

## アドホックネットワークのための方向指定型ゾーンルーティングプロトコル

本間義孝<sup>†1</sup> 小山 明夫<sup>†2</sup> バロリ・レオナルド<sup>†3</sup>

近年、無線通信端末のみで一時的に構成されるアドホックネットワークへの注目が高まっている。これまでにアドホックネットワークのルーティングプロトコルとして様々なものが提案されているが、その性能はネットワークの規模や移動度に左右される。既存プロトコルの一つであるZRP(Zone Routing Protocol)は他のプロトコルに比べて高い柔軟性を持ち、多くの状況に対応できるプロトコルであるが、無駄な制御パケットの送信によりネットワークへの負荷が増加し、その結果ネットワークの性能を低下させてしまう。本稿では、過去に探索したノードへのルート再探索の際に探索方向を限定してネットワークへの負荷を減らす事ができるSBZRP(Selective-Bordercasting Zone Routing Protocol)を提案し、ZRPと比較してネットワークの性能を向上させる事ができる事を示す。

### A Direction Selective Zone Routing Protocol for Ad-Hoc Networks

Yoshitaka Honma<sup>†1</sup> Akio Koyama<sup>†2</sup> and Leonard Barolli<sup>†3</sup>

Recently, a lot of research is going on in ad-hoc networks and many routing protocols for ad-hoc networks are proposed. But, the performance of these protocols depends on the scale and the frequency of network movement. One of known routing protocols for ad-hoc networks is ZRP (Zone Routing Protocol). The performance of ZRP is better than other protocols. However in ZRP, many useless control packets are sent in the network, thus the load of network is increased resulting in a decrease of network performance. In this paper, we propose a SBZRP (Selective Bordercasting Zone Routing Protocol) in order to reduce the network load by limiting the number of sending control packets when searching for a new route. The performance evaluation via simulations shows that the proposed SBZRP has a good behavior and a better performance compared with ZRP.

#### 1 はじめに

近年、コンピュータの小型化、高性能化が進み、ノート型PCやPDA等の携帯型端末が広く利用されるようになってきた。また、通信技術の高速化、低価格化により、ネットワークに接続するコンピュータの割合も急激に増加している。このような背景から、携帯型端末をネットワークに接続したいという要求が高まっている。

携帯型端末をネットワークに接続する方法は、端末の移動性を妨げないようにする為に無線を用いるのが一般的である。しかし、現在広く利用

されている無線LAN[1]では、端末がルーティングを行う事はできず、直接通信できない端末とはアクセスポイントと呼ばれる固定端末を用いて有線ネットワークを介する事により実現する。しかしこの方法では、通信を行う携帯型端末はアクセスポイントとの通信が可能な位置に存在する必要がある、携帯型端末の移動が制限される。また、このようなネットワークでは、災害などでアクセスポイントが破壊された場合にネットワークが構築できない、イベント会場などで一時的にネットワークを構築したい場合に利用価値に見合わないコストがかかるという問題がある。

現在、このような問題を解決する為にアドホックネットワークの研究が盛んに行われている[2]。アドホックネットワークでは、個々の携帯型端末がルーティングの機能を持つ事によって、携帯型端末のみでネットワークを構築することができる。これまでに、アドホックネットワークのルー

†1 山形大学大学院理工学研究科  
Graduate School of Science and Engineering,  
Yamagata University  
†2 山形大学工学部  
Faculty of Engineering, Yamagata University  
†3 福岡工業大学情報工学部  
Faculty of Information Engineering, Fukuoka  
Institute of Technology (FIT)

ティングプロトコルは MANET Working Group[3]等により研究され、様々なものが提案されているが[4,5,6,7]、その中でも ZRP(Zone Routing Protocol)は他のプロトコルに比べて適用範囲が広いと考えられるプロトコルである[8]。しかし、経路を探索する際に多くの制御バケットを生成してしまい、ネットワークの性能を低下させてしまう問題がある。そこで本稿では、過去に経路探索が成功している宛先への再探索の際に探索方向を限定するゾーン型のルーティングプロトコル SBZRP(Selective Bordercasting Zone Routing Protocol)を提案し、ZRP との比較を行う。

