

# 海洋破碎プラスチックごみ回収ロボットの開発

## -第4報 ごみ・砂分離機構の改良と統合モデルの開発-

○崔 丞杓, 松本 耕平, 倉爪 亮 (九州大学)

### Development of a Marine Plastic Waste Collection Robot - Improvements to Waste-Sand Separation Mechanism and Integrated Model

○ Seungpyo Choi, Kohei Matsumoto and Ryo Kurazume

Abstract: Plastic debris scattered along coastlines is a major contributor to microplastic pollution. However, manually cleaning large coastal areas is extremely challenging. We are developing a robotic system to collect plastic debris from coastlines. This study reviews the limitations of previously developed systems and introduces a newly developed system, including performance evaluation results and remote control capabilities using ROS2.

#### 1. 緒言

地球表面積の約71%を占める海洋生態系は生物多様性に富み、過去から現在に至るまで人類にとって貴重な存在である。Cunnane et al. によると、人類は歴史的に海洋生態系から安定した食料を得ることができ、それが人間の脳の発達に良い影響を与えてきた<sup>1)</sup>。さらに、現在、世界の食用肉生産の17%が海洋生態系からもたらされており、過去から現在に至るまで、海洋生態系が人類の生存に大きな役割を果たしてきた<sup>2)</sup>。

しかし、近年、海洋生態系はプラスチックごみによる深刻な問題に直面している。海洋に存在するプラスチックごみは、その大きさによって、メガプラスチック (Megaplastics)、マクロプラスチック (Macroplastics)、メソプラスチック (Mesoplastics)、そしてマイクロプラスチック (Microplastics) の4種類に分類される<sup>3)</sup>。特にマイクロプラスチックは、生態系を構成する様々な生物に摂取される可能性が高いため、海洋生態系に深刻な悪影響を及ぼす。マイクロプラスチックの主な発生源のひとつは沿岸域の家庭ごみである。沿岸地域は商業化が進んでいることが多く、住宅や経済活動から出るプラスチックごみが海岸に流れ着く可能性が高い。特に、プラスチックゴミは水処理システムがあるにもかかわらず浄化されないことが多く<sup>4)</sup>、実際に海洋に存在するプラスチックの75%以上が陸地から流入されると言われている<sup>5)</sup>。したがって、海洋生態系を保護するために、沿岸域における体系的かつ持続可能な浄化方法を確立する必要がある。この問題に対し、本研究では、特に海岸に打ち上げられたマイクロプラスチックを効率的に回収するための新しいロボットシステムを開発する。

#### 2. 先行研究

海岸清掃でのロボットシステムの利用は、海洋生態系におけるマイクロプラスチックの蓄積に対処する効果的な方法であり、活発に研究されている。しかし、既存の研究の多くは、大型プラスチックごみの回収に焦点を当てており<sup>6)7)8)</sup>、マイクロプラスチックに対しては有効ではない。この問題を解決するために、先行研究では砂を直接に吸引し、マイクロプラスチックを砂から回収するロボットシステムを提案した<sup>9)</sup>。しかし、このシステムは電力管理やプラスチックと砂の分

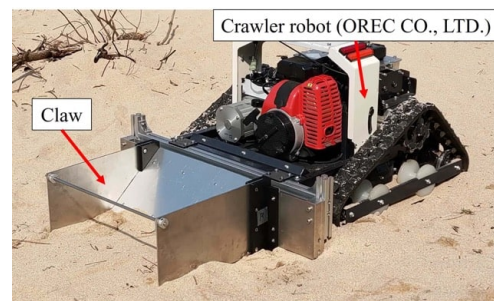


Fig. 1 Garbage collecting robot with its nail.

離性能の点で問題があった。

そこで、我々はベルトコンベアを利用した新たなシステムを提案した<sup>10)</sup>。具体的に、ロボットの前面にスロープ状の構造物 (以下、ツメ) を設け、ロボットの前進に伴って自然に砂をすくい上げ、ツメの上部のコンベアベルトでさらに強制的に後部へ送る。次に、すくい上げられた砂はメッシュ状のベルトコンベヤーに移され、砂はメッシュを通して落下し、プラスチックごみだけが回収される。さらに、先行研究では、様々な条件下で砂の安息角を計測し、それに基づいてツメの角度を設計した (Fig. 1)。その結果、従来の吸引式ロボットより大幅に性能が向上したが、以下のような問題が確認された。

