

採 択 番 号 04001

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

(1) 研究開発の目的

本研究開発では、Beyond 5G (以降、B5G と略す) 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す。

- ① 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する。
- ② 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研究開発する。
- ③ 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研究開発する。
- ④ 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する。

これらの研究開発に取り組むことで、IoT システムの開発・運用において必要とされる機能・性能を最大限に実現できるアーキテクチャを創出する。計算資源の特性や種類に依存しない統一された広域分散プラットフォームを構築し、関数型パラダイムに基づくプログラム性の高い超柔軟な IoT アプリケーションの開発環境を提供する。

本研究開発の成果を利用するシステム開発者は、IoT システムの構成要素であるエッジデバイスや MEC といった多様な資源特性は意識することなく、関数型パラダイムによる一体的なプログラミングが可能となる。開発された IoT アプリの各処理は、配分決定アルゴリズムによって計算資源が最適に割り当てられ、ネットワーク上に分散配置された各 IoT ノード上で透過的に動作するようになる。加えて IoT ノードの実行環境として具備された Elixir 処理系および通信ミドルウェアの機能によって、IoT システム全体の超低消費電力化が自動的に実現されるようになる。

(2) 研究開発期間

令和 3 年度から令和 5 年度 (3 年間)

(3) 受託者

国立大学法人東京大学<代表研究者>
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～)

(4) 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)
※百万円未満切り上げ

(5) 研究開発項目と担当

研究開発項目 1 資源透過型の分散処理プラットフォーム
1-a) アーキテクチャの検討・設計 (大阪大学、高知工科大学、シティネット)
1-b) プラットフォームの Elixir による実装 (高知工科大学、シティネット)

研究開発項目 2 IoT ノードの能率的な実行環境

2-a) ヘテロ SoC 向け BEAM 処理系の設計・実装

(東京大学、高知工科大学、シティネット)

2-b) B5G 向け通信ミドルウェア

(さくらインターネット、東京大学)

研究開発項目 3 計算資源配分の決定手法

3-a) 最適配分アルゴリズム

(近畿大学)

3-b) 優先制御と競合解決アルゴリズム

(近畿大学)

研究開発項目 4 実証評価向けアプリケーションの開発 (さくらインターネット、東京大学)

(6) 特許出願、外部発表等

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

(7) 具体的な実施内容と最終成果

研究開発項目 1 資源透過型の分散処理プラットフォーム

1-a) Java による分散処理環境の Dripcast についてのアーキテクチャを分析し、階層構造、分散型スケールアウト機構、透過的な資源利用モデルなどが含まれる言語非依存なアーキテクチャとして再構築した。また、研究開発期間を通して得られた検討結果を基に、Elixir 言語を使用したプラットフォームのアーキテクチャ設計と基本設計を実施した。これによって、Java に代表されるオブジェクト指向言語パラダイムから Elixir に代表される関数型言語パラダイムへの移行に関する考察を行った。以上を基にして、client, relay, engine, store の 4 層からなる資源透過型のプラットフォーム(以下 Giocci)のアーキテクチャを設計し、Elixir ならびに汎用向けの抽象化フレームワークの策定、ならびに Elixir 実装に向けた基礎検討と機能検証を実施した。

1-b) 1-a) の設計の結果を元に、資源透過型の分散処理プラットフォーム機能を Elixir で実装した。Giocci の基本的な 4 層(client, relay, engine, store)の実装を行い、双方向通信(client から engine への通信、engine から client への通信)を実現した。また、高知工科大学とクラウド(aws、さくらインターネット)を SINET で接続した閉域網内での動作検証を行い、マルチクラウド上での Giocci の基本的な 4 層のデプロイ、異なるネットワーク上からの双方向通信を確認した。加えて、「研究開発項目 4 実証評価向けアプリケーションの開発」で開発した実証評価向けアプリケーションを用いて、Giocci の機能を実証的に評価した。また、本実行環境をソフトバンクの 5G-MEC 上にも構築し、商用のキャリア 5G でも正しく動くことを立証した。

