

無線メッシュネットワークにおけるさらし端末問題を防ぐチャンネル割当法

無線LANのアクセス方式であるCSMA/CA方式の無線局どうしが直接接続することにより構成される無線メッシュネットワークにおいて発生するさらし端末問題を回避するためのチャンネル割当方式を研究した。なお、本研究は新潟大学工学部（仙石 正和教授）との共同研究により実施した。

ふじわら あつし すぎやま たかとし
藤原 淳 杉山 隆利

1. まえがき

無線局どうしが接続することによって構成されるアドホックネットワーク、あるいは無線メッシュネットワークと呼ばれるネットワークは、これまでの商用サービスに用いられてきたセルラ型のネットワークとは異なる新たな形態のネットワークとして期待され、関連する研究が広く行われつつある。特に無線LANを活用した無線メッシュネットワークは、N900iLなどのパッセージデュプレ端末をはじめ、近年その用途が大幅に拡大した無線LAN搭載デバイスが利用できるエリアを柔軟に広げることが可能であること、さらには災害発生時などに容易に無線ネットワークが構築できることなどが期待される。

しかしながら、無線LANのアクセス方式であるCSMA/CA（Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance）方式を無線メッシュネットワークに用いた場合には、隠れ端末問題あるいはさらし端末問題のために、通信品質が大きく劣化する場合がある。特に通信品質の劣化に大きな影響を与える可能性が高いさらし端末問題の影響を軽減するためには、CSMA/CAプロトコルの改良あるいは複数チャンネルの利用が考えられる。前者の検討は幅広く行われているが、後者についてはその検討がほとんど行われてこなかったのが実情である。

これまでドコモでは、さらし端末問題を防ぐためのチャンネル割当問題がグラフ理論^{*1}における点彩色問題と等価であることを示し、無線局数が10以下のネットワークにおける必要チャンネル数の解析を実施した[1]。このチャンネル割当問題は、無線局数の増加に伴って複雑になるため、無線局数が10より大きいネットワークでは、異なった解析手法が必要となる。そこで、グラフ理論に関する解析実績のある新潟大学の仙石教授との共同研究にて、無線局数が10を超える無線メッシュネットワークにおいて、さらし端末問題を防ぐためのチャンネル割当法について検討を行った。本稿では、まず点彩色問題として従来から検討されてきた近似解法を無線メッシュネットワークに適用し、その効果および最適化について検討した結果を述べる。次に、利用できるチャンネル数が制限されるときにネットワークの性能をなるべく低下させずに、さらし端末問題の影響を軽減できる切断リンク選択法について提案する。

2. 無線メッシュネットワークにおけるさらし端末問題

2.1 隠れ端末問題およびさらし端末問題

無線LANにおいて広く使われているIEEE（Institute of Electrical and Electronics Engineers）802.11^{*2}方式は、各無線局が送信する搬送波（以下、キャリア）を互いに検出しようことにより多重アクセス制御を実現するCSMA/CA方式をベースとしている。以下に制御の概要を示す。

無線局は送信すべきパケットが発生した場合、キャリアが検出されなければ、即時送信を開始するが、キャリアが検出された場合、キャリアが検出されなくなるまで待機し、乱数によって決まる待機時間が経過した後送信を開始する。ただし、待機中にキャリアが検出された場合には、再びキャリアが検出されなくなるまで、待機時間の計測およ

*1 グラフ理論：ネットワークに関する研究やアルゴリズムの研究などに幅広く用いられている理論。節（ノード）および節どうしをつなぐ辺（エッジ）により構成される「グラフ」が持つさまざまな性質について研究する学問。

