

令和 6 年 5 月 25 日現在

機関番号：17401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K11814

研究課題名（和文）知的ロボットシステムのためのモデル駆動FPGA設計環境

研究課題名（英文）Model-driven FPGA Design Environment for Intelligent Robot System

研究代表者

大川 猛（Ohkawa, Takeshi）

熊本大学・半導体・デジタル研究教育機構・准教授

研究者番号：80392596

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：エッジ・クラウドに分散した異種処理の統合方法をROS2（Robot Operating System 2）を用いて検討し、更にUML(Unified Modeling Language)シーケンス図からのROS2システム生成方式の検討を進めた。具体的な例として、画像縮小の並列処理で複数のソフトウェア・FPGA回路間をDDS（Data Distribution Service）の通信を用いて統合する自動生成環境・ツールを提案し、国際会議で発表した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

知的ロボットのシステム設計において、ソフトウェア・FPGA等からなる異種（ヘテロジニアスな）計算環境をモデル化し自動生成することによりロボットソフトウェアシステムを実現する開発方式・ツールの姿を検討した。特に、FPGA・ソフトウェアの実装が完了する前のモデルの段階で、システムアーキテクチャ検討段階における機能・性能シミュレーションを行うことが出来る一例を示すことが出来た。これにより、今後の知的ロボットをはじめとする組み込みシステムの設計開発における生産性向上に貢献すると考えられる。

研究成果の概要（英文）：A method for integrating heterogeneous processing distributed at the edge and cloud using ROS2 (Robot Operating System 2) and a ROS2 system generation method from UML (Unified Modeling Language) sequence diagrams were investigated. Specifically, an automatic generation environment and a tool were proposed that integrates multiple software and FPGA circuits using DDS (Data Distribution Service) communication during parallel processing of image resize, and presented at an international conference.

研究分野：ハードウェア・ソフトウェア協調設計

キーワード：モデル駆動開発 FPGA 並列処理

1. 研究開始当初の背景

AI (Artificial Intelligence) の一般化にともない、クラウドと接続され全体として高度な処理を行う知的ロボットのソフトウェアの複雑度の増加に対し、モデルベース設計手法を使う事が、設計の明確化、デバッグや検証の容易化、コンポーネントの再利用のために必須である。

その流れの中で、近年 ROS (Robot Operating System) や、ROS の次世代バージョンである ROS2 といったロボットソフトウェア開発フレームワークの採用が盛んである。ROS/ROS2 普及の本質は、AI ソフトウェアを含むロボットソフトウェアをインターネット経由で入手し、自分の手元の PC 環境ですぐに動かすことができるという、ソフトウェア部品のポータビリティ・再利用性向上である。すなわち、ROS はソフトウェアを部品化 (コンポーネント化) して通信により疎結合する Publish / Subscribe 通信による処理モデルを採用することでシステムを構成する各部品の再利用性を向上し、ロボットソフトウェアシステムの開発の複雑度を緩和したことが、ソフトウェアシステムの観点における本質的な進歩であると考えられる。

一方、多様なアプリケーションにおける処理エネルギーの効率を向上するために、汎用マイクロプロセッサに加えて GPU (Graphics Processing Unit) や、ニューラルネットワーク処理加速のための専用ハードウェア・DSA (Domain Specific Architecture) ・FPGA (Field Programmable Gate Array) などを活用することが求められている。特に知的なロボットの実現が期待される組込みシステムの処理環境においては、性能・電力の要求は厳しい。

研究代表者は、この要求を満たすべく、ソフトウェアと協調した FPGA を使ったシステムの最適設計手法を基本テーマとし、FPGA を ROS のベースである Publish / Subscribe 通信を用いた疎結合の処理システムノードとする「FPGA コンポーネント技術」を確立してきた。

今後さらに、最初に記したように、知的ロボットのシステム設計者は、これらのヘテロジニアス (異種) な処理環境をクラウド処理も含めたシステム全体レベルの視点から見て、上流の設計段階でアプリケーションプログラムの要求に応じて最適な機能分割を行った上でシステムの構成や処理配置を決めることが求められる。

2. 研究の目的

本研究の目的は、上記問題の解決のために、クラウド処理、エッジサーバ・エッジデバイス処理、CPU 処理、FPGA や GPU など異種の処理システムを統合的に取り扱い、適正な機能分割、性能シミュレーション、更に FPGA も含めた異種処理システムごとの実装コードを自動生成する異種処理システム統合モデルベース設計手法・環境を提案・構築することである。モデルベース設計開発においては、モデルと実装の乖離 (抽象度のギャップ) が問題である。これに対し本研究では、前述した研究代表者の独自技術である「FPGA コンポーネント技術」をベースに、FPGA を再利用・相互運用可能なコンポーネント (部品) として扱うことにより、FPGA をモデル上の部品として利用とする。すなわち上流の設計段階における FPGA の「機能モデル」「性能モデル」に基づくシステム全体構成の検討を可能とし、知的なロボットのような性能・電力等の要求が厳しいシステムの設計生産性を大幅に向上する。

