

非指向性検出器と自己遮蔽を搭載した移動ロボットによる放射線分布推定

○森田 英嗣, 小松 廉, 中島 慎介, 安琪, 山下 淳, 浅間 一 (東京大学)

Estimation of Radiation Distribution Using a Mobile Robot Equipped With Non-Directional Detectors and Self-Shield

○ Eiji Morita, Ren Komatsu, Shinsuke Nakashima, Qi An, Atsushi Yamashita, and Hajime Asama (The University of Tokyo)

Abstract: Research on robots that can work remotely in high-dose environments without exposing humans to danger has been conducted. To reduce spatial radiation levels in contaminated environments, radiation source estimation is essential. In this study, a robot equipped with LiDAR, gamma radiation detectors, and shielding was used to perform radiation measurements and attempt to locate radiation sources. In conclusion, it was found that rough radiation source estimation could be achieved based on data differences from the robot's self-position and direction, measured radiation dose, and the presence of shield.

1. 序論

1.1 背景

福島第一原子力発電所事故によって、大量の放射線物質、特にセシウム 134, セシウム 137, ヨウ素 131 などが放出され、原子力発電所の建屋内などの環境中に残存している。ヨウ素 131 は、放射線を出す能力が半分になるまでの時間である半減期が約 8 日と非常に短いため、今日ではほとんど環境中に残存していない。しかし、セシウム 134 やセシウム 137 の半減期はそれぞれ約 2 年, 30 年と非常に長いため、これらのモニタリングや除染・遮蔽が必要になる。作業員は防護服を着用して作業にあたっているが、ガンマ線を完全に遮蔽することはできないため、高線量環境での作業は被ばくの危険を伴う。そこで、作業員を危険な環境に曝すことなく、遠隔で作業を行うためのロボットの研究がなされてきた。

汚染された環境の空間線量を低下させるためには、飛散した放射線源を鉛など放射線を透過させにくい物質で遮蔽または洗浄等で除染する必要があり、そこで放射線分布推定が必要となる。放射線分布推定では、非指向性検出器と指向性検出器の 2 種類の放射線検出器が一般的に用いられる。非指向性検出器は放射線の入射のみを検知するもので、情報量が少なく、より多くの観測時間と観測箇所を必要とする。一方で指向性検出器は入射した方向についての情報も得られる。福島第一原子力発電所 1F サイト内には多くの機器やガレキ、建屋といった様々なものが存在しており、これらに放射性物質が付着しているため、汚染は 3 次元的に広がっており、放射線がいたるところを飛び交っている。非指向性検出器の 1 つであるサーベイメータでは入射した放射線の個数をカウントできるが、計測地点での線量率を測定するだけでは正確な汚染の分布が把握できないという問題がある。さらにそのような点での測定では、作業現場全体の 3 次元測定に時間がかかるだけでなく、作業員が被ばくしてしまうという問題もあった。

また高線量環境では様々な問題が生じる。重量が軽

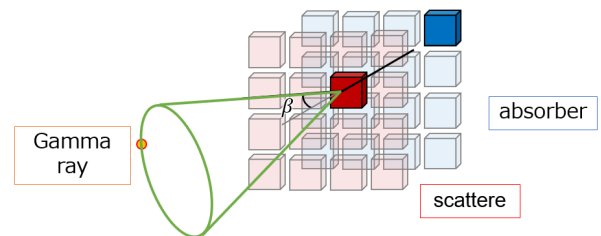


Fig.1 Schematic of Compton camera

く、移動ロボットで主に用いられる指向性検出器であるコンプトンカメラでは、方向を検出できないという問題が生じる。コンプトンカメラでは、入射ガンマ線が散乱体検出器でコンプトン散乱を起こし、そこで散乱したガンマ線を吸収体検出器で捉えることで入射ガンマ線の到来方向とエネルギーを同時に計測する。Figure 1 にコンプトンカメラの模式図を示している。高線量環境において、複数の粒子が同時に散乱体に入射し、散乱が同時に起こると吸収体との関係が分からなくなるため、方向が検出できなくなる。本研究で対象とする環境の福島第一原発 1F サイト内の空間線量は最大で 1600 mSv/h である。しかし、コンプトンカメラの例として Temporal Imaging Compton Camera V3 のスペックは検出限界が 1 mSv/h なので本研究で想定している環境では使うことが出来ない^[1]。指向性検出器であるガンマカメラは高線量環境でも使用可能だが、重いコリメータを用いているため、ガレキなどが存在する環境下での活動を想定された移動ロボットの最大積載量を超過してしまう。

