

## 空間内に分布する移動コンピュータのためのルーティングプロトコル

東京電機大学 理工学部 情報システム工学科

高橋 将 桧垣 博章

E-mail: {susumu,hig}@higlab.k.dendai.ac.jp

モバイルコンピュータは時間とともにその位置を変える。そのため、モバイルコンピュータによるネットワークの通信手段として無線が広く用いられつつある。そのネットワーク形態としては、基地局と通信し、パケットのルーティングは固定ネットワークのルータによってなされるインフラストラクチャネットワークと、移動コンピュータのみからなり、移動コンピュータ自身がパケットのルーティングを行うアドホックネットワークとに分類される。現在、アドホックネットワークでは、IEEE802.11 や Bluetooth などの無線 LAN プロトコルが標準化され、これらの利用が始まっている。IEEE802.11 では、10mW の送信電力を用い、100m 程度の無線信号到達距離を実現している。したがって、パケットの配送経路を決定する際には移動コンピュータの位置の高低差を考慮せず、2次元平面上でのルーティングがなされる。しかし、移動コンピュータのバッテリー容量は限られているため、通信の省電力が必要となる。Bluetooth では、1mW の送信電力しか必要としないが、10m 程度の無線信号到達距離しかを実現することはできない。このようなマイクロセルをベースとしたネットワークにおけるルーティングにおいては、移動コンピュータの位置の高低差を考慮しなければならない。本論文では、3次元空間での新しいアドホックルーティングプロトコルを提案する。

## Routing Protocol for Mobile Computers in 3D-Space

Susumu Takahashi Hiroaki Higaki

Department of Computers and Systems Engineering

Tokyo Denki University

E-mail: {susumu,hig}@higlab.k.dendai.ac.jp

A mobile computer changes its location. Wireless communication media has been getting popular for supporting execution of network applications in the mobility of a computer. There are two types of wireless LAN protocols; communication protocols for infrastructured networks where a mobile computer communicates with other computers through an access point and messages are forwarded by routers, and ones for ad-hoc networks where there is no fixed computer and mobile computers have function for forwarding a received message according to a routing table. Wireless LAN protocols such as IEEE802.11 and Bluetooth have been standardized. In IEEE802.11, signal is transmitted with 10mW power and the signal transmission range is about 100m. Here, it is reasonable that a routing protocol works on 2D space since the difference of the height between any two mobile computers is much less than the transmission range. On the other hand, bluetooth is designed for supporting mobile computers with less battery capacity and signal transmission range is only 10m with 1mW transmission power. Such a smaller signal transmission range is called a microcell. In a microcell-based network, a routing protocol has to work on 3D space. In this paper, the authors mentions a brief idea for designing such routing protocols.

## 1 背景と目的

ノート型PCやPDA、自律移動ロボットなどの移動コンピュータからなるモバイルネットワーク環境が構築されている。モバイルネットワークは、移動コンピュータが基地局と通信し、パケットのルーティングは固定ネットワークのルータによってなされるインフラストラクチャネットワークと、移動コンピュータのみからなり、移動コンピュータ自身がパケットのルーティングを行なうアドホックネットワークとに分類される。アドホックネットワークは、災害時のレスキュー活動、会議やイベントのための一時的なネットワークや、原子力発電所の内部、高所や深海探索などの危険な環境での自律移動ロボットからなるネットワークなど、トポロジーの柔軟な変化が要求される応用に適用される。

ここで、アドホックネットワークは以下の2つに分類できる。

- (1) 各移動コンピュータの位置情報を用いないプロトコル
- (2) 各移動コンピュータの位置情報を用いるプロトコル

まず、(1)について考える。(1)にはDSR [4]やAODV [6]、LBSR [7]といったプロトコルがある。これらは、フラッディングを用いることにより送信元コンピュータから送信先コンピュータまでの経路を探索する。そのため、ネットワークへの負荷が大きくなってしまふ。

次に、(2)について考える。(2)には移動コンピュータの位置情報を知るためのハードウェアが必要である。また、(2)は、さらに3つに細分化できる。

- (a) 送信元コンピュータから送信先コンピュータまでのホップ数が小さくなるように経路選択を行うもの。
- (b) 送信元コンピュータから送信先コンピュータまで、100%の到達率を実現するもの。

