

インターネット接続を考慮したモバイルアドホックネットワーク

Mobile Ad Hoc Networks Considering The Internet Connectivity

伊藤 雅†
Masaru ITOH

Abstract: This paper discusses new protocols for mobile ad hoc networks to connect Bluetooth with wireless LAN in consideration of the Internet connectivity. Bluetooth is built on a synchronous fast-frequency-hopping paradigm operating in the 2.4 GHz unlicensed ISM band. This ISM band is generally utilized on IEEE 802.11g, which is a wireless LAN standard to enable transmission at symbol rates of 54 Mbps. If a Bluetooth node could communicate with another wireless LAN node on the same ISM band, then the Bluetooth node might be able to connect to the Internet. The objective of this paper is to expand both protocols regarding IEEE 802.11g and Bluetooth so as to connect more number of nodes into the Internet through the given access points for wireless LAN. Hop-level and slave-number are embedded into the Bluetooth packet, while Bluetooth-address is into the IEEE 802.11g packet. A sequence of links on the ad hoc network would be formed one by one by using the information on these packets. The simulation results show that the proposed protocols have appropriately worked in all procedures such as appending-node, deleting-node, and updating-node, respectively.

1. はじめに

モバイル端末間で自律的に構築されるネットワークのひとつにモバイルアドホックネットワーク (MANET: Mobile Ad hoc NETWORK、以下アドホックネットワーク)^{1, 2)}がある。アドホックネットワークとはインフラストラクチャに依存しない端末のみで構築される無線ネットワークである。アドホックネットワークの端末を一般にノードと呼ぶ。ノードがある程度広い範囲に分散配置している場合、中継ノードはルータの機能も果たす。中継ノードを経由して送受信する形態がマルチホップ通信である。

ノード間の距離が 10m 以内であれば、障害物があっても利用できる Bluetooth 通信³⁾がある。Vergetis ら⁴⁾によれば、Bluetooth の使用は小規模アドホックネットワークに限定される。想定する使用環境は、恒常的なネットワーク環境ではなく、イベント会場や地震等の被災地あるいは大規模トンネル火災事故現場といった緊急時のネットワークであるので、小規模でも十分実用性はある。

救助活動や救援活動では個々のモバイル端末が接続できるだけでなく、通常のインターネットにもアドホックネットワークを介して間接的につながるようなプロトコルを策定する方が望ましい。そこで、マルチホップの Bluetooth 通信と無線 LAN 通信を融合したアドホックネットワークを確立する方法を提案する。Bluetooth は免許なしで自由に使える 2.4GHz 帯の電波を利用している。これは無線 LAN の標準規格の一つであり、やはり 2.4GHz 帯で約 54Mbps の通信を行う IEEE 802.11g¹⁾ とほぼ同じ周波数帯域を利用している。同一周波数帯域を使用するので、複数の無線 LAN 端末

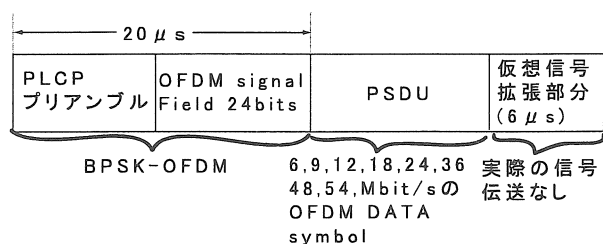
と Bluetooth 端末同士が適宜通信できれば、Bluetooth がインターネットに直接接続することが可能になる。もちろん干渉の問題は解決されなければならない。IEEE 802.11g は拡張性のあるプロトコルであるので、Bluetooth との接続を考慮することも十分可能である。

Bluetooth の接続形態は大別すると 2 つある。ひとつは 1 個のマスタノードを複数のスレーブノードと接続してネットワークを形成していくピコネット (piconet)⁵⁾である。もうひとつは複数のピコネットを相互に接続して形成されるスキヤッタネット (scatternet)⁵⁾である。どちらもブロードキャスト的な通信を行うことによってノード間の通信を実現する。トラフィックをできるだけ少なくし、かつ、IEEE 802.11g の無線 LAN と通信できるプロトコルを策定する。

