

## 災害対応ロボット WAREC-1 による自律的な階段昇段のための画像処理技術の検討 Disaster Response Robot WAREC-1's Image Processing Technology for Climbing Stairs Autonomously

宮川 和也<sup>†</sup> 大谷 淳<sup>†</sup> 小方 博之<sup>‡</sup> 松澤 貴司<sup>†</sup> 橋本 健二<sup>\*</sup> 高西 淳夫<sup>†</sup>

Kazuya Miyakawa<sup>†</sup> Jun Ohya<sup>†</sup> Hiroyuki Ogata<sup>‡</sup> Takashi Matsuzawa<sup>†</sup> Kenji Hashimoto<sup>\*</sup> Atsuo Takanishi<sup>†</sup>

### 1. はじめに

世界有数の自然災害大国である日本では、過去に大規模地震や集中豪雨による河川の氾濫・土砂崩れなど様々な災害が発生している。これらの災害が発生した際には、現場の被害状況の調査や復旧作業が必要となる。しかし、家屋や街路樹の倒壊、ガス管の破損によるガスの充満等の可能性がある災害現場は、立ち入って作業を行うには大きな危険が伴う環境といえる。そこで、上述したような極めて危険な災害現場における二次災害の防止や作業負担の軽減の観点から、災害現場で人間に代わって復旧作業や救助活動を行う災害対応ロボットの需要が増加している。この需要の高まりを受けて、早稲田大学では災害現場のような極限環境下で作業可能な四脚ロボット WAREC-1[1]の開発を行っている。災害対応ロボットの研究は、日本国内のみならず、米国や韓国を始め世界中で行われており、米国では2013年から2015年にかけて災害救助用のロボット競技大会である Darpa Robotics Challenge (以下、DRC) [2]が開催された。

現在、WAREC-1 はセンシングに基づく自律移動を行っておらず、WAREC-1 周辺の環境情報を事前に与えることで動作計画を実施し、移動を行っている。しかし、この移動法では未知環境下において、WAREC-1 を運用することができないため、センシングに基づく周辺環境の認識を行う必要があるといえる。

WAREC-1 を始めとする災害対応ロボットに求められる移動機能として、階段昇降機能が挙げられる。現時点で、WAREC-1 は階段の位置・方向が既知という条件下における階段昇降機能を実現している。しかし、上述したように未知環境下において WAREC-1 を運用するためにはセンシングに基づく階段の位置・方向の推定が必要となる。そこで本稿では、災害対応ロボット WAREC-1 による自律的な階段昇段を実現するための階段の踏板の三次元位置座標を推定する手法を提案する。

### 2. 提案手法

本稿では、WAREC-1 による自律的な階段昇段を実現するために、RGB 画像と三次元点群を入力とし、階段の踏板の三次元位置座標を推定する手法を提案する。なお、本研究では下階と上階の間を直線で結ぶ直階段を昇段の対象とする。

### 2.1 直階段の検出

RGB 画像中に存在する直階段を検出する研究は、Shimakawa らの研究[3]を始め盛んに行われている。しかし、いずれの手法も直階段の種類やセンサとの相対角度が限定的であるため、災害対応ロボットに求められる複雑なシチュエーションにおける直階段の検出は困難である。そこで、本提案手法では直階段の種類やセンサとの相対角度の制約を緩和するため、深層学習を用いた物体検出手法である Single Shot MultiBox Detector (以下、SSD) [4]を活用した。直階段の RGB 画像データをスタンフォード大学が提供する ImageNet[5]、Google 社が提供する Open Images Dataset v4[6]等から収集し、それらを学習データとして SSD の転移学習を行う。直階段は、蹴込み板の有無で箱型階段とスケルトン型階段に分別されるが、いずれもカテゴリを直階段として学習を行う。WAREC-1 に搭載した RGB カメラより取得される RGB 画像に学習済みモデルを適用することで、画像中に存在する直階段の領域を囲う矩形 (以下、Bounding Box) を推定する。

### 2.2 直階段を含む三次元点群の抽出

WAREC-1 に搭載した Laser Range Finder より取得される三次元点群から 2.1 にて推定した Bounding Box の領域内に相当する三次元点群を抽出するため、Bounding Box の垂直・水平方向の画角を算出し、RGB カメラを原点とする視錐台を生成する。視錐台内の内部・外部でフィルタリングを行うことで、直階段を含む三次元点群の抽出を行う。この処理を Frustum Culling[7]といい、イメージを図 1 に示す。

