

# 研究終了報告書

## 「大容量データをリアルタイム処理するメニーコア向けソフトウェアプラットフォームの構築」

研究期間： 2017 年 10 月～2021 年 3 月

研究者： 安積 卓也

### 1. 研究のねらい

人工知能技術を活用した IoT の高度化に対応するために、大容量データをリアルタイムに処理をする必要性が高まっており、クラウドだけでなく IoT 機器などと処理を負荷分散することが求められてきている。本研究課題は、超スマート社会サービスプラットフォームの基盤技術で挙げられている、IoT の高度化に必要となる現場システムでリアルタイム処理の高速化や多様化を実現及び、大規模データの高速・リアルタイム処理を低消費電力で実現する技術で貢献することをねらっている。

本研究課題は、特に、(1)社会・経済などに貢献するため多種・膨大な情報を組み合わせ解析する技術開発及び、(2)多種・膨大な情報に基づき状況に応じ最適化されるシステムのための技術開発に貢献する。具体的には、個別の機能・サービスを統合するために必要なソフトウェア技術、大量に発生する時系列データの処理をシステム本体周辺やクラウドで分散しシステムの安定性やデータ処理遅延抑制などを実現する技術を実現する。IoT 機器側での人工知能技術の情報基盤で、解決すべき課題として、スケール性、省電力、リアルタイム性が挙げられている。本研究では、高度かつ効率的なセンシングシステム、リアルタイム処理可能なシステム最適化技術、アクチュエーション技術に加え、低消費・スケール性のあるソフトウェアプラットフォームの構築を目指す。応用分野として、自動車や車椅子のモビリティを実現する社会基盤を想定している。

### 2. 研究成果

#### (1)概要

提案プラットフォームは、人工知能技術を実行するだけでなく、実世界へのアクチュエーションの動作環境を兼ねる。本研究課題では、これまで行ってきた研究(組込みシステム向けコンポーネントシステムなど)を出発点として、ソフトウェア開発効率を改善するメニーコア向けのソフトウェアプラットフォームを構築する。具体的には、下記の研究テーマを実施した。

#### 研究テーマ A:メニーコア向けソフトウェアプラットフォーム

本研究テーマでは、大量のデータ処理をリアルタイム性に行う自動運転アプリケーションなどを対象とし、メニーコアプロセッサを有効に活用することで低消費・高性能なプラットフォームを構築する。自動運転のミリ波センサなどから連続して生み出される膨大な情報から安全走行に必要な情報のみを取り出し、高度な知的情報処理を実行する。

#### 研究テーマ B:メニーコア向けモデルベース開発基盤

本研究テーマでは、MATLAB/Simulink のブロックモデルを並列化しメニーコア上で実行できるモデルベース開発(特に自動車業界でデファクトスタンダードになっている開発手法)基盤を

構築する。本研究テーマが実現することにより、既存コードだけでなく、自動運転の経路計画など様々なアプリケーションをメニーコア上で並列化し動作させることができるようになる。

## (2) 詳細

### 研究テーマ A「メニーコア向けソフトウェアプラットフォーム」

本研究テーマでは、自動運転車など比較的データ処理量の多い機器を対象とする。GPU は、ディープラーニングのように、行列計算に落とし込むことができる人工知能技術にはとても適しているが、異なった種類の複数の処理を同時に実行することはできない。その点、メニーコアの場合は、異なった種類の複数の処理を同時に実行することができる。

