

## 片方向リンクの存在するアドホックネットワークにおける TDMA スロット割り当て手法の性能評価

神崎 映光<sup>†</sup>      原 隆浩<sup>†</sup>      西尾章治郎<sup>†</sup>

TDMA (Time Division Multiple Access) 方式は、ネットワークのトラフィック量に関わらず、パケット衝突の発生しない転送が実現できるため、アドホックセンサネットワークへの適用が有効である。これまでに筆者らは、端末ごとの無線通信範囲が異なる環境において、帯域を有効に利用する TDMA スロット割り当て手法を提案した。本稿では、筆者らが提案した手法の有効性を、シミュレーション実験によって確認する。シミュレーション実験では、提案手法により得られたスロット割り当てにおける帯域の利用効率、および、ネットワーク全体におけるデータ転送効率を評価する。

### Performance Evaluation of TDMA Slot Assignment Protocol in Ad Hoc Networks with Unidirectional Wireless Links

Akimitsu KANZAKI<sup>†</sup>      Takahiro HARA<sup>†</sup>      Shojiro NISHIO<sup>†</sup>

Due to the ability to provide the collision-free packet transmission regardless of the traffic load, TDMA (Time Division Multiple Access) has been applied effectively to ad hoc sensor networks. In our previous work, we have proposed a TDMA slot assignment protocol that utilizes the channel bandwidth effectively in ad hoc sensor networks in which nodes have different communication ranges. In this paper, we verify the effectiveness of our proposed protocol by simulation experiments. In simulation experiments, we evaluate the channel utilization and the efficiency of data transfer which are given by our proposed protocol.

#### 1 はじめに

近年、無線通信端末のみで暫定的に形成するアドホックネットワークが注目を集めており、特に、多数のセンサによってネットワークを構築するアドホックセンサネットワークに対する期待が高まっている。アドホックセンサネットワークでは、各端末が継続的に周辺の情報を収集し、端末間で交換するため、ネットワーク全体のトラフィック量が非常に大きくなる。このような環境では、ネットワークのトラフィック量に関わらず、衝突の発生しないパケット転送を実現できる TDMA (Time Division Multiple Access) 方式の適用が有効であり、多くの手法が提案されている [3, 5, 6]。

一般にアドホックネットワークでは、多種多様な端末が混在してネットワークに参加するものと考えられる。このような環境では、端末ごとの無線通信範囲の違いによって、通信が一方向のみに限定される無線リンクが存在する。そのため、無線通信範囲の大きい端末が、無線通信範囲の小さい端末の存在を認識できなくなり、従来の手法では、衝突の発生しないスロット割り当てが行えず、帯域の利用効率が著しく低下してしまう。

この問題を解決するために、筆者らは、無線通信範囲の異なる端末が混在するアドホックセンサネットワークにおいて、帯域を有効に利用する TDMA スロット割り当て手法として ASAP-UN (Adaptive Slot Assignment Protocol for Unidirectional Networks) を提案した [2]。ASAP-UN では、筆者らが文献 [1] で提案した E-ASAP (Extended ASAP) を拡張し、端末ごとの無線通信範囲が異なる環境において、割り当て情報の不整合を抑制している。また、提案手法の性能をシミュレーション実験により評価し、E-ASAP と比較して、割り当ての不整合によるパケット衝突の発生を大幅に削減することを確認した。本稿では、ASAP-UN によって得られたスロット割り当てにおける帯域利用効率の特性を、シミュレーション実験によってより詳細に調査し、また、得られたスロット割り当てが上位層のデータ転送に与える影響を評価する。

以下では、2 章で文献 [1, 2] において提案したスロット割り当て手法について述べる。3 章で提案手法の帯域利用効率の評価結果を示し、4 章でデータ転送効率の評価結果を示す。最後に 5 章で本稿のまとめを述べる。