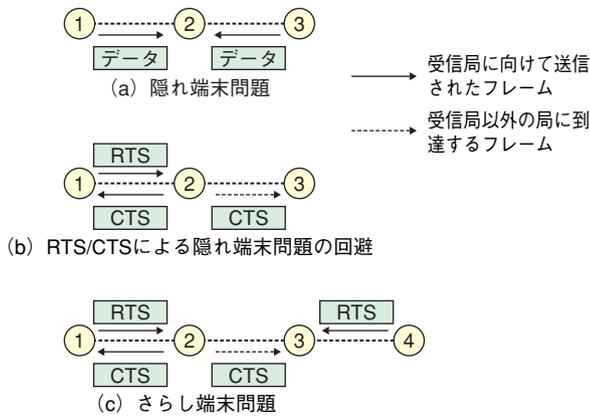


図1 隠れ端末問題およびさらし端末問題

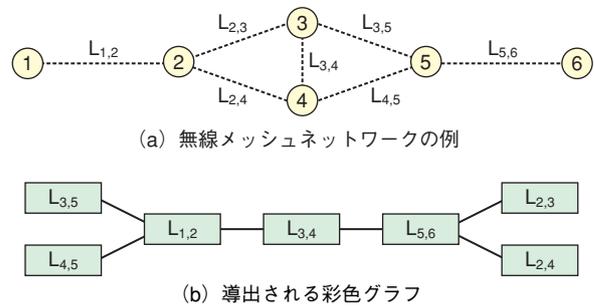


図2 無線メッシュネットワークにおける彩色グラフ

び送信は行わない。

このCSMA/CA方式は、同じエリアに存在する無線局どうしのキャリアが互いに検出できることを前提としている。図1(a)に示すように、3つの無線局が直線状に配置され、両端の無線局（無線局1および3）にて互いにキャリアが検出できない場合には、中央の無線局2でパケット衝突が発生する。無線局1と無線局3が互いに隠れた存在であることから、この問題は隠れ端末問題と呼ばれる。

隠れ端末問題によるパケット衝突を軽減するために、IEEE802.11においては、図1(b)に示すようにデータ送信前に、送受信局間で送信要求（RTS：Request To Send）フレームと送信確認（CTS：Clear To Send）フレームを交換する方式が規定されている。無線局1が無線局2にデータを伝送する場合、無線局3は間に位置する無線局2からのCTSを受信できることから、無線局1の送信状態を認識でき、パケット衝突を防ぐことができる。

無線局がさらに増えると、また異なる問題が発生する。図1(c)に示すように、4つの無線局が直線状に配置され、すべての無線局は隣接する無線局とのみキャリアが検出可能とする。無線局1が無線局2にデータを伝送する際にデータパケットの伝送時のRTS/CTSフレームの交換により、無線局3は無線局2からのCTSフレームを受信し、無線局1～2間の通信が完了するまで、待機状態となる。この待機状態の間に、無線局4が無線局3にデータ伝送を開始すると、無線局3は何の応答もできないため、無線局4は再送を繰り返し、該当するパケットは破棄される。この問

題はさらし端末問題と呼ばれ、TCPスループット低下などの深刻な問題を引き起こす。

2.2 チャンネル割当てによるさらし端末問題の回避

前節で述べたさらし端末問題は、2つの無線リンク（図1(c)における無線局1～2間と無線局3～4間）において同時にパケット伝送を行うことがパケット損失を引き起こす。例えば、この2つの無線リンクに異なる周波数チャンネルを割り当てれば、さらし端末問題が回避できる。

この例のように、簡単な構成のネットワークでは、さらし端末問題を回避できるチャンネル割当てパターンを容易に見出せるが、ネットワーク構成が複雑になるにつれて、チャンネル割当てのパターンも複雑となる。筆者らは、無線メッシュネットワークにおいてさらし端末問題を防ぐためのチャンネル割当て問題が、グラフ理論における彩色問題と等価であることを示した。これは、無線メッシュネットワーク（図2(a)）におけるリンクをグラフの節とし、同時通信によりさらし端末が発生するリンク（グラフの節）どうしを接続することで生成されるグラフ（図2(b)）において、隣接する節を異なる色に彩色する「点彩色問題」に帰着できることから、このグラフを「彩色グラフ」と呼ぶ。

一般に点彩色問題は、最適な組合せをすぐには求められないというNP（Non-deterministic Polynomial）完全問題と位置付けられており、最も少ない色数による彩色を効率的に見出するためのアルゴリズムは存在しないとされている。そのため点彩色問題の解法については、近似アルゴリズムによる解法が数多く検討されている。本研究では、従来から提案されている「順序を定めて一度だけ彩色する」アルゴリズムから4種類[2]、「順序を変えて繰り返し彩色す

* 2 IEEE802.11：米国財団法人であるIEEEが策定した無線LANの国際標準規格。

る」アルゴリズムから1種類を無線メッシュネットワークに適用し、その効果を検証している。

3. 彩色問題における近似アルゴリズム

本研究で検証した近似アルゴリズムを以下に挙げる。

(1) LF (Largest First)

