

複数台分散ロボットサービスのための IoT/IoR プラットフォームの実現に向けて

菅谷 みどり^{†1,2} 小野 健也^{†2} 寒竹 俊之^{†2}
劉 一帆^{†2} 長島 聡志^{†1} 小泉 亘平^{†1}

概要: 近年、複数台のロボットを連携したサービスは様々な場面での活用が期待されている。こうしたサービス現場においては、効率性と信頼性の高い通信方法、また、サービスにおいては送信受信するデータの通信要求が異なる環境での緊急データの帯域確保、接続ノードの電源管理を伴う省電力化、コンテキストに応じた振る舞いなどの支援が課題となる。本研究では、これらの課題に対して、自律分散ロボットを統合管理する IoT/IoR プラットフォームを提案する。それぞれの課題に対して、どのような解決策がありえるかについて議論した内容について述べる。

IoT/IoR Platform Supporting for the Distributed Autonomic Robots with Integrated Management System

MIDORI SUGAYA^{†1} KENYA ONO^{†1} TOSHIYUKI KANTAKE^{†1}
LIU YIFAN^{†1} SATOSHI NAGASHIMA^{†1} KOUHEI KOIZUMI^{†1}

Abstract: In recent years, services that cooperate with multiple robots are expected to be utilized in various situations, such as a communication method with high efficiency and reliability, and communication in data transmission and reception Support for bandwidth conservation of emergency data in different environments, power saving accompanied by power management of connected nodes, support for behavior according to context, etc. In this research, autonomous distributed robot IoT / IoR Platform that integrates and manages the problems of each task, and discusses the contents of discussion on what kind of solution can be made for each problem.

1. はじめに

近年、安価なロボットの普及や無線への接続の普及により、複数のロボットを連携するサービスが検討されている。人間とのコミュニケーションを目的としたロボットでは、フロア案内をするなどにより、人的資源が限られた店舗において、待ち行列の緩和などが期待できる。また、災害現場においても、自律分散ロボットの利用により、効率的な探索が期待されている[1-4]。このように、複数台のロボットを連携したサービスは様々な場面での活用が期待される。

複数台のロボットを利用したサービスにおいては、ロボットを利用したサービス提供者とロボット自身の間で密な通信が不可欠である。サービス提供者側は、個々のロボットを管理するために、その情報収集が必要となる。ロボットは、自律制御がある、ないに関わらず、移動や会話など、動的に変化する環境へのリアルタイムでの応答が求められることから、その目的の達成についてデータを効率よく収集して直ぐに提供するサービスの内容を素早く決定するという要求は、システム構成上自然な要求である。

サービス現場においては、ロボットは無線であることが望ましい。一方、近距離無線環境において、ロボットが接続するサーバとのアクセスについて様々な通信方法は存在するが、ロボットの特性を考慮した効率性と信頼性の高い通

信形態は何かについては、まだ十分な評価や議論が行われていない。また、ロボットは介護施設や災害現場でサービスを主に提供することから、緊急事態に対して同時に送信するデータの強制的な停止を伴わずに緊急のデータを即座にサーバに送信するための、緊急データの帯域確保などの技術が必要となる。さらに、接続ノードの電源管理を伴う省電力化、コンテキストに応じた振る舞いを支援し、複雑化するプログラムの再利用性を高めるなどの課題がある。

本論文では、複数台の自律ロボットがネットワークを介して接続し、統合管理するための IoT/IoR プラットフォームに対する課題抽出と解決の展望について述べることを目的とする。IoT とは Internet of Things の略でモノをインターネットに接続し、センサから取得した計測データや、制御データの通信により、サービスを実現する仕組みであるが、我々はさらに自律ロボットにこうした仕組みを適用させ、管理手法を確立することで、より多くの自律ロボットのサービスを利用可能とすることができると考えた。特に、IoR とは Internet of Robots を意味する造語で、Internet of Things と同様、インターネットに接続した自律ロボットの統合管理の手法について議論することを目的としている。