<sup>†</sup>大阪大学大学院情報科学研究科マルチメディア工学専攻

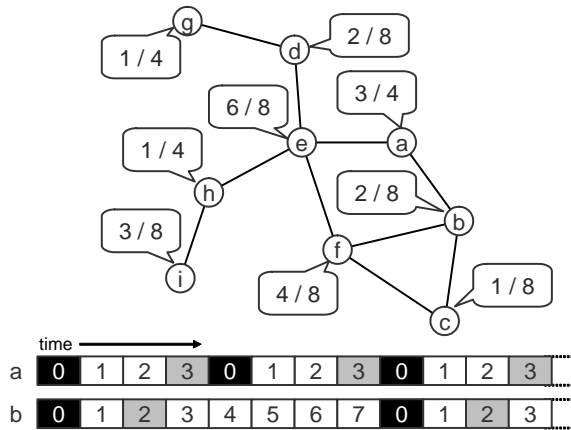


図 1: スロット割り当て例

## 2 スロット割り当て手法

本章では、筆者らがこれまでに提案したスロット割り当て手法について説明する。

### 2.1 E-ASAP

文献 [1] では、全端末の無線通信範囲が等しい環境を想定して、帯域を有効に利用するスロット割り当て手法である E-ASAP を提案した。E-ASAP では、各端末が、影響圏の端末とパケット衝突を起こさない最小のフレーム長を自身に設定することにより、余分な空きスロットの発生を抑制する。ここで影響圏とは、端末がパケットを送信する際にパケット衝突を起こす可能性のある端末の集合を表し、具体的には隣接端末と隠れ端末を表す。

図 1 に、E-ASAP におけるスロット割り当ての一例を示す。図 1 において、各端末に与えられた吹き出しは、右側の数字がフレーム長を、左側の数字がそのフレーム長における割り当てスロットの番号を表す。E-ASAP では、フレームの先頭スロット（図 1 の黒色のスロット）は、新たにネットワークに参加する新規端末が割り当て情報を要求するために空けておき、通常データ転送には用いない。また、各端末のフレーム長を 2 の累乗スロットで与えることにより、フレーム長の異なる端末間でも、パケット衝突の発生しない転送を実現する。例えば図 1 において、互いに隣接している端末 a および b は、それぞれが灰色のスロットを用いてパケットを送信することで、衝突の発生しないパケット転送を実現している。

E-ASAP において、新規端末は、影響圏の全端末におけるスロット割り当て情報を収集した後、自身のフレーム長を最小フレーム長である 4 スロットに設定し、以下に示す 3 つの手順によって、割り当

て可能なスロットを検索する。

#### 1. 空きスロット獲得

設定したフレーム長において、先頭スロットが全隣接端末に割り当てられておらず、かつ他にも空きスロットが存在した場合、空きスロットの中から 1 つを選択し、自身に割り当てる。

#### 2. 複数割り当ての解放

フレーム中に空きスロットが存在しない場合、設定したフレーム長において複数のスロットが割り当てられている端末が影響圏に存在するか調べる。該当する端末が存在した場合、その割り当ての一部を解放し、自身に割り当てる。

#### 3. 倍周期割り当て

設定したフレーム長において、割り当て可能なスロットが存在しない場合、フレーム長を 2 倍にし、上記 2 つの方法によって、利用可能なスロットを再検索する。この動作は、割り当て可能なスロットが発見できるまで繰り返される。

### 2.2 ASAP-UN

E-ASAP では、隣接している全ての端末が双方向でパケットを交換できる環境を想定しているため、端末ごとの無線通信範囲が異なる環境では、各端末の保持する割り当て情報に不整合が発生する。そのため、パケット衝突の発生しないスロット割り当てが実現できず、帯域の利用効率が低下する可能性がある。そこで文献 [2] では、端末ごとの無線通信範囲が異なる環境において、割り当て情報の不整合によるパケット衝突の発生を抑制するスロット割り当て手法として ASAP-UN を提案した。

端末ごとの無線通信範囲が異なる環境では、通信が一方向のみに限定される片方向リンクが存在する。本稿では、片方向リンクの一端に存在し、相手端末にパケットを送信できるが、相手端末からのパケットを受信できない端末を上流端末と呼び、他端に存在する端末を下流端末と呼ぶ。

ASAP-UN では、E-ASAP と同様に、フレーム長を 2 の累乗スロットで与え、各端末が、パケット衝突を起こさない最小のフレーム長を自身に設定する。また、各端末は、自身と隣接している端末の情報に、以下に示す 4 つのフラグのいずれかを付加し、隣接端末との通信方向を把握する。

