

# 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 | 序論   | 1  |
| 第 2 章 | 関連技術   | 4  |
| 2.1   | ROS 2 . . . . .  | 4  |
| 2.2   | mROS 2 . . . . .   | 7  |
| 第 3 章 | 先行研究   | 11 |
| 第 4 章 | アプローチ  | 16 |
| 第 5 章 | 実装   | 18 |
| 5.1   | 実装アプリケーションの構成 . . . . .                                  | 18 |
| 5.2   | 実装アプリケーションの問題と解決策 . . . . .                              | 20 |
| 第 6 章 | 実験   | 24 |
| 6.1   | 概要 . . . . .   | 25 |
| 6.2   | 結果 . . . . .   | 27 |
| 6.3   | 考察 . . . . .   | 28 |
| 第 7 章 | 関連研究   | 30 |
| 7.1   | mROS 2: 組み込みデバイス向けの ROS 2 ノード軽量実行環境 . . . . .            | 30 |
| 7.2   | ROS 2 ノード軽量実行環境 mROS 2 における任意型メッセージの通信処理<br>方式 . . . . . | 30 |
| 第 8 章 | 結論   | 32 |
| 8.1   | まとめ . . . . .  | 32 |
| 8.2   | 今後の課題 . . . . .  | 33 |
|       | 参考文献   | 35 |

## 第 1 章

# 序論

### 1.1 背景

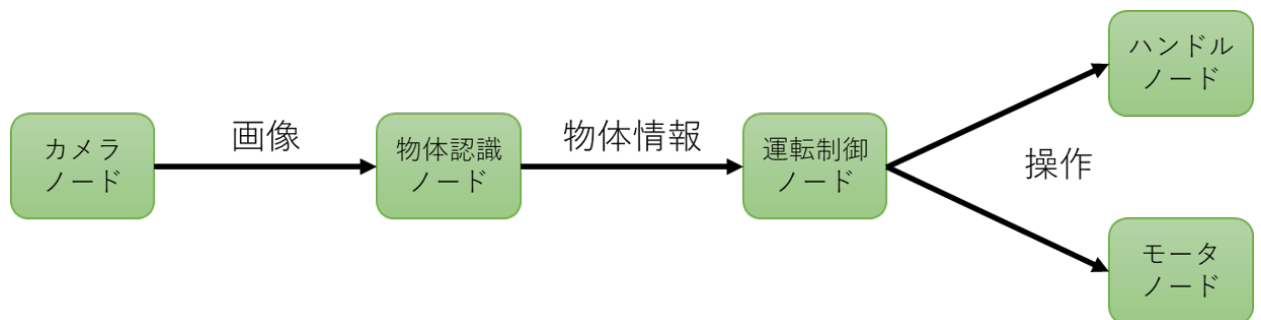


図 1.1: ROS プログラミングモデルの例

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. 例として図 1.1 に示す. 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。

## 1.2 課題

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。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る。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。

## 1.3 目的

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に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、異なる CPU アーキテクチャ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 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、mROS 2-POSIX 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っている [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、ノードの動的マイグレーションに向けた mROS 2-POSIX と mROS 2-Wasm の性能評価を行い、ROS 2 と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優位性を明らかにすることを目指している。アプローチとして、動的配置機構を実現するのに適したアプリケーションを mROS 2-POSIX, mROS 2-Wasm, ROS 2 で実装し、通信時間とメモリ消費量を比較評価する。ROS 2 にはラズパイマウス [22] と呼ばれる 2 つの車輪を回転することで動作するロボットのライントレース実装があり、本実装として、mROS 2-POSIX と mROS 2-Wasm にそのアプリケーションを移植する。このライントレースノー

ドは、組み込みデバイス上で動作し、主な機能は Pub/Sub 通信を使用しているため、本研究の実装するアプリケーションとして適しているうちの一つである。このライントレースノードの実装により、mROS 2-POSIX と mROS 2-Wasm のロボットソフトウェア基盤としての拡張性を示すことができ、評価によって、実アプリケーション上で mROS 2-POSIX と mROS 2-Wasm の軽量性を示すことができる。

## 1.4 章構成

本評価では、ライントレースノードを各環境で動作させ、いくつかのトピックに対して、Pub/Sub 通信のにかかる時間を通信性能とし、計測を行った。また、各環境で RSS を測定するために実行時のプロセス ID を取得し、そのプロセスに割り当てられている RSS を計測した。この結果を実験結果として本論文に示す。

本論文は、全 8 章から構成されている。第 1 章は、本研究における背景と課題、目的について述べた。第 2 章は、ROS や mROS 2-POSIX について述べる。第 3 章では、Wasm 仮想マシンを用いた mROS 2-POSIX 環境である mROS 2-Wasm に関する先行研究について述べる。第 4 章では、本研究のアプローチについて説明する。第 5 章では、本研究のライントレースノードを各環境の実装について説明する。第 6 章では、実験結果を示し、結果から得られた知見から考察を述べる。第 7 章では、関連研究について述べる。第 8 章では、本研究のまとめと今後の課題について述べる。

## 第 2 章

# 関連技術

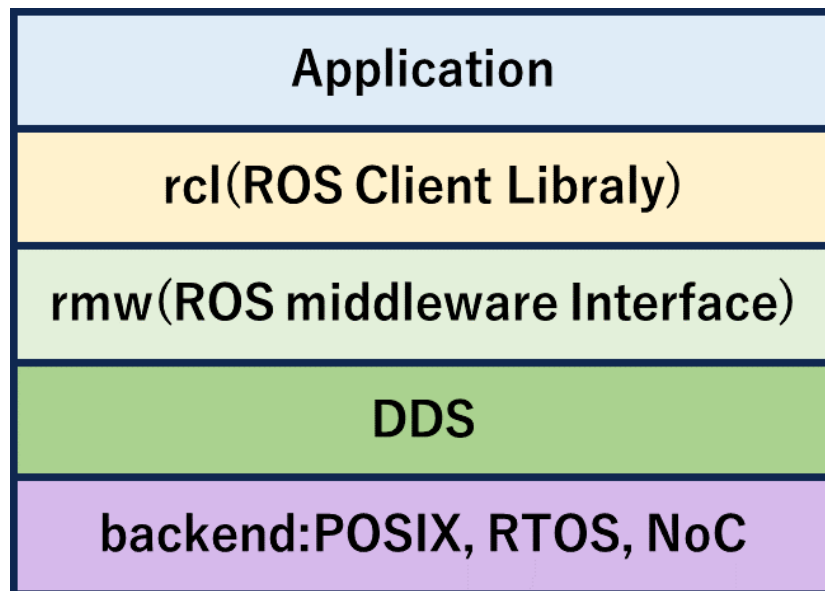


図 2.1: ROS 2 の構成図

### 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 はすでに 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 が研究用途において、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。

具体的には、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。QoS は、通信の信頼性や遅延時間、帯域幅などの通信品質を制御するための機能である。ROS 2 には



QoS の設定として、データの到達を保証する Reliability、多少のデータの欠損を許容する Best Effort があり、ROS 2 のノードにはデフォルトで Reliability が設定されている。

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、(5) の Ubuntu 以外の OS にも対応した。

ROS 2 の構成を図 2.1 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 [24] 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 (Real Time Operating System) や POSIX などの ROS 2 は様々な環境で動作するために表す層がある。

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[23] によると、ROS は 550365601 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.

### 2.1.2 Service 通信と Action 通信

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, 計算結果を受け渡しに適しており, 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複数の Publisher や Subscriber, Action, Service 通信を抱える高度なノードを動作させることができる.