(a)には、greedy プロトコルやGPSR(Greedy and Perimeter Stateless Routing) プロトコル [5] といったものがあり、送信元コンピュータから送信先コンピュータまでのネットワークトポロジーに関する完全な情報収集が必要となるために、保持する経路情報が多くなってしまふ。greedy プロトコルとは、無線信号到達範囲内にあるすべてのコンピュータ(隣接コンピュータ)のうち、最も送信先コンピュータに近づく隣接コンピュータへパケットを配送することを繰り返し、送信元コンピュータから送信先コンピュータまでのパケット配送を実現する。もし、最も送信先コンピュータに近づく隣接コンピュータが存在しないデッドエンドが生じた場合、パケットの配送に失敗してしまふ。一方、GPSR プロトコルとは、自身に隣接する移動コンピュータのうち、送信先コンピュータとの距離が最も短い隣接コンピュータへパケットを配送することを繰り返し、送信元コンピュータから送信先コンピュータまでのパケット配送を実現するものである。こちらもgreedy プロトコルと同様、デッドエンドが生じた場合、パケットの配送に失敗してしまふ。

(b)には、FACE プロトコルがある。FACE プロトコルとは、送信元コンピュータから送信先コンピュータまでの経路において、どの面を通過するかという情報に基づいてパケットを配送するものである。

(a)と(b)を組合わせたものには、GFG [2] プロトコルがある。GFG プロトコルは、(1)に分類されるgreedy プロトコルと(2)に分類されるFACE プロトコルを組合わせたプロトコルである。通常はgreedy プロトコルを用いてパケット配送を行うが、送信先コンピュータの存在しないデッドエンドが生じた場合、FACE プロトコルに切り替えてパケットを配送する。

ここで、現在のアドホックネットワークにおけるパケット配送は無線LANプロトコル(IEEE802.11など)によって実現されている。IEEE802.11では、10mWの送信電力を用い、100m程度の無線信号到達距離を実現している。したがって、パケットの配送経路を決定する際には、移動コンピュータの位置の高低差を考慮せず、2次元平面上でルーティングがなされる。しかし、移動コンピュータは、限られたバッテリー容量で稼働することが求められる。そのため、通信の省電力化が必要となる。Bluetooth [1]では、1mWの送信電力しか必要としないが、10m程度の無線信号到達しか実現することはできない。このようなマイクロセルをベースとしたネットワークにおけるルーティングにおいては、移動コンピュータの位置の高低差を考慮する必要がある。

本論文では、3次元空間でのアドホックルーティングプロトコルを提案する。

## 2 関連研究

### 2.1 GPSR ルーティングプロトコル (図1)

GPSR ルーティングプロトコルとは、2次元平面を対象としたルーティングプロトコルであり、各移動コンピュータは送信先コンピュータの位置情報と隣接コンピュータの位置情報をテーブルとして持つ。

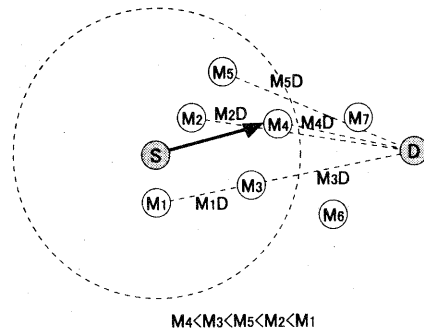


図1: GPSR ルーティングプロトコル

送信元コンピュータから送信先コンピュータへのパケット配送は、直接通信可能な移動コンピュータのう

ち、送信先コンピュータとの距離が最も短くなる隣接コンピュータへパケットを転送することによりなされる。言い換えるならば、これは送信元コンピュータと送信先コンピュータを焦点とする楕円体群の中で最も内側になる楕円体を形成する隣接コンピュータへとパケットを配送する、ということである。もし、最も送信先コンピュータに近づく隣接コンピュータが存在しないことによるデッドエンドが発生した場合、失敗を検出した移動コンピュータと送信先コンピュータを直線で結び、半時計回りに隣接コンピュータを検索し、最初に発見した移動コンピュータへとパケットを転送する。これにより、デッドエンドを回避しているように見えるが、図2のようなネットワーク構成がされている場合、このプロトコルをSは自身に隣接する移動コンピュータのうち、もっとも楕円体群の内側に存在するAへとパケットを転送する。次に、Aは自身とDを焦点とする楕円体としてこのプロトコルを適用するため、AはSへパケットを転送する。このように、実際にはデッドエンドを避けることができない。