研究開発項目 2 IoT ノードの能率的な実行環境

2-a) 様々な計算性能・アーキテクチャが混在しうる IoT 環境を想定し、ヘテロ SoC 向け BEAM 処理系を設計・実装した。ヘテロ SoC については、1 つずつ GPOS/RTOS 用のコアを持つ SoC、GPOS 用コアと FPGA とを持つ SoC を対象とした。特に後者のプロセッサと FPGA を混載するヘテロ SoC については、AMD/Xilinx 社の KR260 を対象とし、Arm Cortex A53 コア上には Elixir の組み込みシステムプラットフォームである Nerves を移植してこれを稼働させ、コンフィギュレーションツールを用いて FPGA への回路の書き込みと制御ができるようにした。また、高知工科大学の屋内に工場型 MEC として RAN からコアまでを一式含む構成を想定した 5G を含めた広域分散型の実証実験環境を構築した。これと合わせて、高知工科大学内に構築された Local5G 環境及び、Local5G エミュレート環境から SINET 経由でクラウド(aws、さくらインターネット)に接続可能な NW 環境を構築した。

2-b) 計算資源間を繋ぐ通信ミドルウェアの選定および Elixir 向けの実装とそれらのミドルウェア間の比較検討を行った。エッジデバイスの自律動作の実現に必要なノードディスカバリ機能と Pub/Sub 型通信に対応する DDS 通信機能を包含した Rclx クライアントライブラリを、Nerves デバイスで利用できるようにソフトウェアとして組み込み実装した。また、OSS ソフトウェアである Zenoh に着目し、本研究開発項目で試作検討中の IoT ノードに実装して通信性能の評価を行った。本研究開発プロジェクトで整備・運用を行っている高知工科大の Local5G 環境において、異なる NAT サーバを越えた環境下でこれが動作することを確認した。加えて、Elixir アプリケーションから Zenoh を利用できるようにするクライアントライブラリである Zenohex を初期実装し、この動作を確認した。これらにより、本研究開発で試作検討中のエッジデバイス、MEC、クラウド全てで Elixir 処理系での通信を実現できることになった。

研究開発項目 3 計算資源配分の決定手法

3-a) 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設計した。中央集権的なサービスにおいてこれを実装した場合のモデルを設計し、どのアルゴリズムに優位性があるかについて定量的に比較評価した。本アルゴリズムは排他的に計算資源を選択することができ、制約条件を満たさない場合は明示的にその結果を返すことが可能である。

3-b) 複数のドメインにまたがる計算機資源の売買に関する初歩的な評価実験を行った。これを基にして、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、過度な集中が発生する際に与えられるペナルティによって衝突を解決する優先制御アルゴリズムを設計した。本アルゴリズムを実装し、デモンストレーションを実施した。

研究開発項目 4 実証評価向けアプリケーションの開発

エッジデバイス・MEC・クラウドそれぞれ、およびそれぞれの組み合わせ間で実行メトリック情報を取得するプログラムを設計・実装した。また、本研究開発試作プラットフォーム上で稼働させる実証評価向けアプリケーションを検討し、既出のアプリ例対照表の結果も参考にして本研究開発プロジェクトにおけるアプリケーションの候補を選定した。この検討結果を基にして、実証評価向けアプリケーションとしてカメラ画像解析アプリケーションを開発し、OSS として公開した。これを利用することで第三者が分散処理プラットフォームの動作を再現・評価可能である。実際、EdgeTech+ 2023、JANOG53、四国情報通信懇談会 ICT 研究交流フォーラム ICT 技術勉強会、の各イベントにて当プラットフォーム・アプリを利用した技術デモを実施した。これらのデモ・展示は、本成果の社会実装につながるアピール活動である。

(8) 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の 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。