

単眼カメラとレーダを用いた三次元構造物復元及び距離測定手法の検討 Examination of 3-D structure restoration and distance measurement methods using a monocular camera and radar

三浦勝吏[†] 太田悟[†] 鈴木健司[‡] 山田昌幸[‡] 石澤満[‡] 浜尾和秀[‡]
Masashi Miura Satoru Ota Kenji Suzuki Masayuki Yamada Mitsuru Ishizawa Kazuhide Hamao

1. はじめに

近年,ロボットや自動車、ドローン等に関する開発が活発に行われており,自己位置推定と周辺環境の地図作成を同時にできる SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) に関する研究が盛んに行われている。SLAM には, LiDAR (Light Detection and Ranging) センサを用いる手法や,カメラ画像を用いる Visual-SLAM といった手法が存在する。中でも,単眼カメラを用いた Visual-SLAM では, LSD-SLAM^[1], ORB-SLAM2^[2]などの手法が提案されている。これらは,安価なカメラで三次元構造を構築することができる,小型化が容易である, AI による物体認識などのカメラを使用したシステムと併用できるといったメリットがある。また,カメラを用いて三次元構造を構築する技術は,環境地図を作成するだけでなく,三次元構造の計測などにも用いられており,社会インフラへの適用も可能である^[3]。

さらに,精度やロバスト性を向上させるために LiDAR とカメラ, IMU センサとカメラといったセンサフュージョンを行う SLAM 手法も研究されている^[4]。

本稿では,単眼カメラを用いた Visual-SLAM の手法の一つである REMODE^[5]と,雨・霧・雪・濃煙・粉塵環境下でも測距が可能であり,気象や外部環境による影響をほとんど受けない測定手段としての利用が期待できる,ミリ波レーダを組み合わせることで,REMODE が構築した三次元構造中の任意の2点間距離を測定する手法を提案する。また,福島ロボットテストフィールド(以下,RTF)^[6]に設置されているプラント棟を利用し,実証実験を行うことによって本提案の有用性を示す。

2. 提案手法

2.1 提案手法の構成

本研究では,単眼カメラによる Visual-SLAM の手法の中でも,より密な点群が得られることから REMODE を採用し,三次元構築を行うこととした。REMODE を採用するにあたり,構築されたデータに歪みがほぼないことを確認した^[7]。構築した環境を表1に示す。

ここで,カメラはグローバルシャッター方式のものを使用した。解像度,フレームレート及び視野角(縦・横)はそれぞれ 640×480[px],30[fps],40[deg] (縦),48[deg] (横)である。

またレーダは,図1内の θ が 28[deg]以内の角度であれば $\cos \frac{\theta}{2} \approx 1$ とみなすことができる^[8]ため,今回の実験では,28[deg]の範囲で得られた距離値のみを用いることとした。

表1 REMODE 構築環境

フレームワーク	ROS-indigo ^[8]
OS	Ubuntu14.04
GPU	GeForce GTX 1650
カメラ	KAYETON製 KYT-U030-GS01M
レーダ モジュール	シャープタカ電子工業(株)製 T16_02120112

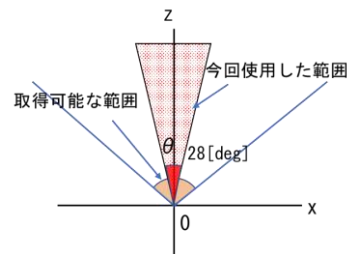
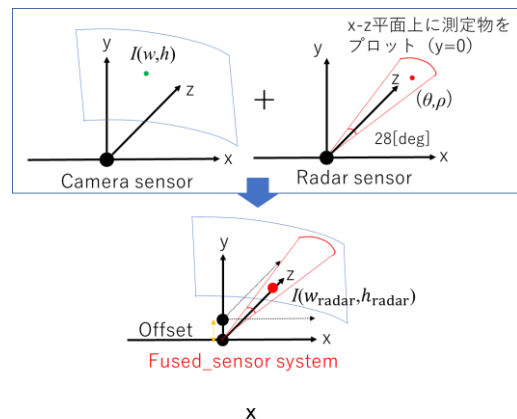