次数^{*3}の高い点（グラフの節）から順に彩色していくアルゴリズム。次数が同じ場合には、任意に1つ選択する。

(2) SL (Smallest Last)

次数の低い点から順に除去していき、点を除去したときの逆順で彩色していくアルゴリズム。次数が同じ場合には、任意に1つ選択する。

(3) DS (DSatur)

飽和度の高い端末から順に彩色していくアルゴリズム。飽和度とは、隣接点に使用されている色の数を表す。初期点は次数の高い点とする。飽和度が同じ場合には、その中で次数の高い点を選択する。次数も同じ場合には、任意に1つ選択する。

(4) RLF (Recursive Largest First)

同じ色で彩色することのできる点を次数の高い点から選択するアルゴリズム。最初の点の選択はLFと同じであるが、その次の点は、最初に選んだ点と隣接していない点から選択する。

(5) IG (Iterated Greedy)

いったん彩色されたグラフをグループ（同じ色の点の集まり）ごとに順序を変えて繰り返し彩色し直すアルゴリズム。今回は文献[3]で紹介されている組合せについて数多くの検証を行い、必要色数が少ない以下の2つの方式について詳細に検討を行う。

① IG 1

- ・ 点の多いグループ順の彩色を5回行う
- ・ 点の少ないグループ順の彩色を2回行う
- ・ 確率0.1でランダムなグループ順の彩色を行う

② IG 2

- ・ 点の多いグループ順の彩色を5回行う
- ・ グループの並びを逆向きにした彩色を2回行う
- ・ 確率0.1でランダムなグループ順の彩色を行う

ネットワークの端末数が30のときの結果をそれぞれ図3

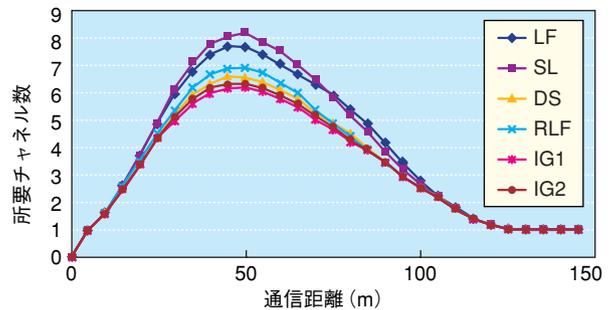


図3 彩色アルゴリズムに対する所要チャネル数

に示す。横軸は各端末の通信距離を表し、縦軸はネットワークからできる彩色グラフで必要となる色数平均（所要チャネル数）を表す。

図3より、今回使用した5種類のアルゴリズムの中でIG 1アルゴリズムが所要チャネル数を最も低く抑えられていることが分かる。また、通信距離が50m付近で所要チャネル数が最大になっていることが分かる。これは、通信距離が小さいときにはネットワークが連結^{*4}になりにくくリンク数が少ないため彩色グラフの規模が小さくなり、通信距離が大きくなるにつれて、ネットワークも連結になり、リンク数も干渉も増えてくるため所要チャネル数が増加すると考えられる。逆に通信距離が大きくなりすぎるとネットワークが完全グラフ^{*5}に近づくため、すべての端末にキャリアが到達して干渉がなくなり、1つのチャネルで通信が可能となる。

4. チャネル数が制限される場合の切断リンク選択法

利用できるチャネル数が有限である場合、さらし端末を防ぐために必要なすべてのチャネルが割り当てられるとは限らない。本研究では、必要なチャネル数を N 、与えられたチャネル数を M とした場合に、以下の方法を用いて一部のリンクを使用禁止とすることにより、さらし端末問題による問題を軽減する。

色（チャネル）番号を $1 \sim M$ で表す。 $N > M$ ならば、 $M + 1$ 番から N 番の色で塗られた無線リンクの集合を V_0 で表す。 V_0 の無線リンクには、 $1 \sim M$ 番の色のうち、干渉が少ないものを割り当てる。その後、 V_0 の無線リンクの辺間隔度の平均値を ave で表し、 sd をその標準偏差とする。辺間隔度とは、経路制御の際に最短経路が選択されるとい

*3 次数：グラフ理論における用語であり、1つの節（ノード）に接続されている辺（エッジ）の数を表す。

*4 連結：グラフ理論における用語であり、任意のノードの間になんらかの経路が存在する状態を表す。本稿では、孤立したノードやネットワークが存在しない、1つのメッシュネットワークである状態を示す。