## 2 アドホックルーティング

アドホックネットワークでは各ノードが自由に移動するので、ネットワークトポロジが頻繁に変化する。そのため、効率的に宛先ノードまでの経路情報を取得する必要がある。その基本的な方法はプロアクティブ型とリアクティブ型の2種類に分類することができる。

### 2.1 プロアクティブ型プロトコル

プロアクティブ型プロトコルは、各ノードがネットワークの他のノードへの経路情報を事前に取得しておき、通信を行うときはルーティングテーブルを参照してデータを送信する方法である。この方法では、通信を行うときに経路を探索する必要がないのでデータ送信時の遅延が少ないが、通信を行わないときでも経路情報を更新する必要があるため、ネットワークのトラフィックが増加する。

### 2.2 リアクティブ型プロトコル

リアクティブ型プロトコルは、通信を行うときにだけ経路情報を取得する方法である。この方法では、ルーティングテーブルの更新などが不要なので無駄なトラフィックの増加を防ぐことができるが、通信要求が発生してから経路を探索しなければならないので、データ送信時の遅延が大きくなる。

### 2.3 ネットワーク環境とプロトコルの効率

実際のネットワークの環境によって、プロアクティブ型プロトコルとリアクティブ型プロトコルのどちらが有効なのかは変わってくる。例えばノードの移動度が小さい場合は、一度作成した

ルーティングテーブルを長く使えるので、プロアクティブ型プロトコルのほうが効率的であり、逆に移動度が大きい場合は、ルーティングテーブルの更新を頻繁に行わなければならないので、通信を行う際に経路情報を取得するリアクティブ型プロトコルの方が効率的である。また、ネットワークの規模に関しては、規模が大きくなると更新情報をネットワーク全体に伝えるのが困難になるため、規模が小さい場合はプロアクティブ型プロトコル、規模が大きい場合はリアクティブ型プロトコルが効率的である。

## 3 既存プロトコル

プロアクティブ型プロトコルとリアクティブ型プロトコルを組み合わせたプロトコルとして、ZRP(Zone Routing Protocol)が提案されている。ZRP では、ゾーン半径というパラメータを持ち、自身からの最短ホップ数がゾーン半径以下であるノードを自身のルーティングゾーンにいると判断し、ゾーン内のノードに対してはプロアクティブ、ゾーン外のノードに対してはリアクティブなルーティングを行う。ZRP は、ゾーン半径を変える事でプロトコルの性質が変わるので、ネットワークの環境に応じて適切な値を設定すれば純粋なプロアクティブ型やリアクティブ型のプロトコルより多くの環境に適応できる。ゾーン内のルーティングを IARP (IntraZone Routing Protocol)、ゾーン外のルーティングを IERP (InterZone Routing Protocol)という。

以下に IARP、IERP の動作を示す。

### [IARP(ゾーン内ルーティング)]

1. ノード S が IARP パケットを生成し、[送信元=S, ホップ数=1]という情報を書き込み周りのノード(A, B, C)に送信する(図 1)。IARP パケットを受け取ったノードは、IARP の情報から得た S への経路情報(ホップ数=1, 最初に送信するノード=S)をルーティングテーブルに記録する。更に受け取った IARP パケットを [送信元=S, ホップ数=2, 経由地=A](ノード A の場合。ノード B, C の場合は経由地がそれぞれ B, C となる)と書き換えて自身の周りのノードに送信する(図 2 中、実線・破線矢印)。ノードは移動するので、経路情報は時間が経つと無効なものになる。例としてノード H のルーティングテーブルを図 3 に示す。