## 2.2 mROS 2

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

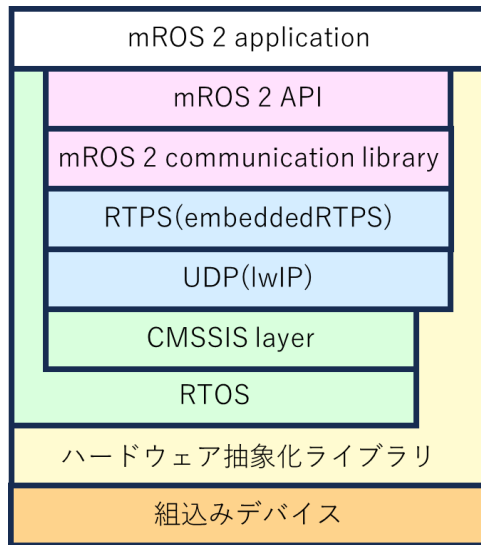


図 2.2: mROS 2 の内部構成

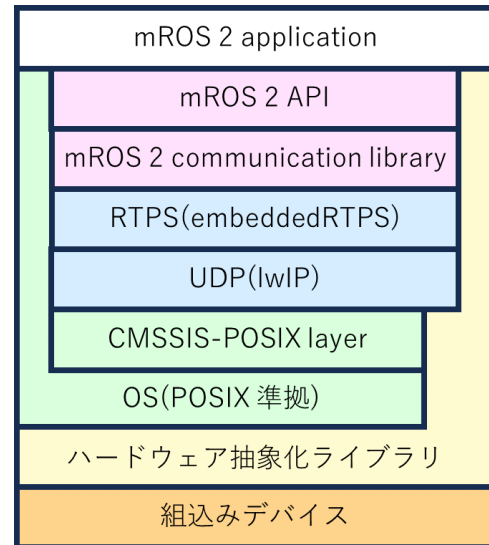


図 2.3: mROS 2-POSIX の内部構成

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 Connex 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る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 mROS 2 の内部構成

図 2.1 に mROS 2 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 embeddedRTPS 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、非常に短い間隔で正確な時間測定を可能にする高分解能タイマ (High Resolution Timer) やシステムが待機状態のときにエネルギー消費を削減できるティックレス (Tickless) 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な組み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` (初期化处理) 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 mros2::init()` が呼ばれたときに、対象の組み込みデバイスを 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 に、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ンネルである 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 CMSAIS-POSIX[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

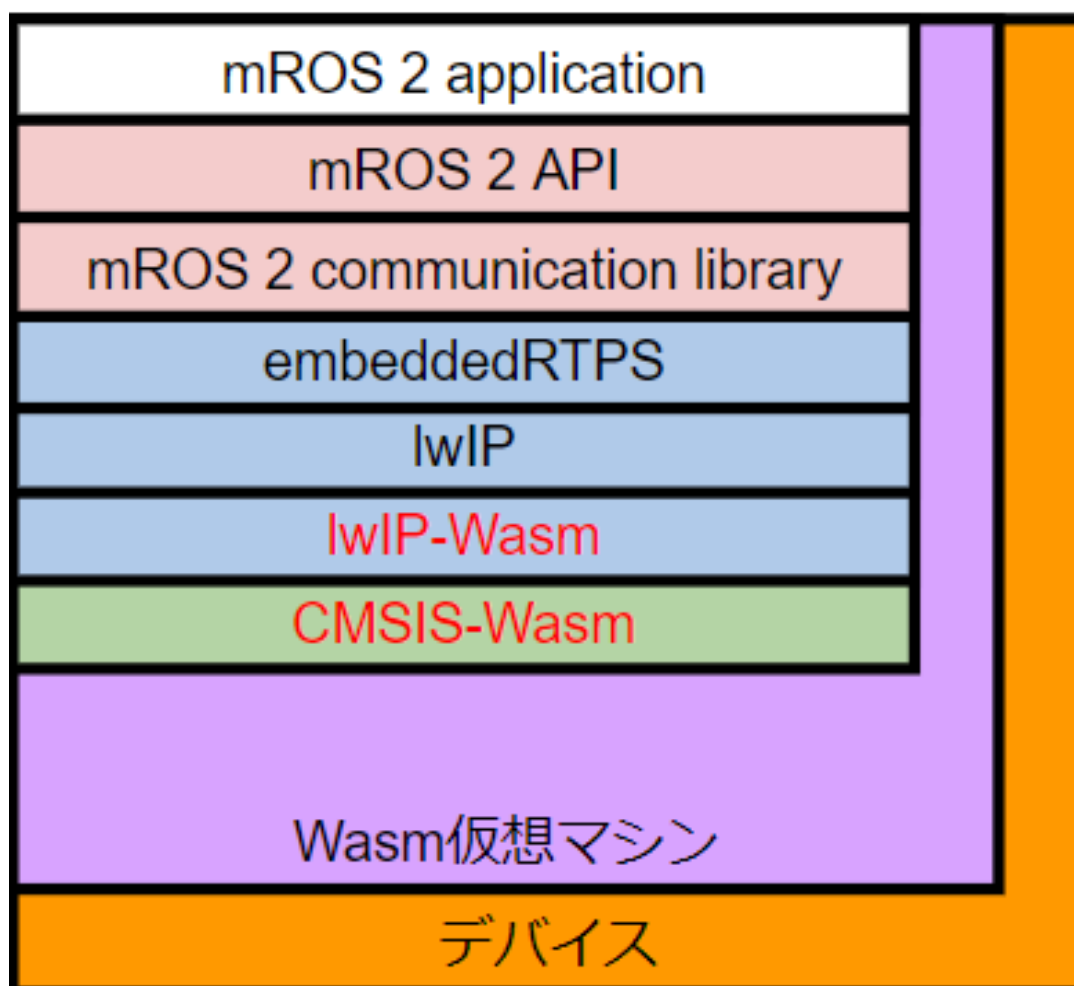


図 3.1: mROS 2-Wasm の構成図

柿本らによって, mros2-POSIX を wasm 環境で実行する mROS 2-Wasm が提案された.

