオード用に開発されて低ノイズのトランスインピーダンスアンプで、このアンプによりノイズレベルは1/10になった。従って最終的なアンプゲインは帯域が1.5倍に大きくなったにもかかわらずゲインは3dbと大きく設計でき、3D走査のため受光光学系の受光面積の縮小にもかかわらずTOP-URGと同等の感度が実現できた。

2-2-3 ダブルスライス回路

TOF 方式の距離センサの場合、半透明な反射や検出物のエッジなどにより、1 レーザの照射で複数個の信号が帰ってくる。特に雨や水滴の場合その反射とその奥になる検出物の反射の 2 エコーから、雨等のノイズ信号を除去し、奥の信号を採用することが多い。またレーザセンサのセンサ内部の不要反射による影響で、近距離の物体が見えないという不感帯を生じることがある。本センサでは 2 値化レベルを 2 個(Double)設けて、近距離の不感帯を防いでいる。

内面反射や光学窓についた水滴、雨があった時の信号を図 2-1 に示す。

検出物が近距離の場合はレベルの高い SLICE1 を使い、遠距離の場合はレベルの低い SLICE0 を使う。選択する SLICE の切り替えはソフトで行う。

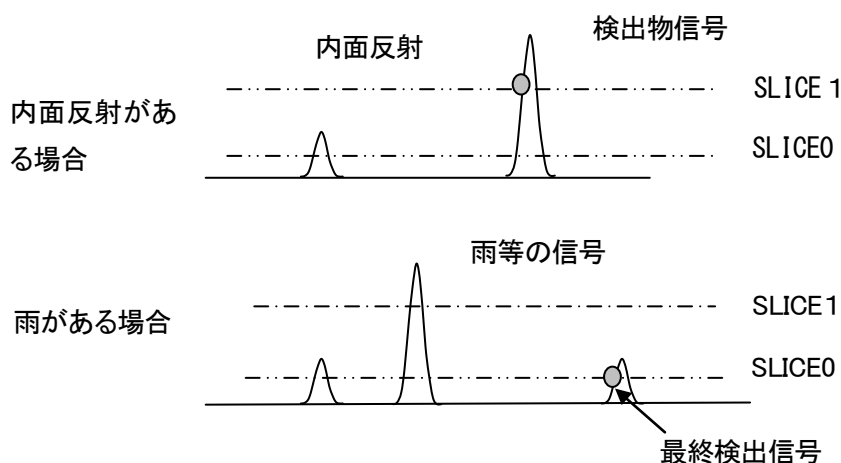


図 2-1 ダブルスライス マルチエコー信号

2-2-4 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る ARMcore マイコン K6 を採用し、図 2-2 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図 2-3 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、回路の削減を行った。距離演算回路はダブルスライスに対応して 2 個設けた。選択するエコーは CPU で行う。

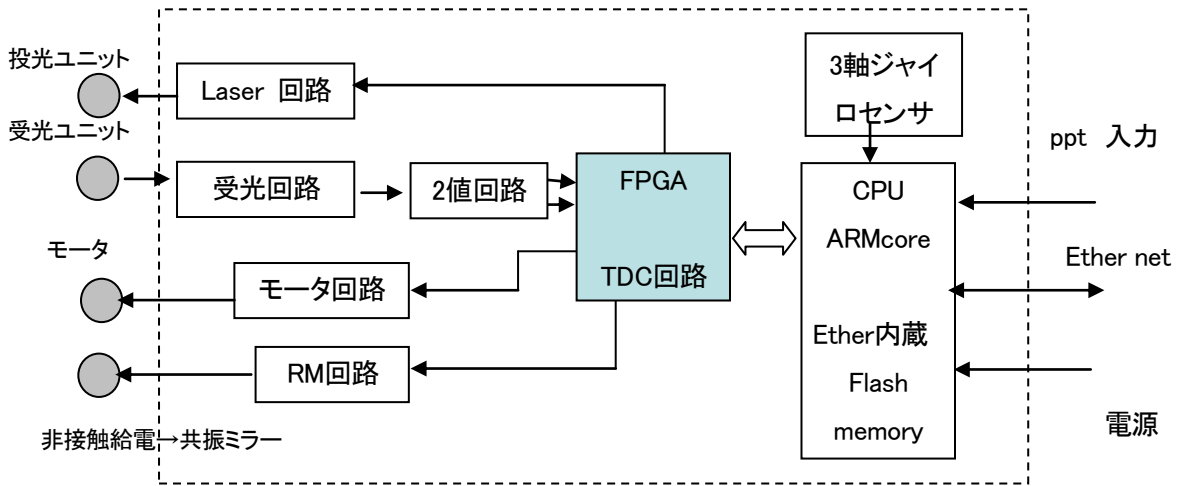


図 2-2 制御回路構成図

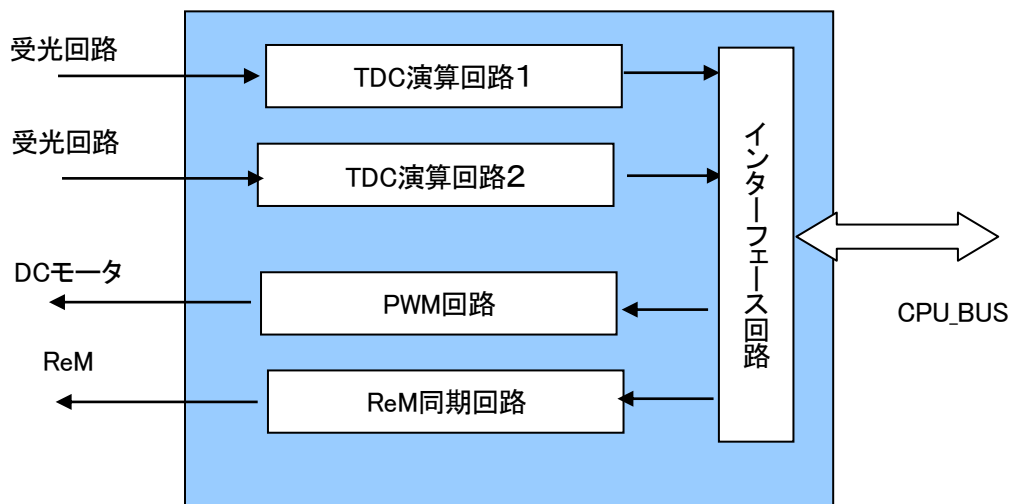


図 2-3 FPGA 回路

2-2-5 距離演算回路

距離演算はFPGA内に内蔵された256段の遅延回路によって実現した。FPGA内の遅延回路は各段ごとの遅延量が異なり、且つ温度や電圧で大きく変動する。そのため、絶えず校正が必要になる。図2-4にTDC回路構成を示す。TDC回路は遅延回路から構成されるファインカウンタと、4ns(600mmの相当)単位で計測するコースカウンタからなる。ファインカウンタの要素である遅延回路は1回路10p~60p(10mm)ばらついているため、各遅延回路ごとに遅延時間を校正回路により測定し、LUP(ルックアップテーブル)を毎周期ごと(50ms)に更新する。その校正回路方法はランダムパルスを使用するリングカウンタ方式と遅延回路を用いたIOデレー方式の2種類を検討した。図2-4にTDC回路の構成、図2-5に2種類の校正回路の精度グラフを示す。精度グラフから明らかなようにコースカウンタの分解能600mmごとに遅延精度が変動し、4nsの基準パルスによる校正が正しく行なわれていることを証明している。精度はIOデレーのほうが約2倍高くなった。リングカウンタ方式はカウンタに使用した回路の特性により、ランダムパルスに特徴が現れるためと思われる。IOデレーはデレー値や繰り返し演算周期を設計上変更できるため、パルスの特徴性が削減され、安定した遅延校正ができた。

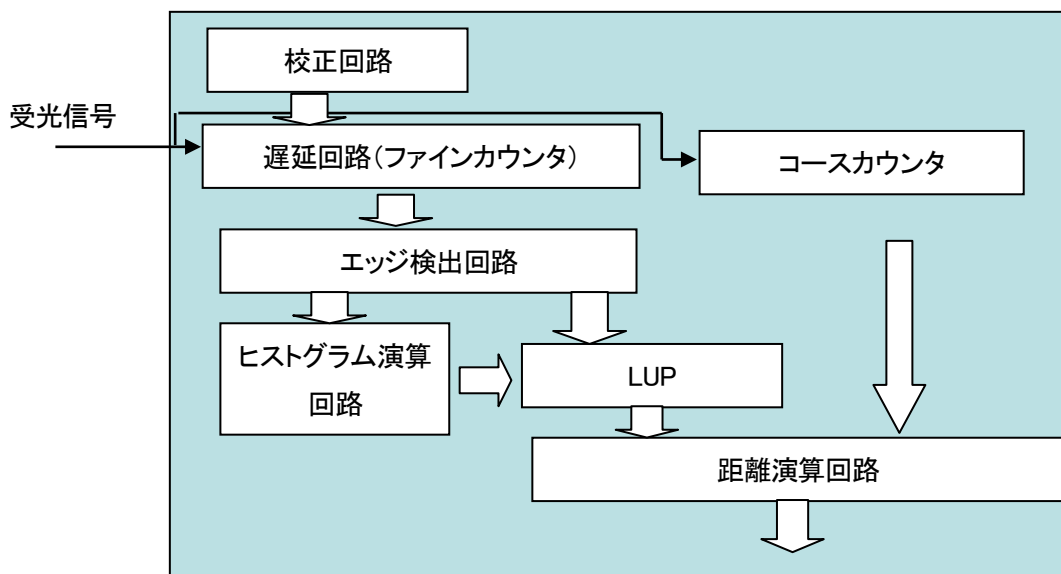


図 2-4 FPGA 演算回路

校正回路1 リングカウンタによるランダムパルス発生

校正回路2 IOディレーによるランダムパルス発生

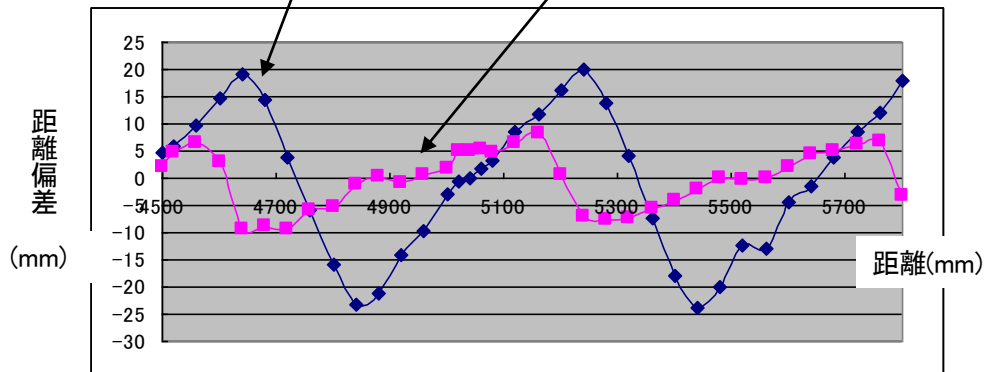


図 2-5 TDC 回路校正精度

2-2-6 レーザ安全

一般の空間に放射されるレーザの安全は IEC60825-1 2007 年度版規格の最も厳しい規格クラス 1 以下でなくてはならない。クラス 1 の安全は 1 パルスの最大被爆量、100 秒間に図 2-6 に置かれる人の目に入る平均被爆量、繰り返しパルスの場合は 10 秒間に目に入るレーザ個数から演算されるレーザトレイン被爆量の内、最も少ない被爆量で規定される。

(1) 1 パルスの最大被爆量

$$AEL_{max}=5.14E-07(J)$$

$$W_{max}=206W$$

(2) 100 秒間の平均被爆量

$$W_{max}=111W$$

(3) 10 秒間のトレイン被爆量

$$AEL_{max}=79.2E-09(79.2nJ)$$

$$W_{max}=13.2W$$

従ってクラス 1 の最大被爆量は 10 秒間のトレイン被爆量で規定される。

センサの出力部分(レーザ光から 100mm はなれたφ 7mm のアパーチャーで測定)

計測値 33nJ 13.2W (周期 9μ s で換算して計算)

測定器 Mach 6 200,000pps Energy Meter Gentec 社

IEC60825-1 2007 年度版規格
クラス 1

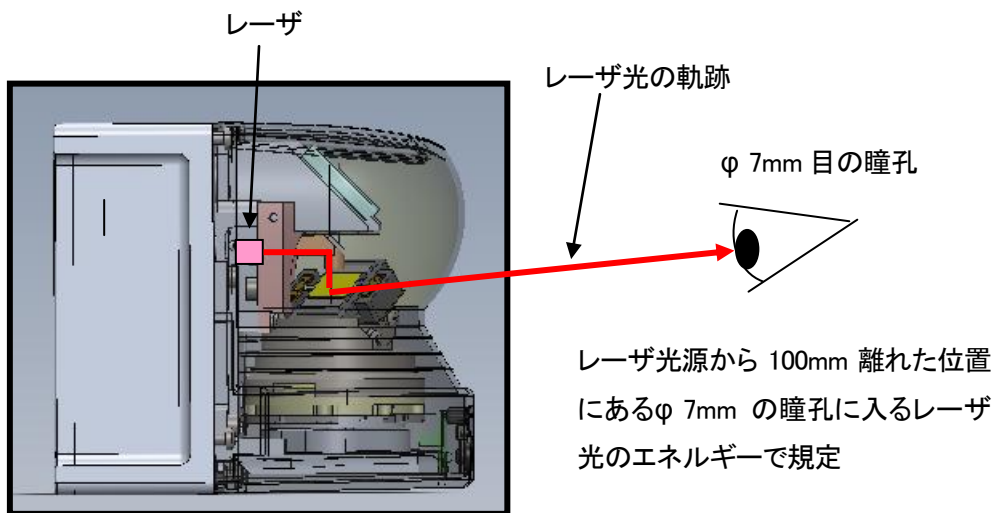


図 2-6 レーザ光のパワーの測定位置

2-3 信頼性の高い小型軽量な 3 次元走査方法の開発

2-3-1 投受光系光学ユニットの開発

(1) 光芒の向きによる感度のばらつき

図 2-7 に 3D センサの光学ユニットを示す。光学ユニットは投光ユニット及び受光ユニットから形成されている。両ユニットは共振ミラー ReM の光軸上で同軸配列されている。

投光の光芒はφ 3mm 但し投光筒によりφ 5mm のマスク領域になる。ReM の有効領域は $8 \times 16\text{mm}$ 、最も傾いた位置で 47.5 度(下向き) 27.5 度(上向き)になる。従って有効 ReM の大きさは $(8 \times 16) \cos(47.5) \sim (8 \times 16) \cos(27.5) = 86.47 \sim 113.53\text{mm}^2$ と振る向きに変動する。更に投光筒のマスキングにより 20mm^2 が陰になり、また向きが 90 度方向では投光筒の影によりミラーの半分がマスキングされる。

3D センサの方向と感度(有効受光面積)を図 2-8 に示す。3D センサでは基準距離を水平 0 度垂直 15 度でテストを行い 30m の検出距離を実現しているが、最悪の方向では 20m の検出距離になる。計算上はこの値になるが、光学窓の内部反射やレーザの形状の関係で若干 0 度方向よりも ± 90 度方向のほうがアパーチャーから出てくるレーザパワーが大きいので、検出感度の比率は改善されている。

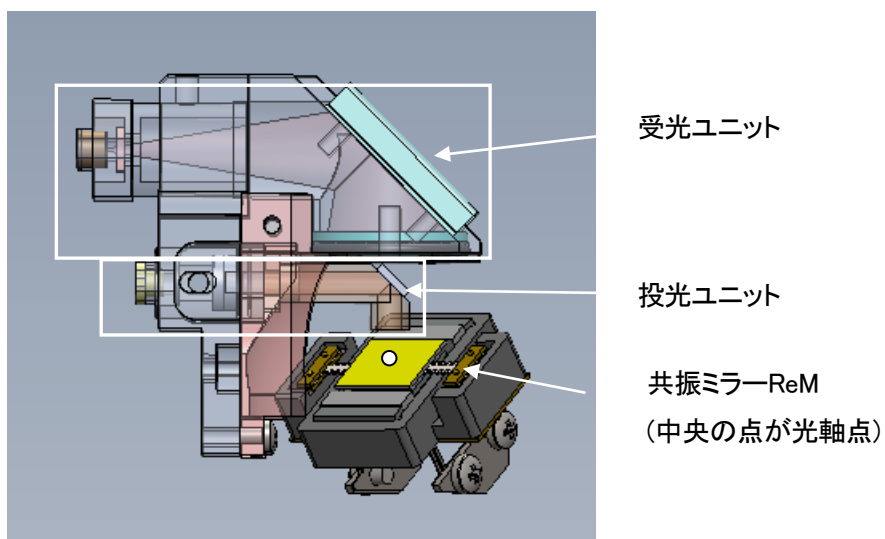


図 2-7 投受光ユニット

| | 水平 | 垂直 | 有効受光面積(mm ²) | 比率 |
|---|-------|------|--------------------------|------|
| 1 | -90 度 | -5 度 | 39 | 0.48 |
| 2 | -90 度 | 15 度 | 54 | 0.66 |
| 3 | -90 度 | 35 度 | 66 | 0.80 |
| 4 | 0 度 | -5 度 | 66.5 | 0.81 |
| 5 | 0 度 | 15 度 | 81.5 | 1 |
| 6 | 0 度 | 35 度 | 93.5 | 1.14 |
| 7 | 90 度 | -5 度 | 39 | 0.48 |
| 8 | 90 度 | 15 度 | 54 | 0.66 |
| 9 | 90 度 | 35 度 | 66 | 0.80 |

