

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 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
- ◆受託者 日本電気株式会社、株式会社スペクトラ
- ◆研究開発期間 令和4年度～令和7年度 (4年間)
- ◆研究開発予算 (契約額) 令和4年度250百万円

2. 研究開発の目標

- ・時刻同期:2026年3月までに、有線NWを介して隣接する時刻ノード間の時刻同期精度を30 ps以下とする。また、無線NWを介して隣接する時刻ノード間同期については、無線電波の周波数や無線通信方式に依存するものの、複数方式で数百ns以下とする。
- ・データ連携:2026年3月までに、デバイス情報データがフィジカル空間からサイバー空間に到着するまでの伝達時間を1 ms以下とし、かつ到着時刻を30 psオーダで計測することを実現する。更に、時刻スケジューラ通りにデータが送信できること、優先制御が必要なパケットについては、伝達時間が100 μs以下となることを実現する。

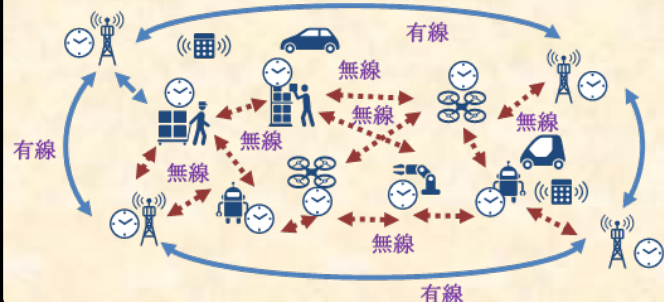
3. 研究開発の成果

①有無線シームレス時刻同期

研究開発目標

研究開発成果

ネットワークポロジーが変化し得る有線/無線ノードの混在した系に対してシームレスに適用可能かつ高精度な時刻同期プロトコルの開発



- 1-a) 有線/無線互換型時刻同期システムの研究開発
- 1-b) 無線時刻同期プロトコルの研究開発

研究開発成果:1-a) 有線/無線互換型時刻同期システムの研究開発
IEEE1588-2008に基づくPTP(Precision Time Protocol)では、時刻計測精度がシステムクロック周波数125 MHzの逆数(8 ns)で制限されることが課題。

- D-DMTD(Digital Dual Mixer Time Difference)を5ブロック使った有線ノードの基本設計を実施。
- 有線ノード間の時刻差計測/補正精度が30 ps以下であることを机上計算およびタイミングチャートで確認。

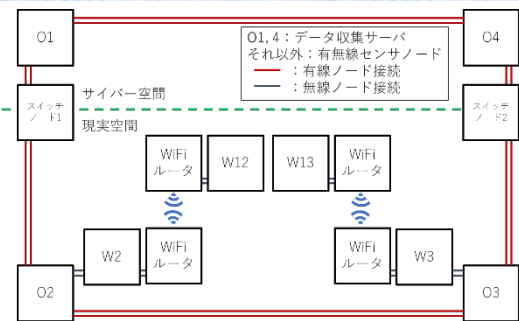
研究開発成果:1-b) 無線時刻同期プロトコルの研究開発

無線時刻同期プロトコルは有線と異なり国際動告化されていないため、独自に研究開発する必要があることが課題。

- 有線の場合と同様にD-DMTDを5ブロック使った無線ノードの基本設計を実施。
- 加えて、独自に開発したPDVフィルタを導入することで、無線ノード間で数百nsの確度で時刻同期可能であることが示唆された。
- 無線ノード間の時刻差計測/補正精度が30 ps以下であることを机上計算およびタイミングチャートで確認。

②時刻・データ連携処理

有無線高精度時刻同期のシステム実証及びそのプロトコルの最適化



- 2-a) 時刻に同期したデータ通信の研究開発
- 2-b) 時刻・データ連携処理最適化プロトコルの研究開発

研究開発成果:2-a) 時刻に同期したデータ通信の研究開発

研究開発項目1-a), 1-b)で開発された時刻同期プロトコルを実証するため、専用のスイッチノードを開発し、時刻同期されたノード間でデータ伝送のシステム実証を行う。

