

# 狭隘内部空間の三次元構造復元に関する研究開発（第2報）

## Research and development on 3-D structure restoration of interior narrow spaces (2nd report)

技術開発部 生産・加工科 鈴木健司 石澤満 山田昌幸 浜尾和秀  
南相馬技術支援センター 機械加工ロボット科 三浦勝吏 太田悟

本研究では、光学単眼カメラ、ミリ波レーダを融合し、狭隘空間内構造物の三次元データの復元法を提案する。まずVisual-SLAMのREMODEを用い、密な点群による三次元復元をし、その復元の線形性を評価した。次にレーダを用いたイメージングには、アジマス分解能からレーダモジュールを移動させる必要性を示した。最後にカメラ及びレーダを一体化することで、カメラ位置とレーダ位置を一致させることができ、復元点群間を含め任意の2点間距離を測定することを可能にし、その誤差を評価することで本提案の有効性を示した。

Key words: 狭隘、光学、単眼、カメラ、ミリ波、レーダ、三次元、点群、構造、復元

### 1. 緒言

全国的に老朽化が進んだ橋梁、トンネル等社会インフラの更新時期の本格到来への備えが課題となっている。340万人の技能労働者は今後10年間で110万人の離職予測<sup>1)</sup>があり、インフラ点検の効率化が喫緊の課題であり、併せて予防保全及び予知保全の重要性が増している。

本報告では、光学単眼カメラによるVisual-SLAMの中で、密な点群が得られるREMODEの評価を行い、対象構造物の三次元点群構築に用いた。またミリ波レーダを用い、対象構造物の占有グリッドマップを生成し、対象構造物の存在位置を確認した。

光学単眼カメラとミリ波レーダを、取り付け治具を用いて一体化し、位置を一致させることでレーダから対象構造物までの距離をカメラから復元した三次元点群と融合し、任意の2点間距離を求めることを可能にした。

### 2. 実験

#### 2.1. Visual-SLAMの検討

前年度(令和元年度)は、Visual-SLAMの代表的な手法であるORB-SLAM2<sup>2)</sup>、LSD-SLAM<sup>3)</sup>及びREMODE<sup>4)</sup>を実装した。それぞれ比較した結果、三次元復元を行うにはより密な点群が得られるREMODEが有用であることを確認した。

そこで、今年度はREMODEを採用しミリ波レーダと組み合わせることで狭隘内部空間の三次元構造復元に向けて開発を進めてきた。開発環境を表1に示す。

表1 開発環境

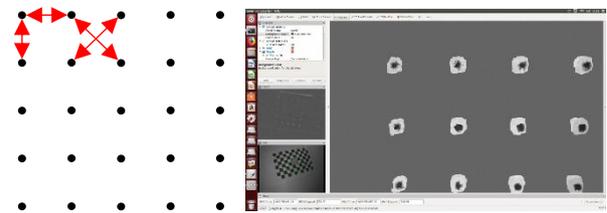
|          |                 |
|----------|-----------------|
| フレームワーク  | ROS-indigo      |
| OS       | Ubuntu14.0      |
| GPU      | GeForce GTX1650 |
| カメラ      | KYT-U030-GS01M  |
| レーダモジュール | T16_02120112    |

#### 2.2. REMODEの評価

##### 2.2.1. 歪の評価

REMODEを採用するにあたり、復元されたデータに歪がないか評価を行った。図1に示すように点が等間隔に配置されたシートを用いて評価した。5×5に配置された点をREMODEにより復元し、縦、横及び対角線の長さを測定した。復元した点と点の間の長さは、ROSのデータ可視化ツールであるRvizの「Measure」機能を使用した。結果を図2に示す。

