

移動通信網における無線マルチホップアクセス方式の性能評価

中川 智尋[†] 吉川 貴[†] 太田 賢[†] 倉掛 正治[†]

[†] 株式会社 NTT ドコモ マルチメディア研究所 〒239-8536 神奈川県横須賀市光の丘 3-5

E-mail: †{nakagawa,yoshikawa,ken,kurakake}@mml.yrp.nttdocomo.co.jp

あらまし 偏在するアドホックネットワークを移動通信網へのアクセス網として機能させることにより、既存の移動通信ネットワークの通信エリアを拡大すると共に、任意の無線インターフェースを有するデバイスを異種ネットワークに接続することができる。このような無線マルチホップアクセスネットワークにおける通信方式として、筆者らは、経路制御メトリックとハンドオーバー制御メトリックを併用した「複合メトリック」による制御方式を提案した。本稿では、トポロジー変化の速度やネットワーク密度といったネットワーク環境が様々に変化した場合の評価を行い、提案方式の適用可能範囲を検証する。

キーワード アドホックネットワーク、移動通信ネットワーク、ハンドオーバー制御、経路制御

Performance Evaluation of Wireless Multi-hop Access Method in Terrestrial Networks

Tomohiro NAKAGAWA[†], Takashi YOSHIKAWA[†], Ken OHTA[†], and Shoji KURAKAKE[†]

[†] Multimedia Laboratories, NTT DoCoMo Inc., 3-5 Hikari-no-oka, Yokosuka, Kanagawa, 239-8536
Japan

E-mail: †{nakagawa,yoshikawa,ken,kurakake}@mml.yrp.nttdocomo.co.jp

Abstract Pervasive ad hoc networks will enable users to access terrestrial networks even when they leave the coverage area. We have proposed a new access method which utilizes a hybrid metric for route evaluation. The hybrid metric is composed of a handover metric in combination with an ad hoc routing metric that assesses route stability and optimality. In this paper, potentiality of the proposed method is evaluated under diverse network environments, in which frequency of topology change or network density is varied on a large scale.

Key words Ad-hoc Networks, Terrestrial Networks, Handover Control, Route Control

1. はじめに

移動通信技術の発展はめざましく、第3世代のセルラーサービスに加え、無線 LAN や Bluetooth によるホットスポット型ネットワークも実現しつつある。さらに、一時的に集合した端末が局所的にネットワークを形成するアドホックネットワークの研究開発も盛んである [8] [9]。アドホックネットワークはインフラが存在しない場所において端末を中継することにより広範囲な通信網を形成する技術であり、これまでに様々な経路制御プロトコルが提案されている。このように無線ネットワークのヘテロジニアス化が進むなかで、異種ネットワークに対するシームレスな接続への要求が高まっている [1] [2] [3]。

シームレスなネットワーク接続環境を実現する技術として、筆者らはアドホックネットワークと移動通信網の連携技術に着目している。アドホックネットワークを移動通信網から隔離さ

れたネットワークとして利用するだけでなく、セルラーネットワークやホットスポットへのアクセス網として機能させることにより、エンドユーザが他の端末を中継して移動通信網に接続する無線マルチホップアクセスが可能となる。無線マルチホップアクセスの利点としては、スループット向上、通信エリアの拡大、および異種ネットワークへの接続などが挙げられる。

従来研究では、Mobile IP とアドホックネットワークの経路制御の統合に焦点をあてた研究が多く、制御パケットの処理方法について論じられてきた。しかし、動的にトポロジーが変化しつづけるアドホックネットワークにおいて、端末がどのように経路制御やハンドオーバー制御を行うかという点に関して十分な検討がなされていない。このため、電波状態の不安定な通信路を選択することによるスループットの悪化、あるいは経路制御メトリックを利用しないために最適ではない経路を選択するという問題点があった。

