

## 動的マルチホップ防災無線端末「SARDINE」の開発

児島史秀<sup>†</sup> 藤瀬雅行<sup>†</sup>

<sup>†</sup>独立行政法人情報通信研究機構 (NICT)

本稿では、VHF 帯等を用いる自営無線のための、自律分散型マルチホップ通信アルゴリズムを提案する。提案アルゴリズムでは、各端末が他端末との通信状況を判断し、それに基づいて自律分散的に端末グループと呼ぶサブネットワークを構成する。同時に各端末は本グループに応じて経路選択テーブルを作成することで、動的なパケット中継通信を行い、端末間で高効率の双方向 IP アプリケーションを実現する。さらに本稿では、本アルゴリズムを実装する無線通信端末の試作機について説明し、屋外試験において取得した特性ならびに効果を報告する。

### “SARDINE”: An Autonomous Mobile Multi-Hop Terminal for Disaster Prevention Radio

Fumihide Kojima<sup>†</sup>, Masayuki Fujise<sup>†</sup>,

<sup>†</sup>National Institute of Information and Communications Technology (NICT), IAA

This paper proposes an autonomous multi-hop communication algorithm for customer-provided mobile communications system assuming VHF-band radio transmission. According to the proposed algorithm, each mobile terminal autonomously constructs sub-network topology named terminal-group, based on the received power from other terminals. Each terminal also generates its own routing-table due to such topology, and conducts dynamic packet relay transmission, thereby achieves effective two-way IP communications among terminals. We further introduce our prototype terminal for such an algorithm and reports about its performance under field experiments.

#### 1 はじめに

VHF 帯等を用いる自営用移動通信システムは、市町村デジタル移動通信システム「ARIB-STD T-79」に代表されるように防災行政無線としても非常に重要な用途に割り当てられている[1]。本周波数帯運用の特質上、現状のシステムでは信号の周

波数帯域幅は極めて狭く設定されており、結果として音声伝送が主たるサービスの実態となっている。一方で、防災行政無線の見地からは動画像伝送等を含むマルチメディア通信の実現は切実に望まれている。さらに現状システムでは、通信のトポロジは固定基地局の存在を前提とした中継通信が支配的となっているため、地震等の広域巨大

災害で固定基地局が損害を受けた場合には十分な機能が見込まれない。

情報通信研究機構では、現状の自営用移動無線システムの高度化という観点から、具体的には以下のような要素技術の導入について検討を続けている。ひとつは高度変調方式の適用による伝送速度・品質の向上であり、もうひとつは、端末同士の自律分散型マルチホップ通信による通信基盤の確立である。前者については、広帯域伝送による伝送速度の向上や、OFDM 等の技術による耐マルチパス性の確立が想定される。一方後者については、状況に応じて端末同士で行われる動的なマルチホップ通信アルゴリズムの導入が考えられる。特に後者の技術は、従来の固定基地局・中継局の存在を必要としない運用形態を示唆しており、これらの固定設備の機能が損なわれた災害地において、移動端末のみによる救援活動支援等に有効性が予想される。このような、動的マルチホップ通信を実現するためのアルゴリズムについては、様々な制御手法が提案されている [2]-[4]。しかしながら、そのような動的マルチホップ通信技術の適用例としては、室内環境における無線 LAN を用いるシステム等に関して議論されているものが多く [5][6]、VHF 帯等の低い周波数帯を用い、比較的通信距離の長いシステムへの適用についてはほとんど議論されていなかった。一方で、広域巨大災害時における当該動的マルチホップ通信技術の有効性については前述のとおりであり、現状の防災無線システムの高度化という観点からも早急に実用化を見込んだ検討が行われるべきだと考えられる。

以上の背景から、情報通信研究機構では、前述した要素技術を備えた移動通信端末を構想上、SARDINE (Simple and Autonomous Routing Device under Independent Network Environment) と名付け検討を行ってきた。特に文献[7]では、当該端末の中心技術となる動的マルチホップ通信技術について基礎的なアルゴリズムを提案・評価し、同時にそれらを具備する試験用端末を用いた室内基本動作実験について報告を行った。しかしながら、文献[7]の段階では、マルチメディア通信においては不可欠な双方向通信への対応の検討、