#### 1. 双方向フラグ

相手端末との通信が双方向で可能である。

#### 2. 上流フラグ

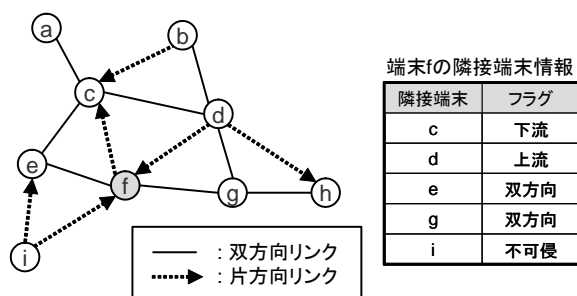


図 2: フラグの設定

相手端末が自身の上流端末である。ただし、他の隣接端末を介して、パケットを転送することは可能である。

### 3. 下流フラグ

相手端末が自身の下流端末である。

### 4. 不可侵フラグ

相手端末が自身の上流端末であり、他の隣接端末を介してもパケットを転送できない。

例えば図 2 の端末  $f$  は、端末  $c$  に対して下流フラグを、端末  $e, g$  に対して双方向フラグを設定する。また、上流端末  $d$  とは、他の隣接端末  $c$  や  $g$  を介してパケット転送が可能であるため、 $d$  に対して上流フラグを設定する。パケットを中継できる隣接端末が存在しない端末  $i$  に対しては不可侵フラグを設定する。

ASAP-UN において、新規端末は、E-ASAP と同様に、影響圏の全端末におけるスロット割り当て情報を収集し、「空きスロット獲得」「複数割り当ての解放」「倍周期割り当て」の 3 つの手順に従って、自身に割り当てるスロットを選択する。ただし、「複数割り当ての解放」において、不可侵フラグが設定された端末の割り当ては変更しない。また、複数のスロットが割り当てられた端末のうち、双方向フラグが設定された端末の割り当ては、上流フラグが設定された端末より優先的に解放する。

## 3 帯域利用効率の評価

本稿では、シミュレーション実験によって、前章で説明した 2 つの手法の帯域利用効率を比較した。本章では、その結果を示す。

### 3.1 評価環境

本実験では、 $1,000[m] \times 1,000[m]$  の 2 次元平面領域内において、端末数が 100 になるまで 1 端末ずつネットワークに参加させる動作を 50 回試行した。

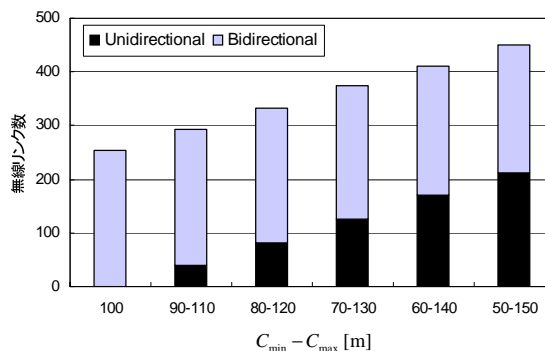


図 3: 無線リンク数

新規端末は、既にネットワークに参加している端末のうち、自身と双方向リンクを生成するものが 1 端末以上 5 端末以下となる範囲内からランダムに選択した位置に出現するものとした。また、新規端末が参加した後、スロット割り当ての更新が完了し、すべての端末がデータパケットの転送を再開するまで、他端末は参加しないものとした。各端末の無線通信範囲は、 $C_{min}[m]$  から  $C_{max}[m]$  の範囲内でランダムに選択した。図 3 に、それぞれの実験における双方向リンク数および片方向リンク数の平均値を示す。

### 3.2 評価基準

本実験では、以下の 4 つの評価値を用いた。なお、各評価値は、50 回の試行の平均とした。

#### 1. 平均送信機会

各端末のフレーム長に対する割り当てスロット数の割合（ネットワーク全体の平均値）。平均送信機会が増加すると、各端末がパケットを送信する機会が増えるため、帯域の利用効率が向上する。ただし、衝突の要因にもなるため、転送に失敗する割り当てスロットが生じる可能性も高くなる。

