

## 1. 研究課題・受託者・研究開発期間・研究開発予算

- ◆研究開発課題名 関数型パラダイムで実現するB5G時代の資源透過型広域分散コンピューティング環境
- ◆受託者 国立大学法人東京大学、高知県公立大学法人、国立大学法人大阪大学、株式会社シティネット、さくらインターネット株式会社、大学共同利用機関法人情報・システム研究機構(～2021年度)、学校法人近畿大学(2022年度～)
- ◆研究開発期間 令和3年度～令和5年度(3年間)
- ◆研究開発予算(契約額) 令和3年度から令和5年度までの総額126百万円(令和5年度29百万円)

## 2. 研究開発の目標

Beyond 5G時代の通信インフラの利点・機能を積極活用したIoTアーキテクチャを創出し、アクターベースの関数型言語であるElixir(エリクサー)を礎とした革新的なコンピューティング環境を開拓することを目指します。

## 3. 研究開発の成果

### 研究開発項目1)

#### ① : 資源透過型の分散処理プラットフォーム

- 項目 1-a) アーキテクチャの検討・設計
- 項目 1-b) プラットフォームのElixirによる実装

エンドデバイス(エッジデバイス)からクラウドに至るネットワークに配置される構成要素であるexMEC(extended MEC)に対して、これらのノードの資源特性に対して柔軟に処理を配置できる透過的な並列処理基盤を研究開発します。

### 研究開発項目2)

#### ② : IoTノードの能率的な実行環境

- 項目 2-a) ヘテロSoC向けBEAM処理系の設計・実装
- 項目 2-b) B5G向け通信ミドルウェア

IoTシステムの構成要素であるIoTノード(エンドデバイス、exMECおよびクラウド)について、Elixirプロセスが能率的に実行できる技術を開発します。

### 研究開発項目3)

#### ③ : 計算資源配分の決定手法

- 項目 3-a) 最適配分アルゴリズム
- 項目 3-b) 優先制御と競合解決アルゴリズム

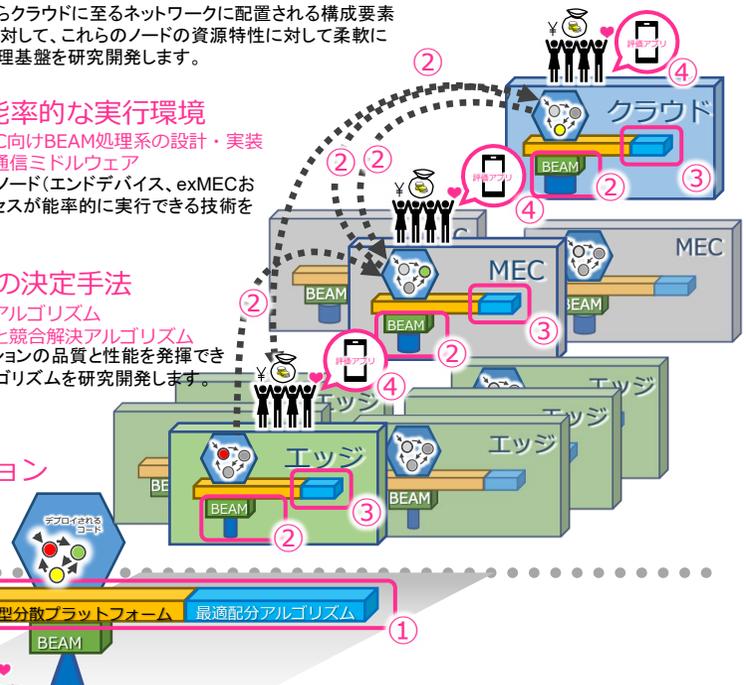
IoTノード上で動作するアプリケーションの品質と性能を発揮できる最適な資源配分を決定するアルゴリズムを開発します。

### 研究開発項目4)

#### ④ : 実証評価向けアプリケーション

本研究開発の成果を活用して実証評価向けアプリケーションを開発します。

### 研究開発目標



- 凡例
- ① : 最適配分アルゴリズム
  - ② : 透過型分散プラットフォーム
  - ③ : BEAM (Elixir処理系)
  - ④ : IoTノードの計算資源

### 研究開発成果 1-a) アーキテクチャの検討・設計

Dripcast実装をJavaからElixirに移行したアーキテクチャを検討した。アーキテクチャには階層型の構造やスケールアウト機構、透過的な資源利用モデルが含まれており、システム上で分散された計算資源を透過的に利用するフレームワークを提供した。

### 研究開発成果 1-b) プラットフォームのElixirによる実装

資源透過型の分散処理プラットフォームGiocciを実装し、OSSとして公開した。基本機能の4層(client, relay, engine, store)を実現し、各層の双方向通信を確立している。

### 研究開発成果 2-a) ヘテロSoC向けBEAM処理系の設計・実装

高知工科大学内にオンプレミスのLocal 5G基地局をMECも含めて構築し、SINET6経由で2つのクラウド(AWSおよびさくらインターネット)と接続して評価環境を実現した。ヘテロSoCについては、GPOS/RTOS型およびGPOS/FPGA型のGPOSコア側にIoTプラットフォームNervesの実装を行い、コア間連携のアーキテクチャ検討を実施した。

### 研究開発成果 2-b) B5G向け通信ミドルウェア

Elixir処理系のBEAMにDDSを組み込み、基本機能が動作することを確認した。種々の通信ミドルウェア技術に対して、任意定義型のメッセージによるDDS通信を実現する手法の設計・実装を実施した。

