

# 卒業論文

## 軽量 ROS ランタイム mROS 2 の評価に向けた口 ボット制御アプリケーションの実装

公立はこだて未来大学  
システム情報科学部 複雑系知能学科  
知能システムコース 1020259

中村 碧

指導教員 松原 克弥

提出日 2024 年 1 月 25 日

## BA Thesis

## Implementing Robot Applications Toward Evaluating 'mROS 2' a Lightweight ROS Runtime

by

Aoi Nakamura

Intelligent Systems Course, Department of Complex and Intelligent Systems  
School of Systems Information Science, Future University Hakodate

Supervisor: Katsuya Matsubara

Submitted on January 25th, 2024

## **Abstract—**

In the realm of robot software development, the utilization of ROS has been on the rise. While the construction of robot software harnessing ROS often emphasizes cloud-based distributed robot systems, there are challenges in the flexibility of node placement. Specifically, the dynamic repositioning of nodes becomes complex due to differences in CPU architectures between the cloud and robots. Previous studies have pointed out the increase in overhead with dynamic placement mechanisms. Although approaches using mROS 2-POSIX have been proposed, their performance evaluations are mostly confined to microbenchmarks of network throughput, and the efficacy in real applications remains under-assessed. This study aims to compare the performance of mROS 2-POSIX with ROS 2. Based on experimental results, I demonstrate that mROS 2-POSIX can deliver the anticipated performance even in sophisticated applications.

**Keywords:** cloud robotics, Robot Operating System, WebAssembly

**概要：** ロボットソフトウェア開発において、ROS の利用が増加している。ROS を活用したロボットソフトウェアの構築ではクラウドを用いた分散ロボットシステムが注目されているが、ノード配置の柔軟性が課題となっている。特に、クラウドとロボットの CPU アーキテクチャの違いから、動的なノード再配置が難しい。先行研究での動的配置機構はオーバーヘッドの増加が問題とされ、mROS 2-POSIX を用いたアプローチも提案されているが、性能評価はネットワークスループットのマイクロベンチマークに留まり、実アプリケーションにおける有用性が十分に評価されていない。本研究では、mROS 2-POSIX と ROS 2 の性能を比較評価する。実験結果によって得た通信性能やメモリサイズをもとに、mROS 2-POSIX が複雑なアプリケーション上でも期待される性能を発揮できることを示す。

**キーワード：** クラウドロボティクス, Robot Operating System, WebAssembly

# 目次

第 1 章	はじめに	1
第 2 章	関連技術	3
2.1	ROS 2 . . . . .	3
2.2	mROS 2 . . . . .	6
第 3 章	先行研究	10
第 4 章	アプローチ	14
第 5 章	実装	15
5.1	実装アプリケーションの構成 . . . . .	16
5.2	実装アプリケーションの問題と解決策 . . . . .	17
第 6 章	実験	19
6.1	概要 . . . . .	19
第 7 章	考察	20
第 8 章	関連研究	21
8.1	ロボットソフトウェア軽量実行環境 mROS 2 の POSIX 対応に向けた実装 および評価 . . . . .	21
8.2	クラウド連携を対象としたアーキテクチャ中立な ROS ランタイムの検討 . .	21
8.3	mROS 2: 組み込みデバイス向けの ROS 2 ノード軽量実行環境 . . . . .	22
第 9 章	おわりに	23
	参考文献	25

## 第 1 章

# はじめに

さまざまな産業向けやエンターテインメント関連のロボットシステム、自動車の自動運転技術や IoT システムのソフトウェア開発をサポートするフレームワークとして Robot Operating System（以下、ROS）の普及が進んでいる [1]. ROS のプログラミングモデルは、システムの各機能を独立したプログラムモジュール（ノード）として設計することにより、汎用性と再利用性を向上させて、各機能モジュール間のデータ交換を規定することで、効率的かつ柔軟なシステム構築を可能にしている. たとえば、カメラを操作して周囲の環境を撮影するノード、画像からオブジェクトを識別するノード、オブジェクトのデータをもとに動作制御を実行するノードを連携させることで、自動運転車の基本機能の一部を容易に実装できる.

ROS のプログラミングモデルは、ロボット/IoT とクラウドが協力する分散型システムにおいても有効である. ロボットシステムのソフトウェア処理は、外界の情報を取得する「センサー」、取得した情報を処理する「知能・制御系」、実際に動作するモーターなどの「動力系」の 3 要素に分類できる [2]. クラウドロボティクス [3] において、主に知能・制御系のノードを高い計算能力を持つクラウドに優先して配置することで、高度な知能・制御処理の実現を促進できる. さらに、ロボットが取得した情報や状態などをクラウドに集約・保存することで、複数のロボット間での情報共有と利用を容易にする. 一方で、現行の ROS 実装では、各ノードの配置をシステム起動時に静的に設定する必要があり、クラウドとロボット間の最適なノード配置を事前に設計する必要がある. しかし、実際の環境で動作するロボットは、ネットワークの状況やバッテリー残量の変動など、システム運用前に予測することが困難な状況変化に対応する必要があり、設定したクラウドとロボット間のノード配置が最適でなくなる可能性がある. このような状況変化への対応として、ノードを動的に再配置するライブマイグレーション技術があるが、多くの場合でクラウドとロボット間の CPU アーキテクチャが異なり、命令セットがそれぞれ違うため、実行中のノードをシステム運用中にマイグレーションすることは技術的に困難である.

菅ら [4] は、WebAssembly（以下、Wasm）を用いることで、クラウドとロボット間での

実行状態を含む稼働中ノードの動的なマイグレーションする手法を実現した。Wasm とは Web 上で高速にプログラムを実行するために設計された仮想命令セットアーキテクチャのことで、1つのバイナリが複数のアーキテクチャで動作するため、異種デバイス間でのマイグレーションに適しているといえる。課題として、ROS 2 を Wasm 化したことでライブマイグレーション後のファイルサイズのオーバーヘッドが増大し、ノードの実行時間が大幅に増えてしまう問題が残った。柿本ら [5] は、組込みデバイス向けの軽量な ROS 2 ランタイム実装である mROS 2-POSIX を採用し、ROS ランタイムの Wasm 化にともなうオーバーヘッド増加に対処した。しかし、採用された mROS 2-POSIX 上で指定されたメッセージを往復させるシンプルなアプリケーション上でしか評価実験はされていない [6]。また、柿本らによって実現した mROS 2-POSIX を Wasm 化した mROS 2-Wasm も実際のアプリケーションでは評価されていない [5]。そのため、ライブマイグレーション後のオーバーヘッド増加を解決するロボットソフトウェア基盤として、アプリケーションが複雑化した場合の動作が明らかでない。