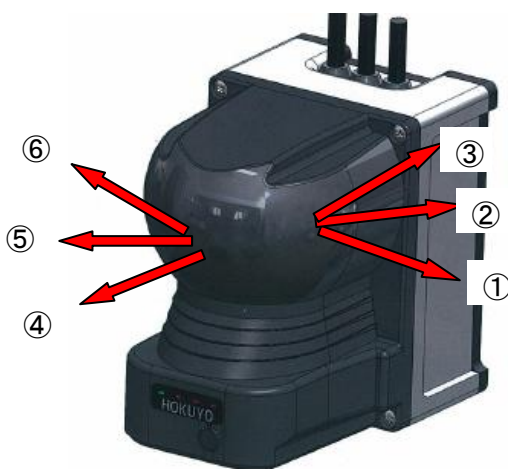


図 2-8 3D センサの光芒の向きによる感度

(2) 投光ユニット

図 2-9 に投光ユニットの構成を示す。半導体レーザから発光されたレーザ光は投光レンズで集光され、 ϕ 3mm のアパーチャーを通過して概 ϕ 3mm の光芒でミラーに当たり、45 度折り曲げられて ReM の光軸点に照射される。

主要部品のスペックを以下に示す。

| | | |
|--------|-----------------------------|---|
| 半導体レーザ | L11845-307-05 ハママツフォトニクス | $\lambda = 905\text{nm}$ 21w(100ns) チップサイズ 10×70 μm |
| 投光レンズ | 非球面プラレンズ | F-9mm 有効 ϕ 6mm |
| ミラー | 金蒸着 Si ウェファー | 反射率 97%以上($\lambda = 905$) |
| アパーチャー | ピンホールフィルタ | ϕ 3mm |

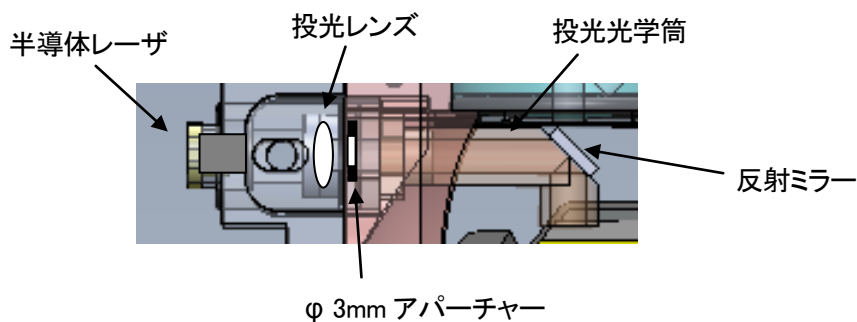


図 2-9 投光ユニット

(3) 受光ユニット

図 2-10 に受光ユニットの構成を示す。ReM の光軸上に置かれた受光ユニットは ReM からの反射光を有効径 ϕ 18mm 焦点距離 50mm のレンズで絞る。反射ミラーにより水平方向に折り曲げられた光は多層膜干渉フィルタを通過してアバランシャフォトダイオードに導かれる。光軸以外から入射される太陽光などの外乱光をカットするため、焦点距離は形状が許す限り長く取っている。

主要部品のスペックを以下に示す。

| | | |
|--------|-------------------------|---|
| 受光レンズ | 両凸ガラスレンズ | 有効径 18mm 焦点距離 50mm |
| ミラー | 金蒸着 Si ウェファー | 反射率 97%以上($\lambda = 905$) |
| 光学フィルタ | 多層膜干渉フィルタ | $\lambda = 905 \pm 20\text{nm}$ バンドパスフィルタ |
| 受光素子 | S12508-05 ハママツフォトニクス | ϕ 0.5 アバランシャフォトダイオード |

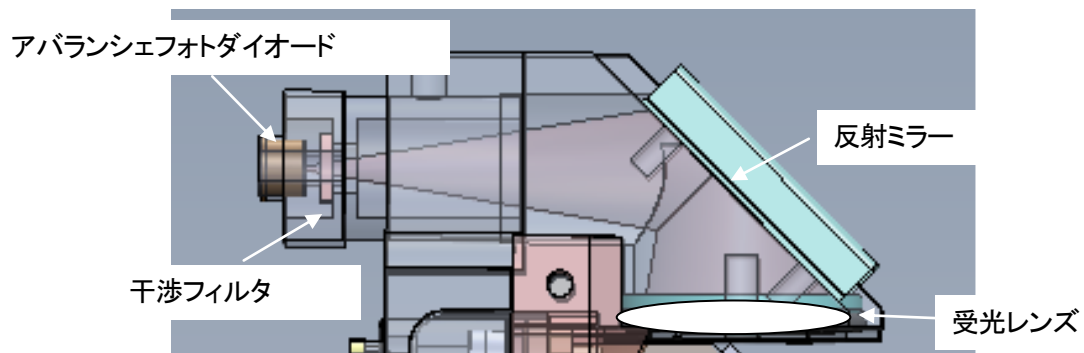


図 2-10 投受光ユニット

(4) 投光回路の投光効率

図 2-11 のように投光光学系を一体型にして省スペースを実現し、各光学系での効率を測定した。しかし受光効率を上げるには受光レンズの前に置かれた反射ミラーのけられを最小にしなければならない。そのためには投光光学系の光芒を小さくする必要があり、それにより投光効率が悪くなる。受光効率と投光効率の最適な光芒を実験で求めた。

レーザの MTBF はパワーと仕様温度により大きく変動する。レーザパワーはレーザの安全規格 IEC60825-1 class1 の制限により、3D センサでは 12.6W が限界である。レンズによる投光効率はレンズの F で決められる。焦点距離 9mm レンズ開光φ 3mm の場合、F=3 50%の効率となる。その他ミラーの反射効率、光学窓の減衰等を入れると効率 30%になり、その場合に必要なレーザ素子のパワーは 45W になる。但し温度 70°C の場合のレーザの MTBF のメーカー補償が 100,000h 以上となるため、効率が悪いが単純なこの光学系を採用した。

3DセンサVer1.0 投光パワー／受光波形 2013.11.28 RS／西村

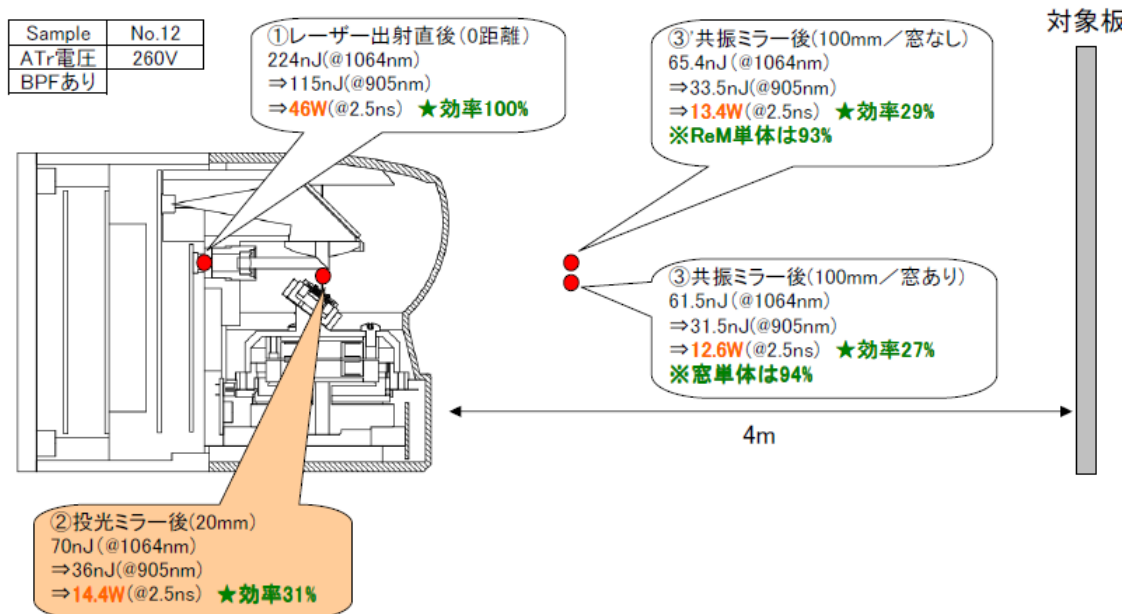


図 2-11 投光効率

(5) 光学窓と内面反射

光学窓の形状を図 2-12 に示す。内面反射が大きいと内面反射と近距離の信号が重なって分離できなくなるため、近距離に不感帯を発生させる。2 重スライスで近距離の信号をカットしているが、その値が大きくなると分離が不可能になる。従って内面反射はできるだけ小さくすることが性能向上につながる。光学窓の形状は ReM の光点を焦点にもつ回転楕円体形状のため、光学窓による内面反射は少ないが、投光筒出口エッジから出た拡散光が ReM のケースや金属に当たって反射され、受光光学系に入ることが多い。

光学窓の形状は ReM の走査中心と内面反射を検出しないポイントを焦点とした回転楕円体の形状を取っている。ReM から反射されたレーザはもう一方の焦点に集まるため、光学窓の内面の正反射成分は受光光学系には入射しない。

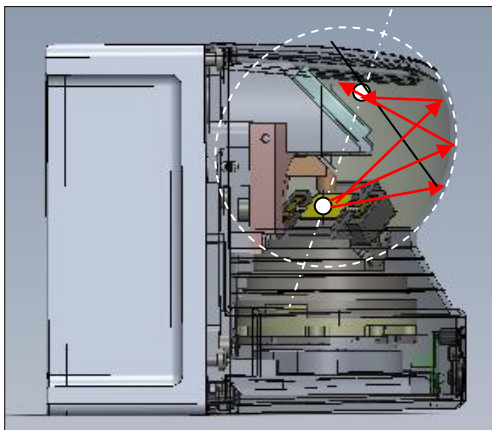


図 2-12 光学窓の形状

2-3-2 共振ミラーの開発

(1) 共振ミラー(ReM)の原理と構造

共振ミラーはねじれ軸を持った材料に光学ミラーやコイルをつけ、更に周囲には磁石を配置した図 2-13 の構造を持っている。

Tortion がねじれを運動とコイルに電流を流す電極となる。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 Tortion 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。本 ReM は Tortion には特殊加工された SUS304 が使われており、シリコンウエファァーを使った MEMS に比べミラー面積の大きな ReM を安価に作る事ができる。

ReM の構成部品は図 2-14 に示すように7点である。中間にある緩衝部品やつなぎ部品も入れても 10 点である。ミラーからコイル部品までの稼動部分は部品が小さく軽いため、位置決めピンで位置決めしながらディスペンサで固定し、オープンで固める。使用部品の総重量が ReM の共振周波数と大きく関係するため位置決め精度だけでなく、ディスペンサ(接着材)の塗布量も厳しくコントロールしなければならない。

試作した 1200Hz の ReM の形状を図 2-15 に示す。共振周波数に最も大きな影響を受けるミラー(重量が重い)はこの形状が限界であった。この形状で破断限界は振幅 78 度 余裕は 51% である。余裕率が 65% を越えると Tortion に μ クラックが入ったり、微妙な組成変化が現れるようである。詳細は確認できなかった。経験上 50% で使うことが最適と考えている。

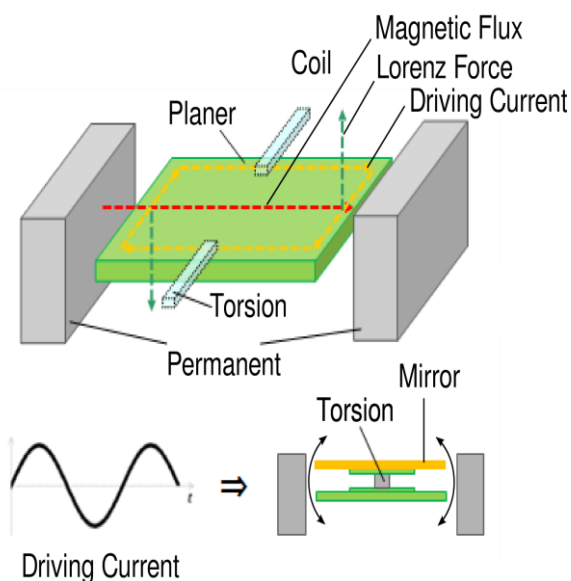


図 2-13 ReM の動作原理

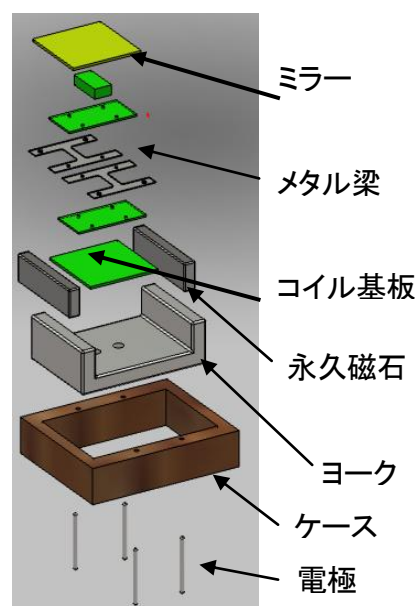


図 2-14 ReM の構成部品

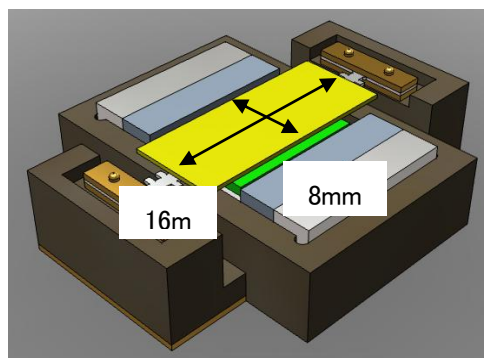


図 2-15 試作した ReM

Tortion は多く曲げると自己発熱のため SUS が硬くなり共振周波数がさがる。Tortion は放熱効果が高い Fish Born 構造をとっている。

(2) 共振ミラーの特性

共振点の設計値は 1219Hz で、製作した ReM は 1210~1220Hz になるように試作している。制御は共振点より高めの 1220Hz 近辺で行っている。振り角度検出センサにより 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、絶えず 40 度で振るようコントロールしている。ReM は周囲温度が上がると共振周波数が+3Hz (60℃)、下がると-5Hz 変化する。追従周波数が 1228Hz 以上になると、レーザ安全クラス 1 オーバになるため、センサが停止する。従って使用温度内ではこの値以下になるように検査しなければならない。

(3) 共振ミラーの組み立て精度

10 個のミラーを製作し共振特性と組み立て精度を検証した。図 2-16 に示すミラーの貼り付け精度が、ReM の共振周波数及びオフセット角度に大きく影響し、品質が安定しなかった。特にミラーの組み立ては基準ピンをすることができないため、外形であわせると位置ずれが大きく、更に接着材を塗布した後、オープンで固定させる間にずれることが多い。量産化には大きな課題となるため、品質を安定させるジグと ReM の組み立てロボットを検討している。

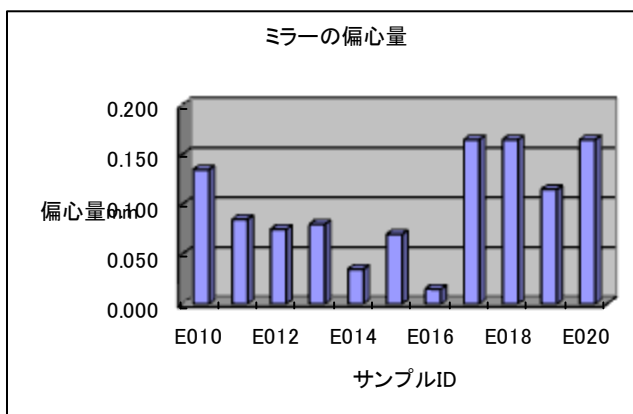
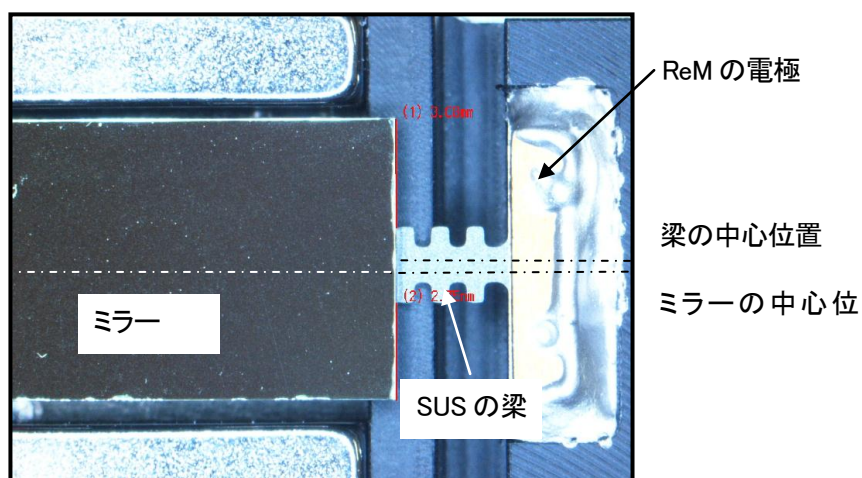


図 2-16 組み立て精度分布

2-3-3 非接触給電回路の開発

非接触給電は中空モータの軸から線を出し、制御回路に接続した。図 2-17 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ある。磁性体は純鉄から低周波フェライトコア 2G8 に変更して形状を少し大きくし、巻く数を多くできるように改善した。140 ターン以上巻けばフラットな特性が得られるが、その場合銅線にインピーダンス(銅損)が大きくなるので、 ϕ 0.25 100 ターンで製作した。この場合でも 70%以上の効率を確認した。

