

令和 3 年 6 月 8 日現在

機関番号：14301

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2020

課題番号：18K18024

研究課題名（和文）電力効率と設計生産性に優れたロボットシステムの実行基盤技術および設計方法論

研究課題名（英文）A runtime environment and design methodology for improvements of energy efficiency and productivity of robot systems

研究代表者

高瀬 英希（Takase, Hideki）

京都大学・情報学研究科・准教授

研究者番号：50633690

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：電力効率とリアルタイム性に優れたモバイル型サービスロボットシステムの実現を支える基盤技術を確立した。ヘテロジニアスSoCの搭載された組み込みデバイスの活用に着目し、省電力性およびリアルタイム性の向上に適したROSノードの軽量実行環境であるmROS、および、ロボットシステムのSW/HW協調設計を効率的に実現する統合開発プラットフォームであるZytleBotに関する研究成果を挙げた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、ヘテロジニアスSoCの搭載された組み込みデバイスにおいて、電力効率とリアルタイム性に優れたロボットシステムを探索した。ロボットシステムのための実行プラットフォーム技術およびシステムレベルの設計方法論を並行的に確立したことで、次世代の情報社会を支える新たなサービスロボット・アプリケーションの創出機会を提供できると考える。

研究成果の概要（英文）：This research project have established a fundamental technology that realizes mobile service robot systems with power efficiency and real-time performance. Focusing on the utilization of embedded devices equipped with heterogeneous SoC, we proposed mROS, which is a lightweight runtime environment for ROS nodes for improving power saving and real-time performance, and ZytleBot, which is SW/HW co-design platform for developing robot systems.

研究分野：組み込みシステム

キーワード：組み込みシステム ロボティクス 通信ミドルウェア 協調設計 FPGA 分散システム

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

生活支援や介助支援、災害救助の現場など、我々の社会生活において所望のサービスを提供するモバイル型サービスロボットの開発が活発になっている。これらのロボットは、これまで開発されてきた有線接続の外部電源で動作する産業用ロボットとは異なり、内部電源によって動作することが求められる。また、様々な制約のもとでの高度かつ多機能なサービスを要求される。このため、モバイル型サービスロボットが提供するサービス品質の向上には、省電力化の実現が求められる。

本研究計画で特に着目した ROS ( Robot Operating System ) は、ロボットシステムの開発支援のために近年ひろく普及しているフレームワークである。ROS ではソフトウェア部品をノードとして表現し、複数ノードを組み合わせるコンポーネント指向開発によって所望のロボットシステムを実現できる。ROS は出版購読型のノード間通信を提供するミドルウェアの役割も担っている。ただし、ROS は汎用 Linux および高性能なデバイスの利用を想定した設計であるため、省電力化およびリアルタイム性の確保が困難となる。

いっぽう、組み込みシステム分野では、複数の計算資源を 1 チップに集積したヘテロジニアス SoC が台頭している。この計算資源としては、プロセッサ、FPGA およびアナログ回路がある。ロボットシステムには、画像認識や自己位置推定など再構成可能なハードウェアである FPGA に適した並列化可能な処理が数多く存在する。ROS の通信制御についても高い応答性が求められ、これらの処理において FPGA は性能対電力効率の向上が期待できる。外界環境との入出力を担うアナログ回路は、実世界との連続値によるインタラクションによってサービス提供を実現するロボットには必須の計算資源である。ただし、ヘテロジニアス SoC を活用した組み込みシステム設計では、計算資源ごとに異なる知識と技術が設計者に要求される。このため、システムレベル設計の観点からは設計生産性 ( 設計工数や費用に対するシステム性能と機能価値の割合 ) の向上が課題となる。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、電力効率とリアルタイム性に優れたモバイル型サービスロボットシステムの実現を支える基盤技術を確立することである。ヘテロジニアス SoC の搭載された組み込みデバイスの活用に着目し、電力効率とリアルタイム性に優れたロボットシステムを探求する。省電力性およびリアルタイム性の向上に適した ROS ノードの軽量実行環境について議論する。加えて、設計生産性の向上を目指し、ロボットシステムのためのシステムレベル設計について議論する。ここでのシステムレベルとは、要求されるサービスの提供のために構成される分散ロボットシステムの全体を指す。このようなロボットシステムのための実行プラットフォーム技術およびシステムレベルの設計方法論を並行的に確立できれば、次世代の情報社会を支える新たなサービスロボット・アプリケーションの創出機会を提供できると考える。