本研究では、クラウドとロボット間での実行状態を含む稼働中ノードの動的マイグレーションの実現に向けた mROS 2-POSIX と mROS 2-Wasm の性能評価を行い、mROS 2-POSIX と mROS 2-Wasm と ROS 2 を比べて動的配置機構実現後のロボットソフトウェア基盤としてどのような優位性があるのか明らかにすることを目指す。

## 第 2 章

# 関連技術

### 2.1 ROS 2

ロボットシステムを開発するにあたって現在は ROS 2 が主流であるが、その前身である ROS は、スタンフォード人工知能研究所の研究プロジェクトとから移管された Willow Garage 社によって開発が始まったロボットソフトウェア開発基盤である。最初の正式なディストリビューション版は、2010 年 3 月にリリースされた Box Turtle で、その後、Fuerte, Groovy, Hydro, Indigo, Jade, Kinetic, Lunar, Melodic, Noetic, Foxy, Galactic, Humble といったバージョンがリリースされている。ROS の利点は、分散型ロボットシステムの実現に向いている通信ミドルウェアの実装や RTPS (Real Time Publish Subscribe) 通信プロトコル、プロジェクト管理やデバックおよびシミュレーションなどのための広範囲なツール群、豊富な OSS (Open Source Software) のパッケージやライブラリ、世界規模の活発なオープンソース開発コミュニティという 4 つの側面にある [8]。

パッケージやライブラリに関しては公式のものだけでも多種多様であり、ロボット本体の制御、モーターの制御、センサーの制御、画像処理、音声認識、自律走行、SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) など、ロボットシステムに必要な機能を網羅している。短期間で機能の大枠を組み立てることができるため、研究開発、教育、産業用途においても、幅広い分野で利用されている。

ROS すでに 10 年以上の歴史を持っており、ロボット工学の発展に大きく貢献してきた。日本の企業ではソニーの aibo の事例が ROS を使った製品として代表的であり、他の企業でも商用商品に採用されることも多い。ロボット開発を取り巻く環境や ROS が研究用から商用にも活用され始めるという変遷を受け、2014 年より第 2 世代バージョンである ROS 2 の開発が始まった。これは ROS 1 は研究用途においては十分な性能を持っていたが、商用製品においてはリアルタイム性やセキュリティの問題があった。ROS 1 の設計は以下のようにされている。

- 単一のロボットで動作することを想定

- 多くのリソースを抱えているマシン上で動作されることを想定
- リアルタイム性は考慮しない
- 優れたネットワーク上で動作されることを想定（有線接続など）
- 研究，主に学術的なアプリケーションを想定
- 規制や禁止事項がなく，最大限の柔軟性がある（プログラムが `main()` から始まることを決定していないなど）

そのため，産業用に利用されることが増えるとその設計が問題になることが多かった。

ROS 1 が抱える課題として以下のようなものがある。

1. メッセージ通信の仲介役として ROS Master が必要である。ROS Master が何らかの原因でダウンすると，全てのプロセスがダウンしてしまうという問題がある。
2. リアルタイム性を考慮していない設計になっている。
3. メッセージを暗号化せずに送受信を行っているため，セキュリティに問題がある。
4. 実行するマシンにリソースが少ないと動作が不安定になるという問題がある。
5. Ubuntu (Linux) でないと使いにくい

ROS 2 では，ROS 1 の上記の問題を解決するため，リアルタイムおよび組込みシステム向けの DDS (Data Distribution Service) [7] と呼ばれる通信ミドルウェアを採用し，通信の信頼性を確保するための QoS (Quality of Service) 制御の機能を導入した。

この DDS の採用により，(1) の問題点がなくなり，QoS と DDS の組み合わせにより，(2) に対してリアルタイム性の実現を目指した。(3) のセキュリティの問題は ROS 2 でメッセージの暗号化が施されたことにより解決した。また，(4) に対応するためにリソースの少ないマシンで動作できるように開発されている。さらに Ubuntu 以外の OS にも対応した。

ROS 2 の構成を図 1 に示す。ROS 2 では図のようにユーザーが実装するアプリケーション層があり，その下にクライアントライブラリである `rcl` の層がある。`rcl` クライアントライブラリ層には通信概念を公開する API の定義がされており，DDS の上に構築された。`rcl` は，C++，Python といった各プログラミング言語用のクライアントライブラリに共通する機能を提供している API である。その下部に DDS と `rmw` (ROS Middleware Interface) がある。DDS はリアルタイム通信を行うための API とプロトコルを提供している国際ミドルウェア標準 [1]。 `rmw` は様々な種類の DDS 実装，各 backend の差を吸収，最適化を施している層であり，`rcl` クライアントライブラリに対して共通のインタフェースを提供している。RTPS は DDS から呼び出される `tranceport` 層に位置する通信プロトコルである。backend として，RTOS や POSIX，NoC などの ROS 2 は様々な環境で動作するための表す層がある。

このように，従来の ROS 1 では難しかったロボットシステムでも ROS 2 を使うことで，個々のロボットが独立して動作するだけでなく，複数のロボットが協調して動作する分散型

ロボットシステムの開発が可能になった。

2015 年 8 月には最初のディストリビューションであるアルファ版がリリースされ、2017 年の 12 月に ROS 2 が本リリースされた。2023 年の Metrics Report [ ] によると、ROS は 550,365,601 回ダウンロードされている。そのうち 30% が ROS のディストリビューションである Noetic で、32% が ROS 2 のディストリビューションである humble である。2023 年で ROS は Noetic、ROS 2 は humble が主流のディストリビューションであった。本研究は ubuntu 22.04 でリリースされた ROS 2 の humble ディストリビューションを使用している。

### 2.1.1 Publisher と Subscriber

ROS では基本的なノード間のデータ通信として Publish/Subscribe (Pub/Sub) 通信型の非同期な通信プロトコルを採用している。データの送信側を Publisher (出版者) とよび、受信側を Subscriber (購読者) と呼ぶ。通信経路として、トピック (Topic) を介した通信が行われる。トピックで送受信されるデータはメッセージ (Message) と呼ばれ、車輪の角速度や回転量、現在位置の 3 次元座標など、基本型を組合せた任意の型を定義することができる。同じ名前のトピックに対して、様々な個数や種類のノードが任意のタイミングで登録、変更、削除ができる。さらに、メッセージの型が一致していれば、通信が行われる。Publisher 側は自由なタイミングで Topic に向けて通信を行い、非同期に動作する Subscriber 側は、Publisher からメッセージを受け取った際に対応するコールバック関数が実行される。ノードは Publisher や Subscriber、またその両方をプログラム次第で変化できるため、ユーザが考えたオリジナルのノードを作成することができる。この仕様のため、ノード同士の依存が少なくなり、ロボットシステム全体の機能の追加や削除が容易である特性は、柔軟なロボットシステムの構築の一助となる。ROS 2 で Publisher を作成する際、C++ で `rclcpp::Node` クラスの継承から `create_publisher()`、Python で `import rclpy` 後に `.create_publisher()` を行うことで Publisher を作成することができる。同様に Subscriber は C++ で `rclcpp::Subscription` クラスを使用して `create_subscriber()`、Python で `import rclpy` 後に `create_subscriber` を記述することで Subscriber を作成できる。