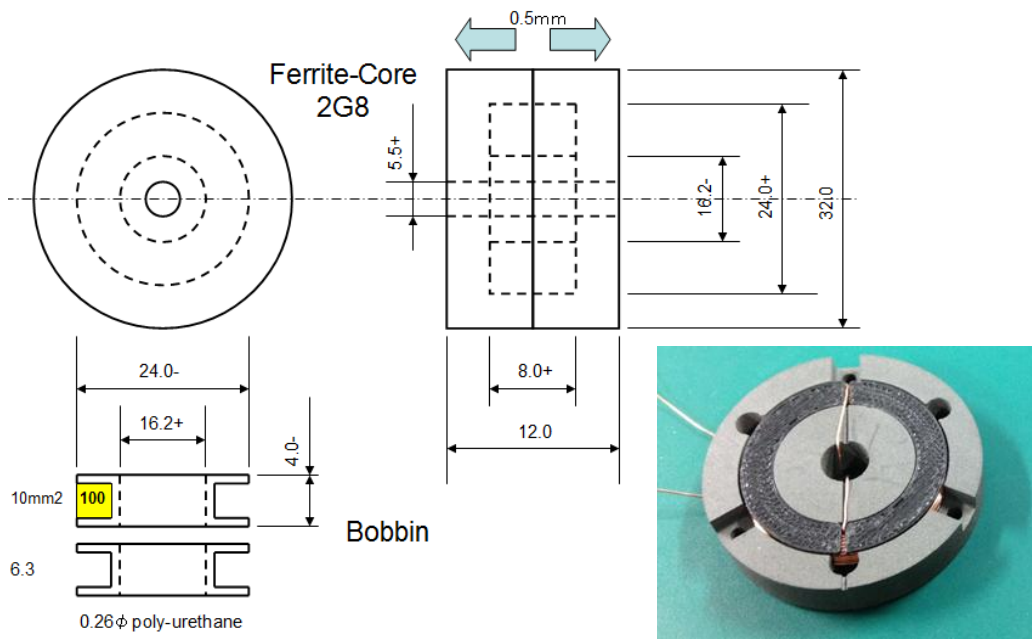
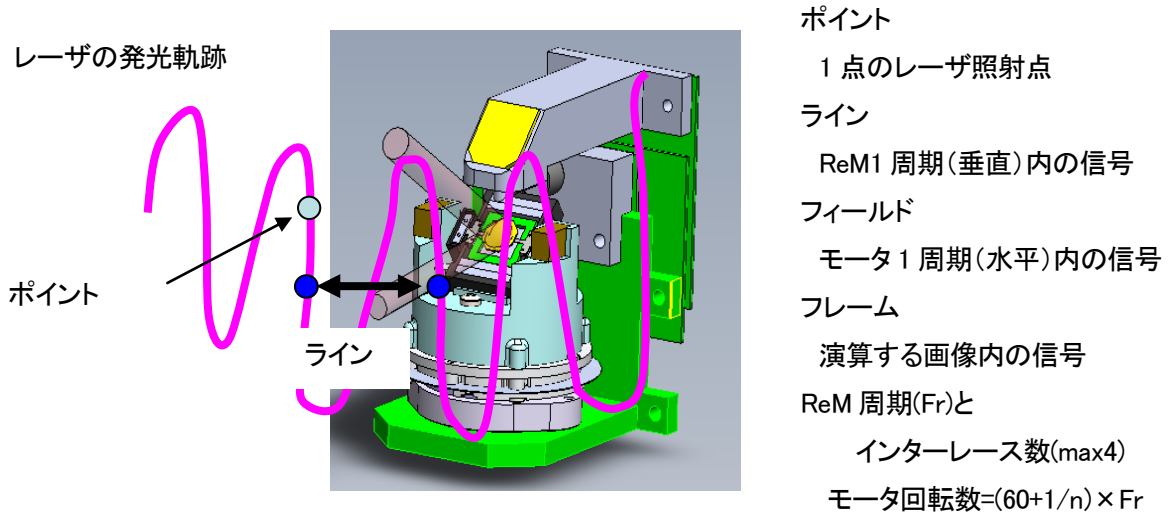


図 2-17 非接触給電コア 外観図

2-3-4 3次元走査方式の開発

ReM 制御はセンサの計測範囲外に基準反射板を置き、その反射データから ReM の周波数、振幅、位相(電気信号と ReM の振動遅れ)を測定し、モータと ReM のドライバ信号を制御する。

ReM 制御するパラメータを図 2-18 に示す。



| | スポット数 | ライン/フィールド数 | 画角 | 時間 |
|----------|-----------|------------|-------|----------|
| ポイント P | 1p | | | 9μ s |
| ライン L | 90p | | 40 度 | 0.833ms |
| フィールド Fi | 3,240p | 60(有効 36L) | 220 度 | 50ms |
| フレーム F1 | Max12960p | 1~4Fi | | 50~200ms |

図 2-18 ReM 制御パラメータ

(1) ReM 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にレーザーが照射されると、検出したレーザーのインテンシティーは白が高く黒が低くなる。この値が設計された値になるように、レーザーの振り角度と ReM のライン走査とモータの回転走査の位相を調整する。

白幅は振幅に依存し、インテンシティーの立ち上がりは位相に依存する。

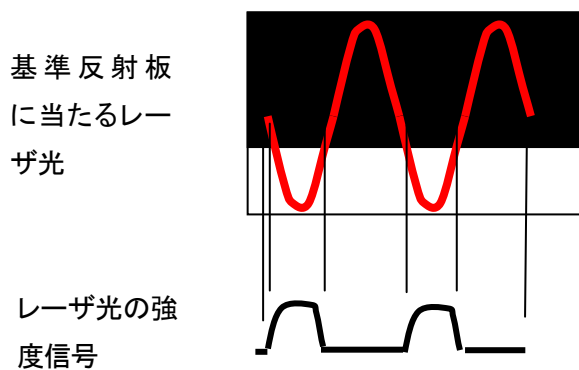


図 2-19 基準反射板からの信号

(2) モータ制御

3D 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。振動や衝撃を受けると制御が乱れる。それを極限までに短縮する制御技術が求められる。

3D 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。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 以下にすることができた。

第3章 大容量の3次元データを効率よく通信できるコマンド体系の開発

3-1 プロトコルの開発 VSSP Ver1.1

3D センサのコマンドシステムを完成し、センサに組み込んだ。通信用プロトコルとして VSSP (Volumetric Scanning Sensor Protocol) を策定した。VSSP は以下の4種類のコマンドと2種類のデータ形式を持つコマンド体系である。

コマンド

- 2.1 PING
- 2.2 バージョン情報
- 2.3 パラメータ設定
- 2.4 パラメータ取得 データ Start/Stop

データ形式

- 2.6 ri 形式データ
- 2.7 ro 形式データ

上記プロトコルに対応したアプリケーションプログラムとサンプルプログラムを作成した。このプログラムは、2014 年度つくばチャレンジに参加するメンバーに提供した。

使用実績から問題点を抽出すると共に、今後プロトコルの改良及びライブラリーを充実させていく。詳細は、添付資料2「VSSP 仕様書」参照。

3-2 幅広いユーザに使い易いアプリケーションインターフェースの開発

3D データの解析やデータの収集に専用のアプリケーションソフトを作成した。添付資料の 3D センサビューア仕様書は開発者向けのビューアである。

アプリ画面を図 3-1 に示す。この画面では 3D 表示を視点を変えてみる事ができる。また必要なログデータの所得ができ、検出物の位置や精度等も確認することができる。またロボットに送られた通信データの所得もできるため、ロボット制御のデバッグにも使用できる。

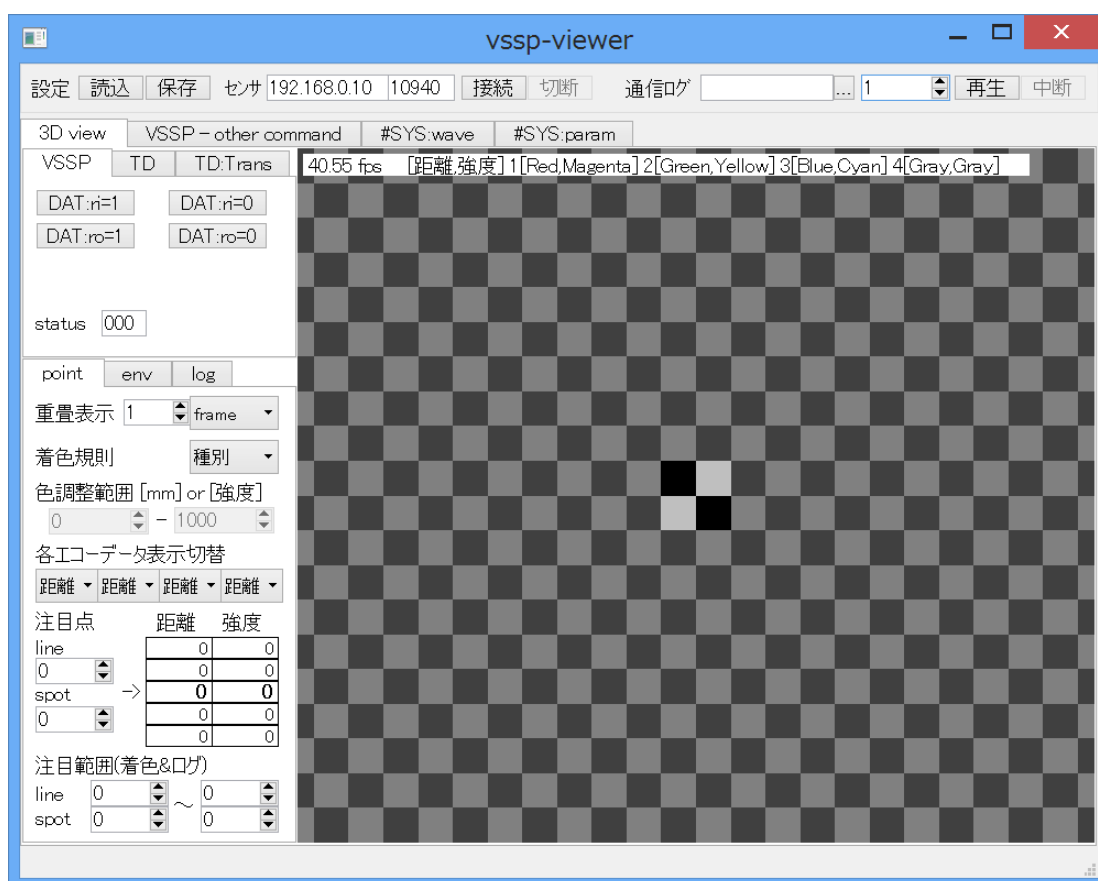


図 3-1 アプリケーション(ビューア)画面

その他ユーザに開放する画面は VSSP のその他のコマンド操作タブ画面がある。

一般に開放しないセンサ開発者向けの画面は以下の 2 画面である。

- ・波形操作タブ画面
- ・パラメータ操作タブ画面

詳細は添付資料3「3D センサビューア仕様書」を参照。

第4章 センサの試作評価

3D センサは 3 回試作した。

Ver1 平成 24 年 基本特性評価用 3 台

Ver2 平成 25 年 1 次評価用 10 台

Ver3 平成 26 年 つくばチャレンジ、アドバイザ、北陽評価用 20 台

試作評価は平成 26 年度製作の Ver3 で行った。

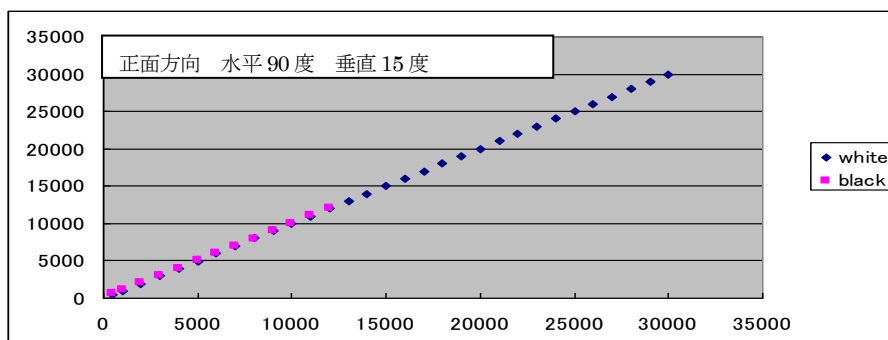
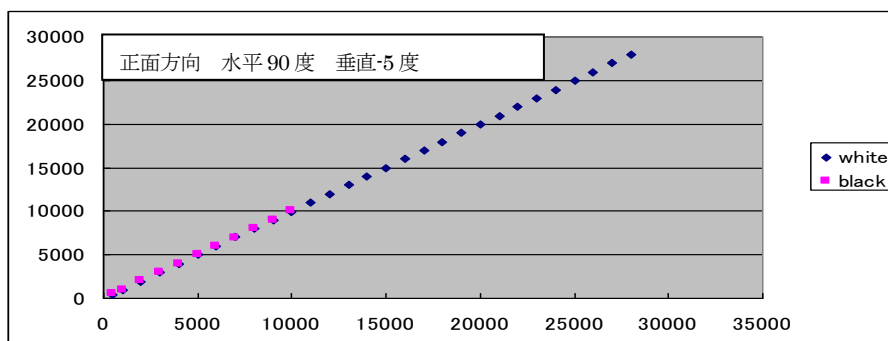
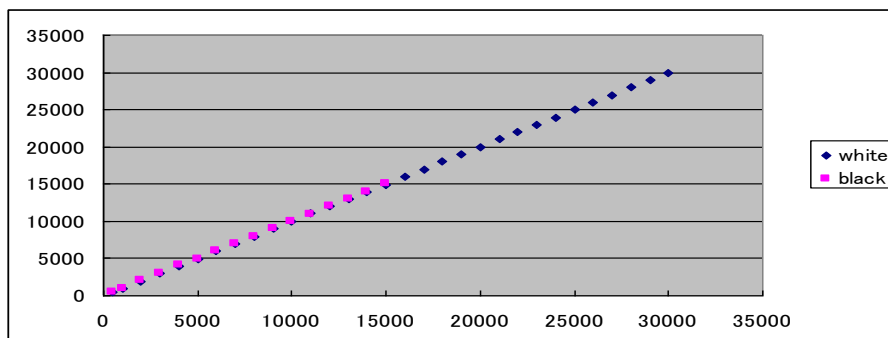
4-1 試験結果報告

距離・精度試験

水平 0 度 垂直 15 度(正面 標準位置)

水平 90 度 垂直 15 度(側面 位置)

水平 90 度 垂直-5 度(側面 最小検出感度位置)



第5章 センサの総合評価

5-1 ロボット搭載評価

組み上げたセンサ装置を研究開発用の移動ロボットに搭載し、ロボット周囲の環境認識に利用するための総合的な評価として、以下に示す各項目について検討を行った。

- ・三次元点群地図の作成

つくば市の遊歩道環境において、屋外の三次元点群地図を生成した。広場内建屋周辺、ペDESTリアンデッキ、公園内等において実験を行った結果、周囲の環境が正しく三次元的に計測された。

- ・人間の計測

広場内の環境において、静止して起立している人間の横をロボットが移動しながら計測した結果、人間の存在が確認できるデータを取得することができた。

- ・走行路面の計測

大学構内のアスファルト道路において、走行路面の計測実験を行った結果、ロボット正面約4m までの路面を計測できており、ロボット近傍については密に計測されていることが確認できた。また、道路脇の縁石を計測する実験を行った結果、高さ数 cm の縁石が正しく検出されることがわかった。

詳細は、添付資料4「ロボット環境認識報告書」を参照。

また、ロボットに搭載して使用するためのセンサドライバを作成した。このソフトウェアは、以下の三つのプロセスから構成される。

- ・データ受信プログラム

- ・座標変換プログラム

- ・点群表示プログラム

詳細は、添付資料5「センサドライバソフトウェア説明書」を参照。

5-2 つくばチャレンジ報告

つくばチャレンジに参加するチーム 13 チームおよびロボットメーカーである外部アドバイザー5 団体に試作機を提供し評価して頂いた。本研究開発の妥当性や事業化に向けての課題を確認することができた。

以上

資料集

資料1: 3D センサの仕様書・外形図

資料2: VSSP 仕様書

資料3: 3D センサビューア仕様書

資料4: ロボット環境認識報告書

資料5: センサドライバソフトウェア説明書

日付：2014.07.11

3D 測域センサ 3D LAIDER

仕 様 書

| | | | | | | |
|------|----------------------------|------------|-----------|-------|---------------|------|
| □× | | | | | | |
| □×7 | 免責事項訂正、同期入出力の説明文修正、誤記訂正・追記 | 2,6,7,8,11 | 2014.4.24 | 山本(智) | RS-0401 | |
| 訂正符号 | 訂 正 理 由 | | 訂正頁 | 訂正年月日 | 訂 正 | 図修番号 |
| 承 認 | 確 認 | 作 成 | 設 計 | 名 称 | 3D LAIDER 仕様書 | |
| | | | | 図 番 | C - 4 2 - | 1/5 |