間瀬ら⁶⁾は Bluetooth を用いたアドホックネットワークにおける自律分散スキヤッタネットオペレーションプロトコルについて提案している。スキヤッタネットを局所的に調整できない場合、スキヤッタネットをリセットし、新しいスキヤッタネットを全面的に再構築するプロトコルである。シミュレーションでは 100 通りのノード分布を用いて静的ネットワークを構築している。しかし、ノードの追加や削除には未対応である。提案法は静的ネットワークだけでなく動的ネットワークにも対応させる。加藤ら⁷⁾は消防活動等でアドホックネットワークを指向したマルチキャストルーチングプロトコルに関して検討を加えているが、Bluetooth と無線 LAN の融合までは考えていない。

IEEE 802.11g と Bluetooth の干渉に関しては、例えば、Park ら⁸⁾が COFDM ベースの WLAN で Bluetooth 干渉の影響を効果的に緩和できることを示している。干渉問題では、いかに干渉を抑制するかが議論の中心になっている。Ghosh ら⁹⁾は Bluetooth 干渉下で 802.11g の性能改善を図

† 愛知工業大学 経営情報科学部 情報科学科 (豊田市)



(出典: 無線 LAN とユビキタスネットワーク p.107)

図 1 IEEE 802.11g OFDM 方式の packets 構成

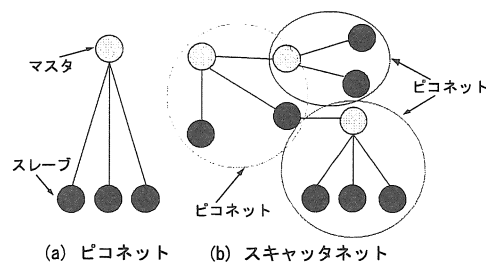


図 2 ピコネットとスキヤッタネット

るための復号器のアルゴリズム (PHY アルゴリズム) を提案している。いずれの論文もスキヤッタネットと無線 LAN の融合という視点からのアプローチはしていない。干渉の抑制を主テーマとしている。この点で本研究とは相違している。

本研究の目的は、無線 LAN と Bluetooth を用いて既与の無線 LAN アクセスポイント数でより多くのノードと接続でき、広域エリアでインターネット接続を可能にする無線 LAN と Bluetooth を融合させるプロトコルを提案することである。提案するプロトコルで動作するアドホックネットワークシミュレータを Java で開発し、ネットワーク構築の様子から提案プロトコルの有効性を検証した。

以降では、2 章で IEEE 802.11g と Bluetooth の概要について述べ、3 章でインターネット接続を考慮したアドホックネットワークプロトコルを提案する。4 章は提案プロトコルに基づくシミュレーションの結果とその考察である。最後に 5 章でまとめと今後の課題について述べる。

2. IEEE 802.11g と Bluetooth の概要

2.1 IEEE 802.11g の特徴および概要

IEEE 802.11 は IEEE の初期の無線 LAN 仕様で、2.4GHz 帯域の電波を利用する方式と赤外線を使用する方式が標準化されている。伝送速度は 1~2Mbps で、伝送距離は 100m 程度である。基本的にはデータ伝送に用いる媒体としてケーブルの代わりに電波を用いる違いがあるだけで、物理層より上層は有線 LAN と同じプロトコルになっている。

IEEE 802.11g は 802.11b の上位規格であり、周波数は 802.11b と同じ 2.4GHz の ISM 帯を利用する。最大通信速度は 802.11b の 11Mbps から 54Mbps に高速化されている。802.11b に対する上位互換性が保証されている。

IEEE 802.11g には、3 種類の packets フォーマットがある。ロングフレームフォーマット、ショートフレームフォーマット、OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 方式¹⁾のフレームフォーマットの 3 つである。OFDM 方式のフレームフォーマットにのみ仮想信号拡張部分という packets 追加領域が含まれている。IEEE 802.11g の OFDM 方式の packets 構成を図 1 に示す。

