

# 論文内容の要旨

論文題目      Time Slot Assignment for Maximum Bandwidth  
in Slotted Wireless Ad Hoc Networks  
(TDMA ベース無線アドホックネットワークにおける  
最大帯域タイムスロット割り当て)

氏名: 李 建平

無線アドホックネットワークは、固定電話網、携帯電話網、インターネットなど既存の特定のネットワークインフラに依存することなく、中継機能を搭載した端末だけから構成された一時的なネットワークを意味している。このような無線アドホックネットワークは、ユビキタス社会を実現する次世代移動通信に最も望ましい端末ネットワークの一つと考えられている。さらに、TDMA (Time Division Multiple Access) に基づく無線アドホックネットワークは、衝突のないデータ転送によって、マルチメディア応用向けの QoS (Quality of Service: 品質) の保証が比較的容易に実現できるため、注目されている。

QoS の指標は、帯域、遅延、スループットなど様々である。マルチメディア応用に最も重要で基本的な指標は帯域保証である。無線アドホックネットワークには、無線チャネルや端末能力等、必要な資源が一般にかなり限られているうえ、ルートのマルチホップ性、リンク間の干渉、基地局への非依存性など、他に見られない数々の特徴があり、他のネットワークの帯域保証方法をそのまま応用することができない。また、無線アドホックネットワークの帯域保証に関する研究は少なく、研究が完全に空白なテーマもある。しかも少ない既存研究には大きな欠陥があり、実用性が低いという問題もある。

そこで、将来における重要さと有望さの観点から、マルチメディアへの応用を可能とするため、無線アドホックネットワークにおける帯域保証という極めてチャレンジングな未開拓技術の研究を、緊急の重要課題と判断して実施した。具体的には、以下の三つの課題の解決策の開拓に取り組んだ。

課題 1: 無線ルートの帯域の定量的な導出方法

課題 2: 帯域最大化のためのタイムスロットの割り当て法

### 課題3：帯域保証のためのルートの選定法

以上の三つの課題を解決するための研究の成果をとりまとめた本論文は全8章よりなる。

第1章は「序論」で、研究の背景と目的を述べている。

第2章は、課題1の「無線ルートの帯域の定量的な導出」についての研究結果である。無線アドホックネットワークにおいて中核となる、ルートの帯域の定量的な導出に関する既存の関連研究では、一つのルート内の干渉だけを考慮しており、ルート間の干渉を考慮していない。その結果、帯域の導出結果は実際的でなく実用性に欠ける。そこで、本研究では、全てのルート間の無線干渉を考慮した、ルートの帯域の定量的な導出方法を初めて明らかにしており、更にその正しさを帰納法で証明した。

第3章から第6章までは、課題2の「帯域最大化のためのタイムスロットの割り当てアルゴリズム」についての研究結果である。

TDMA方式では、時間をタイムスロットに分割して各ユーザに割り当て、各ユーザは割り当てられたタイムスロットだけを使ってパケットを転送できる。このため、タイムスロットの割り当てはTDMAベースの無線アドホックネットワークにおける帯域保証に必須の重要な技術である。割り当てられたタイムスロット時間中、ユーザは通信路の全帯域幅を使用できる。その結果、ネットワークのトラフィックが増大してもパケット衝突が発生しない転送を実現できるため、無線アドホックネットワークのQoS保証に極めて有効であり、TDMAベースの無線アドホックネットワークは多くの注目を浴びている。

本研究では、TDMAベースの無線アドホックネットワークにおいて、各ノードは一つのトランシーバを持つこととしている。トランシーバは一つの無指向性のアンテナを持っており、送受信は同時にはできない。本研究でのタイムスロット割り当ての目的は、できるだけ多くのタイムスロットをルート内の各リンクに割り当て、ルートの帯域を最大化することにある。

第3章では、タイムスロット割り当てをMIP (Mixed Integer Programming)問題として定式化した。その結果、理想的なタイムスロット割り当ては、例えばGLPK (GNU Linear Programming Kit)のような線形ツールを使って求めることが可能になった。

この方法は最大帯域を得ることが可能であるが、無線アドホックネットワークの規模が大きくなって、ルートが長くなったり、タイムスロット数が多くなったりすると、タイムスロットの割り当て時間が急激に増大するという問題がある。そのため、一般に資源がかなり限られる無線アドホックネットワークにおいては、この方法を実際に採用することは不可能になってしまう。