### 研究開発成果 3-a) 最適配分アルゴリズム

エッジ・MEC・クラウドの状態および通信路の特性に応じて、要求されたジョブを適切な計算機資源に割り当てる意志決定アルゴリズムを定めた。中央集権的なサービスにおいてこのモデルを設計し、それぞれの優位性を定量的に比較評価した。

### 研究開発成果 3-b) 優先制御と競合解決アルゴリズム

計算機資源利用量を設定したときに、最低価格となる計算機資源を選択しつつ、過度な集中をペナルティとして衝突を解決する優先制御アルゴリズムを設計した。

### 研究開発成果 4-a) 実証評価向けアプリケーション

それぞれの研究開発成果を利用して稼働する実証評価向けアプリケーションとしてカメラ画像解析システムをPoC開発し、ローカルデバイス、MEC、クラウドで動作させたときの処理時間と伝搬遅延時間について計測実施した。OSSとして公開した本システムを複数の展示会でデモ展示し、デモを通じ社会実装可能なものであることをアピールするとともに、開発期間短縮等に資するものであることを示した。

4. 特許出願、論文発表等、及びトピックス

国内出願	外国出願	研究論文	その他研究発表	標準化提案・採択	プレスリリース 報道	展示会	受賞・表彰
0 (0)	0 (0)	0 (0)	103 (31)	0 (0)	9 (5)	6 (4)	2 (0)

※成果数は累計件数、( )内は当該年度の件数です。

- (1) RICC-PIoT workshop 2022, RIXX-PIoT workshop 2023, 2024を共催  
地域間インタークラウド分科会 (RICC) およびIoTデータ連携推進分科会 (PIoT) が主催しているワークショップに共催し、「B5G.ex showcase」と銘打ったセッションを実施した。本プロジェクトの全体像ならびに最新成果を紹介し、当該分野の研究者や技術者と活発な議論や意見交換を実施した。
- (2) 多数の依頼講演やチュートリアルを実施  
CKP (Cyber Kansai Project) 夏の研究会2022、情報処理学会連続セミナー、EdgeTech+ 2022などでの依頼講演を実施した。  
2022年8月の日本ソフトウェア科学会第39回大会 (JSSST2022) では、Elixir/Nervesのハンズオンを交えたチュートリアル講演を実施した。  
2022年9月には、第24回組込みシステム技術に関するサマーワークショップ (SWEST24) において、チュートリアルセッションを企画・実施した。
- (3) 研究開発成果をオープンソースソフトウェア (OSS) として公開  
本研究開発プロジェクトの成果をOSSとして公開し、積極的に情報発信した。期間中に公開・更新したオープンソースのGitHubリポジトリは53点、注目度を示すStar数の合計は2024年2月末で計463にのぼっている。GitHubの公開リポジトリのうち主要なものを示す。  
Client Library for Giocci (computational resource permeating wide-area distributed platform towards the B5G era) [b5g-ex/giocci](#)  
Nerves System configuration for the ODYSSEY - STM32MP157C [b5g-ex/nerves\\_system\\_stm32mp157c\\_odyssey](#)  
Zenohex: Elixir API for Zenoh [b5g-ex/zenohex](#) Rclx: ROS 2 Client Library for Elixir [rclx/rclx](#)  
mROS 2: agent-less and lightweight communication library compatible with rclcpp for embedded devices [mROS-base/mros2](#)
- (4) 多数のデモ展示の実施とプレスリリースを発売、Elixirに関する書籍を出版  
EdgeTech+, JANOG Meetingなどで本委託研究の成果をブース出展した。Edge Tech+ 2023におけるNICTブースでは、社会実装支援プロジェクトの一環としてインタビュー動画投影とプレゼンを実施した。プレスリリースは実施可能な各拠点より発出し、主要メディアで報道として取り上げられている。また、Elixirに関する技術書籍「[Elixir実践入門](#)」を出版し、研究代表者がNervesに関する章の執筆を担当した。

5. 研究開発成果の展開・普及等に向けた計画・展望

本研究開発を通して、「動く実装」と「実と身のある」アプリを実現できた。各研究開発項目は一部を除いて概ね順調に達成できたといえるが、研究開発予算の大幅削減を受けて注力対象を選別せざるを得なかったものもあった。

5G/Beyond 5G技術ならびに広域分散型IoTシステム開発技術を取り巻く背景技術と社会環境は、日々大きく変遷しているといえる。具体的には、関数型言語パラダイムを採用した開発スタイルの台頭が見られており、オブジェクト指向パラダイムから置き換わる可能性が出てきている。また、デバイスの高性能化と低資源消費化、ネットワーク構造の多様化、オープンソースとオープンコミュニティの成長と常識化の潮流も見られる。これらを踏まえた上で5年後を見据えた今後の普及・展開に向けた戦略としては、まず、本研究開発を通して得られた知見を活かした、広域分散環境や多様なアーキテクチャに適した通信ミドルウェア技術の追求が挙げられる。また、エッジノードの移動を前提とした資源配分最適化アーキテクチャへの拡張も必要であると考えられる。また、5G通信網で有望な技術であるSRv6 MUPとのシナジー効果を高めていき、最適な資源への経路制御による性能向上やネットワーク機器の負荷低減に繋げることも考えられる。今後も、本研究開発プロジェクトに参画したメンバの強みと特色を活かして、学術セクターと産業セクターとでビジネス展開の可能性を模索していく予定である。なお、標準化活動と知財出願は本研究開発期間中には実施できなかったが、残された宿題とみなして今後も取り組んでいく予定である。