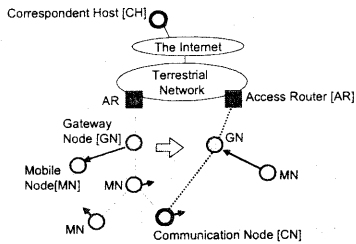


図1 ネットワークモデル
Fig.1 network model

本稿では、無線マルチホップアクセスネットワークにおける経路制御およびハンドオーバー制御において、経路制御メトリックとハンドオーバー制御メトリックを併用した「複合メトリック」による制御方式を提案し、その評価結果について述べる。

2. 提案方式

2.1 ネットワークモデル

検討モデルを図1に示す。ユーザの端末を移動ノード (MN) とする。アクセスルータ (AR) は移動通信網への接続点を提供する。通信ノード (CN) は、インターネットを介して通信相手ホスト (CH) と通信を行う MN である。MN は1つあるいは複数の無線インターフェースを有し、移動通信網に接続すると同時に、アドホックネットワークを形成することができるものとする。

MN は Mobile IP [10] や Cellular IP [11] といったモビリティプロトコルを搭載し、MN と AR の間のハンドオーバー制御を行う。AR に直接接続する MN をゲートウェイノード (GN) とする。

MN はさらに、他の MN との間でマルチホップの通信を実現するためのアドホックルーティングプロトコル (以下、アドホックプロトコルと略す) を搭載する。CN が AR への直接リンクを持たない場合、CN は周囲の MN によって形成されるマルチホップの経路を介して AR に接続する。

2.2 関連研究

4つの関連研究との比較を表1に示す。提案方式では、通信路の制御において経路制御メトリックとハンドオーバーメトリックを併用する「複合メトリック」を利用する点が最大の特徴となる。

2.2.1 アーキテクチャ

無線マルチホップ・アクセスネットワークのアーキテクチャは、AR にアドホックプロトコルが搭載されているか否かという観点において、オーバラップ型とスプリット型に分類することができる (図2)。オーバラップ型では、CN, MN, GN のみならず、AR もアドホックプロトコルを搭載する。スプリット型では、CN, MN, GN の間ではアドホックプロトコルにより経路制御が行われ、GN と AR の間ではモビリティプロトコルにより経路制御が行われる。

提案方式では、AR にアドホックプロトコルを搭載するコス

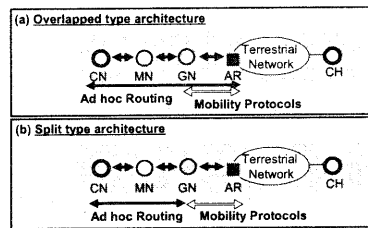


図2 アーキテクチャ
Fig.2 architecture

トを避けるという観点から、スプリット型アーキテクチャを採用する。スプリット型を採用するもう1つの理由は、経路制御の柔軟性である。すなわち、スプリット型では CN が CN-AR 間の経路を構築する際にハンドオーバー制御メトリックを利用することができる。ハンドオーバー制御メトリックは、移動通信網のハンドオーバー制御 [12] において利用される電波状態を評価する指標であり、GN-AR 間の無線リンクの安定性に関する情報を CN に提供する。

2.2.2 スプリット型における経路制御の利点

オーバラップ型アーキテクチャでは、GN は CN から AR の間に設定された経路に偶然存在する端末である。これに対して、スプリット型アーキテクチャを採用した場合、CN は GN を複数の候補からアドホックプロトコルの目的地ノードとして選択することができる。

表1における方式 III [6] および IV [7] はスプリット型アーキテクチャを採用している。方式 III では、GN から CN に対してマルチホップ広告メッセージ (MHA_ADV) を発信され、MHA_ADV を受信した CN は複数の候補から GN を選択することができる。しかし、GN を選択する際の指針には触れていない。このため、電波状態の悪い GN を経由する不安定な経路を選択し、スループットを低下させるという問題がある。方式 IV は GSM システムのハンドオーバー制御に基づく方式である。CN は、ハンドオーバーアルゴリズムを利用して AR への直接リンクと隣接 MN とのリンクを比較することにより、AR への直接接続もしくは近隣の MN を中継したマルチホップ接続を選択する。方式 IV の経路の選択においては、アドホックルーティングメトリック (以下、アドホックメトリックと略す) は利用しない。このため、マルチホップの経路において経路の最適性が実現されないという問題がある。

