

令和 4 年 6 月 21 日現在

機関番号：32619

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2021

課題番号：17K00079

研究課題名(和文) Robot Operating System向け文脈指向言語基盤と方法論

研究課題名(英文) Context-Oriented Programming Framework and Methodology for Robot Operating System

研究代表者

久住 憲嗣 (Hisazumi, Kenji)

芝浦工業大学・システム理工学部・准教授

研究者番号：10380685

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本課題では環境適応型ロボットソフトウェアの開発を支援する言語、及び、フレームワークであるContextROSを開発することを目的とした。その成果として(1) ROSのためのCOP環境であるContextROS、(2) 例外が発生した際にレイヤの切り替えを優先的に実行できるCOP実行環境PLAM、(3) 組み込みシステムをターゲットとしたCOP言語、及び実行環境であるRTCOP、(4) 組み込みシステムを意識したステートマシン図をCOP拡張した方法論を提案し、実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ContextROSによりロボットシステム開発デファクトスタンダードであるROSにコンテキスト指向プログラミング(COP)の概念を導入することができた。また、組み込みシステムにCOPを導入した際における課題であった例外処理の処理方法を解決することが出来た。また、従来は難しかった組み込みシステムにCOPを導入することが出来る開発環境と言語、実行環境を実現した。

研究成果の概要(英文)：The goal of this project was to develop ContextROS, a language and framework to support the development of environmentally adaptive robot software. As a result, we have developed (1) ContextROS, a COP environment for ROS, (2) PLAM, a COP execution environment that can preferentially switch layers when an exception occurs, (3) RTCOP, a COP language and execution environment targeting embedded systems, and (4) an extended state machine diagram that aware COP and embedded 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 コンテキストウェアシステム コンテキスト指向プログラミング

1. 研究開始当初の背景

近年、組込みシステムにおいて環境適応型のシステムが求められている。環境に応じた全体書き換えの問題を解決するプログラミング技術として、コンテキスト指向プログラミング (Context-Oriented Programming: COP)がある。図 1 に COP の概念図を示す。COP はコンテキスト (Context) に依存した振る舞いをレイヤとしてモジュール化し、実行時のコンテキストの変化に応じてレイヤを切り替えるプログラミング手法である。COP のレイヤによる振る舞い変更は、コンテキストに依存する横断的関心事を扱うことができるため、サービスの切り替えのみではなく、デバイス故障や通信途絶といった非正常系の処理への適用も有用である。このような非正常系の処理は横断的関心事となり得ることが知られている。

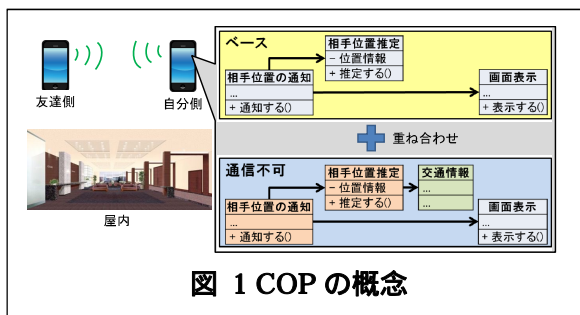


図 1 COP の概念

組込みソフトウェアの機械制御における例外処理を COP で実現する場合、事故の発生や製品の故障を防ぐために、例外処理の変更要求から振る舞い実行までの応答時間は重要である。例外処理の変更に時間がかかる要因としては、他の正常系の変更が終了するのを待つ場合があること、振る舞いを変更するための準備に時間がかかる処理が必要となる場合があることなどが挙げられる。例えば、陸空両用型レスキューロボットでは、地上走行中、飛行モードに移行するための滑走中、飛行中のそれぞれのモードにおいて、例外状態が発生した場合に実行すべき処理が異なり、さらに、モード間の移行は物理的な制約を満たしつつ実行しなければならないために、急には実行できない。これらの課題は、現状の COP 関連技術では十分に解決されていない。

一方で、スマートロボットの開発を支援するメタオペレーティングシステムである Robot Operating System (ROS)がある。ROS はロボット開発では事実上の標準で広く使われており、オープンソースとして提供されている。また、ROS はノードと呼ばれる比較的粗粒度なソフトウェア部品を単位として、それらが分散協調動作する。この ROS で利用できる COP 環境は存在せず、言語機構の支援なしに環境適応型システムを開発しているのが現状である。

2. 研究の目的

本研究では環境適応型ロボットソフトウェアの開発を支援する言語、及び、フレームワークである ContextROS を開発する。ContextROS では ROS 上に COP の機能を実現する ROS は分散協調動作するため、分散環境における適切なレイヤ切り替え機構を提案し実現する。