本論文の構成は以下の通りである。まず、2 節で主な課題を課題と提案技術について述べる。また、3 節にてまとめと今後の課題について述べる。

^{†1} 芝浦工業大学 工学部情報工学科

^{†2} 芝浦工業大学院 理工学研究科 電気電子情報工学専攻

2. IoT/IoR プラットフォームの課題と展望

はじめに述べたように、複数台ロボットをネットワークに接続し、自律動作を前提として利用するサービス現場で、ロボットによる無線通信や、異なるサービス要求を満たすことを目的とした場合

- (1) データ共有の効率性と信頼性の高い通信の実現
- (2) 緊急データの送信時の帯域確保
- (3) 省電力化と総電力管理
- (4) プログラムの再利用性

といった課題がある。まず、(1)については、様々な手法が提案されている一方、ロボットの特性を考慮した具体的な評価や議論はまだ十分ではない[2-4]。また、これらが達成された場合、送信受信するデータの通信要求が異なる環境において、同時に送信するデータの強制的な停止を伴わずに緊急のデータを即座にサーバに送信するための、(2)緊急データの帯域確保が必要となる。特に、ロボットが担う役割は、人とのインタラクションを含むものであることも考えられることから、この機能はとても重要である。さらに、(3)接続ノードの電源管理を伴う省電力化、(4)コンテキストに応じた振る舞いを支援し、複雑化するプログラムの再利用性を高めるなどの課題がある。

2.1 分散システムのデータ共有における効率性と信頼性

複数台ロボットのサービスは、医療現場から災害現場など、広範囲にわたる。自律的な動作でサービスを提供すること前提とした場合、無線通信を行うことを前提として研究をすることが重要である。特に、災害現場などで、ロボットが分担して行方不明者の探索活動を行う場合、探索者データの共有などが重要となる。現場においては、並列的にこれらのロボットを中央のアクセスポイントに対し配置し、アクセスポイントをサーバとし、そのまわりの複数台をクライアントとして、後者がサーバを中心に従属するネットワークシステムを導入し、ソフトウェアで処理を支援することで、効率的に一定距離のデータ共有と自律動作のシステムを実現する。

データ共有の効率性と信頼性が課題の解決に向けて、まず我々は非同期分散型の情報共有を可能とする ROS に着目した。同期型通信については、すでにマルチキャストや、ブロードキャストといった一斉同報型通信方法がある。これらは、サーバからノードに対して、セグメントやグループを定義した上で、一斉にデータ共有をできる反面、相手ホストの状況は不明であり、そのデータ配信の状況については把握できず、効率性がある一方、ホストが反応できなかった場合のデータの取りこぼしの可能性など信頼性の問題がある。ROS が提供する、非同期型通信では送信元が、送信先の状況を把握できない点で一致して

いるが、ホスト側が自分の好きなタイミングで情報を取得することができることから、同期方式による取りこぼしの可能性を低減することができる考えた。

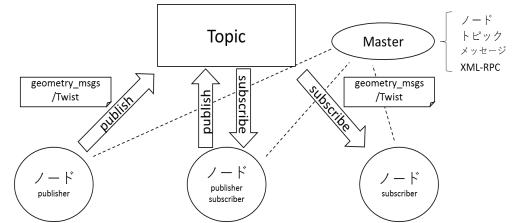


図1 Publisher/Subscriber モデル

また、本研究では、ROS の基礎的な評価がまだ十分ではないことから、基礎的な調査を行った。比較のため、ブロードキャストを用い、Publisher/Subscriber モデルの送信開始から受信終了までの時間を計測、Publisher/Subscriber モデルのネットワーク性能評価を行った (Intel Core i3 2.1GHz, メモリ 4GB の PC で OS は Ubuntu14.04LTS ROS のバージョンは indigo) とした。

2.2 計測区間

ブロードキャスト方式と Publisher/Subscriber モデルそれぞれの計測区間を図2に示す。

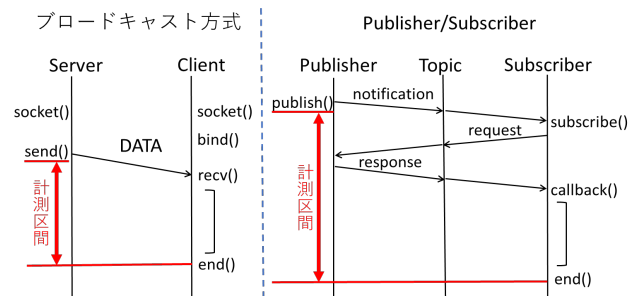


図2 計測区間

3. 3 結果

ブロードキャスト方式と Publisher/Subscriber モデルについて、800 回の計測時間の平均値、標準偏差値、受信不可数を表1に、送受信時間のヒストグラムを図3、図4に示す。