まず、システム全体を移動させるクローラロボット (Towing Robot, 牽引ロボット) について、ロボット自体のトルクが不足していた。そのため、稼働時間が長くなるにつれてツメに堆積する砂の量が増え、ロボットの動作が止まってしまう問題が発生した。また、クローラロボットと回収ロボット (Collecting Robot) をチェーンで連結していたため、ロボットが後進できない問題があった。最後に、動力源に単気筒エンジンを使用していたため振動が激しく、長時間稼働させるとロボットの電子機器に深刻な損傷を与える可能性があった。

また、ペットボトルなど大きなゴミや、湿った砂がベルトコンベアに流入されると、ベルトコンベア上のゴミの流れが止まり、システムが停止する問題が発生した。具体的には、水分を含んだ砂がベルトコンベア

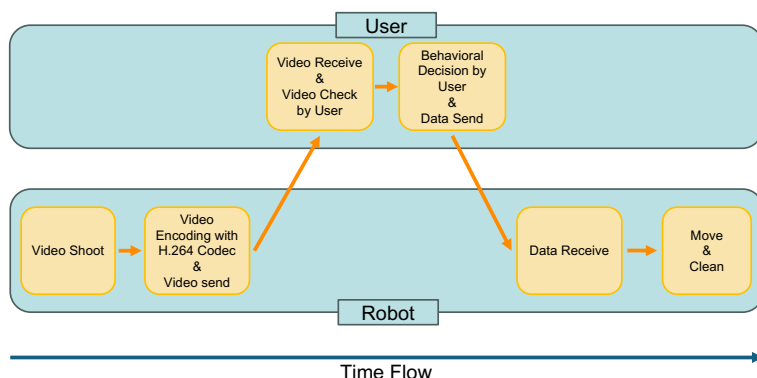


Fig. 2 An overview of the system used in this study.

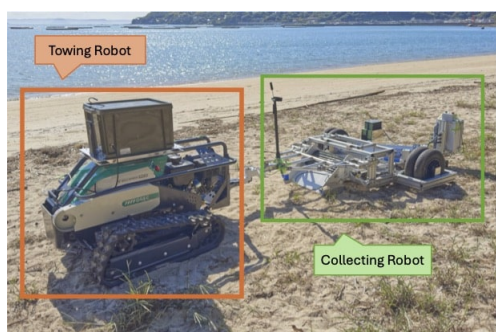


Fig. 3 An overview of the system used in this study.

に入り込むと、メッシュで目詰まりが起こり、砂がメッシュを通過できなくなった。これらの問題により、砂はゴミと一緒に回収され、システムの持続運転性能が低下する原因になった。

最後に、先行研究のシステムにはクローラロボットにカメラが搭載されていないため、ユーザーはロボットを近い距離から確認し、操作する必要があった。また、先行研究で使用されたロボットはラジコンベースの操縦方式を採用していたため、遠隔地からの制御は不可能であった。

### 3. システム構成

本研究で開発したシステムの概要を Fig. 2. に示す。本研究では手動制御を基本とする商用携帯電話回線を利用した長距離遠隔操縦システムを採用した。具体的に、ロボット側から送信された映像データをもとに、ユーザはロボットに操作指令を送り、ロボットはそれに応じて清掃作業を実行する。清掃作業では、Fig. 3 に示すように、クローラロボットが回収ロボットを牽引する。この際、回収ロボットは流入する砂からプラスチックゴミを分離し、ゴミ箱に回収する。さらに、先行研究で確認された問題点を解決するために、以下のような方法でシステムの改良を行なった。

まず、牽引トルクが不足し、持続運転性能が低下する問題を解決するために、クローラロボットを OREC 社のラジコン草刈り機 (Bull mower) を ROS2 対応に改造したロボットに変更した。このロボットは高性能モーターと 48V バッテリーシステムを搭載している。さらに、14ps の単気筒ガソリンエンジンを搭載し、バッテリーシステムへ継続的に電力を供給できるように設計されている。また、クローラロボットに搭載さ

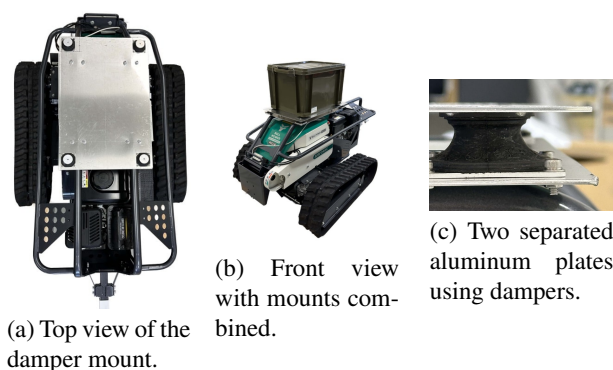


Fig. 4 Designed mount with four dampers.