### 2.1.2 Service と Action

ROS 2 では、Publisher とサブスクライバー以外にも Service 通信と Action 通信がある。Service 通信は、サーバーとクライアントの 2 つのノード間でリクエストとレスポンスをやり取りする通信である。これは既存のクライアント・サーバーモデル [15] によく似ており、Subscribe するのではなく、ノードがメッセージの値を欲しいタイミングでリクエストする仕組みになっている。そのため、ロボットに対する命令やデータの取得、計算結果を受け渡すに適しており、Service 通信はリアルタイム性や連続的なデータには向かないが、確実に



応答するというロボットシステムにおいて重要な役割を果たす。さらに、Service 通信は同期的な通信であるため、Service 通信を行うノードは、Service 通信が完了するまで他の処理を行うことができない。そのため、クライアントの処理を間接的にブロックすることができる。一方、Action 通信は、Service 通信と同様にサーバーとクライアントの2つのノード間でリクエストとレスポンスをやり取りする通信である。しかし、Action 通信は Service 通信と異なり、リクエストに対するレスポンスを即座に返すのではなく、リクエストに対するレスポンスを返すまでの間に、進捗状況を返すことができる。この通信方式によって、長時間のタスクやフィードバックが可能なタスク、中断可能なタスクに適しているため、開発者は柔軟性を保ちながら、ロボットシステムを構築することができる。さらに、Action 通信は非同期的な通信であるため、Action 通信を行うノードは、Action 通信が完了するまで他の処理を行うことができる。これによって、複雑なタスクを行うノードでも Action 通信を用いることで同時に処理することが可能であり、多くのリソースがあるマシンで高度なノードを動作させることができる。

## 2.2 mROS 2

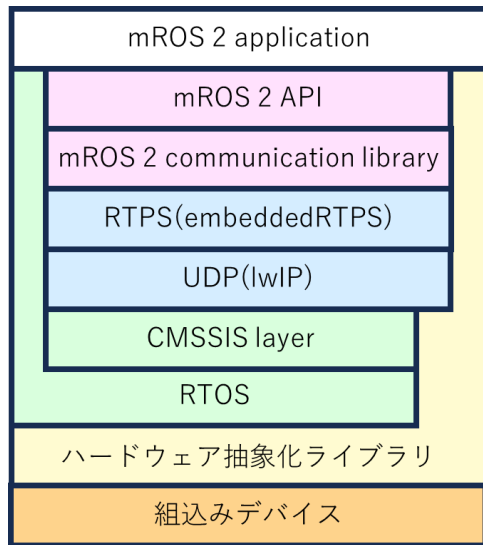


図 2.1: mROS 2 の内部構成

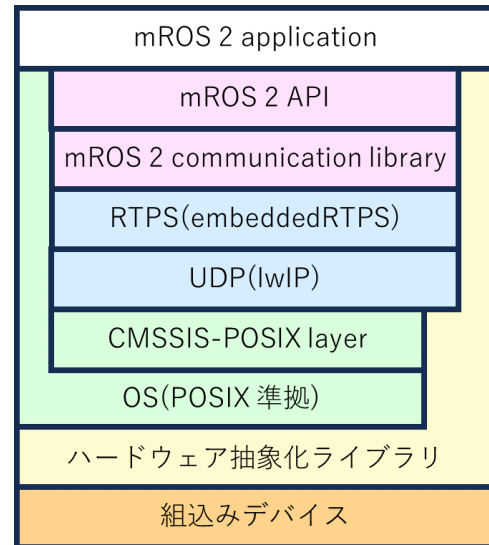


図 2.2: mROS 2-POSIX の内部構成

mROS 2 は、ROS 2 ノードの軽量実行環境である。ROS 2 を採用するロボットシステムにおいて通信方式とメモリ軽量な実行環境を確立することができる組み込み技術を導入することにより、分散型のロボットシステムにおける応答性やリアルタイム性の向上、消費電力の削減が可能になる。mROS 2 は汎用 OS 上で実行される ROS 2 ノードと通信できることを目的として実装された。そのため、Pub/Sub 通信の相手と経路を自律的に探

索できるように設計され、ROS 2 および RTPS の利点が、組み込み技術導入時に損なわれないようになっている。ROS 2 に対応している DDS の種類として、FastRTPS, RTI Connnext DDS, eProsima Micro XRCE-DDS を挙げたが、既存の組み込みデバイス向けの ROS 2 ノード実行環境である micro-ROS[16] がある。micro-ROS は RTPS の軽量規格である DDS-XRCE (DDS For Extremely Resource Constrained Enviroments) の実装である Micro XRCE-DDS を採用している。Micro XRCE-DDS は、ホストとして ROS 2 ノードを実行するデバイスと通信する際に、Agent ノードと呼ばれるノードの稼働が必要となる。通信の仲介の役割を Agent ノードは担っており、Agent ノードは、ホストデバイス上の ROS 2 ノードと RTPS に則った通信、組み込みデバイス上のノードと XRCE に則った通信をそれぞれ行うため、応答性とリアルタイム性の低下が懸念される。また、複数の組み込みデバイスを用いる場合、Agent ノードは分散型システム全体の通信を仲介するため、Agent ノードの数が増えると通信の遅延が増加する。そのため mROS 2 は、DDS として XRCE-DDS を採用せず、embeddeRTPS[17] を採用している。embeddeRTPS は、一つの Domain クラスから Participant, Writer, Reader の 3 つのインスタンスが生成される。つまり、初期化処理の段階で embeddedRTPS の提供する Pub/Sub 通信が利用できるようになる。これによって XRCE-DDS のように Agent ノードが必要なく、組み込みデバイス上での通信の遅延を抑えることができる。この embeddeRTPS が採用されたのは通信の遅延を抑えることができるだけではない。この RTPS は、SPDP と SEDP が実装されており、通信の宛先や受け手として自立性を確保できる RTPS であること点である。また、ROS 2 で代表的な FastRTPS と通信の確認ができていたため親和性が高い点も上げられる。以上の設計思想により mROS 2 は、計算資源の限定的な組み込みデバイス上での稼働を想定した組み込みデバイスのリアルタイム性の向上および消費電力の削減ができるソフトウェア基盤である。

