

データの地産地消を促進する情報指向型データ滞留基盤の提案と実証検証

研究代表者	野 林 大 起	九州工業大学大学院 工学研究院 准教授
共同研究者	中 村 遼	福岡大学 工学部 講師

1 背景

Internet of Things (IoT) 技術の進展と普及に伴い、あらゆる電子機器がインターネットに接続し、インターネット上のサーバ（クラウド）に情報を集約、それらのデータを分析することで社会課題を解決するための基盤が確立している。一方で、IoT デバイスから生成されるデータは、ユーザである我々に近い位置で生成されるにも関わらず、クラウド上にデータを集約して活用している。このようなデータの中には、その時間、その場所で直接活用可能なものが存在する。我々はそのようなデータを「時空間データ」と定義し、この時空間データを地域内のデバイス（ユーザが有するスマートフォンやタブレット、マイコン等の計算資源）と無線通信を用いて効果的に流通することができれば、地域内の課題は地域内のデータのみで解決することが可能となり、地域におけるデータの地産地消を促進可能であると考えた。結果として、地域データを地域内で利用することは不要なデータをインターネットに流出させる必要がなくなることからデータプライバシーの確保も可能になり、さらに、インターネット集中型である現在の情報システムの負荷を各地域に分散することが可能となる。

我々はこれまで、時空間データを地域内のデバイスと無線通信を用いて効果的に流通するための時空間データ滞留基盤(Spatio-temporal Data Retention System, STD-RS)について研究を行ってきた[1]。データ滞留には地域のデバイスを用いるため、ネットワーク構成が非常に動的であることから、流通するデータの発見・探索を省略するため、地域内のデバイスが全てのデータを蓄積しつつ無線通信を用いてブロードキャスト（無指向的データ発信）を繰り返し実施することで、ユーザにデータを提供している。そのため、地域のデバイスにおけるデータ蓄積のためのストレージの確保と過剰な無線通信資源の浪費が課題であった。一方で、情報指向ネットワーク（Information Centric Networking, ICN）は従来の IP ネットワークとは異なり、データに付与される属性（例としてコンテンツの名前やタグ等）に基づきデータ転送を行い、中継するノードでキャッシュすることで効率の良いデータ流通を実現する技術として注目されている[2][3]。しかし、現在のインターネット基盤は TCP/IP によって構築されているため、広域での ICN 技術の適用は困難であると考えられている。そこで本研究課題では、地域のデバイスによって構成される時空間データ滞留基盤（ネットワーク）に ICN 技術を適用することで、滞留基盤が有しているデータの発見・探索をデータの属性に基づき流通可能となり、無線通信資源の浪費を抑制しつつ効果的なデータ流通を実現可能であると考えた。

そこで本申請課題では、データの地産地消を促進するために、無線通信資源を節約しつつ効果的なデータ流通基盤を実現可能な情報指向型データ滞留基盤の実現を目的とする。我々はこれまで、IoT 技術により生成されるセンサデータは、生成された場所と時間に深く依存すると考え、データの地産地消を実現するためのデータ滞留基盤を提案してきた。これにより地域におけるデータ流通実現に向けた知見を収集することができたが、ユーザのデータ取得からサービス展開までのフローを検討したところ、ユーザエクスペリエンスを向上させるためには無線通信によりデータ転送を活発に実施する必要があることから、有限である無線資源を必要以上に浪費する可能性があることが明らかとなった。そこで本研究では、我々がこれまで取り組んできたデータ滞留基盤と、データの内容に基づきデータ流通を実現する情報指向ネットワーク（Information Centric Networking, ICN）の技術を融合することで、無線通信資源の浪費を抑制しつつ効果的なデータ探索・発見・流通が実現可能な、地域におけるデータ流通基盤の実現を加速させることを目指す。

2 研究内容

本研究助成では、情報指向ネットワークを用いたデータ滞留システムの実現に向けて、データ取得のための転送制御手法の検討、データ配信・取得のモデル化および最適化の検討、そして実機を用いた実験による実現可能性の評価に取り組んだ。以下に各テーマについて報告する。

2-1 受信信号レベルに基づく時空間データ滞留システムにおける情報指向ネットワークを用いた能動的データ取得手法

研究背景

IoT 技術の発展、スマートシティやモビリティサービスの普及により、交通情報や気象情報といった「時間」と「空間」に依存した情報の価値が高まっている。これらのデータを効率的に収集・配信するうえで、既存のインフラ型ネットワークではコストや柔軟性に限界があり、さらにクラウドを介した一極集中処理に依存することで、情報の発生場所と利用場所が近接している場合でも通信遅延や通信資源の浪費が生じている。

この課題に対し、著者らは特定地域内でデータを収集・処理しサービスを提供する「時空間データ滞留システム (STD-RS)」を提案してきた[1]。本システムは、交通情報や気象情報など生成された時間・場所に依存するデータを「時空間データ (STD)」として扱い、ストレージ・計算資源・無線通信機能を備えた車両を情報流通の中継ハブ (InfoHubs) として活用する。InfoHubs 車両が STD を配信する地域を「滞留エリア」と定義し、そのエリア内でブロードキャスト通信により STD パケットを拡散・滞留させる。1つの STD は 1つのパケットとして構成され、アプリケーションが利用する情報に加え、位置情報・滞留半径・データ送信周期といった滞留制御情報も含まれる。これにより、既存インフラに依存せず、災害時など通信が遮断された状況でも有効に機能し、ユーザは滞留エリア内に滞在する間 STD を受動的に取得できる。