### 3. 研究の方法

本研究の目的を達成するためのキーアイデアは、ROS を基盤とした組み込みデバイス向け実行環境およびヘテロジニアス SoC の積極活用を推進するシステムレベル設計手法である。具体的には、次の 2 点の研究項目を掲げて実施した。

#### 研究(A) 組み込みデバイス向け ROS ノードの省電力かつ軽量の実行環境

リアルタイムカーネルを柱とした組み込みデバイスにおける ROS ノードの実行プラットフォーム技術を構築する。ROS 通信については、TCP/IP をサポートする組み込み向け軽量プロトコルスタックを採用する。また、ROS ノードをリアルタイム OS 上のタスクとして資源管理するカーネル技術を研究開発し、ROS ノード実行の省電力化ならびにリアルタイム性の向上のための機能強化を実現できるようにする。具体的には、ROS ノードの振る舞いに適した省電力リアルタイムスケジューリング理論、および、ROS の出版購読型通信に特化したタスク間同期・通信手法に取り組み。これらの ROS ノードに関する資源管理を担う実行環境を構築して活用することで、組み込みデバイスを活用した省電力かつ軽量のロボットシステムを実現する。

#### 研究(B) 分散型ロボットシステムのためのシステムレベル設計技術

複数の計算資源が混載されたヘテロジニアス SoC を対象として、ソフトウェア志向による高い抽象度の記述から、FPGA のハードウェアおよびアナログ回路のドライバを自動合成できる協調設計環境を開発する。本環境では、各計算資源の構造や処理タイミングは意識させず、アプリケーション全体を標準的なプログラミング言語で設計できるようにする。各計算資源への処理配置やデータ通信方式の指定は構成記述によって与える。設計および指定に対応した ROS ノードを合成するために、配置先に適応した設計記述の最適化およびデータ量に応じた通信機構の

効率化を実現する。

#### 4. 研究成果

研究項目(A)の主要な成果としては、mROS と呼ぶ組み込みデバイス向け軽量実行環境に関する研究開発の成果を挙げた。本成果は、中規模の組み込みマイコンにおいて、ROS の通信機構を活用できる実行プラットフォーム技術である。特に本研究では、効率的な出版購読型通信のためのタスク間同期・通信手法、および、ROS のソフトウェア開発において独自の型定義を可能とする Message Type の対応に取り組んだ。他の組み込み向け ROS ノード実行環境との比較評価を実施し、我々の提案手法の有効性を定量的に立証した。本成果は、情報処理学会の英字論文誌や国際会議 HEART や APRIS において採択され、発表・出版された。また、システム設計技術分野で著名な国際会議 ASPDAC2019 において招待講演を実施した。

電力効率とリアルタイム性に優れた ROS ノードの省電力リアルタイムスケジューリング理論としては、エリアカバレッジタスクにおける移動ロボットの動作計画決定手法の研究に取り組んだ。自律走行型移動ロボットを対象として、その回転動作を考慮しつつ、与えられたタスクの達成時間を最小化するアルゴリズムを開発した。移動ロボットの行動計画決定アルゴリズムについては、国際会議 APRIS2018 における Outstanding Paper、および、組み込みシステムシンポジウム 2018 における優秀論文賞を受賞した。

研究項目(B)については、まず、研究題材であるモバイル型サービスロボットの整備に取り組んだ。提案者のこれまでのロボットシステム開発の経験を活かしながら、ヘテロジニアス SoC を採用した組み込みデバイスを搭載する自律走行型移動ロボットを開発した。Zyt leBot と名付けた本ロボットは、組み込みプロセッサと FPGA が密結合されたヘテロジニアス SoC を採用しており、ROS のエコシステムの恩恵を活用しながら、FPGA の利点を活用することができる。この取り組みを通して、電力効率とリアルタイム性に優れたサービスロボットを実現するための要件定義を明らかにした。

