

## 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 低遅延・自律性を実現するフローティングサイバーフィジカルシステムと広域連携の研究開発
- ◆受託者 国立大学法人九州工業大学、株式会社KDDI総合研究所
- ◆研究開発期間 令和4年度～令和6年度 (3年間)
- ◆研究開発予算 (契約額) 令和4年度から令和5年度までの総額195百万円 (令和5年度100百万円)

## 2. 研究開発の目標

MEC・デバイスエッジ連携によるフローティングコンポーネント技術、フローティングサイバーフィジカルシステム基盤実現に向けたBeyond コンテナ実行基盤により得られる成果を統合することで、低遅延・自律性を実現するフローティングサイバーフィジカルシステム基盤を構築し、ユースケースに基づいた実証実験を日本および米国のBeyond 5G テストベッドを用いて実施することでその有効性、実現可能性を評価する。

## 3. 研究開発の成果

### 研究開発項目1: MEC・デバイスエッジ連携によるフローティングコンポーネント技術

- 大容量データおよび空間で使用する「機能」を滞留させるためのフローティングコンポーネント技術の改良、評価を実施
- F-CPSデバイスエッジの監査機構の高度化と広域化に向けた改良と評価
- 多対多データ転送に関して複数の1対多データ転送を同時並列実行できるスケジューリング手法をより最適化
- パケットロス率およびパケット遅延分散の劣化リンクの実時間検知に關してもより最適化し検知完了時間を平均10%以上短縮

### 研究開発項目2: フローティングサイバーフィジカルシステム基盤に向けたBeyondコンテナ実行基盤技術

- コンテナ内で動作する滞留機能からユーザ端末やIoT機器に接続されたセンサー等へのアクセス手法を設計
- Beyondコンテナに関するセキュリティ監視機構を実装
- WebAssembly(Wasm)コンテナ実行基盤を拡張し、メッセージングプロトコルをWasmコンテナから利用するためのミドルウェアの開発
- デバイスエッジ上で動作可能なスケジューリング機能の検討

### 研究開発項目3: フローティングサイバーフィジカルシステム統合実証実験

- 研究開発項目1および研究開発項目2により得られる成果を統合するための要件および課題を抽出した上で、設計、および試作を実施
- 日米横断テストベッドネットワークとして九工大、CCNY、COSMOS間を高速に接続しその接続を安定稼働

- 研究成果1: フローティングコンポーネント技術の基盤の改善
  - 効率的なデータ拡散・データ滞留を実現し、空間全体のデータ送信数を削減しつつ高いカバー率を実現し、シミュレーション評価により、その有効性を明らかにした
  - データの運用・管理ポリシーや通信環境が異なる複数の地域間での連携時のエッジデバイスの異常動作の検出手法の実機実装方法について検証した
- 研究成果2: F-CPS間連携を想定したプログラマブルネットワーク基盤の検討
  - 5つ以上の異なる1対多データ転送の並列実行のスケジューリング手法を改善し、20個以上のノードから成るネットワークにおいてファイル転送完了時間を平均10%以上短縮した
  - In-network処理を利用したスイッチ間連携によりコントローラを介さない劣化リンク検知手法を開発し、20個以上の仮想リンクを持つネットワークにおいて検知完了時間を平均10%以上短縮した
- 研究成果3: Beyond コンテナ実行基盤の設計と開発
  - WebAssembly(Wasm)コンテナ実行基盤に対してWeb通知機能を用いたユーザへの情報提示インタフェースの設計、実装した
  - Unikernelを用いるBeyondコンテナの通信監視時の性能を向上、VMIを用いて様々なハイパーバイザ上で監視する技術、コンテナ外からの監視技術を開発した
  - デバイスエッジ間の連携動作におけるメッセージングプロトコル性能評価を完了し、NATSプロトコルを用いたPub/Sub型通信を可能とするインタフェースの設計および実装を完了した
  - 分散型機能スケジューリング基盤についてスケジューリングフローのシーケンスおよびインタフェースの設計し、実装が完了した。
- 研究成果4: 統合実験へ向けた試験実験を実施、テストベッド環境を整備
  - 研究開発項目1、2の成果の一部を統合し、ユースケースに基づいた実証実験に向けた統合試験実験を実施した
    - 九州工業大学 戸畑キャンパスにあるGYMLABO内において、単一のF-CPSの構築を実施
    - NICT B5Gテストベッドに設置したMECサーバから地域特化型アプリケーションを配信、データ滞留システムによりデータを拡散・滞留することで、ユーザ(モバイル端末)が地域内情報をリアルタイムに利活用可能であることを明らかにした
  - 2024年度の実証実験に向けて日米間を接続するP4プログラマブルネットワークを用いるためのAPIの設計・開発を実施した。
  - JGNのP4テストベッドの試行利用を進めると共に九工大およびCOSMOSとのVLAN接続を完了した。

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
4 (2)	0 (0)	1 (1)	78 (51)	0 (0)	1 (0)	1 (0)	8 (4)

※成果数は累計件数、( )内は当該年度の件数です。

(1) 研究論文1件、その他研究発表51件(内、国際共著 4件)

本研究開発において1件の研究論文の採択、51件の研究報告を実施し、同分野における様々な研究者と活発な議論が行われた。米国の連携先であるCCNYと国際共著論文として研究論文1件、国際会議に3件採択されている。また、電子情報通信学会における研究会や国際会議において4件招待講演として報告している。このことから社会的期待が大きいことを確認できた。