2.2 Bluetooth の特徴および概要

Bluetooth とは、東芝、エリクソン、インテル、IBM、Nokia を中心に開発された無線通信の規格およびその技術である。

ノートパソコン、携帯電話、PDA などのモバイル機器やその他、様々な電子機器の間でケーブルの代替として無線で通信を行う。Bluetooth の周波数帯は 2.4GHz 帯を利用しており最大通信距離は 10m、最大伝送速度は非対称モードで下り 721Kbps である。そのため、大量のデータを送受信するような用途に Bluetooth は向かない。

Bluetooth アーキテクチャはアドホック無線デバイスのクラスタをベースとしている。クラスタ化によってメディアアクセス層での調整とルーティングが可能になる。ピコネット (図 2(a) 参照) にはマスタと呼ばれるコントローラの役割をするクラスタヘッドが存在する。それ以外のデバイスはスレーブと呼ばれる。規格上、マスタに対するスレーブの数は最大 7 に制限される。そのため、ピコネット内でマスタとスレーブを合わせて 9 個以上のデバイスがアクティブになることはない。ピコネット内のスレーブはマスタとのみリンクをもち、同一ピコネット内のスレーブ間同士でリンクをもちつけない。スレーブ同士の通信はマスタを通じて行われる。

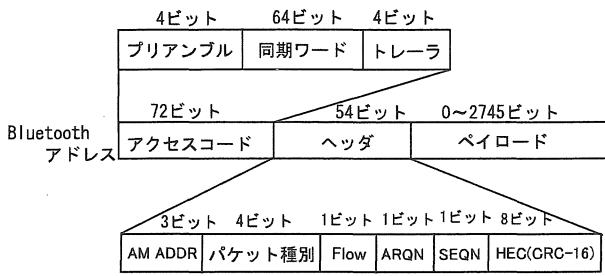
ある Bluetooth デバイスが 2 つのピコネット内に同時に存在する場合、タイムシェアリングが行われる。つまり、片方のピコネットで幾つかの slots を使い、他方でまた幾つかの slots を使う。ピコネットからピコネットへのカスケードがスキヤッタネットとなる。スキヤッタネットの例を図 2(b) に示す。ピコネットのマスタは他のピコネットのマスタに対するスレーブになることができる。1 つのデバイスが同時に 2 つのピコネットのマスタになることはできない。

Bluetooth は図 3 のような packets をブロードキャストで送受信している。Bluetooth の packets はアクセスコード部、ヘッダ部、ペイロード部の 3 つで構成されている。以下に packets 構成の概略を示す。

アクセスコード: プリアンブル (4 ビット)、同期ワード (64 ビット)、トレーラ (4 ビット) の合計 72 ビットで構成されている。アクセスコードはピコネットの指定やオフセット補正に用いる。

ヘッダ: 制御情報 (アドレッシングやリンク制御あるいはエラー制御) が含まれる。

- AM ADDR: ピコネット内でアクティブになっているノードの識別に用いられる。
- packets 種別: 制御情報・音声情報・データの区別。
- Flow: フロー制御。受信側のバッファがあふれたり、他の処理の影響でデータを欠落しないように、



(出典: アドホックモバイルワイヤレスネットワーク p.238)

図3 Bluetoothのパケット構成

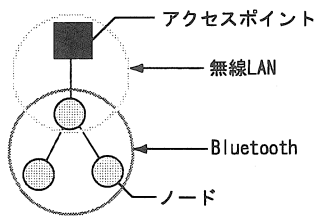


図4 無線LANとBluetoothを融合したシステム

送信するデータの速度を落としたり、送信を停止したりして、データの送信量を調節する機能である。

- ARQN: 送信済みパケットの確認。
- SEQN: 新規パケット/再送パケットの区別。
- HEC (CRC-16): ヘッダ情報のエラー訂正。

ペイロード: ユーザーが伝送したい情報ビットを格納するためのスペースである。

3. インターネット接続を考慮したアドホックネットワークプロトコルの提案

3・1 無線LANとBluetoothの融合

アドホックネットワークを用いて限られたアクセスポイントで、より多くのノードがインターネット接続できるプロトコルを提案する。Bluetooth だけでは伝送距離に問題がある。アクセスポイントと接続する部分は無線LANで通信して、Bluetoothと無線LANを融合したシステム(図4参照)を考えなければならない。融合する利点は、無線LANの伝送距離を活かしながらBluetoothのスキュッタネットを利用してアドホックネットワークが構築できる点である。現行の既存プロトコルだけでは無線LANとBluetoothを融合したシステムは実現できない。そのためにはパケット拡張が必要である。これについては次節以降で述べる。