ならびに屋外無線通信環境における諸特性の取得等が今後の課題として考えられていた。

そこで本稿では、上記に関してより効果的なマルチホップ通信アルゴリズムを提案し、計算機シミュレーションによる評価を行う。さらに、当該アルゴリズムを具備する試作機を開発し、本検討における高度自営用移動通信端末の総合評価とすべく、屋外環境にて特性評価実験を行い、結果を報告する。

## 2 システム構成

### 2.1 システムイメージ

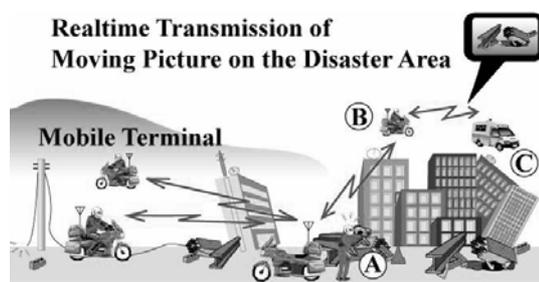


図1 システムイメージ。

図1に SARDINE を用いた提案システムのイメージを示す。図は地震等の広域巨大災害により、既存の基地局設備等が損害を受けた状況であり、その場合にも比較的機動性を確保できるオートバイ等の端末を用いて負傷者等の捜索ならびに状況伝達を行う様子を表している。図では、A と示された端末が要救助者を発見し、その様子を他の移動端末 C に動画像にて伝えようとしている。しかし本状況では AC 間の距離は遠いため、直接パケットを伝達することは困難となる。このような場合にも、提案システムによれば、動的マルチホップ通信技術の適用により、2 端末の間を通りかかった第三の端末 B によってパケットが自動的に中継され、通信を達成することができる。なお上記制御は自律分散的に行われることを前提としているため、これらの 3 台の端末の操作者は各自の位置を把握した上で適切な中継経路を設定する必要はない。特に端末 B については、自身が中継制御を行っている事象すら、操作者は意識しなくてよいと考えられる。

## 2.2 端末グループ構成アルゴリズム

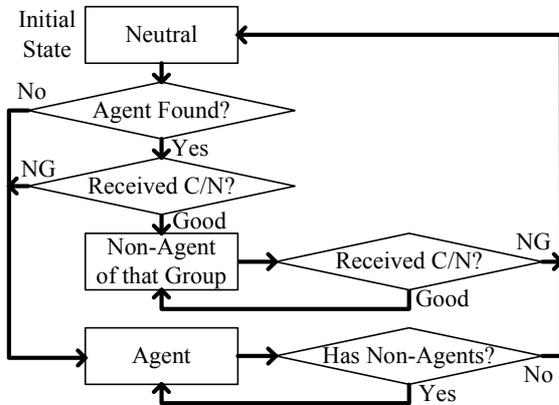


図2 端末グループ構成のフローチャート.

前節のような状況に応じたマルチホップ通信を実現するために、提案システムでは端末グループという概念を導入する。端末グループとは、周囲状況に応じて選ばれる Agent 端末を中心とする、スター状のネットワークである。端末グループは、ひとつの Agent 端末と、それに対して比較的通信状況の良いパス (Preferable Path) を介して論理的に従属する 0 個以上の Non-Agent 端末で構成される。

