

令和 6 年 5 月 30 日現在

機関番号：12605

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K17729

研究課題名（和文）ユーザ参加により自律型Device-to-Device通信を促進するメカニズム

研究課題名（英文）Mechanism to Facilitate Autonomous Device-to-Device Communication through User Participation

研究代表者

中山 悠（Nakayama, Yu）

東京農工大学・工学（系）研究科（研究院）・准教授

研究者番号：80802058

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 5,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、モバイルユーザ同士の自律的なD2D通信を促進するため、新たにペナルティ項を導入し、マルチエージェントシミュレーションでその有効性を確認した。また、セキュリティ上の懸念に対処するために、光学チャネルを介したマルチチャネルデバイス認証プロトコルを提案し、Androidアプリで実装した。さらに、映像向けの光信号埋め込み方式として、SCMを提案し、液晶ディスプレイとスマートフォンを用いて実証した。自律型D2D通信における通信品質の問題には、C-RANアーキテクチャや部分的な通信リンクの統計情報を活用し、通信の信頼性や安定性の評価・検証を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、これまで十分な研究が進んでいなかった自律型D2D通信に焦点を当て、従来の一方的なインセンティブとは異なる観点でアプローチしたことは学術的意義が大きい。ペナルティ項の導入や光カメラ通信のセキュリティ確保など、このメカニズムの実用化に向けた有望な成果も得ることができた。また、市民からの無線ユニット収集による通信リソースの効率的活用は、持続可能な都市開発の実現に貢献するといえる。さらには、部分的なリンク統計による信頼性評価の効果も示唆され、通信システムの設計や運用において効率性が向上することが期待できる。こうした成果は、今後の産業や社会の発展に大きく寄与するものといえる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we introduced a new penalty term to encourage autonomous device to device (D2D) communication among mobile users, confirming its effectiveness through multi-agent simulations. Additionally, to address security concerns, we proposed a multi-channel device authentication protocol utilizing optical channels, implemented in an Android application. Furthermore, we proposed Signage Cipher Modulation (SCM) as an optical signal embedding method for video content, validated using liquid crystal displays and smartphones. To tackle communication quality issues in autonomous D2D communication, we utilized C-RAN architecture and statistical information from partial communication links to evaluate and verify communication reliability and stability.

研究分野：情報ネットワーク

キーワード：D2D 可視光通信 OCC イメージセンサ

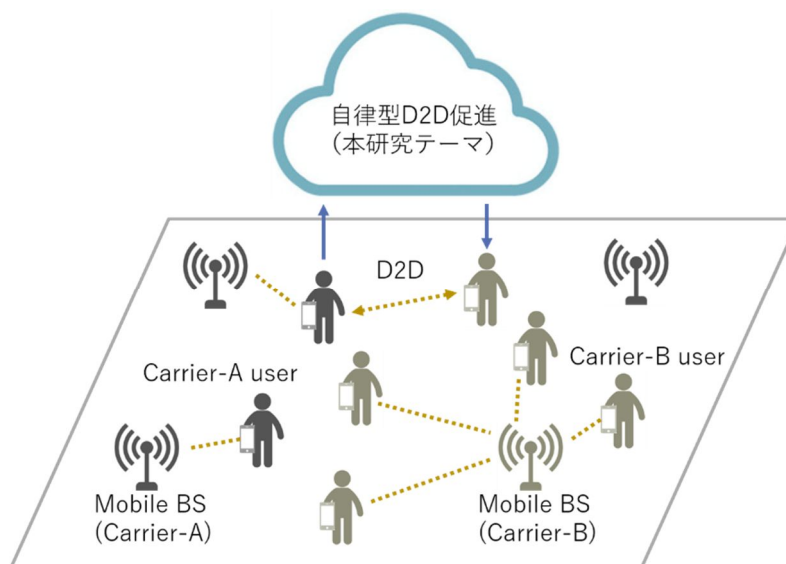
1. 研究開始当初の背景

IoT の普及や AI 技術の進歩を背景に、モバイルトラヒックは世界的な規模で爆発的な増大を続けている。商用サービスが開始された 5G ネットワークや次世代の 6G ネットワークでは、基地局からの電波到達距離が短いスモールセルが一般的となっているが、モバイルトラヒックは時空間的な変動が大きいいため、カバーエリアの小さいスモールセルを用いて効率的に広範囲のトラヒックを収容するのは難しいという課題があった。

このような背景のもと、本研究では、スマートデバイス間での効率的な通信が期待される Device-to-Device (D2D) に着目する。中でも、オペレータの管理負荷が低いという利点があるものの、モバイルユーザが自発的に参加できる仕組みについては検討が不十分であった自律型 D2D について検証を行った。