ノードはまず無線LANを用いてアクセスポイントに接続する。無線LANと接続できなかった場合のみBluetoothを用いて、インターネットへの接続を試みる。Bluetoothでピコネットを構築する際、1つのマスタは最大で7つのスレーブをもつことができる。スレーブは複数のマスタをもつことも可能であるが、ここではネットワーク構造が複雑になるため1つのマスタとのみ接続できると仮定する。

アドホックネットワークのノード削除において、削除ノードを認識する方法は、一定期間ノードからパケット送信がな

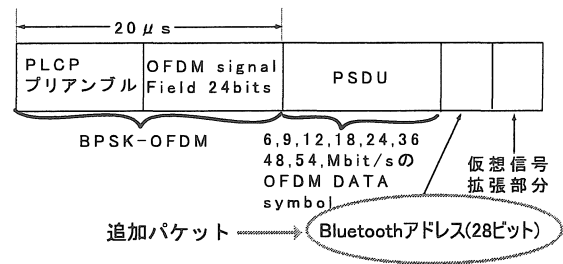


図5 拡張 IEEE 802.11g のパケット構成

い場合に限定する。その際、削除ノードとスキュッタネットを構築していたノードがインターネットから切断されたことを認識する順序は、最初にマスタがいなくなったスレーブ、そのノードのスレーブという順序であると仮定する。

3・2 無線LANプロトコル側の拡張

IEEE 802.11a/b/g を検討した結果、IEEE 802.11g の OFDM フレームフォーマットを採用することとした。IEEE 802.11g の OFDM 方式にのみ仮想信号拡張部分というパケットを追加する領域が含まれているからである。

IEEE 802.11g にはアドホックネットワークに属しているノードの接続要求を送信するパケット領域はない。そこで、無線LANのパケットにBluetoothアドレスを追加する。図5にBluetoothアドレスを付加した拡張 IEEE 802.11g のパケット構成を示す。無線LANではアクセスポイントと接続するまではブロードキャストを利用し、接続後はユニキャストで通信する。拡張したパケット構成の詳細を記す。

PLCP Preamble: Physical Layer Convergence Protocol preamble の略。送信された無線パケット信号を検出し、受信処理での同期のために用いられる。

OFDM Signal Field: 引き続き送信されるデータ信号の伝送速度とデータ長の情報で構成されている。

BPSK-OFDM: Binary Phase Shift Keying - OFDM の略。1 次変調で BPSK を、2 次変調で OFDM を利用する。

PSDU: PLCP Service Data Unit の略。物理層が伝送するデータ情報である。

6,9,12,18,24,36,48,54 Mbit/s の OFDM Data symbol: 6 ~ 54 Mbit/s の 8 種類の情報伝送レートを示す。

Bluetooth アドレス: 接続要求をしたノードの Bluetooth アドレス。Bluetooth アドレスは 28 ビットである。

仮想信号拡張部分: 実際には信号伝送のない領域である。

3・3 Bluetoothプロトコル側の拡張

Bluetooth は他のノードのスレーブかマスタのどちらかになることでアドホックネットワークを構成する。ここではインターネット接続を考慮しているため、より快適に接続できるようなスキュッタネットを構成できるプロトコルを考える。より快適に接続するには、アクセスポイントまでのホップ数を減らし、マスタとなるノードのスレーブ数が少ないノードと接続することで達成できる。ホップ数とは図6に

