

大規模ブルートゥースネットワークの新たな構成法：MBNET

間瀬 憲一[†] 松井 貴宏[†] 長谷川貴史[†] 八木 啓之[†]
柄沢 直之^{††}

A Novel Configuration of Large-Scale Bluetooth Networks: MBNET

Kenichi MASE[†], Takahiro MATSUI[†], Takashi HASEGAWA[†], Takashi YAGI[†],
and Naoyuki KARASAWA^{††}

あらまし 本論文ではセンサネットワークなどの用途を想定し、基地局と複数のノードをブルートゥースにより接続するためのネットワークアーキテクチャ、マルチホップブルートゥースネットワーク (MBNET) を提案した。MBNET では各ノードが複数ブルートゥースデバイスをもつことにより、基地局アクセスのためのマルチホップネットワークを構成すること、各ノードが基地局までの独立経路を複数有することを特徴としている。従来のスキヤタネットとの基本的な違いは、複数のピコネットに所属するブルートゥースデバイスが不要であるため、ピコネットスイッチのためのオーバーヘッドが生じないことである。MBNET において基地局に各ノードの近隣ノード情報を収集するプロトコルに関して逐次発見方式と並列発見方式を提案した。計算機シミュレーションにより、後者がより短時間に情報収集ができることを示した。次に、MBNET におけるトポロジー構築アルゴリズムを提案した。ブルートゥースのマスタデバイスが収容可能なスレーブデバイス数 (次数) をパラメータとしてシミュレーションを行い、次数を 5~7 程度とすると広域でノード数が大きなネットワークでも高い接続性能が得られることを示した。

キーワード ブルートゥース, 無線技術, マルチホップ, スキヤタネット, センサネットワーク

1. ま え が き

近年、携帯電話、PDA などの無線通信機器の開発が急激に進展している。また、短距離無線通信機器であるブルートゥース [1] が携帯電話に搭載されるようになり注目が集まっている。ブルートゥースとは PC, PDA, 携帯電話などをつなぐケーブルの代わりとして用いられる短距離無線通信機器である。また、小型、低消費電力という特長をもっているため移動通信機器に搭載するのに適している。ブルートゥースの新規格であるブルートゥース version 1.2 [2] では最大伝送速度 2 Mbit/s を実現している。

一方、LSI 技術の進展により、超小型のセンサノードなどが登場し、無線センサネットワークに関する研究開発が盛んになっている。センサネットワークは、

対象となるエリアにセンサノードを多く配置し、気温、湿度、画像などの情報を基地局へ集めるネットワークである。動画などハイエンドなセンサアプリケーションでは、高速通信可能なブルートゥースの利用も考えられる。ブルートゥースを搭載したセンサノードとして BTNode [3] が開発されている。

ブルートゥースを用いて通信をするためには、各デバイスはマスタまたは、スレーブの役割をもつ必要がある。マスタは最大七つまでのスレーブと接続できる。マスタがいくつかのスレーブを収容したネットワークをピコネットという。また、ピコネット同士が相互接続してできるネットワークをスキヤタネットという。スキヤタネットにおいて、複数のピコネットに所属しピコネット間を接続するノードをブリッジと呼ぶ。ブリッジは通信する際に接続している複数のピコネットを時分割的に切り換えて通信を行う役割をもっている。

ブルートゥースを用いて多数のセンサノードからなるセンサネットワークを構築する場合、従来手法としてはスキヤタネットを構築する必要がある [4]~[10]。しかし、スキヤタネット上でパケットの配信を

[†] 新潟大学大学院自然科学研究科, 新潟市

Graduate School of Science and Technology, Niigata University, 2-8050 Ikarashi, Niigata-shi, 950-2181 Japan

^{††} 新潟大学工学部情報工学科, 新潟市

Faculty of Engineering, Niigata University, 2-8050 Ikarashi, Niigata-shi, 950-2181 Japan

行くと、ブリッジとなったノードのピコネットの切替、スケジューリングにより性能の低下が生じる [11].

本論文では、ブルートゥースを用いたセンサネットワーク構築手法としてマルチホップブルートゥースネットワーク (Multihop Bluetooth Network: MBNET) [12] を提案する. MBNET は各ノードに複数のブルートゥースデバイスをもたせ、性能低下の要因であるブリッジをもつスキタネットを用いず、複数のピコネットを連結し構築されるネットワークである.

MBNET はネットワーク内のノードの一つが基地局となり、各ノードから基地局まで独立経路を二つ以上もたせるようにブルートゥースデバイス間にリンクを構成する. 本論文では MBNET においてすべてのノードから基地局へ近隣ノード情報を集める手法と、基地局に集めた情報をもとに、MBNET のトポロジを構築するアルゴリズムを検討する. 2. では本論文で用いる MBNET について説明する. 3. では、近隣ノード情報収集のための二つのアルゴリズムを説明し、4. ではそれらのアルゴリズムに関して計算機シミュレーションによる性能評価を行う. 5. では、MBNET のトポロジ構築アルゴリズムを示し、6. では計算機シミュレーションによる性能評価の結果を述べる. 最後に 7. で結論と今後の課題を述べる.

2. MBNET

2.1 MBNET の概要

MBNET では、ノードのうちの一つは基地局として、他のノードはセンサノード (以後ノードと呼ぶ) として動作する. MBNET の特徴を以下に示す.

(1) 各ノードは複数のブルートゥースデバイスを装備している. なお、以下では二つと仮定する.

(2) 各ノードはブルートゥースデバイスを通じてリンクを形成し他のノードと接続する.

(3) ノードの各デバイスはマスタ、スレーブのいずれかの役割をもつ.

(4) 複数のピコネットに属するデバイスはない.

(5) 各ノードは基地局までの独立した経路を 2 本もっている. これにより経路の一つが切断しても、残りの経路を使うことにより通信の信頼性が向上する.

図 1 に MBNET の構築例を示す. MBNET は図 1 の実線で示すように基地局を根とした木構造を骨格とする. 各ノードは、一つのデバイスをスレーブとして上位ノード (親ノード) とのリンクを張るために使い、もう一方のデバイスをマスタとして下位ノード (子

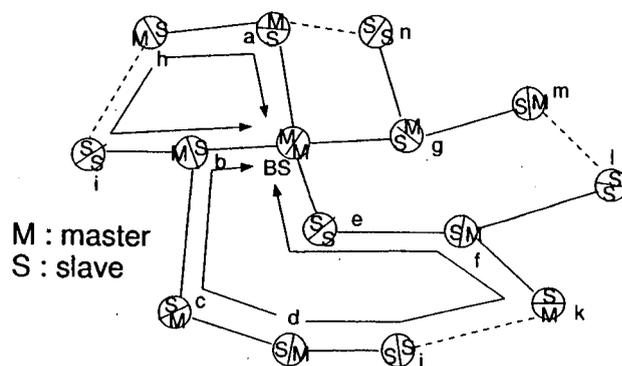


図 1 MBNET の例
Fig. 1 An example of the MBNET.

