

学 位 論 文 題 名

ランダム区間グラフに基づくアドホックネットワークの
連結性に関する解析

学位論文内容の要旨

近年、ノート PC や PDA、携帯電話などのモバイル端末が急速に普及し、固定通信においては高速常時接続のブロードバンドネットワークが広く導入されている。また、あらゆる物に通信機能を持つチップが組み込まれ、相互に通信したり、既存のネットワークと接続することが可能なシステムが実現しつつある。しかしこのように急速に高度化が進む通信技術においても、空間的・地理的制約、通信対象の制約など、その能力や仕様から生じる様々な制約が残っている。これらの制約を解消するためには、従来のネットワークとは異なる新たな形態のネットワークが必要となっている。

そのような新たな形態のネットワークとして、交換機や基地局等のインフラストラクチャに依存せず、交換機能を持つ端末のみで構成される自律分散型ネットワークであるアドホックネットワークが注目されている。アドホックネットワークにおける技術的課題は多く存在し、特にネットワーク上でマルチホップ通信によって 2 端末間をつなぐ経路の存在確率、すなわち連結性を解析する必要がある。一般に端末は 2 次元空間に配置されると考えられる。都市内では、端末が密に存在するので、任意の 2 端末間の経路の存在確率は 1 とみなすことができる。これに対し都市間では、端末の存在は疎であるが、多くの場合 1 次元空間とみなすことができる。このような観点から、1 次元アドホックネットワークの連結性の解析は重要な課題となっている。

1 次元アドホックネットワークモデルとしては、2 次元のランダムグラフモデルの 1 つである固定半径モデル（単位円板グラフ、ランダム幾何グラフともいう）を 1 次元に縮退したモデルであるランダム区間グラフ（Random Interval Graph: RIG）が知られている。RIG は何らかの確率分布に従って 1 次元ユークリッド空間上にランダムに配置された n 個の頂点と、互いの距離が R 以内である 2 頂点間に生成される辺によって構成されるグラフであり、全ての移動端末が距離 R 以内にある他の端末と通信できる 1 次元アドホックネットワークの自然な数理モデルと考えられている。これに基づいた 1 次元の特定のモデル（本論文で扱うモデルの 1 つである自由端 RIG）については、統計学の分野での関連研究においてもすでに解析解が得られている。しかし、限定的なモデルであるため、アドホックネットワークの連結性の解析には応用されず、それをさらに複雑化したネットワークについては、まだ解が求められていなかった。

本論文では、このような問題を解決するために従来の「自由端 RIG」とは異なる「固定端 RIG」というモデルを提案し、その連結性について確率論に基づいた厳密な解析解を数理的に求めている。このモデルをビルディングブロックとすることによって、自由端 RIG だけではなく、本論文で導入する種々の複雑なネットワークの解析解も求めている。

本論文は全 6 章で構成され、その内容は以下の通りである。

第1章の序論において、本研究の背景及び目的について述べている。第2章では、第3章以降の準備として、アドホックネットワークとそれに関連する技術、ランダムグラフ、順序統計量について概説している。また、本論文の関連研究についても概観し、本論文の特徴を明確にしている。

第3章においては、まず本論文で提案する「固定端 RIG」の定義を述べている。これは、1次元の有限空間内に一定数の頂点が一様分布する条件の下で、区間の両端に必ず頂点が存在するモデルである。このモデルは、次章で導入するすべての派生モデルの基本となるモデルであり、本論文において中心となるモデルである。次に固定端 RIG が連結グラフである確率が満たすべき再帰的な積分方程式を示し、その積分方程式の特徴について詳細に述べている。また、積分方程式によって導き出される解の係数がすべて整数になることを示し、係数のみを求める漸化式を導出している。最後に、再帰的な積分方程式で表された解にラプラス変換を導入することにより、その閉じた解を求めている。

第4章では、固定端 RIG から派生する7つのモデルとして、自由端 RIG、リングモデル、固定端インフラモデル、中継端末チェーンモデル、中継インフラスターモデル、2 端末間通信モデル、部分区間通信モデルを導入している。「自由端 RIG」は、固定端 RIG の定義から区間の両端に頂点が存在するという条件を取り除いたモデルである。このモデルでは、固定端 RIG の結果を利用することによって、その連結確率を解析的に示し、ラプラス変換を導入することによって閉じた解を求めている。「リングモデル」は、区間の代わりにリング(円周)上にランダムに頂点を配置するモデルである。このモデルでは、固定端 RIG の結果を利用して、その連結確率を解析的に示し、ラプラス変換を導入することによって閉じた解を求めている。「固定端インフラモデル」、「中継端末チェーンモデル」、「中継インフラスターモデル」の3つのモデルは、実際のアドホックネットワークの利用形態を考慮し、固定された中継用の端末や、有線でつながれたインフラ設備を取り入れたモデルである。これらのモデルでは、固定端 RIG、自由端 RIG、リングモデルの結果を利用することによって、それらの連結確率の解析解を求めている。「2 端末間通信モデル」は、1次元アドホックネットワークにおいて、区間内の任意の2 端末間の連結性に着目したモデルである。このモデルでは、区間内の任意の2 端末間の連結確率を解析的に求めている。「部分区間通信モデル」は、1次元アドホックネットワークにおいて、ある部分区間に存在する端末間の連結性に着目したモデルである。このモデルでは、部分区間内の距離が最も離れた2 端末間の連結確率を解析的に求めている。なお最後の2つのモデルでは、区間または部分区間内の任意の2 端末間の連結性の解析解を求めている。

