

令和 5 年 6 月 12 日現在

機関番号：17104

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K11792

研究課題名（和文）IoT/CPSを実現する時空間データ流通プラットフォームに関する研究

研究課題名（英文）A Study of the Spatio-temporal Data Distribution Network for IoT/CPS

研究代表者

野林 大起（Nobayashi, Daiki）

九州工業大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号：40632906

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、様々なデータの中には時間的・空間的にその発生位置に強く依存する時空間データがあることに着目し、車両ネットワークおよび Mobile Edge Computing (MEC) 技術を用いた時空間データ流通基盤の確立を目的とした。時空間データを効率的かつ効果的にユーザに提供するための時空間データ滞留システムに関する研究を実施し、ネットワークアーキテクチャの設計、送信制御手法の考案、シミュレーション及び実験を用いた実験による性能評価を実施し、その有効性及び実現可能性を検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究成果であるデータ流通基盤を用いることにより、様々な場所で生成されるIoTデータの中でも、その場所・時間に深く依存する時空間データを、その場所に存在するユーザが利用可能となり、「データの地産地消」を実現可能となる。これにより、従来のインターネットにおけるデータの集中管理のための負荷分散だけでなく、特定のサービスに依存しない地域内でのデータ連携を促進可能となる。

研究成果の概要（英文）：This study aims to establish a new data distribution platform that utilizes spatio-temporal data (STD), which depends strongly on the location of their occurrence in time and space. Specifically, we proposed an STD retention system to provide users with STD efficiently and effectively using vehicular networks and Mobile Edge Computing (MEC) technologies. We evaluated the performance by simulations and experiments using actual equipment and verified its effectiveness and feasibility.

研究分野：情報ネットワーク

キーワード：IoT 時空間データ 情報流通基盤 車両ネットワーク エッジネットワーク

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

IoT 技術の発展により、通信業界だけではなく医療、産業、観光など、様々な分野においてその活用が検討されている。総務省 平成 30 年度 情報通信白書によると、世界の IoT デバイス数は 2020 年までに 400 億台を突破すると予測されている。このような IoT デバイスから生成されるデータは、インターネットを経由しネットワークの先に設置されたクラウド 等において蓄積し活用される。つまり、IoT デバイスから生成される膨大かつサイズが小さいデータがインターネットに流入する。これにより、データセンタの肥大化や運用管理コストの増大が懸念される。一方で、IoT 技術を用いたサービス展開に着目すると、現状ではデータ収集と提供はサービス事業者毎に行われている。そのため、ユーザは個別に契約しない限りは、複数の種類のデータを同時に活用することは困難である。一方で、IoT デバイスから生成されるデータには、時間的・空間的にその発生位置に強く依存するものがある。例えば、交通量・事故情報、商店街や都市における人流情報、各地域の災害情報、そして店舗における時限的な広告など、その場所・時間で活用できるデータのことを指す。申請者はこのようなデータを時空間データと定義する。この時空間データは遠方に位置するサーバ/クラウドへ収集して活用するよりも、データの発生した場所で活用する方が、利便性が高まる可能性がある。そのため、時空間データを有効に活用可能な新しい情報基盤が必要となる。

2. 研究の目的

本研究では、時空間データがユーザの生活空間に強く依存する点に着目し、その空間に存在する情報処理機器を用いて、時空間データの地産地消を促進する新しい情報基盤を構築することを目的とする。本研究課題では、高い移動性、高性能な計算処理機器、大容量ストレージ、そして近距離無線通信機器を搭載可能な車両と、ユーザ及びセンサに対して近い距離で様々な処理を実現する Mobile Edge Computing (MEC) に着目し、車両ネットワークおよび MEC を用いた時空間データ流通基盤の実現を目指す。

3. 研究の方法

本研究では、時空間データ流通基盤実現に向けて、車両ネットワーク及び MEC を用いた時空間データ滞留手法を提案し、シミュレーション及び実機を用いた実験によりその有効性を評価した。以下に課題に分けて研究方法について記述する。

(1) 時空間データ滞留のための送信位置と受信信号レベルに基づく送信制御手法に関する研究
従来提案されてきた車両を用いた時空間データ滞留方式における送信制御手法では、隣接車両密度に応じてデータ送信確率を制御してデータ送信数を削減していたが、この手法では全車両のビーコン送信が必須であるため、車両密度が高い環境ではビーコン送信がデータ滞留に悪影響を与えていた。そこで本課題では、ビーコン送信なしで時空間データ滞留を実現するために送信位置と受信信号レベルに基づく送信制御方式を提案し、シミュレーション評価により効果的に時空間データ滞留ができることを明らかにする。