#### 2. 平均実効送信機会

各端末のフレーム長に対する、パケット衝突を起こしていない割り当てスロット数の割合（ネットワーク全体の平均値）。

#### 3. 解決不能競合数

解決できなかった割り当ての競合の総数（ネットワーク全体）。

#### 4. 制御トラヒック

新規端末が参加するために交換された制御パケットの総数（ネットワーク全体）。

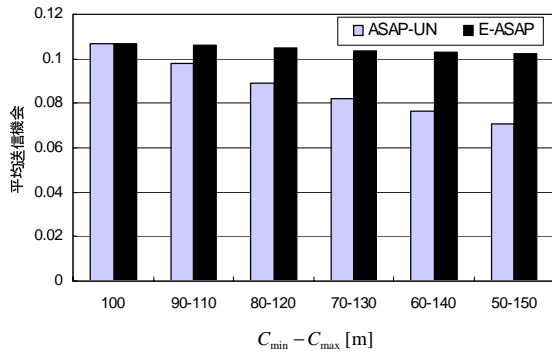


図 4: 平均送信機会

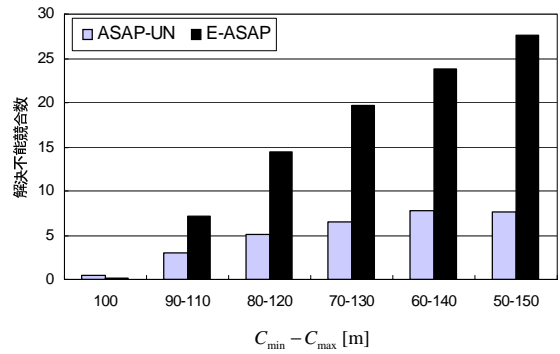


図 6: 解決不能競合数

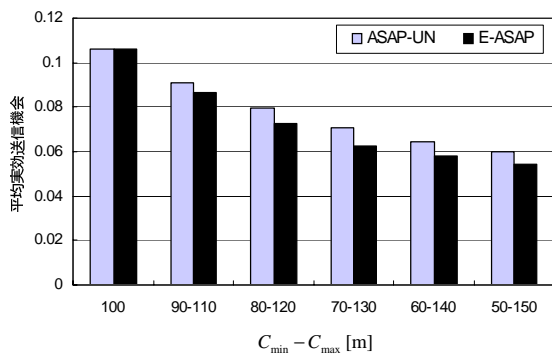


図 5: 平均実効送信機会

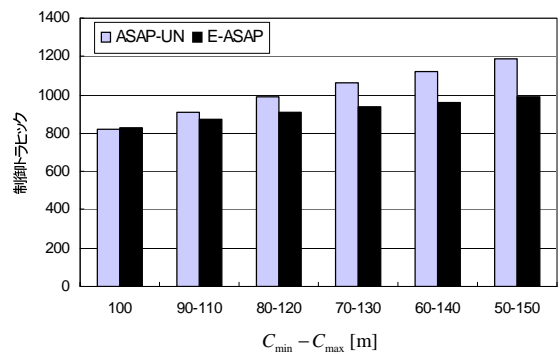


図 7: 制御トラヒック

### 3.3 評価結果

端末の無線通信範囲の最小値  $C_{min}$  および最大値  $C_{max}$  を変化させたときのシミュレーション結果を図 4, 図 5, 図 6, および図 7 に示す. 各グラフの横軸は  $C_{min}$  および  $C_{max}$  を表し, 縦軸はそれぞれ, 平均送信機会, 平均実効送信機会, 解決不能競合数, 制御トラヒックを表す.

まず, 図 4 の結果より, 片方向リンクの存在を考慮しない E-ASAP では, 無線通信範囲の幅に関わらず, ほぼ同じ送信機会が得られていることがわかる. これは, 片方向リンクの両端に存在する端末において割り当て情報が交換されず, 両者が互いの存在を考慮せずに自身の割り当てスロットを決定することで, 各端末がより小さいフレーム長を自身に設定するためであると考えられる. 一方, ASAP-UN では, 各端末が片方向リンクの存在を認識し, 上流端末の存在を考慮したスロット割り当てを行うことで, E-ASAP より送信機会が小さくなる.

また, 図 5 の結果より, E-ASAP において, 実効送信機会が図 4 の送信機会と比較して大幅に減少していることがわかる. 一方, ASAP-UN においては, E-ASAP と比較して常に高い実効送信機会が

保たれており, また図 4 の送信機会からの減少幅も小さい. これより, ASAP-UN は, 端末の無線通信範囲が異なる環境において, 帯域利用率の低下を抑制していることがわかる.

さらに, 図 6 の結果より, 無線通信範囲の幅の増加に伴い, E-ASAP において解決できない競合が多く発生しており, 実効送信機会を低下させる要因となっていることがわかる. 一方, ASAP-UN では, E-ASAP と比較して, 競合の発生を大幅に抑制しており, また無線通信範囲の幅の増加に伴う競合発生数の増加量も小さい.

最後に, 図 7 の結果より, 無線通信範囲の幅の増加に伴い, ASAP-UN における制御トラヒックが E-ASAP と比較して若干増加していることがわかる. これは, ASAP-UN において, 下流端末が上流端末に自身の存在を通知するために, 別の隣接端末を介してパケットを送信する機会が増加したためであると考えられる.