表1 データ共有時間の比較 (単位: ms)

	平均値	標準偏差値	受信不可数
ブロードキャスト方式	196.8	3.5	6
Publisher/Subscriber	465.9	289.0	0

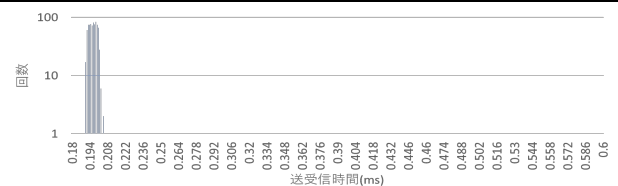


図3 ブロードキャスト: 送受信時間のヒストグラム

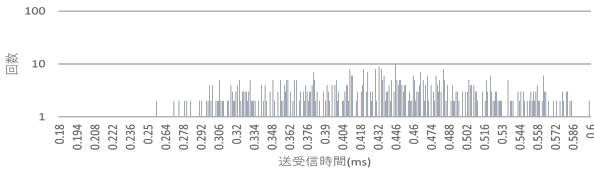


図4 Publisher/Subscriber: 送受信時間のヒストグラム

実験結果より, 効率性の点ではブロードキャスト方式のほうが優れているが, Publisher/Subscriber モデルは受信不可数がないため信頼性が高いといえることがわかった. ブロードキャストは, 実装されていることから, 取りこぼしや, 応答がない場合も送信することから, 災害現場など取りこぼしを減らしたいデータ共有にあたっては, 信頼性の高い ROS を用いることが今後重要となると考えられる.

2.3 ノードへの帯域保証

医療現場や災害現場においては, ロボットは定期的なモニタリングといった人の作業の代理を行う一方, 人命に関わる場合には即座に通報するといったサービスを提供することが考えられる. こうした場合において, ネットワーク負荷によらず, 緊急データの送信に対して帯域確保を行う方法を明らかにすることが重要となる.

ネットワーク全体の流量や帯域制御については, すでにルータレベルの QoS 機能などが数多く研究されている[3]. しかし, これらはマシンごとの帯域制御であり, アプリケーションごとに特定することは困難である. そこで我々はネットワーク負荷に応じたアプリケーションごとの帯域制御資源量計算と, OS レベルでプロセスごとの送信バッファ制御を動的に行うミドルウェアを提案するものとした. 本提案では, クライアントが送信するデータに対して, 予めサービスに応じて付与された優先度で通信制御を行う機構を提供する. サービスはアプリケーションごとに提供され, OS 上ではプロセスとして実行されることから, プロセス単位でサービスを扱うことを可能とした(図5).

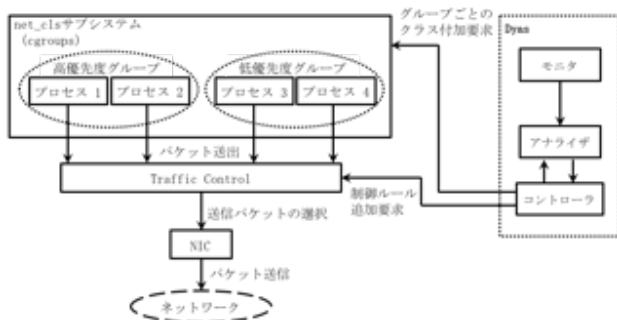


図5 OS レベルでの送信バッファ制御を実現するアプリケーションごとの QoS 制御システム

評価に先立ち, 単一のマシンで優先度の異なる複数のプロセスを動作させてデータ送信を行う環境を想定し, ネットワーク負荷をかけた場合の動作を確認することを目的と

して, シミュレーションツールおよび視覚化ツールを設計, 実装し, 実験を行った. 優先度ごとのレスポンスタイムの平均, 標準偏差, 最悪値を表2に示す. レスポンスタイムの平均はいずれの優先度も目標のレスポンスタイムに対して5%以内の範囲であった.