### 2.2.1 mros2 の内部構成

図 2.1 に mros2 の内部構成を示す。ユーザーアプリケーションからの階層順で、mROS 2 通信ライブラリ、通信プロトコルスタック、RTOS、ハードウェア抽象化ライブラリによって構成される。mROS 2 通信ライブラリは、ユーザアプリケーションに対して、ROS 2 通信のトピックに関する基本的な API を提供している。主な API として `void mros2::init()`, `void mros2::Node::create_node()`, `void mros2::Publisher::create_publisher()`, `void mros2::Subscriber::create_subscriber()` がある。通信プロトコルスタックには、C++ で実装された embeddeRTPS を採用している。先ほど述べたようにこの RTPS には SPDP と SEDP が実装されており、計算資源の限定的な組み込みデバイス上での稼働を想定した設計であるかつ、ROS 2 の代表的な RTPS である FastRTPS と通信の確認できているという理由がある。UDP については組み込み向けの C による軽量実装である lwIP[18] が採用されている。RTOS には、TOPPERS/ASP3 カーネル [19] が採用されており、高分解能タイマや

ティックレスの低消費電力な処理遅延機能など、高いリアルタイム性と安全性が求められる軽量の組込みシステムに適した設計がなされている。lwip は CMSIS-RTOS API に依存しているため、それぞれの API 差分を吸収するラップが用意されている。

### 2.2.2 mROS 2 の通信機能

mROS 2 の通信機能は、mROS 2 の通信ライブラリにある init task（初期化処理）と RTPS/UDP と通信ライブラリを介する write task (Publish 処理) と reader task (Subscribe 処理) の 3 つのタスクに分けられる。またアプリケーション層にある user task（ユーザーアプリケーション）という開発者が実装するタスクがある。user task は、ROS 2 のノードに相当している。Pub/Sub 通信を行うアプリケーションである。mROS 2 の API を介して Publish や Subscribe を行うことができる。init task は ROS 2 としてのノードの情報の初期化を行う。API mros 2::init() が呼ばれたときに、対象の組込みデバイスを RTPS の Participant として登録する。writer task と reader task に関しては、Publish および Subscribe に関する処理を担う。これらのタスクは user task からの依頼を mROS 2 API を介して受け、RTPS の該当機能を立ち上げる。writer task は Publish の依頼を受けて起動し、reader task は Subscribe の依頼を受けて起動する。

### 2.2.3 mROS 2-POSIX の内部構成

mROS 2 が POSIX[20] に対応したのが mROS 2-POSIX である。

図 2.2 は、mROS 2-POSIX のソフトウェア構成を示す。mROS 2-POSIX アプリケーション層は、ユーザが実装する ROS 2 ノードに相当する。つまり、ROS 2 におけるオーバーレイに相当する層である。mROS 2-POSIX API 層および通信ライブラリ層は、メッセージを非同期に Publish や Subscribe するためのコミュニケーションチャネルである ROS 2 の Topic に相当する API および通信機能を提供する階層である。本階層は、ROS 2 のネイティブなクライアント通信ライブラリである rclcpp と互換性を保つように設計されている。mROS 2 通信ライブラリでは、rclcpp のうち pub/sub 通信の基本的な機能のみ実装されている。利用可能な機能は制限されているものの、組込み技術を導入する ROS 2 開発者は、汎用 OS 向けのプログラミングスタイルを踏襲しながら C++ によって mROS 2 のアプリケーションを実装できる。そのため mROS 2-POSIX は Service 通信や Action 通信には対応していない。

RTPS プロトコルスタックには UDP でパブリッシャとサブスクライバ C++ 実装の embeddedRTPS が採用されている。UDP については組込み向けの C 実装である lwIP が採用されている。通信層の embeddedRTPS および lwIP は CMSIS-RTOS[21] に依存しており、図 1 (b) に示す mROS 2 の CMSIS-RTOS を互換した層になっている。最下層にはハードウェアを抽象化したライブラリがある。

mROS 2-POSIX は図 2 に示す実行方式を採用している。リアルタイム OS では、組込みマイコンを実行資源の管理対象として、タスク単位でアプリケーションが実行される。POSIX においてはタスクに相当する概念はプロセスであり、そこから生成されるスレッドを実行単位として処理が進行している。しかし、mROS 2-POSIX は実行単位であるノードに POSIX のスレッドを対応づけ、組込みマイコンでの通信処理におけるイベント割込みについては、POSIX 準拠 OS におけるブロッキング API の発行に相当させて処理している。これらの方式によって、mROS 2-POSIX は POSIX 準拠 OS 上で仮想 ROS 2 ノードとして軽量環境下で実行することができる。

## 第 3 章

# 先行研究

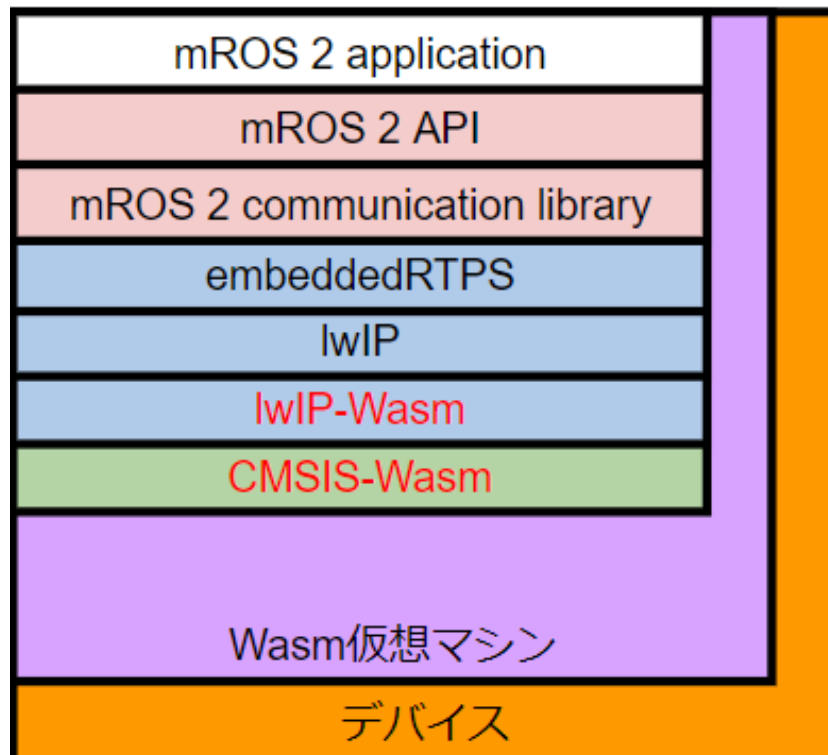


図 3.1: mROS2-wasm の構成図

柿本らによって、mros2-POSIX を wasm 環境で実行する mros2-wasm が提案された。[] WebAssembly (Wasm) は、C, C++, C#, Rust などの言語で書かれたプログラムをコンパイルのターゲット Web 上でプログラムを高速に実行するために設計された、スタックベースの仮想マシンで実行される仮想命令アーキテクチャである。[4][16] サンドボックスな環境でアプリケーションは実行されるため、ハードウェアや言語、プラットフォームに依存せず、ネイティブ日回実行速度でコードを実行できるという性質がある [] Wasm の性質か