STD-RS と既存研究の課題

STD-RS の既存手法として、まず位置情報と車両密度に基づくデータ送信確率制御システム[1]がある。各車両は GPS で位置情報を取得し、他の InfoHubs 車両からのビーコンメッセージを受信して隣接車両数を推測する。送信周期 d に従い $0 \sim d$ の範囲でランダムに送信タイミングを決定して衝突を回避しつつ、送信確率を周辺ノード密度に応じて動的に制御することで、通信資源の効率的利用と高いデータカバー率を両立する。しかし、定期的なビーコンメッセージがブロードキャスト通信を増加させる問題がある。

これに対し RSSI 値に基づく時空間データ滞留システムが提案された[4]。これは適切送信位置 (ATP) を、最小限の送信回数で滞留エリア全体を効率的に覆うよう配置された位置として定義し、各車両が最寄りの ATP に基づいて自律的に送信タイミングを決定する。これによりビーコン信号に依存せず、同時送信を回避しながら受動的なデータ取得を可能にする。

しかし、STD-RS は受動的にデータを受信する方式であるため、ユーザが能動的に情報を取得できず、送信周期によっては必要なデータを受け取るまでに大きな遅延が生じうる。また、ユーザにとって不要なデータも一律に配信されることで通信資源の浪費が発生する。従来手法ではビーコンメッセージを用いた車両密度ベースのシステムに ICN を導入することでユーザ主導のオンデマンドなデータ取得を実現したが、車両密度推定のためビーコンメッセージを継続的に送信する必要があり、ブロードキャスト通信量の増加・輻輳・衝突が課題として残っていた[5]。特に大容量 STD を扱う場合、この追加通信負荷が効率的なデータ滞留・取得の妨げとなる。

提案手法

そこで本論文では、RSSI 値に基づく時空間データ滞留システムに ICN を組み込み、ビーコンメッセージに依存することなく、不要なデータ送信を削減しつつ、大容量データの効率的な滞留とユーザ主体のデータ取得を可能にする手法を提案する。提案システムは、基盤となる RSSI ベースのデータ拡散・滞留機構と、その上に統合された ICN ベースの能動的データ取得から構成される。

データの拡散・滞留は先行手法の制御に基づく。ATP を配置し、各ノードは割り当てられたタイムスロットと ATP からの距離に応じて送信時刻 (最寄り ATP までの距離 D_p 、通信半径 D_v 、送信周期 d を用いて $(D_p/D_v) \cdot (d/7) + \text{SlotStartTime}$) を決定する。各滞留ノードはパケットの完全性に応じてフラグ

(0/1) を付与し、フラグが 0 なら拡散段階で所有パケットを全送信、フラグ 1 なら滞留段階に入る。滞留段階では、ATP から見た理想的な RSSI 値 (フリスの伝達公式で計算) と実測 RSSI 値を比較し、実測値が低ければ伝搬不足とみなし再送、高ければ十分に到達済みと判断して再送を抑制する。

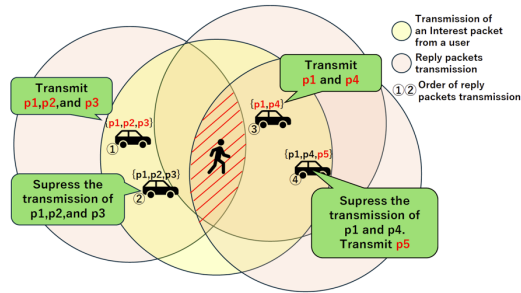


図 1: Interest Reply 返送

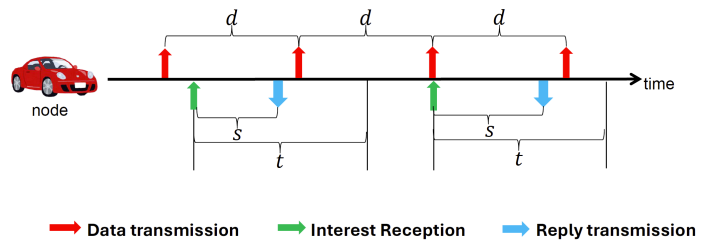


図 2: 送信タイミング制御概要

データ取得には ICN のコンテンツ名ベースの要求応答モデルを採用する。図 1 に応答モデルの概要を示す。ユーザは任意のタイミングで「ccnx:/カテゴリ名」形式の Interest パケットをブロードキャストする。これを受信した滞留ノードは、滞留エリア内かつ該当カテゴリのデータを保有していれば Reply パケット (ICN の Data パケットに相当) を返送する。Reply パケットは送信開始からの t 秒 (ユーザがエリア内にいればデータ復元可能な時間、本研究では 5 秒) の中でランダムな時間 s 秒で送信される。自分が送信予定の Reply パケットを他ノードから受信した場合は重複送信を抑制する。図 2 に送信タイミング制御の概要を示す。これにより、STD-RS によるデータの可用性・持続性を確保しつつ、送信頻度の制御、不要なデータ配信の抑制、ユーザによる効率的・自律的な情報取得を実現する。

評価環境

シミュレーションは、ネットワークシミュレータ OMNeT++、交通シミュレータ SUMO、両者を連携させるフレームワーク Veins を用いて実施した。主なパラメータは、通信方式 IEEE802.11p、伝送速度 12 Mbps、車両通信範囲 300 m、車両速度 40 km/h、STD パケット数 10、パケットサイズ 1,500 bytes、測定時間 200 s である。縦横 2,200 m の範囲に車両列を 200 m 間隔で配置し、東西方向から一定速度で交互走行させる。図 3 にシミュレーション環境を示す。道路端到達車両は消失し、反対側から新規車両が生成されることでエリア内車両数を一定に保つ。