1.2 関連研究

Sato らは、撮影画像から 3D モデルを復元するフォトグラメトリを利用し、放射線検出器による放射線観測結果を環境の 3D モデルに投影する手法を提案した^[2]。この手法を用いた場合の問題点は、ガンマ線は透過力が高いため、ロボットと放射線源の間に物体が存在した場合、手前の物体に放射線源があるとみなされる可

能性があることである。誤推定された放射線源位置を遮蔽すると、遮蔽箇所を誤ることになり、空間線量を低下させることが出来ない。

Haefner らは、持ち運び可能な非指向性検出器を用いて、放射線源分布を推定する手法を提案した^[3]。画像の色情報と深度情報が得られる RGB-D センサを用いて行った SLAM と組み合わせることで、放射線分布推定に成功した。しかしこの研究では、放射線汚染環境内で人間が放射線検出器を携帯して歩きまわること前提にしており、高線量環境下では使用することができない。

また汚染分布の 3 次元可視化を行った研究が存在する^[4]。この研究では、3 次元測域センサ、コンプトンカメラ、サーベイメータを組み合わせた、統合型放射線イメージングシステムを構築し、これらの複数のセンサ情報を入力ファイルとすることで、数回のボタン操作で 3 次元汚染マップを描画できる専用ソフトウェアを新たに開発した。汚染分布や線量率分布を可視化した 3 次元マップを仮想空間に投影することにより、線量率低減のための遮へいや除染効果のシミュレーションが可能となる。この研究では、静止測定にて 2 次元的な汚染分布を得る従来のコンプトンカメラの利用方法と異なり、オペレータが測定対象箇所の周辺を高濃度汚染箇所に近づくことなく、比較的線量率の低い通路上を歩行移動しながら短時間で計測することで汚染箇所の 3 次元マップの描画をしている。この研究の問題点としては、周囲に低線量の環境がないような高線量環境では手法が使えない点が挙げられる。

Minamoto らは非指向性検出器による放射線分布推定を行った^[5]。放射線量が逆二乗則に従って減衰し、放射線カウントがポアソン統計に従うという仮定の下で、放射線量を三次元的に計測し、放射線の減衰特性とポアソン統計量に基づいて MAP 推定を計算することにより、点状放射線源の強度を推定した。この研究の問題点は、測定点が密でないことと推定ができないことである。

Nguyen らは、構造物の遮蔽効果を考慮し、放射線の測定結果を補正した上で画像再構成を行った^[6]。補正により、壁がなかったときのような計測ができることで、実際に設置した線源に近い位置の分布を見ることができた。この研究の問題は、線源がどの領域にあるかは分かるが、具体的な位置が推定できていないことである。

1.3 研究目的

このように放射線分布推定、放射線マッピングの手法や研究は様々存在するが、誤推定の可能性や人間が活動できるような低線量環境下を想定しているなどの問題がある。

そこで本研究では、指向性検出器が使えない高線量環境において非指向性検出器を用いた放射線分布推定を行う。また遮蔽を考慮することでより短時間での推定を行うことを目指す。

2. 提案手法

2.1 概要

LiDAR による Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) を行い、ロボットの自己位置を取得する。放射線源が存在する環境下で、ロボットに遮蔽、非指向性検出器を搭載し、放射線量を測定し、放射線源の方

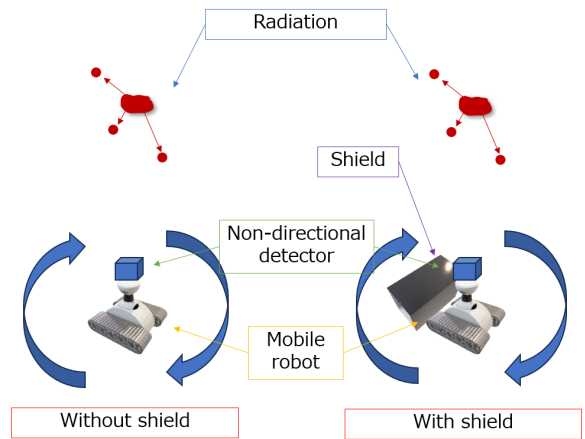


Fig.2 Proposed Method

向を推定する。測定した放射線量、方向、ロボットの自己位置、それぞれの情報を組み合わせることで、短時間で非指向性検出器による放射線分布の推定を行う。また、これらのデータを統合し、マップ上に表示する。