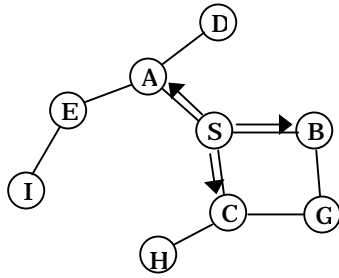


図 1 IERP パケットの送信

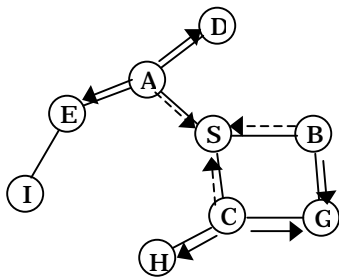


図 2 IERP パケットの転送

宛先	ホップ数	送信ノード	残り寿命 (ms)
S	2	C	1500
C	1	C	2000

図 3 ノード H のルーティングテーブル

- IERP パケットを受け取ったノードは、ホップ数がゾーン半径に達するまで、IERP パケットの情報を書き換えながら周りのノードへの送信を続ける。ただし、IERP パケットのホップ数が自身のルーティングテーブルに記録してあるホップ数より多い場合は、パケットがまわり道をして届いたと判断して、ルーティングテーブルの更新を行わずに、パケットを破棄する(図 2 中、破線矢印)。
- 1 から 2 までの動作をネットワーク内の全てのノードが定期的に行い、ルーティングテーブルを更新していく。ゾーン内のノードへのパケット送信要求が発生したら、ルーティングテーブルを参照してすぐにパケットを送信できる。

#### [IERP(ゾーン外ルーティング)]

以下の説明では、各ノードのルーティングゾーンを円で表し、境界ノード以外のノードは省略してある。

- 図 4 のネットワークで、ノード S においてノード J へのパケット送信要求が発生したとする。このとき、ノード S はノード J までの経路情報を保持していないものとする。ルーティングテーブルを参照して経路が無ければ、IERP パケットを生成する。IERP パケットには[送信元=S, 目的ノード=J, ボーダーキャスト数=1]という情報を書き込む。このパケットを特に IERP 要求パケットと呼ぶ。IERP パケットのフォーマットを図 8(a)に示す。
- 生成した IERP 要求パケットをゾーンの境界上のノード全てに送信する(図 5)。ゾーンの境界上のノードとは、自身からの最短ホップ数がゾーン半径と等しいノードである(図 5 では A, B, C)。従って境界上のノードは複数存在する場合があります。全ての境界上のノードへの送信をボーダーキャストと呼ぶ。この場合の S が送信した時点での IERP 要求パケットフォーマットを図 8(b)に示す。

- IERP 要求パケットを受け取った境界上のノードは、IERP 要求パケットのボーダーキャスト数を 1 増やし、経路地に自身の ID を加える。つまり IERP 要求パケットの情報は[送信元=S, 目的ノード=J, ボーダーキャスト数=2, 経路地=A](ノード A の場合)となる。その後自身のルーティングテーブルを参照し、目的ノードへの経路を探す。

テーブルで目的ノードを見つける事ができなければ、更にボーダーキャストを続ける(図 6 中、黒矢印のパケット)。ただし、IERP 要求パケットに送信元又は経路地として記録されているノードに対しては送信しない(図 6 中、破線矢印のパケット)。

目的ノードへの経路を見つけるか自身が目的ノードであったら、探索が成功したものとして S へ受信した IERP パケットを送り返す(図 7)。このパケットを特に IERP 応答パケットと呼ぶ。ここではノード G はルーティングテーブルにノード J までの経路を保持しているので、ノード G は IERP 応答パケットをノード S へ送信する。IERP 要求パケットには S から G までの経路地が記録されているので、それを逆に辿りながら S まで届ける。この場合の IERP 応答パケットのフォーマットを図 8(c)に示す。