ノード) とのリンクを張るために使う. ただし、最上位レベルの基地局では両デバイスはマスタとなり、下位レベルにノードをもたないノードの両デバイスはスレーブとなる.

MBNET においてノードやブルートゥースデバイスが故障した場合、MBNET を再構築する必要がある. その間、センサ情報の転送などが中断するおそれがある. MBNET の全面的な再構築には、4.2 で述べるように数秒から数十秒を要すると見積られる. このため、MBNET では (5) に述べたように、独立経路を 2 経路もたせる構成としている. センサ情報などを常時、2 経路により転送したり、経路切断検出後、速やかに、他経路使用に切り換えることにより、センサ情報の転送中断を防止できることになる. また、残った経路を使用して MBNET 再構築をローカルに行い、再構成時間を短縮できる可能性もある.

2.2 複数ブルートゥースデバイス間の干渉

MBNET には複数のピコネットが含まれているので、通信範囲内に複数ピコネット (干渉ピコネット) が存在し、異なるデバイスがあるタイミングで同一の周波数 (チャネル) を使用した場合パケット衝突が起こるので再送が必要になる. しかし、各ピコネットにおける周波数ホッピングパターンは異なるので、基本的には複数のピコネットが同時に通信可能である. 各ピコネット内に同程度の通信需要があるとすれば、干渉ピコネット数が増えるほどパケット衝突が増えることになり、MBNET 利用の限界を与える. この干渉ピコネットによる限界については、スキタネットと同様である.

MBNET がスキタネットと異なるのは同一のノード上に複数ブルートゥースデバイスを搭載することによる相互干渉の問題である. 同一ノード上の一方のデ

デバイスが受信中に他方のデバイスが送信を行うと受信側のデバイスへの強い妨害波となり、受信感度に影響を与える可能性がある。しかし、ブルートゥースは元来パーソナルエリアネットワーク (PAN) などに利用される近距離通信機器であり、例えば会議室などで多数のブルートゥースデバイスが近接して置かれることは想定されることである。したがって、相互干渉の問題は実際の製品化に当たって十分考慮されていることが期待される。

実際に、ノート PC とブルートゥースデバイス (Bluetooth TM Ver1.2 準拠) からなるノード 5 台を、直線上に 10m 間隔で並べた高さ 52cm の台の上に配置し、隣接ノード同士が縦続接続する MBNET とスキタネットをそれぞれ構築した。MBNET では各ノードに 2 台、スキタネットでは 1 台のブルートゥースデバイスを用いる。このネットワークで、CBR (Continuous Bit Rate) タイプのトラフィックに対する UDP スループット (ペイロード 1309 バイト) を Netper を用いて測定した。測定は各 10 回行い、結果の平均値を求めた。この結果、MBNET では、1 ホップでスループットは約 700 kbit/s、4 ホップでも約 450 kbit/s のスループットが得られた。ちなみに各ノードにブルートゥースデバイス 1 台のスキタネットの場合、スループットは 1 ホップで約 550 kbit/s、4 ホップで約 100 kbit/s であった。このように、各ノードにブルートゥースデバイスが 1 台のスキタネットのときに大きくスループットが低下するのは、半二重通信に加え、ブリッジとなるデバイスにおいて、ピコネット切替が生ずるためである (1 ホップ時にもスキタネット自体は構成されているのでピコネット切替が生ずる)。各ノードにデバイス 2 台の MBNET 構成では全二重通信が可能であり、ピコネット切替も生じないので、マルチホップによるスループット低下の主要因は、前述の干渉ピコネット、相互干渉の問題であると考えられる。更に、MBNET における 2 ホップ実験を行い、1 ホップ目の距離を 10m、40m とするとスループットはそれぞれ約 670 kbit/s、410 kbit/s となった。これらの実験結果は 1 例ではあるが、相互干渉が存在してもそれを大きく上回る複数デバイス利用効果が期待できることを示唆している。本論文では相互干渉は MBNET の優位性を損ねるほどの問題にはならないと仮定して以降の議論を進める。なお、相互干渉自体を防止・低下する方法として、キャリアセンスなどの導入により同一機器上の一方のデバイスが受信

中、他方のデバイスが送信抑制を行う方式、MBNET のすべてのデバイスが時間軸上で同期をとり、同一機器上の複数デバイスが同時に送受信を行わないようにパケットの送受信タイミング制御を行う方式、指向性アンテナの利用なども考えられる。これらの検討課題は本論文の対象外である。

2.3 MBNET 構築手順

MBNET はエリアに一つの基地局と複数のノードが存在することを前提としており、基地局にすべてのノードからの近隣ノード情報を集めてトポロジーを設計することで目的に応じたネットワークを構成することができる。ここで、近隣ノード情報とは各ノードの通信範囲内 (近隣) にいるノード ID (識別子) 及びそのノードが装備しているブルートゥースデバイス ID である。MBNET では一つのノードにデバイスを複数装備するため、基地局でトポロジーを設計する際にノードとデバイスを対応づける必要がある。MBNET ではまずはじめに各ノードが近隣ノード情報を収集する。その後集めた情報を基地局まで送信する。基地局は各ノードから報告された近隣ノード情報をもとにブルートゥースデバイス間のリンク (ブルートゥースリンク) を設計する。このときすべてのノードから基地局へ独立 2 経路を確保するようにリンクを設計する。その後、各ノードが基地局からの指示に従いリンクを張ることによって MBNET 構築完了となる。具体的には以下の三つのフェーズからなる。

[近隣ノード情報の基地局への収集]

本フェーズでは、基地局がまず隣接ノードを発見する。次に隣接ノードはそれ自身の隣接ノードを発見する。これを順次繰り返すことにより基地局から離れたノードの発見も可能になる。この過程で各ノードに親ノードが定まり、各ノードは親ノードに近隣情報を報告する。互いに発見したノード間には、地理的にリンクがあるとみなし、G-リンクと呼ぶ。また、G-リンクで構築されたグラフを G-グラフと呼ぶ。

[基地局におけるトポロジー構築]

各ノードから報告された近隣ノード情報 (G-グラフ) をもとに、基地局において MBNET のトポロジーを設計する。具体的には G-リンクの中から実際に接続し、通信に用いるブルートゥースリンク (B-リンク) を選択する。ノードと B-リンクからなるグラフが MBNET のトポロジーであり、B-グラフと呼ぶ。

[リンク接続]

基地局において設計された B-リンクのトポロジーを

実現するため、まず基地局から隣接ノードへ B-リンクを設定する。設定された B-リンクを用いて B-リンク情報を下位ノードへ伝達することにより、下位ノードは更に下位ノードに対して B-リンクを設定する。このような手順を繰り返し、すべての B-リンクを設定する。