3. 研究の方法

以上の目的のため、本研究においては以下の項目について検討を行った。

(1) ハードウェア・ソフトウェアを含む多くの異種の処理環境を適切にモデル化する方法

各ロボットソフトウェア部品の処理モデルに対して、入力・出力データのインターフェイス型と内容を定義する。続いて、性能、消費電力に関するパラメータを定める。これらを異なる処理環境 (CPU, FPGA 等) で処理した場合の性能情報について定義し最適な処理配置を導出する。

(2) 上流設計における抽象度の高いモデルでの性能シミュレーション方法

上記モデルを対象に機能検証と性能評価を行う。一般に、精度とシミュレーション時間はトレードオフの関係であるため、まずは粗い精度での性能シミュレーションを可能とする。一方、実装コードをもとにした細かい粒度の機能・性能シミュレーションを、粗い粒度の場合と同様に行える様にする。

(3) モデルから実装を生成することが可能な自動化設計手法

まずは出力を通常のソフトウェアとしてモデルからの実装生成を行うシステムを開発する。次に、モデルから FPGA 回路の生成を行えるようにする。これは、Xilinx 社の高位合成 (HLS) ツール Vivado HLS に入力可能な C/C++ 言語での実装を生成する事を第一の手段として検討する。最終的に、ヘテロジニアスなシステム全体の生成を行う。ソフトウェア単体もしくは FPGA 単体の生成に加えて、ソフトウェアと FPGA の間の通信 (メッセージ通信) を生成することでシステム全体の統合を自動化する。

4. 研究成果

本研究では、各項目について以下の研究成果を上げた。

- (1) ハードウェア・ソフトウェアを含む多くの異種の処理環境を適切にモデル化する方法

2021年度は、モデル化の方法について、モデル駆動によるFPGA設計開発対象の機能定義について検討した。具体的な題材として、簡単なロボットアーム（4軸もしくは6軸の可動域）および小型のロボットドッグ（12個のサーボモータ）を用いることとし、ROS2（Robot Operating System 2）による処理の通信による統合を行う枠組みで、開発環境の構築を行った。

2022年度は、ROS2（Robot Operating System 2）による通信により遠隔ロボットアームを実現する方法についての設計・実装を行なう事例を通じ、多くの異種処理環境について機能・非機能要件（性能含む）を適切にコンポーネントとしてモデル化する方法の検討を進めた。また、エッジ・クラウドに分散した異種処理環境の扱いについて、ROS2/DDS（Data Distribution Service）の拠点間をインターネット経由でつなぐ方法についての検討を進めた。

2023年度は、ROS2（Robot Operating System 2）による通信により遠隔ロボットアームを実現する方法、およびエッジ・クラウドに分散した異種処理環境の扱いについて、ROS2/DDS（Data Distribution Service）の拠点間をインターネット経由でつなぐ方法をもとにして、異種（ヘテロジニアス）な処理を通信により統合する環境を検討した。
- (2) 上流設計における抽象度の高いモデルでの性能シミュレーション方法

2021年度は、性能シミュレーションについては、(A)のモデルに基づく方式実証のための機能・性能シミュレータを、ROS2に用いられる通信ミドルウェアDDS（Data Distribution Service）の活用により構築するための基本設計を進めた。

2022年度は、粗粒度シミュレーションの一つとして、UMLシーケンス図からROS2システムとして生成可能な粗粒度モデルの実現を目標に検討を進めた。

2023年度は、前年までに検討したUML（Unified Modeling Language）シーケンス図からROS2システムを生成する方式をもとに、粗粒度シミュレータの実現と、実際のC/C++高位合成によるFPGA回路を想定した細粒度シミュレーションの実現の検討を進めた。
- (3) モデルから実装を生成することが可能な自動化設計手法

2021年度は、自動化設計手法については、UML（Unified Modeling Language）モデルからFPGA向けに高位合成可能なC/C++実装生成を行うシステムの実現を目的に検討を行った。