また、図2の赤線部を基準として測定した長さの二乗平均平方根誤差(以下、RMSE)及び二乗平均平方根誤差率(以下、RMSPE)を求めた結果を表2に示す。RMSPE



評価シート REMODEによって復元した評価シート  
図1 歪の評価

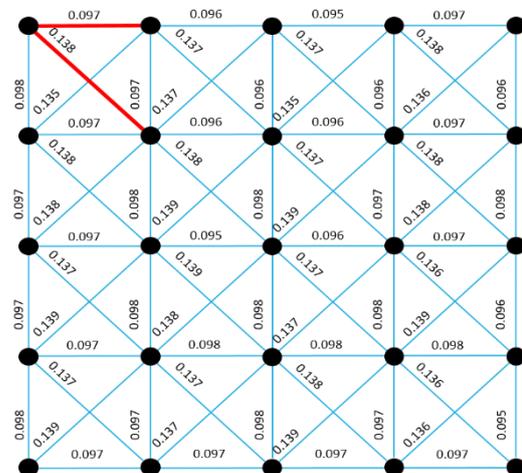


図2 測定結果

表2 評価結果

|           |                       |
|-----------|-----------------------|
| RMSE      | $1.07 \times 10^{-2}$ |
| RMSPE [%] | $9.25 \times 10^{-1}$ |

が 0.925 [%] と低いことから歪がほぼないことを確認した。

### 2. 2. 2 奥行き方向の評価

REMODE の奥行き方向について評価を行った。カメラと対象物の距離を実空間及び Rviz 内の仮想空間それぞれにおいて、100 [mm] から 1000 [mm] の間を 50 [mm] 間隔で測定し相関係数を求め、実際の距離と仮想空間内の距離に線形性があるか確認した。実際の距離は BOSCH 社製のレーザ距離計を使用して測定した。仮想空間内の距離は歪の評価時と同様、Rviz の「Measure」機能を使用して測定した。実験の様子を図3及び図4に示す。また、実験の結果を図5及び表3に示す。

相関係数が1にかなり近い値であることから、強い線形関係があることを確認した。実際の距離と仮想空間内の距離に線形性があることが分かった。

### 2. 2. 3 照度実験

狭隘部は暗所であることも想定されるため、どの程度の暗さまで三次元構造を復元できるか調査した。測定対象物を無造作に置き、その上に段ボールと黒幕を覆い、暗所を再現した。明るさ調節可能な LED を設置し、それぞれの明るさの場合に復元の可否を確認した。LED は 9 段階で明るさを調整可能で、消えている状態 (2.5 [lx]) から 1 段階ずつ明るくし、照度を測定した。測定はシンワ社製の照度計を使用した。実験の様子を図6に示す。また、実験の結果を表4に示す。

実験の結果から、復元をするためには 115 [lx] 程度



図3 カメラからチェックボードまでの距離

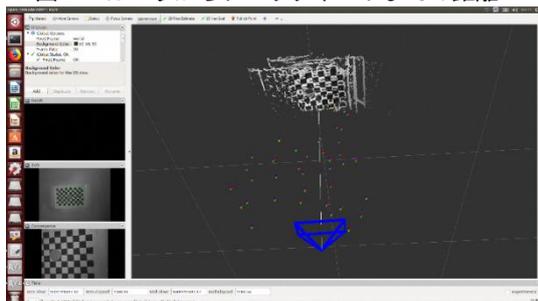


図4 Rvizに表示されたカメラ位置とチェックボード

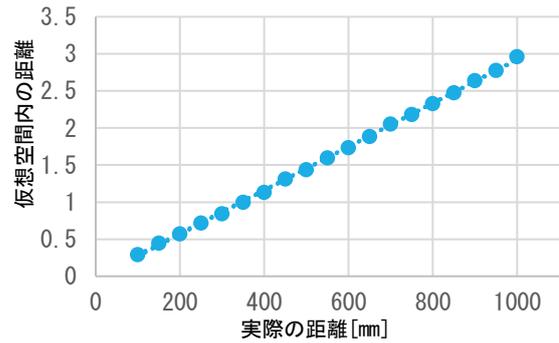


図5 Visual-SLAMの奥行き評価

表3 奥行き方向の評価

|      |          |
|------|----------|
| 相関係数 | 0.999823 |
|------|----------|



実験の様子



対象物と復元結果 (116 [lx])



図6 照度実験

表4 照度実験結果

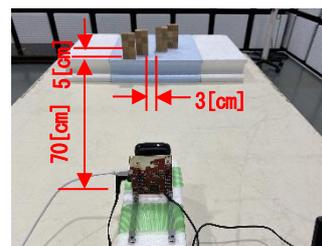
|         |     |      |      |      |       |
|---------|-----|------|------|------|-------|
| 照度 [lx] | 2.5 | 25.4 | 58.7 | 86.9 | 116.8 |
| 測定可否    | 不可  | 不可   | 不可   | 不可   | 可     |