3. 近隣ノード情報収集プロトコル

3.1 前提条件

各ノードの近隣ノード情報を効率良く基地局へ収集する手法について検討を行う。ノードが近隣ノードの情報を集めるためには近隣に存在するノードと接続し、ノード ID やデバイス ID などの必要な情報を交換する必要がある。ブルートゥースでは Inquiry 状態のデバイスと Inquiry Scan 状態のデバイスが互いに発見し合うことによって情報を交換することができる。Inquiry というのは周囲に IAC パケットと呼ばれるデバイスの周波数ホッピングパターン情報を含んだパケットをブロードキャストするものである。Inquiry Scan というのは IAC パケットを受け取るための待機状態である。IAC パケットを受け取ったデバイスは、複数のデバイスが一斉に応答し、応答するパケットが衝突するのを避けるため、いったんランダム時間 (0 から 1023 の間で乱数を発生させ、その乱数分の時間スロット、1 スロットは 625 μ s) のスリープ状態に入る。その後、再度 IAC パケットを受信すると FHS パケットと呼ばれるデバイス情報を含んだパケットを相手デバイスに送信する。これを受信した相手デバイスは FHS パケットを返信する。IAC パケットを受け取ることでマスタの周波数ホッピングパターンが分かり、FHS パケットを送受信することでマスタのクロックが分かり、ピコネット内同期を取ることができる。

以下に述べる近隣情報収集プロトコルでは基地局以外のノードでは、二つのデバイスのうち一方が Inquiry 用、他方が Inquiry Scan 用とする。二つの近隣ノードがそれぞれのデバイスで接続すると、Inquiry を行ったノードは親ノード、Inquiry Scan を行ったノードは子となり、親子間でノード情報 (ノード ID と、デバイス ID) の交換を行う。

近隣ノード情報収集プロトコルにおいて、各ノードがノード発見処理を逐次的に進める方式 (逐次発見方式) と並列的に進める方式 (並列発見方式) が考えられる。以下にそれぞれの方式を記述する。

3.2 逐次発見方式

図 2 に基地局とノードの配置例を示す。相互に通

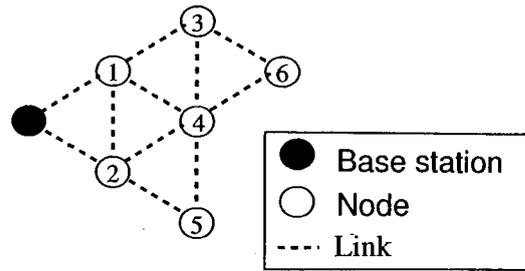


図 2 基地局とノードの配置例
Fig. 2 An example of node placement.

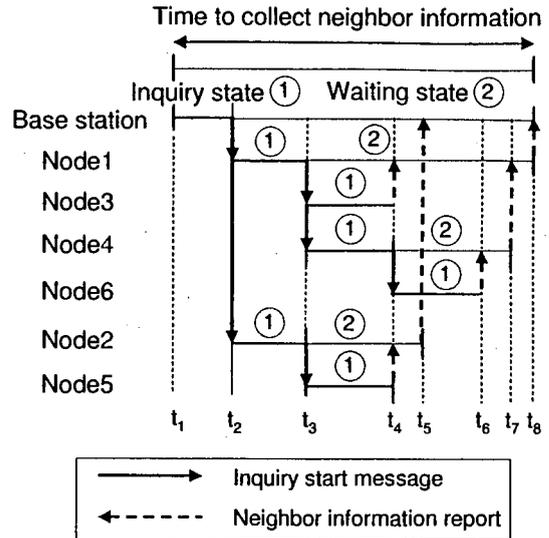


図 3 逐次発見方式タイムチャート
Fig. 3 Time chart of sequential discovery.

信範囲内にあるノード同士を破線で示している。図 2 のノード配置において逐次発見方式を実行するものとし、各ノードの Inquiry 用デバイスの状態変化の一例を図 3 に示す。まずはじめに基地局が Inquiry を開始する (t_1)。一方ですべてのノードの Inquiry Scan 用のデバイスは Inquiry Scan を行っているものとする。Inquiry を開始した基地局は一定時間 Inquiry を行った後、情報交換のできたノード 1, 2 に自身のレベル (0) を含んだ Inquiry を開始せよという命令 (Inquiry 開始メッセージ) を送信する (t_2)。この Inquiry 開始メッセージを初めて受信したノードは自身のレベルを 1 と設定し、Inquiry を開始する (t_2)。このとき Inquiry 開始メッセージの送信元を親、受信したノードを子とする。複数のノードから Inquiry 開始メッセージを受信する場合はレベルの小さいノードを親とし、レベルが等しい場合はランダムに親を選択する。Inquiry を開始したノード 1, 2 は一定時間 Inquiry を行った後、情報交換のできたノード 3~5 に Inquiry 開始メッ

セージを送信する (t_3). Inquiry を開始したノード 3~5 は以下同様の手続きを行う. 逐次発見方式ではこのように階層的に Inquiry 手続きが進んでいき, すべてのノードが周辺に存在するノードの情報を集める.

一方で Inquiry Scan 用のデバイスは自ノードの Inquiry 終了と同時に Inquiry Scan も終了する. 逐次発見方式では基地局から階層的に Inquiry を行っているため, Inquiry を終えたノードがこれ以上 Inquiry Scan を行っても, 周辺で Inquiry を行うノードが存在しない場合や, 既に発見したノードを再発見するため, 近隣ノード発見の効率が悪くなるおそれがある. そのために逐次発見方式では Inquiry 終了時に Inquiry Scan も終了する.

次に各ノードが発見した近隣ノード情報を基地局まで転送する手順を説明する. 各ノードは Inquiry 終了時, 自分に子がいるかないかを判断する. 子がいなかった場合は直ちに自分の親ノードに自分の発見した情報を報告する. 例えば図 3 ではノード 3 は Inquiry 終了時に子がいないために自分の発見した近隣ノード情報を直ちにノード 1 へ報告する (t_4). ノード 5 も同様である. 子がいる場合は待機状態となり, すべての子からの報告を待つ. すべての子からの情報を受け取ると, 自分の親に子からの情報と自分の発見した情報を報告する. 例えば, ノード 2 はノード 5 からの報告後に基地局へ報告する (t_5). これを繰り返すことにより, 基地局にすべてのノードの近隣ノード情報を集めることができる. ノード情報発見, 報告の過程で一時的に設定した接続は, すべて切断する.

3.3 並列発見方式

図 2 のノード配置において並列発見方式を実行するものとし, 各ノードの Inquiry 用デバイスの状態変化の一例を図 4 に示す. 逐次発見方式と同様に基地局から Inquiry を行い, Inquiry Scan 用のデバイスは自ノードが Inquiry を終了するまで Inquiry Scan を継続して行う.