図1 レーダ値の取得範囲



図2 カメラとレーダの固定



2.2 カメラとレーダの一体化

Visual-SLAM は,カメラ画像から自己位置および姿勢を推定できることから,図2に示すようにカメラとレーダの位置関係を固定することで,カメラによる位置推定の結果をレーダにも反映させることができる。カメラとミリ波レーダを一体化した場合の座標系の様子を図3に示す。

ここで,カメラとレーダモジュールの位置を固定化したものを Fused_sensor システムとし,カメラ及びレーダモジュールを視点とした座標を Fused_sensor 座標とした。

図2に示すようにレーダモジュールはカメラの下に取りつけた状態となっており,40[mm]オフセットしている。カメラとレーダの一体化については Renyuan Zhang らの研究^[10]を参考とした。

[†] 福島県ハイテクプラザ南相馬技術支援センター
Fukushima Technology Centre Minamisouma Technical Support Center

[‡] 福島県ハイテクプラザ Fukushima Technology Centre

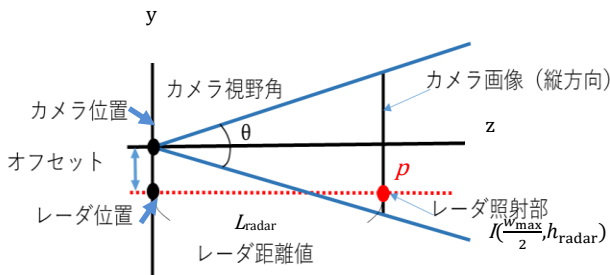


図4 カメラ画像とレーダ照射部

カメラの画角とカメラとレーダモジュールの位置関係から、図4に示すようにレーダ照射部(点 p)がカメラ画像内での位置を示しているかがわかる。カメラ画像のピクセルの位置を $I(w, h)$ とすると、点 p の画像中の位置 $I(w_{\text{radar}}, h_{\text{radar}})$ は次のように表すことができる。この時、カメラ画像の左上を $I(0, 0)$ とした。

$$h_{\text{radar}} = \frac{L_{\text{offset}} + L_{\text{radar}} \tan \frac{\theta}{2}}{2L_{\text{radar}} \tan \frac{\theta}{2}} h_{\text{max}} \quad (1)$$

$$w_{\text{radar}} = \frac{w_{\text{max}}}{2} \quad (2)$$

ここで、 L_{offset} はカメラとレーダモジュールのオフセット値、 L_{radar} はレーダから得られた距離値、 θ は縦方向の視野角、 h_{max} は縦方向の解像度、 w_{max} は横方向の解像度である。

また、レーダが照射している点の方位方向の位置 w_{radar} は、2.1項で示した通り取得する範囲を狭めて使用していることから、方位方向の中心値とした。

2.3 REMODE とレーダの統合

今回採用した REMODE では SVO (Fast Semi-Direct Monocular Visual Odometry) [11] と呼ばれる手法が用いられている。SVO は連続したカメラ画像から得られた特徴点をマッチングすることでカメラの位置と向きを推定するビジュアルオドメトリの手法の1つである。

レーダモジュールで得られた図3の Fused_sensor 座標内の距離値を、SVO を用いてグローバル座標系に変換することで、対象物の座標を得ることが可能となる。Fused_sensor 座標からグローバル座標への変換は次のように表すことができる。

$$\begin{pmatrix} x_{\text{global}} \\ y_{\text{global}} \\ z_{\text{global}} \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_{00} & R_{01} & R_{02} & T_x \\ R_{10} & R_{11} & R_{12} & T_y \\ R_{20} & R_{21} & R_{22} & T_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_{\text{radar}} \\ y_{\text{radar}} \\ z_{\text{radar}} \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