表2 優先度ごとのレスポンスタイム比較

	目標 RT [sec]	平均 [sec]	標準偏差	最悪値 [sec]
高優先度	0.1	0.104	0.020	0.132
低優先度 1	1	1.032	0.057	1.102
低優先度 2	1	1.044	0.120	1.274

第1縦軸はレスポンスタイム, 第2縦軸はネットワーク負荷, 横軸は経過時間を示している. シミュレーション開始後の初回とネットワーク負荷が0%の時, 途中ネットワーク負荷を最大約20%かけた時, 最後, 再びネットワーク負荷を0%に下げた時の帯域制御の結果となっている.

2.4 省電力

電力削減に関する研究は, 動作電圧・周波数の制御を行う DVFS (Dynamic Voltage and Frequency Scaling) [5]や, 軽量化や回路の効率化, 半導体を使って電力を制御する PWM (Pulse Width Modulation) など様々行われている. これらの削減手法は, 主にハードウェアに実装されることが効果的であることから, 個々のロボットの消費電力の削減には効果的であると考えられるが, 現場に複数台のロボットがある場合に, これらの不効率な電力消費を発見して削減するといった管理目的で利用することは困難である.

また, ソフトウェア側からの時間特性に着目したタスクスケジューリング手法などの省電力手法も数多くなされている[8]が, 出荷後のロボットの動作特性に合わせて電力量を削減する手法については, まだ十分に議論されていない[9]. 本課題に対して我々は, 複数台のロボットの電力消費傾向を把握し, その傾向をもとに最適化を動的に行うことで総電力を削減する手法を提案することを目的とした. 実現のために, ハードウェアの消費特性と, 稼働状況の差異を反映した予測モデルを構築し, そのモデルをもとに, 複数台ロボットの総電力を予測できるようにした. また, 予測モデル上に不効率なロボットの個体を検出した場合, 仕事の割り振りの変更で総電力を削減する.

2.5 再利用性の向上: COP フレームワークの適用

ここまでの構成では, 集中型のトポロジーであるクライアント/サーバ(C/S)の構成を複数台ロボットの管理構成として検討した. こうしたC/Sの構成はネットワークが常に定常的に利用でき, かつ, クライアントがいつでもサーバにアクセスすることが前提とされている. しかし, 分散したロボットは外で, 物理的な制約や無線通信などの機構も十分ではない中で, サービスを実現する必要があることが

ら、サーバに必ずしも常にアクセスすることが困難である。こうした場合、物理的に近いクライアント同士が、データ共有をすることが望ましい場合も多い。C/S 構成ではクライアント同士のデータの共有は基本的に認められておらず、構造的にサーバを介したデータ共有を行う必要がある。データ共有の必要がクライアント間だけの場合でもサーバを介す分だけ通信に無駄があるといえる。

一方、サーバを介さずにクライアント間のデータを共有する場合、クライアント間で何らかの方法で、通信チャネルを確立し、コネクションをつなぐ必要がある。しかし、データの共有のたびにクライアント間で逐一コネクションをすることは不効率である。本課題に対して、ROS を適用することにより、データ共有の改善が考えられる。

ROS は node 間 (例のシステムの場合ロボット間) を topic 介してのデータ共有を行うことで通信ごとのコネクション確立が不要となり、topic ごとに受信するデータを特定することも容易である。一方、前述のシステムではクライアントに当たるロボッ node が増えると注文の情報である topic の数が増える。例えば、ロボット 1 台の publisher に対し、ロボットが個別に subscriber を持つ必要がある。その結果、1 台のロボットが多数の subscriber を持つことになり、ロボットのシステムの複雑さ、負荷、が大きくなると考えられる (図 6)。