Inquiry を開始した基地局は一定時間 Inquiry を行い情報交換したノード 1, 2 に自身のレベル (0) を含んだ Inquiry 開始メッセージを送る. このとき逐次発見方式では基地局の Inquiry 終了後, ノード 1, 2 に Inquiry 開始メッセージを送信していたが, 並列発見方式では Inquiry 中に情報交換したノードにすぐさま Inquiry 開始メッセージを送信する (t_1, t_2). Inquiry 開始メッセージを初めて受け取ったノード 1 は自身のレベルを設定し, Inquiry 開始メッセージ送信元である

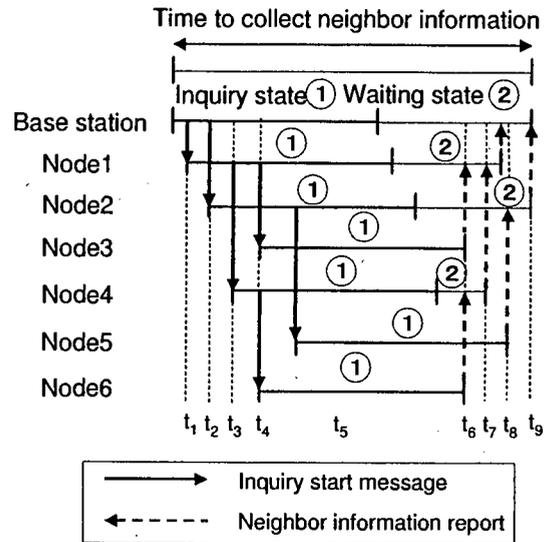


図 4 並列発見方式タイムチャート
Fig. 4 Time chart of parallel discovery.

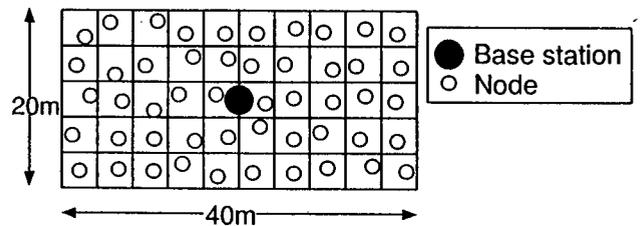


図 5 格子型配置例
Fig. 5 An example of lattice-based placement.

基地局を親とし, Inquiry を開始する (t_1). ノード 1 は一定時間 Inquiry を行い, Inquiry 中に他ノードと情報を交換すると直ちに, そのノードあてに Inquiry 開始メッセージを送信する (t_3, t_4). 以上の手続きを繰り返すことによりすべてのノードが周辺に存在するノードを発見することができる.

各ノードが発見した情報を基地局まで転送する手順は逐次発見方式と同様である.

3.4 シミュレーション条件

3.2, 3.3 で述べた二つの近隣ノード情報収集プロトコルを用いて, すべてのノードの近隣ノード情報を基地局まで集めるシミュレーションを行った. 平らな見通しの効く場所にノードがほぼ均等な密度で配置されるセンサネットワークを想定し, 長方形のエリアを一定間隔で格子状に区切り, 各格子内に一つのノードをランダムに配置する (図 5). また, 基地局をエリアの中央に配置する. これを格子型配置と呼ぶこととする. ノード密度は格子の間隔に依存する. 例えばエリアの広さを $20\text{ m} \times 40\text{ m}$, 格子間隔を 4 m とすると, 作られる格子数は $5 \times 10 = 50$ (個) になり, エリア

表 1 シミュレーション条件
Table 1 Simulation conditions.

Area	20 m × 40 m, 40 m × 40 m
Lattice unit length	2 m, 4 m
Physical and data-link layer	Bluetooth ver.1.1
Transmission range	10 m
Number of simulations	50

にはノード 50 個, 基地局 1 個が存在することになる。ブルートゥースの通信半径を 10 m とすると, 格子間隔を 4 m 以下とすることにより, 隣接エリアのノードとリンク確立が可能になる。

表 1 の条件でシミュレーションを行った。物理層では厳密な電波伝搬のモデル, ブルートゥースデバイスの送信電力, 受信感度などは厳密にモデル化せず, 単に, ブルートゥースデバイスの通信範囲を 10 m とし, 受信デバイスから 10 m 以内の他のデバイスが同一チャネルを利用してパケット送信を行う場合にパケット衝突が起こるものと仮定した。これは通常の無線 LAN のシミュレーションツールなどがサポートする物理層のモデル化に比べて簡易であるが, FHSS 方式では複数のデバイスが同時に同一チャネルを利用する確率は極めて低いため, 許容されると考えられる。

4. 近隣ノード情報収集プロトコルの性能評価

評価指標として以下のものを定義する。ノード情報収集時間: 基地局が Inquiry 開始後すべてのノードからの近隣ノード情報を受け取るまでの時間である。

近隣ノード発見率: 各ノードが通信範囲内にあるノードを発見できる確率である。すなわち, 各ノードが発見した近隣ノード数の総和を N_d , ノードの通信範囲内に存在するノード数の総和を N とすると, N_d/N で表される。

各ノードが Inquiry を行う時間をパラメータとしてシミュレーションを行った。Inquiry を行う時間の単位として Length を用いている。これはブルートゥースで Inquiry を行う最低単位の時間を示すもので 1 Length は 1.28 s である。

4.1 シミュレーション結果

シミュレーション結果を図 6~図 8 に示す。図 6 は格子の間隔を 4 m とし, エリアの広さを 40 m × 40 m としたもので, エリア内に 100 のセンサノードが存在する。例えば Length = 3 では, 近隣ノード発見確率は逐次発見方式が 20% 近く高く, ノード情報収集時間

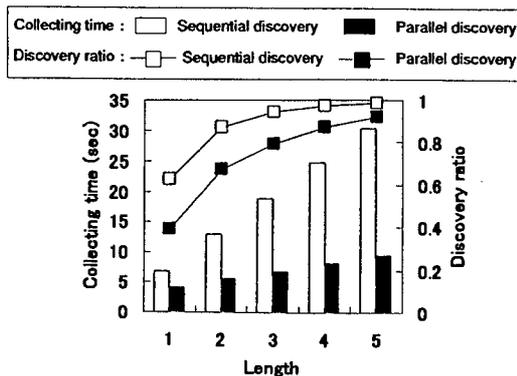


図 6 ノード情報収集時間と近隣ノード発見率の特性 (40 m × 40 m, 格子間隔 4 m)

Fig. 6 The characteristics of neighbor information collecting time and neighbor discovery ratio. (40 m × 40 m, Lattice unit length 4 m)

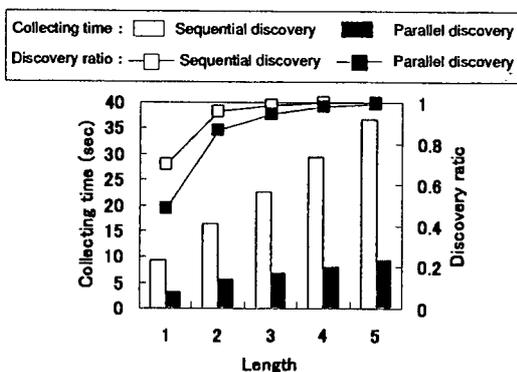


図 7 ノード情報収集時間と近隣ノード発見率の特性 (20 m × 40 m, 格子間隔 4 m)

Fig. 7 The characteristics of neighbor information collecting time and neighbor discovery ratio. (20 m × 40 m, Lattice unit length 4 m)