GN-AR 間のリンクの安定性と CN-GN 間の経路の最適性を両立するために、本論文では「複合メトリック」を提案する。複合メトリックとは、ハンドオーバーメトリックとアドホックメトリックを併用する通信路の評価指標である。

2.3 複合メトリック

CN と AR の関係を示す状態は以下の3つに分類される。

- AR へ直接接続
- GN を介してマルチホップで AR に接続
- AR に接続しない

CN は複合メトリックを利用して、アドホックネットワーク内

	I.RIP-based [4]	II.DSR-based [5]	III.Cellular IP/DSR [6]	IV.GSM with Relay [7]	Proposed Method
Architecture	Overlapped-type			Split-type	
Control	Ad-hoc Routing Metric			GSM Handover	Hybrid
Metric	Hop Count		RTT & Hop Count		Metric

表 1 関連研究との比較

Table 1 Comparison with Related Work

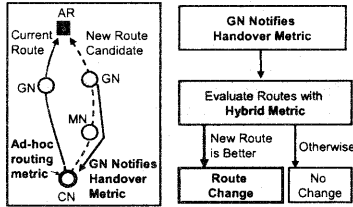


図 3 複合メトリックによる経路の評価

Fig. 3 Route Evaluation with Hybrid Metric

での経路の変更,あるいは他のARへのハンドオーバーを実行するかを判断する。複合メトリックを利用した経路構築の手続きを図3に示す。

まず, CNはGNからハンドオーバーメトリックを収集する。次に, CNは複合メトリックにより経路の候補を評価する。複合メトリックの値 M_{hybrid} は次のように定義される。

$$M_{hybrid} = w * N_1(M_{ho}) + (1 - w) * N_2(M_{ahr}) \quad (1)$$

M_{ho} と M_{ahr} はハンドオーバーメトリックとアドホックメトリックであり, N_1 と N_2 は各メトリックを0から1までの値に正規化する関数である。 w は重み付け係数であり, ハンドオーバーメトリックとアドホックメトリックのいずれかを重視する場合に値の調整を行う。 N_1 と N_2 の例としては, 次のような関数が考えられる。

$$N_1(M_{ho}) = 1 - R_{loss}(M_{ho}) \quad (2)$$

$$N_2(M_{ahr}) = 1 / (1 + M_{ahr}) \quad (3)$$

式(2)における関数 R_{loss} はハンドオーバーメトリックを指数とし, 0から1の間でリンクのロス率を与える。式(3)では, アドホックメトリック M_{ahr} がホップ数で与えられる場合を想定しており, CNが直接ARに接続している場合には, $M_{ahr} = 0$ とすることにより, M_{ahr} の値を0から1の間で正規化することができる。

3. 評価

3.1 比較方式

下記の3方式について評価を行った。

□シングルホップ方式

マルチホップでARに接続する通信形態をとらない方式。CNはARの通信範囲に存在する場合のみCHと通信可能である。

□即時登録方式

関連研究のうち, 即時登録 (Instant Registration) 方式を比較対象として評価した。即時登録方式は, 表1に示した方式III[6]に基づいて制御を行い, スプリット型アーキテクチャを採用している。ハンドオーバーと経路制御に関しては最新の制御情報を採用する方針とする。すなわち, CNがMobile IPのエージェント広告を受信するか,あるいはGNからMHA_ADVを受信すると,登録パケットを送信して新しいGN,ARへの経路を構築する。