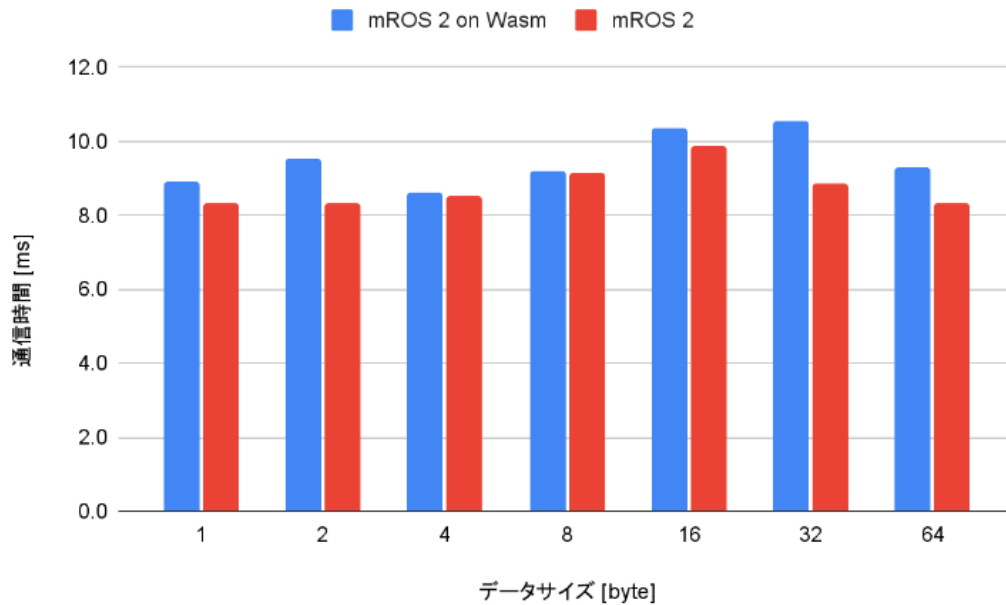


図 3.2: mROS 2-Wasm の通信性能

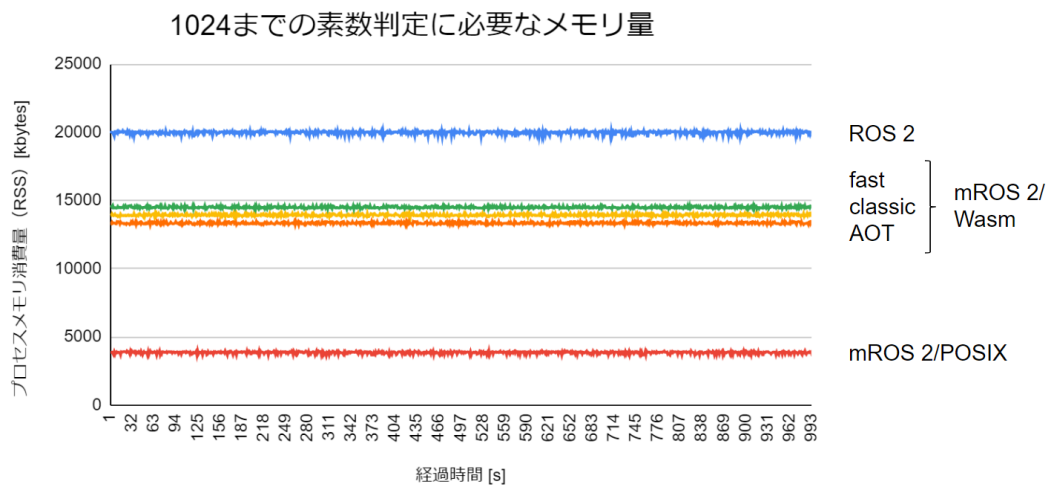


図 3.3: mROS 2-Wasm のメモリ使用量

[5] 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, ネイティブに近い実行速度でコードを実行できるという性質がある [24]. 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) [25] 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。

mROS 2 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) [26] がある。WAMR は、組み込みや 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 バイナリを実行時に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) をサポートする組み込みライブラリや Socket API をサポートする組み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、以下のような 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。以下に示すのがそのオプションである。

- 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。以上の実装により、実行中の mROS 2-POSIX を Wasm 化することができた。

mROS 2-Wasm は通信時間とメモリサイズと計算処理性能の評価が行われた。

計算処理性能の評価では、ノード内で擬似作業として 1 以上の整数を順に素数判定し、1024 までの素数を見つける処理を行う実装をし、その時間を計測、評価した。コンパイル方式は AoT と Classic インタプリタと Fast インタプリタを使って計測した。

通信時間では mROS 2-Wasm と mROS 2 を比較評価した。その結果を図 3.2 に示す。計測方法はクラウド想定デバイスから文字列データを送信し、ロボット想定デバイスからデータを受け取ると、そのままデータを返し、クラウド想定デバイスが受け取るまでの時間、RTT (Round Trip Time) を計測している。mROS 2-Wasm のコンパイル方式は AoT と JIT を使わず Classic インタプリタでコンパイルしたバイナリファイルを使って計測した。

メモリサイズの評価では、mROS 2-POSIX と mROS 2-Wasm と mROS 2-POSIX を比較評価している。その結果を図 3.3 に示す。この計測では、計算処理性能で実装された処理のプロセス ID の RSS (Resident Set Size) と VSS (Virtual Set Size) を取得し評価をした。今後の課題として、mROS 2-Wasm に実行状態の保存、復元機構を実装することが残った。

## 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
- OS への依存が少ないアプリケーションであること

第 2 章では、mROS 2-POSIX の実装と ROS 2 の実装について述べた。ROS 2 には Pub/Sub 通信や Service 通信、Action 通信があるが、mROS 2-POSIX と mROS 2-POSIX を基盤とした mROS 2-Wasm には、Pub/Sub 通信のみの実装になっている。そのため、ROS 2 のアプリケーションを mROS 2-POSIX と mROS 2-Wasm に移植する際には、Pub/Sub 通信を主な通信手段としているアプリケーションが望ましい。

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 や Jetson nano 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。

第 1 章で述べた動的配置機構は、OS への依存が少ないアプリケーションが望ましいと考える。これは、OS の環境に依存したアプリケーションであればあるほど、マイグレーション後の環境で正常に動作しない可能性が大きくなるためである。

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。

ライントレースはロボティクスや自立走行車において基本的な技術であり、将来的によ

り大きなアプリケーションに発展できる可能性がある。そのため、評価だけでなく mROS 2-POSIX と mROS 2-Wasm のロボットソフトウェア基盤として拡張性示すことができると考え、ラズパイマウスのライントレースノードを各環境に実装することとした。

