

マルチホップ経路の存否に基づく TDMA スロット割り当て手法

東京電機大学 理工学部 情報システム工学科

津村 周典 梶垣 博章

E-mail: {tsumura, hig}@higlab.net

アドホックネットワーク、センサネットワーク、無線マルチホップアクセスネットワークといった無線機能を備えた移動コンピュータのマルチホップメッセージ配送を利用するモバイルワイヤレスネットワークにおいて、大量のセンサデータやマルチメディアデータの配送といった高いスループットを必要とするアプリケーションの研究開発が進められている。高いスループットの無線マルチホップ配送を実現する手法として、本論文では、通信経路内および通信経路間の競合、衝突の発生しない各無線通信リンクへの TDMA スロット割り当て手法を提案する。ここでは、無線マルチホップ配送経路に含まれる無線通信リンクによるデータメッセージ配送に用いるスロットのみを割り当てるリアクティブ型(オンデマンド型)の手法による割り当て成功率の向上を目的とする。このための TDMA スロット割り当ての制約条件を明らかにし、割り当てプロトコルを設計する。

TDMA Slot Assignment Protocol for Active Multihop Transmission Route in Mobile Ad-hoc Networks

Shusuke Tsumura and Hiroaki Higaki

Department of Computers and Systems Engineering

Tokyo Denki University

E-mail: {tsumura, hig}@higlab.net

In mobile wireless networks such as ad-hoc networks, sensor networks and mesh networks, wireless multihop transmission is adopted for data message transmission. For achieving higher throughput and shorter transmission delay, TDMA is one of more effective methods which avoid collisions and contentions than CSMA/CA and RTS/CTS. This paper proposes a reactive TDMA time slot assignment method in which time slot assignment gets active only when wireless multihop transmission is initiated. Here, a slot is assigned not to a mobile computer but to a wireless communication link included in an active wireless multihop transmission route for achieving higher connectivity due to less assigned TDMA time slots. This paper discusses restrictions of TDMA slot assignment and designs slot assignment and release protocols.

1 はじめに

無線通信デバイスを備えた複数の移動コンピュータから構成されるアドホックネットワークの研究開発が活発に行なわれている。アドホックネットワークは、無線基地局やこれに接続する有線固定ネットワークを必要としないことから、災害救済、ITS、展示会、会議等のためのネットワーク構築や、インフラ構築が物理的制約や経済的制約で困難な場合のネットワーク構築などの応用が検討されている。ここでは、移動コンピュータ間の通信は無線信号の交換によって実現されるが、無線通信はブロードキャストを基礎とすることから、互いに隣接する移動コンピュータは通信メディアを共有することになる。競合や衝突の発生回避はデータメッセージ配送遅延の縮小、紛失率の低減、スループットの拡大のための重要な課題である。TDMA (Time Division Multiple Access) 方式を用いることで、無線通信メディアを共有する隣接移動コンピュータの送信する無線信号の衝突を回避することが可能である。TDMA 方式における移動コンピュータへのスロット割り当てでは、隣接移動コンピュータにおける無線信号の衝突を回避する、特に隠れ端末との無線信号の衝突を回避するために、隣接移動コ

ンピュータに加えて 2 ホップ近隣移動コンピュータにおけるスロット割り当て状況を考慮する必要がある。従来提案されている手法では、2 ホップ近隣移動コンピュータがデータメッセージ配送に関わっているか否かに関わらず移動コンピュータのトポロジのみによって割り当てることができないスロットを決定しているため、割り当てに対する制約条件が厳しい。特に、通信要求発生頻度に対して移動コンピュータ密度が相対的に高い環境では、スロット割り当ての成功率が低下するという問題がある。

本論文では、移動コンピュータのトポロジに加え、データメッセージ配送要求をも考慮に入れることによって、成功率の高い TDMA スロット割り当てを実現する手法を提案する。

2 TDMA による無線マルチホップ通信

一般に無線アドホックネットワークを構成する移動コンピュータは、外部からの給電機構を備えていない。また、複数の移動コンピュータが送信する無線信号の衝突機会を減少させることが、低遅延、高スループット域の通信を実現するために必要である。そこで、すべての