ここで、 R 及び T はそれぞれ回転変換、並進変換を表しており、SVO の結果から得ることができる。 $x_{\text{radar}}, y_{\text{radar}}, z_{\text{radar}}$ は、レーダモジュールの値となっている。今回使用したレーダモジュールは2次元であるため、 y_{radar} は0となる。変換の様子を図5に示す。

レーダモジュールから得られた値をグローバル座標系へ変換することで REMODE によって復元された点群データの中にレーダの値を対応付けすることができる。

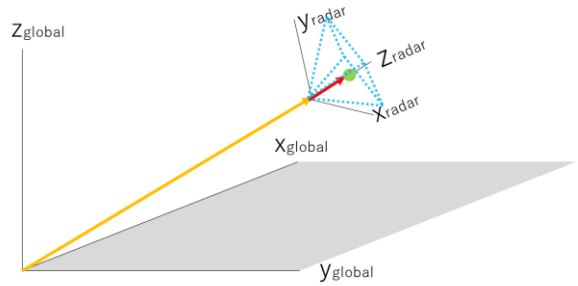


図5 Fused_sensor 座標からグローバル座標への変換

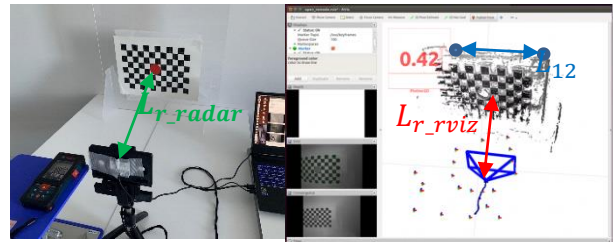


図6 任意の2点間距離の測定

2.4 2点間距離の算出方法

今回採用した REMODE は仮想空間内の相対的な位置だけを示すため、実際の距離を求めることができない。そこで、ミリ波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。REMODE の線形性を確認[5]できたことから、レーダモジュール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。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 $(x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2)$ の間の距離 L_{12} を次のように求めることができる。

$$L_{12} = \frac{L_{r_radar}}{L_{r_rviz}} \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2} \quad (4)$$

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での距離値である。それぞれ対応する部分を図6に示す。

3. 実験

3.1 カメラ画像内のレーダ照射位置の評価

実際にレーダモジュールが得た値が、カメラ画像のどの部分を捉えているのか確認実験を行った。ミリ波レーダの周波数帯である79[GHz]付近の吸収体に、50[mm]×50[mm]×25[mm]の木製ブロックを取り付け、レーダモジュールがブロックを捉えたときのカメラ画像を確認した。Fused_sensor システムから吸収体までの距離は500[mm], 250[mm], 100[mm]の距離でそれぞれ実験を行った。

実験の模式図とそれぞれの距離でブロックを捉えたときのカメラの様子を図7に示す。図7内に表示されている数値はミリ波レーダから得られた距離値[m]を示している。

結果を表2に示す。また、実験値はブロックの中心のピクセル位置とし、理論値は(1)式により求められる値である。どの距離においても実験値と理論値はよく一致した。図7のようにカメラ及びレーダモジュールから物体までの距離が近く

なるほど対象物がカメラ画像の下側に表示されていることを確認し、距離 100[mm]においては理論値通りにカメラ画像の範囲外となることを確認した。

表2 カメラ画像内のレーダ照射位置結果

距離[mm]	500	250	100
実験値[px]	300	360	範囲外
理論値[px]	299	358	536

3.2 REMODE とミリ波レーダの統合実験

REMODE とレーダモジュールからそれぞれ得られた点群の位置関係を確認する実験を行った。キャリブレーションシート2枚を 200[mm]オフセットさせ、段違いの状態を設置し、REMODE とレーダによる測定を行った。結果を図8に示す。レーダによって得られた点群は Fused_sensor システムからの距離値を1秒ごとにプロットしたものである。図8から REMODE による点群がほぼ重なることを確認した。