ら Web ブラウザ以外の実行環境として利用する取り組みがあり、Web の外部で Wasm を実行するための API 群として WASI (WebAssembly System Interface) [] が提案された。WASI を用いることでファイルやディレクトリ、ネットワークソケットなど、様々なリソースに Wasm からアクセスできるようになり、Web ブラウザ以外の実行環境として動作する Wasm ランタイムの開発が進んだ。

mROS2 を Wasm 化させるにともない、使用する Wasm ランタイムに関して以下の制約がある。

- ROS ランタイムにはスレッド操作やネットワーク通信の処理が必要であるため、Wasm ランタイムにはこれらの機能が必要である
- リソースの限られているエッジデバイスで動作させることを想定する必要があるため、Wasm ランタイムと ROS ランタイムによるリソース消費を最小限に抑える必要がある

これらの制約を満たすランタイムとして WAMR (WebAssembly Micro Run-time) [] がある。WAMR は、組込みや IoT、クラウドなど、様々なプラットフォームで動くようにメモリ消費量が小さくなるよう設計された、オープンソースの Wasm ランタイムである。Wasm プログラムの実行方式としては Wasm バイナリを逐次実行するインタプリタ方式と (Classic)、事前に Wasm バイナリをネイティブバイナリにコンパイルして実行する AoT (Ahead Of Time)、Wasm バイナリをネイティブバイナリにコンパイルして実行する JIT (Just In Time) があり、そのうち AoT と JIT ではネイティブと同等の実行速度で動作する。またマルチスレッドやスレッド管理を行う pthread API (POSIX スレッドの標準 API) をサポートする組込みライブラリや Socket API をサポートする組込みライブラリも提供されている。

Wasm はサンドボックスな環境で実行されるため、OS の機能に依存した層がある mROS 2-POSIX をそのままではコンパイルすることができない。図 2.2 で示したとおり、mROS 2-POSIX で OS に依存している層は CMSIS-POSIX と lwIP-POSIX である。CMSIS-POSIX は mROS 2 内部で RTPS 通信を行うための機能として、スレッド管理機能、排他制御機能、メッセージキュー管理機能、時間管理機能が pthread などを用いて実装されている。lwIP では、UDP マルチキャストをおこなための実装が Socket や CMSIS-POSIX が提供する機能を用いて実装されている。

これらの依存を解消するため、CMSIS-POSIX を Wasm 対応した CMSIS-WASM、lwIP-POSIX を Wasm 対応した lwIP-WASM を柿本らは実装した。mROS2-wasm の構成を図 3.1 に示す。なお、mROS 2 はオープンソースソフトウェアであることから上位レイヤに変更が加わっても変更を取り込みやすいよう、既存のビルドシステムに極力手を加えずにシステムを構築されている。

CMSIS-WASM を実装する機能のうち、排他制御機能、メッセージキュー管理機能はス

レッド管理機能に依存している。時間管理機能は手を加えることなく Wasm コンパイルが可能であったため、実際に実装されたのはスレッド管理機能である。実装に際して、WAMR の pthread API を用いてスレッド管理機能を実装されているが WAMR pthread ライブラリの既知の問題が障害となった。

- timespec 構造体をサポートしていない
- wasi-sysroot の errno と互換性がない
- pthread\_attr\_t 構造体をサポートしていない

timespec 構造体は、スレッドの同期処理などに使われる pthread\_cond\_timedwait 関数から使用され、待機時間の長さを指定するために使われる。WAMR では timespec 構造体が使われず、useconds を用いる必要があった。そのため待機死体時間をマイクロ秒単位に変換し引数として WAMR の pthread\_cond\_timewait に渡すことで timespec 構造体を用いずに同様の動作をさせた。

errno に関してはシステムが正常に動作している際に使われることがないため、仕様が避けられている。

スレッド生成時にそのスレッドの属性を設定するのに使われる pthread\_attr\_t 構造体は、WAMR ではサポートされていない。しかし、pthread\_attr\_t はスレッドを生成する関数のみで使用されており、デフォルトの属性から変更されずにスレッド適用されていたため、削除されている。CMSIS-WASM は上記のように柿本らによって実装された。

lwIP-WASM は、Socket を用いて通信機能の実装が行われているため、WASI を用いる必要がある。WAMR には WASI を用いて実装された Socket API が提供されているため、それを用いて実装が行われた。

WAMR の Socket API では、setsockopt 関数において IPPROTO\_IP レベル ( ) で設定できるオプションは5つに限られている。

- IP\_MULTICAST\_LOOP
- IP\_ADD\_MEMBERSHIP
- IP\_DROP\_MEMBERSHIP
- IP\_TTL
- IP\_MULTICAST\_TTL

一方 mROS 2-POSIX の lwIP-POSIX では、IP\_MULTICAST\_IF, IP\_ADD\_MEMBERSHIP, IP\_MULTICAST\_TTL が使用されており、IP\_MULTICAST\_IF が WAMR の Socket API には存在しないためネットワークインターフェースの指定ができないという問題があった。Socket は IP\_MULTICAST\_IF によるネットワークインターフェースの指定がない場合はデフォルトのネットワークインターフェースが指定されるため、IP\_MULTICAST\_IF を設定する setsockopt 関数を削除して実装が行われた。また、マルチキャスト通信の配信範囲を制

御する TTL を設定する `IP_MULTICAST_TTL` の指定時に, WAMR の Socket API では オプションデータの長さが 4bytes でないときプログラムが終了してしまう. lwIP-POSIX ではこの長さが 1bytes で定義されていたため 4bytes に変更した. このように WAMR の Socket API に合わせた細かい変更を行うことで, lwIP-WASM が実装された.

システムのビルドは, 外部のプロジェクトのビルド・インストールなどを可能にする `ExternalProject` を用いて mROS 2 のディレクトリ外から行うことができる.