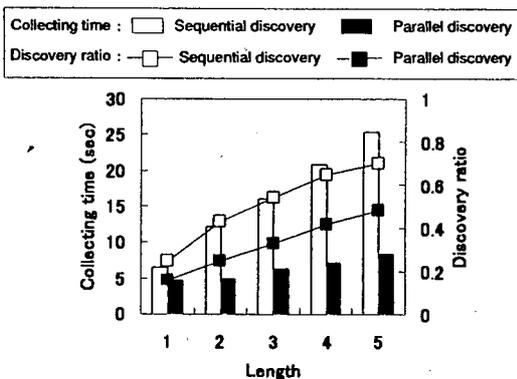


図 8 ノード情報収集時間と近隣ノード発見率の特性 (40 m × 40 m, 格子間隔 2 m)

Fig. 8 The characteristics of neighbor information collecting time and neighbor discovery ratio. (40 m × 40 m, Lattice unit length 2 m)

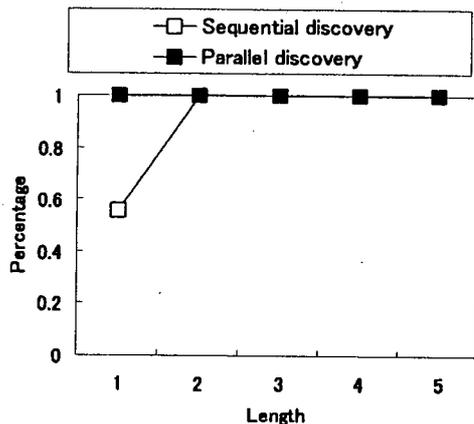


図9 基地局まで独立な2経路をもつ確率
(40 m × 40 m, 格子間隔 4 m)

Fig.9 Percentage of two disjoint paths to the base station. (40 m × 40 m, Lattice unit length 4 m)

は並列発見方式が逐次発見方式の40%程度になっていることが分かる。通信範囲内で数十のノードが一度にInquiryを行うとパケットが衝突し、正確に情報交換することができない。並列発見手法では多くのノードが一度にInquiryを行うことでノード情報収集時間を短縮できるが、そのためにパケット衝突が起きやすくなり近隣ノード発見率が低くなっているものと思われる。Lengthが大きくなるほど近隣ノード発見率における両方式の差は縮まり、ノード情報収集時間における両方式の差は広がること分かる。

図7はエリアの縦の長さを半分にし、エリアに存在するノード数を半分にしたものである。この場合は、図8と比べると、逐次発見方式はあまり変化が見られないが、並列発見方式では近隣ノード発見率がかなり上がっている。これは一度にInquiryを行うノード数が減少し、Inquiry時のパケット衝突の確率が減少したためである。

図8は格子間隔を縦横ともに半分にし、ノード密度を4倍にしたものである。このため、上記とは逆の現象により、図8と比べると二つの方法ともに近隣ノード発見率が低下している。近隣ノード発見率が低下すると、基地局までの経路を確保できないノードが増えるおそれがある：そこで、各ノードが基地局まで独立な2経路をもつ割合を調べた(図9)。その結果、どちらの方式もInquiry時間が2以上のときには近隣ノード発見率が低くとも、基地局まで独立な経路をもつことが分かった。このように近隣ノード発見率が低くても、基地局への独立な2経路を確保するために十分なノード発見ができていくことが分かる。

ノード配置完了後のMBNET構築所要時間の主要因はノード情報収集時間とリンク接続時間である(基地局でのトポロジー構築はコンピュータ内での演算時間であり無視できる)。ノード情報収集時間に対する要求条件はアプリケーションに大きく依存する。例えば、会議場などで複数の携帯PCをマルチホップで接続するような場合、10秒程度でリンク接続まで完了することが望ましく、ノード情報収集に許容される時間は数秒程度であろう。一方、監視カメラからの情報収集などの用途の場合、現状のように有線でネットワークを構築するとすれば、ネットワーク構築には規模にもよるが数時間以上かかる。そこで数十分でネットワーク構築が完了できれば大きな優位点となる。この場合、ノード情報収集に数分程度かけることは十分許容されることになる。このような観点から、上記で示したノード情報収集時間の評価例は広いアプリケーションへの対応可能性を示唆しているといえる。

5. MBNETトポロジー構築アルゴリズム

5.1 前提条件

2.3に述べたように2ノードが隣接関係にあると、その間のリンクをG-リンクと呼び、ノードとG-リンクの集合をG-グラフと呼ぶ。5.1, 5.2では、単にリンクという場合、G-リンクを指すものとする。基地局は近隣ノード情報収集プロトコルによりノード情報を収集し、G-グラフを得る。G-グラフ上で基地局のレベルを0とし、基地局からの最小ホップ数として各ノードのレベルが定まる。レベルが小さいほど上位のレベルとする。このレベルは近隣ノード情報収集プロトコルで使用されたレベルと同じ必要はなく、新たに定めればよい。MBNETトポロジー構築アルゴリズムでは、G-グラフにおいてレベル最大の各ノードに対して中継ノードを順次選択し、基地局までの独立経路を2本作る。このとき、経路上のあるノードにおいて、基地局への次ホップのノードは直上のレベルのノードから選択する。直上のレベルからノードを選択できない場合は同一レベルのノードから選択する。すなわちレベルに関して後戻りはしないことを条件として経路を選択する。この結果、レベル最大のノードと基地局間にループが構成されるので、経路上のどのノードも基地局への独立経路を少なくとも2本もつことが保証される。レベル最大の各ノードに対する上記の処理を終了したらどの経路にも含まれないノードに着目し、その中の最大レベルの各ノードに対し、同様の処理を

行う。これを繰り返すことにより B-グラフを構築する。B-グラフは 2.3 で述べたようにノード間のブルートウースリンク (B-リンク) とノードの集合である。

B-グラフ構築の条件として、各ノードが収容できる下位レベルのノード数 (度数) を用いる。マスタデバイスが収容するスレーブ数に相当し、最大 7 である。G-グラフにおいてレベル i ($i \geq 1$) のノード群を M_i 、ノード数を N_i とする。次数を d とすると、 M_{i-1} のノードがリンクを張ることのできる、 M_i の最大ノード数は $d \times N_{i-1}$ であるので式 (1) の条件が必要になる。ただし、 $i = 1$ の場合、基地局の両方のデバイスはマスタなので、式 (2) となる。

$$N_i \leq d \times N_{i-1} \quad (i \geq 2) \quad (1)$$

$$N_i \leq 2 \times d \quad (i = 1) \quad (2)$$

B-グラフでは各レベルのノード数は式 (1), (2) を満たす必要がある。このため第 1 段階として、G-グラフに対して (1), (2) の条件を考慮し、各レベルのノード数を調整する。この結果得られるグラフを H-グラフ、そのリンクを H-リンクと呼ぶ。次に H-グラフから B-グラフを構築する。このように、MBNET トポロジー構築アルゴリズムは H-グラフ構築アルゴリズムと B-グラフ構築アルゴリズムの 2 段階からなる。

5.2 H-グラフ構築アルゴリズム

[ステップ 1]