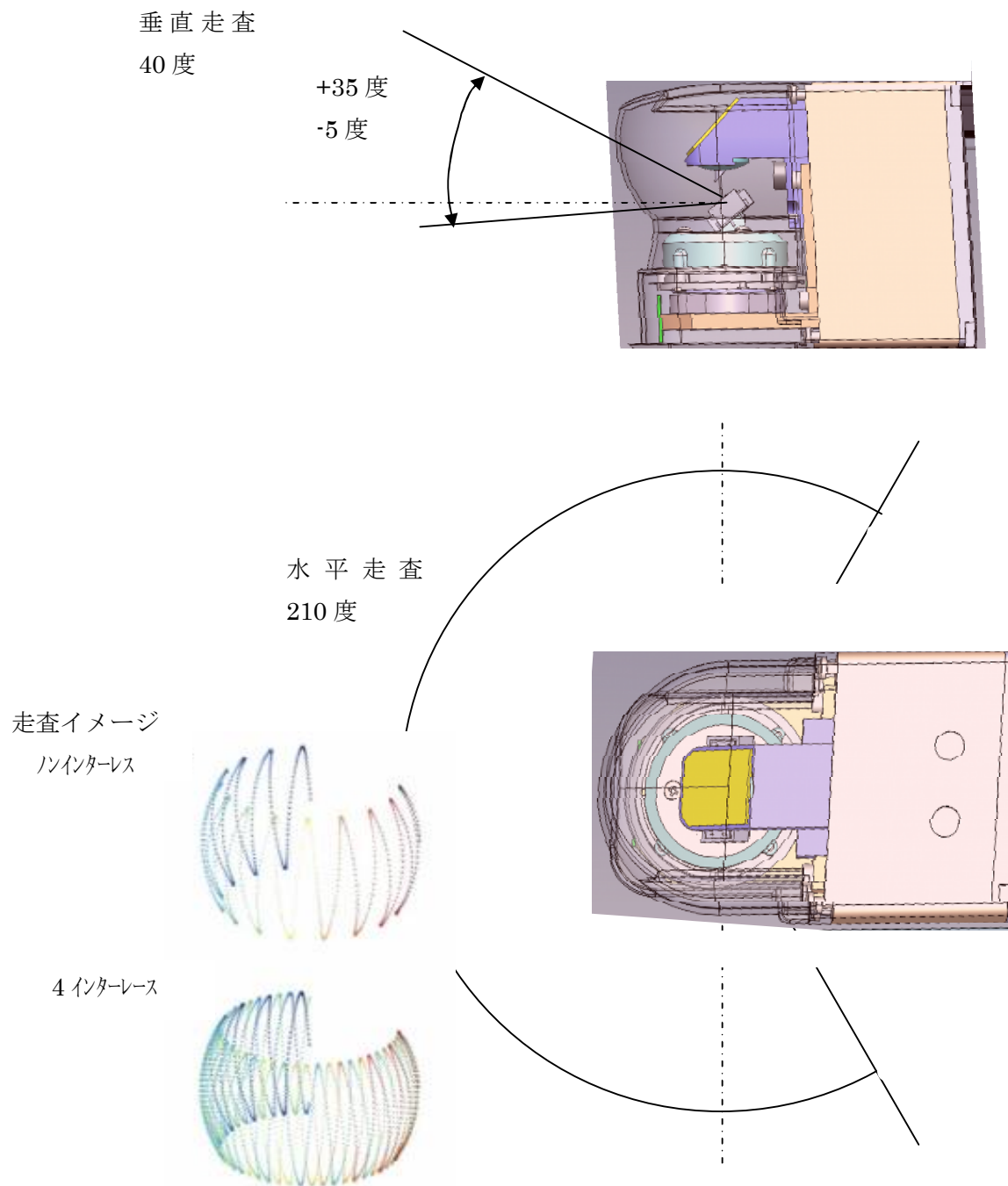
1. 概要

動作原理

- ・ レーザ($\lambda=905\text{nm}$)光線により半円状のフィールドをスキャンし、対象物との距離計測とそのステップ角度により座標を計算し、設定されたエリア内の障害物を検知するセンサです。
- ・ 通信プロトコル VSSP を使用することで、距離データを出力することが可能です。
- ・ レーザの安全はクラス1です。

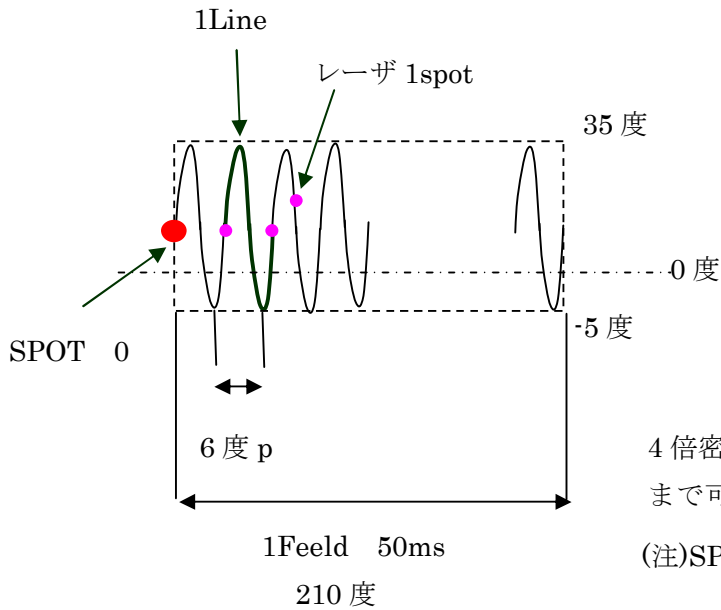
2. 構成(光線スキャンイメージ)

(1)構成図



| | | | | |
|----|--------------|----|-------|-----|
| 名称 | 3DLAIDER 仕様書 | 図番 | C-42- | 2/5 |
|----|--------------|----|-------|-----|

(2) 光線図説明

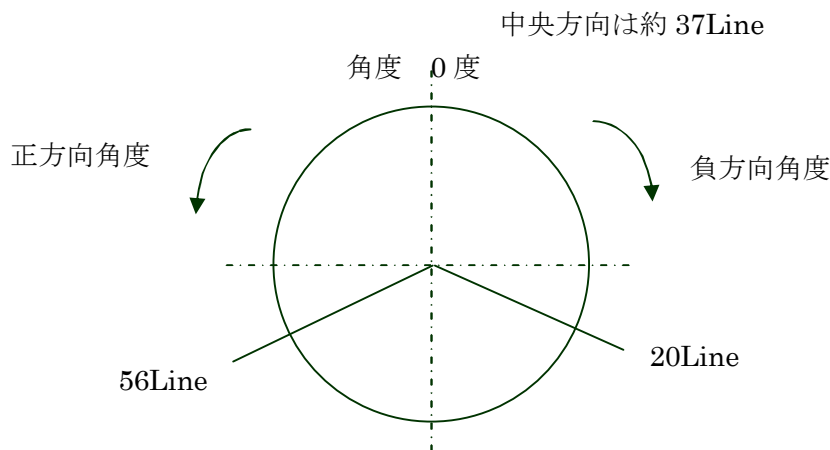


| | |
|--------------|------------|
| 1Frame | Max 4Field |
| 1Field | 35Line |
| 1 Line | 60spot |
| 高密度の周辺部は7点消灯 | |

4倍密度(インターレース4)
まで可能

(注)SPOT NO.0はLine 開始点0度の位置

(3) Flame Field Line の相関関係図



4インターレースの場合

インターレースは1~4まで可能です。

| Flame | Field | Line | 開始角度 |
|--------|--------|--------|--------|
| 1Flame | 1Field | 20Line | -105 |
| | | 56 | +105 |
| | 2Field | 20 | -106.5 |
| | | 56 | +103.5 |
| | 3Field | 20 | -107 |
| | | 56 | +102 |
| | 4Field | 20 | -108.5 |
| | | 56 | +100.5 |

Line 終了角度は開始角度+6度

| | | | | |
|----|--------------|----|-------|-----|
| 名称 | 3DLAIDER 仕様書 | 図番 | C-42- | 3/5 |
|----|--------------|----|-------|-----|

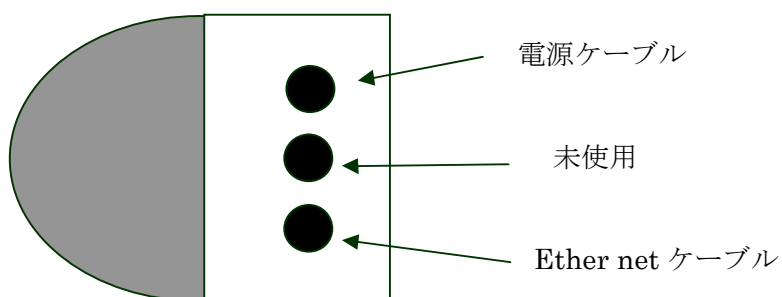
3. 定格仕様

| | |
|----------|--|
| 項目 | 内容 |
| 名称 | 3次元測域センサ (3D LIDAR) |
| 型式 | YVT-X001 |
| 光源 | Laser diode Wave length=905nm(Class1) |
| 電源 | 10 to 30VDC(12v 700mA 24v 350mA) |
| 水平走査角度 | 210度 ピッチ 6度 |
| 垂直走査角度 | 40度 分解能 60SPOT |
| インターレース | Up to 4field |
| 検出距離 | Min8m(黒紙 反射率 10%) Min25m(白紙) |
| 繰り返し精度 | ±40mm(白紙 8m 以下) ±100mm(白紙 20m 以下) |
| 検出エコー数 | UP to 3 echoes (1st, 2nd, 3rd, Last echoe) |
| 水平走査速度 | 20Hz |
| 垂直走査速度 | 1200Hz |
| 水平走査エラー | 0.2% (100μs/50ms) |
| インターフェース | Ether net(TCP/IP) 100MBPS |
| 構造 | IP67(無通電) 水中使用不可 |
| 重量 | Approx 700g |
| 大きさ | 70mm×106mm×95mm(W×D×H) |
| 温度/湿度 | -10～50℃ 85%以下(結露をしないこと) |
| ジャイロ | InvenSense MPU-9250#1 |
| 通信プロトコル | VSSP 1.0 |

#1:詳細はジャイロのカタログ参照

(注)環境の影響は実機での確認をお願いします

4. 接続及び表示灯



4.1 電源ケーブル仕様

電源ケーブル 2 芯 2m(フライングリード仕様)

| | |
|----------------|---|
| 内容 | |
| 電源 V+ (10～30V) | 茶 |
| 電源 V- (0V) | 青 |

| | | | | |
|----|--------------|----|-------|-----|
| 名称 | 3DLAIDER 仕様書 | 図番 | C-42- | 4/5 |
|----|--------------|----|-------|-----|

4.2 Ethernet ケーブルの仕様

コネクタ型式

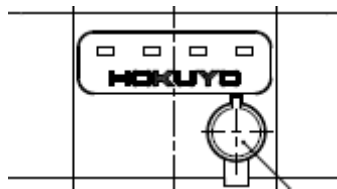
RJ-45

Ethernet 接続プラグ

| PIN番号 | 機能 | 配線色(T568A) |
|-------|-----|------------|
| 1 | TX+ | 橙 |
| 2 | TX- | 白/橙 |
| 3 | RX+ | 緑 |
| 4 | RX- | 白/緑 |

通信プロトコルの内容は通信仕様書を参照願います。

4.3 表示灯



| | |
|----------|---|
| 電源 | 緑 |
| 故障 | 赤 |
| 通信 | 橙 |
| IP RESET | 青 |

IP Reset 保護カバー

5. Ethernet 設定

5.1 初期値について

IP 初期値 : 192.168.0.10

ポート番号 : 10940

5.2 IP 初期化について

製品下部の保護用のパッキンを取り外し、IP 初期化スイッチを 2 秒以上長押ししてください。

橙色の LED が点滅後、センサが再起動を行うのでスイッチを離して下さい。

初期化後、保護用のパッキンを必ず取り付けてください。

VSSP ver 1.0 仕様書 (Volumetric Scanning Sensor Protocol)

Volumetric Scanning Sensor Project

北陽電機株式会社

2014年9月1日

変更履歴

| 年月日 | 署名 | 概要 |
|------------|------------|--|
| 2014年7月20日 | (株)Doog 大島 | 初版 |
| 2014年9月1日 | (株)Doog 大島 | <ul style="list-style-type: none">・ 2.6, 2.7 付属の解説における誤記を修正・ 3.1 の座標変換の説明を補足・ ri 形式と ro 形式の解説を刷新 (ri 形式のエコーインデックス配列の説明誤りも修正)・ エコーインデックス配列の「データ配列内各先頭エコー位置」を「データ配列展開時の各先頭エコー位置」に修正 |

目次

| | |
|---|-----------|
| 1. 全般 | 3 |
| 1.1 通信方式 | 3 |
| 1.2 測距方式 | 3 |
| 1.3 データ形式 | 3 |
| 1.4 表記形式 | 4 |
| 1.5 時刻 | 4 |
| 2. コマンド | 5 |
| 2.1 応答確認 (PNG コマンド) | 6 |
| 2.2 バージョン情報 (VER コマンド) | 6 |
| 2.3 パラメータ取得 (GET コマンド) | 7 |
| 2.4 パラメータ設定 (SET コマンド) | 8 |
| 2.5 データ開始/停止 (DAT コマンド) | 8 |
| 2.6 ri 形式データ (<code>_ri</code> 応答コマンド) | 9 |
| 2.7 ro 形式データ (<code>_ro</code> 応答コマンド) | 11 |
| 2.8 ax 形式データ (<code>_ax</code> 応答コマンド) | 13 |
| 3. 参考 | 14 |
| 3.1 3次元座標変換 | 14 |
| 3.2 視野角に対するデータ範囲 | 14 |
| 3.3 データ構造 | 15 |

1. 全般

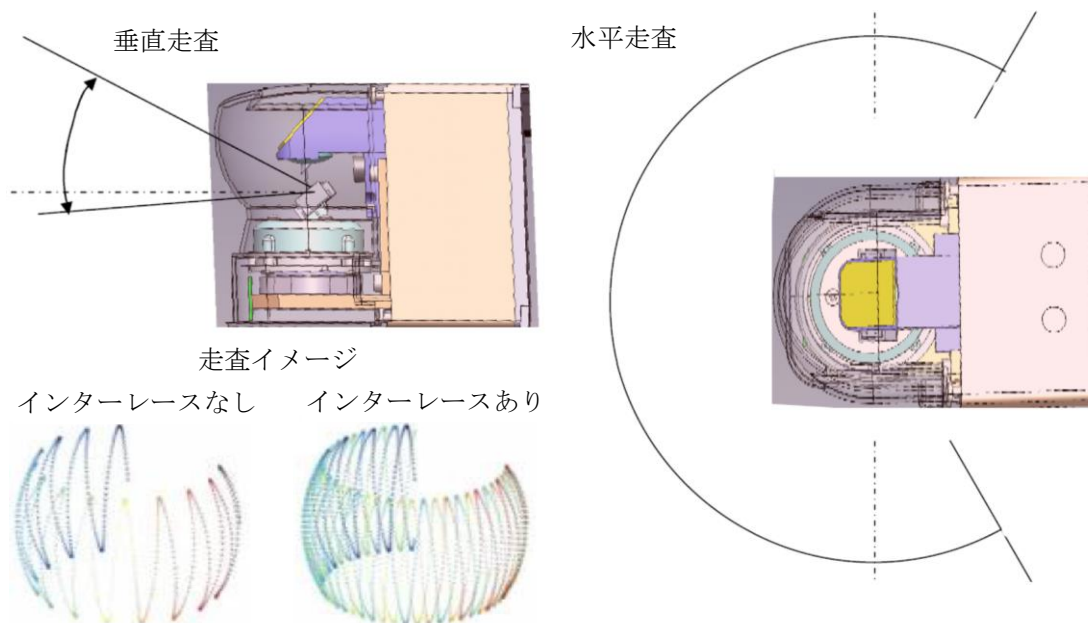
1.1 通信方式

セッション層として TCP/IP、UDP/IP、USB CDC-ACM などを使用する。誤り検出や訂正は、セッション層以下の仕組みを用い VSSP では実施しない。

1.2 測距方式

本プロトコルはスキャニングにより 3 次元の距離等を測定するセンサ全般で利用することを前提に構築されている。

ただし、本プロトコルの策定にあたり参考としたセンサは、下図の通り水平走査と垂直走査にそれぞれモータの無限回転とミラーの振動を組み合わせたスキャニングを実施するタイプである。



1.3 データ形式

スキャニングにより測定するデータの区切りを以下の通り呼称する。

| 名称 | 意味 |
|-------|---|
| エコー | 任意の 1 方位内における 1 つの奥行き測定 |
| スポット | 任意の 1 方位における測定全体 (複数のエコーをまとめたもの) |
| ライン | 垂直走査または水平走査の速い側の 1 周期分のスポットの集合 |
| フィールド | 垂直走査または水平走査の遅い側の 1 周期分のラインの集合 |
| フレーム | インターレーススキャンを含み、垂直および水平のスキャンがある任意方位から同一の方位に戻るまでのラインの集合 (インターレースが無い場合は 1 フレーム = 1 フィールドである) |

1.4 表記形式

通信データ列には可読文字とバイナリが混在し、表記形式を以下の通り定義する。

| データ列表記 | 意味 |
|--------|--|
| 'A' | 1文字(byte)の固定された可読文字(左例では文字 A を意味する) |
| C(n) | n文字(byte)の固定ではない可読文字列 |
| LF | ラインフィード = 0x0A |
| CR | キャリッジリターン = 0x0D |
| U8 | 符号無し 1byte 整数 |
| U16 | 符号無し 2byte 整数, リトルエンディアン |
| S16 | 符号付き 2byte 整数, リトルエンディアン |
| U32 | 符号無し 4byte 整数, リトルエンディアン |
| S32 | 符号付き 4byte 整数, リトルエンディアン |
| Rsv | 予約領域の空データ = 0x00 ※ センサからホストへ構造化したデータを複数種類連結して送信する際に、ホスト側の受信バッファから各構造化データの先頭を 4byte=32bit 刻みでアクセスできるように予約領域を追加する |