続けて、ROS と FPGA の統合開発を推進する統合開発プラットフォームの研究開発に取り組んだ。本研究成果は、ソフトウェア志向の設計記述を入力として、FPGA 向けの HW 回路および ROS ノードから HW 回路を管理するためのドライバ機構を自動的に生成することができる。本成果を自律走行型移動ロボットの開発に適用し、研究成果が電力効率とリアルタイム性に優れたサービスロボットの実現に寄与できることを明らかにした。

同時に、プロセッサおよび FPGA が密結合されたシステムアーキテクチャにおけるアプリケーションの高速化事例に取り組んだ。対象としてベイジアンネットワークの構造学習処理に着目し、FPGA 上に構成される演算回路を繰り返し利用できるようにすることで、アプリケーションの高速化および電力効率の向上に寄与できることを明らかにした。

本研究の成果については、FPGA 設計技術の国際会議である FPT や FPL を始めとして多数の国際会議、展示会、国内研究会発表を実施した。特に研究成果を応用して開発した自律移動型ロボットは、FPGA の設計技術に関する国際会議 FPT'18 および HEART2019 に併設された FPGA Design Competition において 1st Prize を続けて受賞した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 祐源英俊, 高瀬英希	4. 巻 62
2. 論文標題 ROSノード軽量実行環境mROSのユーザ定義メッセージ型の対応のための機能拡張	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 情報処理学会論文誌	6. 最初と最後の頁 917-930
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.20729/00210259	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takase Hideki, Mori Tomoya, Takagi Kazuyoshi, Takagi Naofumi	4. 巻 28
2. 論文標題 mROS: A Lightweight Runtime Environment of ROS 1 nodes for Embedded Devices	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Information Processing	6. 最初と最後の頁 150 ~ 160
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2197/ipsjjip.28.150	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計24件（うち招待講演 4件/うち国際学会 14件）