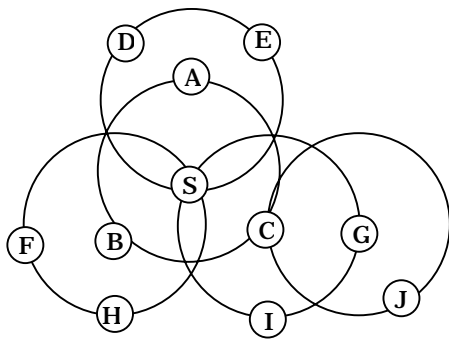


図 4 ネットワーク構成

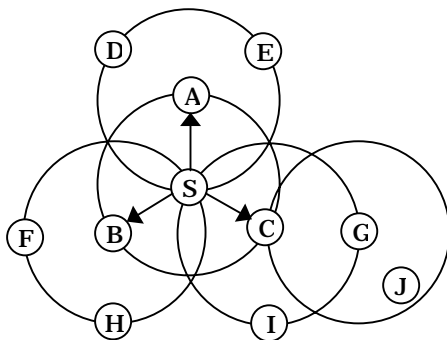


図 5 IERP 要求ボーダークキャスト

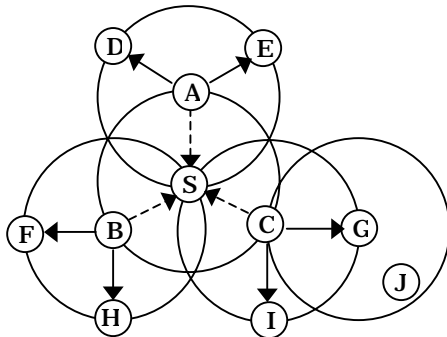


図 6 IERP 要求パケット転送

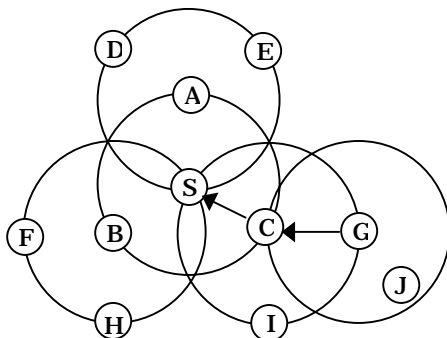


図 7 IERP 応答パケット転送

目的 ノード	送信元 ノード	経由境界 ノード	パケット タイプ	ボーダ- キャスト数
-----------	------------	-------------	-------------	---------------

(a) IERP パケットフォーマット

目的 ノード	送信元 ノード	経由境界 ノード	パケット タイプ	ボーダ- キャスト数
J	S	null	要求	1

(b) 図 5 での  
IERP 要求パケットフォーマット

目的 ノード	送信元 ノード	経由境界 ノード	パケット タイプ	ボーダ- キャスト数
J	S	C,G	応答	2

(c) 図 7 での IERP 応答パケットフォーマット

図 8 IERP パケットフォーマット

宛先 ノード	送信元 ノード	経由境界 ノード	パケット タイプ	データ
-----------	------------	-------------	-------------	-----

(a) データパケットフォーマット

宛先 ノード	送信元 ノード	経由境界 ノード	パケット タイプ	データ
J	S	C,G	データ	データ

(b) 図 7 の後のデータパケットフォーマット

図 9 データパケットフォーマット

- IERP 応答パケットには送信元ノードから宛先ノードまでの経路地が記録されているので、これを逆に辿って送信元ノードまで届けられる。
- 送信元ノードは IERP 応答パケットの情報から宛先ノードまでの経路を知り、これによってデータパケットを送信する。データパケットのフォーマットを図 9(a)に示し、この場合のデータパケットのフォーマットを図 9(b)に示す。