□提案方式

ハンドオーバーメトリック M_{ho} としてAR-GN間の受信電波強度を利用し, アドホックメトリック M_{ahr} としてホップ数を利用して, 2.3節の式(1)(2)(3)に基づいて複合メトリック M_{hybrid} を算出する。式(2)に関しては, 受信電波強度に応じて区分した受信レベルを設定し, 各レベル毎に想定されるリンクロス率を既知として関数 R_{loss} を与える。複数のGNからの受信を待機するMHA_ADVの数を $N_s[\text{samples}]$ とし, MHA_ADVを待機する時間を $T_w[\text{ms}]$ とする。ここで T_w は, 最初のMHA_ADVを受信してから待機する時間である。シミュレーションでは, $[N_s, T_w] = [10, 10]$ とした。また, 式(1)における重み付けのパラメータは, $w = 0.5$ とした。

3.2 シミュレーションモデル

シミュレーションモデルを図4と図5に示す。400[m]x400[m]の矩形エリアにMNとARを配置する。ランダムに選んだ1つのMNをCNとする。CNはARに直接接続するか,あるいは間接的にマルチホップ経路で接続することにより, 外部ネットワークに存在するCHと通信を行う。CNは一定のビットレート600[kbps]で100[s]の間UDPパケットをCHに送信する。

ARは無線LANにより半径約100[m]のホットスポットを提供する。各MNは無線LANによりARにアクセスし, Bluetoothにより他のMNとアドホックネットワークを構築する。Bluetoothは仕様上の最大出力に相当するクラス1を想定し, 100[m]程度の通信半径とする。無線LANとBluetoothのパケットロス率は通信ノード間の距離の関数として与える(図6)。無線LANのパケットロス率は実験データを適用し, Bluetoothのパケットロス率は文献[15]で示された値を適用した。他のシミュレーションパラメータを表2に示す。

□2ARモデル

CNが2つのARの間を移動してハンドオーバーする際のスループットおよびパス長を評価した。MNは100ノードとし, そのうち移動する数を25, 50, 75, 100と変化させた。

□1ARモデル

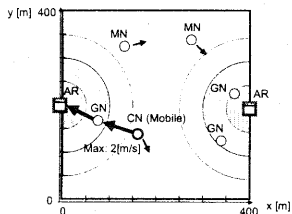


図4 2AR モデル
Fig. 4 Dual AR Model

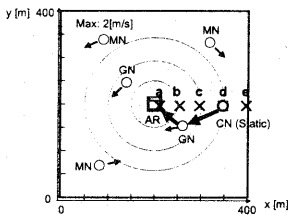


図5 1AR モデル
Fig. 5 Single AR Model

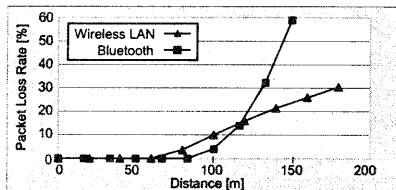


図6 適用したロス率のモデル
Fig. 6 Applied Loss Rate of Wireless Links

AR を1つ配置し、CN がAR から一定の距離に静止した場合のスループットおよびパス長を評価した。CN は図中の点 a, b, c, d, e に静止し、100 の MN のうち 50 が移動する。各点は AR よりそれぞれ 0[m], 50[m], 100[m], 150[m], 200[m] 離れた位置とする。

3.3 歩行者の端末の場合

MN の移動モデルとして、下記の移動モデル A に関して評価を行った。

□移動モデル A

各 MN として歩行者の持つ端末を想定する。各 MN は上限 2[m/s] のランダムなスピードでランダムな方向に移動する。エリアの端で方向を変えながら、一定速度で移動しつづける。

3.3.1 2AR モデルの結果

2AR モデルの結果を図7, 8 に示す。図7 は各方式のスループットを示している。即時登録方式はシングルホップ方式に対して 104-121[kbps] のスループット改善が見られ、提案方式ではさらに 33-49[kbps] の改善が見られる。この結果は、マルチホップアクセスにより AR のエリア外でも通信可能となる効果を顕著にあらわしている。また、提案方式の複合メトリックは