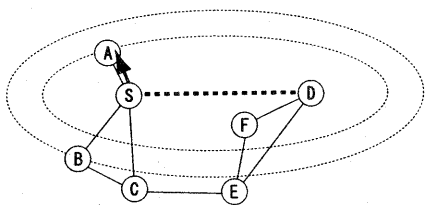


図2: GPSR ルーティングプロトコルにおけるデッドエンド

[送信手順]

(送信元コンピュータ S)

- Sは隣接コンピュータをリストアップする。
- 隣接コンピュータ群の中にDが存在するかどうかを確認する。Dが存在した場合にはパケットを配送し、終了する。
- もし、隣接コンピュータ群にDが存在しなかった場合、隣接コンピュータ $M_i$ とDの位置情報から、線分 $M_iD$ の距離を計算する。これをすべての隣接コンピュータに対して行う。
- 計算したもののうち、最もDへ近い隣接コンピュータへパケットを転送する。

(隣接コンピュータ  $M_i$ )

- 送信元コンピュータSと同じ手順をとる。
- もし、デッドエンドが発生した場合、自身とDからなる直線を引き、半時計回りに隣接コンピュータ $M_j$ を検索する。
- もし、発見された場合には $M_j$ へとパケットを転送する。
- もし、発見されなかった場合にはパケット配送に失敗する。

(送信先コンピュータ D)

- 自身が送信先コンピュータとなっていることを確認し、パケットを受信する。

## 2.2 greedy ルーティングプロトコル

greedy ルーティングプロトコルでは、各移動コンピュータは、送信先コンピュータの位置情報と隣接コンピュータの位置情報を持つ。これらの情報から、最も送信先コンピュータに近い隣接コンピュータにパケットを転送することを繰り返し、送信元コンピュータから送信先コンピュータまでのパケット配送を実現する。この方法でパケットが送信先コンピュータまで配送された場合、最少ホップ数がそれに近い経路を用いることになる。ただし、図3のように、次ホップを決定できないデッドエンドが発生すると、パケットの配送に失敗することがあり、送信元コンピュータから送信先コンピュータへのパケットの到達率は低い。

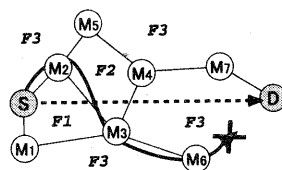


図3: greedy ルーティングプロトコル

[送信手順]

(送信元コンピュータ S)

- Sは隣接コンピュータをリストアップする。
- 隣接コンピュータ群の中にDが存在するかどうかを確認する。Dが存在した場合にはパケットを配送し、終了する。
- もし、隣接コンピュータ群にDが存在しなかった場合、隣接コンピュータ $M_i$ とDの位置情報から、最も送信先コンピュータに近づく隣接コンピュータを計算する。これをすべての隣接コンピュータに対して行う。
- 計算したもののうち、最もDへ近い隣接コンピュータへパケットを転送する。

(隣接コンピュータ  $M_i$ )

- 送信元コンピュータSと同じ手順をとる。
- もし、デッドエンドが発生した場合、パケット配送に失敗する。

(送信先コンピュータ D)

- 自身が送信先コンピュータとなっていることを確認し、パケットを受信する。

## 2.3 FACE ルーティングプロトコル

図4に示すように、移動コンピュータをノード、直接通信可能な2つのノードの接続をリンクとするグラフ

において、どの面を通過するかという情報に基づいてパケットを配送するのがFACEプロトコルである。ここでは、送信元ノードSから送信先ノードDへパケットを配送するためには、線分SDが交わる面F1(SM<sub>1</sub>M<sub>3</sub>M<sub>2</sub>)、F2(M<sub>2</sub>M<sub>3</sub>M<sub>4</sub>M<sub>5</sub>)、F3(M<sub>6</sub>M<sub>3</sub>M<sub>4</sub>M<sub>7</sub>D)を順にたどるようにルーティングすればよい。ここでは、GPS等を得

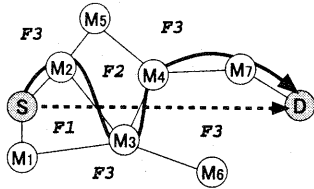


図4: FACEルーティングプロトコル

たSとDの位置情報をSが保持している。また、各移動コンピュータは隣接コンピュータの位置情報を保持しているが、ネットワーク全体の情報を持つことはできない。したがって、自身も含めてどの移動ノードがどの面の頂点であるかを知ることができない。そこで、次の2つを実現することが必要となる。

- (1) 現在注目している面のすべての頂点を通過するようにパケットを配送する。
- (2) 現在注目している面から次に注目すべき面への切替えを実現する。
- (3) (1)と(2)をパケットがDに到達するまで繰り返す。