研究テーマ A では、図 1 に示す流れを実現するために、主に下記の 3 点に関して研究を進めた。

研究テーマ A-1: 実行解析  
メニーコアプロセッサの Kalray MPPA に搭載されている 1 つのコア上での実行時間

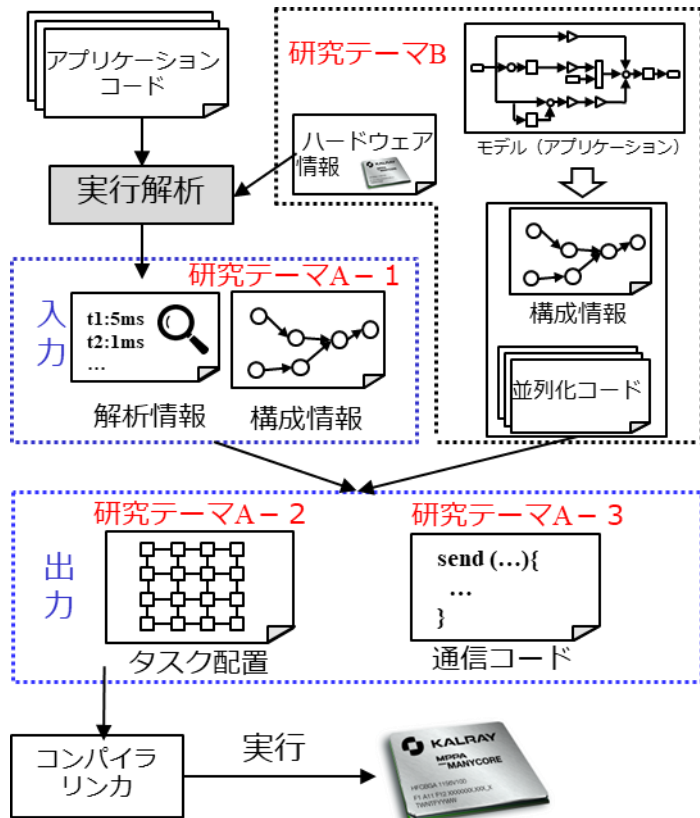


図 1 研究の全体像

見積りを行えるようにした。LLVM を利用し、C/C++ で実装されたプログラムを LLVM の中間言語に変換し、実行サイクル数を計算することで、Kalray MPPA 上でののおおよその実行時間を予測可能にした。プログラムの予測値と実測値の誤差を分析し、予測の精度を既存研究より高めた。本研究成果は、CATA2018 で発表を行った。

### 研究テーマ A-2: リアルタイム処理を考慮したタスク配置

マルチコアを考慮したスケジューリング理論で DAG (Direct Acyclic Graph) を考慮したスケジューリングアルゴリズムが IEEE RTSS (Real-Time Systems Symposium) などのリアルタイムシステムのトップカンファレンスで頻りに発表されてきている。研究テーマ A-1 で解析した実行時間の情報及び、DAG などで表現されたアプリケーションの構成情報を活用して、メニーコア上で動作させるための最適なタスク配置を実現するスケジューリングアルゴリズムを考案する。本研究で用いているメニーコアのハードウェア構成を意識し、負荷の重い処理を複数コアで実行する実用に近いスケジューリングアルゴリズム (処理の順序を決めるアルゴリズム) を提案した。本アルゴリズムは、あらかじめ、利用するクラスタ (16 コアを 1 つにまとめた単位) 及び NoC (Network on Chip: チップ内のネットワーク) のルートを決めておくことにより、通信競合を減らす

ことを実現した。

本研究の成果は、RTSOPS2018、DS-RT2019、RTSS2019、DS-RT2020、ICESS2020、EUC2020 で発表を行った。さらに、IEEE/ACM DS-RT2019 において、Best Paper Runner-up Award を受賞した。

#### 研究テーマ A-3: コア間通信機構

マルチ・メニーコアの効率的に動作させるには、データ転送をうまく使いこなす必要があることが知られている。フォン・ノイマン・ボトルネックとして知られているとおり、処理性能が向上するにつれて、計算時間のボトルネックがメモリの読み書きであり、性能向上を妨げている。組込みメニーコアプロセッサ(Kalray)は、NoC(Network-on-Chip)の通信形態をサポートしており、それらを活用することにより、メモリ転送のボトルネックが解消されることが期待されている。ただし、NoCなどをうまく活用するソフトウェアプラットフォームはまだ確立されていない。研究テーマ A-2で配置されたタスクの情報をもとに、最適な通信機構を提供することが目的である。

研究テーマ A で研究開発したプラットフォームの有用性の検証を行うために、低速の完全自動運転で、自己位置推定、経路計画(レベル4)、経路追従を提案プラットフォーム上で実現し、実証した(図2)。本研究成果で、ESS2019、IROS2020 で発表を行った。ESS2019 では、優秀論文賞を受賞した。