移動コンピュータ対がデータメッセージを含む無線信号を直接交換するのではなく、各移動コンピュータは限られた電力を用いてデータメッセージを含む無線信号を送信し、他の移動コンピュータがこれを中継する無線マルチホップ配送が用いられる。送信元移動コンピュータ $M_s (= M_0)$ から送信先移動コンピュータ $M_d (= M_n)$ への無線マルチホップ配送経路 $R = \{M_0 \dots M_n\}$ では、すべての移動コンピュータが送信する無線信号到達距離が L であるとき、 $|M_i M_{i+1}| \leq L$ が成り立っている。この無線マルチホップ配送経路は、移動コンピュータの経時的な位置変化や故障、回復、省電力機能による一時的な離脱、バッテリー消耗による離脱等のネットワークポロジの変化への対応を考慮して設計された様々なアドホックルーティングプロトコルによって探索、検出され、これに沿ってデータメッセージが配送される [6]。 R 上の各無線通信リンクにおけるデータメッセージ配送には、IEEE802.11 [1]、Bluetooth [2]、ZigBee [3] といった CSMA/CA や RTS/CTS を基礎とする無線 LAN プロトコルを用いることが検討されているが、移動コンピュータ密度の高い環境では、無線信号送信要求の競合発生が高頻度となり、配送遅延の拡大、スループットの低下を招く。そこで、ひとつの無線マルチホップ配送経路内の衝突、競合の発生を回避するプロトコル [5] や複数の無線マルチホップ配送経路間の衝突、競合を回避するプロトコル [9] が提案されている。

一方、TDMA を用いて衝突のない無線マルチホップ配送を行なうことが検討されている [8, 10]。ここでは、データメッセージを送信する時間スロットを各移動コンピュータに割り当てる。互いに隣接する複数の移動コンピュータに同一のスロットを割り当てず、さらに互いに隠れ端末の位置にある、すなわち互いに 2 ホップ近隣となる複数の移動コンピュータに同一のスロットを割り当てないことによって、送信する無線信号による衝突の発生を回避することが可能となる。従来の TDMA スロット割り当て手法では、各移動コンピュータ M の隣接移動コンピュータと 2 ホップ近隣移動コンピュータを M の影響圏としている。影響圏に含まれる移動コンピュータ M' は、 M と同じスロットを用いて同時にデータメッセージを含む無線信号を送信すると衝突が発生する。したがって、 M にスロットを割り当てる場合には、 M の隣接移動コンピュータおよび 2 ホップ近隣移動コンピュータのすべてで割り当てられていないスロットを用いることとしている。このため、移動コンピュータ密度が高い場合、スロット割り当ての成功率が低下する問題がある。

3 提案手法

3.1 リアクティブ型スロット割り当て

前章で述べた問題を解決するために、本論文では、データメッセージの無線マルチホップ配送要求が発生したときのみ、その配送経路に含まれる移動コンピュータがスロット割り当てを行なうリアクティブ型(オンデマンド型) TDMA スロット割り当て手法を提案する。提案手法では、データメッセージ配送経路に含まれる移動コンピュータだけがスロット割り当てを行なう。さらに、従来手法では隠れ端末の位置に存在するために潜在的に衝突が発生する可能性を持っている移動コンピュ

ータには同一スロットの割り当てを禁止するのに対して、存在するマルチホップ配送経路によるデータメッセージ配送を行なった場合に衝突が発生する可能性を持つ移動コンピュータにのみ同一スロットの割り当てを禁止する。すなわち提案手法によって、より高いスロット割り当て成功率を実現できると考えられる。従来のプロアクティブ型割り当て手法では、各移動コンピュータが自身からすべての隣接移動コンピュータへの無線信号送信に使用するスロットを割り当てる(図 1)のに対して、本論文で提案するリアクティブ型割り当て手法では、構築された無線マルチホップ配送経路に含まれる無線通信リンクを用いた無線信号送信に使用するスロットを各移動コンピュータが割り当てる(図 2)。