(2) 大容量時空間データ滞留のための送信制御方式に関する研究

課題(1)で提案してきた時空間データ滞留方式では、IoT センサから得られるデータのみを対象としていたため、1パケットで構成可能な非常に小さなデータのみを想定していた。しかし、時空間データには動画像なども想定される。そのため、大容量時空間データを滞留させる場合には、パケット衝突等に起因する時空間データを構成するパケットの部分的な欠落によって効果的な滞留が実現できないといった問題が生じる。そこで本課題では、大容量時空間データの滞留を実現するため、時空間データを構成するパケットを車間で選択的に補い合う補完型データ送信制御方式を提案し、シミュレーション評価によってその有効性を評価する。

(3) 時空間データ滞留システムにおける受信電波強度に基づく送信制御手法の実験評価

課題(1)、(2)で想定している時空間データ滞留システムおよびその送信制御手法については、シミュレーションによって有効性が評価されていたが、現実環境では遮蔽物や電波の反射の影響により信号強度が変動するため、その対策が必要となる。そこで本課題では、各ノードから受信した電波強度を蓄積し、受信電波強度の変動を考慮した送信制御手法を提案し、実機を用いた実験評価により時空間データ滞留方式の中継制御に与える影響を評価する。

(4) MEC 連携による時空間データ滞留システム誤動作解析に関する研究

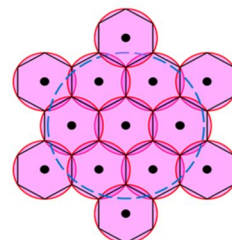
課題(1)から提案してきた時空間データ滞留では、その自律制御に起因し、車両ノードの位置情報誤差、受信電波強度の計測誤差、ソフトウェアプログラムのバグ等により、想定外のエリアから時空間データ配信されてしまう可能性がでてきた。この誤動作による想定外のデータ送信は、時空間データ配信者にとって対象外のユーザへの情報配信による情報漏洩などのリスクとなりうる。そこで本課題では、時空間データ配信が滞留範囲内の配送状況を監査する仕組みとして、

MEC を用いて各エリアでの時空間データの流通履歴を管理・共有する機能を備えた多層化ブロックチェーンを提案し、シミュレーションによりその有効性を評価する

4. 研究成果

(1) 時空間データ滞留のための送信位置と受信信号レベルに基づく送信制御手法に関する研究

時空間データ滞留を電波伝搬環境に基づくピーコンレスな送信制御により実現する手法を提案した。本手法では、データ送信に適した送信ポイントを予め定義し、送信ポイント周辺の車両がデータ衝突を回避しながら、周囲のデータ受信信号強度に基づいてデータ送信を制御する。



● 送信ポイント ● 通信範囲 ○ 滞留エリア

図 1: 送信ポイントの定義

本手法では最初に、最小数のデータ送信で滞留エリア全域に時空間データを提供するための理想的なデータ送信位置（以降送信ポイントと呼ぶ）を設定する。送信ポイントは、図 1 に示すようにデータ送信位置の中心から、想定される無線通信範囲を基準に正六角形で設定される。この手順で設定した送信ポイント上に位置する車両のみがデータを送信する場合、最小数のデータ送信で滞留エリア全域にデータを提供することが可能となる。しかし、現実環境では車両は移動することから、送信ポイント上に必ず車両が存在するわけではないことや、電波の減衰により、想定される通信範囲全域にデータを提供できないことが考えられる。そこで、提案手法ではこの問題に対応すべく、受信データの信号強度に応じてデータ送信を制御する。次に、各車両は、最も近い送信ポイントと自身との距離に基づきデータ送信時刻を設定する。具体的には、送信ポイントとの距離が短い車両から順にデータを送信することになる。最後に、電波の減衰を考慮してデータ送信を制御する。各車両は先に設定されたデータ送信時間になるとデータを送信する。このとき、自身のデータ送信時刻より前にデータを受信した車両は、そのデータの信号強度を確認する。次に自由空間伝搬モデルの公式に従い、仮に送信ポイントからデータを受信したと想定したときの受信電波強度を算出し、実際に受信したデータとの受信強度を比較する。実際の受信強度が大きい場合は、自身の周りには十分にデータが届いていると判断し、データ送信を抑制する。反対に、想定値が大きい場合は、周囲にデータが十分に行き届いていないと判断し、データを送信する。このように、実際に受信したデータの信号強度を想定される値と比較し、これを基にデータ送信を制御することで、電波の減衰に対応したデータ送信制御を実施し、不必要なデータの再送を抑制することが可能となる。