G-グラフの M_i における一つのノードの、 M_{i-1} への平均リンク数を p とする。 M_{i-1} のノード x が、 x とリンクをもっている M_i のノードへ B-リンクを設立する確率は $1/p$ である。よって、ノード x から M_i へのリンク数を u とすると、ノード x から M_i への平均 B-リンク数は u/p である。式 (1), (2) を満たすため、平均 B-リンク数を式 (3), (4) のように調整することとする。

$$u \leq d \times p \quad (i \geq 2) \quad (3)$$

$$u \leq 2 \times d \times p \quad (i = 1) \quad (4)$$

式 (3), (4) を満たさない M_{i-1} のノード x がある場合、ノード x がリンクをもつ M_i のノードの一つについて、 M_{i-1} のノードとのリンクを切断し、 M_{i+1} へ移す。リンク切断を行うノードは、移動後に上位レベルとのリンク数をできるだけ多くもてるように、対象となるノードの中で、 M_i において他のノードとのリンク数が最大のノードとする。このような処理を繰り返す。

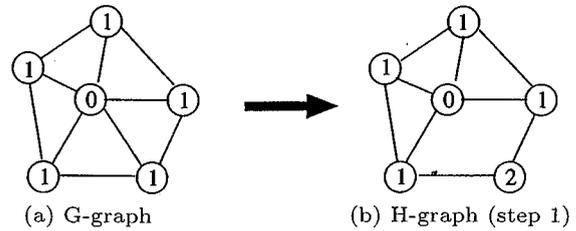


図 10 H-グラフの構成例 (次数 2 の場合)
Fig. 10 An example of H-graph generation-Step 1. (Degree 2)

返し、式 (3), (4) が満たされるように、基地局から順次、各レベルのノード数を調整する。ここでノードの調整例を図 10 に示す。円の中の数字はノードのレベルを示す。(a) の状態で M_1 のノード数は 5 個である。レベル 0 のノードの両デバイスはマスタとなる。 $d = 2$ の場合基地局は、2 (デバイス数) \times 2 (次数) = 4 個のスレーブとしか接続できない。よって、 M_1 のノードから一つ選択し基地局とのリンクの切断を行うことで M_1 のノード数を 1 個削減し 4 個とする。この結果、 M_2 のノードが 1 個となる。このように、順次各レベルにおいてノード数の調整を行う。ステップ 1 で構成されたグラフの最下位レベルを k とする。

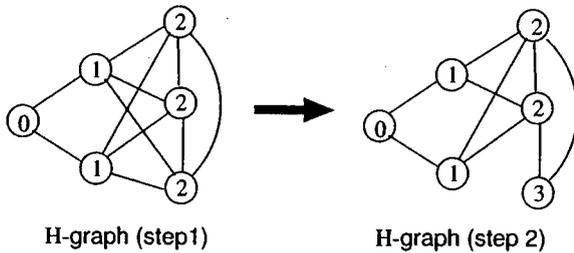
[ステップ 2]

(i) $N_{k-1} < 2N_k/d$ の場合

M_k のノードの両デバイスはスレーブになる。 M_k の各ノードは M_{k-1} からのリンクを 2 本もつ必要がある。この場合、 M_{k-1} のノード x が、 x とリンクをもっている M_k のノードとの間に B-リンクを設立する確率は $2/p$ である。よって、ノード x の M_k へのリンク数を u とすると、式 (3) の代わりに式 (5) を使用する必要がある。

$$u \leq d \times p \times 1/2 \quad (5)$$

式 (5) を満たさない場合、ノード x がリンクをもつ M_k のノードの一つについて、 M_{k-1} のノードとのリンクを切断し、 M_{k+1} へ移す。リンク切断を行うノードは、移動後に上位レベルとのリンク数をできるだけ多くもてるように、対象となるノードの中で、 M_k において他のノードとのリンク数が最大のノードとする。このような処理を繰り返す。式 (5) が満たされるように、レベル k のノード数を調整する。例を図 11 に示す。レベル 2 において $d = 2$ のため、レベル 1 のノードが式 (5) の条件を満たしていない。そこで、ノードの一つをレベル 3 に移す。

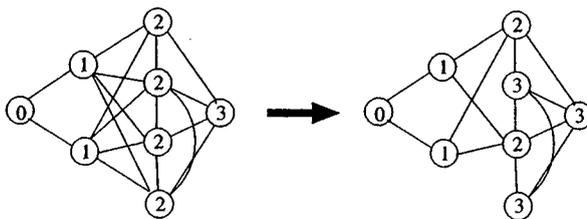


H-graph (step 1)

H-graph (step 2)

図 11 ノード数の調整例その 1 (次数 2 の場合)

Fig. 11 An example of H-graph generation-Step 2, No. 1. (Degree 2)



H-graph (step 1)

H-graph (step 2)

図 12 ノード数の調整例その 2 (次数 2 の場合)

Fig. 12 An example of H-graph generation-Step 2, No. 2. (Degree 2)

(ii) $N_{k-1} > 2N_k/d$ の場合

M_k の各ノードは両デバイスがスレーブとなるので M_{k-1} へのリンクを 2 本もち、更に M_{k-1} のノードの中にも、 M_k のノードからのリンクを収容せず、両デバイスがスレーブとなって M_{k-2} のノードへのリンクを 2 本もつことがある。そこで、安全側としてすべての M_{k-1} のノードが M_{k-2} のノードへリンクを 2 本もつ場合を想定し、 M_{k-2} のノード x について、式 (5) を満たさない場合、ノード x がリンクをもつ M_{k-1} のノードの一つについて、 M_{k-1} のノードとのリンクを切断し、 M_k へ移す。このような処理を繰り返す、式 (5) が満たされるように、 M_{k-1} のノード数を調整する。例を図 12 に示す。レベル 2 において $p=2$ のため、レベル 1 のノードが式 (5) の条件を満たしていない。そこで二つのノードをレベル 3 に移す。

以上の手順を経て、H-グラフが構成される。

5.3 B-グラフ構築アルゴリズム

5.3 ではリンクとは H-リンクを指す。H-グラフ構築アルゴリズムにおいて作成された H-グラフをもとに、B-リンク (ブルートゥースリンク) を選択し、各ノードから基地局への独立した 2 経路を作成する。具体的には H-グラフの最下位レベルのノードから上位レベルへと基地局までの経路を構成し、そこに含まれるリンクを B-リンクとする。このとき基地局への 2 経路

を独立したものにするため、各ノードに A, B, C のクラスを与える。初期状態では、基地局のデバイスの片方は A, もう一方は B に属し、他のノードはすべて C に属している。1 本目の経路で中継用として選択するノードは、クラス A, またはクラス C のノードとする。クラス C のノードを選択した場合はそのノードのクラスを A に変更する。2 本目の経路では、クラス B, またはクラス C のノードから選択する。クラス C のノードを選択した場合、そのノードのクラスを B に変更する。これにより、1 本目の経路と 2 本目の経路が同じ中継ノードを選択することを防ぎ、互いに独立した経路になることを保障している。詳細なアルゴリズムを以下に示す。

H-グラフの最下位レベルを m , レベル i のノード群を S_i , ノード数を N_i , レベル i の j 番目のノード j を (i, j) とする ($i=0, 1, \dots, m, j=1, 2, \dots, N_i$).