本手法を適用可能とするためには、スロットの割り当てと解放のタイミングが明示的に与えられることが必要である。上位層のプロトコルに TCP のようなコネクション指向プロトコルが用いられる場合には、コネクションの確立と解放のタイミングでスロットの割り当てと解放を行なうことができる。また、アドホックルーティングプロトコルとして AODV [7] や DSR [4] といったオンデマンド型プロトコルが用いられている場合には、経路探索のタイミングでスロットの割り当てを行なうことができる。ただし、スロットの解放についてはそのタイミングが明示的には示されないため、データメッセージ配送が一定時間以上行なわれないタイミングで解放を行なうことになる。

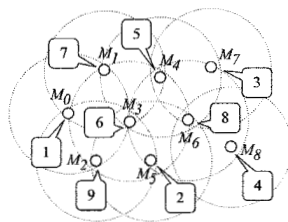


図 1: プロアクティブ型スロット割り当て

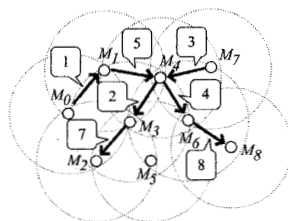


図 2: リアクティブ型スロット割り当て

3.2 スロット割り当て条件

無線通信デバイスを備えた移動コンピュータからなるアドホックネットワークにおいて、送信元移動コンピュータ $M_s (= M_0)$ から送信先移動コンピュータ $M_d (= M_n)$ までの無線マルチホップ配送経路 $R = \{M_0 \dots M_n\}$ を用いたデータメッセージ配送が、 R に含まれる複数の移動コンピュータから送信される無線信号の間で衝突を發

生することなく、他の無線マルチホップ配送経路に含まれる移動コンピュータから送信される無線信号との衝突を回避して実現されるために割り当てスロットが満たすべき条件を明らかにする。以下では、移動コンピュータ M の無線信号到達範囲に含まれ、 M から1ホップで到達可能な隣接移動コンピュータの集合を $N_1(M)$ 、 M の無線信号到達範囲には含まれず、 M から2ホップで到達可能な2ホップ近隣移動コンピュータの集合を $N_2(M)$ とする。

無線リンク $|M_i M_{i+1}|$ において、あるスロット s を割り当てることができないのは、以下の場合である。

- s を用いてデータメッセージを含む無線信号を M_i が送信すると、 M_i がこれまで衝突なく受信可能であった無線信号との衝突が発生する場合。
- s を用いてデータメッセージを含む無線信号を M_i が送信すると、 M_i の隣接移動コンピュータがこれまで衝突なく受信可能であったいずれかの無線信号との衝突が発生する場合。
- s を用いてデータメッセージを含む無線信号を M_i が送信すると、 M_{i+1} において M_{i+1} の隣接移動コンピュータが送信した無線信号との衝突が発生する場合。

M_i への無線通信リンク、すなわち M_i の隣接移動コンピュータ $M \in N_1(M_i)$ から M_i への無線通信リンク $|MM_i|$ を含む無線マルチホップ配送経路 R' がデータメッセージの配送に用いられているとき、 $|MM_i|$ に割り当てられているスロットを $|M_i M_{i+1}|$ に割り当てる場合を考える。このとき、 M と M_i がこのスロットで同時にデータメッセージを送信すると M_i で無線信号の衝突が発生し、 M_i は M からのデータメッセージを受信することができない(図3)。 $|M_i M_{i+1}|$ では $|MM_i|$ に割り当てられていないスロットを割り当てることによって、 M が送信する無線信号と M_i が送信する無線信号との衝突を回避することが可能である。

[スロット割り当て制約条件(1)]

無線マルチホップ配送経路 $R = \{M_0 \dots M_n\}$ に含まれる移動コンピュータ M_i ($0 \leq i < n$) は、無線通信リンク $|M_i M_{i+1}|$ において、 M_i の隣接移動コンピュータ $M \in N_1(M_i)$ から M_i への無線通信リンク $|MM_i|$ に割り当てられていないスロットを割り当てなければならない。□

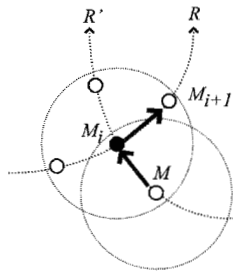


図3: スロット割り当て制約条件(1)