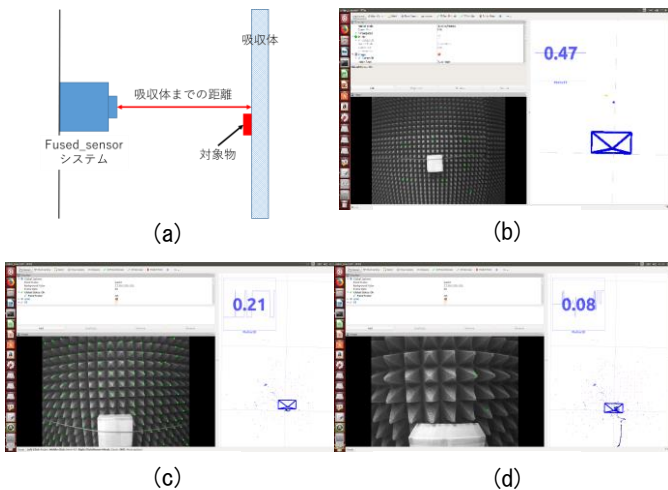


図7 カメラとレーダモジュールの位置合わせ実験
(a) 実験の様子 (b) 500[mm]
(c) 250[mm] (d) 100[mm]

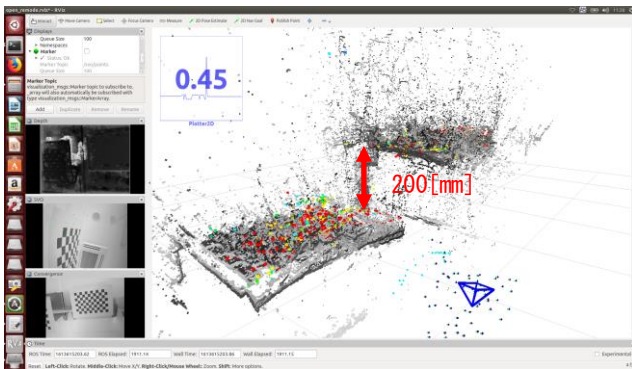


図8 REMODE とミリ波レーダの統合

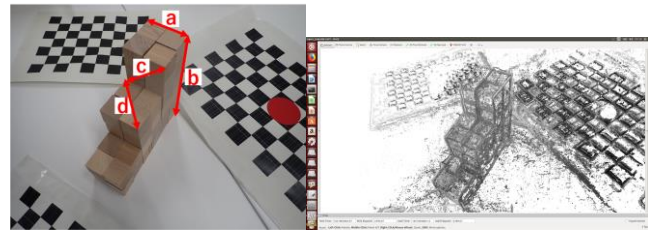


図9 2点間距離の測定評価
(a) 測定箇所 (b) 復元結果

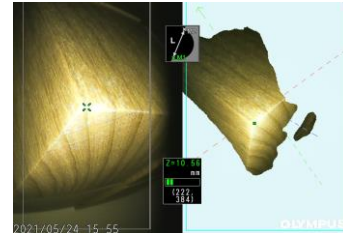


図10 ビデオスコープによる復元

3.3 2点間距離測定の評価

(3)式で示した任意の2点間距離を求める手法の評価を行った。図9(a)に示すように木製ブロックを階段状の形に組み立て、図9(a)に示す a から d の長さをそれぞれ測定した。ノギスで測定した長さを真値とし、復元した点群データから2点間距離を測定した値の RMSE を求めた。この時、どの長さも5回ずつ測定した。図9(b)に復元した点群データを示し、測定結果を表3に示す。実験の結果、どの方向に対しても 8[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。