2. 研究の目的

本研究の目的は、モバイルユーザの自発的な参加による D2D 通信を促すメカニズムを考案し、その有効性を示すことである。すなわち右図に示す通り、外部からモバイルユーザの D2D 通信への参加や相互の協力を促す何らかの仕組み（モバイルネットワークオペレータ (MNO) による通信制御とは異なるもの）を導入することで、自律的かつ、時空間的に適切な D2D 通信を実現することを目指す。



本研究テーマのコンセプト

3. 研究の方法

自律的かつ時空間的に適切な D2D 通信を実現するためには、モバイルユーザの D2D への参加や相互協力を促す何らかの仕組みを導入することが課題である。この課題に対してオークションを用いた市場原理により、ユーザ参加を促す手法があるほか、ゲーミフィケーションの概念を導入したゲーム参加型 D2D が考えられる。

本研究では、このゲーミフィケーションの要素を取り入れることでモバイルユーザの D2D への自由な参加を促し、モバイルネットワークを動的に構成する仕組みについて研究を行った。従来の単純な参加型 D2D 通信では、ホストユーザが密集して配置されるため、ネットワークのカパシティが低下するという課題があった。そのため、他のホストとの接近度に応じて高くなるペナルティ項を設定し、これを得点から減算することでホストの密集を回避するという新しいモデルを導入した。その有効性については、マルチエージェントシミュレータを用いて、従来手法、提案手法、ランダム動作の比較および実装・評価を行った。

また、基地局を介さずにモバイルユーザ同士が通信を行う自律型 D2D 通信では、各ユーザが自由に移動することが想定される。移動する車両や人々のような高度に変動する環境下では通信環境が大きく変化するため、通信品質の低下が懸念される。特に通信インフラの需要は急速に増加しており、従来のモバイルネットワークでは限界に達しつつある。本研究では、こうした問題に対して、車載型クラウドソース無線装置 (CRUs) を活用した集中型無線アクセスネットワーク (C-RAN) アーキテクチャを利用し、その有効性についてデータ分析やシミュレーションで検証を行った。さらに、高度に変動する環境下での通信の信頼性を評価する手法として、AoI (Age of Information) と RoI (Reliability of Information) の概念を導入し、部分的なリンク統計情報のみを利用した場合の有効性について検討した。具体的には、リンク状態の AoI の解析を通じて、通信リンクの情報が受信側に到達するまでの経過時間を評価し、その情報の信頼性を RoI という指標で測定し、シミュレーションによる検証も行った。

4. 研究成果

(1) ホストの空間的密集とカバレッジ低下の解消

ゲーム参加型 D2D は、ホストとなるユーザがクライアントとなるユーザやデバイスに接続を提供することで得点を得る仕組みであるが、従来の単純な得点モデルではホストが空間的に集まりやすく、カバレッジが低下するという問題があった。そこで、本研究では他のホストとの接近度に応じて高くなるペナルティ項を新たに設定し、これを得点から減算することでホストの密集を回避するというモデルを導入した。その有効性を確かめるため、マルチエージェントシミュレーションモジュール Mesa による検証を行ったところ、ペナルティ項によりホストの密集を回避することに成功した。さらに、ペナルティ項を導入した場合でも、パラメータを適切に設定することで、ナッシュ均衡が存在することを確認することができた。

このことから、ゲーミフィケーションは、ペナルティ項などの適切なゲーム設定を定義することによって、自律型 D2D 通信にとって効果的なアプローチであることが示唆される。

(2) 光カメラ通信を用いたマルチチャネル認証プロトコルの実装

これまで、管理者が存在しない自律型 D2D には、中間者攻撃やなりすましといったセキュリティ上の課題があった。そこで、D2D 接続時のセキュリティを担保するため、光カメラ通信を使用したマルチチャネル認証プロトコルを提案し、Android アプリを実装・評価した。これは、Diffie-Hellman 鍵交換を、光通信チャネルで実施する手法である。提案方式の利点は、物理的に光を観測できるデバイスとの通信のみを許可することでセキュリティを確保する、その限界到達性にある。伝送速度と距離の観点から理論的に性能を評価した上で、提案方式を Wi-Fi Direct と統合した Android アプリケーションとして、OCC Wi-Fi Direct プロトコルを実装し、デバイス間距離 18 メートルでの相互認証を実証した。