さらに COP を使用した場合に例外処理を安全に実行するための機構を導入する。正常系の処理のレイヤ切り替え中に例外処理が発生した場合に、正常系処理を中断した上で、高速に例外レイヤを活性化する仕組みを開発する。

さらに、ContextROS が使用する組込みシステム向けの COP 言語を開発する。この言語や言語の実行環境は組込みシステムにおいて使用するために十分な性能や少ないメモリ使用で動作することを目指す。

3. 研究の方法

本研究はソフトウェアフレームワーク開発と方法論の確立が目的であるため、開発や手法の提案と、それらを使用したアプリケーション開発による実証を反復して行う。まず、ContextROS に対する要求整理と設計、プロトタイプ実装を行う。特に ROS は、COP の文脈では議論されてこなかった分散環境であるため、その上でのレイヤ実現上の課題に着目して実現する。次に ContextROS 上でのアプリケーション開発、および、方法論の提案を行う。

4. 研究成果

本課題においては、(1) ROS のための COP 環境である ContextROS [1][2]、(2) 例外が発生した際にレイヤの切り替えを優先的に実行できる COP 実行環境 PLAM [3]、(3) 組込みシステムをターゲットとした COP 言語、及び実行環境である RTCOP [4][5][6]、(4) 組込みシステムを意識した状態マシン図を COP 拡張した方法論 [7] を提案し、実現した。以下順番に説明する。

(1) ROS のための COP 環境である ContextROS

ROS に COP の技術を適用しコンテキストに依存した振る舞いのモジュール化とコンテキストに応じた振る舞いの変更を実現する ContextROS を提案し、実装した。ContextROS では COP のレイヤの概念を ROS に導入し、コンテキストの明示とコンテキスト依存の振る舞いをモジュール化できる。ROS の記述言語である Python や C++ の言語を拡張し、コンテキスト依存の振る舞いをレイヤとして記述できるようにした。分散環境下でのレイヤの活性化、非活性化を ROS のトピック通信、及び、サービス呼び出しの両者で実現し、要求に応じて使い分けることが出来るようにした。

さらに ContextROS を使用して開発したソフトウェアの保守性を評価するため、コンテキスト

依存な振る舞いを持つオブジェクトを3種類の方法で実装し、コード行数、凝集度を比較した。ケーススタディとして、状況に応じて振る舞いを変更するマルチ掃除ロボットアプリケーションの設計をROSによる場合と拡張した Context ROS による場合で比較した(図2)。評価の結果 COP による実装が最もコード行数が少なく凝集度が高いことを示すことができた。ケーススタディとしてマルチ掃除機ロボットアプリケーションを拡張した ContextROS、通常の ROS それぞれで設計し比較した。その結果、結果拡張した ContextROS を使用することでノードをまたがる横断的関心事のモジュール化を実現したことを示した。

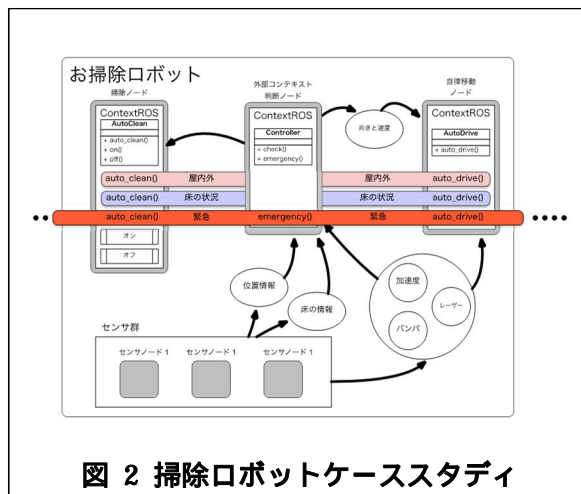


図2 掃除ロボットケーススタディ

(2) PLAM(Preemptive Layer Activation Method):

例外が発生した際にレイヤの切り替えを優先的に実行できる COP 実行環境 PLAM を提案し、実装を行った。PLAM ではマルチスレッドによるプリエンティブなレイヤ起動のためのアーキテクチャを採用した。PLAM の API を用いることで、例外処理を行わないレイヤを同時に起動する。このことにより、例外処理レイヤのコンテキストを認識したときに、他のレイヤの起動処理を中断または終了させることができる。また、PLAM を ContextROS に適用し ROS Service mode に基づく通信モデルを設計し、レイヤの活性化の実行をサポートした。