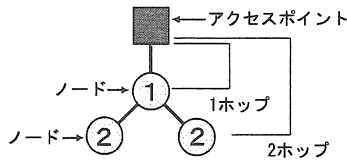


図 6 ホップ数の例

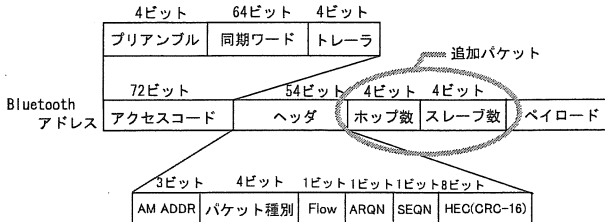


図 7 追加後の拡張 Bluetooth パケットの構成

示すように、アクセスポイントと直接接続しているノードのホップレベルを 1 とし、そのノードと Bluetooth で繋がるノードのホップレベルを 2 とする。以降ホップ数は 1 つずつ増加していくことになる。一方、スレーブ数とはマスターノードと既に接続しているスレーブノードの数をいう。

以上を勘案して、Bluetooth の送信パケットにホップ数とスレーブ数を追加する。これら 2 つの追加情報はペイロード領域に確保する。ブロードキャストして、返信パケットが複数のノードから届く場合、そのホップ数とスレーブ数を比較することで、より快適な接続が可能となる。どちらも小さい方が優先される。ホップ数とスレーブ数ではホップ数を優先する。ホップ数とスレーブ数を追加した拡張 Bluetooth パケットの構成を図 7 に示す。節 2・2 で述べたように Bluetooth 通信はすべてブロードキャストで送受信する。

3・4 ノードの追加・削除・更新の処理手順

インターネット接続を考慮したアドホックネットワークの各リンクは、ノードの追加・削除・更新によって順次形成されていくことになる。各処理手順について説明する。

3・4・1 ノードの追加処理

ノードは、インターネット接続を考慮しているため、まず無線 LAN を用いてアクセスポイントにプローブ要求をする。プローブ応答の中からアクセスポイントの使用チャンネル数が最小のアクセスポイントと接続する。もちろん、チャンネルに空きがなければ接続はできない。接続するアクセスポイントが決定したので、アクセスポイントは受信パケットを基に送信元ノードアドレスを記憶する。接続ノードが 1 つ追加したのでアクセスポイントの使用チャンネル数を 1 加算する。

アクセスポイントから応答がなかった場合や接続できなかった場合は、既にアドホックネットワークを形成しているノードに向けて Bluetooth のブロードキャストパケットを送信する。パケット返信があったノードから最小ホップで更に最小スレーブ数のノードと接続する。接続するノードが決定したので、これをマスターノードとする。ノードはマスターノードからの受信パケットを基にホップ数に 1 を加算する。

マスターノード側はノードからの送信パケットを基にそのスレーブノードを記憶する。接続ノードが 1 つ追加されたのでスレーブ数を 1 加算する。

3・4・2 ノードの削除処理

一定時間ノードからパケットの送信や受信がない時、そのノードはエリアから削除されたものとする。そのときの無線 LAN のアクセスポイントおよび Bluetooth のマスターノードとスレーブノードの処理内容を 3 つの場合に分けて説明する。

1. アクセスポイントに接続しているノードから切断要求があった場合、そのノードは削除される。次の新規ノードと接続できるようにアクセスポイントのチャンネルをクリアし、使用チャンネル数を 1 つ減らす。
2. インターネットに接続要求をしても、一定時間、受信完了パケットの返信がない場合、そのノードはスキュタネットのリンクを切断する。スキュタネットのリンクを切断するためにマスター情報とスレーブ情報をクリアする。スレーブは最大 7 つまでである。
3. マスターノードがスレーブノードからブロードキャストパケットを一定時間受信しなかった場合、そのスレーブノードは削除されたものと見做す。その際、マスターノードはスレーブ数を 1 つ減らし、削除ノードをスレーブ情報からクリアする。

3・4・3 ノードの更新処理

スキュタネットのリンクを切断されたノードは、再度インターネットに接続するためにノード追加処理を行う。

4. シミュレーションによる結果と考察

提案したプロトコルでアドホックネットワークがどのように形成されるかを確認するためにシミュレータを Java で開発した。エリア全体を格子構造で表現し、オープンエリアを想定する。アクセスポイントはエリアの周辺に配置し、四角で表現する。一方、ノードは格子の交点上に小円で配置する。シミュレーション条件は以下の通りである。