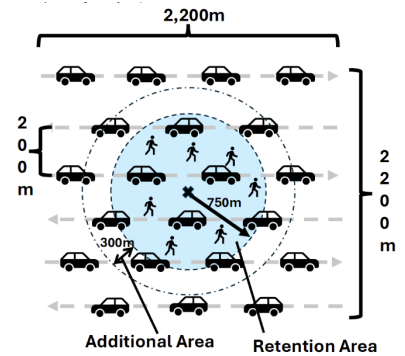


図 3: シミュレーション環境

提案手法そのものの効果を見極めるため近傍ノード数の時間変動を抑えた制御条件とし、近傍ノード数を 5・6・8・10 台と変化させた。

滞留周期 d は拡散がほぼ完了する動作開始 40 秒後から 5~40 秒まで 5 秒刻みで変化させ、ユーザは 40~160 秒の間に 1 秒ごとに出現し、Interest パケットを送信確率 0・10・20・30・40% で送信した。10 パターンのユーザ配置×5 通りの送信タイミングで計 50 通りの平均を算出した。評価指標は、ユーザが 5 秒以内にデータを復元できたかを表すデータ取得時間と、一連の動作での総送信パケット数である。

比較対象は、車両密度に基づく適応送信制御システム (vehicle-density method)、RSSI 値に基づくシステム (RSSI-based method)、車両密度に基づく情報指向型システム (comparison method) であり、RSSI 制御の効果と ICN 導入の効果を分離して評価できるよう設計されている。

評価結果

RSSI-based method への ICN 導入効果 (近傍 8 台、図 4、図 5) : RSSI-based method では滞留間隔 15s で平均データ取得時間が 5s を超え、要求時間内の取得が困難であった。一方、提案手法は Interest 送信ユーザ割合 10% でも滞留間隔 20s で平均 5s 以内、30% では滞留間隔 40s でも 5s 以内を達成した。総送信パケット数は、RSSI-based method が滞留間隔 15s で約 9,500 パケットだったのに対し、提案手法は 10%・滞留間隔 20s で約 8,500、30%・滞留間隔 40s で約 7,000 に抑制された。

RSSI 制御の有効性 (図 6、図 7) : Interest 送信割合を 30% に固定し近傍ノード数を変化させた正規化結果 (comparison method を 1 とする比) では、提案手法のデータ取得時間・総送信パケット数がすべての条件で 1 を下回り、提案手法が優れていることが示された。これは、比較手法が車両密度推定のため周期的ビーコンブロードキャストを要し、ノード数増加に伴いトラヒックと衝突が増えるのに対し、提案手法は RSSI 値で送信を決定しビーコンを不要とするためである。提案手法でも Interest/Reply によるブロードキャストは発生するが、Interest はユーザ要求時のみ、Reply は重複抑制により一部ノードのみが

送信するため追加オーバーヘッドは限定的である。

まとめ

本研究は、STD-RS における通信資源の有効利用とユーザ主体のデータ取得を実現するため、ICN を用いたコンテンツ名ベースの能動的データ取得手法を提案した。シミュレーションにより、パケット損失が発生しやすい環境下でもユーザが安定かつ迅速にデータを取得でき、総送信パケット数も削減できることを確認した。今後は、ICN におけるパケットロス発生時の再送制御手法や、ICN を活用したより効率的なデータ拡散手法の検討を予定している。

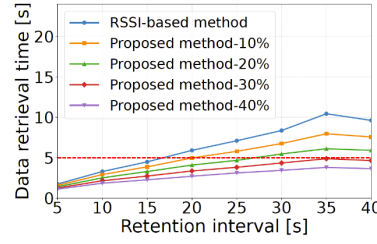


図 4: データ取得時間

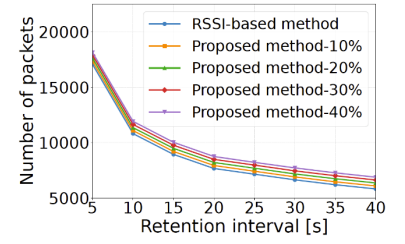


図 5: 総パケット送信数

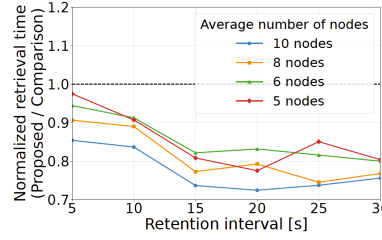


図 6: 正規化データ取得時間

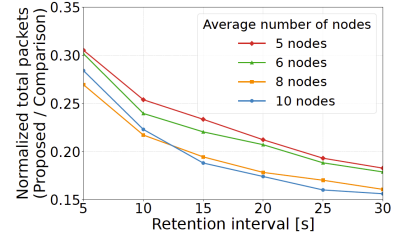


図 7: 正規化総パケット送信数

2-2 時空間データ滞留システムにおけるデータ配信・取得のモデル化および最適化

本研究では、従来の滞留に基づくプッシュ型通信と ICN に基づくプル型通信とが混在するシステムモデルを記述し、データの特성에応じた通信形態の割り当てを最適化する。