図 2 提案プラットフォームを用いた実証実験の様子

<https://www.youtube.com/watch?v=4T0Nqx5M1aA>

#### 研究テーマ B: メニーコア向けモデルベース開発基盤

本研究テーマでは、MATLAB/Simulink のブロックモデルを並列化しメニーコア上で実行できるモデルベース開発基盤を構築する。本研究テーマが実現することにより、既存コードだけでなく、経路計画など様々なアプリケーションをメニーコア上で並列化し動作させることができるようになる。研究テーマ B では、主に下記の3点に関して研究を進めた。

#### 研究テーマ B-1 : メニーコア向けハードウェア策定・基礎評価

研究開始当初は、既存のマルチコア (RH850 など) では、2コア・4コアマルチコアシステムのハードウェア情報の記述方法は確立しつつあるが、NoC 通信など、メニーコア向けのハードウェア情報の記述は確立していなかった。

本研究テーマでは、NoC 通信などメニーコア実行見積りで必要なハードウェア情報を提案した。さらに、本研究の研究対象である Kalray のメニーコアプロセッサの実機で基礎評価を行った。本基礎評価の結果は、PDP2020 や ETFA2020 などの論文の性能評価の基礎データとして利用している。

#### 研究テーマ B-2 : 実行時間見積り

既存研究では、NoC を考慮した実行時間解析はできておらず、メニーコア上 (16 コア以上 : 本研究では 256 コアを想定) での見積りは、Multi-core Association (組込みシステム向けのマルチ・メニーコアの世界標準団体) でも確立できていない。本研究テーマでは、既存の見積り (LLVM 中間言語を利用した見積り) 手法に加えて ISS (命令セットシミュレータ) を利用したメモリアクセスログを利用した高精度な見積りを検討している。さらに、メニーコアプロセッサ特有の NoC 通信を含んだ実行時間見積り手法を提案した。

本研究成果は、PDP2020 で発表を行った。

#### 研究テーマ B-3 : 並列化コードの生成

MATLAB/Simulink の Embedded Coder (特に自動車業界でデファクトスタンダードのツール) が生成するコードは逐次実行を想定しているため、並列化コード生成するには、様々な問題 (負荷分散・同期処理) を解決する必要がある。本研究課題では、メニーコアでの実行を想定した (通信遅延・同期通信など) 構成情報 (処理の依存関係) の情報を元にして並列化コードの生成を行った。本研究成果は、ETFA2020 で発表を行った。

さらに、研究テーマ B の評価ベンチマークを研究開発し、オープンソースとして公開した。本ベンチマークに関しては、JST と共同でプレスリリースを行った。

<https://www.jst.go.jp/pr/announce/20190416-4/index.html>

さきがけの研究テーマをまとめた論文で、2020 年度の情報処理学会山下記念賞を受賞した。

### 3. 今後の展開

さきがけの研究では、提案時の研究を一通り完成させ、完全自動運転で必須機能であり環境認識と並んで重い処理である自己位置推定及び、経路追従を提案メニーコアプラットフォームで実現できた。今後は、環境認識を含め、モビリティに必要な機能を一通り、メニーコアプロセッサ上で実行できるソフトウェアプラットフォームの構築を目指し、特に小型モビリティなど、大量のバッテリーを積み込むことが難しい領域に対して、メニーコアの応用を検討する。

### 4. 自己評価



本研究は、クラスタ型メニーコアプラットフォームを用いて自動運転などで利用できるソフトウェアプラットフォームを世界にさきがけて実現するというチャレンジングなものであった。

さきがけ実施前は、スケジューリングアルゴリズムなど理論的なところ(特に ILP と用いた手法)に関しては、十分な実績ななかったが、本研究領域の研究者との議論により、共同研究に発展し、共著論文で国際会議にいくつか発表することができた。計画当初の研究課題であるメニーコアプラットフォーム研究課題に関しては予定を上回る成果を挙げることができ、いくつかの研究テーマで、国内外の論文で、優秀論文賞や Best Paper Runner-up Award を受賞、情報処理学会山下記念賞受賞、JST と共同でプレスリリースを行った。さらに、ICCPS2018 の約 2 年間で引用数が 100 を超えて今も増え続けているなど、想定以上の研究成果を挙げられたと考えている。