従って、現実的にはタイムスロット割り当ての近似法を採用しなければならない。これまでの研究によって得られている近似法では、ソースノードから宛先ノードまでその順番でタイムスロットを順次割り当てる。つまり、一つのノードでタイムスロットを割り当てるとき、以降のノードでの割当を考慮しない。このため、この方法で得られた帯域は狭く、本来は割当が可能な空き

タイムスロットを割り当てられないことが多々あり、結果的にタイムスロットの利用効率が低くなってしまふ。既存のタイムスロット割当法に関するこのような調査と分析をすることによって、タイムスロット割り当て問題を高速で解く新しい近似解法アルゴリズムの考案して詳細に設計し、その結果を SAGO (Slot Assignment by Global Overview) と命名し、第 4 章で具体的に論じた。

SAGO は、ソースノードと宛先ノード、及びそれらを結ぶ一つのルートが与えられた場合、そのルートの最大の帯域を求める方法である。具体的には、SAGO は reactive 型のルーティングプロトコルを前提にしており、ソースノードから宛先ノードに対して、RREQ (Route REQuest Packet) を送出し、各ノードが持っている全タイムスロットの使用状況、すなわち、各タイムスロットが使えるか否かという情報を RREQ に順次付け加えていき、宛先ノードでこれらをすべて収集しタイムスロットの割り当てを決める。

SAGO には次の特徴がある：

- タイムスロット割り当てをソースノードから宛先ノードまで順次行うという既存研究と異なり、空きタイムスロットが最も少ないボトルネックリンクから両端のノードまでそれぞれ割り当てる；
- ルート帯域を予め推定し、この推定値を使って、割り当てを試み始める；
- 割り当てできなくなった場合は、推定値を 1 だけ減らして、割り当ての試みを繰り返す；
- 割り当てるとき、各スロットと近隣リンクの関連度によって、リンク内の割当タイムスロットを選ぶ。

また、第 4 章で、SAGO の有効性・割り当ての速さをシミュレーションによって実証した。

更に、第 5 章では、SAGO を CDMA (Code Division Multiple Access)/TDMA ベースの無線アドホックネットワークに拡張した。CDMA/TDMA ベースの無線アドホックネットワークは TDMA と同様に QoS 保証が容易である。CDMA/TDMA ベースの無線アドホックネットワークと TDMA ベースの無線アドホックネットワークは共通点もあるが、違いも存在する。例えば、TDMA モデルでは、データ転送時に二つの衝突の可能性がある。一つは各ノードが同じタイムスロットで同時に送受信できないために発生する。もう一つの衝突は各ノードが一つのタイムスロットで同時に二つのノードからのパケットを受けられないために発生する。一方、CDMA モデルでは、後者の衝突が起きないので、前者の衝突だけ存在する。つまり、タイムスロットの利用率を更に向上させることが可能である。

本研究では、CDMA/TDMA に基づくアドホックネットワークにおけるタイムスロットの割り当て方法を考案し設計して、SAP (Slot Assignment by Priority) と命名したアルゴリズムを提示して論じ、シミュレーションによって第 4 章と同様な実証を行った。

以上の研究はリンクの方向性をまったく考慮していない。しかし、リンクの方向性を考慮すれば、タイムスロットの使用率を更に大きくすることが可能になる。そのため、第 6 章では、TDMA アドホックネットワークにおいて、リンクの方向性を考慮したタイムスロットの割り当て問題を定式化した。次に、その問題を高速で解く近似解法アルゴリズムを考案した。また、考案した近似解法アルゴリズムの近似度・計算量に関して、定量的に評価した。更に、リンクの方向性を考慮しない近似アルゴリズムと比較して、タイムスロット使用率の向上度に関してシミュレーシ

ンで評価した。

第7章は課題3の「帯域保証のルートの選定法」についての研究成果である。即ち、第6章までの研究の前提として必要となる、最も重要なルート選定法について検討し、新しい選定法を提案した。そして、シミュレーションによって、このルート選定法を、TDMAベースの無線アドホックネットワークにおいて評価し、その有効性を定量的に実証した。

第8章は本論文の結論であり、第7章までの研究成果をとりまとめた結果を論じた。

本研究の成果は、無線アドホックネットワークにおけるアクセス制御や負荷のバランス化などにも応用できると考えられる。つまり、本研究成果の適用領域の拡大を図ることによって、エンドツーエンドのQoS保証と将来のユビキタスネットワーク技術の発展に大きく貢献できるものと期待される。

将来の課題として、遅延やスループットなどの他のQoS指標の保証と制御に取り組むことが挙げられる。