- ノードエリアサイズ: 10m × 10m
- ノード数: 10 ~ 20
- アクセスポイント数: 2
- 無線 LAN チャンネル数: 2
- 無線 LAN 検索範囲: 20m
- Bluetooth 検索範囲: 5m

ノードの追加・削除・更新によってアドホックネットワークが順次形成されていく。最終的なネットワーク構成を図 8 に示す。直線はノード間のリンクである。この図が示すように各ノードはアクセスポイントと直接的あるいは間接的に接続され、インターネット接続が可能になっている。ノードの追加・削除・更新の各処理過程の結果を順に示す。

ノード追加処理では、図 9 の左図から右図のようにネットワークが変化した。図中の追加ノードの位置からまずアクセスポイントを検索するが、無線 LAN チャンネル数が 2 で

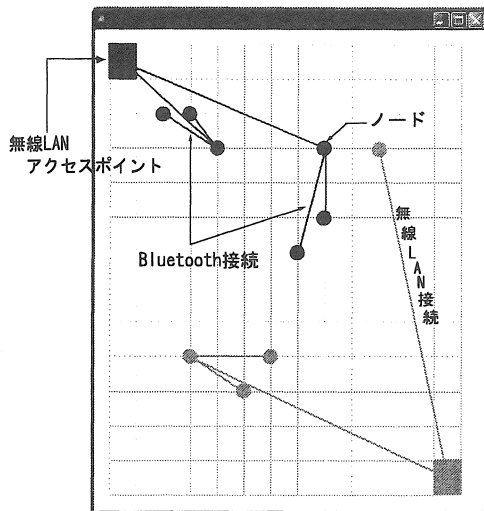


図8 アドホックネットワークの構築結果

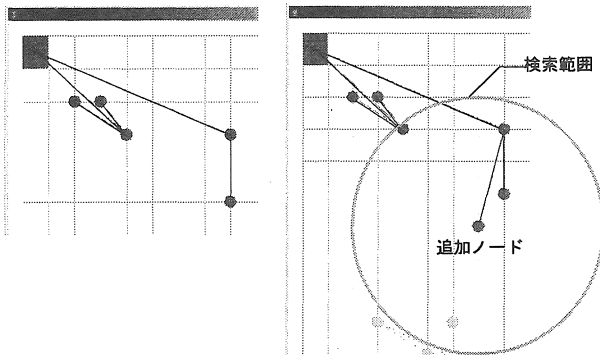


図9 ノードの追加前(左)と追加後(右)

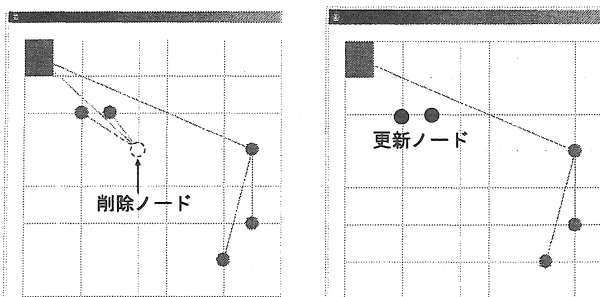


図10 ノードの削除前(左)と削除後(右)

あるため、アクセスポイントと直接は接続できない。そこで Bluetooth 接続でピコネットのスレーブとしてアドホックネットワークに参加することになる。ホップ数1、スレーブ1のノードに接続することになる。他はホップ数またはスレーブ数のいずれかで劣っている。

ノード削除処理では、図10の左図から右図のようにネットワークが変化した。削除ノードとスキヤッタネットの関係にある2つのスレーブノードは共に更新ノードとなる。

ノード更新処理では、更新ノードとなった2つの追加ノードに対し、インターネット接続できるように再度、無線LANのアクセスポイントを検索することになる。アドホックネッ

