

令和 5 年度研究開発成果概要書

採 択 番 号 05301

研究開発課題名 高精度時刻同期に基づく超低遅延デジタルツイン処理基盤の研究開発

(1) 研究開発の目的

ネットワーク上の離れた複数地点に設置された原子時計間で、無線・有線により高精度なクロック周波数の同期を行う分散型時刻同期システムを構築する。分散型時刻同期システムを構成する各ノードは小型原子時計等からなる計時機能を備えており、自ノードと他ノードがそれぞれ保持する時計の間の時刻差を比較し、これらの時刻差情報を集約することで、最も確からしい時刻を推定し、各ノード間の時刻同期を行う。上記実現により、Beyond 5G における大容量通信や、自動運転・移動体制御や産業 IoT 応用等に資する超低遅延データ通信の基盤技術を確立する。これにより、サイバー空間とフィジカル空間が高度かつリアルタイムに連携する Society 5.0 に資する時空間デジタルツイン基盤を実現する。

(2) 研究開発期間

令和 4 年度から令和 5 年度 (2 年間)

(3) 受託者

日本電気株式会社<代表研究者>
株式会社スペクトラ

(4) 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 450 百万円 (令和 5 年度 200 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 有無線シームレス時刻同期基盤の研究開発

研究開発項目 1-a) 有線/無線互換型時刻同期システムの研究開発 (日本電気株式会社)

研究開発項目 1-b) 無線時刻同期プロトコルの研究開発 (日本電気株式会社)

研究開発項目 2 時刻・データ連携処理基盤の研究開発

研究開発項目 2-a) 時刻に同期したデータ通信の研究開発 (日本電気株式会社)

研究開発項目 2-b) 時刻・データ連携処理最適化プロトコルの研究開発 (株式会社スペクトラ)

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

(7) 具体的な実施内容と最終成果

研究開発項目1：有無線シームレス時刻同期基盤の研究開発

項目1では、有線時刻同期システムに関して、有線時刻同期カード間の時刻差計測／補正可能な有線ノードを用い、FPGAによるD-DMTDの機能実証を行った。D-DMTDを5ブロック用いた有線時刻同期システムにより、実際に30ps以下での有線時刻同期の実証に成功した。無線時刻同期システムに関して、無線デバイスにおける処理遅延算出および補正プロトコル動作の結果、時刻同期の精度（変動の時系列偏差）としてはpsオーダが得られ、無線同期において課題とされる精度（スレーブから見たマスターとのオフセット時刻差）についても、オフセット低減プロトコルを適用した結果1.5 μ s程度まで抑えられることが実証された。

研究開発項目1-a) 有線／無線互換型時刻同期システムの研究開発（日本電気株式会社）

30 ps以下の精度で有線時刻同期カード間の時刻差計測／補正可能な有線ノードの要件定義を行った。また、有線時刻同期カード間の時刻差計測／補正可能な有線ノードを用い、FPGAによるD-DMTDの機能実証を行った。さらに、D-DMTDを5ブロック用いた有線時刻同期システムにより、実際に30 ps以下での有線時刻同期の実証に成功した。

研究開発項目1-b) 無線時刻同期プロトコルの研究開発（日本電気株式会社）

タイミングチャートを使ったシミュレーションにより、無線ノード間の時刻差計測／補正精度がシミュレーションで30 ps以下であることを確認した。また、独自に開発したPDVフィルタによる時刻オフセット低減技術を実証し、スレーブから見たマスターとのオフセット時刻差が1.5 μ s程度に抑えられることを実証した。

研究開発項目2：時刻・データ連携処理基盤の研究開発

項目2では、スイッチノードの機能検証を行い、スイッチノード内に用意した伝送遅延の異なるパス4本(100 μ s以下、200 μ s以下、500 μ s以下、1 ms以下)が所望の動作をすること、パケット長120byteの条件にて、最優先のパスでの送信遅延が1 ms以下となることを確認した。また、合成時刻に基づく同期シミュレーションを行い、マスターと他ノードが同程度に安定なクロックを搭載している場合には、従来手法と比較してよりロバストな同期状態を維持できることを示した。

研究開発項目2-a) 時刻に同期したデータ通信の研究開発（日本電気株式会社）

伝送遅延の異なるパスを4本用意したスイッチノードの要件定義と、伝送遅延時間のシミュレーションを行った。このスイッチノードについて機能検証を行い、所望の機能が実装されており、パケット長120byteの条件にて、最優先のパスでの送信遅延が1 ms以下となることを確認した。

研究開発項目2-b) 時刻・データ連携処理最適化プロトコルの研究開発（株式会社スペクトラ）

ネットワーク内の各ノード間で得られた時刻差情報に基づく合成時刻の生成方法の検討と、ネットワークシミュレータを用いた性能評価を行った。時間方向での合成、空間（ノード間）方向での合成の双方について複数の合成手法をシミュレータ上で実装し、従来のグラウンドマスタークロックのみを基準とした時刻補正と比較してロバスト性の高い時刻補正が実現しうることを確認した。

(8) 研究開発成果の展開・普及等に向けた計画・展望

本委託研究によって実証した超低遅延な時刻・データ連携処理システムと有無線シームレス時刻同期システムの社会実装および普及に向けては、委託期間で得られた研究成果を国際学会等への外部発表で大きくアピールすると同時に、有線/無線互換型の同期ネットワークへの適用実証や、その他のアプリケーションの開拓にも注力する。

無線通信適用については、今後搬送波としてより周波数帯の高いミリ波（～100 GHz）やテラヘルツ波（～1 THz）の本格活用が期待される中で、基地局間の時刻同期に求められる精度スペックはよりシビアになることが確実視される。また、大容量無線通信が普及しユースケースが多様化すると、移動体や携帯端末等の通信環境が動的に変化する無線機器間でも、従来以上に高精度な時刻同期が要求されることが見込まれる。今後 Beyond 5G の構想や必要仕様が具体化され、市場が拡大していく中で、同期に関する課題/ニーズに対して適時・適切に本委託研究の技術を提供できるよう、早い段階で有線/無線互換型の同期ネットワークへの適用実証実験を進める。

また、本研究で取り組んだ時刻同期システムにおいては、小型原子時計が一つのキーコンポーネントとして普及のカギを握る。本委託研究では現在市販の小型原子時計を使用する計画だが、日本電気株式会社は国立研究所（産業技術総合研究所）や他企業と連携して、より高安定な小型原子時計の実現に向けた活動を行っており、システム研究開発と並行して、従来以上に高精度かつ安価な時計デバイスの将来的採用を視野にシステムの全体最適化を検討する。

展望に関して、本委託研究で開発した時空間デジタルツイン処理基盤が Beyond 5G において本格的に社会実装される 2030 年以降を見据えて、バックキャストした標準化活動を行う。時刻同期方式を定める ITU-T SG15/G.827x/G.7721 に関して、有線/無線を問わない時刻同期方式・時刻管理方式に関する調査を進めると同時に、技術ビジョン勧告・性能要件提案の実施を目指す。また、時刻同期プロトコル標準に関する IEEE1588-2002/2008/2019 およびその後継に対して、無線同期プロトコルに関する ANNEX 追加提案を行うことを前提に、標準化推進活動を実施する。また同時に、3GPP TS 38.331 (SIB9) に関して、Beyond 5G/6G のための無線同期プロトコルに関する提案を目指す。