#### 4 提案手法

以下の説明では、過去にノード S からノード J への IERP による経路探索が成功しているものとする。

ZRP では、ゾーン外への経路探索の際に IERP 要求パケットを無条件でボーダークキャストするが、一度探索が成功しているノードに対しては、

再探索までの経過時間が短い場合は以前の探索結果が有効であるか、有効な経路に近い可能性が高い。

そこで、同じノードへの再探索の際に IERP 要求パケットの送信方向を限定する SBZRP (Selective Bordercasting Zone Routing Protocol)を提案する。SBZRPでは、基本的にゾーン型のプロトコルを採用するが、ゾーン外への探索結果である IERP 応答パケットを一定時間バッファに保持し、同じノードへ再探索する場合には全ての境界上のノードへ IERP 要求パケットを送信するのではなく、以前の IERP 応答パケットが送信された方向に限定して探索を行う(図 10)。

宛先ノードが移動していたとしても、経路ノードのいずれかのゾーン内にいれば探索は成功する(図 11)。図 11 の場合、以前の IERP 応答に記録されている経路地がノード C、G であっても、SBZRP では送信した IERP 要求パケットがノード C に届いた時点で、目的ノードであるノード J がノード C のゾーン内にいるので、ここで探索が成功したものととして、ノード C はノード S へ IERP 応答パケットを送信する。

仮に宛先ノードが経路ノードのゾーン外に移動していたとしても、以前の探索からの経過時間が短い場合は以前の IERP 応答が返された場所からそれほど遠くへは移動していないと考えられるので、以前の IERP 応答に記録されている経路ノードのうち最も宛先ノードに近いノードから新たに IERP 探索を行えば、送信元から全方向に探索するよりは少ない IERP パケット数で宛先ノードまでの経路を探索することができる。図 12 の場合のように、IERP 要求パケットがノード G に届いた時点で J への経路が見つからなかった場合は、ノード G を中心として新たに IERP 要求パケットをボーダークキャストすれば、少ないパケット数で宛先ノード J への経路を探索する事ができる。

SBZRP を用いる事により、IERP による経路探索の成功率を維持しながら、無駄な IERP 要求パケットの数を減らすことにより、ネットワークのトラフィックの増加を抑える事ができるので、スループットを向上し、通信遅延を減少させる事が可能になると考えられる。

## 5 性能評価

ZRP, SBZRP の性能をシミュレーションによ

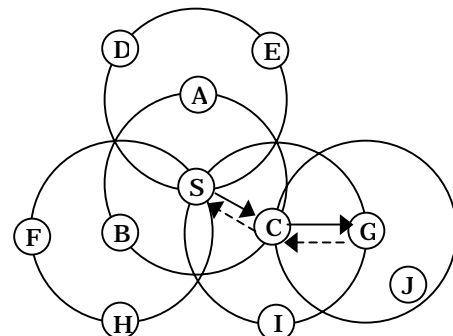


図 10 SBZRP での経路再探索

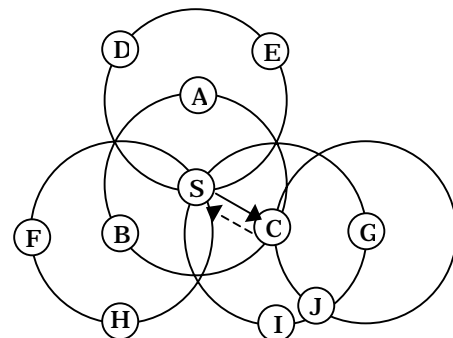


図 11 宛先ノードが移動していた場合

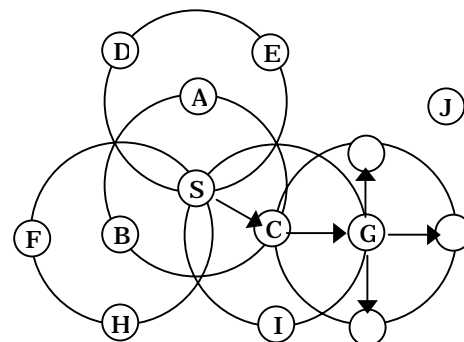


図 12 リンクが切れていた場合

り評価した。

### 5.1 シミュレーションの条件および方法

シミュレーションは、条件としてノード数 10、フィールド 500m × 500m、無線伝播範囲 100m でノードが移動しないネットワークポロジを用いた場合と、条件として条件と同じノード数とフィールド、無線伝播範囲を用い、データ発生間隔を 30ms と固定してノードを移動させた場合(移動モデルには Random Waypoint Model を用い、移動速度は最大 10m/s とした)のシミュレーションを行った。