提案手法の性能をより現実的に評価するため、本シミュレーションでは車両の移動および信号等の交通モデルに LuST (Luxembourg SUMO Traffic) を用いた。このモデルを用いて、ネットワークシミュレータである OMNeT++ と交通流シミュレータである SUMO を統合的に利用可能で、IEEE802.11p を実装した車両ネットワークシミュレーション用のフレームワークである Veins を用いて提案手法の性能を評価した。その結果、提案手法は既存の滞留システムと同様のカバー率（滞留エリアに対するデータ取得可能な範囲の割合）を達成可能であると共に、システム全体のデータ送信数とデータ衝突数を大幅に削減可能であることを示した（図 2）。

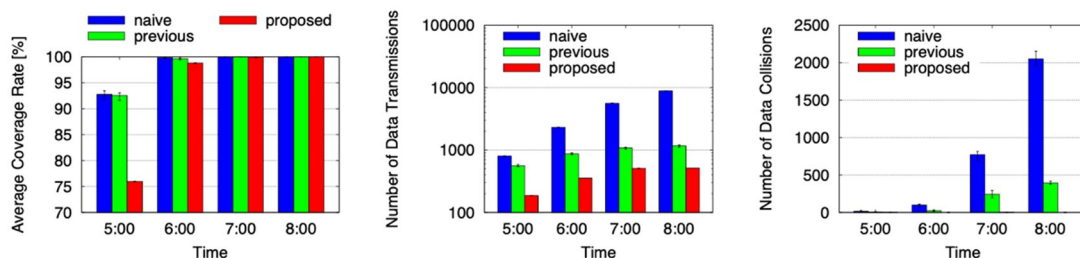


図 2: シミュレーション結果（左：カバー率、中：データ送信数、右：データ衝突数）

(2) 大容量時空間データ滞留のための送信制御方式に関する研究

大容量時空間データ滞留を実現するために、(1)の成果を基に、新しい送信制御手法を提案した。図 3 に 2 台の車両が送信を行う場合の動作フローを示す。本手法では、(1)と同様に、自身の送信時刻になると、所持しているの大容量データの完全性に関わらずに所持しているパケットをブロードキャスト送信する。この時、他の車両からパケットを受信した車両は、既存手法 [1]と同様に自身の送信時刻を予め遷移させることで、送信時刻の重複によるパケット衝突を防ぐ、また同時に、受信した全てのパケットのシーケンス番号及び RSSI 値を確認する。もし受信車両が送信されたシーケンス番号以外のパケットを所持している場合、もしくは既に送信されたパケットであっても、RSSI 値が理想値よりも低い場合には自身が再度送信することで周囲のエリアにそれらのパケットを提供する必要が

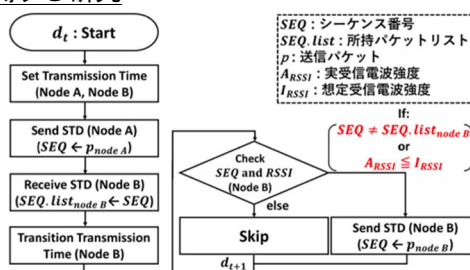


図 3: 動作フロー

図 3: 動作フロー

SEQ: シーケンス番号
SEQ_list: 所持パケットリスト
p: 送信パケット
RSSI: 実受信電波強度
I_RSSI: 想定受信電波強度

ある。したがってこの車両の送信時刻が訪れた際には、未だ配信されていないパケット、及び RSSI 値が不十分なパケットをブロードキャストによって送信する。この動作を各車両が連続して行うことで、部分的な時空間データを車両間で補いつつ、必要最小限の送信数で大容量時空間データ滞留を実現する。本手法の有効性は、(1)と同様にシミュレーション評価によって、提案手法が 100% のカバー率を維持しつつ、既存手法[1]と比べてパケット送信数を 40%、衝突数を 70% 以上削減できることを明らかにした。