## 第 4 章

# アプローチ

mROS 2-POSIX と mROS 2-Wasm と ROS 2 を比較評価するためのアプローチとして ROS 2 で実際に動作するアプリケーションが望ましい。第 1 章で述べた通り，mROS 2-POSIX の評価はネットワークスループットのマイクロベンチマークに留まり，実アプリケーションにおける有用性が十分に評価されていない。そのため，mROS 2-POSIX と mROS 2-Wasm と ROS 2 に以下の条件を満たしたアプリケーションを実装し，比較評価を行う。

- Pub-Sub 通信のみを使用したアプリケーションであること
- 組み込みデバイス上で動作できるアプリケーションであること

mROS 2-POSIX, mROS 2-Wasm は Pub/Sub 通信のみしか実装されていない。そのため ROS 2 から移植するアプリケーションは Pub/Sub 通信のみを使用したアプリケーションである必要がある。

本研究は第 1 章で述べた通り，動的配置機構実現後のロボットソフトウェア基盤としてどのような優位性があるのか明らかにすることを目指している。したがって，実装するアプリケーションは動的配置機構が適用される Raspberry Pi のような組み込みデバイス上で動作できるアプリケーションが望ましい。以上の条件を満たすアプリケーションとして，本研究ではラズパイマウス [1] で動作する ROS 2 のライントレースノードを mROS 2-POSIX と mROS 2-Wasm に移植し，比較評価を行う。

## 第 5 章

## 実装

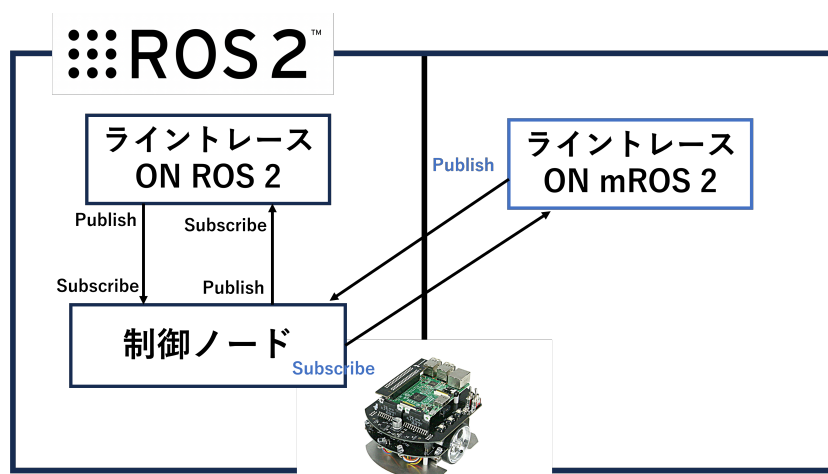


図 5.1: 実装アプリケーション構成 1

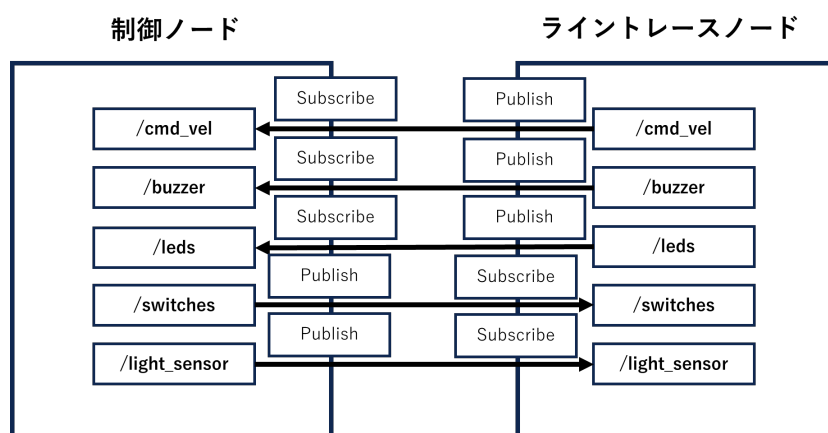


図 5.2: 実装アプリケーションの Pub/Sub 通信構成

本章では、mROS 2-POSIX と ROS 2 の性能を比較評価するにあたって、mROS 2-POSIX と ROS 2 に実装するアプリケーションの概要について説明する。

## 5.1 実装アプリケーションの構成

本研究では ROS 2 で動作するライントレースノードを mROS 2-POSIX に移植し、mROS 2-POSIX と mROS 2-wasm, ROS 2 の性能を比較評価する。比較評価のためのアプリケーションの構成図を図 4.1, 図 4.2 に示す。

図 4.1 は mROS 2-POSIX と mROS 2-wasm, ROS 2 の実装アプリケーションの構成である。図のようにラズパイマウスを制御するノードは os に近い実装になっており、動的配置機構を適用するに適していないと判断した。したがって、OS に依存しないノードであるライントレースノード (follower ノード) を mROS 2-POSIX と mROS 2-wasm それぞれに実装した。

図 4.2 はライントレースノードとその制御ノードの Pub/Sub 通信についての構成図である。ライントレースノードと制御ノードは相互に 5 つのトピックを介して通信を行う。

- /light\_sensors
- /switches
- /cmd\_vel
- /buzzer
- /leds

/light\_sensors と /switches はライントレースノードが Subscribe するトピックであり、/cmd\_vel, /buzzer, /leds はライントレースノードが Publish するトピックである。/light\_sensors は制御ノードから常に Publish されるライトセンサの値で、光が反射しやすい白い部分をライトセンサに近づけると取得する整数値が大きくなり、光を吸収する黒に近い部分をライトセンサに近づけると取得できる整数値が小さくなる。/switches は /light\_sensors 同様に制御ノードから常に Publish されるスイッチの状態を表す値である。スイッチが押されると true が Publish され、スイッチが押されていないと false が Publish される。/cmd\_vel はライントレースノードが Publish するトピックであり、ラズパイマウスのモーターを制御するためのトピックである。/buzzer はライントレースノードが Publish するトピックであり、ラズパイマウスから音を鳴らすことができるトピックである。/leds はライントレースノードが Publish するトピックであり、ラズパイマウスの LED を制御するためのトピックである。これらのトピックを介して Pub/Sub 通信を行えるよう、Python で記述されたライントレースノードを C++ に書き換え、mROS 2-POSIX と mROS 2-wasm に移植した。また、動作フローなどで通信時間に影響がでないように、ROS 2 と mROS 2-POSIX, mROS 2-wasm の動作フローを統一した。