の明るさが必要であることが分かった。この結果から試作機に取り付ける LED を選定し、LED を点灯することで暗所でも REMODE の動作が可能となった。

### 2. 3. ミリ波レーダ

#### 2. 3. 1. 占有グリッドマップの確認

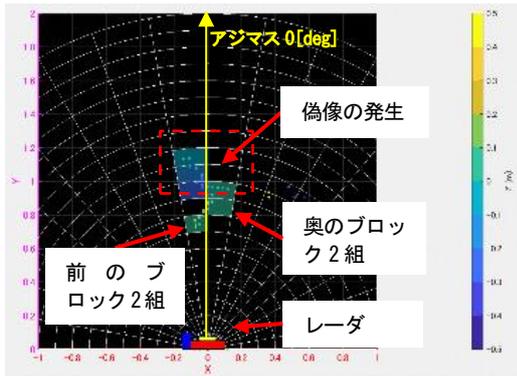
対象構造物を模擬した木製ブロックに対し、図7に示す実験環境で、ミリ波レーダにより対象構造物をアジマス (水平) 方向の二次元面で測定した。対象構造物が存在する位置を示すため、占有グリッドマップ<sup>5)</sup>により表示させた結果を図8に示す。



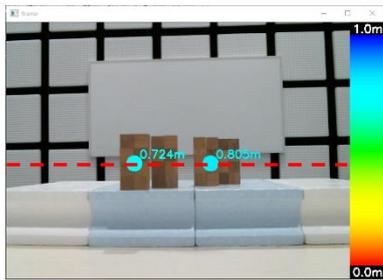
木製対象構造物  
W5 [cm] × H10 [cm] × D2.5 [cm]  
構造物奥行き: 5 [cm] 毎差  
中央は 3 [cm] の間隔空き

ミリ波レーダ: IWR1443Boost  
Chirp 信号: 79 [GHz]、  
3.2 [GHz] 帯域幅  
対象物間距離: 70 [cm]

図7 ミリ波レーダの測定実験



グリッドは 10[cm]-10[deg] 単位の表示  
 図8 占有グリッドマップ



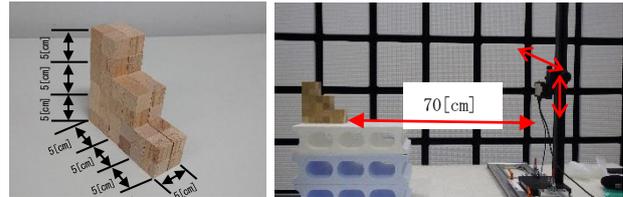
赤点線は二次元レーダ測定位置を示す  
 図9 レーダ測定距離のカメラ画像重畳表示

本実験で用いたレーダ IWR1443Boost は、2Tx-4Rx MIMO アンテナにより、アジマス分解能は 14.3[deg] である。表示させた占有グリッドマップでは、対象構造物中央の 3[cm] 空間を挟んで左右それぞれ 2 組の対象構造物は同じグリッド位置内に測定されることを確認できる。しかし前後 5[cm] に配置された対象構造物は、同一構造物として表示されている。図 9 は、カメラ画像にレーダ測定点をリアルタイム重畳表示したもので、0.72[m]、0.80[m] の位置でレーダの反射点が測定されていることが分かる。こちらも同様前後構造物に対し、レーダ測定点は前の構造物への測定点だけが得られている。アジマス分解能に起因する結果を確認できた。

### 2. 3. 2. レーダアンテナの移動

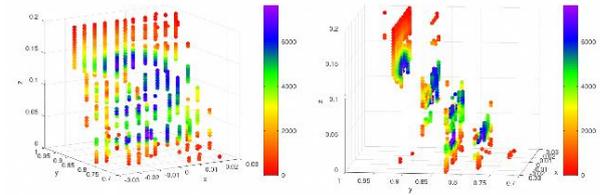
本節で用いたレーダ T16\_02120112 は、2Tx-4Rx MIMO アンテナで 15[deg] のアジマス分解能である。対象構造物をイメージングするにはアジマス分解能は十分とは言えない。図 10 のように治具を用いレーダモジュールを移動させ、アジマス方向 0[deg] からの反射値及びレンジ (距離) 方向 70[cm] から 90[cm] の範囲を閾値にして対象構造物を測定した。その結果を図 11 に示す。