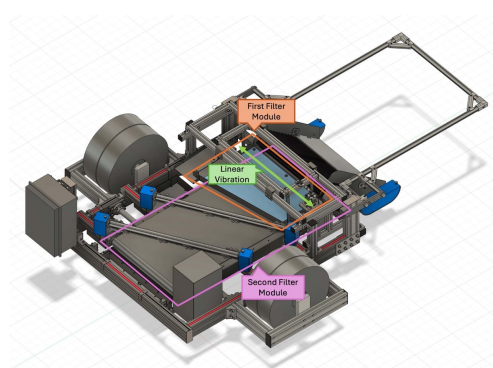


Fig. 5 Redesigned garbage collecting robot.

れた電子機器をガソリンエンジンによる振動から保護するために、ダンパーを活用したマウントシステムを導入した (Fig. 4)。具体的には、Fig. 4(c) に示すように、ダンパーを用い、機体に搭載される電子機器をエンジンが搭載されているメインフレームから分離する機構を採用した。

次に、大型ゴミや水分を含んだ砂の流入による誤動作の問題を解決するために、回収ロボットを Fig. 5 のように再設計した。特に、Fig. 5 の赤枠で示した First Filter Module (FFM) は、本研究で新たに開発した装置である。この装置は、回転するカム機構に結合され、連続的な直線振動運動を行う (Fig. 6(a))。さらに、Fig. 6(b) に示すように、FFM は直径 12mm の円で囲まれる比較的に広い六角形のメッシュ構造で設計した。そのため、マイクロプラスチックを含む砂だけが下のベルトコ

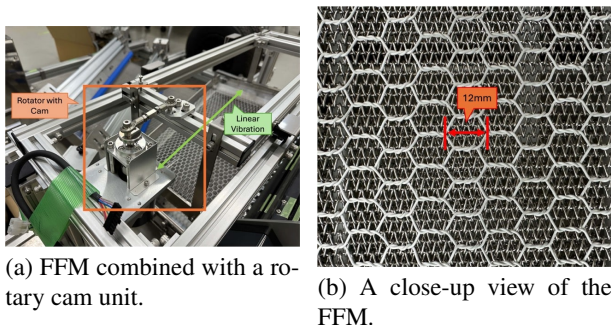


Fig. 6 Structure of the newly designed FFM.

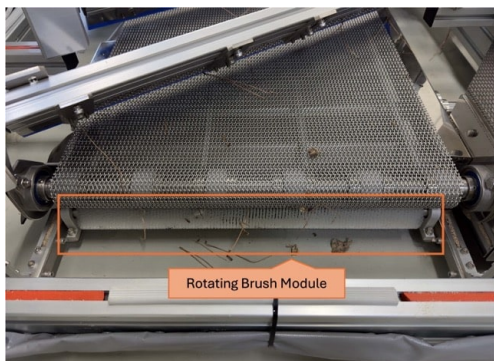


Fig. 7 Brush module attached to the end of the conveyor belt.

ンペアー (Second Filter Module, SFM) に移動し、大きなゴミは回収ボックスに収集され、湿気を含んだ砂も FFM で細かく分解される。さらに、SFM の先端には、Fig. 7 のような回転可能なブラシモジュールを取り付け、メッシュの間に挟まった砂を除去できるようにした。最後に、砂から分離したプラスチックゴミを回収するゴミ箱を、Fig. 8(a) のようにメッシュ構造のアルミフレームで再設計した。

さらに、クローラロボットと回収ロボットの結合部を金属製の強固なフレームに変更した (Fig. 9)。図に示すように、結合部は ball-and-socket joint 構造を採用し、平面内での自由な回転運動を実現した。また、回収ロボットに取り付けた連結構造は、上下方向に自由に動くように設計されている。結果的に、2 台のロボットの連結部は、確実に連結された状態で全方位に自由に動くことができる。



(a) Redesigned garbage collection box with an aluminum mesh structure. (b) The garbage collection box used in previous studies.

Fig. 8 Comparison of the garbage collection box.



Fig. 9 The coupling structure of two robots.