(2) 国際ワークショップを2件開催

2023年10月1日～4日、The Grove School of Engineering, City College of New York において「Workshop on Computation and Communication Innovation CCNY, Kyutech, KDDI, and NICT Collaborative Research (F-CPS Project)」を開催した。本ワークショップには、九州工業大学、株式会社KDDI総合研究所、情報通信研究機構(NICT)、ニューヨーク市立大学、コロンビア大学の研究者が参加した。14件の研究発表と、ポスターセッションを企画し、機関間の研究交流を実施した。また、本研究開発に関係する日米間のテストベッド活用について今後の連携方針、研究推進計画について議論した。

2024年1月22～23日、九州工業大学飯塚キャンパスにおいて九州工業大学、株式会社KDDI総合研究所、ニューヨーク市立大学が参加するワークショップを開催した。本ワークショップでは、日本側の研究機関が開発を進めているF-CPS実証基盤のデモを通して、次年度における日米間テストベッド活用について議論した。

5. 今後の研究開発計画

研究開発項目1 MEC・デバイスエッジ連携によるフローティングコンポーネント技術

- 研究開発項目1-a 車両・デバイスエッジを用いたフローティングコンポーネント技術
  - ・ 地域内で使用する「機能」を滞留させるためのフローティングコンポーネント技術の改良、評価を実施
  - ・ F-CPS実現に向けて屋内向けに時空間データ滞留システムの改良を行い、実機実験により有効性を評価
  - ・ 上記の成果を研究開発項目3と統合、実証実験を実施
- 研究開発項目1-b 効率的かつ高信頼なF-CPS運用を実現するMEC連携に関する研究
  - ・ 監査機構の「高信頼化/汎用化」のための学習の効率化手法を新たに考案し、ネットワークシミュレータを用いて、多様な通信環境における提案手法の有効性を示す。
  - ・ 監査機構の「広域化」を実現するMEC間の連携制御機構を改良し、テストベッド環境上で実証実験を行い、有効性を評価
  - ・ 上記の成果を研究開発項目3と統合、実証実験を実施
- 研究開発項目1-c 広域のF-CPS間連携技術に関する研究
  - ・ 多対多ファイル転送においては、In-networkキャッシュを利用した中継ノードでのデータ書き換えのスケジューリングおよび異なるタイミングで参加する送信者を含む場合のスケジューリングの最適化を進める。
  - ・ 品質劣化リンク実時間検知においては、In-network処理を利用したスイッチ間連携によるコントローラを介さない劣化リンクの高速検知をさらに改良する。
  - ・ 上記の成果の一部はP4機能を持つ広域テストベッドを利用して実験・検証し、実用化へ向けた課題を抽出する。

## 研究開発項目2 フローティングサイバーフィジカルシステム基盤に向けたBeyondコンテナ実行基盤技術

- 研究開発項目2-a 軽量性と高可搬性を備えたコンテナ技術
  - ・ 研究開発項目2-cおよび2-dで研究開発を進めたミドルウェアおよびスケジューリング技術を統合し、WebAssembly (Wasm)ベースのBeyondコンテナ実行基盤の構築を実施
  - ・ Wasmコンテナ向けのWebXR機能およびインタフェースを拡張開発し、XRデバイスの制御をおこなうWasmコンテナの研究開発を実施
  - ・ 上記の成果を研究開発項目3と統合、実証実験を実施
- 研究開発項目2-b Beyondコンテナのためのセキュリティ監視技術
  - ・ Unikernelを用いるBeyondコンテナについて、VMIを用いてカーネルデータを監視する性能および、コンテナの通信を監視するオーバーヘッドを調査
  - ・ Wasmを用いるBeyondコンテナについて、コンテナの状態やシステムインタフェースの利用状況を監視する性能を調査
  - ・ 開発したセキュリティ監視技術を用いてBeyondコンテナの異常な挙動が検知できることを検証
- 研究開発項目2-c 滞留機能の分散処理に対応するミドルウェア技術
  - ・ NATSプロトコルによるPub/Sub型メッセージシステムを用いてWasmコンテナ間の連携動作を確認し、複数のWasmコンテナがチェーン状に連携して情報を処理することでF-CPSにおける滞留機能が実現可能であることを実証
  - ・ 滞留機能のステート情報移行技術において、メモリ情報の送受信インタフェースおよびタイミングを改善、毎秒1台のデバイスエッジが参加/離脱する模擬環境において評価を実施
- 研究開発項目2-d 機能滞留に対応する機能スケジューリング基盤技術
  - ・ 分散型スケジューリング機能を研究開発項目2-aで開発するBeyondコンテナ実行基盤上へ導入
  - ・ 複数台の異なるOS、CPUを搭載した実機デバイスで構築した基盤上で、分散型スケジューリング機能の協調動作や分散処理の有効性を評価
  - ・ 実証実験において地理情報やユーザの位置情報、ノードの備える機能に応じたフィルタリングやスコアリングをベースとしたスケジューリングを統合、ノード配置や滞留機能間の情報連携や情報配信への有効性を評価

## 研究開発項目3 フローティングサイバーフィジカルシステム統合実証実験

- 研究開発項目3-a F-CPS基盤の開発とユースケースに基づいた実証実験
  - ・ 2023年において前倒して実施した統合試験実験の結果から得られた様々な課題を解決するため、システムの改良と検証を実施
  - ・ 九州工業大学戸畑キャンパスのGYMLABO、及び屋外において、ユースケースに基づくフィールド実験を実施
- 研究開発項目3-b ポリシーの異なるF-CPS間の広域連携実証実験
  - ・ 米国CCNYの連携研究者と連携し、上記の例をベースとした広域連携実証実験のためのアプリケーションの具体的な設計及び開発を実施
  - ・ 2023年までに構築した日米横断テストベッドネットワークのP4実験環境の試験実験を実施
  - ・ 日米横断型広域テストベッドを用いたF-CPS 広域連携実証実験を実施

## 6. 外国の実施機関

ニューヨーク市立大学 (City College of New York, アメリカ合衆国)