(1) S_m において上位レベルへの B-リンクをもっていないノード (m, j) を選択する。選択するノードは S_{m-1} へのリンク数が最も少ないノードとする。 $i=m$ と設定する。

(2) S_{i-1} のクラス A または C のノードの中で、ノード (i, j) とリンクをもち、既に S_i のノードとの間に設定されている B-リンクの数が d 未満かつ最も少ないノードを選択する。これを $(i-1, v)$ とする。もし、ノード $(i-1, v)$ がクラス C なら、そのクラスを A に変更する。もし、同条件のノードが複数あった場合、同レベルとのリンク数が最も少ないノードとする。もし、ノード $(i-1, v)$ が選択できなかった場合、同レベルのノード (i, s) を選択する。

(3) (2) において選択したノードを新たに (i, j) として (2) の処理を繰り返す。もし、(2) で選択されたノード $(i-1, v)$ が基地局か、既に上位ノードまたは同レベルのノードへ B-リンクをもっている場合、基地局までの経路が確立するので、そこで (2) の処理を停止する。その結果、(1) で選択したノード (m, j) に対する 1 本目の経路が設立される。

(4) 2 本目の経路を設立するため、(1) で選択したノード (m, j) に対して (2), (3) と同様の処理を繰り返す。ただし、選択する上位レベルまたは同レベルのノードはクラス B または C のノードとする。クラス C のノードを選択した場合は、そのクラスを B に変更する。その結果、(1) で選択したノード (m, j) に対する 2 本目の経路が設立される。

(5) 上記の処理がレベル m において終了したらレベ

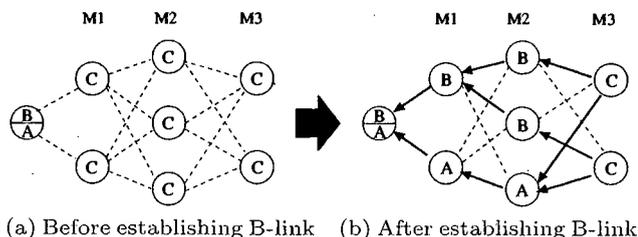


図 13 B-グラフ構築例
Fig. 13 An example of B-graph generation.

ル $m-1$ において、下位レベルのノードからの B-リンクをもっていないノードについて (1)~(4) の処理を行う。

(6) (5) をレベル 1 まで行う。

(7) 基地局への経路選択において、次ホップのノードが選択できない場合、現ノードの選択をキャンセルし、前ノードに戻り選択をやり直す。このように順次遡って経路選択を試みる。この結果、経路選択に成功しなければ、途中までの経路選択はキャンセルする。

B-グラフの構築例を図 13 に示す。

6. トポロジー構築アルゴリズムの性能評価

6.1 シミュレーション条件

4.1 と同様の基地局、ノード配置を考える。表 2 にシミュレーション条件をまとめる。格子間隔を 4m とする。ここでは次数を 2 から 7 として評価を行った。B-グラフに関して、次の評価指標を用いる。

接続性能：各ノードがもっている基地局への独立した経路の本数に着目し、評価尺度 X_i ($i=0\sim3$) を下記のように定義する。 X_2 の割合が大きいほど接続性能が高いことを意味する。

X_2 ：基地局までの独立経路を 2 本もっているノードの割合。

X_1 ：基地局までの独立経路を 1 本もっているノードの割合。

X_0 ：基地局までの経路を 1 本もたないノードの割合。

平均ホップ数：各ノードがもっている基地局までの最短経路のホップ数の平均値。

最大ホップ数：基地局までの最短経路が最長となるノードの最短経路ホップ数の平均値。

6.2 シミュレーション結果

(1) 接続性能

表 3 に接続性能を示す。各エリア (ノード数) 条件において、次数が高くなるほど接続性能が向上する

表 2 シミュレーション条件
Table 2 Simulation conditions.

Number of nodes and area	25 (20 m × 20 m) 100 (40 m × 40 m) 400 (80 m × 80 m)
G-graph configuration	G-links exist between nodes with the distance no greater than 10 m.
Number of simulations	50

表 3 接続性能 (%)
Table 3 Connectivity performance. (%)

Degree	20 m × 20 m			40 m × 40 m			80 m × 80 m		
	X2	X1	X0	X2	X1	X0	X2	X1	X0
2	89.5	10.0	0.5	83.2	13.8	3.0	80.5	12.9	6.6
3	99.4	0.6	0	99.4	0.5	0.1	99.7	0.2	0.1
4	99.2	0.8	0	99.9	0.1	0	100	0	0
5	100	0	0	100	0	0	100	0	0
6	100	0	0	100	0	0	100	0	0
7	100	0	0	100	0	0	100	0	0

ことが分かる。次数 2 の場合には、H-グラフ構築の際、階層が増え、B-グラフ構築時の経路選択の自由度が低いため、接続性能が低下する。次数が増えることにより、接続性能は急速に改善され、特に、次数 5 以上では、すべての場合で、 X_2 が 100% となっている。このように、次数が比較的小さな値でも多くのノードを独立 2 経路の条件のもとで収容可能であり、ブルートゥース仕様に基づく次数 7 の制約は問題とはならないことが分かる。また、提案する MBNET トポロジー構築アルゴリズムは 2.1 に述べた独立 2 経路の条件を達成するため、十分な性能を有していることが分かる。

(2) 平均、最大ホップ数

図 14 に B-グラフの平均ホップ数と、最大ホップ数を示す。平均ホップ数、最大ホップ数とも、次数が増えるにつれ、減少している。例えば、次数が 2 から 7 に増えると、平均ホップ数は約 50% になる。仮に、通信範囲が大きく、全ノードが基地局と通信可能とすれば、次数と最大レベル数は反比例の関係となる。したがって、次数が 2 から 7 になると 3.5 倍であるので、下位ノードの収容率も 3.5 倍となり、最大レベル数は 30% 程度、ホップ数も同程度になるはずである。実際には、通信範囲 10m の制約があるため、30% にはならず、50% 程度になっていると考えられる。

(3) B-グラフと G-グラフの平均ホップ数

図 15 に B-グラフと G-グラフの平均ホップ数を示す。G-グラフの平均ホップ数はノードの初期配置のホップ数なので、次数に関係なく一定となっている。

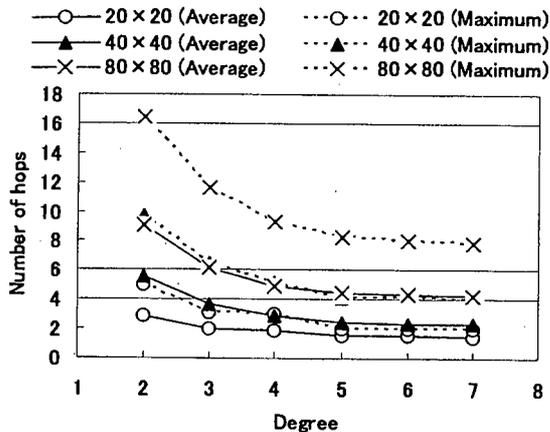


図 14 平均, 最大ホップ数

Fig. 14 Average and maximum number of hops to the base station.