また、映像向けの光信号埋め込み方式の一つとして、Signage Cipher Modulation (SCM) を提案した。SCM の目的は、ディスプレイやデジタルサイネージなどで放映される映像コンテンツを伝送媒体として、OCC 向けのデータを伝送することである。つまり、広告や動画などの映像コンテンツに対してデータ通信を統合し、見るだけではない映像体験を目指すための技術である。提案手法について、液晶ディスプレイおよびスマートフォンを用いた検証を行い、映像ごとに定義したシンボルセットを用いて実際に光信号の伝送が可能であることを確認している。なお、映像を放映するデバイスによっては発色の調整が行われるため、受信機となるスマートフォン側の信号処理と合わせて色成分のズレが生じるという点については、今後さらなる検証が必要である。

(3) CRUs を活用した通信インフラのコスト削減と通信品質の最適化の実現

本研究では、従来の基地局の代わりに、クラウドソーシングされた無線ユニット (CRUs) を用いた通信ネットワークの構築手法を新たに提案した。

具体的には、市民が所有する車両や建物に CRUs を設置することで、通信インフラのコストを下げるだけでなく、ネットワークのカバレッジや容量を向上させることに成功した。さらに、通信トラフィックの多いエリアに CRUs が自動的に集まるようにすることで、通信品質を最適化することが可能となる。このシステムの最大の利点の 1 つは、市民の参加を促進することにより、通信インフラの拡張や改善をより効率的に行える点である。つまり、市民が自分の所有する車両や建物に CRUs を設置することで、ネットワークの拡張や改善に貢献することができる。また、路側ユニット (RSUs) やエッジサーバーの活用により、通信トラフィックの情報をリアルタイムで収集でき、昼夜を問わず通信ネットワークを構築することが可能となる。これにより、スマートシティの通信インフラの構築や維持管理がより持続可能なものになることが期待される。

(4) 部分的なリンク統計を使用した通信の信頼性を評価する新しいアプローチの提案

通常、通信システムでは、通信リンクの状態を評価するために多くの統計情報が使用されるが、本研究では一部の情報だけを用いる手法を提案した。具体的には、通信リンクの一部のパラメータや特性に関する統計情報を取得し、その情報を元に通信の信頼性を評価する方法であり、従来の手法よりも効果的であることが示された。これにより、少ない情報量でも通信の安定性を評価できるため、通信システムの設計や運用において、膨大な情報を処理するコストを削減しつつ、効率的な通信の実現が期待できる。

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 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Yu Nakayama, Hideya So, Erina Takeshita, Kazuki Maruta	4. 巻 10
2. 論文標題 Gamified Participatory D2D Communication for Encouraging User Participation Toward Future Mobile Communication	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 81269--81280
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/ACCESS.2022.3195341	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 -
1. 著者名 Tianwen Li, Yukito Onodera, Daisuke Hisano, Yu Nakayama	4. 巻 1
2. 論文標題 Drone Trajectory Control for Line-of-Sight Optical Camera Communication	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE International Conference on Communications	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/ICC45855.2022.9838501	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yoshiaki Inoue, Kazuki Maruta, Yu Nakayama	4. 巻 71
2. 論文標題 Reliable Wireless Networking in Highly Dynamic Environments: Do Partial Link Statistics Suffice?	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Communications	6. 最初と最後の頁 6005-6017
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TCOMM.2023.3292470	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 -
1. 著者名 Hideya So, Kazuki Maruta, Yu Nakayama	4. 巻 11
2. 論文標題 Adaptive C-RAN Architecture using Crowdsourced Radio Units for Smart City	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 81124--81133
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/ACCESS.2023.3301143	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 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 小野寺幸仁, 渡辺博文, 中山悠
2. 発表標題 自律移動ロボット向けのイメージセンサによる統合的な自己位置推定および可視光通信
3. 学会等名 情報処理学会全国大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 李天文, 中山悠
2. 発表標題 Color Palette Coding : CMOSイメージセンサ通信のための選択的信号伝送法
3. 学会等名 電子情報通信学会技術研究報告
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 中山悠
2. 発表標題 持続可能なモバイル / IoTの社会実装に向けた取り組み
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中山悠
2. 発表標題 光カメラ通信技術とその応用
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tianwen Li, Yukito Onodera, Daisuke Hisano, Yu Nakayama
2. 発表標題 Multi-Channel Authentication for Secure D2D using Optical Camera Communication
3. 学会等名 IEEE CCNC (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Megumi Mizuto, Hideya So, Kazuki Maruta, Yu Nakayama
2. 発表標題 Penalized Approach for Wide Coverage in Gamified Participatory D2D Communication
3. 学会等名 IEEE IC0IN (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 水登恵, 宗秀哉, 丸田一輝, 中山悠
2. 発表標題 マルチエージェントによるゲーム参加型D2Dのカバレッジ評価
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 宗秀哉, 中山悠, 丸田一輝
2. 発表標題 ゲーム参加型D2D通信システムにおける無線システムレベルシミュレーション
3. 学会等名 電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2021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
---------	---------