研究の動機と位置付け

ICN を STD-RS に導入する上では、従来の滞留に基づくプッシュ型通信と ICN に基づくプル型通信とを適切に使い分けことが、STD-RS のさらなる効率化につながると考えている。特に、ユーザに提供するデータの特性に応じた使い分けが肝要である。STD-RS で扱われるデータは多様である。実際、センサが観測するデータからアプリケーションまでを STD-RS は扱う。これらのデータ間では、その大きさおよびユーザの関心度が異なっている。このように特性の異なるデータに対して、プッシュ型通信もしくはプル型通信のどちらが適しているかは自明ではない。

本研究は、本研究課題において、シミュレーションおよび実証実験に向けた基礎検討と位置付けられると同時に、研究課題を通して提案するシステムの有用性を理論的に示すものと位置付けられる。

システムモデル

1 台の滞留ノードを考える。滞留ノードによるデータ滞留の周期を Δ と表記する。また、ビーコン周期を δ と表記する。ビーコン周期は滞留周期より小さい、すなわち $\delta < \Delta$ であると仮定する。滞留ノードは、周期 Δ 毎に、データをブロードキャストするものとする。また、ビーコンを受け取ったユーザはデータを滞留ノードから取得するものとする。

C 個のクラスの集合を考える。クラス c に属するデータの大きさを S_c と表記する。

滞留エリア、すなわち滞留ノードに通信が到達するエリアにユーザが到着するものとする。クラス c のデータに対するユーザの到着レートを λ_c と表記する。

クラス c に応じて、滞留によるプッシュ型のデータ配信と、ICN によるプル型のデータ取得とを使い分けるものとする。これを決定変数 x_c^{push} および x_c^{pull} によって表現する。また、クラス c は必ずどちらか一方の通信形態に従うものとする。

以降では、クラス c に対して、プッシュ型通信のコスト、およびプル型通信のコストそれぞれを定義する。まず、プッシュ型通信を考える。クラス c のコスト J_c^{push} を次式で定義する。

$$J_c^{\text{push}} = \alpha \frac{\Delta}{2} + (1 - \alpha) \frac{S_c}{\Delta}$$

本式における α は重み付けパラメータである。右辺の第一項はデータ転送の遅延であり、時間区間 Δ

に滞留エリアに到着したユーザにとっての遅延の期待値である。また右辺の第二項はデータ転送のレートを表す。

同様に、プル型の取得によるコスト J_c^{pull} も定義する。

$$J_c^{\text{pull}} = \alpha \frac{\delta}{2} + (1 - \alpha) \frac{\lambda_c S_c}{\delta}$$

右辺の第二項については、ユーザ数に比例したデータ転送が発生することを踏まえている。

通信形態の最適割当の導出

通信容量が無限であるという仮定の下で、通信形態の最適割当を求める。あるクラス c に着目し、最適な通信形態がプッシュ型通信とプル型通信とのどちらであるのかを論じる。というのも、目的関数は全クラスのコストの総和を最小化することではあるものの、あるクラスの通信割当は他のクラスに対して独立であり、クラス毎に分解して解くことが全体最適化となるためである。

主要な結果である、プッシュ型通信のコストとプル型通信のコストとの大小関係が逆転する閾値を示す。

$$\lambda \geq \frac{\alpha}{1 - \alpha} \frac{\delta(\Delta - \delta)}{2S} + \frac{\delta}{\Delta}$$

つまり、ユーザの到着レートが右辺の閾値を上回れば、プッシュ型通信が最適である。その逆であれば、プル型通信が最適であることを意味する。

数値例を示す。ユーザの到着レート λ に対するコストを図 8 に示す。図中にはプッシュ型通信のコストおよびプル型通信のコストそれぞれを示している。プッシュ型通信のコストは到着レート λ に依存しないものの、プル型通信のコストは λ に対して線形に増加する。また、 λ に応じて、最適な通信形態が存在することも確認できる。すなわち、 $\lambda < 0.14$ であればプル型通信が最適であり、そうでなければプッシュ型通信が最適である。

次に、データの大きさに対するプッシュ型通信とプル型通信の適正を確認する。図 9 は、データの大きさに対する到着レートの閾値 λ^* を示している。この結果から、閾値はデータの大きさに対して反比例に減少している、ということがわかる。これは、データが大きいのであれば、ユーザの到着レートに（ほとんど）よらず、プル型通信よりプッシュ型通信が適している、ということを示している。逆に、プル型通信が有効となるのは、データの大きさが小さく、かつユーザの到着レートが少ない場合であることも示している。

容量制約付き問題に対する解法

プッシュ型通信による転送レートの上限を表す通信容量を R とした、通信容量の制約を導入した問題を検討する。本問題に対する貪欲アルゴリズムを説明する。本アルゴリズムは、プル型通信からプッシュ型通信へ切り替えることによる利得に着目し、容量制約の下でその利得を最大化することを目的とする。アルゴリズムを図 10 に示す。