(1)の実現は、パケットを面の辺に沿って配送することによりなされる。(2)の実現は、現在注目している面に含まれる辺と線分SDとの交わりを検出することによってなされる。この線分は現在注目している面と次に注目すべき面とに共有されている。図4の場合、Sは(最初の面F1にDが含まれるかを見つけるため)隣接コンピュータのうちの一つであるM<sub>1</sub>にパケットを転送する。M<sub>1</sub>はこれを(面F1上にはないM<sub>5</sub>ではなく)M<sub>3</sub>に転送する。この辺M<sub>2</sub>M<sub>3</sub>は線分SDと交わっていることが各点の位置情報から検出できる。そこで、(次の面F2にDが含まれるかを見つけるために)(面F2上にはないM<sub>1</sub>BやM<sub>6</sub>ではなく)M<sub>4</sub>に転送する。この辺M<sub>3</sub>M<sub>4</sub>も線分SDと交わっていることが各点の位置情報から検出できる。そこで(次の面F3にDが含まれるかを見つけるために)(面F3上にはないM<sub>5</sub>ではなく)M<sub>7</sub>に転送する。M<sub>7</sub>はDに転送する。こうしてパケットはSからDまで配送される。

このプロトコルでは、線分SDと交わる面を順にたどるという手法をとることからgreedyプロトコルと異なり、100%パケットをDに配送することが可能である。しかし、面の形によってホップ数が大きくなる可能性があるという欠点を持っている。

[送信手順]

(送信元コンピュータS)

- Sは隣接コンピュータをリストアップする。
- 隣接コンピュータ群の中にDが存在するかどうかを確認する。Dが存在した場合にはパケットを配送し、終了する。
- もし、隣接コンピュータ群にDが存在しなかった場合、隣接コンピュータM<sub>i</sub>とDの位置情報から、 $\angle M_iSD$ を計算する。これをすべての隣接コンピュータに対して行う。
- 計算したもののうち、最も鋭角になる隣接コンピュータへパケットを転送する。

(隣接コンピュータM<sub>i</sub>)

- パケットを受信する。
- 隣接コンピュータをリストアップする。
- 隣接コンピュータ群の中にDが存在するかどうかを確認する。Dが存在した場合にはパケットを配送し、終了する。
- もし、隣接コンピュータ群にDが存在しない、かつ隣接コンピュータ群の中で線分SDと線分M<sub>i</sub>M<sub>j</sub>が交差するものがあれば、M<sub>j</sub>へとパケットを転送する。
- もし、隣接コンピュータ群にDが存在しない、かつ隣接コンピュータ群の中で線分SDと線分M<sub>i</sub>M<sub>j</sub>が交差するものがなければ、線分SDとM<sub>j</sub>との距離が最も短くなる隣接コンピュータへとパケットを転送する。

(送信先コンピュータD)

- 自身が送信先コンピュータとなっていることを確認し、パケットを受信する。

### 3 GFGルーティングプロトコル(図5)

GFGルーティングプロトコルは、greedyルーティングプロトコルとFACEルーティングプロトコルを組み合わせて実現されている。このプロトコルでは、通常はgreedyプロトコルを用いてパケットを配送する。ただし、移動コンピュータm<sub>i</sub>でデッドエンドとなったならば、greedyプロトコルからFACEプロトコルに切り替え、デッドエンドを検出した移動コンピュータm<sub>i</sub>よりもDに近い他の移動コンピュータm<sub>j</sub>まで配送する。m<sub>j</sub>からは、再びgreedyアルゴリズムを用いる。これにより、到達率が100%であり、かつ最短経路に近いホップ数でのパケットの配送が実現できる。

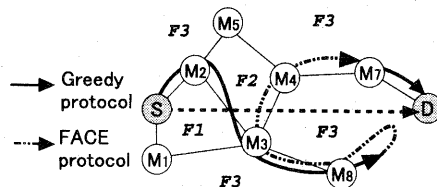


図5: GFGルーティングプロトコル

[送信手順]

(送信元コンピュータ S)

- Sは隣接コンピュータをリストアップする。
- 隣接コンピュータ群の中に D が存在するかどうかを確認する。D が存在した場合にはパケットを配送し、終了する。
- もし、隣接コンピュータ群に D が存在しなかった場合、隣接コンピュータ  $M_i$  と D の位置情報から、最も送信先コンピュータに近づく隣接コンピュータを計算する。これをすべての隣接コンピュータに対して行う。
- 計算したもののうち、最も D へ近い隣接コンピュータへパケットを転送する。