上記の今後の展開でも述べたとおり、メニーコアプラットフォームの特徴である、低消費電力を活かせる小型モビリティでの実用化を検討している。

## 5. 主な研究成果リスト

### (1) 代表的な論文(原著論文)発表

研究期間累積件数: 22件

1. **Takuya Azumi**, Yuya Maruyama, and Shinpei Kato, ROS-lite: ROS Framework for NoC-Based Embedded Many-Core Platform, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS2020), 2020

自動運転を始めとする様々な組み込みシステムにおいて、低消費電力で計算性能が高いメニーコアプロセッサが注目されている。本研究では、NoC をベースとしたメニーコアプロセッサを用いた自動運転プラットフォーム (Autoware) の並列化を行い、構造化されたメッセージ通信を提供するミドルウェア及びそのソフトウェア開発フレームワークを提案する。性能評価では、低速自動運転で求められているデッドライン満たしていることを示した。

2. Shingo Igarashi, Yuto Kitagawa, Tasuku Ishigooka, Tatsuya Horiguchi, and **Takuya Azumi**, Multi-rate DAG Scheduling Considering Communication Contention for NoC-based Embedded Many-core Processor, IEEE/ACM International Symposium on Distributed Simulation and Real Time Applications (DS-RT2019)

本研究は、256 コアのメニーコア上で、マルチレート(複数の種類の周期)を考慮した DAG (a directed acyclic graph: 有向非巡回グラフ) スケジューリングアルゴリズムを提案した。大規模な計算とコア間通信を必要とするタスク処理を、通信競合を回避しながら実行する。評価結果により、本提案スケジューリングアルゴリズムが、スケジューリング性能、デッドラインミス率の観点で既存アルゴリズムより優れていることを示した。(Best Paper Runner-up Award)

3. Shinpei Kato, Shota Tokunaga, Yuya Maruyama, Seiya Maeda, Manato Hirabayashi, Yuki Kitsukawa, Abraham Monrroy, Tomohito Ando, Yusuke Fujii, and **Takuya Azumi**, "Autoware on Board: Enabling Autonomous Vehicles with Embedded Systems," In Proceedings of the 9th ACM/IEEE International Conference on Cyber-Physical Systems (ICCPS2018), 2018.

本論文では、完全自動運転ソフトウェア (Autoware) を GPU 搭載の組み込み機器 (DRIVE PX2) に適用させ動作させた。Autoware は、自己位置、環境認識、経路計画、経路追従など自動運転に必要なモジュールを一通り提供している。消費電力を既存の自動運転プラットフォー

ムに比べ削減することができ、性能評価結果も実用的に利用できるレベルであることを示した。(被引用数:128:2020年11月時点)

(2)特許出願

研究期間累積件数:0件(特許公開前のももの含む)

(3)その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

- 基調講演
  - **安積卓也**,「自動運転ソフトウェアプラットフォーム入門 -要素技術と動作の仕組み-」, デザインガイア 2019, 2019年11月13日
- 主な招待講演
  - **安積卓也**,「ROS 2を用いた完全自動運転プラットフォームの実用化」,第5回 オートモーティブ・ソフトウェア・フロンティア 2020, 2020年2月6日
  - **安積卓也**,「メニーコアプロセッサによる省電力完全自動運転の実現」, ET2019 マルチコアサミット, 2019年11月21日
  - **安積卓也**, 太田徳幸,「自動運转向けソフトウェア Autoware と MATLAB/Simulink の連携」, MATLAB EXPO 2019, 2019年5月28日
- 受賞
  - Best Paper Runner-up Award: 23rd IEEE/ACM International Symposium on Distributed Simulation and Real Time Applications (DS-RT2019)
  - 優秀論文賞: 組込みシステムシンポジウム (ESS2019)
  - 情報処理学会 山下記念賞 (2020年度)
- 著作物
  - Autoware :自動運転ソフトウェア入門(リックテレコム社)、1章、2章、10章を担当、2019年2月
  - 自動運転(コロナ社)、8章、2020年12月
- プレスリリース

本研究で研究開発を行った自動運转向けソフトウェアのモデルをオープンソースとして公開し、JST と共同でプレスリリースを行った。

<https://www.jst.go.jp/pr/announce/20190416-4/index.html>