ネットワークが定常状態になるまでには時間

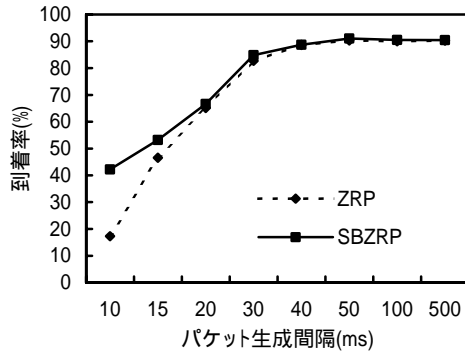


図 13 パケット生成間隔に対するパケット到着率の特性

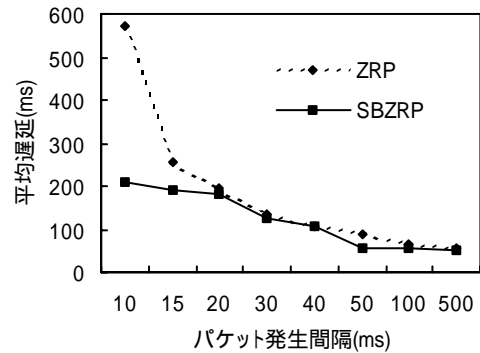


図 15 パケット生成間隔に対する平均遅延の特性

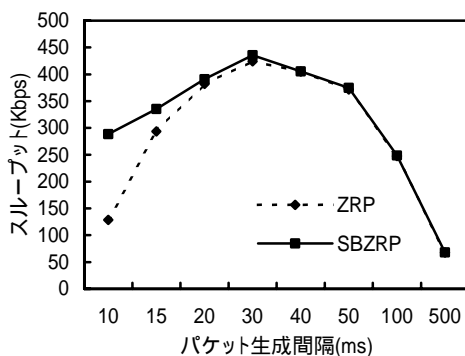


図 14 パケット生成間隔に対するスループットの特性

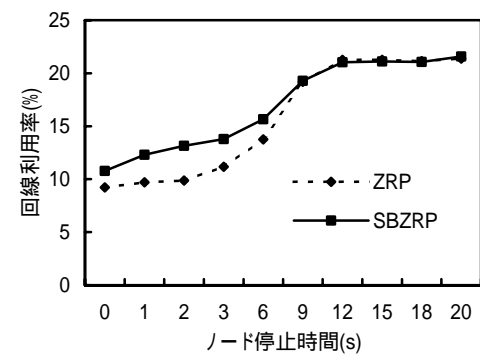


図 16 ノード停止時間に対する回線利用率の特性

がかかるので、最初の 10 秒は計測範囲から除外し、それ以降を計測対象とした。個々のノードが一定間隔でデータパケットを生成し、計測開始から数えて 1000 個目のデータパケットが送信されるまでをシミュレーションした。

計測対象は、生成した 1000 個のデータパケットのうち正しく宛先まで届いたパケットの割合、ネットワーク全体のスループット、データパケットの遅延時間、ネットワーク全体での回線利用率である。

ここでスループットはネットワーク全体で単位時間あたりに宛先へ到着したパケットの容量、遅延時間はデータパケットが生成されてから宛先へ到着するまでにかかった時間と定義した。

## 5.2 結果および考察

まず、条件で行ったパケットの生成間隔に対するパケットの到着率についての特性を図 13 に示す。横軸は各ノードでのデータパケットの生成間隔、縦軸は計測開始から生成した 1000 個のパ

