

(1) 研究開発の目的

(2) 研究開発期間

(3) 受託者

(4) 研究開発予算（契約額）

(5) 研究開発項目と担当

(九州工業大学)

(九州工業大学、KDDI 総合研究所)

(九州工業大学)

(KDDI 総合研究所)

(九州工業大学)

(KDDI 総合研究所)

(KDDI 総合研究所)

(KDDI 総合研究所、九州工業大学)

(九州工業大学, KDDI 総合研究所)

(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	4	0
	外国出願	0	0
外部発表等	研究論文	4	3
	その他研究発表	119	41
	標準化提案・採択	0	0
	プレスリリース・報道	2	1
	展示会	3	2
	受賞・表彰	15	7

(7) 具体的な実施内容と最終成果

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

- 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
 - ・ 地域内のデータ及び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として大容量時空間データ滞留を提案し、シミュレーションおよび実機実験による検証に取り組んだ。シミュレーションにおいては現実環境を模した都市内の車両移動モデルを使用することで、大規模な環境において提案方式が有効であることを示した。また、キャンパス内における実機実験を通して、現実環境における提案方式の有効性を示した。
 - ・ 大容量時空間データ滞留方式におけるデータ到達率改善のため、冗長パケットを用いたデータ復元、その発展としてデータ符号化を用いた信頼性向上手法に取り組んだ。シミュレーション及び実機実験を通して、本提案手法の有効性を示した。
 - ・ GPS 情報が利用できない屋内での時空間データ滞留方式に向けて、無線通信の受信電波強度を用いた位置測位に基づくデータ滞留方式を提案し、実機実験による提案方式の有効性を評価した。
- 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
 - ・ フローティングコンポーネントのデバイスエッジによる滞留動作の監査機構として、「MEC 連携による多層化ブロックチェーン」を提案し、滞留範囲外での送信動作を迅速かつ高信頼で検出出来る事を、シミュレータ及び実機実装を用いた実験を通じて確認した。
 - ・ 単体の F-CPS に着目し、滞留範囲外での送信を行ったデバイスエッジを検出する手法を考案し、高信頼で検出出来る事を多様なシミュレーション評価によって有効性を示した。
 - ・ MEC 連携データ分析・機能抽出機構の実現に向けて検討し、通信・計算資源の効率・公平利用を両立するネットワーク型データ前処理決定アルゴリズムを設計し、有効性を検証した。
 - ・ ネットワーク型データ前処理機能の MEC 内での実現に向けた初期検討として Kubernetes 環境でのプロセス分割機能が実現出来ることを実機検証で示した。
- 研究開発項目 1-c 広域の F-CPS 間連携技術に関する研究
 - ・ 高速・高効率な多対多ファイル転送のために、スイッチでの転送データキャッシュと書換えも活用した複数の一対多転送のスケジューリングにおいて、優先度と経路を動的に変更し、送信者間の競合を緩和し、受信完了時間の全体効率と公平性のトレードオフを制御できる手法を開発した。これにより当初目標：多数の F-CPS をノードとするネットワークにおける多数の一対多データ転送の同時並列実行を適切にスケジュールして、単純な帯域共有に比べて 3 倍以上の効率を実現する、を達成した。
 - ・ ネットワーク内の品質劣化の実時間検知のために、計測パケットへの情報埋込みを活用し、アクティブ計測パケット列をマルチキャスト・ソースルーチングによって転送し、計測ホストとスイッチが直接連携することで、コントローラの介在なしに全リンクの上り下りの品質を監視しながら劣化情報を素早く計測ホストへ知らせ劣化リンクを特定する手法を開発した。これにより当初目標：多数の仮想リンクを持つネットワークにおいて各リンクでのパケットロス率およびパケット遅延分散が閾値を超えた品質劣化リンクを

実時間で検知する、を達成した。

- P4 技術を用いたスイッチの高度処理の実現可能性の検証のために、ソフトウェアおよびハードウェアスイッチ上で動作実験を行い、各種要素機能が P4 で実装可能なこと、ハードウェア P4 スwitchは十分な性能が出ることを確認し、手法の実現可能性についても検証する、という目標を達成した。