用いたレーダでは、対象構造物をイメージングするには十分なアジマス分解能を有していないため、アジマス方向全範囲の測定データは用いず、レーダアンテナを移動させることが対象構造物のイメージングに有効であることを確認した。



木製の 5[cm] × 5[cm] × 5[cm] ブロック  
 手前から 1、2、3 段と積み重ねた  
 アンテナから対象物最前面まで：70[cm]  
 アンテナ移動  
 縦方向：0.4[cm]ステップ  
 横方向：0.5[cm]ステップ

図 10 対象構造物とアンテナ移動測定



色は反射値を示し、赤が弱く、紫が強いことを意味する。  
 15[cm] 高以上に弱い反射が存在及び最下面が弱い反射となり、対象構造物端に反射値の曖昧さ (アンビギュイティ) が観察される。

図 11 対象構造物のイメージング

## 2. 4. 単眼カメラとレーダの融合

### 2. 4. 1. REMODE とレーダによる 2 点間距離の測定

今回採用した REMODE は仮想空間内の相対的な位置だけを示し、実際の距離を求めることができなかった。そこで、レーダと組み合わせることで実際の距離を算出するシステムを開発した。

2. 2. 2. 項で示したように REMODE の線形性を確認できたことから、レーダの値を基準とすることで実際の距離を求めることができる。その際、REMODE による位置推定の結果をレーダに反映させるため、カメラとレーダの位置が常に固定されている必要がある。そこで、カメラの真下にレーダモジュールを取り付けることができるように 3D プリンタで取り付け治具を作成し、カメラとレーダの位置を一体化した。一体化することで、2. 3. 2. 項で示したようにレーダからはアジマス 0[deg] の値を用いることで、カメラの位置とレーダの位置を一致させることができる。この結果、REMODE により復元された点群データにおいて、任意の 2 点間の距離を次のように求めることができる。

$$L_{12} = \frac{L_{r\_radar}}{L_{r\_rviz}} \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2} \quad (1)$$

ここで、 $L_{r\_radar}$  は基準となるレーダの距離値、 $L_{r\_rviz}$  は基準となる長さの仮想空間内の距離値、 $L_{12}$  は任意の 2 点間の距離、 $x_1$ 、 $x_2$ 、 $y_1$ 、 $y_2$ 、 $z_1$ 、 $z_2$  は任意の 2 点のそれぞれの座標値である。それぞれの長さを示す図を図 12 に示す。



図1-2 任意の2点間距離の測定

### 2.4.2. 2点間距離測定の評価

2.4.1.項で示した任意の2点間距離を求めるシステムの評価を行った。仮想空間内で位置推定されたカメラと復元されたチェックボードまでの距離を100[mm]から1000[mm]まで50[mm]ごとに測定し、実際の距離とのRMSEを求めた。また、同様に大きさが既知であるブロック(70[mm]×30[mm]×30[mm])をREMODEにより復元し、実際の長さとのRMSEを求めた。結果を表5に示す。また、カメラとチェックボードまでの距離が1000[mm]、100[mm]の場合とブロックの長さを測定した時のRMSPEを求めた。結果を表6に示す。さらに、実験の様子を図1-3及び図1-4に示す。

実験の結果、どちらにおいても10[mm]以下の誤差で任意の2点間距離を測定できることが分かった。

## 3. 考察

### 3.1. 三次元点群復元

Visual-SLAMの中で密な点群が得られるREMODEを採用し三次元復元に用いた。用いたカメラシステムでは、縦横及び奥行き方向共に歪が生じず線形に復元ができることを確認でき、レンズ、撮像素子等により復元への影響はないことがわかった。光学単眼カメラを利用するため、復元と照度との関係を実験から調べ、最低限必要な照度は15[lx]程度を確認できた。

### 3.2. ミリ波レーダ

利用する79[GHz]レーダモジュールは、2Tx-4Rx MIMOアンテナであり、対象構造物を分離するには、構造物のサイズ及び隣接する間隔によってはアジマス分解能が不足し異なる構造物を分離できない場合が生じる。レーダモジュール自体を上下左右に一定ステップで移