M_i の隣接移動コンピュータ $M \in N_1(M_i)$ への無

線通信リンク、すなわち M の隣接移動コンピュータ $M' \in N_1(M)$ から M への無線リンク $|M'M|$ を含む無線マルチホップ配送経路 R' がデータメッセージ配送に用いられているとき、 $|M'M|$ に割り当てられているスロットを $|M_i M_{i+1}|$ に割り当てる場合を考える。このとき、 M' と M_i がこのスロットで同時にデータメッセージを送信すると M で無線信号の衝突が発生し、 M は M' からのデータメッセージを受信することができない(図4)。 $|M_i M_{i+1}|$ では $|M'M|$ に割り当てられていないスロットを割り当てることによって、 M' が送信する無線信号と M_i が送信する無線信号との衝突を回避することが可能である。なお、 M' は M_i から2ホップ以内で到達可能であり、 $M' \in N_1(M_i) \cup N_2(M_i)$ を満足する。

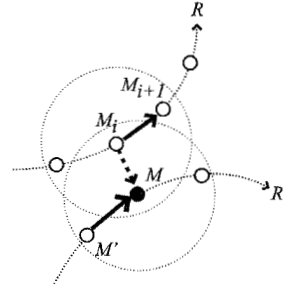


図4: スロット割り当て制約条件(2)

[スロット割り当て制約条件(2)]

無線マルチホップ配送経路 $R = \{M_0 \dots M_n\}$ に含まれる移動コンピュータ M_i ($0 \leq i < n$) は、無線通信リンク $|M_i M_{i+1}|$ において、 M_i の隣接移動コンピュータ $M \in N_1(M_i)$ の隣接移動コンピュータ $M' \in N_1(M)$ から M への無線通信リンク $|M'M|$ に割り当てられていないスロットを割り当てなければならない。□

M_{i+1} の隣接移動コンピュータ $M \in N_1(M_{i+1})$ からの無線通信リンク、すなわち M から M の隣接移動コンピュータ $M' \in N_1(M)$ への無線通信リンク $|MM'|$ を含む無線マルチホップ配送経路 R' がデータメッセージ配送に用いられているとき、 $|MM'|$ に割り当てられているスロットを $|M_i M_{i+1}|$ に割り当てる場合を考える。このとき、 M と M_i がこのスロットで同時にデータメッセージを送信すると M_{i+1} で無線信号の衝突が発生し、 M_{i+1} は M_i からのデータメッセージを受信することができない(図5)。 $|M_i M_{i+1}|$ では $|MM'|$ に割り当てられていないスロットを割り当てることによって、 M が送信する無線信号と M_i が送信する無線信号との衝突を回避することが可能である。なお、 M は M_i から2ホップ以内で到達可能であり、 $M \in N_1(M_i) \cup N_2(M_i)$ を満足する。

[スロット割り当て制約条件(3)]

無線マルチホップ配送経路 $R = \{M_0 \dots M_n\}$ に含まれる移動コンピュータ M_i ($0 \leq i < n$) は、無線通信リンク $|M_i M_{i+1}|$ において、 M_{i+1} の隣接移動コンピュータ $M \in N_1(M_{i+1})$ から M の隣接移動コンピュータ $M' \in N_1(M)$ への無線通信リンク $|MM'|$ に割り当て

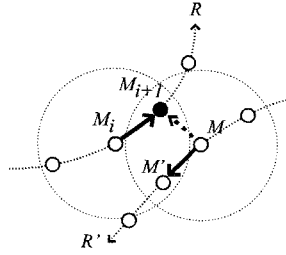


図 5: スロット割り当て制約条件 (3)