端末グループは、周囲状況に応じて動的に構成され、かつ逐次更新されるものである。このことは各端末が、自律分散的に Agent, あるいは Non-Agent という動作モードを決定することに等しい。図2に、端末グループ構成のためのフローチャートを示す。まず動作モードを決定する端末は、Agent 端末が近くに存在するかを検知する。周囲に端末が存在しない場合には、自ら Agent 端末となる。対して 1 個以上の Agent 端末が検知された場合、最も高い受信電力が得られる Agent 端末について、得られた CN 比とあらかじめ設定されたスレッシュド値を比較する。CN 比がスレッシュドを上回った場合、端末の動作モードを Non-Agent と決定し、その Agent 端末に対して従属する。対して下回った場合には、自ら Agent 端末となる。ここで、設定された CN 比のスレッシュドとは、本アルゴリズムの 1 パラメータであり、値を

$CN_{agent}$  と表記する。以上により決定された各動作モードは一定時間ごとに更新条件に照らされた後、必要ならば更新される。Non-Agent 端末では、従属する Agent 端末からの受信電力が  $CN_{agent}$  を下回った場合に、また Agent 端末ではそれに従属する Non-Agent 端末数が 0 となった場合にそれぞれ動作モードをリセットし、新たに動作モードを決定する。

## 2.3 動的双方向ルーティング

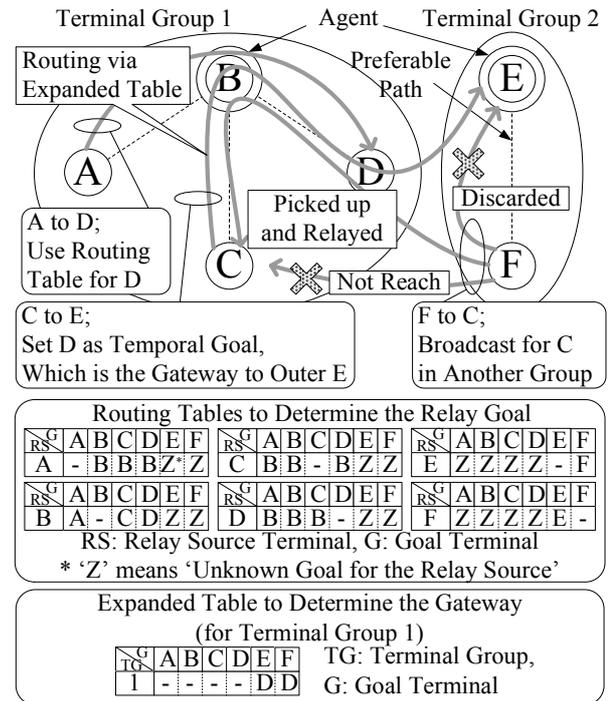


図3 各中継テーブルと、動的ルーティングの例.

前節のアルゴリズムによって、論理的なトポロジである端末グループが決定された場合、そのトポロジに従い、各端末が独自の packets 中継テーブルを所持することで、動的なルーティングは実現できる。図3に、ある端末グループ構成に対する、各端末のテーブルを示す。テーブルは、packet を発生させた端末、および自分宛でない packet を受け取った各端末 (RS) が、その packet を次にとどの端末に中継するべきかを規定するものである。ここで、中継先が Z となっているのは、端末への中継経路が明確でないことを表している。この場

合,そのパケットが自分自身のものであった場合(すなわち,パケット発信元であった場合)には,ブロードキャストを行うが,そうでない場合には,パケットを棄却する.

図3では同時に,以上に基づく自律分散型マルチホップ通信の動作例を示している.端末AはD宛に,FはC宛にそれぞれパケットを発生させている.前者のパケットはAのテーブルに基づいてまずBに中継され,さらにBのテーブルによってDに送られる.後者のパケットは,中継先が0のケースに相当する.Fは発信元であるため,パケットをブロードキャストする.本パケットは伝搬距離による減衰のためDとEにのみ到達するが,中継端末であるEのテーブルの宛先DにはやはりZが表記されているため,Eにてパケットは棄却される.一方で,DのテーブルにはCへのZでない経路が記載されているため,これに従ってBを経てCまでパケットは中継される.