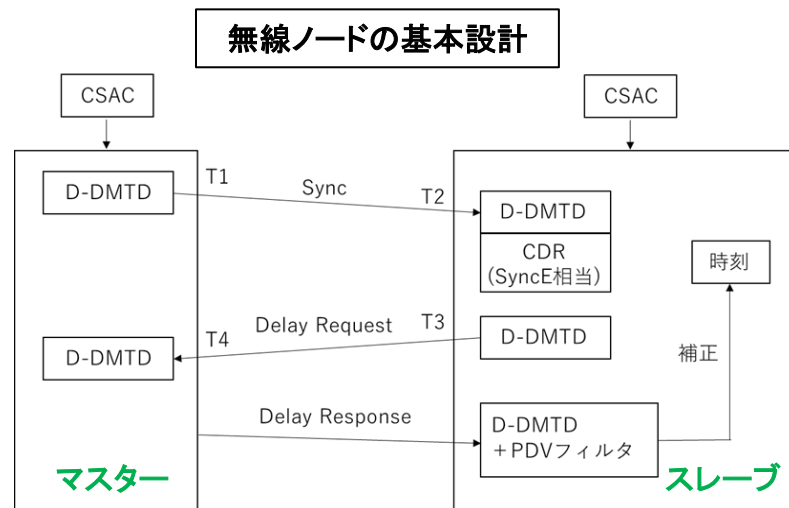
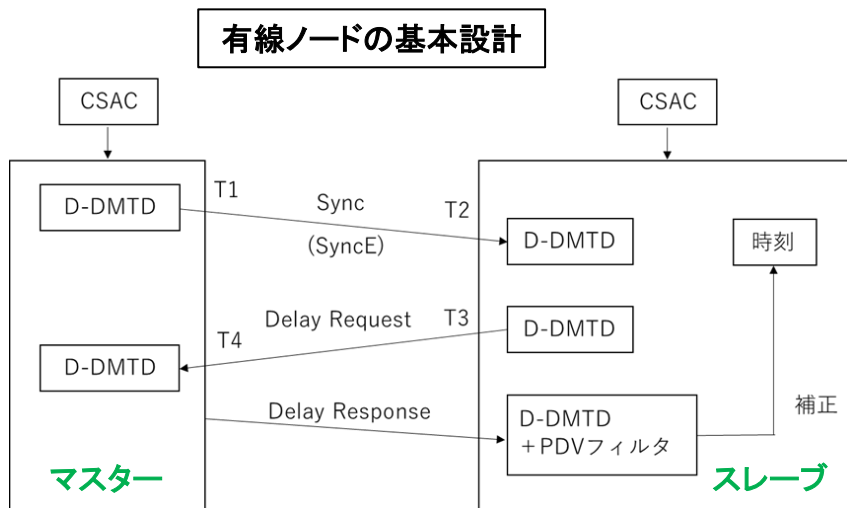
- システムの基本設計を行い、スイッチノードに求められる機能を明らかにした。
- スイッチノードに必要な機能をブロック毎に分解し、それぞれで発生するであろう伝送遅延時間を積み上げることで、スイッチノード全体での伝送遅延を見積もった。
- 伝送遅延の低減には、優先度フィルタと送信バッファの最適化が必要なることを明らかにした。
- スイッチノード基本設計が完了し、伝送遅延時間が全てのパスで1 ms以下であることを確認。

研究開発成果:2-b) 時刻・データ連携処理最適化プロトコルの研究開発

ネットワークのトポロジー等が変動する系を対象とした時刻・データ連携処理プロトコルを開発する。

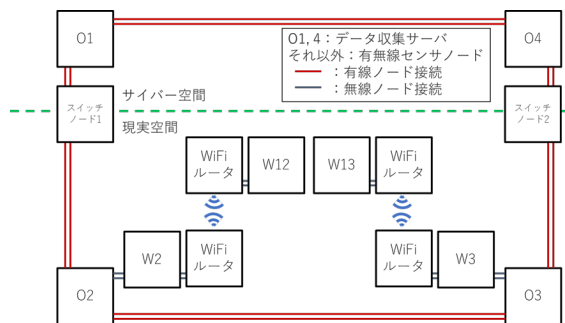
- 既存の時刻同期手法に関して課題点を洗い出し、ネットワークの同期性能を担保するうえで重要な情報を抽出した。
- 管理情報を収集するマネジメントノードで各ノードの時刻情報等を処理し、全体情報から合成時刻を生成・配信することにより、ネットワークの同期精度を担保する方式を検討している。
- PTPマネジメントノードの実装手段及び合成時刻・同期情報の配信方法の基本方針を策定。

①有無線シームレス時刻同期の詳細



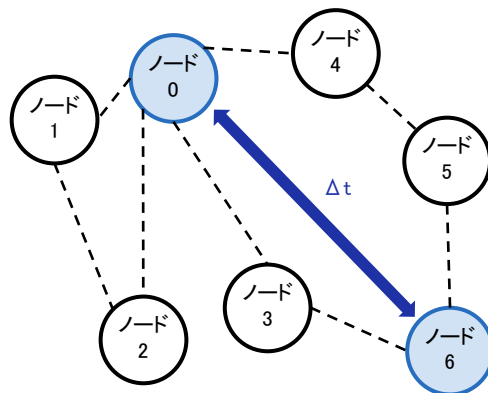
タイミングチャートを使用したシミュレーションによって、**ノード間の時刻差計測／補正精度が30 ps以下**であることを確認。