2.2 遮蔽の採用

本研究ではロボットの回転中心に非指向性検出器、前方に遮蔽を搭載することを想定している。非指向性検出器による測定の場合に測定される放射線量は、検出器と放射線源の間の距離の二乗に反比例して変化する。遮蔽を用いない場合ではロボットがその場で回転したとしても、放射線源と検出器の距離が変わらないために測定される放射線量に変化はない。一方でロボットの前方に遮蔽を装着した場合を考える。遮蔽が存在する方向から入射する放射線量が低下するため、ロボットがその場で回転したとき、遮蔽がロボットと放射線源の間に存在する場合のみ測定される放射線量は低下する。低下した方向に放射線源が存在すると推定する。遮蔽を搭載したロボットの回転動作をマップ上の数点で行うことでおおまかな放射線分布推定を行ったのち、推定された地点周辺で密探索を行う。遮蔽を導入することによる粗密探索により短時間化を図る。

2.3 SLAM の概要

本実験では 3D LIDAR を用いたリアルタイムの 6 自由度 SLAM のためのオープンソース ROS パッケージである hdl_graph_slam を用いる^[7]。これは NDT スキャンマッチングベースのオドメトリ推定とループ検出を備えた 3D グラフ SLAM に基づいている。

3. 実験

3.1 実験概要

知能機動型ロボットシステム PIONEER-3DX, LiDAR (Velodyne:VLP-32C), ガンマ線検出器 (BDKG-204), 遮蔽としてはトレーニング用鉄製おもりである HNM125 を用いて実験を行った。ロボットの最大積載量は 23kg, ガンマ線検出器の線量率の測定範囲は 0.05 μ Sv/h - 10 Sv/h, 遮蔽の重さは 1.25 kg である。Fig. 3 に実験に用いたロボットの概要を示す。またコンピュータとしては NVIDIA Jetson AGX Xavier を用いており、OS は Ubuntu 20.04, ロボット制御ソフトウェアとしては ROS Noetic を用いている。

Fig. 4 のような配置で実験を行った。線源としてはラ

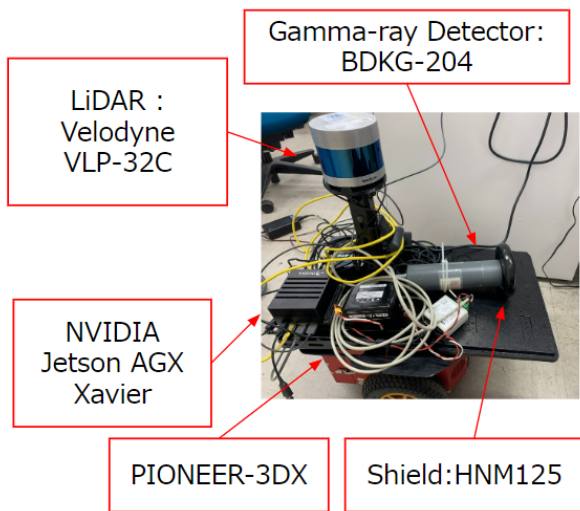


Fig.3 Overview of the robot used in the experiment

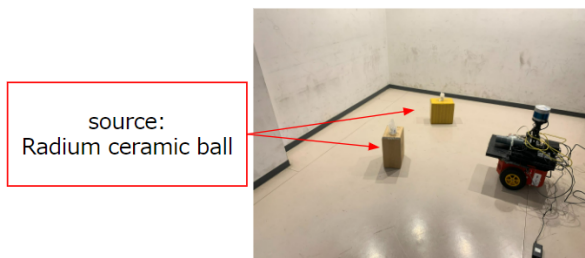


Fig.4 Experimental Environment

ラジウムセラミックボールを用いている。本研究で対象としている高線量環境とは異なり人体に問題ない弱い線源である。そのため、提案手法であるロボットの回転中心に非指向性検出器、前方に遮蔽を置き、ロボットを回転させることで放射線源の方向を特定するというアプローチでは、測定値に差が出ないため方向を推定することができない。そこで本実験では、ロボットの前方に非指向性検出器を搭載し、遮蔽を搭載した場合としない場合のそれぞれで測定を行い、測定値に差が出た方向に放射線源があると推定する。