## 5.2 実装アプリケーションの問題と解決策

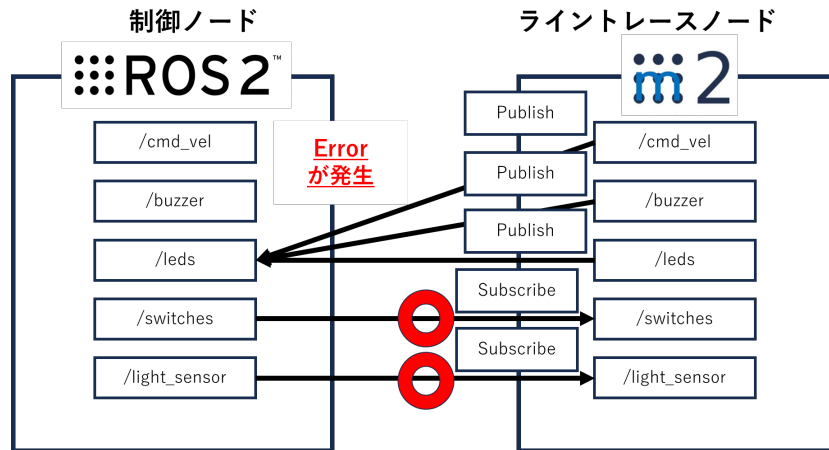


図 5.3: mROS 2-POSIX のバグ

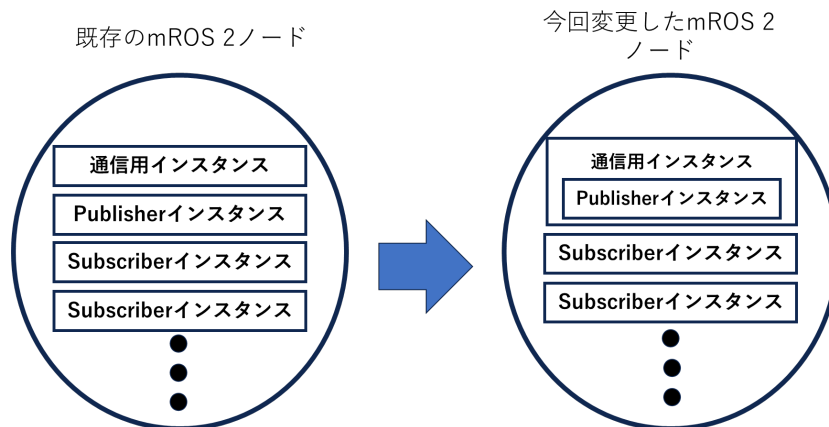


図 5.4: mROS 2-POSIX のバグ fix

ROS 2 で実装されているノードを mROS 2-posix に実装する際に、mROS 2-posix 固有の様々な問題に遭遇した。以下にその問題を述べる。

- mros2-posix の Publisher のバグ fix
- mros2-posix の QoS 設定の変更
- mros2-posix のサービス通信が実装されていない

mROS 2-POSIX は 2024 年 2 月時点で、最後の更新が 2 年前であり、定期的にメンテナンスされているとはいいにくい。また、mROS 2-POSIX を評価するにあたって、高瀬らは 1

つの Publisher と Subscriber を用いたネットワークスループットを評価した。したがって、実際のアプリケーションのような複数の Publisher と Subscriber を用いるアプリケーションで、mROS 2-POSIX 実行し ROS 2 と通信を試みようとすると、ROS 2 の Subscriber で `payloaderror` が発生した。この error は ROS 2 の Subscriber に対して、想定以上のデータが送信された場合に表示される。 `ros2 topic echo` を用いてトピックに送信されているデータを確認したところ図 4.3 に示すように、ROS 2 の Subscriber に対して mROS 2-POSIX で Publisher として定義されているすべてのメッセージが送信されていることが分かった。これは mROS 2-POSIX の Publisher のインスタンスが 1 つのみの生成になっていることが原因である。実装の状態を図 4.4 に示す。Publisher インスタンスにその情報が書きされ、最後に作成された Publisher のトピック宛にすべてのメッセージが送信されている。そのため、本実装では通信用インスタンスに対して、Publisher のインスタンスを生成するように修正した。

mROS 2-POSIX はデフォルトで QoS の設定が `BEST_Effort` になっている。QoS は `Best_Effort` と `Reliable` の 2 つがあり、`Best_Effort` はデータの到達を保証しないため、ROS 2 ではデフォルトで `Reliable` に設定されている。Publisher の QoS 設定が `Best_Effort`、Subscriber の QoS 設定が `Reliable` の場合、Subscriber は Publisher からデータを受信できない。そのため、ROS 2 と mROS 2-POSIX のノード間で Pub/Sub 通信するためには、まず最初にどちらかの QoS 設定を変更する必要がある。mROS 2-POSIX の DDS<sup>[[</sup>である `embeddedRTPS`<sup>[[</sup>は QoS の設定に `Reliable` と `BEST_Effort` をサポートしているため、本実装では mROS 2-POSIX の QoS を `Reliable` に変更し、対応した。

ROS 2 のライントレースノードの実装では、モーターの on/off にサービス通信を使っている。2 章で説明した通り、Service 通信は ROS 2 の通信方法の 1 つであり、クライアント・サーバーモデルに近い通信方法である。ROS 2 のライントレースノードの実装では、このサービス通信を用いてラズパイマウスのモーターの on/off を操作しているが、mROS 2-posix には Service 通信の実装がされておらず、そのまま移植することはできない。本実装では、mROS 2-POSIX の実装部分でモーターの on/off の処理を削除し、ノードを立ち上げた後、ROS 2 の制御ノードに対して端末上から `ros2 service call` を使用することで、モーター電源の on/off を操作した。これらの問題は mROS 2-Wasm にも同様に存在したが、mROS 2-POSIX を実装する際に解決した方法と同じであったため、省略する。

## 第 6 章

# 実験

本章では，実装したアプリケーションを用いて，mROS 2-POSIX と mROS 2-Wasm と ROS 2 の性能を比較評価した実験について述べる．

### 6.1 概要

本研究で mROS 2-POSIX, mROS 2-Wasm, ROS 2 の性能を比較評価するために，それぞれの環境に実装したライントレースノードをラズパイマウスにジョイントしている Raspberry Pi 3B+ 上で動作させ，ノードでの Pub/Sub 通信にかかる時間とメモリ消費量を比較する実験を実施した

## 第 7 章

# 考察

ここは考察

## 第 8 章

# 関連研究

この章では本研究の関連研究について述べる.

### 8.1 ロボットソフトウェア軽量実行環境 mROS 2 の POSIX 対応に向けた実装および評価

高瀬らは, ROS 2 の軽量実行環境である mROS 2 の POSIX 対応に向けた実装および評価を行った. 評価の方法として 2 つのデバイスを用意し, 別のデバイス上のノードから `std_msgs/String.msg` 型のメッセージをパブリッシュする. このノードを `pub` とする. その後, 他方のデバイス上のノードを使って `pub` から送られてきたメッセージをサブスクライブし, サブスクライブしたメッセージをそのまま `pub` ノードと同じデバイスで動作する別のノード (`sub` ノード) にパブリッシュしてサブスクライブする. その間のラウンドトリップタイム (RTT) を計測することで mROS 2-POSIX の評価を ROS 2 と比較して行っている. この評価実験では, mROS 2-POSIX と ROS 2 の RTT の比較を行っているが, mROS 2-POSIX と ROS 2 のメモリ使用量に関しては比較されていない.