## 第 5 章

# 実装

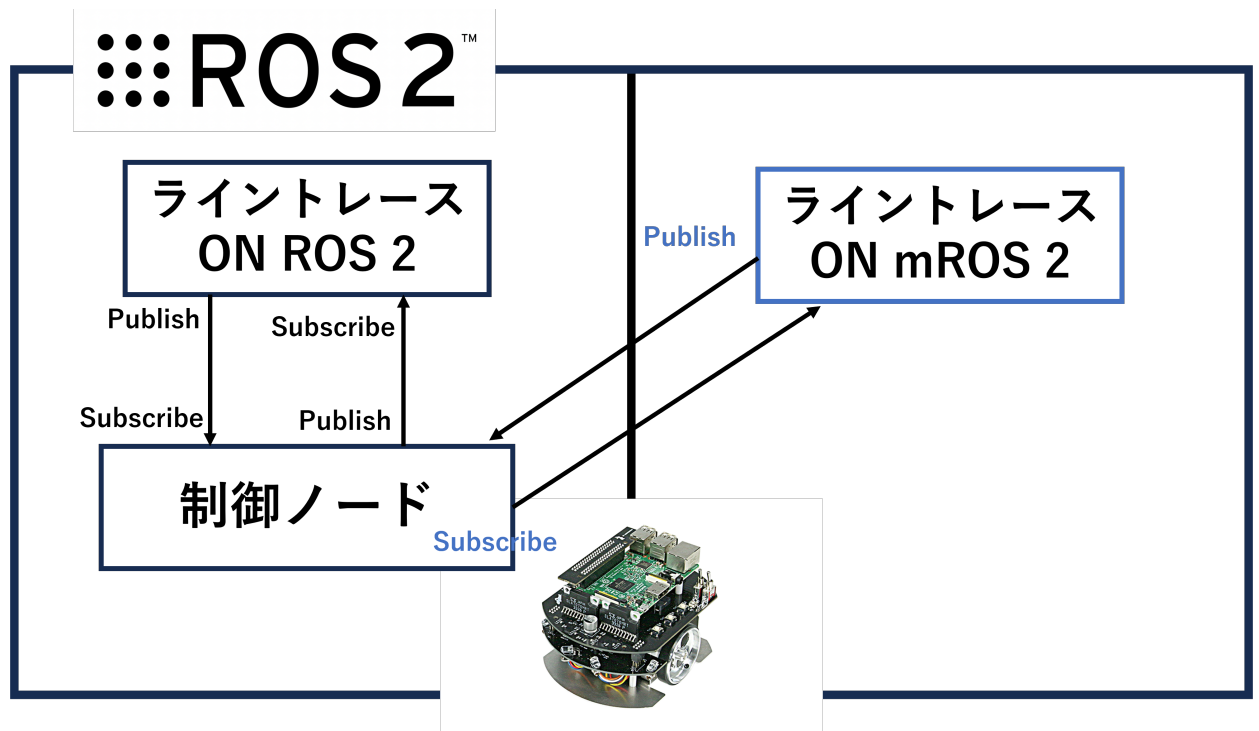


図 5.1: 実装アプリケーション構成 1

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

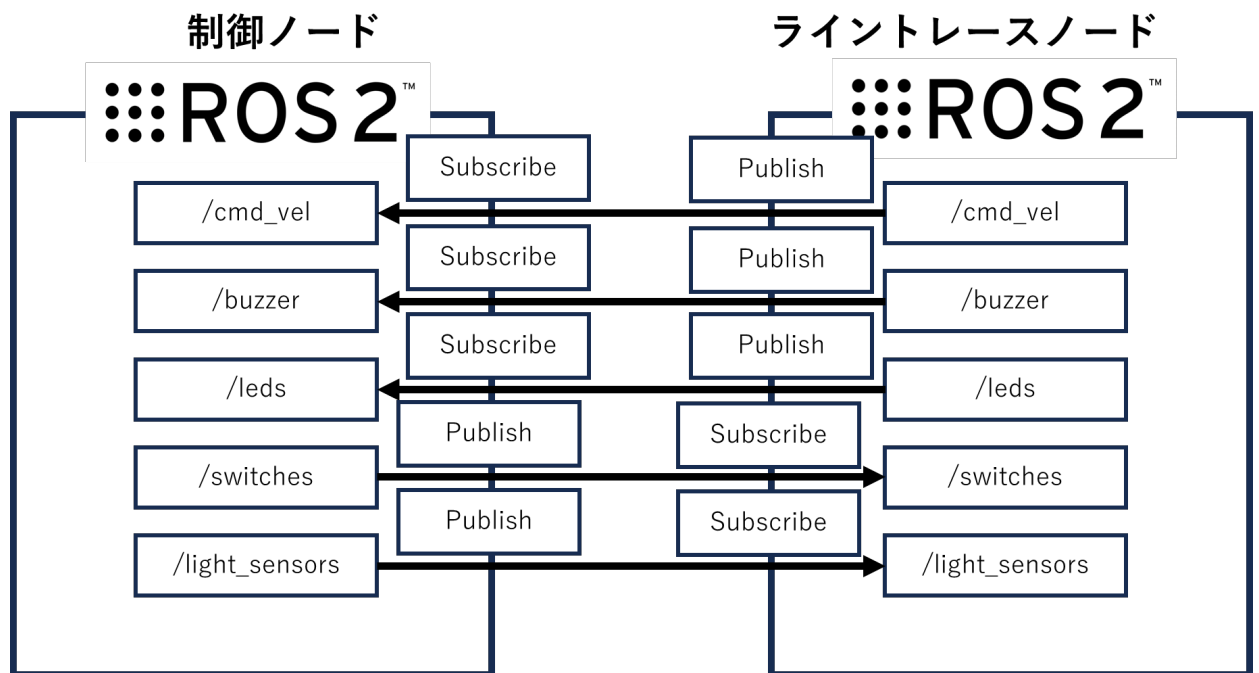


図 5.2: 実装アプリケーションの Pub/Sub 通信構成

ションの構成図を図 5.1, 図 5.2 に示す.

図 5.1 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 に近い実装である. 第 4 章で述べた通り, マイグレーションは OS 依存があるアプリケーションに適用すると, 適用後に動作しない可能性がある. したがって, OS に依存しないノードであるライトレースノード (follower ノード) を mROS 2-POSIX と mROS 2-wasm それぞれに実装した.

図 5.2 はライ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. 以下に通信を行う 5 つのトピックを示す.

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

/light\_sensors と /switches はライトレースノードが 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