1. 発表者名 Yasuhiro Nitta and Hideki Takase
2. 発表標題 An FPGA Accelerator for Bayesian Network Structure Learning with Iterative Use of Processing Elements
3. 学会等名 2020 International Conference on Field-Programmable Technology (ICFPT) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 祐源英俊, 高瀬英希
2. 発表標題 リアルタイムOSによるROSノード軽量実行環境の定量的評価
3. 学会等名 情報処理学会 第56回組込みシステム研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 新田泰大, 高瀬英希
2. 発表標題 ベジアンネットワーク構造学習の演算回路の繰り返し利用によるFPGAアクセラレータ
3. 学会等名 電子情報通信学会 リコンフィギャラブルシステム研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 高瀬英希
2. 発表標題 ROS (Robot Operating System) の紹介とIoT/IOT分野への展開
3. 学会等名 RICC-PIoT workshop 2021 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yasuhiro Nitta, Sou Tamura, Hidetoshi Yugen and Hideki Takase
2. 発表標題 ZytleBot: FPGA Integrated Development Platform for ROS Based Autonomous Mobile Robot
3. 学会等名 2019 International Conference on Field-Programmable Technology (ICFPT) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hidetoshi Yugen, Hideki Takase, Kazuyoshi Takagi and Naofumi Takagi
2. 発表標題 A functionality expansion of the lightweight runtime environment mROS for the user defined message types
3. 学会等名 Asia Pacific Conference on Robot IoT System Development and Platform (APRIS) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroi Imanishi, Hideki Takase, Kazuyoshi Takagi and Naofumi Takagi
2. 発表標題 Supporting TOPPERS/ASP3 Kernel to mROS to Improve its Capability
3. 学会等名 Asia Pacific Conference on Robot IoT System Development and Platform (APRIS) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yasuhiro Nitta, Sou Tamura and Hideki Takase
2. 発表標題 ZytleBot: FPGA integrated development platform for ROS based autonomous mobile robot
3. 学会等名 29th International Conference on Field Programmable Logic and Applications (FPL) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yasuhiro Nitta, Sou Tamura and Hideki Takase
2. 発表標題 FPGA integrated development platform for ROS based autonomous mobile robot,
3. 学会等名 International Symposium on Highly-Efficient Accelerators and Reconfigurable Technologies (HEART) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hideki Takase, Tomoya Mori, Kazuyoshi Takagi and Naofumi Takagi
2. 発表標題 mROS: A Lightweight Runtime Environment for Robot Software Components onto Embedded Devices
3. 学会等名 International Symposium on Highly-Efficient Accelerators and Reconfigurable Technologies (HEART) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hideki Takase
2. 発表標題 the 19th International Forum on Embedded MPSoC and Multicore (MPSoC '19)
3. 学会等名 mROS: How to Integrate ROS Components into Embedded Devices (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 新田泰大, 高瀬英希, 高木一義, 高木直史
2. 発表標題 SWORDSフレームワークにおけるSW/HW通信方式の自動選択に向けた検討
3. 学会等名 電子情報通信学会リコンフィギャラブルシステム研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 矢野泰生, 高瀬英希, 高木一義, 高木直史
2. 発表標題 エリアカバレッジタスクにおける回転動作を考慮した移動ロボットの動作計画決定手法
3. 学会等名 情報処理学会組込みシステムシンポジウム2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 田村爽, 新田泰大, 高瀬英希
2. 発表標題 ZytleBot: ROSxFPGAを実現するロボット開発プラットフォーム
3. 学会等名 第20回 組込みシステム技術に関するサマールワークショップ
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 今西洋偉, 祐源英俊, 松井健太郎, 高瀬英希
2. 発表標題 ロボットソフトウェア軽量実行環境mROSの最新状況と今後のロードマップ
3. 学会等名 第20回 組込みシステム技術に関するサマールワークショップ
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高瀬英希, 森智也
2. 発表標題 mROS: 組込みデバイス向けのROS1ノード軽量実行環境
3. 学会等名 ROSCon JP 2018 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hideki Takase, Tomoya Mori, Kazuyoshi Takagi and Naofumi Takagi
2. 発表標題 Work-in-Progress: Design Concept of a Lightweight Runtime Environment for Robot Software Components onto Embedded Devices
3. 学会等名 The International Conference on Embedded Software (EMSOFT) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yasuhiro Nitta, Sou Tamura and Hideki Takase
2. 発表標題 A Study on Introducing FPGA to ROS based Autonomous Driving System
3. 学会等名 2018 International Conference on Field-Programmable Technology (FPT 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年



1. 発表者名 Kentaro Matsui, Hideki Takase, Kazuyoshi Takagi and Naofumi Takagi
2. 発表標題 Core State Aware Slack Gathering Scheduling for Embedded Real-Time Systems
3. 学会等名 Asia Pacific Conference on Robot IoT System Development and Platform (APRIS 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Taiki Yano, Hideki Takase, Kazuyoshi Takagi and Naofumi Takagi
2. 発表標題 A motion planning method for mobile robot considering rotational motion in area coverage task
3. 学会等名 Asia Pacific Conference on Robot IoT System Development and Platform (APRIS 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 田村爽, 新田泰大, 高瀬英希, 高木一義, 高木直史
2. 発表標題 ROSベースの自律移動ロボットにおけるFPGA統合開発プラットフォーム
3. 学会等名 電子情報通信学会リコンフィギャラブルシステム研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 新田泰大, 田村爽, 高瀬英希, 高木一義, 高木直史
2. 発表標題 プログラマブルSoCを活用した自動運転ロボットにおける交通信号検出タスクの設計空間探索
3. 学会等名 情報処理学会組込みシステム研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hideki Takase
2. 発表標題 ROS and mROS: How to accelerate the development of robot systems and integrate embedded devices
3. 学会等名 24th Asia and South Pacific Design Automation Conference (ASPDAC 2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hideki Takase, Yasuhiro Nitta and So Tamura
2. 発表標題 mROS and ZytteBot: Design Platforms for Embedded Robot Systems
3. 学会等名 Design, Automation & Test in Europe 2019 (DATE 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------