ここで,以上までに言及したアルゴリズムによっては,端末グループの構成を十分に活用していないことを強調したい.すなわち,端末Fから端末Cへのパケットがグループ構造を用いてうまく中継されるのは図3に例示するとおりであるが,他方端末Cから端末Fへのパケットについては同等の結果は期待できない.当該パケットについては,図中のFからCへの経路を逆方向に中継することが最良だと考えられるが,上記アルゴリズムでは,そうした情報を提供する手段が存在しないのである.結果として,Cからのパケットは,CのテーブルにFの情報が無いことを理由にブロードキャストされ,さらにFのグループのいずれの端末にも到達せずに送信が失敗となることが予想される.

そこで本稿においては,双方向通信に対する対応を目的として,端末Fからのパケットがグループ1に到達した場合,その事象がグループ1の共通情報として保持される制御を提案する.当該情報は,拡張テーブルの形で保持される.拡張テーブルは,グループ外端末へのパケットが発生した場合に,宛先への直接通信が可能なグループ内端末をGatewayとして明示するものである.図3では,CからEに宛ててのパケットの例で本機能を説明している.ここでは以前にEおよびFか

らのパケットがDによって拾われた経緯があるとしており,グループ1では,EおよびFへのGatewayはDと示されている.これにより,C発のパケットは,GatewayであるDを一時的な宛先とすることでグループ内を中継され,さらにDに到達した後に本来の宛先であるEへと直接送信される.

### 3 計算機シミュレーションによる評価

#### 3.1 シミュレーション諸元

表1 シミュレーション諸元.

伝搬定数	3.5
シャドウイング	標準偏差 5.5 dB の対数正規分布
パケット到着	ポアソン到着
アクセス制御方式	Slotted-ALOHA
シミュレーション エリア	4L*4Lの正方形
端末数	40 端末
端末の配置	一様分布
$CN_{agent}$	20 dB
$CN_{th}$	20 dB
パケット再送	30 秒以内
パケットタイムアウト	100 秒

提案アルゴリズムの有効性について考察するため,計算機シミュレーションによる評価を行った.表1に諸元を示す.伝搬路状況として,伝搬定数3.5の距離減衰と,標準偏差6.5dBの対数正規分布に従うシャドウイングを考慮する.トラフィックモデルとして,各端末独立にパケットがポアソン到着に従って発生する状況を仮定し,Slotted-ALOHA型のアクセス方式を実現させた.ただし,電力干渉によるパケット衝突は発生しないとした.端末グループ構成の際に必要な $CN$ 比スレッシュホールド $CN_{agent}$ ,ならびにパケットが成功裏に受信可能な受信 $CN$ 比 $CN_{th}$ をともに20dBと設定する.これは,変調方式としてQPSKを用いた場合に,適切な畳み込み符号化ならびにインターリーブを行った結果,フェージング環境下において $BER=1e-6$ 相当の伝送品質を確立するために必要とされる値として採用した[5].端末間でパケット

の伝達に失敗した場合、30 秒以内のランダムな時間で再送を行う。さらに、パケット発生後 100 秒が経過した場合には、そのパケットはタイムアウトとして消失するとした。