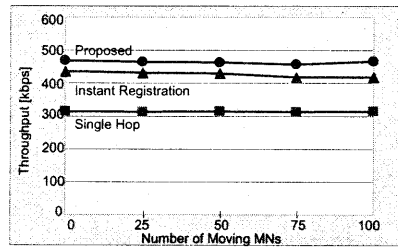


図7 2AR モデルにおけるスループット
(移動端末数を変化させた場合)
Fig. 7 Throughput in Dual AR Model

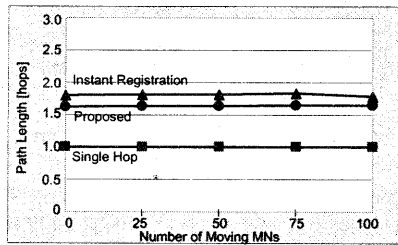


図8 2AR モデルにおけるパス長
(移動端末数を変化させた場合)
Fig. 8 Path Length in Dual AR Model

GN-AR 間の電波状態を考慮して経路を選択するため、スループット向上に効果があることを示している。

図8 は CN から AR に到達するまでのパス長を示している。即時登録方式では平均 1.81[hops] であるのに対して、提案方式では、平均 1.63[hops] となっている。提案方式では CN-AR 間の電波状態が良ければ AR への直接リンクを利用する。これに対して即時登録方式では、CN-AR 間の直接リンクの電波状態が良好であっても、マルチホップ広告を受信するとその最新経路を採用するためである。

3.3.2 1AR モデルの結果

1AR モデルの結果を図9, 10 に示す。図9 は各方式のスループットを示している。横軸は CN-AR 間の距離である。シングルホップ方式は、AR の通信エリアから離れるに従って急激にスループットが悪化し、200[m] の位置では全く通信できない。これに対して、マルチホップアクセスを行う即時登録方式および提案方式では、CN が AR の通信エリア外に存在する場合でも、CH と通信を行うことができる。

提案方式は即時登録方式に対して、20-80[kbps] のスループット改善を示している。特に、AR の近くに位置する場合に、電波状態を考慮して経路を選択する効果が顕著に現れている。また、提案方式は、どの位置においてもシングルホップ、即時登録の両方式より良い特性を示しており、複合メトリックを利用することにより AR のカバーするエリアの内外で最適なアクセス方法を選択する効果が認められる。

図10 は各方式の CN-AR 間のパス長を示している。シング

CBR Data Packet Size	1500[byte]	Mobile IP Advertisement Interval Time	20[s]
CBR Transmission Interval Time	20[ms]	Mobile IP Default Route Timeout Time	20[s]
CBR Transmission Duration Time	100[s]	Multi-hop Access Solicitation Interval Time	20[s]
Processing Time for Routing in IP Layer	10[ms]	DSR Route Construction Timeout	3[s]
Bandwidth of Bluetooth	721[kbps]	DSR Data Transmission Timeout	3[s]
Bandwidth of Wireless LAN	11[Mbps]		