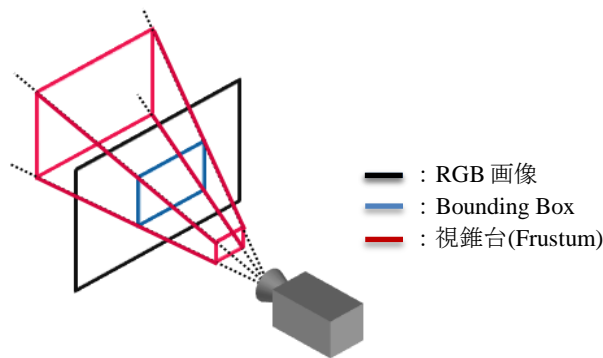


図 1. Frustum Culling のイメージ

### 2.3 直階段の踏板候補の位置推定

2.2 にて抽出した直階段を含む三次元点群には、直階段の踏板の他に手すり、踊り場などさまざまな情報が含まれる。これらの中から踏板の位置情報を推定するために、踏板が地面とほぼ平行な平面であるという性質を利用する。まず、2.2 にて抽出した直階段を含む三次元点群中に存在する地面と平行な三次元平面を形状パラメータの推定法で

<sup>†</sup> 早稲田大学 創造理工学部 総合機械工学科  
Dpt.Modern Mechanical Engineering, Waseda University  
<sup>‡</sup> 成蹊大学 理工学部 システムデザイン学科  
Dpt.Systems Design Engineering, Seikei University  
<sup>\*</sup> 明治大学 理工学部 機械情報工学科  
Dpt.Mechanical Engineering Informatics, Meiji University

ある Random Sample Consensus (以下, RANSAC) [8]を適用し, 推定する. そして, 推定された三次元平面上に存在する点群にユークリッド距離を類似度とするクラスタリングを適用し, 同一平面上に存在する複数の領域を分割する. 分割された各領域を踏板の候補とする. 最後に, 領域ごとに重心を計算し, それらを各踏板候補の位置情報として使用する.

## 2.4 直階段の踏板の位置推定

2.3にて得られた候補から踏板を選び出すために, 直階段の踏板が XYZ 各軸方向に一定間隔で配置されている性質を利用する. 2.3にて推定した踏板候補の重心の中で, XYZ 各軸方向に一定間隔で並んでいるものの組み合わせを探索することで踏板を判別する.

## 3. 実験と結果

本稿で提案した手法の有効性の検証のため, Gazebo[9]で生成したシミュレーション環境内に設置した直階段に対し, 実験を行った. 環境の様子を図2に示す. また, 2.1から2.4の処理の結果を図3から図6に示す. 図5の赤点は, 踏板候補の領域の重心位置を表す. 図6の緑点は, 踏板として判別された領域の重心位置を表す. 緑点は直階段の踏板の位置と一致していることから, 直階段の踏板の抽出が正しく行えたことが確認できた.