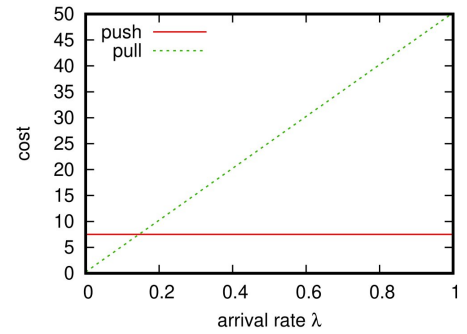


図 8: 到着レートに対するプッシュ型通信およびプル型通信それぞれのコスト

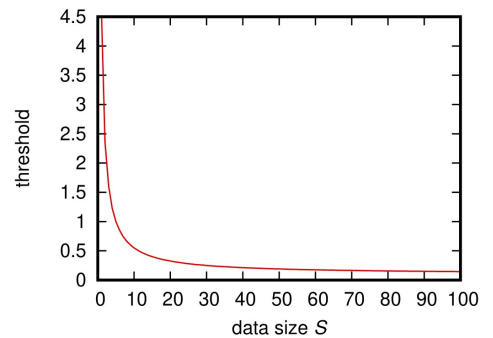


図 9: データの大きさが到着レートの閾値に与える影響

本数値例では、到着レートとデータの大きさとの対応付けに着目した評価を行う。

3 種類の対応付けを定義する。

- positive: 到着レートが高くなるにつれデータの大きさも大きくなる、という正の相関を示す
- negative: positive とは逆に、到着レートが高くなるにつれデータの大きさは小さくなる、という負の相関を示す
- fixed: 到着レートに依らずデータの大きさは等しい

到着レートは Zipf 分布に基づき与えており、データの大きさの分布は対数正規分布で与えた。

まず、貪欲アルゴリズムによって求められた通信形態を述べる。本評価で用いた条件下では、3 種類の対応付けによらず、到着レートが高いクラスにプッシュ型通信が割り当てられていた。positive および fixed の場合には、到着レートが高くかつデータが大きいクラスにプッシュ型通信を割り当てる、ということ直感的に妥当である。というのも、プル型通信のコストは、到着レートとデータの大きさとの双方に比例し増加するためである。一方で、この議論は negative の場合にはそのまま適用できない。到着レートとデータの大きさとの間にトレードオフが生じるためである。本数値例の条件下では、データの大きさと比較して到着レートの影響が相対的に支配的となり、高到着レートのクラスに対してプッシュ型通信を採用することによる利得が得られた。その結果として、negative の場合においても、positive および fixed の場合と同様の傾向が確認された。

次に、図 11 に基づきコストを議論する。図 11(a) は総コストを示しており、図 11(b) は、総コストを構成するプッシュ型通信のコストおよびプル型通信のコストをそれぞれ示している。これらの結果から、positive におけるコストが他の二つの対応付けより大きく、特にプッシュ型通信のコストが大きい、ということがわかる。これは、プッシュ型通信に割り当て可能な容量が制約 R に達した結果、プッシュ型通信を採用できるクラス数が頭打ちとなり、到着レートが高いかつデータが大きいクラスがプル型通信に割り当てられたためである。

最後に、通信容量 R および総到着レート Λ が通信形態の割当に与える影響を議論する。図 12 に、プッシュ型通信を採用しているクラス数を示す。ここでは、対応付けとして fixed を用いている。まず、通信容量 R の影響に着目する。この結果から、容量 R の増加に伴い、プッシュ型通信を採用するクラス数が増加している、ということがわかる。これは、プッシュ型通信による利得が正である場合には、通信容量 R が許す限りプッシュ型通信を採用することが合理的であるためである。次に、総到着レート Λ の影響に着目する。 Λ の増加に伴いプル型通信のコストが増加するため、プッシュ型通信を採用するクラス数も増加す

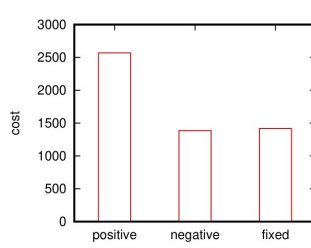
Algorithm 1 Greedy algorithm

```

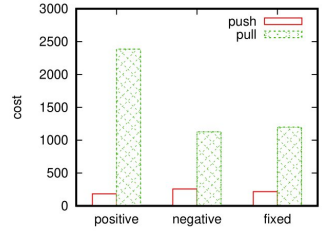
1: Initialize  $x_c^{\text{push}} \leftarrow 0$  and  $x_c^{\text{pull}} \leftarrow 1$  for all  $c \in \mathcal{C}$ 
2: Initialize residual capacity  $\tilde{R} \leftarrow R$ 
3: while true do
4:   Construct candidate set
       $\mathcal{C}' \leftarrow \left\{ c \in \mathcal{C} \mid x_c^{\text{pull}} = 1, \tilde{R} \geq \frac{S_c}{\Delta} \right\}$ 
5:   Evaluate gains  $\{\Delta J_c\}_{c \in \mathcal{C}'}$ 
6:   if  $\mathcal{C}' = \emptyset$  or  $\Delta J_c \leq 0$  for all  $c \in \mathcal{C}'$  then
7:     break
8:   end if
9:   Select
       $c^* \leftarrow \operatorname{argmax}_{c \in \mathcal{C}'} \frac{\Delta J_c}{S_c/\Delta}$ 
10:  Set  $x_{c^*}^{\text{push}} \leftarrow 1$  and  $x_{c^*}^{\text{pull}} \leftarrow 0$ 
11:  Update  $\tilde{R} \leftarrow \tilde{R} - \frac{S_{c^*}}{\Delta}$ 
12: end while
13: return  $\{x_c^{\text{push}}, x_c^{\text{pull}}\}$ 