クローラロボットの制御方式の概要を Fig. 10 に示す。本研究では、ロボットの制御に ROS2 (Robot Operating System 2) を用いた。ROS2 はプログラムのノード間の通信方式として DDS (Data Distribution Service) を採用している。しかし、ROS2 における DDS 通信は、同一ネットワーク内のノード間の通信に限定されるため、別々のネットワーク上のノード間で通信を行うためには、特別な方法が必要となる。VPN (Virtual Private Network) は、物理的に分離されたネットワーク間の通信経路を生成する一般的な方法である。しかし、本研究では、ロボットと操縦側間の通信に商用携帯電話用の 4G/5G ネットワークを使用したため、限られた通信帯域幅で最大の制御性能を導くことが不可欠となっていた。そこで、本研究では VPN の代わりに通信用のミドルウェアの一つである Zenoh<sup>11)</sup> を用いてノード間の通信を実現した。Zenoh を利用することで、一般的に以下のようなメリットが得られる。

- 1) VPN 利用時に発生する通信帯域劣化の問題を低減する。
- 2) 通信モードの設定や QoS (Quality of Service) 設定が容易なため、システムを柔軟に構成できる。
- 3) ROS2 用の Zenoh ブリッジプラグインを使用することで、ROS2 のノード間の通信設定を簡単に行うことができる。例えば、ノード間に送受信するデータトピックを設定し、特定のトピックのデータだけを送受信することができる。

最後に、360 度カメラ (Theta V, Ricoh) を機体に導入し、ロボットの周囲を撮影し、操縦側に転送するようにした。

#### 4. 実験

本研究で提案するシステムの性能を評価するために、九州大学近くの寺山海岸で実験を行なった。実験では、以下のようないくつかの段階を経て、クローラロボットと回収ロボットの性能を評価した。

##### 4.1 回収ロボットの動作評価方法

回収ロボットについては、主に新設計の FFM の性能評価に重点を置いた実験を行った。特に、FFM を導入することでプラスチックゴミの分別性能がどの程度向上したかを評価することを目標とした。

##### 4.2 クローラロボットの動作評価方法

クローラロボットについては、主に遠隔操作に必要な機能の性能を評価した。具体的に、ROS2 と商用携帯

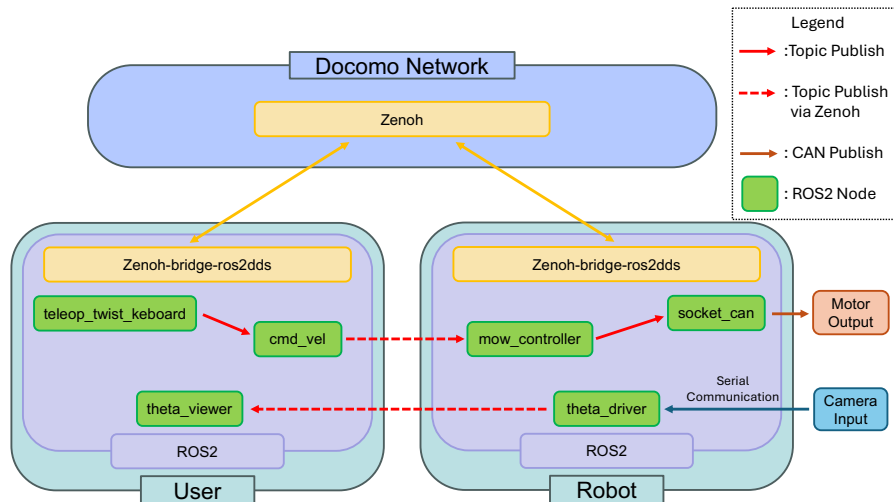


Fig. 10 An overview of the control scheme of the towing robot.

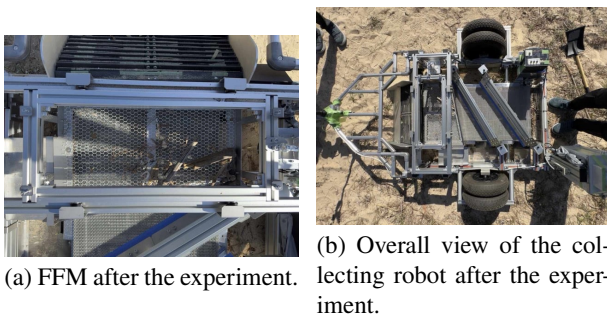


Fig. 11 The collecting robot after the experiment.