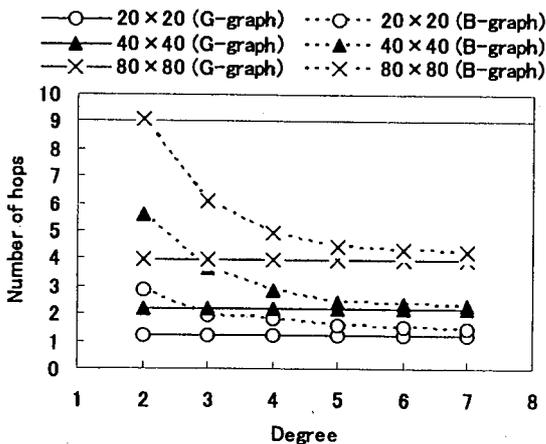


図 15 B-グラフと G-グラフのホップ数

Fig. 15 Number of hops to the base station in B-graph and G-graph.

各エリアとも次数が高くなるにつれて B-グラフのホップ数は G-グラフのホップ数に近づいている。これは、次数が高くなるにつれて H-グラフ構築時にノードの下位レベルへの移行があまり起きず、G-グラフでのレベルとの乖離が小さいためである。次数 7 では G-グラフに比べて、B-グラフの平均ホップ数の増加はわずかな比率であり、この意味からも次数 7 程度が望ましい値であることが分かる。

7. むすび

本論文ではセンサネットワークなどの用途を想定し、基地局と複数のノードをブルートゥースにより接続するためのネットワークアーキテクチャ、MBNET を提案した。MBNET では各ノードが複数ブルートゥースデバイスを持ち、スキャタネットを利用せずに基地局アクセスのためのマルチホップネットワークを構成す

ること、各ノードが基地局までの独立経路を複数有することを特徴としている。MBNET において基地局に各ノードの近隣ノード情報を収集するプロトコルに関して逐次発見方式と並列発見方式を示し、シミュレーションをより、後者がより短時間に情報収集ができることを示した。次に、MBNET におけるトポロジー構築アルゴリズムを提案した。ブルートゥースのマスターデバイスが収容可能なスレーブデバイス数(次数)をパラメータとしてシミュレーションを行い、次数を 5~7 程度とすると広域でノード数が大きなネットワークでも高い接続性能が得られることを示した。

今後の課題として、ブルートゥースにおいて発見時間の短縮を見込んだ fast connection などが組み込まれたブルートゥース ver1.2 での近隣ノード情報収集プロトコルの性能評価や実装・動作検証、ノードの追加、故障による離脱などを考慮した際のトポロジー再構築法などが挙げられる。なお、本研究経費の一部に平成 16 年度科学研究費補助金(研究課題:マルチホップ無線のシステム障害を防ぐダイナミックなネットワーク制御)及び電気通信普及財団助成(研究課題:マルチホップ・ブルートゥース・ネットワークの研究)を利用した。

文 献

- [1] Bluetooth SIG, Specification of Bluetooth System Core 1.1.
- [2] Bluetooth SIG, Specification of Bluetooth System Core 1.2.
- [3] "http://www.btnode.ethz.ch/"
- [4] T. Salonidis, P. Bhagwat, L. Tassiulas, and R. LaMaira, "Distributed topology construction of Bluetooth personal area networks," INFOCOM 2001, pp.1577-1586, 2001.
- [5] C. Law and K-Y. Siu, "A Bluetooth scatternet formation algorithm," Globecom 2001, vol.5, pp.2864-2869, 2001.
- [6] L. Ramachandran, M. Kappor, A. Sarkar, and A. Aggarwal, "Clustering algorithms for wireless adhoc networks," International Workshop on Discrete Algorithms and methods for Mobile Computing and Communications, pp.54-63, Boston, Aug. 2000.
- [7] G.V. Zaruba, S. Basagni, and I. Chlamtac, "Bluetrees-Scatternet formation to enable Bluetooth based ad hoc networks," ICC 2001, vol.1, pp.273-277, 2001.
- [8] Z. Wang, R.J. Thomas, and Z. Hass, "Bluenet a new scatternet formation scheme," 35th Hawaii International Conference on System Science (HICSS-35), Jan. 2002.
- [9] G. Tan, A. Miu, J. Guttag, and H. Balakrishnan, "Forming scatternets from Bluetooth personal area

networks,” MIT Technical Report, MIT-LCS-TR-826, Oct. 2001.

- [10] 間瀬憲一, 佐藤 正, “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タネットワークオペレーションプロトコル,” 信学論(B), vol.J85-B, no.12, pp.2025-2024, Dec. 2002.
- [11] H. Asano and K. Mase, “Connectivity experiments in a Bluetooth-based MultiHop networks,” WPMC, MA7-4, 2003.
- [12] K. Mase, et. al. “An architecture topology and performance of the multihop Bluetooth network (MBNET),” VTC, vol.5, pp.2600-2604, Spring 2004.
(平成 17 年 6 月 15 日受付, 18 年 1 月 19 日再受付)



八木 啓之 (学生員)

平 16 新潟大・工・情報卒。現在, 同大学院自然科学研究科修士課程在学中。



柄沢 直之 (正員)

平 8 新潟大・工・情報卒。平 10 同大学院博士前期課程了。同年日本電気(株)入社。平 11 新潟大助手。無線マルチホップネットワーク, 移動通信ネットワーク, ネットワークの通信品質・効用の研究に従事。平 8 年度本会論文賞受賞。



間瀬 憲一 (正員:フェロー)

昭 45 早大・理工・電気通信卒。昭 47 同大学院修士課程了。同年電電公社武蔵野電気通信研究所入所。以来, 通信網構成法, ダイナミックルーチング, ネットワーク設計法, 通信品質, コンピュータネットワーク, マルチホップ無線ネットワーク等の研究に従事。昭 53~54 米国コロンビア大客員研究員。平 6 年 7 月, NTT 通信網研究所・通信品質研究部長。平 8 年 7 月, NTT マルチメディアネットワーク研究所・情報通信アセスメント研究部長。平 11 より新潟大学工学部情報工学科教授。平 16 より, 新潟大学大学院自然科学研究科教授, 同工学部付属国際情報通信教育研究センター長, 同超域研究機構プロジェクトリーダー。工博。平 5 年度本会論文賞受賞。平 9 年度第 13 回電気通信普及財団テレコムシステム技術賞受賞。IEEE Fellow。著書「マルチメディアネットワークとコミュニケーション品質」(共著), 「無線 LAN とユビキタスネットワーク」(共著)。



松井 貴宏

平 15 新潟大・工・情報卒。平 17 同大学院自然科学研究科修士課程了。同年船井電機(株)入社。



長谷川貴史 (学生員)

平 16 新潟大・工・情報卒。現在, 同大学院自然科学研究科修士課程在学中。