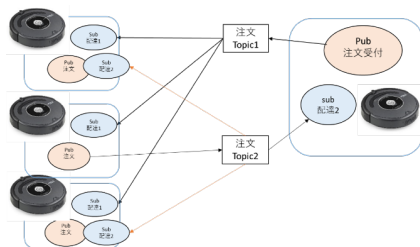


図 6 ROS を用いたサービスの課題

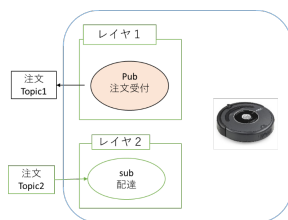


図 7 COP レイヤの適用

本提案では、ROS において膨大な topic を制御する際に複雑化するプログラムの課題に対して、COP (Context Oriented Programming) を用いた解決策を提示することを目的とする [7]。COP はコンテキストに応じた処理を、レイヤという単位でまとめ、レイヤをコンテキストに応じてアクティブ/ディアクティブさせることで動作を変える [6,7]。ここでは、コンテキストは各 topic から subscriber が取得したデータや、ユーザからの注文などがある。このコンテキ

ストに応じたレイヤを判定して topic へのアクセスを制限する。レイヤごとに subscriber へのアクセスを制御し (レイヤの数 L-to-M) のモデルにすることで、M-to-M のモデルであった一つの publisher に対してすべてのロボットが subscriber を持つ必要があった問題を解決できると考える。

3. まとめと今後の課題

複数台のロボットについて (1) 効率性と信頼性の高い通信をどのように行うか (2) 緊急データの帯域確保 (3) 接続ノードの電源管理を伴う省電力化、(4) コンテキストに応じた振る舞いを支援し、複雑化するプログラムの再利用性を高めるなどの課題と解決策の方向性について述べた。今後、これらの 4 つの課題とその統合に向けて、さらに個々の要素技術の研究および開発を推進する予定である。

謝辞

本研究への数多くの助言を頂いた産業技術大学院大学の中野美由紀教授、東京農工大学並木美太郎教授、東海大学渡辺晴美教授、クックパッド株式会社の笹田耕一氏に感謝します。本研究は、JSPS 科学研究費 15K00105 の助成を受けて実現しました。

参考文献

- [1] Satoru Nakayama, Miyuki Nakano, Atsushi Hoshina, Midori Sugaya. Responsible Server for Distributed Care Robots System. The First International Workshop on Smart Sensing Systems (IWSSS'16), Hiroshima, Japan, 28 November, 2016.
- [2] 徳田 一. “レスキューロボットに見る災害対応の取り組み”, 和歌山大学防災研究教育センター紀要, 第 1 号, 2015 年 3 月
- [3] 杉山久佳, 辻岡哲夫, 村田正. “ネットワーク化された群ロボットによる被災者発見システム”. 情報処理学会論文. 2005, Vol. 46, No. 7
- [4] Murphy R., Casper J., Micire M. and Minten B., “Mobility and Sensing Demands in USAR”, IECON2000, Vol.1, pp.138-142
- [5] Morgan Quigley, et al. “ROS: an open-source Robot Operating System”. ICRA Workshop on Open Source Software. 2009
- [6] Gennaro Boggia, Pietro Camarda, Luigi Alfredo Grieco and Saverio Mascolo. Feedback-Based Control for Providing Real-Time Services With the 802.11e MAC, IEEE · ACM TRANSACTIONS ON NETWORKING, Vol.15, No.2, pp.323-333, April 2007.
- [7] 石川圭也, 妙中雄三, 中山雅哉. “レスポンスタイムを一定時間内とするための帯域使用率に基づくフロー間優先制御方式の提案と評価”. 電子情報通信学会技術研究報告 SITE 技術と社会・倫理, Vol.112, No.488, pp.127-132, 2013.
- [6] Róbert Hirschfeld, Pascal Costanza, Oscar Nierstasz, “Context-Oriented Programming”. Journal of Object Technology. 2008, 7(3), p.125-151.
- [7] Harumi Watanabe, Midori Sugaya, Ikuta Tanigawa, Nobuhiko Ogura, Kenji Hisazumi, Proceedings of the 7th International Workshop on Context-Oriented Programming Article No. 4
- [8] 高須雅義, 上田陸平, 藤井啓, 千代浩之, 松谷宏紀, 山崎行. “組込みプロセッサにおける省電力機構の実機評価”, 組込みシステムシンポジウム 2012, 2012, p.79-p.86
- [9] 仲川幸子, 成田雅彦, 土屋陽介, 加藤由花. “クラウドロボティクスにおけるロボットの消費電力を考慮したタスク分散処理”. マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2013) シンポジウム. 2013. p.3-p.10