本実験では SLAM と非指向性検出器による放射線量測定を同時に行い、放射線分布推定を行うことを目標とした。

3.2 遮蔽についての予備実験

実際に遮蔽によりどの程度入射する放射線量が低下するのか検証した。ここでは遮蔽を用いた場合と用いなかった場合、それぞれの場合でのラジウムセラミックボールからの放射線量を測定した。Fig. 5 にその様子を示す。今回用いた遮蔽は素材が鉄で厚さは 20 mm である。また測定値は測定を開始してから 60 秒後に計測されたものとする。

Table 1 The radiation dose measured at each distance [nSv/h]

	50 mm	100 mm
Without shield	141.1	96.5
With shield	102.7	70.0

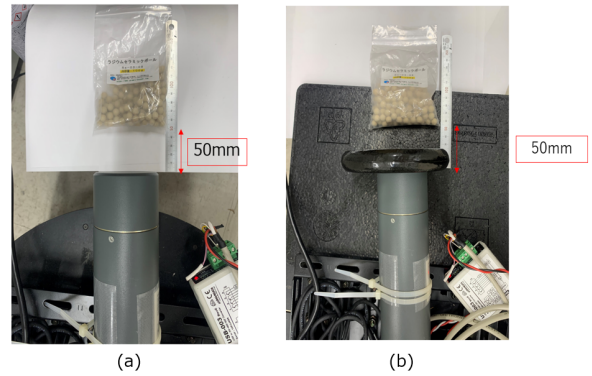


Fig.5 The condition of the experiment: (a) Without shield. (b) With shield.

実験結果を Table 1 に示す。線源が無い場合の計測結果は 50 nSv/h である。

鉄の半価層（線量率を 1/2 に弱める遮蔽体の厚さ）は 21 mm である^[8]。線源が無い場合の放射線量が 50 nSv/h であることから、ラジウムセラミックボールにより、遮蔽を用いなかった場合においては 50 mm で 94 nSv/h, 100 mm では 46 nSv/h 測定値が増加している。一方で遮蔽を用いた場合においては 50 mm で 52 nSv/h, 100 mm の場合では 20 nSv/h 測定値が増加している。50 mm の場合では 43 %, 100 mm の場合では 56 % 減少しており、今回用いた遮蔽の厚さがほぼ半価層に等しいことを考えると、理論通りの結果となったことが分かる。

3.3 実験結果・考察

3.3.1 SLAM

実験結果は Fig.6 のようになった。移動距離が短かったため、一地点で計測した点群しか記録されていなかった。SLAM の精度を上げるためにパラメータ調整が必要である。

3.3.2 放射線分布推定

遮蔽を用いなかった場合と用いた場合でそれぞれ計測を行った。

Figure 7 に実験結果を示す。(a) は遮蔽無しで実験を行ったときのロボットの走行位置と向いている方向、(b) は遮蔽無しで実験を行ったときのロボットの走行位