センサが内部で保持するパラメータには、以下の 2 種類がある。

| 呼び方 | 意味 |
|---------|------------------------|
| 固定パラメータ | SET コマンドで変更できない固定された情報 |
| 可変パラメータ | SET コマンドで変更できる設定値 |

1.5 時刻

本プロトコルには“タイムスタンプ”と表記する時刻情報を含んでいる。

タイムスタンプはセンサ内部で保持する電源投入時からの時間カウントを ms 単位で表したものを意味する。

2. コマンド

コマンドは以下の2種類からなる。

【要求コマンド（ホスト→センサ）の基本型】

| | | |
|---------|----------|----------------------|
| C(3) #1 | C(n) #2~ | LF or CR or CR+LF |
|---------|----------|----------------------|

#1 コマンド名

#2~ コマンド毎に定義される文字列（n=0の場合もある）

※応答時の要求コマンドのエコーを含む場合に末尾はLFに統一される

【応答コマンド（センサ→ホスト）の基本型】

| |
|---------------------|
| VSSP 共通ヘッダ #1~#6 |
| コマンド毎に定義されるデータ列 #7~ |
| ... |

#1~#6 VSSP 共通ヘッダ（必ず先頭に配置される）

#7~ コマンド毎に定義されるデータ列（データ列は0個~複数個並ぶ）

※コマンド末尾はVSSP 共通ヘッダに含まれる”全バイト数”から得る

【VSSP 共通ヘッダ詳細】

| | | | | | | | |
|--------|--------|--------|-----|---------|--------|---------|----|
| ‘V’ | ‘S’ | ‘S’ | ‘P’ | C(3) #1 | ‘:’ | C(3) #2 | LF |
| U16 #3 | U16 #4 | U32 #5 | | | U32 #6 | | |

#1 パケット種類

#2 ステータス(可読3文字であることに注意)

| 番号 | 意味 |
|-------|----------------------|
| “000” | 正常にコマンドを処理 |
| “101” | 定義されていないコマンドを受けた |
| “102” | コマンドの型が正常ではない |
| “103” | コマンドが設定可能な表現ではない |
| “104” | パラメータが設定可能な範囲を超えている |
| “201” | 通信に詳細不明なエラーが生じた |
| “301” | 測定データ取得に詳細不明なエラーが生じた |

#3 ヘッダバイト数 = 24

#4 応答コマンド全体バイト数

#5 要求コマンド受信タイムスタンプ

#6 応答コマンド送信タイムスタンプ

2.1 応答確認 (PNG コマンド)

【要求コマンド】

| | | | |
|-----|-----|-----|----|
| 'P' | 'N' | 'G' | LF |
|-----|-----|-----|----|

#1 コマンド名 = “PNG”

#2 (追加文字列なし)

【応答コマンド】

| |
|------------------|
| VSSP 共通ヘッダ #1~#6 |
|------------------|

#1 パケット種類 = “PNG”

#4 コマンド全体バイト数 = 24 (VSSP 共通ヘッダのみ)

2.2 バージョン情報 (VER コマンド)

【要求コマンド】

| | | | |
|-----|-----|-----|----|
| 'V' | 'E' | 'R' | LF |
|-----|-----|-----|----|

#1 コマンド名 = “VER”

#2 (追加文字列なし)

【応答コマンド】

| | | | |
|------------------|-----|----------|----|
| VSSP 共通ヘッダ #1~#6 | | | |
| C(4) #7 | ':' | C(n) #8 | LF |
| C(4) #9 | ':' | C(m) #10 | LF |
| (以下同じ) | | | |

#1 パケット種類 = “VER”

#7, #9 ... パラメータ種類

#8, #10 ... パラメータ応答

※後記の GET コマンドで得られる複数の情報をまとめて確認するためのコマンドである

2.3 パラメータ取得 (GET コマンド)

【要求コマンド】

| | | | | | |
|-----|-----|-----|-----|---------|----|
| 'G' | 'E' | 'T' | ':' | C(4) #2 | LF |
|-----|-----|-----|-----|---------|----|

#1 コマンド名 = "GET"

#2 パラメータ種類

| #2 | 種別 | 内容 | |
|--------|--------|---|---|
| "vend" | 固定 | ベンダー名 | |
| "prod" | 固定 | プロダクト名 | |
| "firm" | 固定 | ファームウェアバージョン | |
| "prot" | 固定 | プロトコルバージョン | |
| "seri" | 固定 | シリアル番号 | |
| "tblh" | 固定 | 水平方向座標変換テーブル | |
| | | 意味 | 各ラインデータには先頭スポットと末尾スポットの絶対方位が含まれるため、本テーブルを用いてすべての中間スポットの方位を詳細に計算することが出来る |
| | | 数値 | 先頭スポットの向きを 0、末尾スポットの向きを 65535 として 16bit に分割して表現 (ライン分割比率テーブル) |
| | データ | 数値表記： 16 進数可読文字 区切り： カンマ 個数： 1 ラインあたりのスポット数 | |
| "tblv" | 固定 | 垂直方向座標変換テーブル | |
| | | 意味 | 各ラインデータのすべてのスポットの垂直方位を得るために本テーブルを用いる |
| | | 数値 | 水平方向を 0、上方向を正として、360度を 16bit で分割して表現 (絶対角度テーブル) |
| | データ | 数値表記： 16 進数可読文字 区切り： カンマ 個数： 1 ラインあたりのスポット数 | |
| "_itl" | 可変 | インタレース設定 以下の設定状態が応答される | |
| | | 設定状態 | 意味 |
| | | "0,01" | 設定方法 0 番により 1 フィールド/フレーム |
| | | "0,02" | 設定方法 0 番により 2 フィールド/フレーム |
| | | "0,03" | 設定方法 0 番により 3 フィールド/フレーム |
| | "0,04" | 設定方法 0 番により 4 フィールド/フレーム | |

【応答コマンド】

| | |
|---------------------------------|----|
| VSSP 共通ヘッダ #1-#6 | |
| 要求コマンドのエコーバック(末尾 LF 含む) 任意 byte | |
| C(n) #7 | LF |
| C(n) #8 | LF |
| ... | |

#1 パケット種類 = "GET"

#7, #8, ... パラメータ応答 (少なくとも 1 行(#7)の情報を持ち、複数行の場合もある)

2.4 パラメータ設定 (SET コマンド)

【要求コマンド】

| | | | | | | | |
|-----|-----|-----|-----|--------|-----|--------|----|
| 'S' | 'E' | 'T' | ':' | C(4)#1 | '=' | C(n)#2 | LF |
|-----|-----|-----|-----|--------|-----|--------|----|

#1 パラメータ種類 (GET コマンドのうち可変コマンドのもの)

#2 設定状態 (GET コマンドに記載の"設定状態"を受け付ける)

【応答コマンド】

| | |
|---------------------------------|----|
| VSSP 共通ヘッダ #1~#6 | |
| 要求コマンドのエコーバック(末尾 LF 含む) 任意 byte | |
| C(n)#7 | LF |

#1 パケット種類 = "SET"

#7 任意のテキスト = 未定義

2.5 データ開始/停止 (DAT コマンド)

【要求コマンド】

| | | | | | | | |
|-----|-----|-----|-----|--------|-----|------------|----|
| 'D' | 'A' | 'T' | ':' | C(2)#2 | '=' | C(1) #3 | LF |
|-----|-----|-----|-----|--------|-----|------------|----|

#1 コマンド名 = "DAT"

#2 データ種類

"ri" / "ro" = 距離+強度 (range and intensity) / 距離 (range only)

"ax" = 補助 (auxiliary)

#3 状態

'0' = Stop

'1' = Start

※ri と ro の Start 時はお互いに上書きされて後から設定した内容が適用される

※ri と ro の Stop 時はいずれを指定しても両形式のデータが停止される

【応答コマンド】

| | |
|-------------------------------|----|
| VSSP 共通ヘッダ #1~#6 | |
| 要求コマンドのエコーバック(末尾 LF 含む) 9byte | |
| C(n)#7 | LF |

#1 パケット種類 = "DAT"

#7 任意のテキスト = 未定義

2.6 ri 形式データ (ri 応答コマンド)

※DAT コマンドの開始要求に基づいて垂れ流しで応答コマンドのみが送信される。

※1つの ri 形式データは1ライン全体のデータで構成され、通信パケットの上限を溢れる場合には分割されて複数の ri 形式データで1ライン全体のデータを構成される。

【応答コマンド】

| |
|------------------|
| VSSP 共通ヘッダ #1-#6 |
| 距離測定データヘッダ |
| エコーインデックス配列 |
| 距離+強度測定データ配列 |

#1 パケット種類 = “_ri”

#5 要求コマンド受信タイムスタンプ = 0

「距離測定データヘッダ」の詳細解説

| | | | | | |
|---------|--------|--------|---------|---------|---------|
| U16 #7 | U32 #8 | | | U32 #9 | S16 #10 |
| S16 #11 | U8 #12 | U8 #13 | U16 #14 | U16 #15 | |

#7 ヘッダバイト数 = 20

#8 ライン先頭スポットのタイムスタンプ

#9 ライン末尾スポットのタイムスタンプ

#10 ライン先頭スポットの水平方位

(正面を 0°, 左方向に正とし, 360° を 16bit で表現した絶対角度値)

#11 ライン末尾スポットの水平方位

(正面を 0°, 左方向に正とし, 360° を 16bit で表現した絶対角度値)

#12 フレーム番号

#13 フィールド番号

#14 ライン番号

#15 データ先頭スポット番号(1ライン分のデータが分割されると0以外になる)

「エコーインデックス配列」の詳細解説

| | | | | | | | |
|---------|---------|---------|---------|-----|---------|-----------|-----------|
| U16 #16 | U16 #17 | U16 #18 | U16 #19 | ... | U16 #20 | Rsv *1 | Rsv *1 |
|---------|---------|---------|---------|-----|---------|-----------|-----------|

#16 エコーインデックス配列バイト数

#17 スポット数

#18, #19 ... データ配列展開時の各先頭エコー位置(#17 スポット数の個数並ぶ)

#20 合計エコー数

*1 スポット数に応じて予約領域によりエコーインデックス配列を 32bit 刻みに調整

「距離+強度測定データ配列」の詳細解説

| | | | | |
|---------|---------|---------|---------|-----|
| U16 #21 | U16 #22 | U16 #23 | U16 #24 | ... |
|---------|---------|---------|---------|-----|

#21 #23 ... 距離[mm]

#22 #24 ... 受光強度

※#20 合計エコー数個の距離と受光強度が並ぶ

解説：ri 形式のデータ並び

【データ例】

ライン番号 line = 2

データ先頭スポット番号 spot = 5 (※実際には先頭が 0 となることが多い)

エコーインデックス配列 index[] = {0, 2, 3, 4, 6 ... }

距離+強度測定データ配列 data[] = {100, 30, 150, 20, 105, 35, 95, 35, 102, 22, 103, 31, 111, 27, ... }

ユーザ定義の構造体配列 points[]

【距離+強度測定データ配列意味】

points[0].range_mm = data [0] = ライン 2 番, スポット 5 番, 第 1 エコー, 距離値
 points[0].intensity = data [1] = ライン 2 番, スポット 5 番, 第 1 エコー, 受光強度値
 points[1].range_mm = data [2] = ライン 2 番, スポット 5 番, 第 2 エコー, 距離値
 points[1].intensity = data [3] = ライン 2 番, スポット 5 番, 第 2 エコー, 受光強度値
 points[2].range_mm = data [4] = ライン 2 番, スポット 6 番, 第 1 エコー, 距離値
 points[2].intensity = data [5] = ライン 2 番, スポット 6 番, 第 1 エコー, 受光強度値
 points[3].range_mm = data [6] = ライン 2 番, スポット 7 番, 第 1 エコー, 距離値
 points[3].intensity = data [7] = ライン 2 番, スポット 7 番, 第 1 エコー, 受光強度値
 points[4].range_mm = data [8] = ライン 2 番, スポット 8 番, 第 1 エコー, 距離値
 points[4].intensity = data [9] = ライン 2 番, スポット 8 番, 第 1 エコー, 受光強度値
 points[5].range_mm = data [10] = ライン 2 番, スポット 8 番, 第 2 エコー, 距離値
 points[5].intensity = data [11] = ライン 2 番, スポット 8 番, 第 2 エコー, 受光強度値
 points[6].range_mm = data [12] = ライン 2 番, スポット 9 番, 第 1 エコー, 距離値
 points[6].intensity = data [13] = ライン 2 番, スポット 9 番, 第 1 エコー, 受光強度値

【任意スポットデータ取得手順】

スポットデータ i のエコー数 = index[i + 1] - index[i]

特定スポットの全エコーデータにアクセス

```
for(p = index[ i ], echo=0; p <= index[ i + 1 ]; ++p, ++echo){
    //ここで points[] にアクセスして処理を実施
    //エコー番号が 0=第 1 エコー, 1=第 2 エコーとなる
}
```

※注意※

i≠17 スポット数-1 までは正常に計算できる。

index[#17 スポット数]= #20 合計エコー数として index 配列を確保すれば
 全スポットについて上記計算および処理を適用できる。

2.7 ro 形式データ（_ro 応答コマンド）

※DAT コマンドの開始要求に基づいて垂れ流しで応答コマンドのみが送信される。

※1つの ro 形式データは1ライン全体のデータで構成され、通信パケットの上限を溢れる場合には分割されて複数の ro 形式データで1ライン全体のデータを構成される。

【応答コマンド】

| |
|------------------|
| VSSP 共通ヘッダ #1-#6 |
| 距離測定データヘッダ |
| エコーインデックス配列 |
| 距離測定データ配列 |

#1 パケット種類 = “_ro”

#5 要求コマンド受信タイムスタンプ = 0

「距離測定データヘッダ」の詳細解説

| | | | | | |
|---------|--------|--------|---------|---------|---------|
| U16 #7 | U32 #8 | | | U32 #9 | S16 #10 |
| S16 #11 | U8 #12 | U8 #13 | U16 #14 | U16 #15 | |

#7 ヘッダバイト数 = 20

#8 ライン先頭スポットのタイムスタンプ

#9 ライン末尾スポットのタイムスタンプ

#10 ライン先頭スポットの水平角度

(正面を 0°, 左方向に正として, 360° を 16bit で表現した絶対角度値)

#11 ライン末尾スポットの水平角度

(正面を 0°, 左方向に正として, 360° を 16bit で表現した絶対角度値)

#12 フレーム番号

#13 フィールド番号

#14 ライン番号

#15 データ先頭スポット番号(1ライン分のデータが分割されると0以外になる)

「エコーインデックス配列」の詳細解説

| | | | | | | | |
|---------|---------|---------|---------|-----|---------|-----------|-----------|
| U16 #16 | U16 #17 | U16 #18 | U16 #19 | ... | U16 #20 | Rsv *1 | Rsv *1 |
|---------|---------|---------|---------|-----|---------|-----------|-----------|

#16 エコーインデックス配列バイト数

#17 スポット数

#18, #19 ... データ配列展開時の各先頭エコー位置(#17 スポット数の個数並ぶ)

#20 合計エコー数

*1 スポット数に応じて予約領域によりエコーインデックス配列を 32bit 刻みに調整

「距離測定データ配列」の詳細解説

| | | | | |
|---------|---------|---------|---------|-----|
| U16 #21 | U16 #22 | U16 #23 | U16 #24 | ... |
|---------|---------|---------|---------|-----|

#21 #22 #23 #24 ... 距離[mm]

※#20 合計エコー数個の距離が並ぶ

解説：ro 形式のデータ並び

【データ例】

ライン番号 line = 2

データ先頭スポット番号 spot = 5 (※実際には先頭が 0 となることが多い)

エコーインデックス配列 index[] = {0, 2, 3, 4, 6 ... }

距離測定データ配列 data[] = {100, 150, 105, 95, 102, 103, 111, ... }

ユーザ定義の構造体配列 points[]

【距離測定データ配列意味】

points[0]. range_mm = data[0] = ライン 2 番, スポット 5 番, 第 1 エコー, 距離値

points[1]. range_mm = data [1] = ライン 2 番, スポット 5 番, 第 2 エコー, 距離値

points[2]. range_mm = data [2] = ライン 2 番, スポット 6 番, 第 1 エコー, 距離値

points[3]. range_mm = data [3] = ライン 2 番, スポット 7 番, 第 1 エコー, 距離値

points[4]. range_mm = data [4] = ライン 2 番, スポット 8 番, 第 1 エコー, 距離値

points[5]. range_mm = data [5] = ライン 2 番, スポット 8 番, 第 2 エコー, 距離値

points[6]. range_mm = data [6] = ライン 2 番, スポット 9 番, 第 1 エコー, 距離値

【任意スポットデータ取得手順】

スポットデータ i のエコー数 = index[i + 1] - index[i]

特定スポットの全エコーデータにアクセス

```
for(p = index[ i ], echo=0; p <= index[ i + 1 ]; ++p, ++echo){
    //ここで points[] にアクセスして処理を実施
    //エコー番号が 0=第 1 エコー, 1=第 2 エコーとなる
}
```

※注意※

i=#17 スポット数-1 までは正常に計算できる。

index[#17 スポット数]= #20 合計エコー数として index 配列を確保すれば
全スポットについて上記計算および処理を適用できる。

2.8 ax 形式データ (ax 応答コマンド)

※DAT コマンドの開始要求に基づいて垂れ流しで応答コマンドのみが送信される。

【応答コマンド】

| |
|------------------|
| VSSP 共通ヘッダ #1~#6 |
| 補助データヘッダ |
| 補助データ |

#1 パケット種類 = “_ax”