### 3.4 考察

ASAP-UN では, 各端末が片方向リンクを考慮したスロット割り当てを行うことにより, 競合の発生を大幅に削減している. ここで, 割り当ての競合が

発生した場合、その要因となる端末は、片方向リンクの上流に存在する。一般に、割り当ての競合によるパケット衝突が発生した場合、パケットを再送する必要があるが、このような場合、衝突を検出した下流端末は、上流端末に対して直接再送要求を送信できない。そのため、複数の端末を介して再送要求を転送するか、上位層による再送制御を行う必要がある。転送遅延やスループットが大幅に低下するものと考えられる。また、TDMA方式では、パケット衝突によって端末間のパケット転送に失敗する場合、その端末間の無線リンクは無効となる。そのため、解決できない競合数が大きくなると、無効になる無線リンク数が増大し、データ転送に大きな影響を与えるものと考えられる。

## 4 データ転送効率の評価

前章の実験に加え、ASAP-UN および E-ASAP における上位層のデータ転送効率を、シミュレーション実験によって評価した。本章では、その結果を示す。

### 4.1 評価環境

本実験では、前章で生成したネットワークにおいて、各端末が、平均 15[秒] の指数分布に従う間隔で、自身以外からランダムに選択した端末に対して 1,000[バイト] のデータパケットを送信するものとした。また、1 スロットあたりの時間を 0.001[秒]、無線通信帯域を 11[Mbps] とし、ルーティングプロトコルは DSR (Dynamic Source Routing protocol) [4] を用いた。

以上の環境において、各端末に自身以外の全端末に対してデータパケットを 1 つずつ送信させた。

### 4.2 評価基準

本実験では、以下の 4 つの評価値を用いた。

#### 1. 平均経路発見遅延

各端末においてデータパケットが生成されてから、宛先までの経路を発見できるまでに経過した時間の平均値。

#### 2. 平均データ転送遅延

各端末で生成されたデータパケットの送信が送信元端末において開始されてから、宛先に到達するまでに経過した時間の平均値。

#### 3. 平均転送経路長

データパケットの転送に用いられた転送経路のホップ数の平均値。

#### 4. 平均転送率

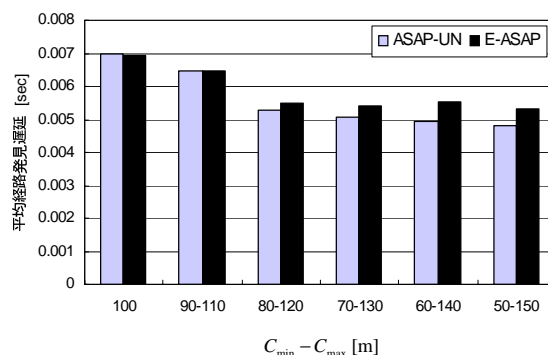


図 8: 平均経路発見遅延

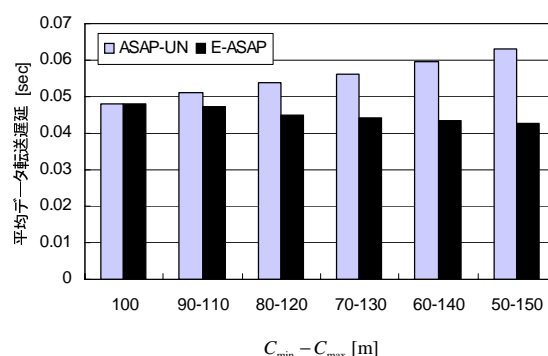


図 9: 平均データ転送遅延

生成された全てのデータパケットに対する、宛先まで到達したものの割合。

### 4.3 評価結果

シミュレーション結果を図 8, 図 9, 図 10, および図 11 に示す。各グラフの横軸は  $C_{min}$  および  $C_{max}$  を表し、縦軸はそれぞれ、平均経路発見遅延、平均データ転送遅延、平均転送経路長、平均転送率を表す。

まず、図 8 の結果より、無線通信範囲の幅が大きくなると、ASAP-UN における経路発見遅延が E-ASAP より小さくなるのがわかる。これは、ASAP-UN において、各端末が保持する割り当て情報の不整合が抑制された結果、パケット衝突によって無効となる無線リンクの発生が抑制され、経路発見に用いるパケットをより短い経路で転送できるためであると考えられる。

一方、図 9 の結果より、データの転送にかかる遅延は E-ASAP の方が小さいことがわかる。これは、前章の図 4 で示したように、E-ASAP において、各端末が多くのスロットを用いてパケットを送信することにより、サイズの大きいデータパケットを短時間で転送できるためであると考えられる。