(3) 時空間データ滞留システムにおける受信電波強度に基づく送信制御手法の実験評価

本手法では、(1)で提案してきた手法が現実において有効であるかを評価するため、実機による検証と、問題点解決のための送信制御手法の改善を実施した。現実空間では受信電波強度は同じ位置に居た場合においても常に変動することから、(1)の仕組みにおいて適切にデータ送信の可否を決定することが困難である。そこで、本提案では各ノードから受信した電波強度を蓄積し、直近から複数回の受信電波強度の中央値をもとに中継ノードの制御動作を決定する。具体的には、データ送信時刻になると中継ノードは、これまでの受信電波強度から中央値を計算し、(1)における位置に基づく想定値と比較することによって送信ノードとしての中継制御動作、もしくは未送信ノードとしての中継制御動作の 2 つのパターンに送信制御を振り分ける。さらに中継ノードは、想定値を実測値（瞬時値）と複数回の電波強度の平均値のそれぞれと比較することで、図 4 に示すフローに従い最終的な送信の有無を決定する。本提案手法の有効性を実機により評価した。時空間データ滞留手法及び提案手法を小型マイコンボードに実装し、九州工業大学戸畑キャンパスにおいて実験を行った。その結果、受信ノードにおいて約 100% の受信率を達成しつつ、受信電波強度の変動に伴う中継ノードにおける想定外の挙動を抑制できたことから、時空間データの滞留の実現可能性を明らかにした。

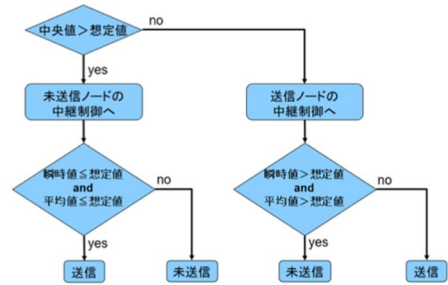


図 4: フローチャート

(4) MEC 連携による時空間データ滞留システム誤動作解析に関する研究

本研究で提案する多層化ブロックチェーンを図 5 に示す。多層化ブロックチェーンは上位層と下位層の 2 層のブロックチェーンで構成される。下位層のブロックチェーンは特定のエッジネットワーク内で構築され、異なる事業者間の時空間データ (STD) 共有を目的とする。一方、上位層のブロックチェーンは情報漏洩検知を目的としてグローバルに構築される。下位層では情報漏洩検知のために、共有する STD からハッシュ値を生成し、上位層のブロックチェーンに登録する。上位層のブロックチェーンに登録されるハッシュ値は STD 毎に異なるため、同一のハッシュ値が登録された場合、情報が特定のエリア外に漏洩されたと判断できるため、情報漏洩を検知できる。この多層化ブロックチェーンでは、下位層ブロックチェーンが STD 自体を登録、共有するのに対し、上位層のブロックチェーンにはハッシュ値のみを登録するため、トラフィック量を削減しつつ、パーソナル情報を保護した上で、STD の漏洩検知が実現できる。

シミュレーションにより、STD-RS 車両台数に対するブロック生成から伝搬するまでの時間と異常検出の時間を評価することで(図 6)、本システムの有効性及び実現可能性を明らかにした。今後は多層化ブロックチェーンによる「車両ノードの位置情報誤差」の解析について評価する。

[1] 金安歩尚ら, “大容量時空間データ滞留のための送信タイミング遷移による衝突回避手法,” 電子情報通信学会 2022 年 ソサイエティ大会, B-6-4, 2022 年 9 月。