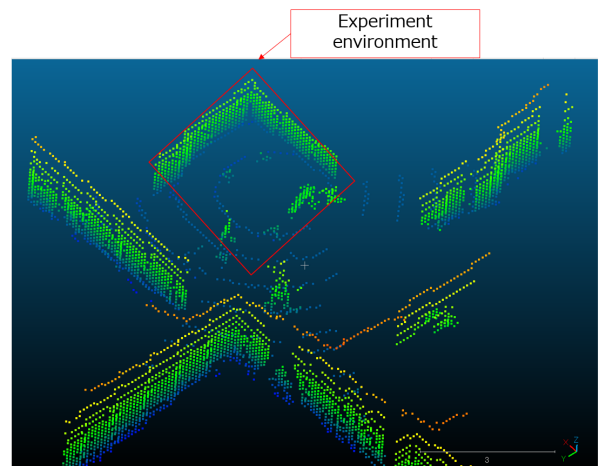


Fig.6 Experimental Result: SLAM

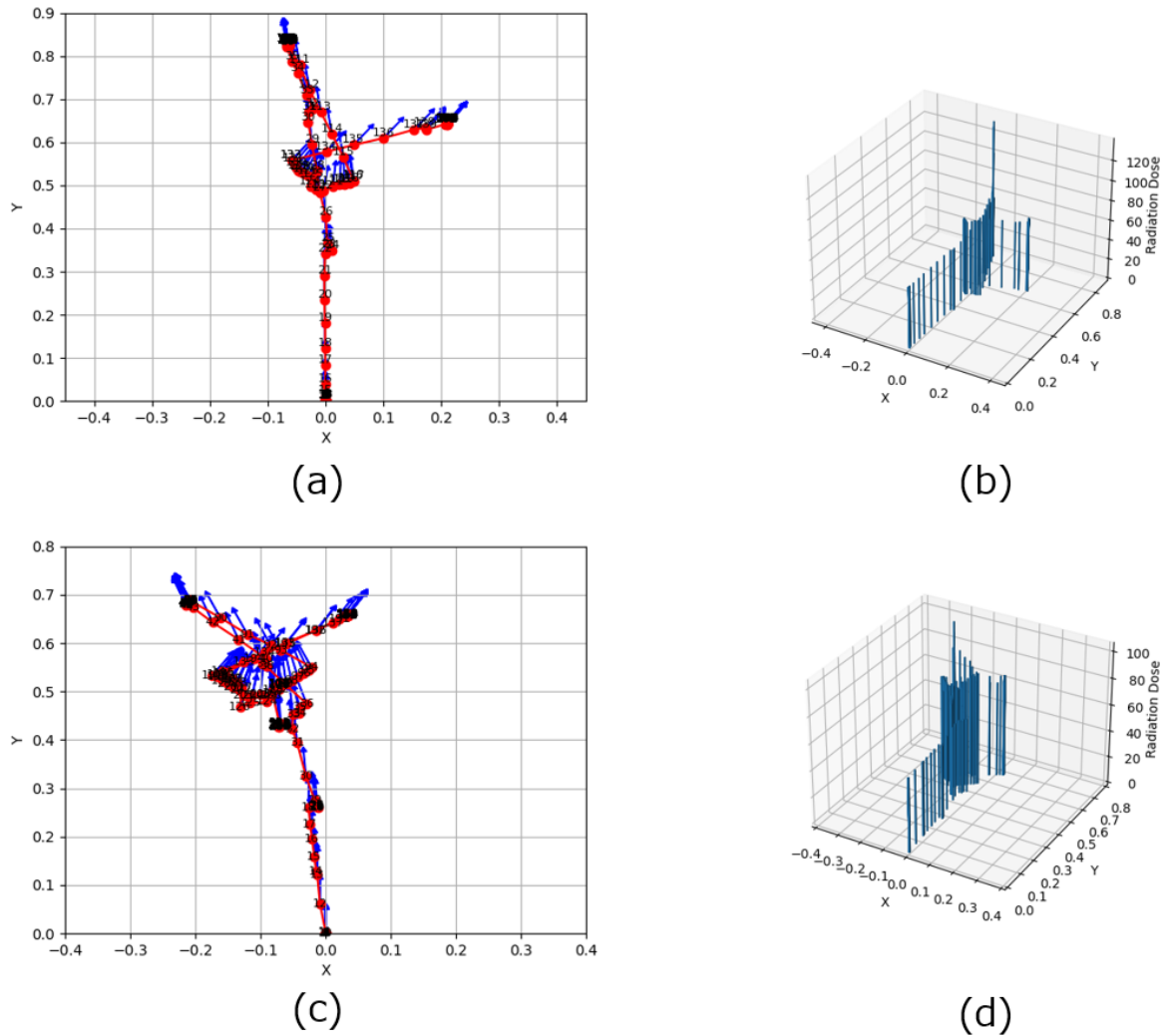


Fig.7 (a) Robot running position and posture without shield. (b) Robot running position and measured radiation dose without shield. (c) Robot running position and posture with shield. (d) Robot running position and measured radiation dose with shield.

置と測定された放射線量, (c) は遮蔽有りで実験を行った時のロボットの走行位置と向いている方向, (d) は遮蔽有りで実験を行った時のロボットの走行位置と測定された放射線量である。

以上の結果から厳密ではないが放射線源の位置を推定した結果が Fig. 8 である。Figure 8 の (b),(d) を比較したとき、遮蔽により放射線量が低減しているロボットの走行位置が存在する。その走行位置の中でも測定された放射線量が周囲と比べ高かった点が Fig. 8 の青い点である。その点においてロボットが向いていた方向に放射線源があると推定した。Figure 8 の赤い部分が推定された放射線源位置である。ロボットの走行位置はオドメトリを用いて測定しており、オドメトリからロボットの先端まで 300 mm 程度あることを考慮している。