第5章では、本論文の成果を視覚的に検証し、普及させるために作成したソフトウェアについて述べている。モデルの種類、端末数、区間長などを入力すると、導出された式とそのグラフが出力される。このソフトウェアを利用することによって、本論文で求めた8つのモデルに基づいた連結性の検証をインタラクティブに行うことができる。

最後に第6章で、本研究の成果と今後の課題をまとめている。

学位論文審査の要旨

主査	助教授	野中秀俊
副査	教授	宮腰政明
副査	教授	工藤峰一
副査	教授	佐藤義治
副査	教授	栗原正仁

学位論文題名

ランダム区間グラフに基づくアドホックネットワークの 連結性に関する解析

近年ノート PC や PDA, 携帯電話などのモバイル端末が急速に普及し, 固定通信においては高速常時接続のブロードバンドネットワークが広く導入されている。また, あらゆる物に通信機能を持つシステムが組み込まれ, 相互に通信することが可能なシステムが実現しつつある。しかしこのように急速に高度化が進む通信技術においても, 空間的・地理的制約, 通信対象の制約など, その能力や仕様から生じる様々な制約が残っている。これらの制約を解消するためには, 従来のネットワークとは異なる新たな形態のネットワークが必要となっている。

そのような新たな形態のネットワークとして, 交換機や基地局等のインフラストラクチャに依存せず, 交換機能を持つ端末のみで構成される自律分散型ネットワークであるアドホックネットワークが注目されている。アドホックネットワークにおける技術的課題は多く存在し, 特にネットワーク上でマルチホップ通信によって 2 端末間をつなぐ経路の存在確率, すなわち連結性を解析する必要がある。一般に端末は 2 次元空間に配置されると考えられる。都市内では端末が密に存在するので, 任意の 2 端末間の経路の存在確率は 1 とみなすことができる。これに対し都市間では端末の存在は疎であるが, 多くの場合 1 次元空間とみなすことができる。このような観点から, 1 次元アドホックネットワークの連結性の解析は重要な課題であると考えられる。

1 次元アドホックネットワークモデルとしては, 何らかの確率分布に従って 1 次元ユークリッド空間上にランダムに配置された n 個の頂点と, 互いの距離が R 以内である 2 頂点間に生成される辺によって構成されるグラフであるランダム区間グラフ (Random Interval Graph: RIG) が知られている。これは全ての移動端末が距離 R 以内にある他の端末と通信できる 1 次元アドホックネットワークの自然な数理モデルであると考えられている。これに基づいた 1 次元の特定のモデル (本論文で扱うモデルである自由端 RIG 及び固定端 RIG) と等価なモデルについては, それぞれ統計学及び優生学 (eugenics) の分野において解析解が得られている。しかし, いずれも個別限定的なモデルであり, また導出過程が陽に示されていないため, 多様なアドホックネットワークの連結性の解析に直接適用することは困難であった。また複雑化したネットワークについては, まだ解が求められて

いなかった。

本論文では、このような問題を解決するために「固定端 RIG」というモデルを提案し、その連結性について確率論に基づいた厳密な解析解を数理的かつ構成的に導出している。このモデルをビルディングブロックとすることによって、本論文で導入する様々なモデルの解析解も求めている。

論文は全 6 章で構成されている。第 1 章は序論であり、本研究の背景及び目的について述べている。第 2 章では、第 3 章以降の準備として、アドホックネットワークとそれに関連する技術、ランダムグラフ、順序統計量について概説している。また、本論文の関連研究についても概観し、本論文の特徴を明確にしている。

第 3 章では、本論文で提案する「固定端 RIG」を定義している。固定端 RIG が連結グラフである確率が満たすべき再帰的な積分方程式を示し、その積分方程式の特徴について詳細に述べている。また、積分方程式によって導き出される解の係数がすべて整数になることを証明し、係数を求める漸化式を導出している。最後に、再帰的な積分方程式で表された解にラプラス変換を導入することにより、その閉じた解を求めている。

第 4 章では、固定端 RIG から派生する 7 個のモデルとして、自由端 RIG、リングモデル、固定端インフラモデル、中継端末チェーンモデル、中継インフラスターモデル、2 端末間通信モデル、部分区間通信モデルを導入している。各モデルについて、固定端 RIG の結果を用いることによって連結グラフである確率を解析的に求めている。

第 5 章では、以上の成果を視覚的に検証し、普及させることを目的として作成したソフトウェアについて述べている。このソフトウェアを利用することによって、本論文で求めた 8 個のモデルに基づいた連結性の検証をインタラクティブに行うことができることが確認された。

これらの研究成果の評価すべき点はつぎのようにまとめられる。

1. アドホックネットワークにおける現実的問題に即した 8 つの連結性解析モデルを提示し、その厳密解を解析的に導出している点に新規性が認められる。
2. その解析手法は工業数学的手法を用いた機械的な数式計算に基いており、それによって、研究分野と証明方法の異なる既存の結果を含むすべての結果を統一的に導出している点に科学的な有用性が認められ、また、それらの解析解の視覚的な検証を可能とするシステムを開発した点について、産業的な有用性が認められる。

これを要するに、著者は、アドホックネットワークの連結性の解析について新知見を得たものであり、数理情報科学とその応用に対して貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士 (情報科学) の学位を授与される資格あるものと認める。