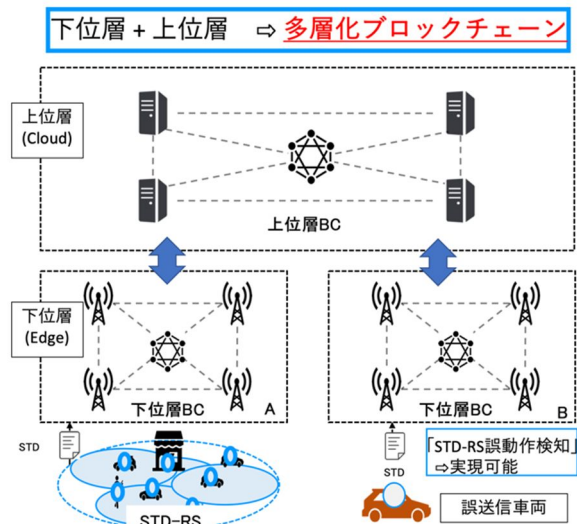


図 5: STD-RS のための MEC を利用した階層型ブロックチェーン

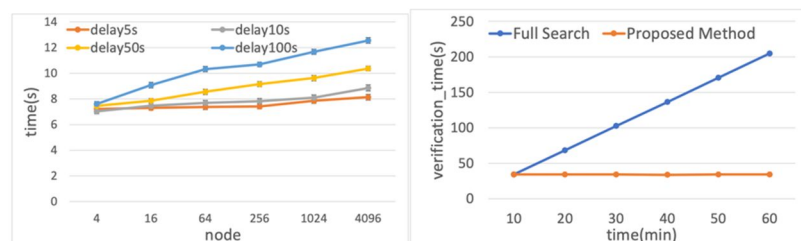


図 6: 結果 (左: ブロック生成時間, 右: 異常検出時間)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 YAMASAKI Shumpei, NOBAYASHI Daiki, TSUKAMOTO Kazuya, IKENAGA Takeshi, LEE Myung J.	4. 巻 E104-B
2. 論文標題 Efficient Data Diffusion and Elimination Control Method for Spatio-Temporal Data Retention System	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Communications	6. 最初と最後の頁 805-816
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/transcom.2020CQP0010	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 GOTO Ichiro, NOBAYASHI Daiki, TSUKAMOTO Kazuya, IKENAGA Takeshi, LEE Myung	4. 巻 E104.D
2. 論文標題 Transmission Control Method for Data Retention Taking into Account the Low Vehicle Density Environments	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Information and Systems	6. 最初と最後の頁 508～512
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/TRANSINF.2020EDL8088	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 Nobayashi Daiki, Goto Ichiro, Teshiba Hiroki, Tsukamoto Kazuya, Ikenaga Takeshi, Gerla Mario	4. 巻 Nov. 2022, vol. 21
2. 論文標題 Adaptive Data Transmission Control for Spatio-temporal Data Retention over Crowds of Vehicles	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Mobile Computing	6. 最初と最後の頁 3822-3835
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TMC.2021.3066438	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する
1. 著者名 GOTO Ichiro, NOBAYASHI Daiki, TSUKAMOTO Kazuya, IKENAGA Takeshi, LEE Myung	4. 巻 E104.D
2. 論文標題 Transmission Control Method for Data Retention Taking into Account the Low Vehicle Density Environments	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Information and Systems	6. 最初と最後の頁 508～512
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/transinf.2020EDL8088	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計19件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Hotaka Kaneyasu, Daiki Nobayashi, Kazuya Tsukamoto, Takeshi Ikenaga, Myung Lee
2. 発表標題 Data Completeness-Aware Transmission Control for Large Spatio-Temporal Data Retention
3. 学会等名 IEEE 40th International Conference on Consumer Electronics (ICCE 2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 金安 歩尚, 野林 大起, 塚本 和也, 池永 全志
2. 発表標題 大容量時空間データ滞留の為にデータ完全性に基づく選択的送信手法
3. 学会等名 電子情報通信学会 超知性ネットワーキングに関する分野横断型研究会 (RISING 2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 金安 歩尚, 野林 大起, 塚本 和也, 池永 全志
2. 発表標題 大容量の時空間データ滞留を実現するデータ完全性確認型送信手法
3. 学会等名 電子情報通信学会 2021年 ソサイエティ大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 川口 光輝, 金安 歩尚, 野林 大起, 塚本 和也, 池永 全志
2. 発表標題 時空間データ滞留のためのデータ拡散手法の実験評価
3. 学会等名 電子情報通信学会 技術研究報告, Vol. 121, No.167, IA2021-25
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 池永 全志, 野林 大起, 塚本 和也
2. 発表標題 無線環境エミュレーションを活用した時空間情報流通基盤研究の推進
3. 学会等名 電子情報通信学会 2021年 総合大会, BI-11-4
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山崎 駿平, 野林 大起, 塚本 和也, 池永 全志, 宮地 利幸
2. 発表標題 移動車両群を用いた効率的な時空間データ拡散手法に関する検証