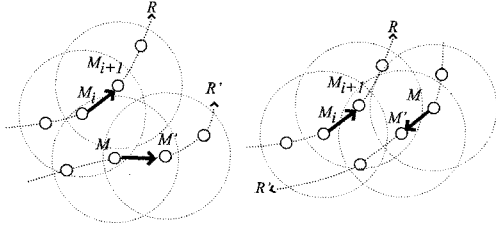


図 6: 同一スロット割り当て可能な無線通信リンク

られていないスロットを割り当てなければならない。□

以上により、データメッセージを含む無線信号の衝突を回避したスロット割り当てを無線通信リンク $|M_i M_{i+1}|$ に行なうためには、 M_i の隣接移動コンピュータと 2 ホップ近隣移動コンピュータからのすべての無線通信リンクで割り当てられているスロットの割り当てを禁止する必要はない。 M_i の隣接移動コンピュータまたは 2 ホップ近隣移動コンピュータ M から M の隣接移動コンピュータ $M' \in N_1(M)$ への無線通信リンク $|MM'|$ であっても、 M が M_{i+1} の隣接移動コンピュータでなく、 M' が M_i の隣接移動コンピュータでない、すなわち $M \notin N_1(M_{i+1})$ かつ $M' \notin N_1(M_i)$ であるならば、 $|MM'|$ に割り当てられているスロットを $|M_i M_{i+1}|$ に割り当てることが可能である。したがって、データメッセージを含む無線信号の衝突が回避できる $|M_i M_{i+1}|$ への割り当て可能スロットは以下の条件を満足するものである (図 6)。

□割り当て可能スロット条件

無線通信リンク $|M_i M_{i+1}|$ に割り当て可能なスロット s は、以下の条件を満足する。

- s は M_{i+1} の隣接移動コンピュータ $M \in N_1(M_{i+1})$ から M の隣接移動コンピュータ $M' \in N_1(M)$ への無線通信リンク $|MM'|$ に割り当てられていない。
- s は M_i の隣接移動コンピュータ $M \in N_1(M_i)$ の隣接移動コンピュータ $M' \in N_1(M)$ から M への無線通信リンク $|M'M|$ に割り当てられていない。

□

3.3 スロット割り当て手法

無線マルチホップ配送経路 R に含まれる移動コンピュータ M_i が次ホップ移動コンピュータ M_{i+1} への無線通信リンク $|M_i M_{i+1}|$ を用いたデータメッセージ

送信に使用するスロットを割り当てる手法を提案する。前節で導出した割り当て可能スロット条件を満足するスロットを選択するために、 M_i または M_{i+1} は以下の情報を入手する。

- 存在するいずれかの無線マルチホップ配送経路 R に含まれる M_i の隣接移動コンピュータ $M \in N_1(M_i)$ が R の前ホップ移動コンピュータから転送されるデータメッセージを受信するスロットの集合 RS_i 。
- 存在するいずれかの無線マルチホップ配送経路 R に含まれる M_{i+1} の隣接移動コンピュータ $M \in N_1(M_{i+1})$ が R の次ホップ移動コンピュータへ転送するデータメッセージを送信するスロットの集合 SS_{i+1} 。

前節で述べた条件から $s \notin RS_i \cup SS_{i+1}$ を満足するスロット s を $|M_i M_{i+1}|$ で用いれば、衝突の回避が可能である。そこで、 M_i では s を $|M_i M_{i+1}|$ を用いたデータメッセージ送信のために割り当て、 M_{i+1} では s を $|M_i M_{i+1}|$ を用いたデータメッセージ受信のために用いることを M_i の隣接移動コンピュータに通知する。また、 M_{i+1} は、 s をデータメッセージの受信のために用いることを M_{i+1} の隣接移動コンピュータに通知する。なお、 s の決定は M_i で行なう方法と M_{i+1} で行なう方法が考えられる。いずれで行なうかは、交換が必要となる制御メッセージによる通信オーバーヘッド、スロット割り当てに要する時間、スロット割り当ての成功率等の要求によって異なると考えられ、選択の指標はシミュレーション実験等によって定めることとする。また、 $|RS_i \cup SS_{i+1}| > 1$ を満足する場合には、無線通信リンク $|M_i M_{i+1}|$ で使用可能なスロットが複数存在する。ここからひとつを選択する方法には以下のものが考えられる。

- 無線マルチホップ配送経路 R の前ホップ移動コンピュータからのデータメッセージ受信に用いるスロットからの待ち時間が最小のスロットを選択する。
- 隣接移動コンピュータが送信に用いているスロット、すなわち SS_i に含まれるスロットを選択する。
- ランダムに選択する。