(隣接コンピュータ  $M_i$ )

- 送信元コンピュータ S と同じ手順をとる。
- もし、隣接コンピュータ群の中に D が存在するかどうかを確認する。D が存在した場合にはパケットを配送し、終了する。
- 隣接コンピュータ群の中に D が存在しない、かつ自身より送信先コンピュータに近づく隣接コンピュータ  $M_j$  が存在した場合、 $M_j$  へパケットを配送する。
- 隣接コンピュータ群の中に D が存在しない、かつ自身より送信先コンピュータに近づく隣接コンピュータが存在しない場合、送信元コンピュータを  $M_i$ 、送信先コンピュータを D とみなし、FACE ルーティングプロトコルを適用する。

- FACE ルーティングプロトコルの経路途中において、 $M_i$  よりも送信先コンピュータに近づく隣接コンピュータ  $M_j$  が見つからなければ FACE ルーティングプロトコルを適用しつづける。

- FACE ルーティングプロトコルの経路途中において、 $M_i$  よりも送信先コンピュータに近づく隣接コンピュータ  $M_j$  へパケットが配送されたならば  $M_j$  から再び greedy プロトコルに切り替える。

(送信先コンピュータ D)

- 自身が送信先コンピュータとなっていることを確認し、パケットを受信する。

## 4 3次元空間のためのルーティングプロトコル

### 4.1 GPSR を 3次元空間へ適用したルーティングプロトコル

このルーティングプロトコルは、先に述べた GPSR を 3次元へ拡張したものである。ここで、3次元空間において、2点により直線は決定可能であることから、楕円体を用い、直線(つまり、距離)というパラメータから次にパケット配送する移動コンピュータを決定する。

しかし、GPSR をそのまま 3次元空間へ拡張したものであるため、このプロトコルではデッドエンドを避けることができず、パケットの配送に失敗してしまうことがある。また、greedy ルーティングプロトコルを 3次元空間へ拡張したものであることから、送信元コンピュータから送信先コンピュータへのホップ数は大きくなってしまふ。

### 4.2 GCG ルーティングプロトコル

本論文では、GFG ルーティングプロトコルを 3次元空間に拡張する。ここで、greedy ルーティングプロトコルは、「直接通信可能な移動コンピュータのうち、送信先コンピュータに最も近い移動コンピュータへとメッセージを送信する」という性質を持つため、そのまま 3次元空間に適用することができる。

[送信手順]

(送信元コンピュータ S)

- Sは隣接コンピュータをリストアップする。
- 隣接コンピュータ群の中に D が存在するかどうかを確認する。D が存在した場合にはパケットを配送し、終了する。
- もし、隣接コンピュータ群に D が存在しなかった場合、隣接コンピュータ  $M_i$  と D の位置情報から、最も送信先コンピュータに近づく隣接コンピュータを計算する。これをすべての隣接コンピュータに対して行う。
- 計算したもののうち、最も D へ近い隣接コンピュータへパケットを転送する。

(隣接コンピュータ  $M_i$ )

- 送信元コンピュータ S と同じ手順をとる。
- もし、デッドエンドが発生した場合、パケット配送に失敗する。

(送信先コンピュータ D)

- 自身が送信先コンピュータとなっていることを確認し、パケットを受信する。

一方、FACE ルーティングプロトコルは「どの面を通過するかという情報に基づいてパケットを配送する」という性質を持つため、そのまま 3次元空間に適用することはできない。よって、CUBE ルーティングプロトコルについて考えなければならない。CUBE プロトコルを考案することで、GFG ルーティングプロトコルを 3次元空間に拡張した図 6 のような GCG ルーティングプロトコル [8] を考案することができる。

CUBE ルーティングプロトコルでは、線分 SD と交わる立体に沿って順にパケットが配送される。そこで、どのようにこれらの立体を構成するかが問題である。

ここで、FACE ルーティングプロトコルと CUBE ルーティングプロトコル、それぞれについて考える。

FACE ルーティングプロトコルでは、すべての面の

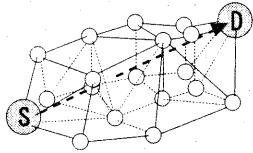


図 6: GCG ルーティングプロトコル

集合  $F = \{F_i\}$  について、以下を満たさなければならない。

- $\bigcup_i F_i = R^2$  (面の集合全体で平面全体が被覆される)
- $\forall_i, \forall_j F_i \cap F_j = \phi$  (任意の2面に共通部分がない)