3. 学会等名 電子情報通信学会 技術研究報告, Vol. 120, No.413, NS2020-133, pp.61-66
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 後藤 一郎, 野林 大起, 塚本 和也, 池永 全志
2. 発表標題 車両を用いた時空間データ滞留システムにおける送信制御手法の検討 ~ルクセンブルグモデル(LuST)を用いた評価~
3. 学会等名 電子情報通信学会 技術研究報告, Vol. 120, No.413, NS2020-132, pp.55-60
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 野林 大起, 後藤 一郎, 塚本 和也, 池永 全志
2. 発表標題 時空間データ滞留のための送信位置と受信信号レベルに基づく送信制御手法
3. 学会等名 電子情報通信学会 技術研究報告, Vol. 120, No.297, NS2020-91, pp.23-28
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 金安 歩尚, 野林 大起, 塚本 和也, 池永 全志
2. 発表標題 大容量時空間データ滞留のための送信タイミング遷移による衝突回避手法
3. 学会等名 電子情報通信学会 2022年 ソサイエティ大会, B-6-4
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 赤司 廉樹, 野林 大起, 塚本 和也, 池永 全志
2. 発表標題 時空間データ滞留システムにおける位置情報に基づく送信制御手法の実証評価
3. 学会等名 電子情報通信学会 2022年 ソサイエティ大会, B-16-24
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 金安 歩尚, 野林 大起, 塚本 和也, 池永 全志
2. 発表標題 大容量時空間データ滞留のための補完型データ送信制御方式における拡散性能に関する評価
3. 学会等名 電子情報通信学会 技術研究報告, vol. 122, no. 198, NS2022-78, p. 3
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 上田 純輝, 塚本 和也, 山本 寛, 野林 大起, 池永 全志
2. 発表標題 多層化ブロックチェーンを用いた時空間データ滞留システム誤動作解析に関する研究
3. 学会等名 電子情報通信学会 超知性ネットワーキングに関する分野横断型研究会 (RISING 2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 赤司 廉樹, 野林 大起, 塚本 和也, 池永 全志
2. 発表標題 時空間データ滞留システムにおける位置情報と受信電波強度に基づく送信制御手法の実験評価
3. 学会等名 電子情報通信学会 超知性ネットワーキングに関する分野横断型研究会 (RISING 2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 金安 歩尚, 野林 大起, 塚本 和也, 池永 全志
2. 発表標題 大容量時空間データ滞留のためのパケット補完型送信制御および衝突回避手法の評価
3. 学会等名 電子情報通信学会 超知性ネットワーキングに関する分野横断型研究会 (RISING 2022)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 金安 歩尚, 野林 大起, 塚本 和也, 池永 全志
2. 発表標題 大容量時空間データ滞留のための補完型データ送信制御方式
3. 学会等名 電子情報通信学会 技術研究報告, vol. 122, no. 268, IA2022-38, pp. 8-13
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 赤司 廉樹, 野林 大起, 塚本 和也, 池永 全志
2. 発表標題 時空間データ滞留のための障害物による受信電波強度の変動を考慮した送信制御手法の実証評価
3. 学会等名 電子情報通信学会 技術研究報告, vol. 122, no. 359, IA2022-69, pp. 8-13
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hotaka Kaneyasu, Daiki Nobayashi, Kazuya Tsukamoto, Takeshi Ikenaga, Myung Lee
2. 発表標題 Spatio-temporal Data Retention System for Floating Cyber Physical System
3. 学会等名 The 10th International Symposium on Applied Engineering and Sciences (2022) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hotaka Kaneyasu, Daiki Nobayashi, Kazuya Tsukamoto, Takeshi Ikenaga, Myung Lee
2. 発表標題 Complementary Data Transmission Control with Collision Avoidance for Efficient Retention of Large-size Spatio-temporal Data
3. 学会等名 The IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC) 2022 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Junki Ueda, Kazuya Tsukamoto, Hiroshi Yamamoto, Daiki Nobayashi, Takeshi Ikenaga, Myung Lee
2. 発表標題 A Reliability Audit Mechanism based on Multi-layered Blockchain for Spatio-Temporal Data Retention System
3. 学会等名 The IEEE Consumer Communications and Networking Conference (CCNC) 2022 (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
米国	City College of New York (CCNY)			