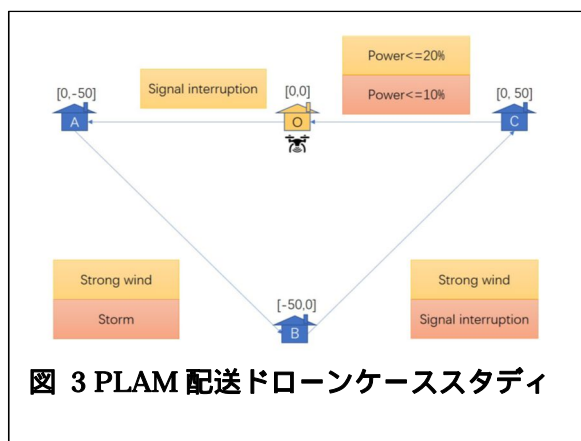


図3 PLAM 配送ドローンケーススタディ

提案手法を図3に示すドローンを活用した配送ロボットに適用した結果、想定したシナリオ通りに動作することが確認できた。

(3) RTCOP

組込みシステムをターゲットとした COP 言語、及び実行環境である RTCOP を提案し、実装した。COP はコンテキストに対応する振る舞いを明示的に扱い、実行時にコンテキストの変更に動的に適応するメカニズムを提供する。既存の COP 言語の主なものは、Java や Smalltalk などの拡張である。これらのプログラミング言語は組込みソフトウェア開発には適していない。今日においても多くの組込みソフトウェアは C または C++ で開発されており、C++ を COP のために拡張することは重要である。提案フレームワーク RTCOP は、COP 実現のためにメソッドディスパッチ機構を拡張し、レイヤアクティベーション機構を備えている。さらに、組込みソフトウェアへの適用に十分な性能を実現するために、提案フレームワークは、メモリ消費量を抑えるべく構成可能になっており、また、COP を導入する上で課題となるメソッドディスパッチや、レイヤアクティベーションの速度が実用的なレベルに収まることを目標とした。その結果、メソッドディスパッチはベース言語に比べて 6% 程度の増加に収めることができた。さらに、レイヤアクティベーションは 0.25 μ 秒と同様の多言語と比べ 0.05% 程度に高速化できた。

(4) ステートマシン図

大規模なソフトウェア開発には開発方法論が必要不可欠である。COP の導入によって、環境に応じて変化する横断的関心事をモジュール化することはできるが、開発方法論に関する検討が不十分な状況である。既存研究では COP で使用するモジュールを表現出来るように UML のクラス図やパッケージ図を拡張したモデルが提案されている。しかしながら構造モデルの検討にとどまっており、システムの振る舞いに注目したモデルが存在しない。

そこで、本研究では COP におけるシステムの振る舞いの変化を表現すべく、UML ステートマシン図を拡張したモデリング言語を提案する。手法は基本的な振る舞いを表したモデルにレイヤの振る舞いを重ね書き換えた差分を作る。そして、重ねた上位をより優先するべきレイヤとしてモデル化する。また、提案したモデリング言語の記述を支援するモデリングツールのプロトタイプを開発した。モデリングツールは、ステートマシン図が描ける上に、レイヤごとにステートに色付けされ、レイヤを切り替えたときのモデルが表示できる。

<引用文献>

1. Yuta Saeki, Ikuta Tanigawa, Kenji Hisazumi, Akira Fukuda: ContextROS: Context-Oriented Programming for the Robot Operating System, Proceedings of International Workshop on Context-Oriented Programming (COP 2017), 2017.
2. Yuta Saeki, Ikuta Tanigawa, Kenji Hisazumi, Akira Fukuda: ContextROS: A Context-Oriented Framework for the Robot Operating System, Proceedings of the Asia Pacific Conference on Robot IoT System Development and Platform 2018 (APRIS2018), pp.1--6, 2018.
3. Zihan Liu, Ikuta Tanigawa, Harumi Watanabe, Kenji Hisazumi: PLAM: Preemptive Layer Activation Architecture Based on Multithreading in Context-Oriented Programming, Proceedings of the 12th International Workshop on Context-Oriented Programming and Advanced Modularity, Association for Computing Machinery, 2020.
4. Ikuta Tanigawa, Kenji Hisazumi, Akira Fukuda, Nobuhiko Ogura, Midori Sugaya, Harumi Watanabe: RTCOP: Context-Oriented Programming Framework based on C++ for Application in Embedded Software, Proceedings of the 2nd International Conference on Information Science and System (ICISS 2019), 2019.
5. Ikuta Tanigawa, Kenji Hisazumi, Nobuhiko Ogura, Midori Sugaya, Harumi Watanabe, Akira Fukuda: RTCOP: Context-Oriented Programming Framework for Applying to Embedded Software based on C++, Asia Pacific Conference on Robot IoT System Development and Platform 2018 (APRIS2018), 2018.
6. 谷川郁太, 久住憲嗣, 小倉信彦, 菅谷みどり, 渡辺晴美, 福田晃: RTCOP:組込みソフトウェア開発への適用を考慮した C++ベースのコンテキスト指向プログラミングフレームワーク, 情報処理学会論文誌 組込みシステム工学特集号, Vol. 6, No. 8, pp.1338--1349, 2019.
7. Shintaro Takenaka, Kenji Hisazumi: Context-oriented Design Method for UML State Machine Diagram, Proceedings of the Asia Pacific Conference on Robot IoT System Development and Platform (APRIS 2021), 2021.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1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 谷川 郁太, 久住 憲嗣, 小倉 信彦, 菅谷 みどり, 渡辺 晴美, 福田 晃	4. 巻 60
2. 論文標題 RTCOP: 組み込みソフトウェア開発への適用を考慮したC++ベースのコンテキスト指向プログラミングフレームワーク	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 情報処理学会論文誌	6. 最初と最後の頁 1338-1349
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 9件）