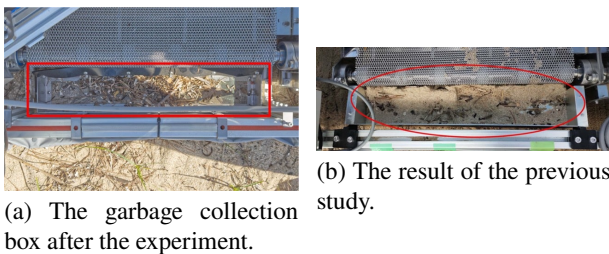


Fig. 12 Comparison of the garbage collection result between the current study and the previous study.

電話の 4G/5G ネットワークを使用し、分離されたネットワーク環境でロボットを操縦できるかどうかを検証した。また、ロボットからの映像データを受信しながら、同時にロボットを制御できることを確認するために実験を行なった。

最後に、再設計したクローラロボットの総合的なハードウェア性能を評価した。特に、新たに設計された結合部の性能を評価するために、凹凸のある路面での牽引能力や逆走能力を評価した。

## 5. 結果

### 5.1 回収ロボットの動作評価結果

Fig. 11 に動作後の回収ロボットを示す。実験の結果、FFM の導入によりゴミ収集性能が大幅に向上したことが確認できた。具体的に、長さ 10cm を超える枝や大きなゴミが混入しても、FFM の動作により分別動作が行

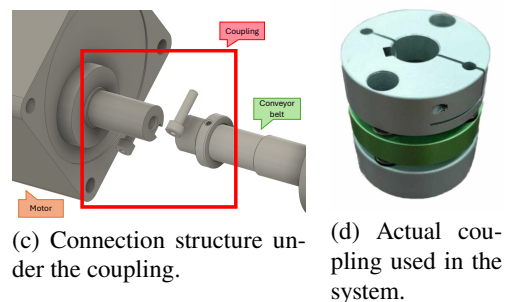
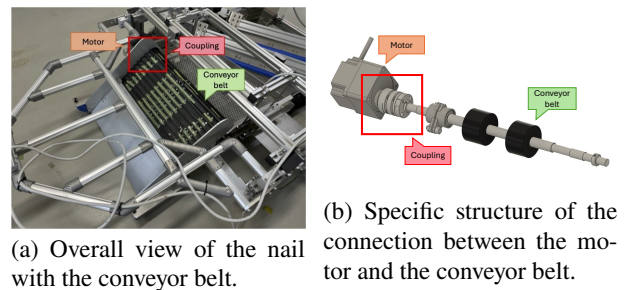


Fig. 13 The coupling structure of the nail.

われ、システムの動作が維持された。また、水分を含んだ砂によってベルトコンベアのメッシュが詰まってしまう問題については、SFM と組み合わせたブラシの動作によって大幅に改善されたことが確認できた。次に、回収ロボットの動作後のゴミ箱の様子を Fig. 12(a) に示す。図でわかるように、砂からゴミだけを分離し、回収したことが確認できた。これらの結果から、FFM の導入や SFM の構造改善により、回収ロボットの連続運転性能が大幅に向上したと考えられる。

一方、ツメの上部のコンベアベルトに不具合が確認された。Fig. 13(a) にモーター、コンベアベルト、両者をつなぐカップリング、Fig. 13(b) に具体的な連結部の構造を示す。図でわかるように、本実験では摩擦を利用して軸間の動力を伝達 clamp-type カップリングを用いた (Fig. 13(c))。実験の結果、使用したカップリングの摩擦力が不十分であり、モーターとベルトコンベアの間で滑りが発生していることが確認された。その結



Fig. 14 System in a stopped state due to the deposited sand.



Fig. 15 Control interface of the PC used in the experiment.

果, Fig. 14 に示すように, ツメに砂が堆積し, システムが前進できなくなる問題が発生した.

## 5.2 クローラロボットの動作評価結果

実験では, ドコモの 4G/5G ネットワーク環境で, Fig. 10 に示した構成のシステムが正常に動作することを確認した. Fig. 15 は実験で使用した制御用 PC のインターフェースを撮影したものである. 実験の結果, クローラロボットからリアルタイム映像データを受信し, 同時に制御指令を送信することができた. さらに, 送信された制御指令は, クローラロボットの ROS で起動したノードによって CAN 信号に変換され, モーターに送信された. 実験の結果, 上述した通信より, ロボットを適切に制御できることを確認した. また, 伝送遅延については, 制御指令では 50ms - 100ms の遅延が測定され, 映像データの伝送では約 300ms の遅延が測定された.

