

採 択 番 号 01201

研究開発課題名 Beyond 5G で実現する同期型 CPS コンピューティング基盤の研究開発

(1) 研究開発の目的

産業システムや社会インフラで用いる CPS では、センサやロボットのアクチュエータなどの OT デバイスに接続された通信ネットワークと、コンピューティング処理基盤によりシステムが構成される。高速の制御ループが必要な OT デバイスでは、通常その制御はデバイス内に閉じて行われる。今後、低遅延の Beyond 5G (B5G) を適用すれば、OT デバイスとネットワーク越しのコンピューティング処理基盤に処理を分散してリアルタイム処理を行うことが可能となる。その結果、単に OT デバイス内に必要な計算資源を減らすことができるだけでなく、多種多様な OT デバイスを CPS に収容し、コンピューティング処理基盤上のアプリケーションで OT デバイスを連携させることが容易に可能となるため、上記特徴は普及に際して重要な KSF (Key Success Factor) となる。本研究開発では、OT を対象とするリアルタイム処理が可能で、多彩なサービスを提供できるコンピューティング処理基盤を特長とする CPS (同期型 CPS と定義) の実現を目的とする。

(2) 研究開発期間

令和 3 年度から令和 6 年度 (4 年間)

(3) 受託者

日本電気株式会社<代表研究者>
国立大学法人東京大学

(4) 研究開発予算 (契約額)

令和 3 年度から令和 4 年度までの総額 976 百万円 (令和 4 年度 517 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 ネットワーク型 OT 制御コンピューティング処理基盤の研究開発 (日本電気株式会社)

研究開発項目 2 QoE 指向時空間ダイナミック無線リソース制御の研究開発

研究開発項目 2-a) 時空間ダイナミックスライシング技術の研究開発 (国立大学法人東京大学)

研究開発項目 2-b) 時空間ダイナミックフロー制御技術の研究開発 (日本電気株式会社)

研究開発項目 2-c) End to End QoE コントローラの研究開発 (日本電気株式会社)

研究開発項目 3 ゼロトラスト・スケーラブルアクセス制御の研究開発 (日本電気株式会社)

(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	12	10
	外国出願	7	4
外部発表等	研究論文	3	2
	その他研究発表	29	19
	標準化提案・採択	0	0
	プレスリリース・報道	7	1
	展示会	1	1
	受賞・表彰	0	0

(7) 具体的な実施内容と成果

研究開発項目 1 :

2022年度は、OT 制御共通基盤及びプランニングエンジンの仕様検討及び試作を行うと共に、ネットワーク型 OT 制御コンピューティング処理基盤に実装するネットワーク遅延フィードバック制御の要件検討及び実験を行った。OT 制御共通基盤・プランニングエンジンの仕様検討及び試作では、OT デバイスの制御 API を抽象化し、認識、判断、制御の機能モジュールを自由に組み合わせて柔軟な OT デバイス制御を可能とする基盤及びクラウド-エッジ間の処理の仕様検討及び試作を行った。その結果、クラウド及びエッジの複数ノードに対して機能モジュールを分散配置できることを確認し、5台のロボットがシミュレータ上で動作可能なことを確認した。さらに実証パートナの物流倉庫にて、一人の作業員が複数台ロボットを制御するためのシステムの原理検証を行い、ロボットが見えない遠隔から指示を出し、離れていてもロボットを制御できることを実機により確認した。

さらにネットワーク遅延フィードバック制御の要件検討および実験では、クラウドとエッジ間のネットワークを跨いだ処理ループにおけるネットワーク遅延を考慮した OT デバイス制御に必要な機能要件の検討と、それに必要な机上評価及び実機評価を行った。その結果、タスクプランニングエンジンの AI に対してネットワーク遅延をフィードバックする方式を確立し、ネットワーク遅延に応じて最適な制御周期を選択することで、ネットワーク遅延を考慮しない場合と比較して、ロボットの動作を最大2倍高速化できることを確認した。

研究開発項目 2

研究開発項目 2-a)

2022 年度は、定義された空間における通信品質を制御する基地局アーキテクチャを設計すると共に空間分解能高度化のアプリケーションの検討を進めた。その結果として、空間分解能を高度化する基地局アーキテクチャ設計の基礎を確立した。さらに、ダイナミック周波数共用の電波利用に向け、導波路アンテナの指向性のシミュレーション評価や誘電体を用いた高指向性アンテナの試作を実施し、その結果として時間分解能・空間分解能の高度化に必要な高指向性が得られることを確認した。

また、メタサーフェス知的反射面による伝搬環境制御については、より現実的な伝搬環境を想定したメタサーフェス制御の検討・評価を行った。基地局の送信パラメータ（アンテナウェイト）とメタサーフェスの構成要素（反射振幅・位相）を効率的に最適化するアルゴリズムを評価する手法の開発に取り組んだ。その結果、基地局における差動変調とメタサーフェスの簡易トレーニングの併用するアイデアを提案し、最小限のトレーニングオーバーヘッドで効率的にメタサーフェス制御するアルゴリズムの基本構成を開発することができた。また数値解析により、オーバーヘッドを削減しながらメタサーフェスの性能利得を維持できることを確認した。

研究開発項目 2-b)

2022年度はよりシビアな無線環境での使用や要求性能の高いアプリケーションに対応するため、複数の RAT を同時に使用する冗長制御技術を検討し、時空間ダイナミックフロー制御への適用を図り、時空間ダイナミックフロー制御技術の確立を行った。具体的には、3本以上の RAT を使用できる場合において、2021 年度に確立した RAT 切り替え技術、および 2022 年度に確立する冗長制御技術を適切に併用できる時空間ダイナミックフロー制御技術の確立を行い、2-c) で 2021 年度に技術開発を