この集合  $F$  を定めるために、FACE ルーティングプロトコルでは Gabriel Graph [3](以下 GG) を用いる。

GG とは、平面に存在する任意の2点の距離を直径とする円内に他の点が存在しない場合に限り、その2点を結んで描くグラフのことである。ここで、図7の面  $M_1M_4M_5M_6$  に注目する。辺  $M_4M_6$  と辺

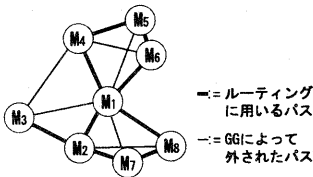


図 7: FACE プロトコルにおいて GG を利用した場合

$M_1M_5$  は交差している。GG を用いることで辺  $M_4M_6$  と辺  $M_1M_5$  はパケットの配送経路から除外され、辺  $M_1M_4, M_4M_5, M_5M_6, M_6M_1$  からなる面  $M_1M_4M_5M_6$  として扱える。このように、GG により FACE プロトコルにおける問題点は解決できる。

同様に CUBE プロトコルでは、すべての立体の集合  $C = \{C_i\}$  について以下を満たさなければならない。

- $\bigcup_i C_i = R^3$  (立体の集合全体で空間全体が被覆される)
- $\forall_i, \forall_j C_i \cap C_j = \phi$  (任意の2つの立体に共通部分がない)

しかし、図8のように、 $M_1M_2M_4M_5$  からなる立体と  $M_1M_3M_4M_5$  からなる立体は、共通部分を含む。もし、図8において線分  $M_3M_4$  を取り除くことができるならば、共通部分を含まない立体を構成できる。ここで、FACE プロトコルでは GG を用い任意の2面の共通部分を取り除いていた。同様に、CUBE プロトコルにおいて、「共通部分を含まない立体を構成するために不要な辺」を取り除かなければならない。

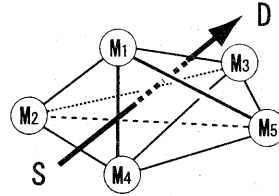


図 8: GCG ルーティングプロトコル

## 5 まとめと今後の課題

本論文では、GCG ルーティングプロトコルの構成要素である CUBE プロトコルにおいて、任意の2つの立体の共通部分を含まないために、「立体を構成しない面」として扱う必要があることを提案した。今後は CUBE プロトコルにおいて、「立体を構成しない面」を発見するアルゴリズムを考案し、CUBE プロトコルの設計を行なう。

## 参考文献

- [1] "Specification of the Bluetooth System," [http://www.bluetooth.com/developer/specification/Bluetooth11.Specifications\\_Book.pdf](http://www.bluetooth.com/developer/specification/Bluetooth11.Specifications_Book.pdf).
- [2] Datta, S., Stojmenovic, I. and Wu, J., "Internal node and shortcut based routing with guaranteed delivery in wireless networks," Proc. of IEEE International Conference on Distributed Computing and Systems, pp. 461-466 (2001).
- [3] Gabriel, K.R. and Sokal, R.R., "A new statistical approach to geographic variation analysis," Systematic Zoology, Vol.18, pp. 259-278 (1969).
- [4] Johnson, D.B., Maltz, D.A., Hu, Y.C., and Jetcheva, J.G., "The Dynamic Source Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks," Internet Draft, draft-ietf-manet-dsr-04.txt (2000).
- [5] Karp, B. and Kung, H.T., "GPSR: Greedy Perimeter Stateless Routing for Wireless," Proc. of The Sixth Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, pp. 243-254 (2000).
- [6] Perkins, C.E. and Royer, E.M., "Ad-hoc On-Demand Distance Vector Routing," Proc. of IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications, pp. 99-100 (1999).
- [7] 佐川, 神林, 松垣, "アドホックネットワークにおけるルーブ型ルーティングプロトコル," 第9回マルチメディア通信と分散処理ワークショップ論文集, pp. 157-162(2001).
- [8] 高橋, 森田, 松垣, "マイクロセルネットワークのための GCG ルーティングプロトコル," 情報処理学会第63回全国大会論文集, No.3, pp. 287-288 (2001).
- [9] 山崎, 瀬崎, "多様なノードを考慮した三次元地理的経路制御手法の提案," 信学技報, Vol.101, No.492, pp. 109-115 (2001).