#5 要求コマンド受信タイムスタンプ = 0

「補助データヘッダ」の詳細解説

| | | | | |
|--------|--------|--------|--------|--------|
| U16 #7 | U32 #8 | U32 #9 | U8 #10 | U8 #11 |
|--------|--------|--------|--------|--------|

#7 ヘッダバイト数 = 12

#8 先頭データのタイムスタンプ

#9 測定データ種類のビットフィールド

| bit | 内容 | bit | 内容 |
|-----|---------|-----|-----|
| 32 | 角速度 X 軸 | 16 | 未定義 |
| 31 | 角速度 Y 軸 | 15 | 未定義 |
| 30 | 角速度 Z 軸 | 14 | 未定義 |
| 29 | 加速度 X 軸 | 13 | 未定義 |
| 28 | 加速度 Y 軸 | 12 | 未定義 |
| 27 | 加速度 Z 軸 | 11 | 未定義 |
| 26 | 地磁気 X 軸 | 10 | 未定義 |
| 25 | 地磁気 Y 軸 | 9 | 未定義 |
| 24 | 地磁気 Z 軸 | 8 | 未定義 |
| 23 | 温度 | 7 | 未定義 |
| 22 | 未定義 | 6 | 未定義 |
| 21 | 未定義 | 5 | 未定義 |
| 20 | 未定義 | 4 | 未定義 |
| 19 | 未定義 | 3 | 未定義 |
| 18 | 未定義 | 2 | 未定義 |
| 17 | 未定義 | 1 | 未定義 |

※各軸の取り方、単位、無効値はいずれも未定義である

※ビットフィールドで区別して、応答時間が異なるデータが送信される

#10 測定データ数(複数時刻分がまとめて送信される)

#11 測定データの時間間隔 [ms]

「補助データ」の詳細解説

| | |
|---------|-----|
| S32 #12 | ... |
|---------|-----|

#12, ... ビットフィールドに応じたデータ値

※#9 測定データ種類のビットフィールドが 1 となったデータについて、

上位ビットから順に詰めて並べられる

※前記の詰めて並べたデータを 1 セットとして、#10 測定データ数だけセットデータが並べられる

3. 参考

3.1 3次元座標変換

以下の通り座標変換することで3次元での測定点を得る。

ただし、座標軸の取り方について、正面、左側、上側をそれぞれ X 軸、Y 軸、Z 軸の正とし、水平角度は正面をゼロとして左回りに、垂直角度は正面をゼロとして上回りをそれぞれ正とした。また、長さの単位(m, mm)は省略し、角度の単位は rad とする。

i = スポット番号

$v_angle[i] = tblv[i] * 2\pi / 65535$

$h_angle[i] = (line_head_h_angle_ratio + (line_tail_h_angle_ratio - line_head_h_angle_ratio) * tblh[i]) * 2\pi / 65535$

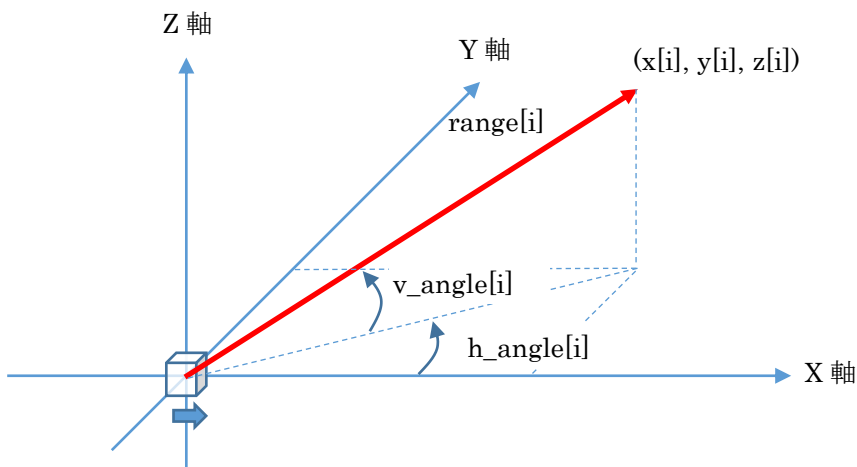
※ $h_angle[i]$ はすべてのスポットについて計算を都度実施する必要があります。理由：ri および ro 形式のデータに含まれる $line_head_h_angle_ratio$ と $line_tail_h_angle_ratio$ はラインの先頭および末尾のスポットの絶対水平方位を意味し、測定ごとに異なる値を持ちます。また、GET コマンドで得られる $tblh[i]$ はラインの中間スポットの絶対水平方位を計算するために用いられます。

以下により極座標系から直交座標系へ変換する。

$x[i] = range[i] * \cos(v_angle[i]) * \cos(h_angle[i])$

$y[i] = range[i] * \cos(v_angle[i]) * \sin(h_angle[i])$

$z[i] = range[i] * \sin(v_angle[i])$



3.2 視野角に対するデータ範囲

距離等の測定データをライン単位で送信する際に、規定された視野角を超えるデータが含まれる場合がある。超えた範囲については保障範囲外と見なし、ユーザ側で破棄するのが望ましい。また与えられるライン数は、視野角を基準として決定するため内部の制御位置や安定性によっては、固定されない場合があるためこれを考慮したソフトウェア設計が求められる。

3.3 データ構造

VSSP の応答コマンドの各構造化データを"疑似コード"として以下に示す。これは可読性を高めるための参考であり、下記項目に注意すること。

- 2byte 以上の変数バイナリ表現はリトルエンディアンとして通信される
- 後ろに別の構造体が接続される構造体については、自身の長さを示す変数があり、末尾に 4byte=32bit 区切りにするための予約領域が挿入される
- 各構造体内部のアライメントは通信パケット上に存在しない

【VSSP 共通ヘッダ】

```
struct vssp_header
{
    char        mark[4];           // パケット先頭マーク (可読 4 文字"VSSP")
    char        type[4];          // パケット種類 ([可読 3 文字]":")
    char        status[4];        // ステータス ([可読 3 文字][LF])
    uint16_t    header_length;    // ヘッダバイト数 (予約領域を含む)
    uint16_t    length;           // 応答コマンド全バイト数
    uint32_t    received_time_ms; // 要求コマンド受信タイムスタンプ [ms]
    uint32_t    send_time_ms;     // 応答コマンド送信タイムスタンプ [ms]
}
```

【距離測定データヘッダ】

```
struct range_header
{
    uint16_t    header_length;    // ヘッダバイト数 (予約領域を含む)
    uint32_t    line_head_timestamp_ms; // ライン先頭タイムスタンプ [ms]
    uint32_t    line_tail_timestamp_ms; // ライン末尾タイムスタンプ [ms]
    int16_t     line_head_h_angle_ratio; // ライン先頭水平角度
    int16_t     line_tail_h_angle_ratio; // ライン末尾水平角度
    uint8_t     frame;           // フレーム#
    uint8_t     field;           // フィールド#
    uint16_t    line;            // ライン#
    uint16_t    spot;           // データ先頭スポット#
}
```

【エコーインデックス配列：以下 2 形式はバイナリで同一】

```
struct range_index
{
    uint16_t    index_length;    // エコーインデックス配列バイト数 (予約領域を含む)
    uint16_t    nspots;         // スポット数
    uint16_t    index[nspots];  // データ配列展開時の各先頭エコー位置
    uint16_t    necho;          // 合計エコー数
}

struct range_index
{
    uint16_t    index_length;    // エコーインデックス配列バイト数 (予約領域を含む)
    uint16_t    nspots;         // スポット数
    uint16_t    index[nspots+1]; // データ配列展開時の各先頭エコー位置
}
```

```
}

```

【距離+強度測定データ配列】

```
struct data_range_intensity
{
    struct
    {
        uint16_t    range_mm;    // 距離 [mm]
        uint16_t    intensity;   // 受光強度
    } point[]
}

```

【距離測定データ配列】

```
struct data_range_only
{
    struct
    {
        uint16_t    range_mm;    // 距離 [mm]
    } point[]
}

```

【補助データヘッダ】

```
struct ax_header
{
    uint16_t        header_length; // ヘッダバイト数 (予約領域を含む)
    uint32_t        timestamp_ms;  // 先頭データのタイムスタンプ [ms]
    uint32_t        data_bitfield; // 測定データ種類のビットフィールド
    uint8_t         data_count;    // 測定データ数
    uint8_t         data_ms;      // 測定データの時間間隔 [ms]
}

```

【補助データ】

```
struct data_ax
{
    struct
    {
        int32_t     value[];      // ビットフィールドに応じたデータ値
    } data[]
}

```

3Dセンサビューア仕様書

※開発者向け

株式会社 Doog 大島章

2014年2月27日

目次

| | |
|-----------------------|----|
| 1. 全般 | 2 |
| 2. 外観 | 2 |
| 3. 操作手順 | 8 |
| 3.1 ビューア設定の読み込み | 8 |
| 3.2 センサと接続 | 8 |
| 3.3 3D 点群表示 | 8 |
| 3.4 ログ保存 | 8 |
| 3.5 通信ログ読込 | 8 |
| 4. 点群描写領域の操作説明 | 9 |
| 4.1 表示形式 | 9 |
| 4.2 視点操作 | 9 |
| 5. 実行に必要なファイル | 10 |
| 6. 動作不具合 | 10 |
| 6.1 ビューアの実行 | 10 |
| 6.2 センサとの接続に失敗 | 10 |
| 6.3 センサとの通信が不安定 | 10 |
| 6.4 ログ保存 | 11 |

1. 全般

本仕様書は、北陽電機株式会社から業務請負により株式会社 Doog が開発した 3D センサ用のビューアに関するものです。ビューアは 3D 表示による動作確認やログ保存などを実施することができる。

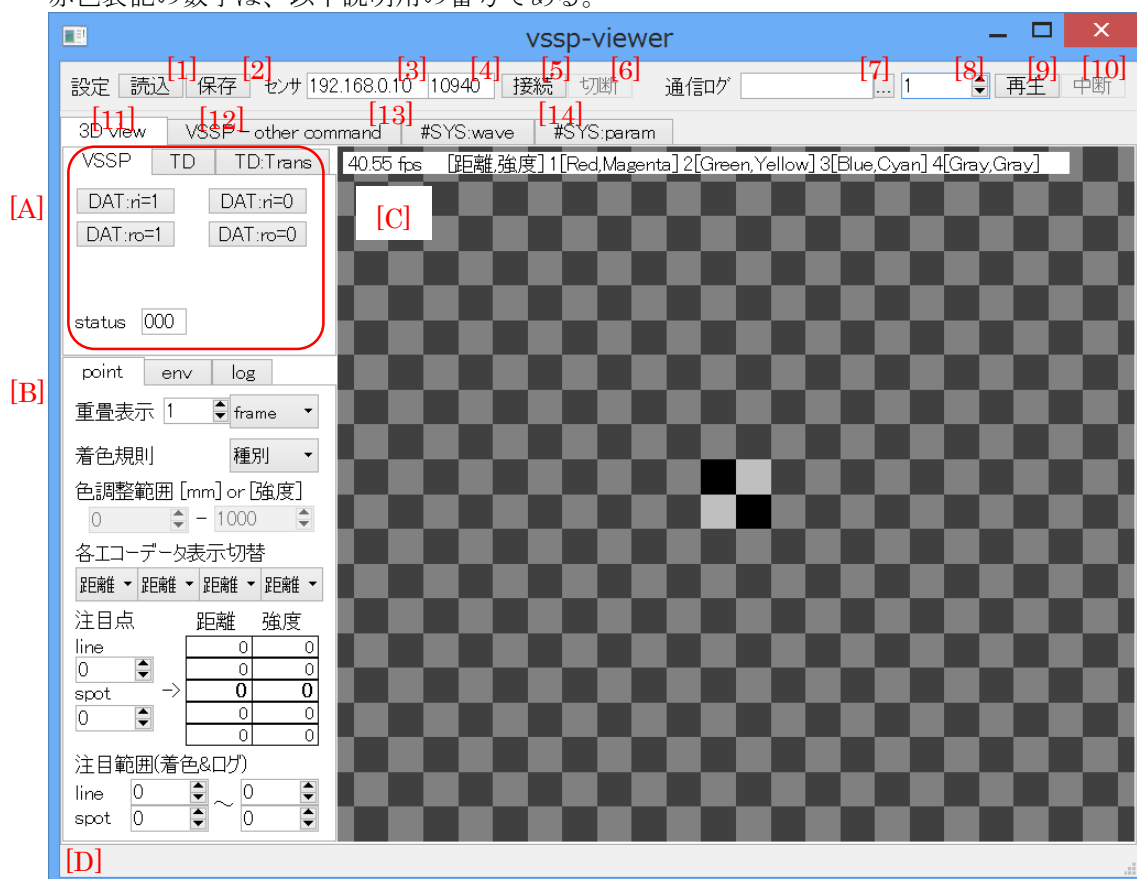
描画や通信などに関して Qt ライブラリを利用しているため環境非依存で実行ファイルを生成できる。ただし、Linux または能力不足な Windows において通信遅延が生じてセンサ側の通信バッファが溢れてデータが崩れる問題や、描写能力の不十分な PC において画面表示が完全ではない問題を生じたことがあるため実行環境に注意して使用する。

※開発者向けとユーザ向けは、実行ファイル引数で決定される。

2. 外観

アプリケーションの正常に実行できると以下のウィンドウが表示される。

赤色表記の数字は、以下説明用の番号である。

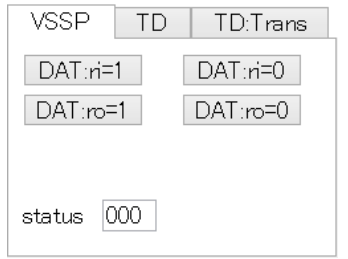

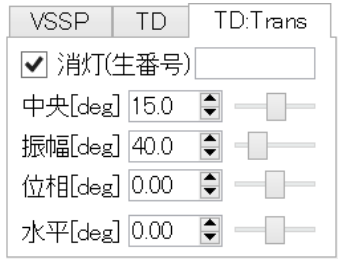


- [1] ビューア設定の読み込みボタン
- [2] ビューア設定の保存ボタン
- [3] センサ IP アドレス入力ボックス
- [4] センサポート入力ボックス
- [5] センサ接続ボタン

- [6] センサ切断ボタン
- [7] 通信ログファイルのアドレス入力ボックス+ファイルダイアログボタン
- [8] 通信ログファイル再生速度[command / sec]
- [9] 通信ログファイルの読込開始ボタン
- [10] 通信ログファイルの読込中止ボタン
- [11] 3D 点群操作タブ
- [12] VSSP のその他のコマンド操作タブ
- [13] 波形操作タブ (北陽電機様および開発者向け)
- [14] パラメータ操作タブ (北陽電機様および開発者向け)

- [A] 距離・強度測定データに関するコマンド通信タブ群
- [B] 3D 点群の操作に関する設定タブ群
- [C] 3D 表示エリア
- [D] ステータスバー

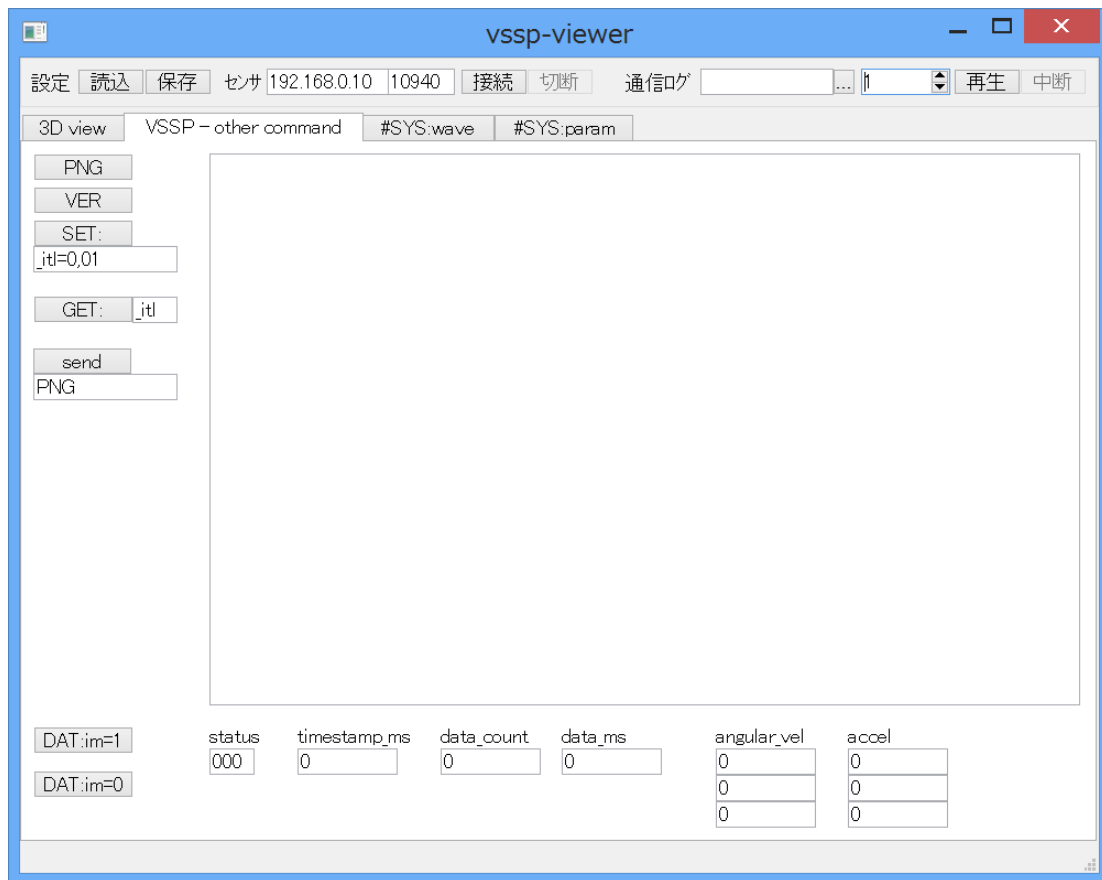
詳細：[A] 距離・強度測定データに関するコマンド通信タブ群

| VSSP コマンド | 開発者向けコマンド | 開発者向けコマンド用の座標変換パラメータ |
|--|--|--|
|  |  |  |
| <p>ボタンに記載されたコマンドを送信し、受け取ったステータスを表示する。</p> <p>※VSSP 用の座標変換テーブルはビューアが通信開始時に受信している</p> | <p>上から以下の通りである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ■TD コマンド(GT1~4, GTL, STOP)送信ボタン ■ミラー制御ON/オフ ■ミラー初期値探索開始 ■ミラー周波数 ■ミラー遅れ(位相相当) <p>※ミラー制御オンでは TD1FRAME コマンドに付与された周波数と遅れを画面に反映</p> <p>※ミラー制御オフでは数値変更時に設定変更コマンドを送信)</p> | <p>TD コマンドには座標変換テーブルが無い為、ビューア定義か VSSP 定義を用いる。左上のチェックを ON にするとビューア定義の状態となる。</p> <p>左上のチェックを OFF にすると VSSP 定義の状態+モータ回転方位のみビューア定義となる。</p> <p>角度は垂直が上に正、水平が左に正とする。</p> |