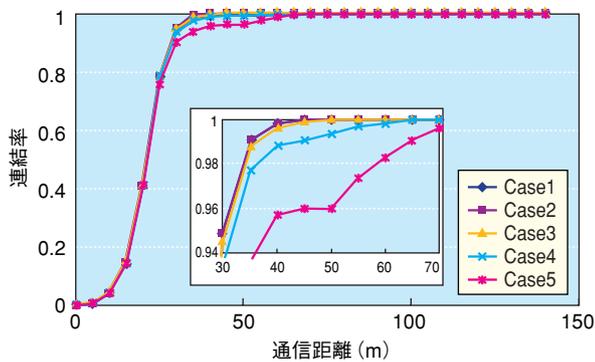


図4 ネットワーク連結率

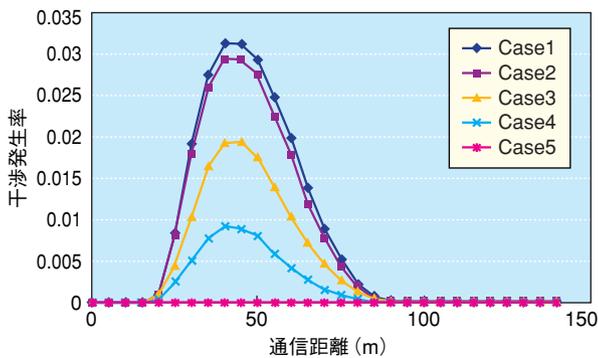


図5 干渉発生率

う前提のもと、すべての2点間が等しく通信を行う場合に各無線リンクの使用頻度という意味合いを持つ。V0の無線リンクのうち、間隔度が以下の条件の場合に使用禁止とする。

- ・ Case1：リンクの使用禁止を行わない。
- ・ Case2： $ave \cdot sd$ (平均値と分散の積) 以下のリンクを使用禁止とする。
- ・ Case3： ave 以下のリンクを使用禁止とする。
- ・ Case4： $ave + sd$ (平均値と分散の和) 以下のリンクを使用禁止とする。
- ・ Case5：すべてのリンクを使用禁止とする。

これらの5つの方法についてシミュレーションで評価する。100×100mの領域に30の無線局がランダムに分布していると仮定し、通信距離を変化させてネットワークを作成する。与えられるチャンネル数を4としたときのネットワークの連結率(各試行において、ネットワークが連結であった割合)と干渉発生率について、1,000回試行した平均の

結果を図4および図5に示す。Case3に示した選択基準に従った無線リンクの使用禁止により、連結率をそれほど下げずに干渉発生率を下げられることが分かる。つまり、辺間隔度を利用することにより連結性を維持しながら、干渉を抑えられることが分かる。

5. あとがき

本研究では、無線メッシュネットワークにおいて通信品質の劣化を引き起こすさらし端末問題を防ぐために、グラフ理論における彩色グラフを用いたチャンネル割当法について検討を行った。従来の彩色アルゴリズムを無線メッシュネットワークに適用し、繰返し彩色し直すアルゴリズムによるチャンネル割当法が必要なチャンネル数を低く抑えることを明らかにした。また、利用できるチャンネル数が制限されるときに、ネットワークの連結性を低下させずにさらし端末問題の発生を抑えるための、切断リンク選択法について研究を行った。

文献

- [1] A. Fujiwara and Y. Matsumoto: "Centralized Channel Allocation Technique to Alleviate Exposed Terminal Problem in CSMA/CA-Based Mesh Networks," IEICE TRANSACTIONS on Communications, Vol. E88-B, No. 3, pp. 958-964, 2005.
- [2] P. M. Pardalos, T. Mavridou and J. Xue: "The graph coloring problem: A bibliographic survey," in Handbook of Combinatorial Optimization, D.-Z. Du and P. M. Pardalos (Eds.), Vol. 2, pp. 331-395, 1999.
- [3] J. C. Culberson: "Iterated Greedy Graph Coloring and the Difficulty Landscape," Technical Report TR 92-07, University of Alberta Dept of Computer Science, Edmonton, Alberta Canada T6G2H1, 1992.

* 5 完全グラフ：グラフ理論における用語であり、任意のノードが他のすべてのノードと互いに接続されているグラフを表す。