

令和 6 年 5 月 31 日現在

機関番号：34310

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2023

課題番号：19K14981

研究課題名（和文）ユーザの分布が時空間上で非均質な無線ネットワークにおけるリアルタイム制御法の研究

研究課題名（英文）Study on real-time control of wireless networks with spatiotemporal non-homogeneous distribution of users

研究代表者

木村 達明 (Tatsuaki, Kimura)

同志社大学・理工学部・准教授

研究者番号：00834673

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、ユーザの分布が時空間上で非均質な無線ネットワークに対し、通信品質をリアルタイムで最適化する手法の確立を目指した。まず、一般の無線ネットワークを対象とし、空間確率過程による解析技法である確率幾何を用いて、通信品質の時空間相関に対する簡潔な公式を導出した。さらに、特に車両通信ネットワークを対象とし、空間上に非均質にユーザが分布する無線ネットワークにおける通信性能の解析を行い、交差点や道路網などを考慮し、その通信品質の表現式を導出した。また、ユーザの時空間上のダイナミクスに追従して通信品質を最適化するネットワークの構築を目的として空中基地局を考え、その自律分散型配置法を確立した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題では、近年多く研究されている、空間確率過程に基づく無線通信ネットワークの性能解析において、解析の単純化のために無視されることが多い、電波伝搬環境に内在する空間的な相関を考慮し、現実的な通信品質の時空間的特性を明らかにした。さらに、理論解析により得られた通信性能特性を分散協調制御と組み合わせ、現在検討の進む空中基地局の自律分散型最適配置法を開発した。本手法は、既存研究と異なり理論的に収束性が保証された自律分散型の制御法であるために実用性が高く、オンデマンドな通信環境を提供する次世代ネットワークの実現に向けた社会的な意義が大きい。

研究成果の概要（英文）：This research aimed to establish a real-time control method for optimizing the communication quality in wireless networks with spatiotemporal non-homogeneous distribution of users. First, considering general wireless networks, we derived simple formulas for the spatio-temporal correlation of communication quality using stochastic geometry, which is an analysis technique based on spatial point processes. We also considered the communication performance of wireless networks with the non-homogeneous distribution of users in space, especially for vehicular communication networks, and theoretically analyzed the communication quality of such networks by considering intersections and road networks. In addition, we have developed an autonomous distributed deployment method for airborne base stations to optimize the communication quality in response to the spatio-temporal dynamics of users.

研究分野：情報ネットワーク

キーワード：無線ネットワーク 確率幾何 性能解析 自律分散制御 車々間通信 UAV空中基地局

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

将来の無線ネットワークである 5G, beyond 5G では, スマートフォンに限らず IoT (Internet-of-Things) 機器や車両など多様な情報通信機器が接続し, 各標準化団体やキャリアでは, 1000 億の規模のユーザの同時接続と現在の 100 倍の通信速度を目標としている. これを支えるための要素技術として, ミリ波通信の利用, 非直交多元接続 (Non-Orthogonal Multiple Access: NOMA), 大規模 MIMO (Multiple-Input-Multiple-Output), 基地局間協調, および多種類の基地局を混在させるヘテロジニアスネットワークといった様々な技術が提案され, それらの研究開発が進められている. 一方, 膨大な数のユーザに対し目標の通信品質を達成するために, これらの多様な技術をどう制御すればよいかは非常に大きな課題であり, 「インテリジェントな」無線通信ネットワークの制御が求められる.

このような背景に対し, 空間確率過程を用いた無線ネットワークの通信性能の理論解析と, それに基づく制御に関する研究が近年盛んに行われているが, 将来の無線ネットワークの制御に対しては十分とは言えない. 具体的には, 空間確率過程による多くの理論解析が, 数学的な扱いやすさのために, ユーザの分布が空間的・時間的に変化しない均質な状況を仮定している. 例えば, コンサート等のイベントでは, ユーザの密度が空間的に偏る「ホットスポット」現象が見られる. 他にも駅やオフィスの集中するビル街のように, 現実のユーザの分布は空間的に非均質である. これに対して, ホットスポットの周辺に高密度にセルを展開し, 送信電力制御などにより干渉電力を低減することで, ホットスポット内のユーザの通信品質の大幅な改善が期待できる. しかし, ユーザのモビリティの影響により, その位置や密度は時々刻々と変化するため, 実際のユーザの分布は時間的にも非均質である. よって, ホットスポットの動きに追従するようにネットワークを制御しなければ, 結果的に干渉が増大し, 通信品質の大幅な劣化につながる. しかし, どのようにネットワークを制御すれば, ユーザの時空間上のダイナミクスに追従して通信品質を向上できるか, については明らかになっていない.