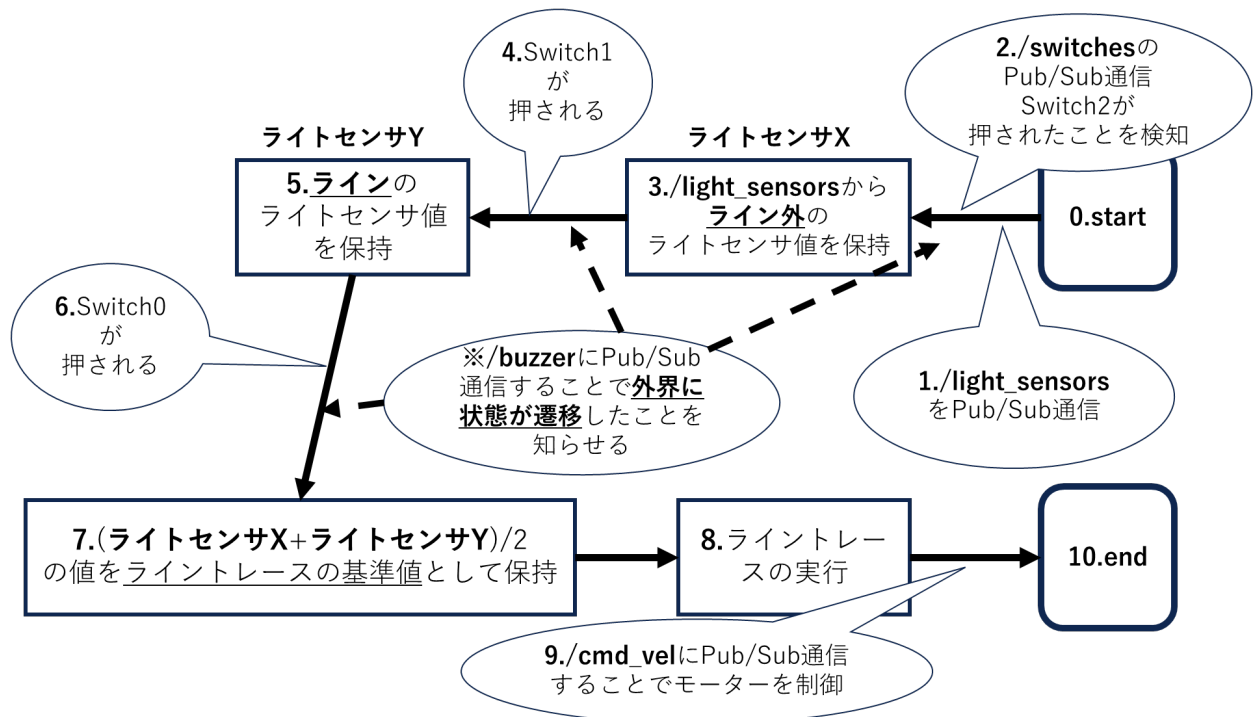


図 5.3: 実装アプリケーションの動作フロー

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。動作フローは図 5.3 に示す。

## 5.2 実装アプリケーションの問題と解決策

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。

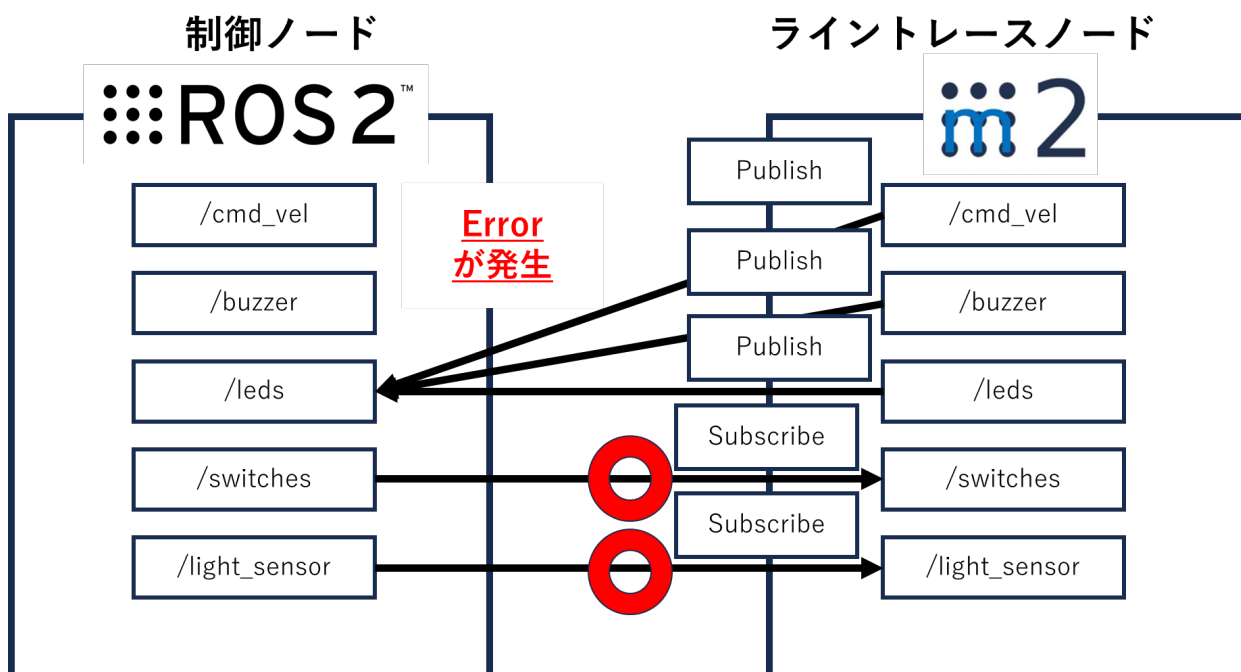


図 5.4: mROS 2-POSIX のバグ

- 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 5.3 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 5.4 に示す。Publisher インスタンスにその情報が上書きされ、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。ROS 2 では



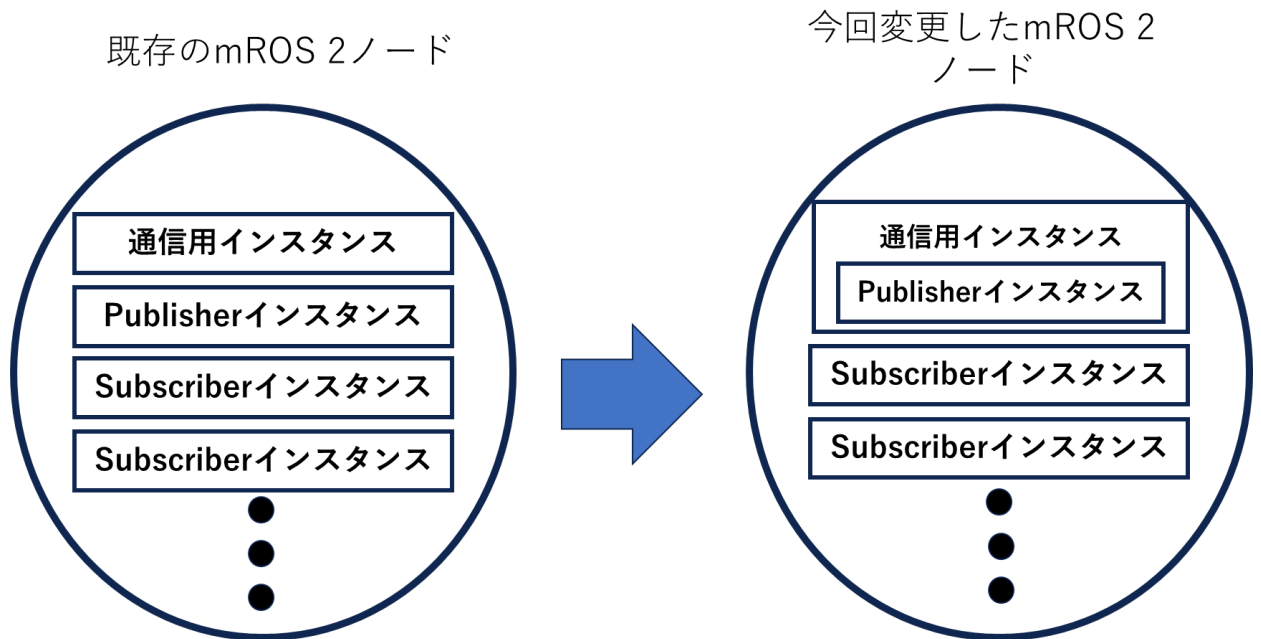


図 5.5: mROS 2-POSIX のバグ fix

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>1</sup> である embeddedRTPS<sup>2</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。

本実装では同じメッセージ型を使用することはなかったが, 既存の mROS 2-POSIX で同じメッセージ型を使用する Publisher もしくは Subscriber を立ち上げると, コンパイルが通らない。これは, mROS 2-POSIX が任意のメッセージ型を扱うための Template を用いた実装部分で, Pub/Sub のメッセージ型を格納するリストに重複を許していたからである。そのため, 本実装では, 重複を許さないようにリストの格納部分を修正し, 同じメッセージ型

を使用してもコンパイルエラーが発生しないようにした。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, 解決した方法と同様で行った。

## 第 6 章

# 実験

表 6.1: 実験環境

|        |  |
|--------|--|
| ハードウェア | Raspberry Pi 3B+                       |
| OS     | Ubuntu 22.04 LTS                       |
| CPU    | 1.4GHz 64-bit quad-core ARM Cortex-A53 |
| メモリ    | 1GB LPDDR2 SDRAM                       |
| ROS 2  | ROS 2 humble                           |

| /light_sensors | ROS2           | mROS2          | mROS2-Wasm      |
|----------------|----------------|----------------|-----------------|
| 平均値            | 733.40 $\mu$ s | 656.59 $\mu$ s | 2101.89 $\mu$ s |
| 最大値            | 830 $\mu$ s    | 780 $\mu$ s    | 2870 $\mu$ s    |
| 最小値            | 650 $\mu$ s    | 580 $\mu$ s    | 1740 $\mu$ s    |
| 標準偏差           | 58.14 $\mu$ s  | 51.16 $\mu$ s  | 282.89 $\mu$ s  |