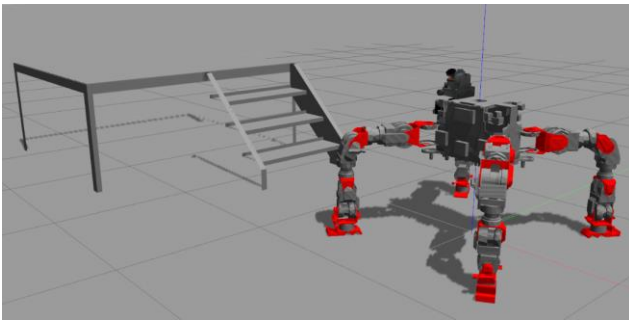


図2.シミュレーション環境

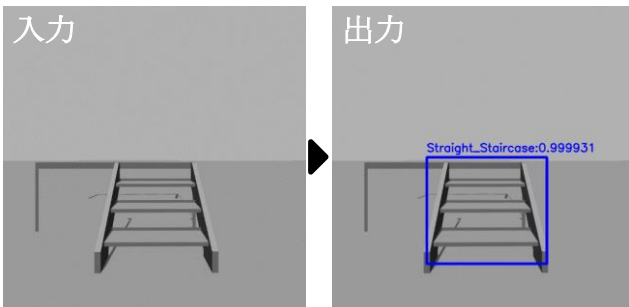


図3.直階段の検出

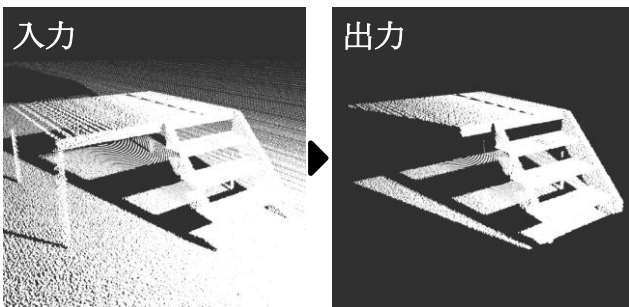


図4.直階段を含む三次元点群の抽出

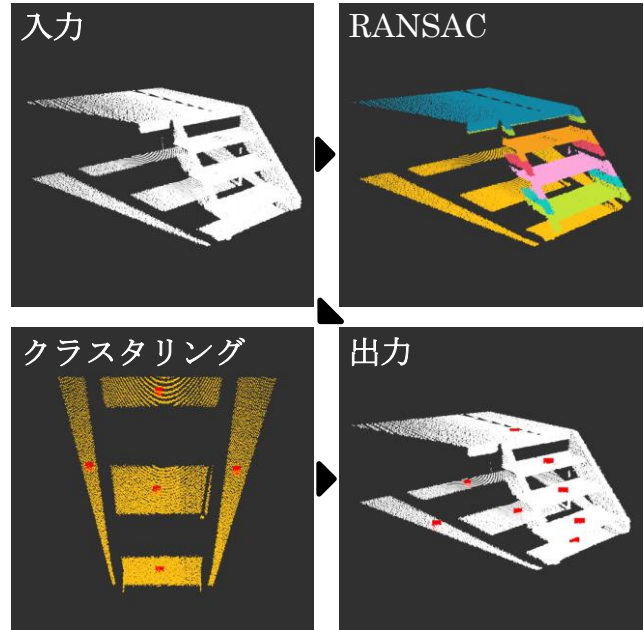


図5.直階段の踏板候補の位置推定

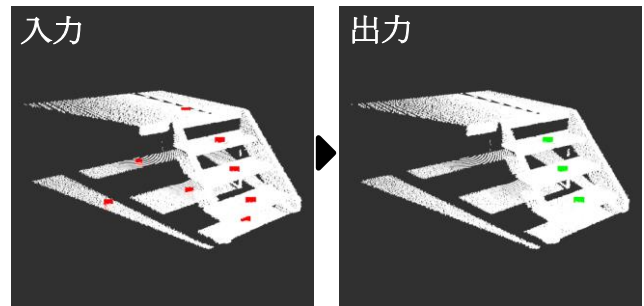


図6.直階段の踏板の位置推定

## 4. まとめと今後の課題

本稿では, 災害対応ロボット WAREC-1 による自律的な階段昇段を実現するための階段の踏板の三次元位置座標を推定する手法を提案し, シミュレーション環境内の実験においてその有効性を確認した. 本稿の 2.3-2.4 は, 直階段上に瓦礫や木材等が存在しないことを前提とした手法であり, このような場合は直階段の位置推定手法を別途検討する必要がある.

### 参考文献

- [1] Kenji Hashimoto et al., "WAREC-1 — A four-limbed robot having high locomotion ability with versatility in locomotion styles", 2017 IEEE International Symposium on Safety, Security and Rescue Robotics (SSRR), pp. 172-178 (2017).
- [2] 梶田 秀司 他, "DARPA ロボティクスチャレンジ決勝戦でのロボットシステム開発と教訓", 日本ロボット学会誌, Vol.34, No.6, pp. 360-365 (2016).
- [3] Manabu Shimakawa et al., "A Study on Staircase Detection for Visually Impaired Person by Machine Learning using RGB-D Images", Proceedings of the 5th IIAE International Conference on Intelligent Systems and Image Processing 2017, 2017.
- [4] W. Liu et al., "SSD: Single Shot MultiBox Detector", In European conference on computer vision, pp. 21-37 (2016).
- [5] ImageNet (最終閲覧日: 2019年6月16日) <http://www.image-net.org/>
- [6] Open Images Dataset (最終閲覧日: 2019年6月16日) [https://storage.googleapis.com/openimages/web/factsfigures\\_v4.html](https://storage.googleapis.com/openimages/web/factsfigures_v4.html)
- [7] Assarsson, Ulf & Moller, Tomas., "Optimized View Frustum Culling Algorithms for Bounding Boxes", Journal of Graphics Tools, (2000).
- [8] Rahul Raguram et al., "USAC: A Universal Framework for Random Sample Consensus", IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, pp. 2022-2038 (2013).
- [9] Gazebo (最終閲覧日: 2019年6月16日) <http://gazebo-sim.org/>