また、比較対象として市販の工業用ビデオスコープであるオリンパス(株)製 IV9635N においても同様に評価を行った。このビデオスコープは一度に測定できる範囲が狭いため、図9辺 a の長さの一部分を復元したものを図10に示す。また、2点間距離の測定についても図9(a)内の辺 a の一部分であるブロック1辺に対して距離を測定し、RMSE を求めた。この結果、RMSE は 0.1[mm]であった。

表3 2点間距離測定結果

	本提案手法による測定				オリンパス社製ビデオスコープ
	a	b	c	d	-
真値[mm]	49.2	147.7	69.7	69.6	24.6
結果[mm]	47.2	155.3	67.9	68.9	24.7
RMSE[mm]	1.2	8.0	1.3	1.5	0.1

3.4 プラント棟における実験

ロボットの実証試験などを行うために実際の使用環境を再現した RTF プラント棟において、配管や階段などを REMODE により復元し、それぞれ2点間距離の測定を行った。対象としたプラント棟の一部の様子と復元結果を図11に示す。また、階段の段差の距離、配管の長さ、2つ並んだ配管の間の距離をそれぞれ復元したデータから求めた。結果を表4に示す。屋外で測定した結果についても誤差 16[mm]以下で測定できることを確認した。

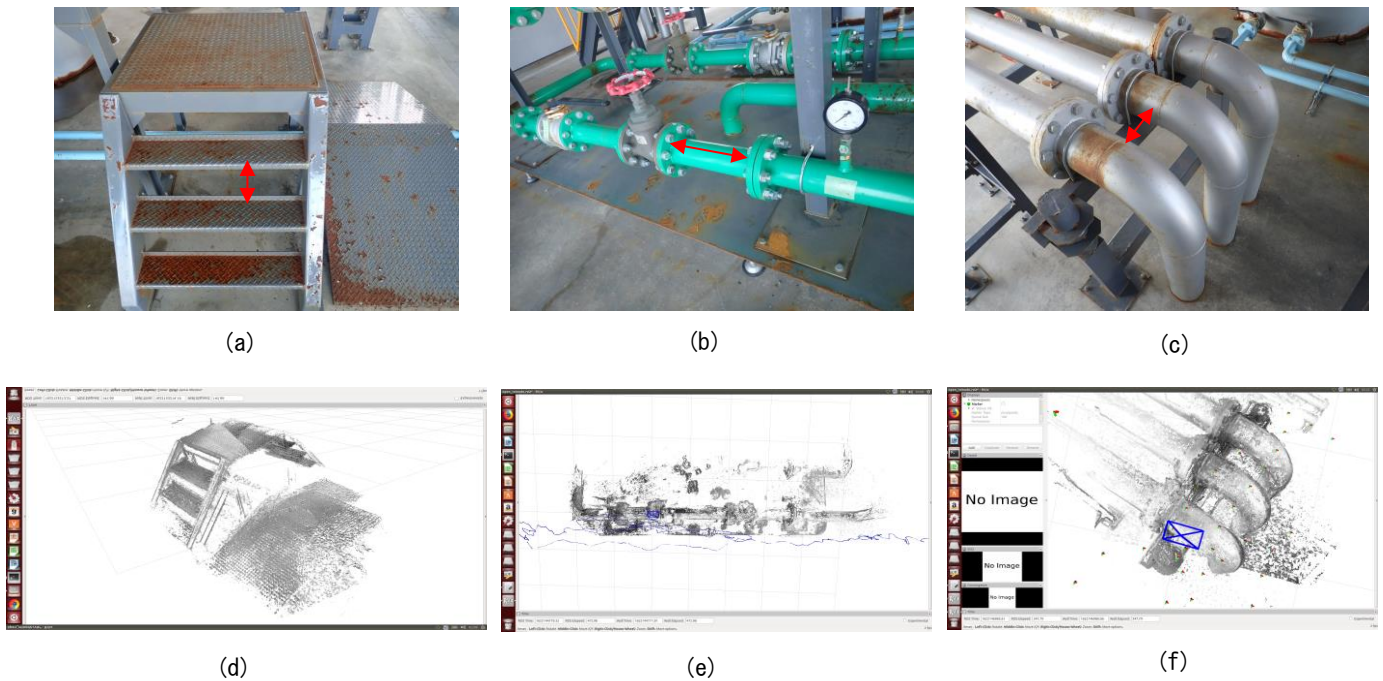


図 11 RTF プラント棟設備測定実験
 (a) プラント棟設備① (b) プラント棟設備② (c) プラント棟設備③
 (d) 復元結果① (e) 復元結果② (f) 復元結果③

表 4 プラント棟設備測定結果

測定箇所	a	b	c
真値[mm]	170.0	400.0	150.0
結果[mm]	157.8	386.7	134.7
RMSE[mm]	12.5	14.3	15.4

4. まとめ

本研究では、単眼カメラ及びミリ波レーダを融合し構造物の三次元復元を行った。ミリ波レーダとカメラを組み合わせることでレーダから構造物の該当位置までの距離を測定し、これを基準として、復元した三次元構造の任意の2点間距離を得ることができた。今回行ったブロックによる実験については、どの方向に対しても8[mm]以下の誤差で測定できることを確認した。ビデオスコープと比較したところ、精度は劣る結果となったが、復元範囲や測定範囲がビデオスコープよりも広い場合、短時間で広い範囲をターゲットとして使用する際は有用である。また、RTFプラント棟において2点間距離を測定したところ16[mm]以下の誤差で測定できることを確認し、実際のインフラ点検を模した実験においても、測定値を得ることができた。

今後は、様々な環境での三次元構造の復元確認及びREMODEによる点群データとミリ波レーダによる点群データのばらつきの評価など、一体化の詳細な評価を行い、複雑形状に対してどこまで対応できるか確認する必要がある。また、復元した点群データに関しても外れ点除去及び点群データの補正を行い、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ことも課題である。