第一の方法の場合、データメッセージの無線マルチホップ配送遅延を短縮する効果が期待できる。一方、第二の方法の場合、既に隣接移動コンピュータが送信に用いているスロットであり、新たなスロットを割り当てないため、以降のスロット割り当て成功率を低下させない効果が期待できる。無線通信リンク $|M_i M_{i+1}|$ で新たなスロット s を割り当てると、 M_i の隣接移動コンピュータ $M_j \in N_1(M_i)$ から見た隣接移動コンピュータが送信に用いているスロットの集合 SS_j に s を加えなければならないため、 M_j の隣接移動コンピュータ M_k から M_j への無線通信リンク $|M_k M_j|$ におけるスロット割り当ての制約がより厳しくなる。

4 スロット割り当てプロトコル

本章では、前章で提案したスロット割り当て手法を実現するプロトコルを設計する。ここで、送信元移動コンピュータから送信先移動コンピュータまでのマルチホップ配送経路 $R = \{M_0, \dots, M_n\}$ は構築済みであり、 R に含まれる各移動コンピュータは、自身の前ホップ移動コ

ンピュータと次ホップ移動コンピュータにメッセージを送信することが可能であるとする。また、複数の空きスロットが割り当て可能である場合には、前ホップ移動コンピュータからのデータメッセージ受信スロット以降で最も近い、すなわちデータメッセージ転送待ち時間が最小となるスロットを選択する方法を用いる。ひとつのフレームに含まれるスロット数は固定とする。各移動コンピュータ M_i は、以下のデータを保持している。

- 自身および自身の隣接移動コンピュータ M が M の隣接移動コンピュータ $M' \in N_1(M)$ への無線通信リンク $|MM'$ によるデータメッセージ送信のために割り当てているスロットの集合 SS_i 。
- 自身および自身の隣接移動コンピュータ M が M の隣接移動コンピュータ $M' \in N_1(M)$ からの無線通信リンク $|M'M$ によるデータメッセージ受信のために割り当てているスロットの集合 RS_i 。

スロット割り当てに要する制御メッセージ数を削減し、時間を短縮するために、無線通信リンク $|M_i M_{i+1}$ に割り当てるスロットを M_{i+1} で決定する。

[スロット割り当てプロトコル]

(送信元移動コンピュータ M_0)

- 1) 送信元移動コンピュータ M_0 は、 RS_0 を含むスロット割り当て要求メッセージ $Sreq$ を次ホップ移動コンピュータ M_1 へユニキャスト送信する。
- 2) M_1 から $|M_0 M_1$ の割り当てスロット s を含むスロット割り当て応答メッセージ $Srep$ を受信した M_0 は、 s を SS_0 に追加するとともに、 s を含む割り当て送信スロット追加メッセージ SS^+req をブロードキャスト送信する。

(中継移動コンピュータ M_i)

- 1) 前ホップ移動コンピュータ M_{i-1} から RS_{i-1} を含む $Sreq$ メッセージを受信した移動コンピュータ M_i は、 $RS_{i-1} \cup SS_i$ に含まれないスロット s を選択する。このような s の候補が複数存在する場合、 M_1 では任意のスロットをひとつ選択し、 $M_i (i \neq 1)$ では受信した $Sreq$ に含まれる $|M_{i-2} M_{i-1}$ で割り当てたスロット s^- 以降で最も近いスロットを選択する。
- 2) M_i は、 s を RS_i に追加するとともに、 s を含む $Srep$ メッセージを M_{i-1} へユニキャスト送信し、 s を含む割り当て受信スロット追加メッセージ RS^+req をブロードキャスト送信する。
- 3) M_i は、 s および RS_i を含む $Sreq$ メッセージを次ホップ移動コンピュータ M_{i+1} へユニキャスト送信する。
- 4) M_{i+1} から $|M_i M_{i+1}$ の割り当てスロット s^+ を含むスロット割り当て応答メッセージ $Srep$ を受信した M_i は、 s^+ を SS_i に追加するとともに、 s^+ を含む割り当て送信スロット追加メッセージ SS^+req をブロードキャスト送信する。

(送信先移動コンピュータ M_n)

- 1) 前ホップ移動コンピュータ M_{n-1} から RS_{n-1} を含む $Sreq$ メッセージを受信した移動コンピュータ M_n は、 $RS_{n-1} \cup SS_n$ に含まれないスロット s を選択する。このような s の候補が複数存在する場合、受信した $Sreq$ に含まれる $|M_{n-2} M_{n-1}$ で割り当てたスロット s^- 以降で最も近いスロットを選択する。