```

図 10: 貪欲アルゴリズム



(a) 総コスト



(b) プッシュ型通信の総コストおよびプル型通信の総コスト

図 11: 3 種類の対応付けにおけるコストの比較

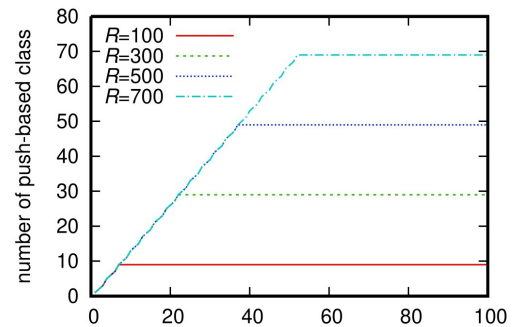


図 12: 通信容量および総到着レートが通信形態の割当に与える影響

る、という傾向が確認される。

まとめ

本研究では、プッシュ型通信とプル型通信とが混在する STD-RS を対象とし、データの特성에応じた最適な通信割当を検討した。通信形態の最適割当問題を通信容量の制約に応じた最適化問題として定式化した。容量が無限である場合には、最適な通信割当を代数的に導出できることを示した。一方、容量が有限であるという制約を有する割当問題に対しては、プッシュ型通信による利得に基づく貪欲アルゴリズムを提案した。また、数値例を通して、データの特性が通信形態の割当に与える影響を考察した。その結果、通信形態の割当に関する指針を数理的に明らかにした。

2-3 時空間データ滞留システムにおける情報指向ネットワークを用いたデータ送信効率化の実装評価 提案の動機と位置づけ

STD-RS は受動的にデータを受信する方式であるため、ユーザが能動的に情報を取得できず、送信間隔によっては必要なデータを受け取るまでに大きな遅延が生じうる。また、ユーザにとって不要なデータが一律に配信されることで無線通信資源の浪費が発生する。そのため、従来のサーバクライアント型のクエリレスポンスによるデータ取得ではなく、コンテンツの内容でデータを探索・取得できるシステムの構築が必要となる。

そこで本研究では、位置情報と車両密度に基づくデータ送信確率制御に加え、ICN による能動的なデータ取得方式を STD-RS に統合する手法を提案する。目的は、ユーザが任意のタイミングでデータを取得可能な仕組みを実現すること、および不要なデータ配信を抑制して総送信パケット数を削減することである。

ICN（情報指向ネットワーク）の基礎

ICN は、従来の IP アドレスに基づくホスト中心の通信とは異なり、コンテンツ名を基にデータを要求・配信することで、ユーザが通信相手ではなく必要とする情報そのものに基づいて通信を行うネットワークアーキテクチャである。代表的なモデルとして Named Data Networking (NDN) が用いられる[6]。図 3 (Interest-Data 通信方式) に示すように、NDN の通信は「Interest パケット」と「Data パケット」の 2 種類で構成される。ユーザは取得したいデータに対応する名前を含む Interest パケットを送信し、受け取った中継ノードは Forwarding Information Base (FIB) を参照してパケットを転送する。該当データを保持するノードがあれば対応する Data パケットが返送される。Data パケットはコンテンツ名に加え署名などのメタデータを含み、中継ノードのキャッシュ機能 Content Store (CS) に一時保存されるため、同じ名前への Interest が再送された場合はキャッシュから迅速に応答される。これにより、効率的なデータ配信や負荷分散が可能となり、ユーザは特定サーバに依存せず柔軟に情報取得ができる。

関連研究との差別化

特定地域内へのデータ流通を目的とする手法として FCS (Floating Content Systems) があるが、情報の維持がノード密度に強く依存し、確実な取得性に課題がある[7][8]。DTN と IoT を統合した FloatingBlue はノード移動に大きく依存するため通信遅延が増加し、リアルタイム応答には適さない[9]。複数の無線通信技術を組み合わせた研究では動的なインタフェース選択で通信成功率が向上する一方、消費電力増加とシステム構成の複雑化が課題となった。VANET に ICN を導入した ICAN は柔軟性・拡張性に優れ、プッシュ・プル型ハイブリッド通信で緊急情報を広域共有できるが、特定の時間・空間にわたる情報の持続的保持・提供が困難である[10]。これらに対し本研究の ICN 導入 STD-RS は、ブロードキャストによる情報拡散・滞留と受動的取得に加え、ノード密度に応じた送信確率制御と制御情報による高い柔軟性を備え、ユーザが任意のタイミングで能動的にデータを取得でき、従来の FCS 系手法に比べ高いリアルタイム性・信頼性・通信資源効率の両立を可能にする。

提案手法の構成

提案手法は、STD-RS によるデータ拡散・維持と、ICN によるデータ取得の二層から構成される。

STD-RS によるデータ拡散・維持：先行手法の制御に基づいて送信時間と送信確率を決定し、データ拡散を行う。情報源ノードは、データ送信間隔 d と滞留半径 r を STD パケットに含めて送信する。各ノードは一定時間ごとに、ノードを一意に識別するノード ID と送信時刻を示すタイムスタンプを含むビーコンメッセージをブロードキャスト配信する。各車両は GPS で自身の位置情報を取得し、周囲のノー

ドが発するビーコンメッセージを受信することで隣接車両数(車両密度)を推定する。STD を受信した際、自身が滞留エリア内にいると判断した場合は、隣接車両密度に応じて動的に送信確率を制御し、その確率に従って STD を配信することで滞留エリア内のデータ拡散・滞留を実現する。

ICN によるデータ取得：ユーザは、滞留エリア内のノードからビーコンメッセージを受信することで自身がエリア内に入ったと判断し、自身の IP アドレスを含んだ Interest パケットを任意のタイミングで周囲のノードにブロードキャスト配信する。Interest パケットは「ccnx:/カテゴリ名」の形式で生成される。Interest を受信したノードは、そのプレフィックスと一致するすべてのデータを、Interest 内で指定された IP アドレス宛にユニキャスト送信する。複数ノードが同時に応答する場合は、重複して受信したデータを破棄する。このように STD-RS でデータの可用性と持続性を確保しつつ、ICN の名前ベースの要求応答モデルを導入することで、送信頻度の制御、不要なデータ配信の抑制、ユーザによる効率的・自律的な情報取得を実現する。