2. 研究の目的

本研究は, ユーザの分布が時空間上で非均質な無線ネットワークに対し, 通信品質をリアルタイムで最適化する手法の確立を目的とする. 具体的には, ユーザの分布が時空間上で非均質な無線ネットワークに対し, 空間確率過程を用いたモデリング手法である「確率幾何」アプローチにより通信品質を理論的に解析し, 解析結果に基づいた「基地局間の分散協調制御」により, 適応的なネットワーク最適化技術を開発する. 確率幾何は, 空間的な確率過程を用いて基地局やユーザの位置をモデル化し, パケットの受信成功率などの通信品質の評価を理論的に行う, 近年注目されるアプローチである. 確率幾何では, シミュレーションや実機実験に頼ることなく, 少量のシステムパラメータを用いて無線ネットワークの性質を理論的に記述できる. このため, 大まかなユーザや基地局, 無線環境に関する情報を用いて現在の通信品質を理論的に見積もることができる. 一方, 「分散協調制御」は, 制御工学の分野において近年注目されるフレームワークであり, 大域的な最適化目標に対して, エージェントと呼ばれる制御対象がそれぞれ, 局所的な情報をもとに近傍のエージェントと協調しながら, 逐次的に分散最適化を行う. 分散協調制御により, 各基地局は, 例えば近傍のユーザ分布や基地局の送信電力といった部分的な無線ネットワークの観測情報を用いて逐次的に制御を行うため, 計算コストの観点から効率的な制御が可能となる. 本研究では, これらのアプローチを組み合わせることで, ユーザの現在の空間上の非均質な分布情報を入力として通信品質を理論的に解析し, 各基地局は送信電力/帯域割り当てといったネットワーク制御を逐次的に実行し, ユーザの時空間上の変動にリアルタイムに追従する通信品質の最適化を, 理論に基づく形で実現できる技術の確立を目指す.

3. 研究の方法

本研究は, 以下に示す方法により研究目的の達成を目指す.

(1) 無線伝搬環境と通信品質の時空間相関解析

ユーザの時空間上の変動を考えるため, まず無線伝搬環境そのものとユーザの通信品質との時空間的な関係を理論的に明らかにする. 具体的には, 空間相関をもつシャドウイングとユーザのモビリティを考慮し, 通信品質の時間発展や相関を確率幾何アプローチにより理論的に解析し, これらを表現する簡潔な表現式の導出を目指す.

(2) 確率幾何アプローチに基づく不均質なユーザ分布をもつ無線ネットワークの性能解析

空間上に非均質にユーザが分布する無線ネットワークを考え, その通信性能を理論的に解析する. 具体的には, 5G における車両通信ネットワークなどを応用として想定し, 道路網などの空間的な位置制約をモデルに組み込み, その性能解析を行う.

(3) ユーザの時空間上のダイナミクスに追従する分散協調制御

時空間上に非均質に分布するユーザの通信性能を目的関数とし, 分散協調制御により最適化する手法を開発する. 具体的には, 上で得られたネットワーク全体の通信性能を大域的な目的関数

として設定し、分散協調制御フレームワークを適用する。その上で、基地局の送信電力、帯域割当などを逐次的に更新し、ユーザのダイナミクスへも追従可能な最適制御法を確立する。

4. 研究成果

(1) 無線チャネル状態の空間相関を考慮したユーザ通信品質の時空間相関解析
無線チャネルにおける遮蔽物等の影響で生じるシャドウイングは、一般に、数十から数百メートルのスケールで空間相関をもつことが知られている。そこで本研究では、ユーザの時空間上のダイナミクスを考えるために、空間相関のあるシャドウイングが、ユーザの通信品質に時空間的に与える影響を解析的に評価した。具体的には、モバイルアドホックネットワークにおいて Gudmundson [1] により提案されたシャドウイングの空間相関モデルを仮定し、干渉電力の時空間的な相関を確率幾何アプローチにより解析した。解析結果は多重積分で表される複雑な表現であるため、Watson の補題 [2] を用いたアプローチにより、シャドウイングの分散が十分大きい場合に成立する陽な近似公式を導出した。最初にユーザの分布がポアソン点過程に従う場合の解析を行い、さらに、ユーザ配置に空間的な相関のある、クラスター点過程に従う場合および行列式点過程に従う場合の解析も行った。それぞれの成果は難関論文誌である IEEE Transactions on Mobile Computing で発表を行った。