詳細：[B] 3D 点群の操作に関する設定タブ群

| 点群表示設定 | 環境表示設定 | ログ取得操作 |
|--|---|--|
| | | |
| <p>上から以下の通りである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ 重ね表示範囲 数字+[frame,field,line,spot] ■ 着色規則 種別：距離、受光強度、エコー番号で分別 距離：距離に応じた色付け 高さ：高さ(上下方向)に応じた色付け 強度：受光強度値に応じた色付け ■ 色調整範囲 上記設定における青(低い)～赤(高い)の色付け範囲 ■ 各エコーデータ表示制限 1～3エコー目までの各々の表示設定 ■ 注目点 | <p>上から以下の通りである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ 定型視点変更 選択することで所定の視点へ変更することが出来る ■ 点サイズ 各点のプロットサイズ(正方形)を調整 ■ 床面高さ プラスが上方向で調整 ■ センサ表示 原点にセンサを示すボックスの表示を切り替え ■ グリッドタイプ チェック：白黒のチェック柄塗りつぶし(グリッド粒度は1mで固定) 直交線：床面高さに縦横に等間隔で直線線を描き、高さ方向に線を描いたもの 同心円：床面高さに同心で等間隔に円を描き、高さ方向に線を描いたもの | <p>上から以下の通りである。</p> <ul style="list-style-type: none"> ■ ログ取り開始ボタン ■ ログ取り停止ボタン ■ 通信データの取得有無 ■ 注目点データ(指定範囲、距離・強度ファイルと座標位置ファイル)の取得有無 ■ 計測生値データ(距離・強度)の取得有無 ■ 座標位置データの取得有無 <p>※PCのスペックによっては同時取得が間に合わないため、センサオンラインで通信データを取得しておき、センサオフラインでログ再生により他のログを取得するほうが良い</p> |

詳細 : [12] VSSP のその他のコマンド操作タブ

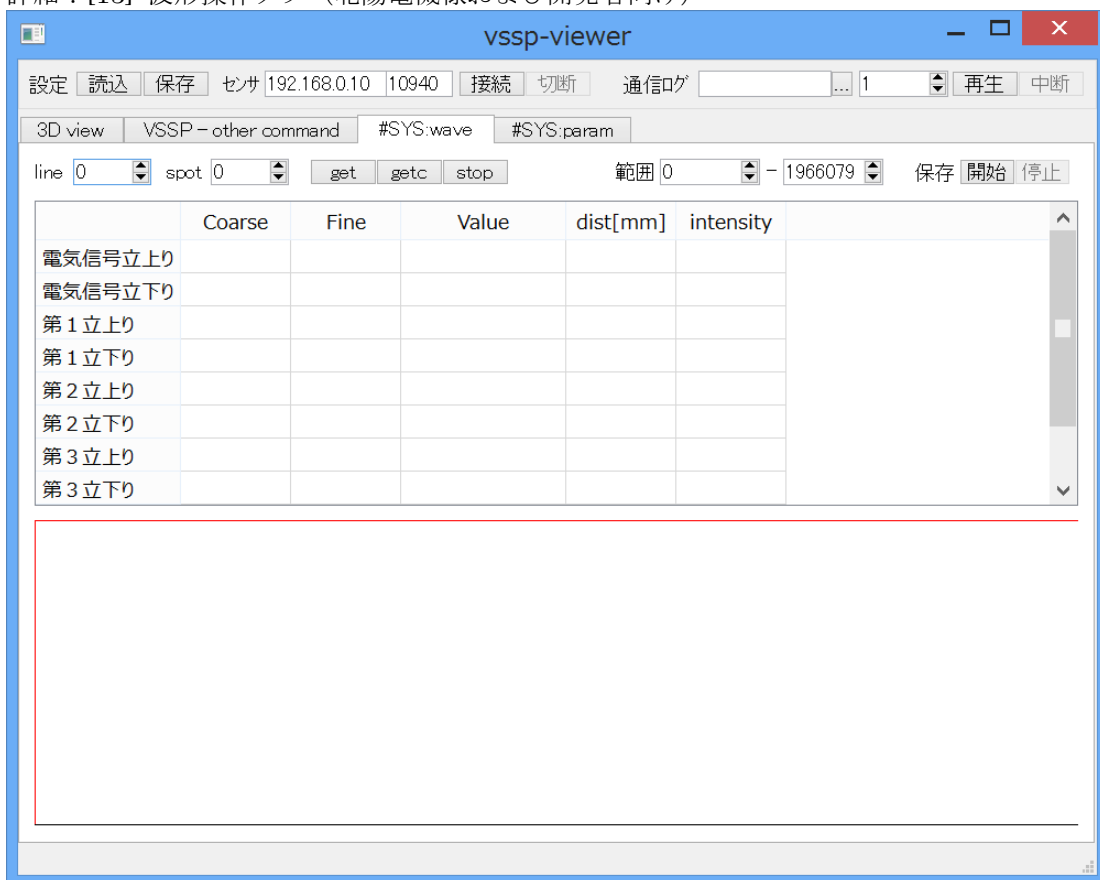


左上から、PNG 送信ボタン、VER 送信ボタン、SET 送信ボタン、SET 内容入力ボックス、GET 送信ボタン、GET 内容入力ボックス、任意コマンド送信ボタン、任意コマンド入力ボックスが並ぶ。

右側は VSSP 応答内容の表示エリアである。

下部は慣性センサ操作エリアであり、DAT コマンドによる送信開始/停止ボタンと、ステータス表示、タイムスタンプ、受信値を表示するテキストボックスが並ぶ。

詳細：[13] 波形操作タブ（北陽電機様および開発者向け）



上段には左から次の順に並ぶ。

波形取得ライン番号、波形取得スポット番号、#SYS コマンドによる波形 1 回取得ボタン(get)、波形連続取得ボタン(getc)、波形停止ボタン(stop)、グラフィカル表示時間範囲(表示状態が最大範囲)、波形ログの取得開始/停止ボタン。

※波形の通信に関するログは、前記した通信ログの取得に含まれる。

中断には波形情報が数値で表示される。

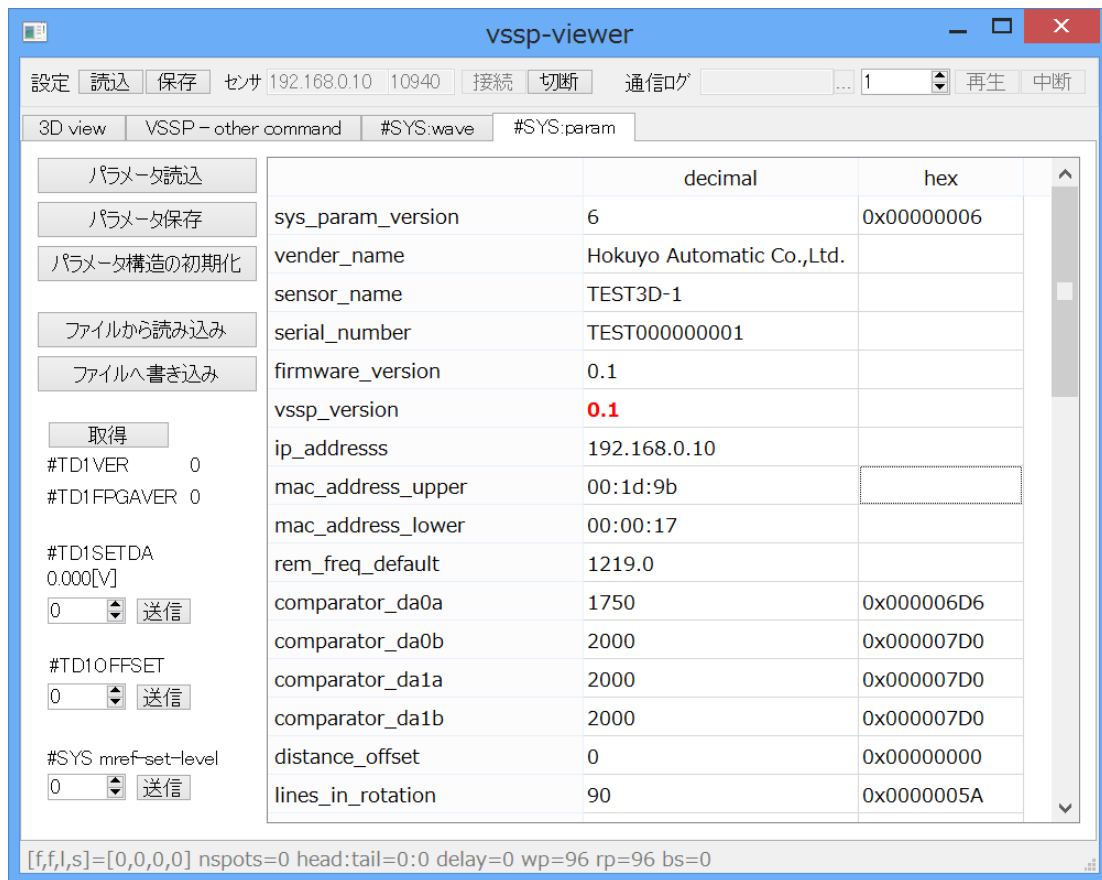
Course 値と Fine 値は FPGA 仕様の数値であり、Value 値はこれに基づき 2 値を合算した数値。

下段には波形タイミングのグラフィカル表示がされる。

左端が時間範囲の下限値、右端が時間範囲の上限側となる。

※時間範囲が狭くなっていると、波形の立ち上がり立ち下がりが画面範囲に含まれずに波形が表示されていないように見えることがあるので注意する。

詳細：[14] パラメータ操作タブ（北陽電機様および開発者向け）



FRAM に保存された（**基本的にはパワーオンリセット時のみ再適用される**）初期値パラメータについて操作できる。

左上のボタンから順に以下の通り並ぶ。

- センサとの通信によるパラメータの一括読み込みボタン
- センサとの通信によるパラメータの一括保存ボタン
- センサ内部の FRAM パラメータ初期化ボタン
- FRAM パラメータの表示リストをファイルから読み込みボタン
- FRAM パラメータの表示リストをファイルへ保存ボタン
- バージョン情報取得ボタン
- DA 値の設定入力ボックス/ボタン（これは FRAM には反映されない）
- オフセット値の設定入力ボックス/ボタン（これは FRAM には反映されない）
- mref-set-level の設定入力ボックス/ボタン（これは FRAM には反映されない）

画面上で編集したパラメータは赤色になり、ファイルから読み込んだパラメータは橙色になる。これを「パラメータ保存」ボタンにより、センサに保存し正常な応答を受けることで黒色となる。

3. 操作手順

基本的な操作手順は以下の通りです。

3.1 ビューア設定の読み込み

[1] 読込ボタンを押すとダイアログが表示し、ファイルが選択できます。
※事前に保存済みのファイルが無い場合には、各設定をビューアに実施した後で[2]保存ボタンを押してファイル名を指定して保存します。

3.2 センサと接続

センサとホストを LAN ケーブルで接続し、センサの電源を ON にします。
[3][4]にセンサの IP アドレスとポート番号が入力されていることを確認します。
[5]接続ボタンを押し、[D]ステータスバーに状態メッセージが表示されることを確認します。

3.3 3D 点群表示

[11]3D 点群タブの状態、[A]内の操作により計測値を取得し座標変換を実施できるようにします。次に[B]内の操作により表示状態を調整します。

3.4 ログ保存

点群が表示(更新)されている状態で、[B]の log タブ内を操作することでデータをファイルに保存することが出来ます。保存される範囲は、開始ボタンを押してから停止ボタンを押すまでの期間です。正常な保存が出来ない場合には『動作不具合』の章をご確認ください。

3.5 通信ログ読込

保存したログファイルのうち、通信ログに関しては再度ビューアで読み込むことが出来ます。
[7]アドレス入力/表示ボックスに直接ファイルパスを打ち込むか、その右側に並ぶファイルダイアログボタンを押してファイルを指定します。[8]通信ログファイル読込速度を調整することで、実時間あるいはゆっくりとデータを確認することが出来ます。[9]読込開始ボタンを押すと通信ログファイルを先頭から読み込みます。[10]読込中止ボタンを押すと通信ログファイルの読み込みを中断することが出来ます。
※途中からスタートする機能が未実装のため、ログファイルを複製・編集してください。

4. 点群描写領域の操作説明

4.1 表示形式

平行投影を採用しているため、遠近による見え方の変化はありません。座標軸はセンサ正面方向を X 軸の正方向、センサ左方向を Y 軸の正方向、センサ上方向を Z 軸の正方向として扱います。

床面および側面のタイプは、チェックマス・直交線・同心円の 3 タイプです。初期状態では 1m 単位で描かれています。直交線・同心円では 0.1m, 0.01m などのサブ単位を表示することも出来ます。なお、チェックマスの表示においては、マスの奥側にある点が非表示になります。

床面の高さは初期値ではセンサ中心と同一の原点ゼロ高さにあります。センサ取付け高さに応じて変更することが出来ます。

センサは座標系原点に固定され、必要に応じてボックスを表示することでセンサ位置を確認することが出来ます。

描画フレームレートと点群の色説明が上部に記載されます。

4.2 視点操作

点群表示エリアにフォーカスが合っている状態では、視点を動かすことが可能です。キーボードの操作とマウスの操作があります。

| 操作 | 挙動 |
|------------------------|-----------------------|
| I キー | 視点を初期状態に戻します |
| R キーを押しながら / 左ボタを押しながら | 回転操作の際に押します |
| T キーを押しながら / 右ボタを押しながら | 移動操作の際に押します |
| 上下キーを押す / マウスを前後に動かす | 現視点から上下方向の回転 / 移動をします |
| 左右キーを押す / マウスを左右に動かす | 現視点から左右方向の回転 / 移動をします |
| マウスをスクロールする | 現視点から正面軸回転 / 拡大縮小をします |

※点群に対する前後(接近 / 離間)の操作は持たず、拡大縮小を採用しているため、点群の中に入っていくそこから周囲を眺めるという操作は出来ません。

※これらのキーボード・マウス操作は立体感を掴むのに適しますが、厳密な視点状態を作るのは困難です。真横から、真後ろからデータを見たい場合には、[Blenv] タブ内の定型視点変更リストより選択します。

5. 実行に必要なファイル

Windows 環境において実行ファイルを動作するには、以下のファイルを実行ファイルと同一のディレクトリに配置する必要があります。

platforms/qminimal.dll
platforms/qwindows.dll
D3DCompiler_43.dll
icudt49.dll
icuin49.dll
icuuc49.dll
libEGL.dll
libgcc_s_sjlj-1.dll
libGLv2.dll
libstdc++-6.dll
libwinpthread-1.dll
Qt5Core.dll
Qt5Gui.dll
Qt5Network.dll
Qt5OpenGL.dll
Qt5Widgets.dll
以上

6. 動作不具合

6.1 ビューアの実行

ビューアの実行ファイルと同じディレクトリに「実行に必要なファイル」でリスト記載したファイルを配置する必要があります。また、ディレクトリ階層に日本語が含まれると実行できない場合があります。

6.2 センサとの接続に失敗

モータが回転しない・通信が接続されないなどの不具合が生じる場合があります。センサの電源再投入や、ビューアソフトの再起動により確認してください。

6.3 センサとの通信が不安定

PCによっては、センサとの通信が出来ていても相性または能力不足によって、データを漏れなく受信できない場合があります。挙動の確認としては、①ステータスバーの `skipLine` のカウント値が増加し続けること、②実際の空間形状とは異なる方位に点群が表示されることから確認します。

- ①は受信データのライン番号をチェックし、飛びが生じていることを示します。
- ②はセンサ内で通信バッファが溢れるなどにより、ライン情報のヘッド部分(モータ回転方向を示す)と、ライン情報のデータ部分(距離や強度を示す)に異なるものがセットとなることで生じています。

6.4 ログ保存

ログの記憶媒体のアクセス速度等により、センサからのデータ受信とすべてのログ保存を同時に実施できない場合があります。推奨される手順として、始めにセンサと接続した状態で通信ログのみを保存します。次に、保存した通信ログを読み込みながら、距離・強度データや位置座標データ、注目データなどの必要なログファイルを保存します。実時間でのログ保存を通信ログのみとして、他のログは実時間に対して遅延が生じてもログファイルに基づくためデータの抜けが生じないため安定したログ取得を実施できます。