表 6.2: /light\_sensors の通信時間の統計

| /cmd_vel | ROS2             | mROS2-POSIX      | mROS2-Wasm       |
|----------|------------------|------------------|------------------|
| 平均値      | 42757.34 $\mu$ s | 36954.83 $\mu$ s | 46760.56 $\mu$ s |
| 最大値      | 74220 $\mu$ s    | 72490 $\mu$ s    | 83190 $\mu$ s    |
| 最小値      | 16550 $\mu$ s    | 2380 $\mu$ s     | 14170 $\mu$ s    |
| 標準偏差     | 23451.16 $\mu$ s | 20486.34 $\mu$ s | 20424.32 $\mu$ s |

表 6.3: /cmd\_vel の通信時間の統計

|                        | ROS2    | mROS2-POSIX | mROS2-Wasm |
|------------------------|---------|-------------|------------|
| RES(Resident Size)     | 32.51MB | 1.66MB      | 17.37MB    |
| SHR(Shared Memory)     | 25.16MB | 1.48MB      | 1,73MB     |
| RSS(Resident Set Size) | 57.67MB | 3.14MB      | 19.10MB    |

表 6.4: 各環境の物理消費メモリ (RSS)

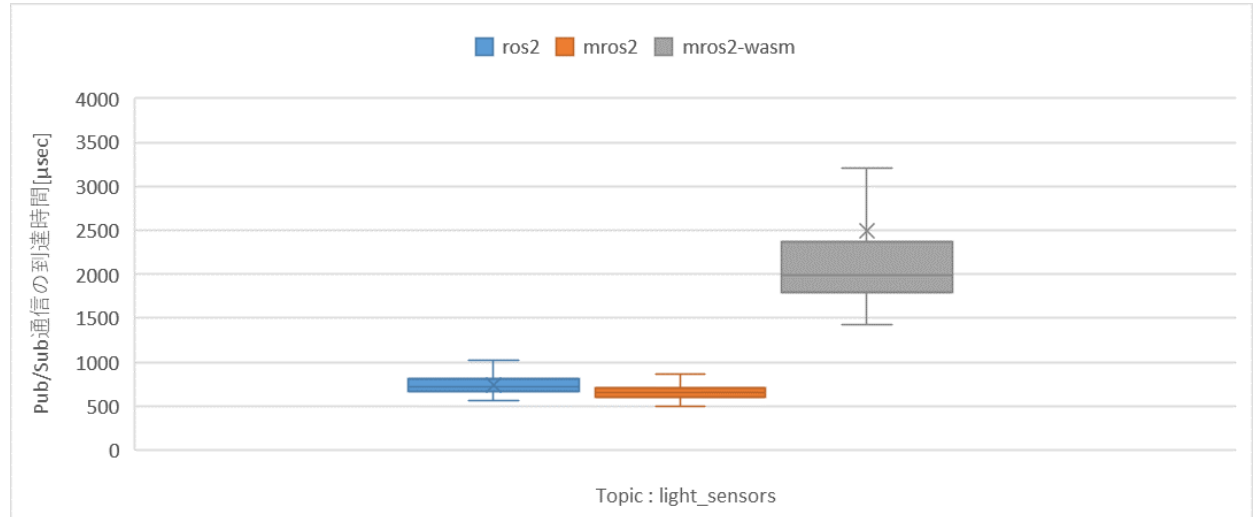


図 6.1: トピック: /light\_sensors の通信時間の箱ひげ図

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、制御ノードとライントレースノードの通信時間とメモリ消費量を比較する実験を実施した。

実験の実行環境を表 6.1 に示す。なお、第 2 章で述べた通り、ネイティブ ROS 2 のランタイムディストリビューションは最新版である humble を採用した。

通信時間の計測は、2 つのノード間で Pub/Sub 通信にかかる時間を mROS 2-POSIX, ROS 2 間で `std::chrono::high_resolution_clock` を用いて計測し、mROS 2-Wasm, ROS 2 間で Linux 標準の `clock_gettime()` を用いた。mROS 2-Wasm で `std::chrono::high_resolution_clock` を用いると、実行時に取得できる時間が ROS 2 側