②時刻・データ連携処理の詳細

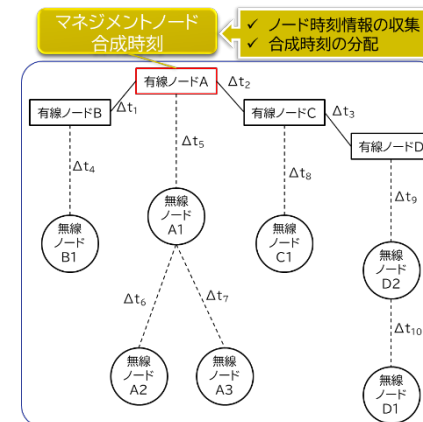


構築する時刻・データ連携システムの構成案

データ収集サーバに、センサノードから送られた情報を集約。
 サーバノードとセンサノード間にはスイッチノードを配備。
 高精度に時刻同期している各ノードの時刻差を算出できるようにする。
 スwitchノードの構成を高速データ通信向けに最適化することで、
 データ伝送遅延を抑制する(全パスで1 ms 以下と算出)。



ネットワークの同期性能評価指標として、任意の2ノード間の時刻差に基づくGlobal Clock Offsetを採用する。



リアルタイム時刻だけでなく時刻履歴も利用し、各クロックの安定度を加味したネットワーク合成時刻を生成・分配する時刻同期方式を策定。

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
0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)

※成果数は累計件数、()内は当該年度の件数です。

- (1) 有無線シームレス時刻同期システム技術に関して、時間軸上のバーニアスケール(システムクロックの補助目盛となる副尺クロックを用いる方式)に基づき時刻差情報を高精度かつロバストに計測する「レーシングポイントモニタ型バーニアスケール方式」など、今後特許出願を予定する複数の成果が得られている。
- (2) 上記方式により、有線ノード間の時刻差計測/補正精度が、机上計算およびタイミングチャートを用いて30 ps以下となることを確認できた。また、無線時刻カードに実装される無線時刻同期アルゴリズムに含まれるPDV(Packet Delay Variation)フィルタの詳細設計を前倒しで実施した。
- (3) 時刻同期したデータ通信の実証のための、複数のノードを繋ぐスイッチノード検討・通信プロトコル設計を実施。伝送遅延の異なるパスを複数用意することで、送受信データの優先度、及び優先度のスケジュール設定に応じて、データ分割機能・スケジューリング機能をシステム実装する方針とした。また、各要素システムにおける遅延時間分析を行い、最優先データの遅延時間を1 ms以内に抑制するためのスイッチノード構成の最適化を行った。
- (4) 既存の時刻同期プロトコル(PTP)手法に関して課題点の洗い出しを行い、分散型時刻同期の実現のため、PTPマネジメントメッセージに相当する通信に情報を格納する方法を提案するとともに、マネジメントノードで収集したパラメータを処理する方法として、各ノードの時刻履歴情報に基づく合成時刻の生成および配布する手法を具体化した。
- (5) 産学官連携のため、今後、自動運転、IoTセンシング(インフラ監視、位置計測)について、大学および企業の三名から、本プロジェクトの運営委員会の外部有識者就任の受諾を頂き、ユースケースに関するヒアリングや議論の場を個別に設けた。

5. 今後の研究開発計画

- ・ 【1-a】 R4年度作成した有線ノードの基本設計を元にして、有線/無線ノードのハードウェア・ソフトウェア詳細設計・製造に取り組む。最終的に他実施項目の成果物と統合することを見据えて、プロジェクト全体で緊密に連携しながら研究開発を進める。
- ・ 【1-b】 今後、PDVフィルタの統計処理方法や学習時間を最適化することで、最終年度目標である系全体で数百nsの時刻同期精度の達成を目指す。併行して上記と異なる無線時刻同期方式も検討し、複数の中から最適な無線時刻同期方式を選定する。
- ・ 【2-a】 本年度に設計を行ったスイッチノードの詳細設計及び製造を2023年度中に完了させる。また、製造したスイッチノードを用いて伝送遅延時間計測のための簡易実験を行い、伝送遅延が1 ms以下であることを確認する。
- ・ 【2-b】 合成時刻に基づく時刻補正機能を組み込んだ、有無線通信で構成されたネットワークモデルを構築し、ネットワークシミュレータ上での同期性能の評価に取り組む。その後、試験用ネットワークを構築し、設計した時刻補正機能の検証を行う。
- ・ R4年度に開発した技術については、R5年度早期の特許出願を着実に進めるとともに、電気情報通信学会などでの成果発表を実施する。
- ・ 外部有識者を招いた半年に一回の運営委員会の開催をR5年5月、11月に計画しており、有識者アドバイスをもとに、本プロジェクトが想定するユースケースや必要スペックに関して具体化・定量化を進める。