ロボット環境認識報告書

組み上げたセンサ装置を研究開発用の移動ロボットに搭載し、ロボット周囲の環境認識に利用するための総合的な評価を行った。

なお、今回の三次元測域センサを用いた実験結果の表示は、すべて地面からの高さによって色を分けている。色の範囲は以下の図に示す範囲である。地面から-16cm 以下を青色、50cm 以上を赤色になるようにし、暖色になるほど地面から高い計測になるように設定した。



図1 高さを表す色の範囲

・センサのロボットへの搭載

ロボットは、下図に示す筑波大学の移動ロボットを使用した。ロボットの大きさは幅 50[cm] 縦 65 [cm] 高さ 86 [cm] であり、重量は 33 [kg] である。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。三次元測域センサは、床面から高さ 55 [cm] の位置に固定した。測定範囲が上方向に広い特性を利用し、ロボット周囲の路面形状を検出するために上下逆さに固定している。



図2 センサを搭載した移動ロボット

・三次元点群地図の作成

つくば市の遊歩道環境において、屋外の三次元点群地図を生成した。全点群を表示させることは処理の関係で難しいため、地図中のうち、注目する箇所のみを表示している。ロボットは 0.7m/s の速度で移動し、すべての三次元点群地図はインタレースをすべて 1 に設定して測定を行った。表示する点群地図は、ロボットの自己位置推定の結果に基づき、三次元測域センサによって計測した情報を 20 秒間分 (400 フレーム分) 蓄積させたものである。広場内建屋周辺、ペDESTリアンデッキ、公園内の三箇所について実験を行った結果を以下に示す。それぞれ、周囲の環境が正しく三次元的に計測されていることがわかる。



図 3 三次元点群地図作成を行った環境① (広場内建屋周辺)

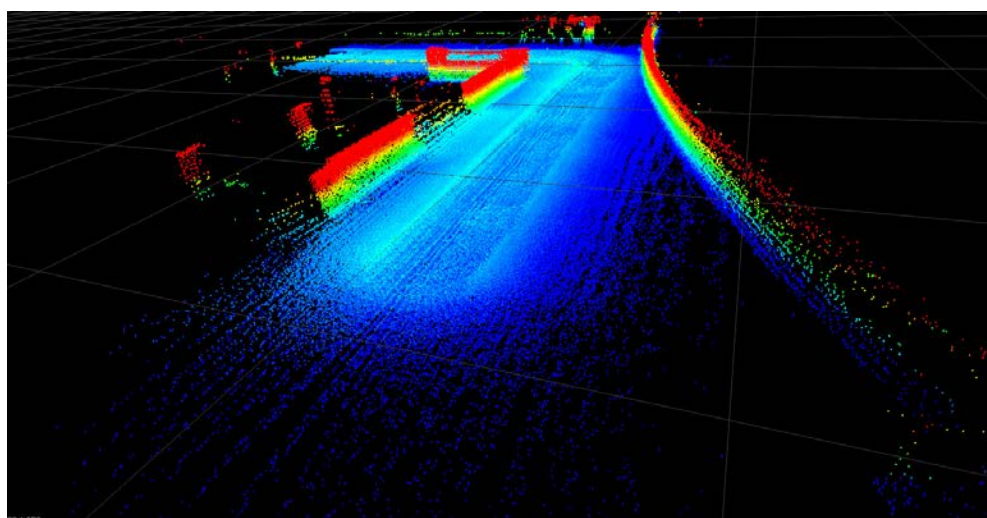


図 4 環境① (広場内建屋周辺) における三次元点群地図作成結果



図5 三次元点群地図作成を行った環境②（ペDESTリアンデッキ）

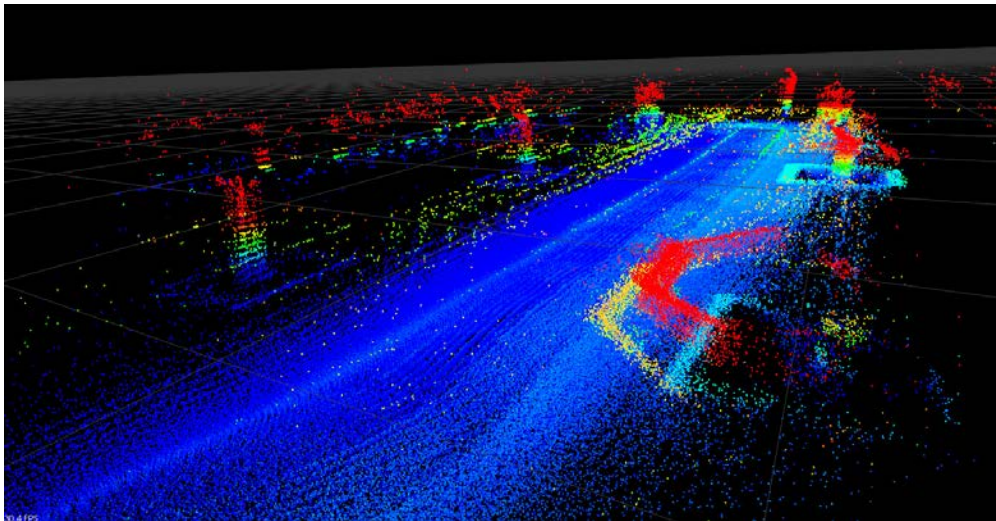


図6 環境②（ペDESTリアンデッキ）における三次元点群地図作成結果



図7 三次元点群地図作成を行った環境③（公園内）

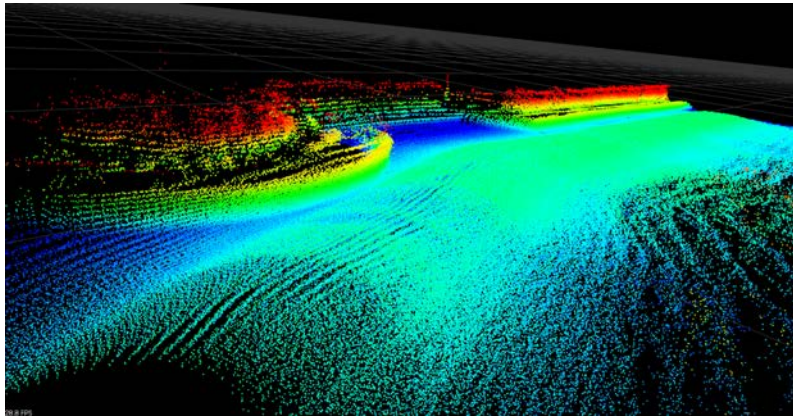


図8 環境③（公園内）における三次元点群地図作成結果

・人間の計測

広場内の環境において、静止して起立している人間の横 5m の地点を、ロボットが 1.0m/s の速さで移動した際の計測結果を表示した。インタレースは 1 に設定しており、5 秒間（100 フレーム）分の計測結果を蓄積して表示している。人間の存在が確認できる。



図9 人間の計測を行った環境（広場内）

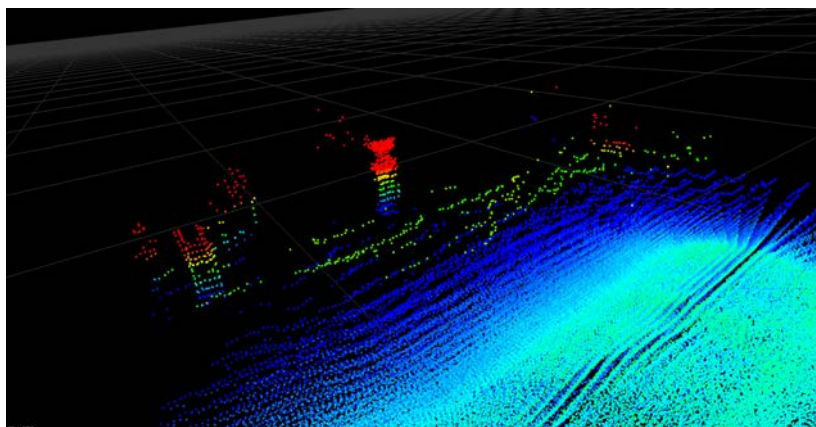


図10 広場内における人間の計測結果

・ 走行路面の計測

筑波大学構内のアスファルト道路において、走行路面の計測実験を行った。道路にロボットを静止させて置き、インタレースを4に設定し計測を行った。計測結果は、1フレーム分の情報を表示している。ロボット正面約4mまでの路面を計測できており、路面を計測した点数は1フレームで約4300点であった。ロボット近傍については、密に計測されている。



図 1 1 走行路面の計測を行った環境（大学構内道路）

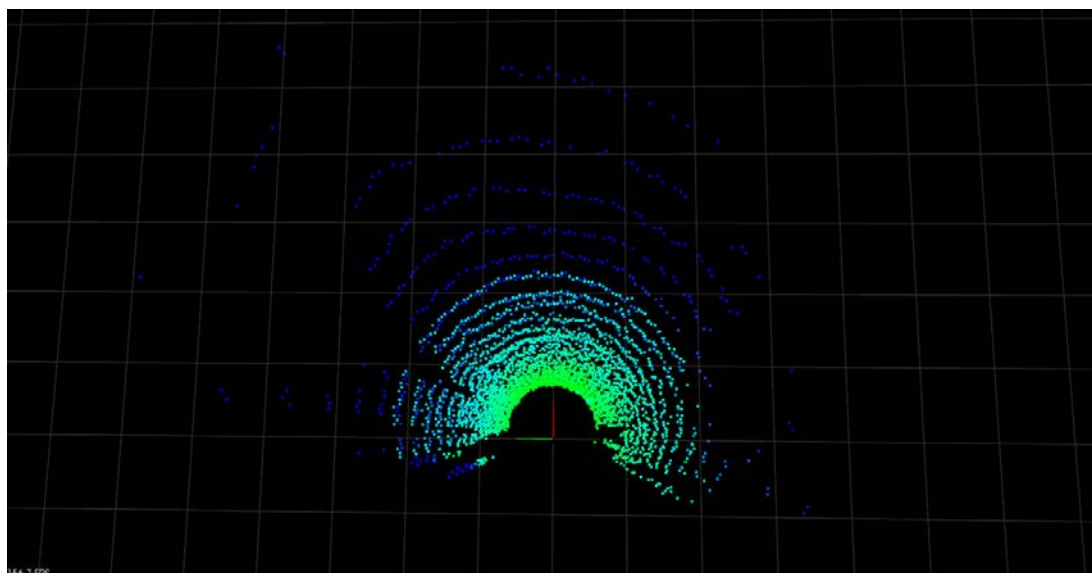


図 1 2 大学構内道路における走行路面の計測結果

また、同様にして道路脇の縁石を計測する実験を行った。図 1 4 は計測全体を表示したものであり、図 1 5 は縁石の近傍 1m に存在する点群のみを描画し、縁石部分を真横から見た拡大図である。高さ数 cm の縁石が正しく検出されていることがわかる。

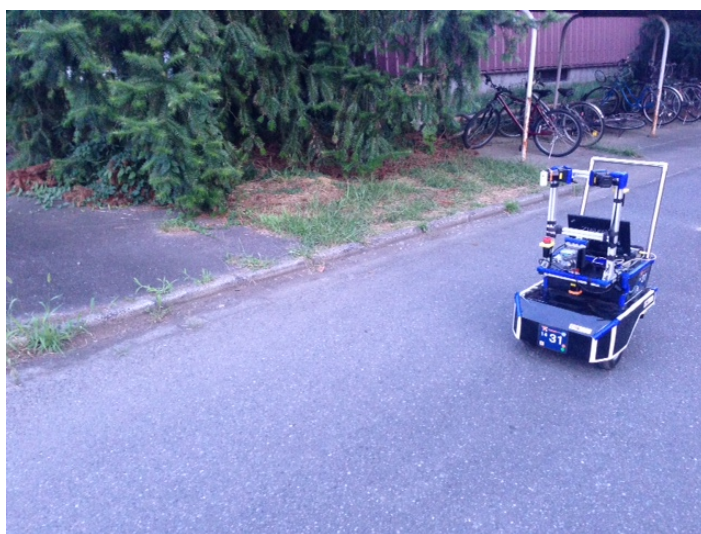


図 1 3 道路脇に存在する縁石の計測を行った環境（大学構内道路）

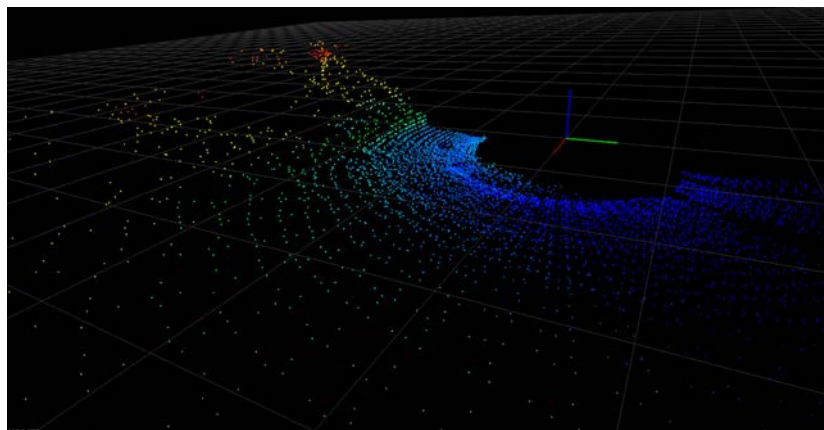


図 1 4 道路脇に存在する縁石の計測結果（計測全体を表示）

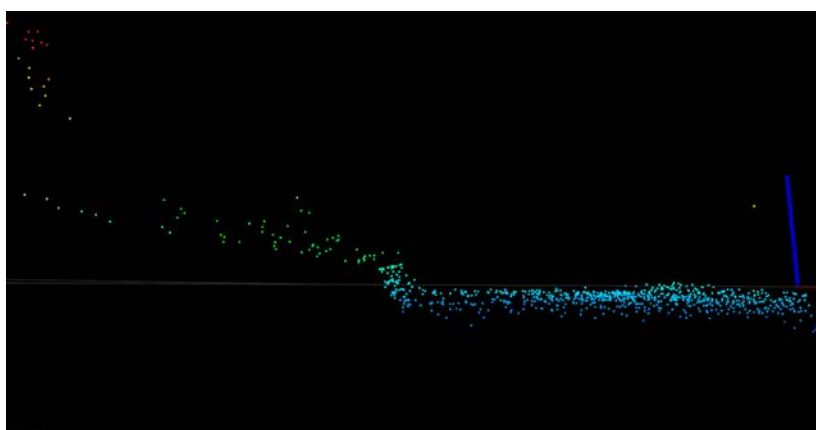


図 1 5 道路脇に存在する縁石の計測結果（縁石部分を拡大して表示）

以上

センサドライバソフトウェア説明書

三次元測域センサを使用するためのプログラムについて説明する。すべてのプログラムは C++ で書かれている。

三次元測域センサで計測を行うために、以下の 3 つのプロセスを並列に実行した。

1. データ受信プログラム
2. 座標変換プログラム
3. 点群表示プログラム

以下、各プログラムの説明をする

1. データ受信プログラム

データ受信プログラムは、三次元測域センサから送られるバイナリデータを受信し、デコードした結果を共有メモリ上に格納するためのプログラムである。

まず、ソケットを用いて三次元測域センサと TCP 通信を行う。TCP 通信が確立されたら、デコードしたデータを格納する共有メモリを宣言、確保する。

次に、計測結果を三次元空間に変換するための垂直、水平変換テーブルを取得する。三次元測域センサに変換テーブル要求コマンド "get:tblh" と "get:tblv" を送信し、応答コマンドをデコードすることでテーブルを取得する。

次に、三次元測域センサのインタレースを設定するコマンド "set:_itr=1" を送信する。

次に、距離と反射強度の計測を開始するコマンド "dat:_ri=1" を送信する。これより、計測結果は一回の垂直方向の走査毎に、垂れ流しで送られてくるようになる。計測結果を受信する毎に各計測点の距離、反射強度、水平、垂直方向の角度、ライン番号、フィールド番号の情報にデコードする。垂直方向一回分のデータをデコードしたら、共有メモリに格納する。以降、ctrl-C による終了処理が入力されるまで受信とデコードを繰り返す。

終了処理が入力されると、三次元測域センサに計測停止信号 "dat:_ri=0" を送信し、TCP 通信を切断する。また、確保した共有メモリを解放することで正常に終了する。

2. 座標変換プログラム

座標変換プログラムは、データ受信プログラムで取得した距離情報と水平、垂直方向の角度、センサをロボットに取り付けた位置から、計測結果を (x, y, z) の三次元の座標に変換するプログラムである。

データ受信プログラムによって共有メモリ上の情報が更新される毎にデータを読み込み、各計測点の距離情報、水平、垂直方向の角度で表される極座標系式から、直交座標系の(x , y , z)の値に変換する。

また、センサの取り付け位置より座標の値を平行移動させ、ロボット中心の座標系に変換する。

その後、変換後の値を共有メモリ上に格納する。この変換処理は `ctrl-C` による終了処理が入力されるまで繰り返される。

3. 点群表示プログラム

点群表示プログラムは、座標変換プログラムで変換された情報を、点群として表示させるプログラムである。点群の表示には `PointCloudLibrary` (以下 `PCL`) を使用している。

座標変換プログラムによって共有メモリ上の情報が更新される毎に、各計測点の座標を基に点群として表示する。

この際、ロボットのオドメトリ情報、もしくは自己位置推定の結果を同時に与えることによって、計測結果をロボットの動きと同期させることができる。この時、過去何フィールド分の計測結果を同時に表示するかを設定することで、蓄積した計測結果を表示させることができる。

以上