表2 シミュレーション諸元
Table 2 Simulation Parameters

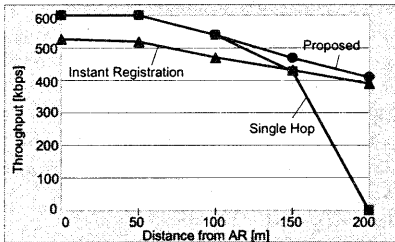


図9 1ARモデルにおけるスループット
(ARからの距離を変化させた場合)
Fig.9 Throughput in Single AR Model

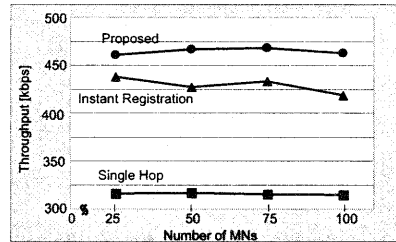


図11 2ARモデルにおけるスループット
(中継端末数を変化した場合)
Fig.11 Throughput in Dual AR Model

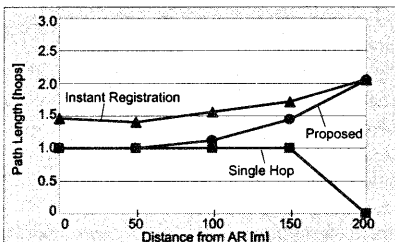


図10 1ARモデルにおけるパス長
(ARからの距離を変化させた場合)
Fig.10 Path Length in Single AR Model

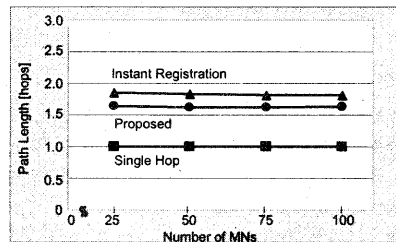


図12 2ARモデルにおけるパス長
(中継端末数を変化した場合)
Fig.12 Path Length in Dual AR Model

ルホップは200[m]の位置では通信不能であるため、0[hops]である。即時登録方式は、1.4-2.0[hops]の経路を構築する。提案方式では、CN-AR間のリンク状態が良好な位置では1[hops]でARに直接接続し、ARから100[m]以上離れるとマルチホップ経路を選択する頻度が高まるため、経路長は1.0-2.0[hops]となっている。

3.4 高速移動端末が含まれる場合

MNの移動モデルとして、下記の移動モデルBに関して評価を行った。

□移動モデルB

移動モデルAよりもトポロジー変化の激しい場合を評価する。移動するMNのうち半数を自動車と想定し、上限60[km/h]のランダムなスピードを与えた。

3.4.1 結果

移動モデルBを適用した際の結果は、3.3.1および3.3.2で述べた結果(図7, 8, 9, 10)とほぼ同じであった。従って、移動

モデルAに関する議論は、移動モデルBに関しても当てはまることが確認された。

3.5 中継端末が少ない場合

MNの数が25, 50, 75, 100と変化した場合の評価を行った。

3.5.1 2ARモデルの結果

2ARモデルにおいて、MNのうち半数を移動モデルAに従って移動させた。結果を図11, 12に示す。提案方式は、従来方式に対して、全般的に良い結果を示している。

図11は各方式のスループットを示している。提案方式では、MNが少ない場合にも、3.3.1に述べたようなスループット向上の効果が認められた。ただし、MNが少なくなるに従い、提案方式によるスループット改善幅が小さくなる傾向がある。これは、MNの数が減少すると共に安定経路を提供する中継候補が減少したためと考えられる。

図12はCNからARに到達するまでのパス長を示している。MNの数の変化の影響は、特に見られなかった。提案方式では、

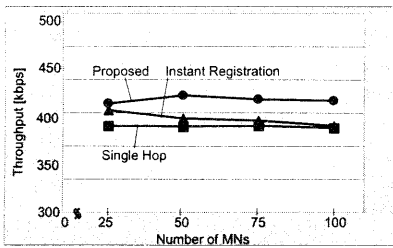


図 13 1AR モデルにおけるスループット
(中継端末数が変化した場合)
Fig.13 Throughput in Single AR Model

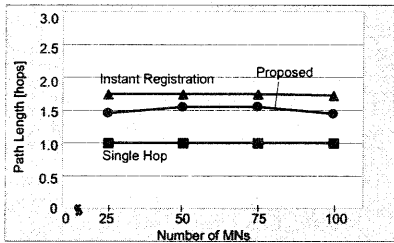


図 14 1AR モデルにおけるパス長
(中継端末数が変化した場合)
Fig.14 Path Length in Single AR Model

ノード数が減少した場合に GN が減少し、AR に直接接続する通信路を採用する可能性が増すためパス長が減少すると予想される。しかし、この結果は GN 減少によるパス長への影響がほとんど無いことを示している。