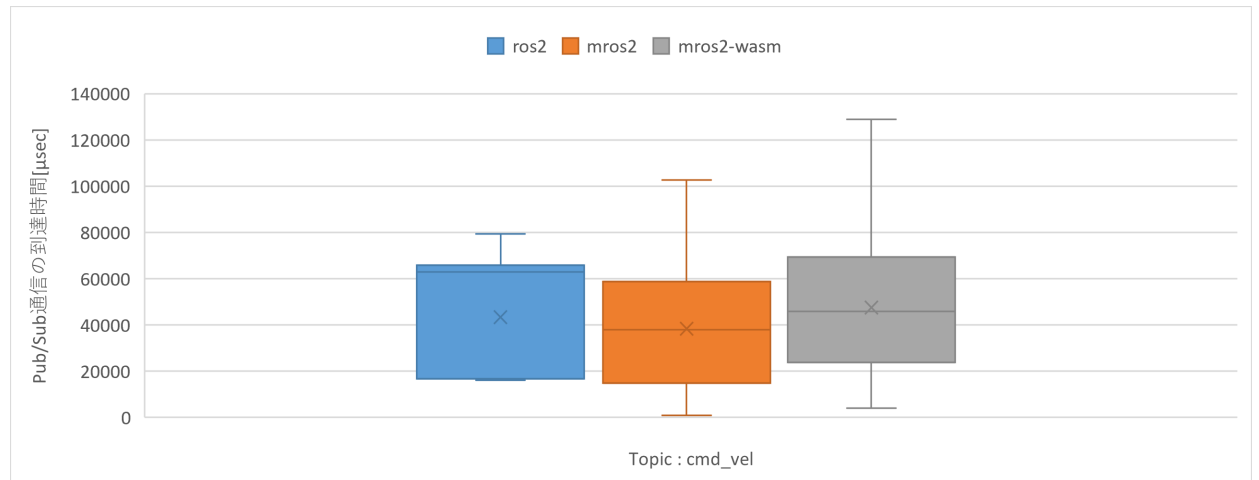


図 6.2: トピック: /cmd\_vel の通信時間の箱ひげ図

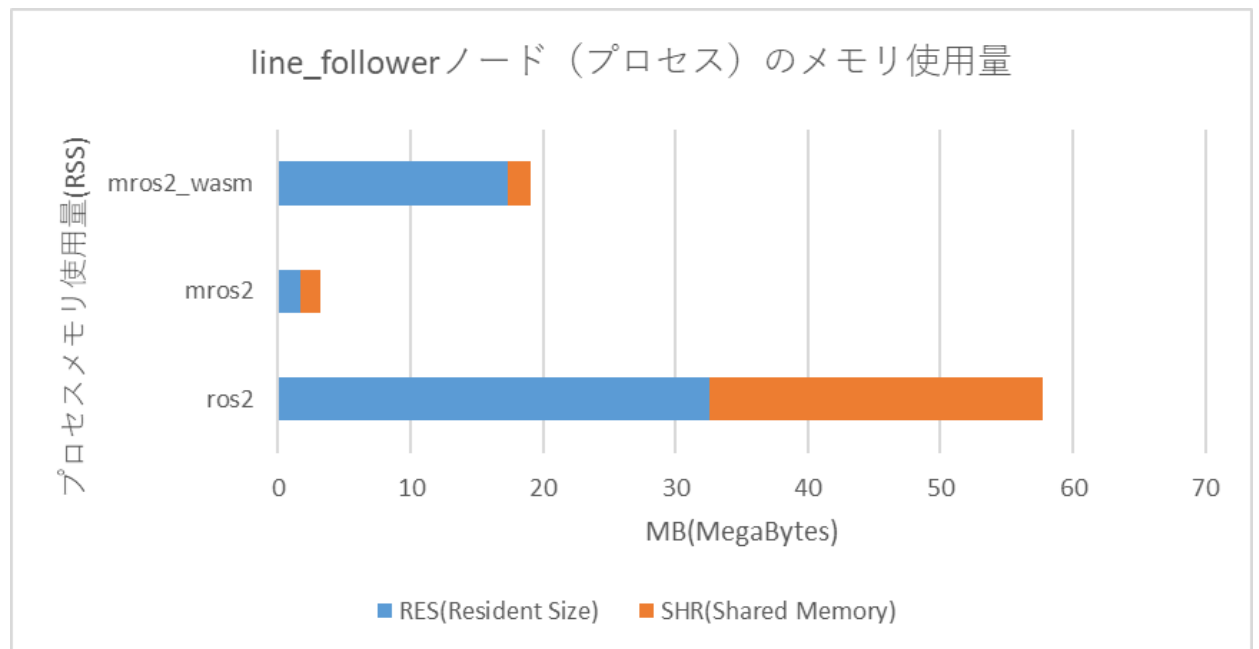


図 6.3: 各環境で RES, SHR を合わせた RSS の比較

の `std::chrono::high_resolution_clock` と数値が大きく異なり、比較が困難であったため `clock_gettime()` を使用した。時間を計測するトピックは、`/light_sensors` と `/cmd_vel` である。このトピックはライトレースする際に使用する主なトピックであり、第 4 章で述べた通り、`/light_sensors` はライトセンサの値を、`/cmd_vel` は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。`/light_sensors` は `Int16` 型が 4 つ格納されている配列であり、`/cmd_vel` は `geometry_msgs/Twist` 型で、`float64` 型が 6 つ格納されている配列であ

る。この2つのトピックの Publish した現在時刻, Subscribe した現在時刻を取得し, その差分を通信時間とした。評価にあたって, 通信時間の箱ひげ図, 平均値, 最大値, 最小値, 標準偏差を計算した。/light\_sensors と /cmd\_vel の Pub/Sub の関係は第5章で述べた通り, /light\_sensors は制御ノードから Publish されるトピックであり, mROS 2-POSIX, mROS 2-Wasm は Subscribe するトピックである。/cmd\_vel は mROS 2-POSIX, mROS 2-Wasm が Publish するトピックであり, 制御ノードが Subscribe するトピックである。

メモリ消費量の計測は, mROS 2-POSIX, mROS 2-Wasm, ROS 2 の各環境でのライントレースノードに対して, 実行しているランタイムのプロセス ID を取得し, そのプロセスに割り当てられている RSS を計測した。各環境で同様の計測を行い, RSS は時間によって変化しなかったため, この RSS を用いて, グラフを作成した。

## 6.2 結果

実験結果を図 6.1 から図 6.3 および表 6.2 から表 6.4 に示す。

図 6.1 では各環境ごとにトピック /light\_sensors の Publish した現在時刻と Subscribe した現在時間の差を計算し, 箱ひげ図として通信時間のばらつきを示している。ROS 2 と mROS 2-POSIX の通信時間のばらつきは比較的同等であるが, mROS 2-Wasm を見ると, 非常に大きなばらつきがあった。

表 6.2 は, トピック /light\_sensors に対して各環境ごとに通信時間の平均値, 最大値, 最小値, 標準偏差を示している。表 6.2 を見ると, 一番小さい平均値を記録したのが mROS 2-POSIX であり, 次いで ROS 2, mROS 2-Wasm の順である。mROS 2-POSIX と ROS 2 の平均時間の差は約 77  $\mu$  sec であり, mROS 2-POSIX と ROS 2 の通信時間の平均がおおよそ同程度, または mROS 2-POSIX の Pub/Sub 通信の方が ROS 2 よりも若干高速であることだった。標準偏差は測定値の分布が平均値のまわりにどの程度集まっているか示す指標で小さい順に, mROS 2-POSIX, ROS 2, mROS 2-Wasm の順である。mROS 2-POSIX と ROS 2 の差はほとんどなく, 若干 ROS 2 のばらつきが大きいが, ほとんど同程度であった。mROS 2-Wasm の通信時間の平均が mROS 2-POSIX と ROS 2 はおおよそ同等であるものの比べて, およそ 3 倍になっており, 標準偏差は, mROS 2-POSIX と ROS 2 がおおよそ同等であるのに対し, mROS 2-Wasm はおよそ 5 倍の値になっている。

図 6.2 は, 図 6.1 と同様に各環境ごとの /cmd\_vel の通信時間のばらつきを示す箱ひげ図である。図 6.2 を見ると, mROS 2-POSIX と ROS 2 と mROS 2-Wasm の通信時間のばらつきはほぼ同等であった。

表 6.3 は, 表 6.2 同様トピックの /cmd\_vel の通信時間の平均値, 最大値, 最小値, 標準偏差を示している。表 6.3 の平均値は, 小さい順に mROS 2-POSIX, ROS 2, mROS 2-Wasm の順である。mROS 2-POSIX と ROS 2 の差は 5082  $\mu$  sec であり, mROS 2-POSIX の方が遅延が少なかった。また, ROS 2 と mROS 2-Wasm の差は 4003  $\mu$  sec であり, ROS 2 の

方が遅延が少なかった。標準偏差を見ると、小さい順に mROS 2-Wasm, mROS 2-POSIX, ROS 2 の順である。これは平均値の順と逆であり、mROS 2-Wasm と mROS 2-POSIX の差はほとんどなく、ROS 2 の標準偏差は mROS 2-Wasm と mROS 2-POSIX で大きくことなっている。

図 6.3 は、ライントレースノードを各環境で動作させたときの RES (Resident Size), SHR (Shared Memory) を合わせた RSS の棒グラフである。表 6.4 は、各環境の RES, SHR, RSS をそれぞれ数字で示している。図 6.3, 表 6.4 を見ると、mROS 2-POSIX のメモリ消費量がもっとも小さく、次いで mROS 2-Wasm, ROS 2 の順である。mROS 2-POSIX は ROS 2 や mROS 2-Wasm と比べて非常に小さなメモリ消費量であった。ROS 2 との差は 54.53MB である。mROS 2-Wasm は ROS 2 よりもメモリ消費量が 38.57MB と少なく、mROS 2-POSIX のほうが 15.96MB 少ない。

### 6.3 考察

図 6.1, 表 6.2, 図 6.2, 表 6.3 から、mROS 2-POSIX は ROS 2 と比べて Pub/Sub 通信の遅延が少なく、安定かつ高速に通信できていることが分かった。これは、mROS 2-POSIX が組み込み用デバイス向けである DDS の embeddedRTPS が軽量な TCP/IP スタックである lwIP を採用しているためだと考える。そして、ROS 2 と mROS 2-Wasm の通信時間を比べると、ROS 2 側が Subscribe を行い、mROS 2-Wasm 側が Publish を行うトピック/cmd\_vel では平均の遅延の差は約 4000  $\mu$  sec, mROS 2-Wasm の遅延が大きかったものの、標準偏差は ROS 2 よりも小さかった。mROS 2-Wasm が ROS 2 から Publish されたメッセージを Subscribe しているトピック/light\_sensors では、mROS 2-Wasm の遅延が ROS 2 の時よりも平均で 3 倍ほど大きく、標準偏差はおよそ 5 倍になっていた。これは、mROS 2-Wasm が Classic インタプリタでコンパイルされ実行されているのが原因であると考える。しかし、Classic インタプリタで実行されたノードでも Publish の通信時間は ROS 2 とそこまで大きな差がないということが示された。この原因として、Publisher の実装がコールバック関数を呼び出す必要のある Subscriber と比べて、メッセージ処理に時間がかかってしまい、遅延が大きくなると考える。