- 2) M_n は、 s を RS_n に追加するとともに、 s を含む $Srep$ メッセージを M_{n-1} へユニキャスト送信し、 s を含む割り当て受信スロット追加メッセージ RS^+req をブロードキャスト送信する。

(移動コンピュータ M_j)

- 1) 隣接移動コンピュータ M_i から s を含む RS^+req を受信した移動コンピュータ M_j は、 s を RS_j に追加する。
- 2) 隣接移動コンピュータ M_i から s を含む SS^+req を受信した移動コンピュータ M_j は、 s を SS_j に追加する。

□

無線マルチホップ配送経路 R を用いたデータメッセージの配送が終了すると、この経路が解放される。これにともなって、 R に含まれる各移動コンピュータに割り当てられているスロットを解放する。

[スロット解放プロトコル]

(送信元移動コンピュータ M_0)

- 1) 無線通信リンク $|M_0 M_1$ におけるスロット割り当てが経路の解放によって不要となったことを検出した M_0 は、この無線通信リンクに割り当てたスロット s を SS_0 から削除するとともに、割り当て送信スロット削除メッセージ SS^-req をブロードキャスト送信する。

(中継移動コンピュータ M_i)

- 1) 無線通信リンク $|M_{i-1} M_i$ におけるスロット割り当てが経路の解放によって不要となったことを検出した M_i は、この無線通信リンクに割り当てたスロット s を RS_i から削除するとともに、割り当て受信スロット削除メッセージ RS^-req をブロードキャスト送信する。
- 2) 無線通信リンク $|M_i M_{i+1}$ におけるスロット割り当てが経路の解放によって不要となったことを検出した M_i は、この無線通信リンクに割り当てたスロット s を SS_i から削除するとともに、割り当て送信スロット削除メッセージ SS^-req をブロードキャスト送信する。

(送信先移動コンピュータ M_n)

- 1) 無線通信リンク $|M_{n-1} M_n$ におけるスロット割り当てが経路の解放によって不要となったことを検出した M_n は、この無線通信リンクに割り当てたスロット s を RS_n から削除するとともに、割り当て受信スロット削除メッセージ RS^-req をブロードキャスト送信する。

(移動コンピュータ M_j)

- 1) 隣接移動コンピュータ M_i から s を含む RS^-req を受信した移動コンピュータ M_j は、 s を RS_j から削除する。
- 2) 隣接移動コンピュータ M_i から s を含む SS^-req を受信した移動コンピュータ M_j は、 s を SS_j から削除する。

□

5 評価

本章では、提案するリアクティブ型 TDMA スロット割り当て手法が従来手法と比較して、各移動コンピュータのスロット割り当てが他の移動コンピュータの割り

当てをより制約しない手法であることを実験によって確認する。ここでは、300-500 台の移動コンピュータを 1200m×1200m フィールドに一様分布に基づく乱数を用いて配置し、ランダムに選ばれた送信元移動コンピュータから送信先移動コンピュータへの無線マルチホップ配送経路を AODV によって探索、検出する。この経路に含まれるすべての移動コンピュータとその隣接移動コンピュータ、2 ホップ近隣移動コンピュータからそれらの隣接移動コンピュータへ接続するすべての無線通信リンク数に対して、提案手法において配送経路に含まれる無線通信リンク数に対して制約を与える無線通信リンク数がどの程度削減されるかを測定する。ただし、各移動コンピュータの無線信号到達距離は 100m とする。

測定結果を図 7 に示す。ここでは、それぞれの移動コンピュータ数について、送信元移動コンピュータから送信先移動コンピュータまでの距離に対する割り当てを制約する無線リンク数の割合を示している。測定結果は最小 0.508、最大 0.813、平均 0.761 となった。以上により、提案手法は従来手法に比べて平均 33.9% 緩和された制約条件のもとで割り当てスロットを決定することが可能である。なお、割り当て成功率向上の評価は今後の課題である。