表5 2点間距離測定の評価 (RMSE)

|                | RMSE [mm] |
|----------------|-----------|
| カメラとチェックボードの距離 | 8.55      |
| ブロックの長さ        | 6.21      |

表6 2点間距離測定の評価 (RMSPE)

|                     |      | RMSPE [%] |
|---------------------|------|-----------|
| カメラとチェックボードの距離 [mm] | 1000 | 1.68      |
|                     | 100  | 7.32      |
| ブロックの長さ [mm]        | 70   | 7.95      |

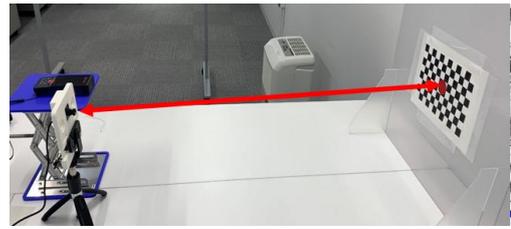


図1-3 カメラからチェックボードまでの距離

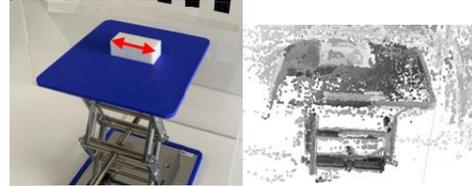


図1-4 ブロックの長さ(対象物(左)と復元結果(右))

動させ、アジマス0[deg]からの最大反射値を採用することで、対象構造物をイメージングできることが確認できた。

### 3.3. 光学単眼カメラとミリ波レーダの融合

REMODEとレーダを固定し両者の位置を一体化した。両者を一体化したことから、REMODEの三次元復元点群の任意の2点間距離を測定できるようになった。センサと構造物間の距離、構造物の長手方向の長さを実際の値し、復元点から算出する値と評価し、10[mm]以下の誤差で算出することができた。しかし、表5、表6に示すように常に6[mm]から8[mm]程度の誤差が生じることから対象物の長さが短い場合、誤差率が高くなってしまふことが分かった。

## 4. 結言

本報告では、光学単眼カメラ、レーダを融合し構造物の三次元復元を行った。

光学単眼カメラでは、Visual-SLAMのREMODEを採用し三次元点群復元からREMODEの性能評価を行った。

利用したレーダモジュールのアジマス分解能では構造物の分離ができないため、レーダモジュールを移動させた。

カメラとレーダを一体化して位置を一致させ、レーダから構造物の該当位置までの距離を測定した。

カメラとレーダを組み合わせることで、任意の2点間距離を求めることが可能となった。

今後は、三次元復元点群の外れ点除去及び点群データの補正、到来角推定手法によるレーダアジマス分解能の向上を行い、光学単眼カメラ、ミリ波レーダ融合による三次元復元の寸法精度を上げていく予定である。

### 参考文献

- 1) 国土交通省. “参考資料 建設産業の現状と課題”. 第6回建設産業政策会議資料”. 2017.6. p.8.

- 2) Clement Godard, Oisín Mac Aodha, Michael Firman, Gabriel J. Brostow “Digging Into Self-Supervised Monocular Depth Estimation”.ICCV2019,2019
- 3) Raul Mur-Artal, J. M. M. Montiel, Juan D. Tardos. “ORB-SLAM2: a Versatile and Accurate Monocular SLAM System”. IEEE Transactions on Robotics,2015
- 4) Jakob Engel,Thomas Schöps,Daniel Cremers “LSD-SLAM:Large-Scale Direct Monocular SLAM”.Computer Vision ECCV2014, 2014,p.834-849.
- 5) Texas Instruments. “Zone Occupancy Detection with mmWave Radar”.Resource Explorer. [http://dev.ti.com/tirex/explore/node?node=AFJ57Xx4-1Hjsuqn1dMoFQ\\_\\_VLyFKFf\\_\\_LATEST](http://dev.ti.com/tirex/explore/node?node=AFJ57Xx4-1Hjsuqn1dMoFQ__VLyFKFf__LATEST). (参照 2021-03-12).