4. 結論

本研究では SLAM と非指向性検出器による放射線分布推定を行った。ロボットの自己位置と方向、測定された放射線量、また遮蔽の有無によるデータの差異か

らおおまかな放射線源測定が行えることが分かった。

今後の課題としては高線量環境での実験の実施、面線源が存在する場合の放射線分布推定、SLAM によって作成したマップ上への放射線分布推定結果の表示などが挙げられる。

5. 謝辞

本研究の一部は、JAEA 英知を結集した原子力科学技術・人材育成事業 JPJA19H19210047 の助成を受けた。

参考文献

- [1] *Temporal Imaging Compton Camera V3*. Accessed on 25.10.2023. URL: <https://damavan-imaging.com/temporal-imaging-compton-camera-v3/>.
- [2] Yuki Sato, Yuta Terasaka, Wataru Utsugi, Hiroyuki Kikuchi, Hideo Kiyooka, and Tatsuo Torii: "Radiation imaging using a compact Compton camera mounted on a crawler robot inside reactor buildings of Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Station". *Journal of Nuclear Science and Technology* 56.9-10, pp. 801–808, (2019).

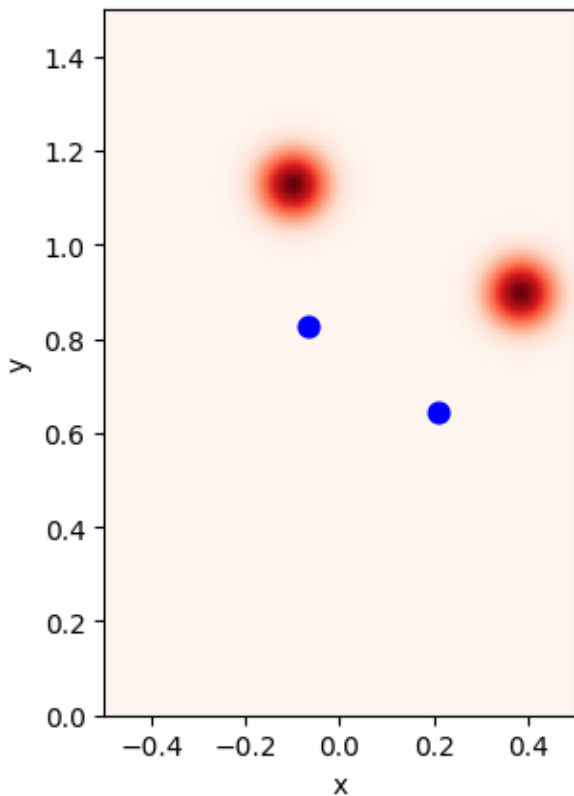


Fig.8 Radiation Source Estimation

- [3] Andrew Haefner, Ross Barnowski, Paul Luke, Mark Amman, and Kai Vetter: “Handheld real-time volumetric 3-D gamma-ray imaging”. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* 857, pp. 42–49, (2017).
- [4] 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構: “廃炉現場の汚染分布を3次元マップで‘見える化’—見えない汚染を仮想空間で把握し、作業員の被ばくを低減—”. Accessed on 09.07.2023. URL: <https://www.jaea.go.jp/02/press2021/p21051403/>.
- [5] Gaku Minamoto, Eijiro Takeuchi, and Satoshi Tadokoro: “Estimation of Ground Surface Radiation Sources from Dose Map Measured by Moving Dosimeter and 3D Map”. *2014 IEEE/RSJ INTERNATIONAL CONFERENCE ON INTELLIGENT ROBOTS AND SYSTEMS (IROS 2014)*, pp. 1889–1895, (2014).
- [6] 阮霸唯, 田村雄介, and 平田泰久: “3次元物体認識を用いた構造物による遮蔽効果を考慮した計測補正”. 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2023 講演論文集. 2023, 2A1–B10.
- [7] Kenji Koide, Jun Miura, and Emanuele Menegatti: “A portable three-dimensional LIDAR-based system for long-term and wide-area people behavior measurement”. *International Journal of Advanced Robotic Systems* 16.2, p. 1729881419841532, (2019).
- [8] J. B MASSEY: *Data for Protection against Ionizing Radiation from External Sources: Supplement to ICRP Publication 15*. (1974).