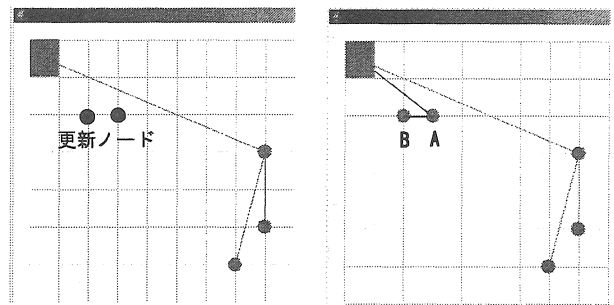


図11 ノードの更新前(左)と更新後(右)

トワークはこのノード更新処理によって図11の左図から右図のように変化する。図10で削除されたノードがアクセスポイントと接続していたため、アクセスポイントのチャンネルに空きが生じる。そのためノードAはアクセスポイントと直接接続でき、ノードBはノードAとBluetooth接続することになる。ノードAがピコネットのマスター、ノードBがスレーブである。

ノードがアクセスポイントに接続する際、無線LANチャンネル数の空きが多いアクセスポイントを優先する。例えば、あるノードが追加されたとき、近くのアクセスポイントより遠くのアクセスポイントの方がより無線LANチャンネル数に空きがある場合、無線LANチャンネル数に空きが多い遠くのアクセスポイントと接続することになる。ノードがアクセスポイントから遠い場合でも、Bluetoothよりもより快適な通信が保障されているIEEE 802.11gを選択するのである。その一方で、追加ノードがアクセスポイントの近隣に出現したとしても、アクセスポイントのチャンネル数に空きがない場合は、IEEE 802.11gでの通信は不可能であり、Bluetoothを介した通信を余儀なくされる。

シミュレーションの結果から提案したプロトコルの欠点も判明した。追加ノードがアクセスポイント近隣に出現したとしても、アクセスポイントのチャンネル数に空きがない場合は先の議論から当然、IEEE 802.11gでは通信できない。結果、追加ノードはBluetoothのスキヤッタネットのスレーブとしてそのマスターと接続する。このとき、最小ホップ→最小スレーブの順で優先接続されることになる。今、ノードの性能差は考慮していないので図12のようにスキヤッタネットが複雑に成長することもあり得る。この問題を解決するには、平衡木構造の概念を取り入れるべきかもしれない。

オープンエリアへのノード投入順序にも依存するが、提案したプロトコルではインターネットに接続できない孤立ノードが生じる可能性もある。その例を図13に示す。シミュレーションではアクセスポイントへの無線LANチャンネル数を2に限定している。よって2台の追加ノードは図13左上隅や右下隅のアクセスポイントには接続できない。さらに、シミュレーション条件でBluetooth検索範囲が5mで、その範囲に他のノードが存在していない。そのため、これら2台はインターネット接続という観点から見れば、孤立ノードとなっている。この2台同士だけならば、Bluetoothプロトコルでの通信が可能である。