1. 発表者名 Liu Zihan, Ikuta Tanigawa, Harumi Watanabe, Kenji Hisazumi
2. 発表標題 PLAM: Preemptive Layer Activation Architecture Based on Multithreading in Context-Oriented Programming
3. 学会等名 the 12th International Workshop on Context-Oriented Programming and Advanced Modularity (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Chinatsu Yamamoto, Harumi Watanabe, Takeshi Ohkawa, Mikiko Sato, Ikuta Tanigawa, Kenji Hisazumi, Nobuhiko Ogura
2. 発表標題 Layer Expression of Context-Oriented Programming and its Model-Driven Development on xtUML
3. 学会等名 the Asia Pacific Conference on Robot IoT System Development and Platform (APRIS 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Chinatsu Yamamoto, Ikuta Tanigawa, Kenji Hisazumi, Mikiko Sato, Takeshi Ohkawa, Nobuhiko Ogura, Harumi Watanabe
2. 発表標題 Layer Modeling and Its Code Generation based on Context-oriented Programming
3. 学会等名 the 9th International Conference on Model Driven Engineering and Software Development (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名	Ikuta Tanigawa, Harumi Watanabe, Nobuhiro Ohe, Mikiko Sato, Nobuhiko Ogura, Takeshi Ohkawa, Kenji Hisazumi
2. 発表標題	Context-Oriented Live Programming Environments with Mixed Reality System for IoT Education
3. 学会等名	Workshop on LIVE Programming (国際学会)
4. 発表年	2019年

1. 発表者名	Ikuta Tanigawa, Harumi Watanabe, Nobuhiro Ohe, Mikiko Sato, Nobuhiko Ogura, Takeshi Ohkawa, Kenji Hisazumi, Akira Fukuda
2. 発表標題	IoT Educational System on Mixed Reality Environments with Context-Oriented Programming
3. 学会等名	Asia Pacific Conference on Robot IoT System Development and Platform (国際学会)
4. 発表年	2019年

1. 発表者名	Yuta Saeki, Ikuta Tanigawa, Kenji Hisazumi, Akira Fukuda
2. 発表標題	ContextROS: A Context-Oriented Framework for the Robot Operating System
3. 学会等名	Asia Pacific Conference on Robot IoT System Development and Platform 2018 (APRIS2018) (国際学会)
4. 発表年	2018年

1. 発表者名	Ikuta Tanigawa, Kenji Hisazumi, Nobuhiko Ogura, Midori Sugaya, Harumi Watanabe, Akira Fukuda
2. 発表標題	RTCOP: Context-Oriented Programming Framework for Applying to Embedded Software based on C++
3. 学会等名	Asia Pacific Conference on Robot IoT System Development and Platform 2018 (APRIS2018) (国際学会)
4. 発表年	2018年

1. 発表者名 Ikuta Tanigawa, Kenji Hisazumi, Akira Fukuda, Nobuhiko Ogura, Midori Sugaya, Harumi Watanabe
2. 発表標題 RTCOP: Context-Oriented Programming Framework based on C++ for Application in Embedded Software
3. 学会等名 2nd International Conference on Information Science and System (ICISS 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuta Saeki, Ikuta Tanigawa, Kenji Hisazumi, Akira Fukuda
2. 発表標題 ContextROS: Context-Oriented Programming for the Robot Operating System
3. 学会等名 International Workshop on Context-Oriented Programming (COP 2017) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 佐伯 優太, 谷川 郁太, 久住 憲嗣, 福田 晃
2. 発表標題 ContextROS: ロボットベレーティングシステムへのコンテキスト指向プログラミングの適用
3. 学会等名 情報処理学会組込みシステムシンポジウム
4. 発表年 2017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
---------	---------