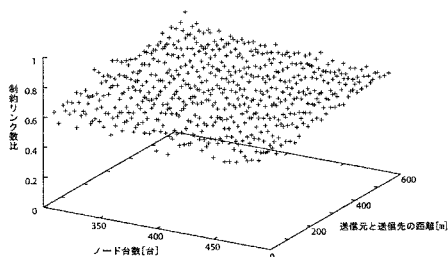


図 7: 提案手法による制約条件の緩和

6 まとめと今後の課題

本論文では、アドホックネットワークにおける無線マルチホップ配送経路によるデータメッセージ配送において、無線信号の衝突を回避するために TDMA を導入するリアクティブ型手法を提案した。配送経路に含まれる無線通信リンクに対して TDMA スロットを割り合える手法により、2 ホップ近隣移動コンピュータに対するスロット割り当て制約条件を緩和することができる。本手法を実現するスロット割り当て、解放プロトコルを設計し、提案手法が従来手法であるひとつの移動コンピュータへのスロット割り当てがその 2 ホップ近隣移動コンピュータのすべてに対して制約を与える手法に対して、多数の空きスロットを保持することを実験によって確認した。

今後は、複数の無線マルチホップ配送経路が並行に利用されるアドホックネットワーク環境において、提案手法がスロット割り当て成功率(すなわちエンドエンドの接続性)を改善していることを実験によって検証する。また、以下の点に関する検討を行なう。

- 制御メッセージの配送手法: 本論文では、無線マルチホップ配送経路を用いたデータメッセージの配送に対してスロットを割り当てる手法を検討したが、この実現にはスロット割り当て、解放に必要な制御メッセージとルーティングに関わる制御メッセージの配送が必要となる。この配送に制御メッセージのための特別なスロットを用いる手法 [8, 10] の他に、制御メッセージを送信する移動コンピュータに既に割り当てられているスロットのいずれかを用いる方法が考えられる。これらに対して、衝突発生率と配送遅延(プロトコル終結時間)の比較を行なう。
- 移動に対する耐性: 従来手法では、各移動コンピュータのスロット割り当てには 2 ホップ近隣移動コンピュータのすべてのスロット割り当てが制約となるため、自身および他の移動コンピュータの位置変化によって、いずれかの 2 ホップ近隣移動コンピュータが変化した場合にはそれらのスロット割り当て状況を取得しなければならない。提案手法では、自身の隣接移動コンピュータとの間の無線通信リンクがいくつかの無線マルチホップ配送経路に含まれていない 2 ホップ近隣移動コンピュータが変化してもその割り当て状況を取得する必要がない。また、取得すべき割り当て状況も必ず隣接移動コンピュータが保持していることから、取得に要する通信オーバーヘッドも小さいと考えられる。この移動に対する耐性を従来手法と比較する実験を行なう。

参考文献

- [1] "Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications," Standard IEEE 802.11 (1997).
- [2] "Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Wireless Personal Area Networks (WPANs)," Standard IEEE 802.15.1 (2002).
- [3] "Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)," Standard IEEE 802.15.4 (2003).
- [4] Johnson, D.B., Maltz, D.A., Hu, Y.C., and Jetcheva, J.G., "The Dynamic Source Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks," Internet Draft, draft-ietf-manet-dsr-04.txt (2000).
- [5] Numata, Y. and Higaki, H., "Routing and Communication Protocols for Higher Throughput in Wireless Ad-Hoc Networks," Proceedings of the 7th International Conference on Wireless and Optical Communications, pp. 68-74 (2007).
- [6] Perkins, C.E., "Ad Hoc Networking," Addison-Wesley (2000).
- [7] Perkins, C.E. and Royer, E.M., "Ad-hoc On-Demand Distance Vector Routing," Proceedings of IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications, pp. 90-100 (1999).
- [8] Young, C.D., "USAP: A Unifying Dynamic Distributed Multichannel TDMA Slot Assignment Protocol," Proceedings of IEEE MILCOM, pp. 235-239 (1996).
- [9] 梅島, 絵垣, "電力制御による競合解消を適用したアドホックルーティングプロトコル," 信学技報, Vol.103, No.443, pp. 57-60 (2003).
- [10] 神崎, 上向, 原, 西尾, "アドホックネットワークにおける端末数の変化に応じた TDMA スロット割り当て手法," 情報処理学会論文誌, Vol.45, No.3, pp. 824-837 (2004).