実機実験による性能評価

提案手法と、能動的なデータリクエストができない滞留システム（先行手法）を比較対象として実機実験で評価した。

実験環境（図 13）：九州工業大学戸畑キャンパスの総合研究 1 号棟で実施した。情報源ノード・中継ノード・ユーザノードのいずれにも Raspberry Pi 4 Model B+ を使用し、情報源ノード 1 台、中継ノード 3 台、ユーザノード 1 台の計 5 台を用いた。中継ノードとユーザノード間の距離は環境要因で通信障害が生じうる 35 m に設定し、情報源ノードはユーザノードの通信に干渉しない位置に配置した。各ノードは Wi-Fi でアドホックネットワークを形成し、全ノードを同一ブロードキャストドメインに属させた。通信規格は IEEE802.11g、データカテゴリは ccnx:/weather の 1 種類、データ数は 10 個・30 個の 2 条件、各データは単一パケット（100 Bytes）とした。



図 13: 実験環境

動作シナリオ：拡散処理は両手法とも同一仕様とし、情報源・中継ノードが全データを滞留した状態を初期条件とする。これらは 1 秒おきにビーコンを配信し、中継ノードの滞留周期 d は先行手法で 3 秒、提案手法で 6 秒に設定し、それぞれ 10 周期・5 周期の 30 秒間で動作を終える。ユーザノードは動作開始から 1・2・3 秒の時点で順次動作を開始し、ランダムなタイミングでエリアに進入する状況を模擬した。手法間比較のため全データを 100% 能動的に取得する構成とし、ビーコン受信次第 Interest をブロードキャスト、対応する Data がユニキャストで返送される。実環境の影響を考慮し、受信パケットに 0%・10%・20% の割合で意図的にパケットロスが発生させ、各条件で 60 回繰り返した。評価指標は、ユーザノードが動作開始から全データを取得するまでの時間と、各ノードの送信パケット数の総和である。

実験結果

データ取得時間（図 14：データ数 10 個、図 15：データ数 30 個）：提案手法を PM、先行手法を CM と表記し、中継ノード数を付して示す。データ数 10 個で隣接中継ノード数が 1 台かつパケットロス率が高い環境では、先行手法の方が早く配信できた。一方、隣接中継ノード数が 2 台以上の場合、パケットロス率によらず提案手法の方が早くデータを配信できた。データ数 30 個でも同様の傾向が確認さ

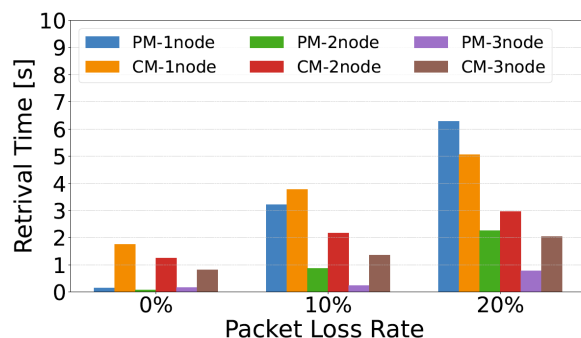


図 14: データ取得時間（データ 10 個）

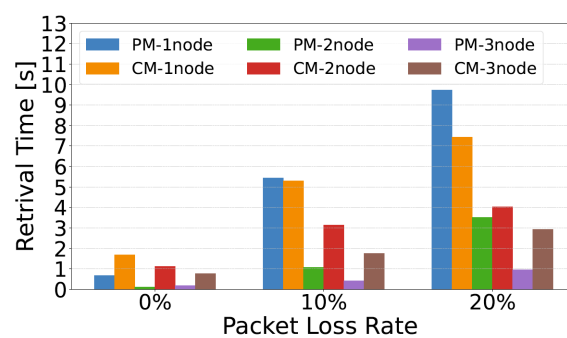


図 15: データ取得時間（データ 30 個）

れ、データ数・パケットロス率によらず、隣接中継ノード数が増えるほど提案手法が迅速に配信できることを示している。これは、提案手法が滞留周期に依存せず即座にデータ取得が可能であることに加え、ユニキャストを用いることでブロードキャストに比べデータ衝突が抑制され、取得時間が短縮されたためと考えられる。

総送信パケット数 (図 16) : PM-10 は提案手法・データ数 10 個のケースを表す。先行手法では中継ノード数の増加に伴い総送信パケット数が大幅に増加する一方、提案手法では上昇率が比較的穏やかであり、データ数が多い場合にその差は一層顕著になる。

以上より、提案手法は先行手法と比較して、パケットロス率が高い状況下でも短時間で安定的なデータ取得を実現し、総送信パケット数の観点でも大幅な削減を達成しており、通信資源の効率的利用を実現できているといえる。

まとめ

本研究では、STD-RS における通信資源の有効利用とユーザ主体のデータ取得を実現するため、ICN を用いたコンテンツ名ベースの能動的データ取得手法を提案した。実機実験により、パケット損失が発生しやすい環境下でもユーザが安定かつ迅速にデータを取得でき、総送信パケット数の削減も可能であることを確認した。今後は、ICN におけるパケットロス発生時の再送制御手法や、ICN を活用したより効率的なデータ拡散手法の検討を予定している。