### 3.2 端末グループ構成

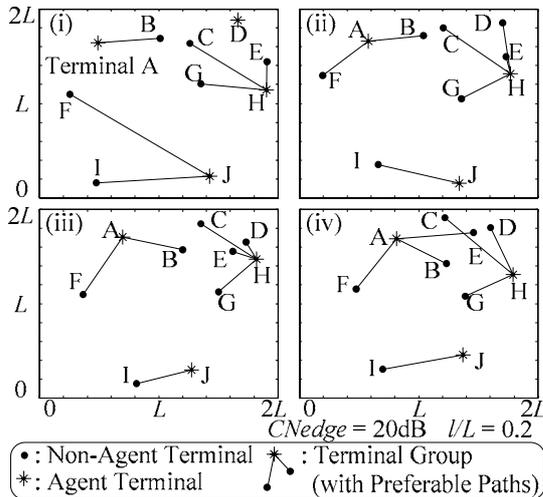


図 4 端末グループの時間的変遷。

図 4 に、シミュレーションによって得られた端末グループ構成の時間的な変化を示す。(i) ~ (iv) の図が順に 10 秒ごとの変化を表している。見易さを考慮し、図 4 においてのみ、表 1 に比べ 1/4 のシミュレーションエリアにおいて、1/4 の数の端末を用いてシミュレーションを行った。ここで、 $CN_{edge}$  とは  $L$  だけ離れた場合の平均受信  $C/N$  比を表すパラメータである。さらに、 $l$  は端末の移動速度を表すパラメータであり、 $L$  を  $1\text{km}$  と仮定した場合には  $l/L$  が  $0.2$  とは、端末移動速度の最高値が  $100\text{km/h}$  である前提に相当する。図より、各端末の移動に応じて、動的に端末グループが構成されていることがわかる。例えば、(i)における端末  $D$  は、(i)の時点では Agent 状態にあり、単独でグループを構成していたのに対し、その 10 秒後の(ii)においては Non-Agent へと変化し、端末  $H$  のグループへと加入している。さらに、(iii)における端末  $E$  は、Agent 端末の  $H$  のグループに属する Non-Agent 端末であるが、その後の(iv)においては端末  $A$  のグループへと加入している。これらの

2 端末の挙動については、図 2 における Agent 端末、Non-Agent 端末の動作モード更新の条件をそれぞれ満たした結果、一時的な Neutral 状態を経た後に新たな動作モードに移行した結果だと考えられる。

### 3.3 スループット特性

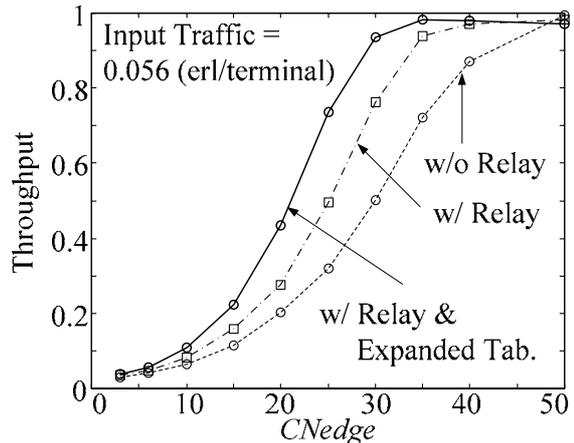


図 5 スループット特性。

図 5 に、スループット特性を示す。比較として、第 2.3 節に述べた拡張テーブルを用いない方式 (w/Relay)、提案するパケット中継を行わず、すべて直接通信を用いる方式(w/o Relay)の特性も併せて示す。電力が十分高い領域では、端末間距離が離れた端末に対しても直接通信によって十分パケットを到達させることができるため、3 方式の特性に差はなく、かつスループットもほぼ 1 であるが、電力が低くなるにつれて、特性は劣化している。しかし、パケット中継を用いる 2 方式では、送信電力が低い状況下においても、Preferable Path を利用し、かつ中継によってパケットの到達範囲を格段に改善することが可能であるため、中継を行わない方式に比べて高いスループットを確立していることが確認できる。さらに、拡張テーブルを用いる方式はグループ間のパケット通信の際により柔軟な中継を実現することができるため、拡張テーブルを用いない方式に比べてさらにスループットを改善できていることがわかる。

#### 4 試作機による評価

##### 4.1 試作端末概要

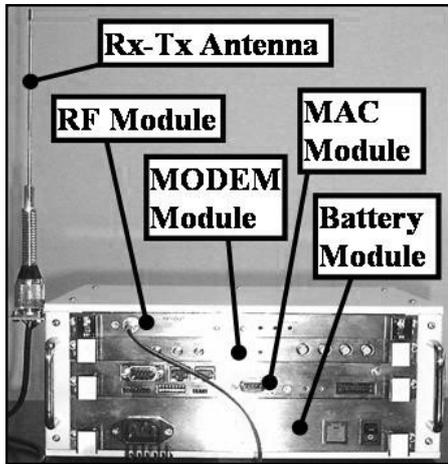


表 6 試作端末外観.