ケットのうち宛先まで届いた割合である。

図から、SBZRP では ZRP よりも送信成功率が高いことがわかるが、その効果はデータパケットの生成間隔が短いとき、つまりネットワークの負荷が高いときに顕著に表れている。これは、負荷が高くなるとパケットの衝突が起こりやすくなる為、IERP 要求パケットの全方向へのブロードキャストが衝突を多く引き起こしてネットワークの性能に大きな影響を与えている事を示している。

次に、条件で行ったスループットについての特性を図 14 に示す。これもネットワークの負荷が高い場合に、送信成功率と同様の理由で SBZRP の方がスループットが高くなっている。負荷が低いときにスループットが落ちているのは、単位時間に送信されるパケット数が少ないからである。また負荷が高いときには、パケットの衝突などが原因でパケットの到着率が落ちているためにスループットも低くなっているものと考えられる。

次に,条件 で行ったパケット到着までの平均遅延の特性を図 15 に示す. 負荷が高いときに ZRP での平均遅延が長くなっているのは,経路を探索するために送信する IERP 要求パケットの量が多くなり,各ノードのバッファを占領している為と考えられる.

次に,条件 で行ったノード停止時間に対するネットワーク全体の回線利用率を図 16 に示す. 図から,ノード停止時間が短いとき,つまりノードの移動度が高いときに ZRP よりも SBZRP の方が回線利用率が高くなっている事がわかる. これは,ノードの移動度が高いと経路再探索が失敗する可能性が高くなるが,SBZRP では探索が失敗したノードから新たに IERP 探索を行うので,経路再探索の時間が ZRP と比べて短くなるのでより多くのデータを送信できる為と考えられる.

以上の結果から,SBZRP では ZRP と比較して,特にネットワークの負荷が高いときとノードの移動度が高いときに性能を向上できる事が示された.

## 6 まとめ

本稿では,アドホックネットワークのためのルーティングプロトコルとして,経路探索のためのパケット数を減らした SBZRP を提案し,シミュレーションによる性能評価を行った.その結果,提案手法により無駄なパケット数が減少し,パケット到着率,スループット,データパケット到着までの遅延時間,回線利用率などのネットワーク性能を向上できる事がわかった.

今後の課題としては以下のような事が考えられる.

### ・プロトコルの改良

今回は個々の端末の無線電波範囲は同一であり,リンクは双方向であると仮定したが,実際には無線送信能力の差により片方向リンクが生じるので,これに対応する必要がある.

### ・プロトコルの実装

今回は Java を用いたシミュレーションでの性能評価を行ったが,実際に携帯型端末で SBZRP を実装し,より詳細な評価を得る必要がある.

### ・ネットワーク環境の変化への対応

実際のアドホックネットワークでは端末数や移動度など,ネットワーク環境が変化する事が考えられるので,ゾーン半径を動的に変えるなど,それぞれの環境への対応も考慮する

必要がある.

## 参考文献

- [1] IEEE802.11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications, First edition, 1999.
- [2] Toh, C.-K.: Wireless ATM and Ad-Hoc Networks, Kluwer Academic Publishers, 1997.
- [3] MANET, <http://www.ietf.org/html.charters/manet-charter.html>
- [4] モバイルコンピューティング, <http://www.wide.ad.jp/document/reports/pdf1997/part12.pdf>
- [5] 萩野浩明, 原隆浩, 塚本昌彦, 西尾章治郎: アドホックネットワークのための蓄積型フラッディングプロトコル, 情報処理学会論文誌, Vol.41, No.9, pp.2445-2453, 2000.
- [6] 横山雄一, 桧垣博章: 指向性アンテナを用いたアドホックルーティングプロトコルの性能評価, 情報処理学会全国大会第 64 回, pp.313-314, 2002.
- [7] Takayuki Yamamoto: A study on transport/routing protocols on ad hoc networks for high-speed data service, Master thesis, Graduate School of Engineering Science, Osaka University, 2002.
- [8] Haaz, Z. J.: A New Routing Protocol For The Reconfigurable WireLess Networks, 1995.