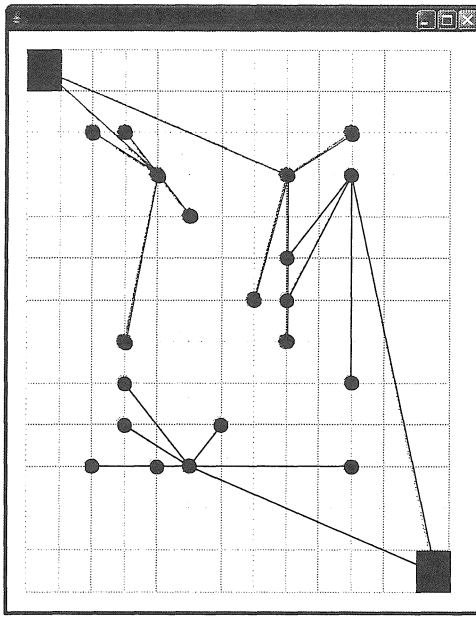


図 12 複雑に成長したアドホックネットワーク

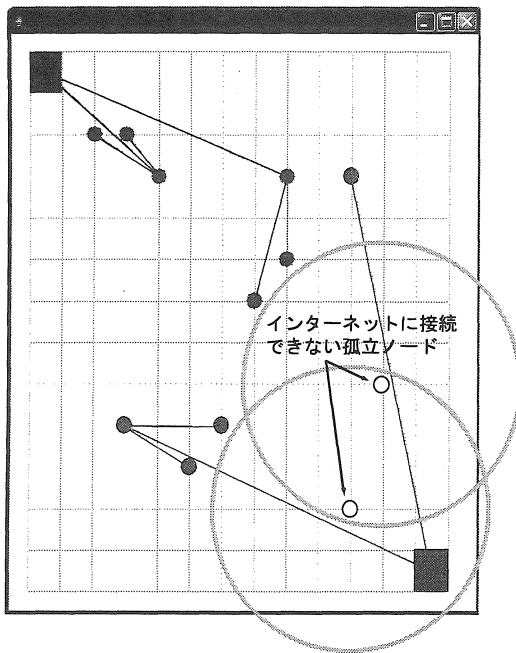


図 13 インターネットに接続できない孤立ノードの例

5. おわりに

本研究では限られたアクセスポイント数でより多くのノードをインターネット接続できるようなアドホックネットワークプロトコルを提案した。パケットを追加して IEEE 802.11g と Bluetooth の両プロトコルを拡張し、ホップ数とスレーブ数からより快適なスキュータネットを形成する方法

を提案した。シミュレーション結果からインターネット接続を考慮したアドホックネットワークの各リンクが、ノードの追加・削除・更新によって順次形成され、提案プロトコルが概ね妥当に機能することを確認した。

提案プロトコルだけではネットワークが複雑に成長する場合もあり、また、インターネットに接続できない孤立ノードが生じる可能性もある。ノードがスキュータネットを経由してインターネット接続している場合、マスタノードはスレーブノードの情報を取得可能なため、セキュリティ面の脆弱性も否めない。今後の課題として、アクセスポイントとの接続方法の改善、ノードの性能差の考慮、セキュリティの強化など、アドホックネットワークプロトコルとして改良すべき余地は多分にある。

謝 辞

本研究は財団法人市原国際奨学財団の第 13 回 (平成 17 年度) 研究助成により達成された。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 小牧省三, 間瀬憲一, 松江英明, 守倉正博: 無線 LAN とユビキタスネットワーク, 丸善, 2004.
- 2) S. Basagni, M. Conti, S. Giordano, and I. Stojmenović: Mobile Ad Hoc Networking, Wiley-IEEE Press, 2004.
- 3) C-K. Toh, 構造計画研究所 訳: アドホックモバイルワイヤレスネットワーク, 共立出版, 2003.
- 4) E. Vergetis, R. Guérin, S. Sarkar, and J. Rank: "Can Bluetooth Succeed as a Large-Scale Ad Hoc Networking Technology?", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 23, No. 3, pp. 644 - 656, 2005.
- 5) 杉浦彰彦: ワイヤレスネットワークの基礎と応用, CQ 出版, 2003.
- 6) 間瀬憲一, 佐藤 正: "ブルートゥースを用いたアドホックネットワークにおける自律分散スキュータネットオペレーションプロトコル", 電子情報通信学会論文誌 B, Vol. J85-B, No. 12, pp. 2015 - 2024, 2002.
- 7) 加藤聡彦, 高梨健一, 伊藤秀一, 浦野義頼: "消防活動のためのアドホックネットワークを指向したマルチキャストルーティングプロトコルに関する一検討", 第 3 回情報科学技術フォーラム FIT 2004, pp. 251 - 252, 2004.
- 8) J. Park, C. Kang, and D. Hong: "Effect of Bluetooth interference on OFDM systems", Electronics Letters, Vol. 40, No. 23, pp. 1496 - 1498, 2004.
- 9) M. Ghosh and V. Gaddam: "Bluetooth Interference Cancellation for 802.11g WLAN Receivers", Proceedings of 2003 IEEE International Conference on Communications, Part Vol. 2, pp. 1169 - 1173, 2003.

(受理 平成 18 年 3 月 18 日)