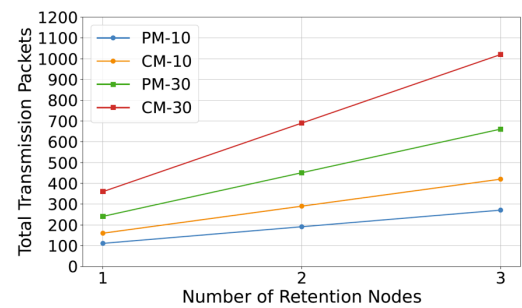


図 16: 総パケット数

【参考文献】

- [1] Daiki Nobayashi, Ichiro Goto, Hiroki Teshiba, Kazuya Tsukamoto, Takeshi Ikenaga, Mario Gerla, "Adaptive Data Transmission Control for Spatio-temporal Data Retention over Crowds of Vehicles," IEEE Transactions on Mobile Computing, Nov. 2022, Vol.21, pp. 3822-3835, Nov. 2022.
- [2] H. Asaeda, et al., "A survey of Information-Centric Networking: The quest for innovation," IEICE Trans. Commun., vol. E107-B, no. 1, pp. 139-151, Jan. 2024.
- [3] S. Shiokawa, "Information Centric Networking in Mobile Environments," IEICE Fundamentals Review, vol. 16, no. 4, pp. 301-309, Apr. 2023.
- [4] Daiki Nobayashi, Renju Akashi, Kazuya Tsukamoto, Takeshi Ikenaga, Myung J. Lee, "Performance Evaluation of Spatio-temporal Data Retention System Supporting a Floating Cyber-physical System", Journal of Information Processing, Vol 32, pp 566-574, Aug. 2024.
- [5] 周田 智貴, 野林 大起, 塚本 和也, 池永 全志, 三角 真, 中村 遼, "時空間データ滞留システムにおける情報指向ネットワークを用いたデータ送信効率化の提案," 電子情報通信学会 技術研究報告, vol. 125, no. 85, IA2025-15, pp. 86-91, 2025 年 6 月
- [6] L. Zhang, et al., "Named Data Networking," ACM SIGCOMM Comput. Commun. Rev., vol. 44, no. 3, pp. 66-73, Jul. 2014.
- [7] J. Ott, et al., "Floating content: Information sharing in urban areas," in Proc. IEEE Int. Conf. Pervasive Comput. Commun. Workshops (PERCOM Workshops), Seattle, WA, USA, pp. 136-140, Mar. 2011.
- [8] S. Ali., "Floating Content: Experiences and Future Directions," International Journal of Advanced Computer Science and Applications, vol. 12, no. 3, pp. 343-346, 2021.
- [9] R. Vianna, et al., "FloatingBlue: A DTN-Enabled IoT Architecture for Remote Areas Combining Data Mules and Low Power Communications," Sensors, vol. 24, no. 19, pp. 1-25, 2024.
- [10] M. A. Salahuddin, et al., "ICAN: Information-Centric Adhoc Network Architecture for VANETs," eScholarship, University of California, pp. 1-10, 2014.

〈発 表 資 料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
情報指向型時空間データ滞留システムに関する一検討	電子情報通信学会第 5 回コミュニケーションクオリティ (CQ) 学生ワークショップ	2024 年 8 月
時空間データ滞留システムにおける情報指向ネットワークを用いたデータ送信効率化の提案	電子情報通信学会 技術研究報告, vol. 125, no. 85, IA2025-15, pp. 86-91	2025 年 6 月
Information-Centric Networking-Based Active Data Retrieval Method in Spatio-Temporal Data-Retention System	The 16th International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN 2025)	2025 年 7 月
屋内環境における時空間データ滞留システムのための代表ノード選出型データ送信制御手法の検討	電子情報通信学会 2025 年 ソサイエティ大会	2025 年 9 月
情報指向ネットワーク技術を用いた時空間データ滞留システム高度化の検討	電子情報通信学会 革新的無線通信技術に関する横断型研究会 (MIKA 2025)	2025 年 9 月
屋内環境における時空間データ滞留システムのためのデータ送信効率化手法の検討	電子情報通信学会 革新的無線通信技術に関する横断型研究会 (MIKA 2025)	2025 年 9 月
Wide-Area Interconnection Experiments between F-CPS for Spatio-Temporal Data Utilization	Workshop on Internet Architecture and Applications 2025	2025 年 10 月
Clustering Based Transmission Control Method for Indoor Spatio-Temporal Data Retention System	IEICE 2025 International Conference on Emerging Technologies for Communications, (ICETC2025)	2025 年 11 月
Experimental Evaluation of Spatio-Temporal Data Utilization on Floating Cyber-Physical System Platform	Computers, Materials & Continua, doi:10.32604/cmc.2026.077008	2026 年 3 月
時空間データ滞留システムにおけるデータ配信・取得のモデル化および最適化	電子情報通信学会 技術研究報告, vol. 125, no. 379, IA2025-90, pp. 90-95	2026 年 3 月
受信信号レベルに基づく時空間データ滞留システムにおける情報指向ネットワークを用いた能動的データ取得手法	電子情報通信学会 技術研究報告, vol. 126, no. 73, IA2026-9, pp. 51-56	2026 年 6 月
Modeling and Optimization of Data Dissemination and Retrieval in Spatio-Temporal Data-Retention System	the 14th IEEE International Workshop on Architecture, Design, Deployment, and Management of Networks and Applications (ADMNET 2026)	2026 年 7 月