通信性能の評価では、実アプリケーション上で mROS 2-POSIX は ROS 2 よりも高速で動作することが示された。また、mROS 2-Wasm は Classic インタプリタでコンパイルされた場合、遅延がほかの環境よりも大きくなることが示された。

図 6.3 と表 6.4 から、mROS 2-POSIX は ROS 2 と比べてメモリ消費量が少ないということがわかった。これは mROS 2-POSIX が ROS 2 で実装されているアプリケーションでも軽量なランタイムとして機能しているということを示している。また、mROS 2-Wasm は ROS 2 と比べてメモリ消費量が少ないということがわかった。そして、mROS 2-Wasm は mROS 2-POSIX と比べてメモリ消費量が大きいということがわかった。これは、mROS

2-Wasm がネイティブの ROS 2 よりもメモリ消費量が少なく, WebAssembly 上で実アプリケーションのノードを実行することができる環境であることを示している.



## 第 7 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.

## 第 8 章

# 結論

本章では、本研究のまとめと今後の課題について述べる。

### 8.1 まとめ

本研究では、クラウドロボティクスにおける実行状態を持つ ROS ノードの動的配置機構の実現後に、mROS 2-POSIX と mROS 2-Wasm と ROS 2 上で実アプリケーションを動作させ、その性能を比較評価することで、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た。

先行研究で実現した mROS 2-Wasm や mROS 2-POSIX に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っており、実アプリケーション上での有用性が十分に評価されていなかった。本研究で、動的配置機構実現後のアプリケーションとして、組込み用デバイスで動作することができるアプリケーションかつ、Pub/Sub 通信のみを使ったアプリケーションである条件を満たしているノード実装として、ROS 2 にすでに実装されているラズパイマウスで、ライントレースを行うノードを mROS 2-POSIX と mROS 2-Wasm に移植し、通信性能とメモリサイズの評価を実施した。

結果として、通信性能は mROS 2-POSIX、mROS 2-Wasm が ROS 2 からのメッセージを Subscribe する/light\_sensors トピックにおいて、mROS 2-POSIX が最も高速で、次に ROS 2、最後に mROS 2-Wasm であった。このトピックでは、mROS 2-Wasm が他の環境と比べて非常に遅延が大きくなった。mROS 2-POSIX と mROS 2-Wasm が ROS 2 にメッセージを Publish する/cmd\_vel トピックにおいては、mROS 2-POSIX が最も高速で、次に ROS2、最後に mROS 2-Wasm であった。しかし、トピック/light\_sensors の時と比べて mROS 2-Wasm の遅延はほかの環境と大きく差がなかった。

メモリサイズの比較では、RSS は ROS 2 がもっとも大きく、次に mROS 2-Wasm、最後に mROS 2-POSIX であった。

考察として、通信性能は、mROS 2-POSIX は実アプリケーション上でも高速に動作する

ことができることが示され、mROS 2-Wasm が Classic インタプリタでコンパイルされた場合、遅延が大きくなることが示された。

メモリサイズの比較では、mROS 2-POSIX が実アプリケーションを用いても ROS 2 よりメモリ消費量が圧倒的に少なく、mROS 2-Wasm も Wasm 分オーバーヘッドが増加した場合でも、ROS 2 の RSS より小さくなることが示された。

## 8.2 今後の課題

今後の課題は、柿本らの mROS 2-Wasm で JIT, AOT の両方のコンパイルを実施し、そのバイナリファイルを用いて性能を評価することである。

先行研究での評価実験の際から、mROS 2-Wasm が JIT, AOT コンパイル後、ノードを立ち上げることができないという問題があった。そのため、Classic インタプリタでコンパイルしたノードを実行することで通信性能の評価を実施した。しかし、Classic インタプリタでコンパイルしたノードは、AOT コンパイルしたノードに比べて通信の遅延が非常に大きくなったため、JIT, AOT コンパイルしたノードをもとに通信性能を評価することが必要である。

メモリサイズの評価の際に、mROS 2-Wasm の RSS が非常に大きくなった。これは Wasm のオーバーヘッドが影響していると考えるが、比較対象として ROS 2 を Wasm 化し、再度評価することで、mROS 2-POSIX を Wasm 化することで、オーバーヘッドはどのくらい減少させることができるのか示すことができる。

また、mROS 2-Wasm には保存・復元機能が実装されていない。管らの研究で ROS 2 の動的配置機構が実現されたが、mROS 2-POSIX にスレッド操作等の処理が含まれているため、WAMR の実行状態を保存、復元する機構をそのまま適用することができる。大学院進学後は、スレッド操作等の処理を含む場合の実行状態の実態や、その扱いについて調査し、動的配置機構を実現することでアーキテクチャ中立な ROS ランタイム実行状態を異種デバイス間でマイグレーションすることを目指す。

## 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, [urlhttp://wiki.ros.org/ROS/Introduction..](http://wiki.ros.org/ROS/Introduction..) (Accessed on 01/23/2024)
- [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>. (Accessed on 01/24/2024)
- [10] Fastrtps ros index <https://index.ros.org/r/fastrtps/>. (Accessed on 01/24/2024)
- [11] RTI Connnext DDS, <https://www.rti.com/en/>. (Accessed on 01/24/2024)
- [12] Micro XRCE-DDS, <https://micro-xrce-dds.docs.eprosima.com/en/latest/index.html>. (Accessed on 01/25/2024)
- [13] Eclipse Cyclone DDS, <https://cyclonedds.io/>. (Accessed on 01/25/2024)
- [14] Gurum DDS, [https://gurum.cc/index\\_eng](https://gurum.cc/index_eng). (Accessed on 01/25/2024)

- [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>. (Accessed on 01/25/2024)
- [16] “micro-ROS — ROS 2 for microcontrollers,” <https://micro.ros.org/>. (Accessed on 01/25/2024)
- [17] “embeddedRTPS”, <https://github.com/embedded-software-laboratory/embeddedRTPS>. (Accessed on 01/25/2024)
- [18] “lwIP”, <https://savannah.nongnu.org/projects/lwip/>. (Accessed on 01/25/2024)
- [19] “TOPPERS/ASP3 kernel”, <https://www.toppers.jp/asp3-kernel.html>. (Accessed on 01/25/2024)
- [20] “POSIX”, <https://ibm.com/docs/ja/zos/2.5.0?topic=ulero-posix>. (Accessed on 01/25/2024)
- [21] “CMSIS-POSIX”, <https://www.keil.com/pack/doc/CMSIS/RTOS2/html/index.html>. (Accessed on 01/25/2024)
- [22] “Raspberry Pi Mouse”, <https://rt-net.jp/products/raspberrypimousev3/>. (Accessed on 01/25/2024)
- [23] “2023 ROS Metrics Report”, <https://discourse.ros.org/t/2023-ros-metrics-report/35837>. (Accessed on 01/25/2024)
- [24] WebAssembly, <https://webassembly.org/>. (Accessed on 01/25/2024)
- [25] WASI, <https://wasi.dev/>. (Accessed on 01/25/2024)
- [26] bytecodealliance/wasm-micro-runtime (wamr) , <https://github.com/bytecodealliance/wasm-micro-runtime#>. (Accessed on 01/25/2024)