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
 - WebAssembly(Wasm)技術を用いた Wasm コンテナ実行基盤ソフトウェアの研究開発を実施し、既存コンテナ技術と比較して高可搬性、軽量の機能実行基盤を実現した。また Web ブラウザ上にコンテナエンジンを配置可能とすることでプロビジョニング不要で多様なデバイスで動作可能なコンテナ技術を確立した。
 - Wasm コンテナを用いてユーザ端末やシングルボードコンピュータ等、異なるプロセッサ、オペレーティングシステムを搭載した機器上でこれら機器毎の実行イメージ変換を必要とせず、同一の機能を共通のイメージファイルで実行可能なことを確認した。またイメージファイルを軽量化することで従来コンテナより高速に実行可能なことを確認した。
 - 研究開発項目 2-b、2-c で開発したミドルウェア機能、分散型スケジューラ機能を統合し、九工大との共同実験を通じてサイバーフィジカルのユースケースとして想定される IoT センサーと XR 仮想空間を連携したアプリケーションに対して本技術を適用可能であることを実証した。
- 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 コンテナのシステム情報および通信を安全に監視するシステムを開発した。これにより、当初目標であった Unikernel に VMI を適用することによる監視に加えて、通信の監視も実現することができた。また、複数のハイパーバイザに対応するという目標も達成した。
 - Wasm を用いる Beyond コンテナの監視手法についての検討を行い、システムインタフェースおよび内部状態を安全に監視するシステムを開発した。これにより、当初目標であった最適な手法を用いた監視技術を実現することができた。
- 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
 - WebAssembly コンテナが備えるメッセージング機能として NATS プロトコル、情報滞留ネットワークの 2 方式の通信インタフェースを設計、開発した。
 - 通信インタフェースを用いて Wasm コンテナがチェーン状に分散処理を実施可能なことを実証実験基盤において確認した。
 - デバイス間でコンテナのステートを移行するコンテナマイグレーション機能を開発、演算の途中でコンテナをデバイス間で移行可能なことを確認した。また本年度は Asyncfy 技術を用いてより汎用的かつ高速にステートを移行する技術を検討、開発し本技術を用いて実験環境において毎秒 1 台のデバイスエッジが基盤に参加・離脱した際の継続動作性を検証した。
- 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
 - Wasm コンテナエンジンを制御する Wasm コンテナ管理基盤(CMS)の設計開発を完了し、研究開発項目 2-a にて開発を行った Wasm コンテナ実行基盤と接続することで、各種デバイス上で動作するコンテナエンジンの制御やコンテナの配置が可能であることをデバイス実機により確認した。
 - Wasm コンテナ実行基盤内で Wasm コンテナとして動作するスケジューラ機能を開発、Wasm コンテナ管理基盤と NATS プロトコルを用いた Pub/Sub メッセージング機能を用いて接続することで複数のデバイス上で分散してスケジューリング処理を行う。評価実験によって 1,000 ノード規模のデバイス接続環境においてスケジューラ機能を自律的に分散配置し、10,000 個のコンテナのスケジュール要求を処理可能であることを確認した。
 - 九州工業大学内に構築した F-CPS 実証基盤環境に本技術を適用し、複数のプロセッサ、OS を搭載した実機デバイスが混在する環境で分散型スケジューラが動作し、ノード情報

に基づいたコンテナの割当先を決定できることを実証した。

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
 - ・ フローティングコンポーネント技術及び Beyond コンテナ実行基盤の統合のためのアプリケーション配信・データ収集手法を提案し、実機上に実装、検証をすることで後段の実証実験に向けた準備を進めた。
 - ・ フローティングコンポーネント技術及び Beyond コンテナ実行基盤を統合した F-CPS 基盤において、九州工業大学のキャンパス内で単一の F-CPS を構築し、F-CPS 基盤の実現可能性の検証と性能評価を実施した。この成果は CEATEC2024 等において報告した。
 - ・ F-CPS 基盤を用いたユースケースとして、分散型の機械学習基盤である連合学習アプリケーションを作成し、実機実験によってその有効性を評価した。
- 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
 - ・ 日米横断テストベッドを整備し、NICT-P4 テストベッド上の基本動作を確認した。NICT-P4 でのネットワーク内機能力スタマイズの利用環境を整備し、九工大・COSMOS 等にまたがる F-CPS 実証基盤を構築した。
 - ・ 日米横断テストベッドを用いた F-CPS 間連携として、AR/XR による空間共有アプリケーションを開発し、広域連携実証実験を行った。この成果は国際会議 SC24 における展示会で検証、成果報告しつつ、ここで得られた知見をフィードバックすることで、ニューヨーク市立大学における実証実験を実施した。

(8) 研究開発成果の展開・普及等に向けた計画・展望

- フローティングサイバーフィジカルシステム
 - 集中管理一極となっているクラウドシステムの分散化を模索する。
 - ✧ 例として、自動運転制御のための連合学習基盤や、スマートシティやスマートモビリティサービスを中心とした活用を検討する。
 - 実証実験を通して、イベント特化型の情報提供アプリは本システムとの親和性が高いことを確認した。
 - ✧ アプリケーション実行基盤の共通化によるイベント特化型のサービス提供をユースケースとして、社会展開・社会実装を検討していく。
- プログラブルデータプレーンネットワーク
 - ハードウェアの開発ベンダーに大きく左右されるが、常に最新の動向に注意しつつ、今回構築した日米横断型のプログラブルデータプレーンネットワークを用いた研究開発を推進する予定である。
- Beyond コンテナ (Wasm コンテナ) 技術
 - 2025 年度：Wasm コンテナエンジンや管理基盤等のコンポーネントをオープンソース化を進める。
 - ✧ 国内外のコミュニティ、シンポジウム、国際会議等へ参加し、技術者へのアピールやコミュニティを通じた利活用を議論していく。
 - 2025 年度～
 - ✧ OSS 団体 (Linux Foundation・Bytecode Alliance) 向けの成果発表、I/F 等の標準化提案を行っていく。
 - 2028 年度～
 - ✧ AI サービスを対象としてクラウドやエッジコンピューティングプラットフォームへの活用検討、パートナーリングを開始することを計画する。
 - ✧ サーバレス PF に関するビジネスモデルを確立する。
 - 2030 年度
 - ✧ キャリアクラウドとユーザサイドエッジを連携した 6G サービスとして展開する

(9) 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)