### 8.2 クラウド連携を対象としたアーキテクチャ中立な ROS ランタイムの検討

柿本らは, クラウド連携を対象としたアーキテクチャ中立な ROS ランタイムを実装し, 実装後の評価実験を行った. 実装として, 組込みデバイス向け ROS 2 ランタイム実装である mROS 2 を WebAssembly ランタイム上で動作させることで, アーキテクチャ中立な ROS ノード実行状態を実現している. 評価実験として, 実装した mROS 2 on Wasm を使って, メモリ使用量と RTT の計測を行い, 実装を評価した. 実験として計算処理を行うの 0 度をクラウドを想定したデバイス上で動作させ, その際にかかる時間を計測し, ロボットを想定したデバイス上で動作させた際にかかる時間を比較している. この評価実験で mROS 2 と



ROS ランタイムの間に処理時間の差が認められ、mROS 2 の軽量化が証明された。

### 8.3 mROS 2: 組込みデバイス向けの ROS 2 ノード軽量実行環境

高瀬らは組込みデバイス向けの高効率な ROS 2 通信方式およびメモリ軽量な実行環境を確立するために、提案として軽量ランタイムである mROS 2 を設計、実装、評価した研究である。mROS 2 を評価するにあたって、ROS と micro-ROS を用いている。micro-ROS は ROS 2 の組込みデバイス向けの軽量実行環境である。mROS 2 と micro-ROS の違いは、ROS 2 と通信する際の Agent ノードの有無である。Agent ノードを立ち上げなければならない、micro-ROS は通信に遅延が発生する恐れがある。通信性能の評価実験として `std_msgs::msg::Int32` のメッセージをエコーバックするアプリケーションを用いている。アプリケーションでの RTT を計測することで通信性能を評価した。結果は、mROS 2 の RTT が一番小さくなり次いで汎用デバイス同士をつないだ ROS 2 環境が早かった。この実験結果から組込みデバイス上で動作した mROS 2 の RTT は汎用デバイス上で動作した ROS よりも高速であることが分かった。

## 第 9 章

# おわりに

本研究は、ROS 2 の軽量実行環境である mROS 2-POSIX の開発を行い、mROS 2-POSIX 上に ROS 2 で実装されているノードの実装を行うことで、mROS 2-POSIX の有用性を検証することを目的としている。有用性の検証過程で、Sphero sprk+ と Wii Fit Board を用いたロボットの動作を制御するアプリケーションの実装を検討した。また、Wii Fit Board と Raspimouse を用いたロボットの動作を制御するアプリケーションの実装を検討した。上記の検討は有用性のある評価実験が行えないと判断し、一部実装のみで終了した。そのため、本研究では、mROS 2-POSIX と ROS 2 の性能を比較評価するために、Raspimouse で動作するライントレースノードを mROS 2-POSIX に移植し、比較評価試みた。実装の結果、mROS 2-POSIX と ROS 2 の間で通信が成功せず、比較評価ができなかった。しかし、mROS 2-POSIX と ROS 2 の間で通信が成功した場合の評価実験の計画を立て、実装を行った。今後の課題として、現状の問題の解決策を一つ一つ試していき、通信の不具合を解消していきたい。

## 謝辞

この度の研究を通じて、多大なるご指導とご支援を賜りました松原 克弥先生に心からの感謝の意を表します。また、日々の研究生活において、絶えず励ましと支えを提供して下さった研究室の仲間たち、先輩方にも深く感謝申し上げます。

## 参考文献

- [1] ROSWiki : ROS/Introduction, url<http://wiki.ros.org/ROS/Introduction>.
- [2] ロボット政策研究会: ロボット政策研究会 報告書 RT 革命が日本を飛躍させる ,<https://warp.da.ndl.go.jp/info:ndljp/pid/286890/www.meti.go.jp/press/20060516002/robot-houkokusho-set.pdf> (2006) .
- [3] Kehoe et al. explored cloud-based robot grasping utilizing the Google object recognition engine, presenting their findings in the 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pages 4263-4270.
- [4] 菅文人, 松原克弥: クラウドロボティクスにおける異種デバイス間タスクマイグレーション機構の検討, 研究報告組込みシステム (EMB), Vol. 2022, No. 36, pp. 1-7(2022).
- [5] 柿本翔大, 松原克弥: クラウド連携を対象としたアーキテクチャ中立な ROS ランタイムの実現, 情報処理学会研究報告, Vol. 2023-EMB-62, No. 51 , pp. 1-7(2023).
- [6] 高瀬英希, 田中晴亮, 細合晋太郎: ロボットソフトウェア軽量実行環境 mROS 2 の POSIX 対応に向けた実装および評価, 日本ロボット学会誌, Vol. 2023-EMB-41, No. 8, pp. 724-727(2023).
- [7] Object Management Group: About the DDS Interoperability Wire Protocol Version 2.5 (online), <https://www.omg.org/spec/DDS-RTSPS/2.5> (2024.01.25).
- [8] 高瀬英希:ROS (Robot Operating System) の紹介と IoT/IOT 分野への展開,RICC-PIoT workshop 2022.
- [9] Fastdds Simple Discovery Settings5.3.2, <https://fast-dds.docs.eprosima.com/en/latest/fastdds/discovery/simple.html>
- [10] Fastrtps ros index <https://index.ros.org/r/fastrtps/>
- [11] RTI Connext DDS, <https://www.rti.com/en/>
- [12] Micro XRCE-DDS, <https://micro-xrce-dds.docs.eprosima.com/en/latest/index.html>
- [13] Eclipse Cyclone DDS, <https://cyclonedds.io/>
- [14] Gurum DDS, [https://gurum.cc/index\\_eng](https://gurum.cc/index_eng)
- [15] クライアント・サーバモデル, <https://www.ibm.com/docs/ja/txseries/8.2?topic=computing-clientserver-model>

- [16] “micro-ROS — ROS 2 for microcontrollers,” <https://micro.ros.org/>
- [17]
- [18] “embeddedRTPS”, <https://github.com/embedded-software-laboratory/embeddedRTPS>
- [19] “lwIP”, <https://savannah.nongnu.org/projects/lwip/>
- [20] “TOPPERS/ASP3 kernel”, <https://www.toppers.jp/asp3-kernel.html>
- [21] “POSIX”, <https://ibm.com/docs/ja/zos/2.5.0?topic=ulero-posix>
- [22] “CMSIS-POSIX”, <https://www.keil.com/pack/doc/CMSIS/RTOS2/html/index.html>