参考文献

- [1] Jakob Engel, Thomas Schöps, Daniel Cremers “LSD-SLAM: Large-Scale Direct Monocular SLAM”. *Computer Vision ECCV 2014*, 834-849. (2014).
- [2] Raul Mur-Artal, J. M. M. Montiel, Juan D. Tardos. “ORB-SLAM: a Versatile and Accurate Monocular SLAM System”. *IEEE Transactions on Robotics*, 31(5), 1147-1163 (2015).
- [3] 西村正三, “光学的計測法を用いた新しい橋梁点検手法について”, 精密工学会, 80(11), 970-974. (2014).
- [4] 友納正裕, 原 祥堯, “SLAM の現状と今後の展望”, システム制御情報学会, 64(2), 45-50. (2020).
- [5] Matia Pizzoli, Christian Forster, Davide Scaramuzza : “REMODE: Probabilistic, monocular dense re-construction in real time”, *2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2609-2616, 2014.
- [6] 福島ロボットテストフィールド, <https://www.fipo.or.jp/robot/>
- [7] 鈴木健司, 山田昌幸, 石澤満, 浜尾和秀, 三浦勝吏, 太田悟 “狭隘内部空間における三次元構造復元に関する研究” 土木学会 第3回 i-Construction の推進に関するシンポジウム講演論文. (2021)
- [8] ROS, <http://www.ros.org>
- [9] Ceasar Ionescu, Sandeep Rao “ミリ波レーダの基礎”, p.7. (2017).
- [10] Renyuan Zhang, Siyang Cao, “Extending Reliability of mmWave Radar Tracking and Detection via Fusion With Camera”. *IEEE Access* .7.137065-137079. (2019).
- [11] C. Forster, M. Pizzoli, and D. Scaramuzza, “SVO: Fast Semi-Direct Monocular Visual Odometry,” in *Proc. IEEE Intl. Conf. on Robotics and Automation*, (2014).