(2) 確率幾何アプローチに基づく車両通信ネットワークの性能解析と制御
一般の車両通信ネットワークは、道路網の配置等により空間的に非均質となる。本研究ではまず、交差点における、走行車両と停止車両の位置を同時にモデル化し、そのブロードキャスト通信の通信性能を確率幾何アプローチにより解析し、得られた解析結果をもとにブロードキャストレートを最適化する手法を提案した。本成果は、国際会議 ITC および論文誌 IEEE Transactions on Mobile Computing で発表を行った。
また、近年注目されているセルラ通信を用いた車々間通信である C-V2V (Cellular-Vehicle-to-Vehicle) 通信ネットワークに注目し、車両間の直接通信と、地上基地局が中継するセルラリレー通信の性能の理論的な解析を行った。現実的な車両の配置を考慮するため、ランダムに配置された道路網上に車両が存在するポアソン・コックス線過程による車両配置モデルと、ポアソン点過程に従って配置された基地局を同時に考え、直接通信とリレー通信の通信性能をそれぞれ理論的に導出した。さらに、これらの性能を比較する新たな指標を考え、その表現式も理論的に導出した。本成果は、国際会議 IEEE GLOBECOM および論文誌 IEEE Transactions on Vehicular Technology で発表を行った。

(3) 時空間上のユーザのダイナミクスに追従する空中基地局の自律分散型最適配置法
時空間上で非均質に配置されたユーザのトラヒック需要に対応するため、近年注目される UAV (Unmanned Aerial Vehicle) に基地局を搭載した空中基地局を考え、その自律分散型の最適配置法を確立した。ユーザは空間上に非均質なポアソン点過程に従って分布しているとし、その強度(密度)関数は地上に配置されたセンサにより推定可能であるとする。マルチエージェント制御理論の一問題である、被覆制御アプローチ[3]と、分散最適化手法の一つである分散プッシュサム[4]を適用することで、空間内のユーザの通信品質を最大化する、理論的な収束保証付きの逐次的な自律分散型制御法を開発した。本成果は、通信分野の最難関国際会議である IEEE INFOCOM および論文誌 IEEE Transactions on Wireless Communications で発表した。また、提案手法の拡張として、空中基地局が地上基地局から無線エネルギーハーベスティングにより給電を行う状況を考え、その自律分散型最適配置法も考案した。

<引用文献>

M. Gudmundson, "Correlation model for shadow fading in mobile radio systems," *IEEE Elec. Lett.*, pp. 2145-2146, 1991.

P. D. Miller, *Applied Asymptotic Analysis*. RI: American Mathematical Society, Providence, 2006.

J. Cortés, S. Martínez, and F. Bullo, "Spatially-distributed coverage optimization and control with limited-range interactions," *ESAIM Contr. Optim. Ca.*, vol. 11, no. 4, pp. 691-719, Oct. 2005.