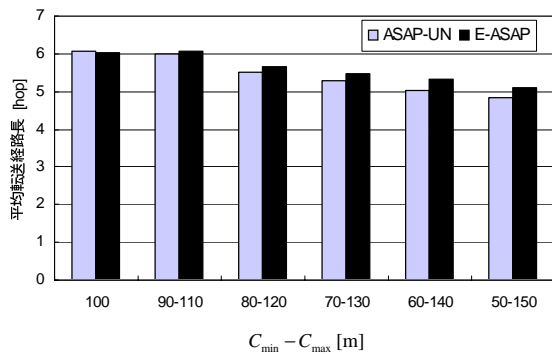


図 10: 平均転送経路長

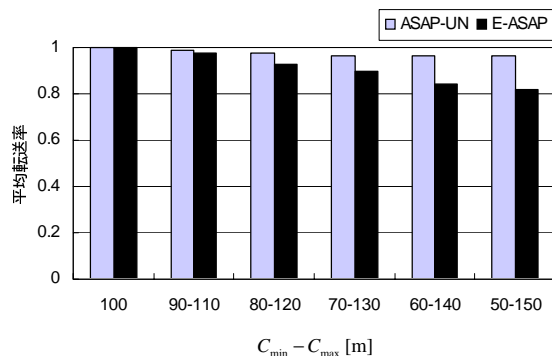


図 11: 平均転送率

次に、図 10 の結果より、無線通信範囲の幅が大きくなると、ASAP-UN における転送経路長が E-ASAP より小さくなるのがわかる。これは、図 8 の結果で述べたように、ASAP-UN において、経路発見に用いるバケットがより短い経路で転送されることで、データパケットの転送に用いる経路が短くなったためであると考えられる。

最後に、図 11 の結果より、無線通信範囲の幅の増加に伴って、E-ASAP における転送率が低下しており、無効となった無線リンクの発生によって、多くの端末間で経路が構築できなくなることがわかる。一方、ASAP-UN では、無線通信範囲の幅が大きくなっても高い転送率を維持しており、ほぼ全ての端末間で経路が構築できていることがわかる。

## 5 まとめ

本稿では、端末ごとの無線通信範囲が異なるアドホックセンサネットワークを対象として、筆者らがこれまでに提案した TDMA スロット割り当て手法の有効性を、シミュレーション実験によって評価した。シミュレーション実験は、帯域利用効率およびデータ転送効率の 2 つの観点から行い、これらの結

果から、ASAP-UN を用いたスロット割り当てを行うことにより、片方向リンクが存在する環境において、割り当て情報の不整合を抑制し、転送の失敗や転送経路長を削減できることを確認した。

今後は、トラフィック要求など、ネットワーク環境の動的な変化に応じて、動的にスロット割り当てを更新する手法について検討する予定である。

謝辞 本研究の一部は、文部科学省 21 世紀 COE プログラム「ネットワーク共生環境を築く情報技術の創出」、文部科学省若手研究 (A)(16680005) (財)立石科学技術振興財団、および日本学術振興会特別研究員制度の研究助成によるものである。ここに記して謝意を表す。

## 参考文献

- [1] 神崎 映光, 上向 俊晃, 原 隆浩, 西尾 章治郎: “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).
- [2] 神崎 映光, 原 隆浩, 西尾 章治郎: “アドホックネットワークにおける無線リンクの片方向性を考慮した TDMA スロット割り当て手法,” 情報処理学会マルチメディア通信と分散処理ワークショップ論文集, vol. 2004, no. 15, pp. 305–310 (2004).
- [3] I. Chalamtac, A. Farago, and H. Zhang: “Time-spread multiple-access (TSMA) protocols for multihop mobile radio networks,” *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 5, no. 6, pp. 804–812 (1997).
- [4] D. B. Johnson, D. A. Maltz, and Y.-C. Hu: “The dynamic source routing protocol for mobile ad hoc networks (DSR),” Internet Engineering Task Force (IETF) Internet-Draft: draft-ietf-manet-dsr-09.txt (2003).
- [5] C. D. Young: “USAP: a unifying dynamic distributed multichannel TDMA slot assignment protocol,” in *Proc. IEEE MILCOM '96*, vol. 1, pp. 235–239 (1996).
- [6] C. D. Young: “USAP multiple access: dynamic resource allocation for mobile multihop multichannel wireless networking,” in *Proc. IEEE MILCOM '99*, vol. 1, pp. 271–275 (1999).