行ったQoE予測技術と結合した場合の評価検証を行った。その結果、静止時において、冗長制御技術により遅延10ms以下のパケットが99.99%、最大遅延11msという性能が達成できることを確認した。さらに、移動時において、2-c)のQoE予測技術と時空間ダイナミックフロー制御技術の結合により、遅延30ms以下のパケットが99.92%、最大遅延85msという性能が達成できることを確認した。他無線機の帯域占有率が平均10%以下という理想的に近い無線環境ではあるものの、静止時、移動時ともに目標制御周期での動作が可能レベルの遅延性能を確認した。

研究開発項目2-c)

2022年度は、QoEを考慮に入れたネットワーク制御を実施するため、2-b)で2021年度に技術開発を行ったRAT切り替え技術とEnd to End QoEコントローラを結合した制御方式の確立を行い、適用効果をシミュレーション評価、および、試作実装を用いた評価を行った。その結果、リアルタイムかつロバストに通信遅延を予測することができることを確認した。また、リソース制御技術における制御方式を確立した。さらに、計算機シミュレーションならびに試作実装による実機評価によって検証を行った。その結果、通信スループットや通信遅延だけでなく、遅延、ジッタも含めた通信フローの要求性能を達成できることを確認した。

研究開発項目3:

2022年度は、ゼロトラストの概念に基づくOTネットワークの詳細なアクセス制御を低コストで行うため、同期型CPS内部の挙動を監視し、ネットワークや関連リソースの動的な変化に追従したポリシーの自動生成と、それを反映して適用可能なアクセス制御基盤の試作実装、評価を行った。その結果、ポリシー管理者の意図を基に、機械学習モデルを適用し、複数のパラメータを複合的に判断した細かなポリシーを自動生成し、従来のアプリケーション側以外にエッジ側にもエンフォース(ポリシー適用ポイント)を配置した多段アクセス制御基盤にて、ネットワークや関連リソースの変化に応じて、段階的にアクセスを制御できることを確認した。

標準化活動

2022年度は、URLLCの実装状況、ユースケースや技術要件に関して3GPP、O-RAN、FIWAREの状況を調査・分析を行った。その結果、時刻同期において実装依存が大きく実現性の課題があることを見出した。また、FIWAREにおいてロボット対応のデータモデルやエージェント(ソフトウェア)があり、エコシステムについてフォローアップを行う方針とした。

(8) 今後の研究開発計画

研究開発項目1:

2023年度は、OT制御共通基盤及びプランニングエンジンを実証環境で評価しフィードバックを得ることで試作機を改善する。またネットワーク遅延フィードバック制御の仕様検討及び試作を行う。

OT制御共通基盤及びプランニングエンジンの実証環境評価および改良試作では、プランニングエンジンとOT制御基盤を結合し、顧客ユースケースで用いるOTデバイスアプリを想定したモジュールをクラウド・エッジに配備した検証を行う。さらにその結果から複数のOTデバイスを用いたシステムにおいて機能配置を効率化するための機能モジュール管理機能の試作や機能モジュールの改善を行う。

また、ネットワーク遅延フィードバック制御の試作検討および試作では、プランニングエンジンにネットワーク遅延を入力し、OTデバイスと計算リソース間の遅延に応じて制御周期を最適化する機構の仕様検討及び試作を行う。

研究開発項目2

研究開発項目2-a)

2023年度は、時空間ダイナミックスライシングプラットフォームの構築では、6GHz以上、特に28GHz以上のミリ波において、導波路アンテナ及びアンテナモジュールを用いた試験環境を構築し、空間分解能を把握する。また、さらに空間分解能高度化のアプリケーションの検討と評価を進める。メタサーフェス知的反射面による伝搬環境制御では、情報理論的セキュリティ実現に向けた研究開発をすすめる。盗聴者が存在する通信シナリオを仮定して、物理層セキュリティ技術により高い秘匿性を達成する。適切にユーザーにビームが向けられているときに盗聴者伝搬路が閾値以下であると仮定して、メタサ

ーフェス制御アルゴリズムを研究開発する。

研究開発項目 2-b)

2023年度は、2022年度までに確立した時空間ダイナミックフロー制御技術と 2-c) で技術開発した QoE 予測技術の結合技術の高度化の検討を行い、QoE 指向型時空間ダイナミックフロー制御技術を確立する。本技術に関し、ソフトウェア試作を行い、実証環境での評価を行う。さらに、実証環境については拡充し、ローカル 5G の機能のアップデートを実施し、低遅延に関する性能の高度化を計画する。具体的には、3本以上の RAT を使用できる場合において、2021 年度に確立した RAT 切り替え技術、および 2022 年度に確立した冗長制御技術を結合した時空間ダイナミックフロー制御技術の確立を行い、適用効果を明らかにする。また、2022 年で結合した 2-c) の QoE 予測技術を適用したフロー制御アルゴリズムの高度化を行い、評価検証を行う。

研究開発項目 2-c)

2023年度は、End to End QoE コントローラのスライス間交渉技術について 2-a) と結合した制御の検討・評価を行う。具体的には 2022 年度に確立するネットワーク制御手法について、2-a) 開発の無線制御技術を連携する手法について検討・評価を行う。

研究開発項目 3 :

2023年度は、動的なネットワークや関連リソースに追従したポリシー生成をスケーラブルに実施するための同期型ポリシー生成の高速化と、10,000 台規模のエッジに対して同期型ポリシーを反映可能なスケーラブルアクセス制御基盤の実装と性能の評価を行う。

標準化活動

2023年度は、本研究開発での評価結果を考慮し、現状とのギャップを分析し、同期型 CPS 実現に必要な技術要件を整理し、標準化へ入力する検討を行う。