D. Kempe, A. Dobra, and J. Gehrke, "Gossip-based computation of aggregate information," In *Proc. IEEE FOCS*, Oct. 2003, pp. 482-491.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 9件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kimura Tatsuaki, Saito Hiroshi	4. 巻 21
2. 論文標題 Theoretical Broadcast Rate Optimization for V2V Communications at Intersection	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Mobile Computing	6. 最初と最後の頁 3360 ~ 3372
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TMC.2021.3051956	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 Kimura Tatsuaki	4. 巻 22
2. 論文標題 Interference Analysis in Non-Poisson Networks Under Spatially Correlated Shadowing	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Mobile Computing	6. 最初と最後の頁 2205 ~ 2220
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TMC.2021.3116314	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 Kimura Tatsuaki	4. 巻 70
2. 論文標題 Performance Analysis of Cellular-Relay Vehicle-to-Vehicle Communications	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Vehicular Technology	6. 最初と最後の頁 3396 ~ 3411
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TVT.2021.3063694	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 Kimura Tatsuaki, Ogura Masaki	4. 巻 20
2. 論文標題 Distributed 3D Deployment of Aerial Base Stations for On-Demand Communication	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Wireless Communications	6. 最初と最後の頁 7728 ~ 7742
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/twc.2021.3086815	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 木村達明	4. 巻 105
2. 論文標題 ネットワーク数理の新潮流 確率幾何アプローチによる無線通信ネットワークの性能解析	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 電子情報通信学会誌	6. 最初と最後の頁 22 ~ 26
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	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 Kimura Tatsuaki	4. 巻 未定
2. 論文標題 Performance Analysis of Cellular-Relay Vehicle-to-Vehicle Communications	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Vehicular Technology	6. 最初と最後の頁 1 ~ 1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TVT.2021.3063694	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 Kimura Tatsuaki, Saito Hiroshi	4. 巻 未定
2. 論文標題 Theoretical Broadcast Rate Optimization for V2V Communications at Intersection	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Mobile Computing	6. 最初と最後の頁 1 ~ 1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TMC.2021.3051956	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 八木 聖太、小蔵 正輝、岸田 昌子、木村 達明、林 和則	4. 巻 J103-B
2. 論文標題 Geometric programによる送信電力制御アルゴリズムのロバスト安定化	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 電子情報通信学会論文誌B 通信	6. 最初と最後の頁 644 ~ 651
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.14923/transcomj.2020JBP3023	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 Kimura Tatsuaki, Saito Hiroshi	4. 巻 20
2. 論文標題 Spatio-Temporal Correlation of Interference in MANET Under Spatially Correlated Shadowing Environment	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Mobile Computing	6. 最初と最後の頁 1642 ~ 1655
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TMC.2019.2959990	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 -

〔学会発表〕 計14件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 3件)

1. 発表者名 藤枝航生, 木村達明, 滝根哲哉
2. 発表標題 高度の異なるUAVから構成される空中基地局ネットワークにおけるハンドオーバーの確率幾何による解析
3. 学会等名 電子情報通信学会NS研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 烏谷涼雅, 木村達明, 滝根哲哉
2. 発表標題 シャドウイングの空間相関を考慮した路車間通信における干渉電力の時間相関解析
3. 学会等名 電子情報通信学会NS研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 喜田隼哉, 木村達明, 滝根哲哉
2. 発表標題 無線エネルギーハーベスティングを行う空中基地局ネットワークにおける分散プッシュサムに基づく最適配置法
3. 学会等名 電子情報通信学会NS研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 木村達明
2. 発表標題 UAV空中基地局の自律分散型最適配置法
3. 学会等名 電子情報通信学会RCS研究会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 木村達明
2. 発表標題 UAV空中基地局の自律分散型制御の研究
3. 学会等名 電子情報通信学会IA研究会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 喜田隼哉，木村達明，滝根哲哉
2. 発表標題 無線エナジーハーベスティングを行うUAV空中基地局の自律分散型最適配置法
3. 学会等名 電子情報通信学会NS研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐々木公威,木村達明，滝根哲哉
2. 発表標題 UAVを用いたデータ収集ネットワークの性能解析
3. 学会等名 電子情報通信学会NS研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 畑中耕太郎, 木村達明, 滝根哲哉
2. 発表標題 非負値テンソル分解によるDNSクエリログからのユーザ通信行動抽出
3. 学会等名 電子情報通信学会NS研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 木村 達明, 小蔵 正輝
2. 発表標題 ユーザQoS最大化のためのUAV空中基地局の自律分散配置法
3. 学会等名 電子情報通信学会NS研究会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tatsuaki Kimura and Hiroshi Saito
2. 発表標題 Theoretical Performance Analysis of Vehicular Broadcast Communications at Intersection and Their Optimization
3. 学会等名 2019 31st International Teletraffic Congress (ITC31) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tatsuaki Kimura
2. 発表標題 Stochastic Geometric Analysis of Cellular-Relay V2V Communications
3. 学会等名 2019 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Tatsuaki Kimura and Masaki Ogura
2. 発表標題 Distributed Deployment of Unmanned Aerial Vehicle Base Stations for Maximizing Ground User QoS
3. 学会等名 2020年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tatsuaki Kimura and Masaki Ogura
2. 発表標題 Distributed Collaborative 3D-Deployment of UAV Base Stations for On-Demand Coverage
3. 学会等名 IEEE International Conference on Computer Communications 2020 (INFOCOM) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 杉本航希, 木村達明, 滝根哲哉
2. 発表標題 衝突回避を目的とした車々間通信の性能解析とブロードキャスト・レート最適化法の提案
3. 学会等名 電子情報通信学会NS研究会
4. 発表年 2020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
---------	---------