3.5.2 1AR モデルの結果

1AR モデルにおいて、地点 d に CN を固定して評価した。結果を図 13, 14 に示す。図 13 は各方式のスループットを示している。提案方式は、従来方式に対して、全般的に良い結果を示している。

MN が 25 の場合は提案方式は即時登録方式とほぼ同じ結果を示している。これは、中継候補が少なくなり、安定通信路を構築するメリットが減少したためである。

図 14 は各方式の CN-AR 間のパス長を示している。MN が 25 の場合は、安定な通信路を提供する中継候補が少なくなるために AR への直接リンクを利用する頻度が増し、パス長は短縮している。

4. おわりに

本論文では無線マルチホップアクセスネットワークにおける経路制御およびハンドオーバー制御において、複合メトリックを利用する方式を提案した。提案方式では、移動通信網におけるリンク状態の評価指標と、アドホックネットワークにおける経路最適性の評価指標を併用する点が最大の特徴である。計算機シミュレーションにより、ホットスポットのエリアの内外において、従来のマルチホップアクセス方式よりも短いパス長で、

かつ高いスループットを維持して通信することを確認した。

また、中継端末に高速移動する端末が含まれる場合や、中継端末数が少ない場合を想定して評価を行い、提案方式が幅広いケースで有効であることを確認した。

今後は、通信端末数が増した場合のスケールビリティを確保する問題や、マルチホップアクセスを行う端末の認証・課金の問題に取り組みたい。

文 献

- [1] Hideaki Yumiba et al., "IP-Based IMT Network Platform," IEEE Personal Communications, October 2001.
- [2] Toru Otsu et al., "Network Architecture for Mobile Communication Systems Beyond IMT-2000," IEEE Personal Communications, October 2001.
- [3] Magnus Prodigh et al., "Future-Generation Wireless Networks," IEEE Personal Communications, October 2001.
- [4] Hui Lei and Charles E. Perkins, "Ad Hoc Networking with Mobile IP," Proc. of EPMCC '97, 1997.
- [5] Josh Broch et al., "Supporting Hierarchy and Heterogeneous Interfaces in Multi-Hop Wireless Ad Hoc Networks," Proc. of the Workshop on Mobile Computing, I-SPAN, June 1999.
- [6] Rahul Bhan et al., "Adding Ad Hoc Network Capabilities to Cellular IP," http://www.columbia.edu/~ap714/CIPDSR_Project_Final.Paper.htm.
- [7] George Neonakis Aggelou and Rahim Tafazolli, "On the Relaying Capability of Next-Generation GSM Cellular Networks," IEEE Personal Communications, February 2001.
- [8] Elizabeth M. Royer et al., "A Review of Current Routing Protocols for Ad Hoc Mobile Wireless Networks," IEEE Personal Communications, April 1999.
- [9] Theodoros Salonidis et al., "Distributed Topology Construction of Bluetooth Personal Area Networks," IEEE Infocom 2001, April 2001.
- [10] C.Perkins, "IP Mobility Support," RFC2002, IETF Working Group for IP Routing for Wireless/Mobile Nodes, October 1996.
- [11] Andrew T. Campbell et al., "Design, Implementation, and Evaluation of Cellular IP," IEEE Personal Communications, August 2000.
- [12] Gregory P. Pollini, "Trends in Handover Design," IEEE Communications Magazine, March 1996.
- [13] David B. Johnson et al., "The Dynamic Source Routing Protocol for Mobile Ad Hoc Networks," IETF Internet draft, draft-ietf-manet-dsr-05.txt, March 2001.
- [14] C.E.Perkins and P.Bhagwat, "Highly Dynamic Destination-Sequenced Distance-Vector Routing (DSDV) for Mobile Computers," Comp. Commun. Rev., Oct. 1994, pp.234-44.
- [15] Hannu LAINE et al., "Bluetooth Performance in Hot Spot Environment," IEICE Journal B Vol.J84-B No.4 pp.680-687, April 2001(in Japanese).