一方で, 高温環境下でシステムを運用する際に発生する問題を確認した. まず, ロボットの前方に搭載されたカメラ (Theta V) が過熱による問題で強制的にシャットダウンされた. さらに, ドコモのネットワークルーターの場合も, 同様な原因で通信速度が強制的に制限されることを確認した.

## 6. 結論

本研究では, 4G/5G ネットワーク環境におけるクローラロボット・収集ロボットの性能を評価した. システムはリアルタイムで映像データや制御指令の送受信することに成功したが, 映像信号と制御信号の両方で遅延が観察された. また, システムは通常的环境では全体的に設計通りの動作を示したが, 高温環境では動作上の問題が確認された. 具体的に, 機体前方のカメラでは過熱による強制シャットダウンが発生し,

ネットワークルーターでは通信速度の制限が発生した. また, 回収ロボットについては, 新たに導入した FFM とブラシ構造により, 砂からゴミを分離する性能に対して, 大幅な向上が確認された. しかし, モーターとベルトコンベアのシャフトをつなぐカップリングの摩擦が不十分であり, 砂の流れが止まってしまう問題が確認された.

これらの結果は, 理想的な環境におけるシステムの有効性を示唆する一方で, 様々な条件下での信頼性を確保するためにさらなる改良の必要性を示唆すると考えられる. したがって, 今後の研究では, システムの信頼性を向上させることに焦点を当てていきたい. 特に, 回収ロボットについては, 砂のスムーズな流れを確保するため, 新たなカップリング構造を導入する予定である. また, クローラロボットについては, 高温環境を含む様々な環境下での確実な運転を可能にするため, システムの耐久性を向上させて行く.

## 謝辞

本研究の一部は, JSPS 科研費 JP20H00230 の助成を受けたものである.

## 参考文献

- [1] S. C. Cunnane, L. S. Harbige, and M. A. Crawford. The Importance of Energy and Nutrient Supply in Human Brain Evolution. en. *Nutrition and Health* 9.3. Publisher: SAGE Publications Ltd, pp. 219–235, (1993). doi: 10.1177/026010609300900307. (accessed on 2024-09-02).
- [2] C. Costello et al. The future of food from the sea. en. *Nature* 588.7836. Publisher: Nature Publishing Group, pp. 95–100, (2020). doi: 10.1038/s41586-020-2616-y. (accessed on 2024-09-02).
- [3] G. G. N. Thushari and J. D. M. Senevirathna. Plastic pollution in the marine environment. *Heliyon* 6.8, e04709, (2020). doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e04709. (accessed on 2024-09-02).
- [4] M. A. Browne, T. Galloway, and R. Thompson. Microplastic—an emerging contaminant of potential concern? eng. *Integrated Environmental Assessment and Management* 3.4, pp. 559–561, (2007). doi: 10.1002/ieam.5630030412.
- [5] A. L. Andrady. Microplastics in the marine environment. *Marine Pollution Bulletin* 62.8, pp. 1596–1605, (2011). doi: 10.1016/j.marpolbul.2011.05.030. (accessed on 2024-09-02).
- [6] J. S. Priya et al. Beach Cleaning Bot Based On Region Monitoring. *2019 International Conference on Computation of Power, Energy, Information and Communication (ICCPEIC)*. ISSN: 2576-9065. (2019), pp. 1–4. doi: 10.1109/ICCPEIC45300.2019.9082368. (accessed on 2024-09-03).
- [7] M. Kulshreshtha et al. OATCR: Outdoor Autonomous Trash-Collecting Robot Design Using YOLOv4-Tiny. en. *Electronics* 10.18. Number: 18 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute, p. 2292, (2021). doi: 10.3390/electronics10182292. (accessed on 2024-09-03).
- [8] T. Ichimura and S. Nakajima. Performance Evaluation of a Beach Cleaning Robot “Hirottaro 3” in an Actual Working Environment. *2018 18th International Con-*

- ference on Control, Automation and Systems (ICCAS)*. (2018), pp. 825–828. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8571634> (accessed on 2024-09-03).
- [9] 宇野光輝, 倉爪亮. 海洋破碎プラスチックごみ回収ロボットの開発. 計測自動制御学会 SI 部門講演会 SICE-SI 予稿集, pp. 1054–1057, (2021).
- [10] M. Uno and R. Kurazume. Development of Garbage Collecting Robot for Marine Microplastics. *2024 IEEE/SICE International Symposium on System Integration, SII 2024*. (2024).
- [11] Zenoh, Zero Overhead Network Protocol. Accessed on 09.26.2024. URL: <https://zenoh.io>.