2022年度は、UML（Unified Modeling Language）モデルのうち、シーケンス図からシステム全体の粗粒度モデルを生成する手法を検討した。すなわち、システム中に登場する部品としてROS2ノードを抽出して、ROS2ノード間の通信メッセージ型を自動生成する手法の検討を行った。また、ステートマシン図からFPGA向けに高位合成可能なC/C++実装生成を生成するための検討を行った。

2023年度は、コード生成システムの実装方式を検討した。

以上(1)(2)(3)の検討をもとに、高位合成によるIP開発（図1）・テスト（図2）を行い、画像縮小を並列に行うシステム（図3）を題材として、複数のソフトウェア間もしくは複数のFPGA回路モジュール間をDDS（Data Distribution Service）の通信を用いてシミュレーション動作させ、更に、FPGA上にて動作する回路を自動生成する環境を提案し、国際会議ICCE2024にて発表[1]した。

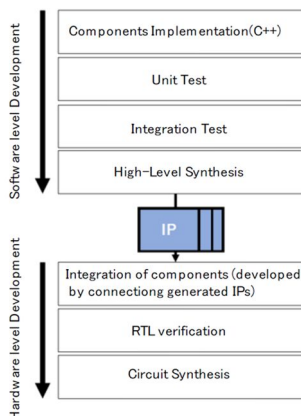


図1 高位合成でのIP開発

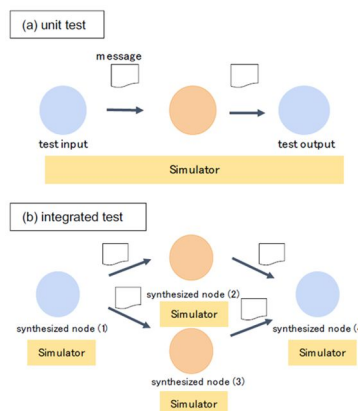


図2 モデルによるテスト

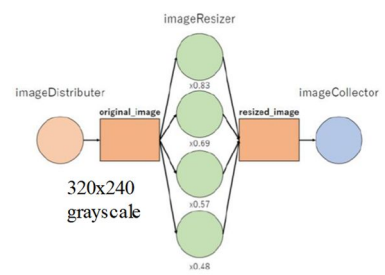


図3 画像縮小並列処理モデル

また、本研究の提案方式の全般に関して、国際会議 APRIS2023 の招待講演にて紹介することが出来た[2]。更に、本研究の考え方で関数型言語 Elixir の組込みシステム向け環境 Nerves を FPGA 上で実現する環境について、研究会にて紹介することが出来た[3]。

参考文献

[1] Ohkawa Takeshi, Arai Kenta, Ootsu Kanemitsu, Yokota Takashi, “ Alchemist: A Component-Oriented Development Tool of FPGA based on Publish/Subscribe Model, ” Proceedings in IEEE 42nd International Conference on Consumer Electronics, pp.1-6, 2024.

[2] Takeshi Ohkawa, “ Toward Model-driven Development of Hardware-Software Cooperative System for Robots and IoT Systems, ” Asia Pacific Conference on Robot IoT System Development and Platform 2023 (APRIS2023) (招待講演), 2023.

[3] 大川猛, 菊池豊, 菊地俊介, 高瀬英希, “ 関数型言語 Elixir の IoT アプリから FPGA を活用可能なプラットフォーム Nerves-on-FPGA の実現に向けた検討, ” 2023 年並列 / 分散 / 協調処理に関するサマー・ワークショップ (SWoPP 2023), 信学技報, vol. 123, no. 151, RECONF2023-18, pp. 25-26, 2023 年 8 月.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Ohkawa Takeshi, Arai Kenta, Ootsu Kanemitsu, Yokota Takashi
2. 発表標題 Alchemist: A Component-Oriented Development Tool of FPGA based on Publish/Subscribe Model
3. 学会等名 Proceedings in IEEE 42nd International Conference on Consumer Electronics (国際学会)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Takeshi Ohkawa
2. 発表標題 Toward Model-driven Development of Hardware-Software Cooperative System for Robots and IoT Systems
3. 学会等名 Asia Pacific Conference on Robot IoT System Development and Platform 2023 (APRIS2023) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 大川猛, 菊池豊, 菊地俊介, 高瀬英希
2. 発表標題 関数型言語ElixirのIoTアプリからFPGAを活用可能なプラットフォームNerves-on-FPGAの実現に向けた検討
3. 学会等名 2023年並列 / 分散 / 協調処理に関するサマー・ワークショップ (SWoPP 2023)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

知的ロボットシステムのためのモデル駆動FPGA設計環境
<https://sites.google.com/view/ohkawalab/>

熊本大学 青柳・大川・久保木研究室
<https://sites.google.com/view/icpkg/>

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
---------	---------