表 2 試作端末諸元

送信電力	3W
周波数帯	150, 260, 400 MHz
最大伝送速度	256kbps
占有帯域幅	300kHz
変調方式	DBPSK, DQPSK, $\pi/4$ -DQPSK
アクセス方式	Slotted-ALOHA, CSMA
装置寸法(本体)	12×30×20 (高さ×横幅×奥行) cm

情報通信研究機構では、前節までの機能を実装し、試作機を開発している。本節以降では、この試作機について述べるとともに、これを用いて行った屋外無線通信環境における特性取得実験の結果を報告する。図 6 に試作端末の外観を、さらに表 2 に本端末の諸元をそれぞれ示す。試作端末は、最も長い一辺が約 30cm であり、車両等に搭載しての屋外試験が容易なように小型化が為されている。同時に、使用周波数帯、変調方式、アクセス方式に関して複数方式を切り替えながら運用することができ、実装環境をパラメータとした提案アルゴリズムの効用について評価することができる。さらに、本試作機は、アプリケーションとして、IP を実現することが可能であるため、現在普及してい

る IP 機器(例えばノート PC)を接続することで、FTP や HTTP のようなプロトコルを実施した上で QOS 評価等も行われる構成となっている。

##### 4.2 屋外無線通信実験の結果



(a)



(b)

図 7 屋外実験概要;

(a)各端末の配置図,(b)試作端末の設置形態.

前節にて説明した試作端末を用いて、屋外無線通信環境において実験を行った。なお、本実験に際して、表 2 に示す試作機のパラメータのうち、周波数として 260MHz、変調方式として  $\pi/4$ -

DQPSK, アクセス制御方式として CSMA をそれぞれ採用した. 実験は横須賀市において 4 台の端末 (A, B, C, D) を用いて行われた. 図 7(a)に各端末の配置を示す. 図の配置において, 端末 B は Agent 端末となり, A と C を伴って端末グループを形成した. さらに, 端末 D は単独の Agent となり別の端末グループを形成した. 特に端末 C に関して試作機端末の設置状態と, 周辺の様子を図 7(b)に示した. 表 3 に, 図 7 の状態における各端末の平均受信電力の実測値を示す.

図 7(a)における端末間の距離は最大で 1km 弱となっている. これは, 中規模の市街地といえる当該地において, 後述する特性取得実験を行うにあたり, ある程度安定した特性を得られることを考慮した上で定めた端末間距離である. なお, 開放地等の, 地形効果がより有利に働く場合においては, 2~3km 程度の端末間距離まで, 直接通信が達成できたことを別途確認している.

表 3 平均受信電力.

送 \ 受	平均受信電力(dBm)			
	端末 A	端末 B	端末 C	端末 D
A から	-	-83	-	-
B から	-76	-	-84	-
C から	-	-81	-	-81
D から	-	-	-77	-

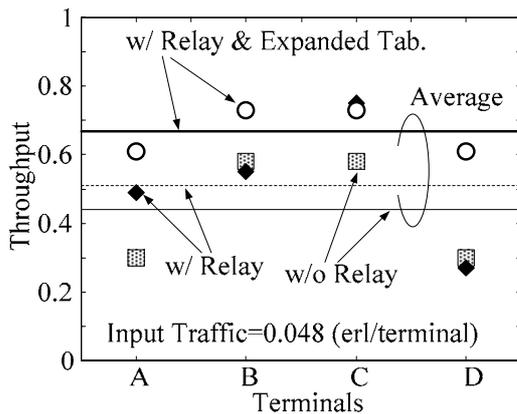


図 8 スループット特性.

図 8 に評価試験によって得られたスループット特性を示す. 図では, 各端末が発生させたパケッ

トについてそれぞれのスループットと, さらに 4 端末の平均特性について示した. さらに, 第 3 節における評価と同様に, 他の 2 方式の特性についても同様に比較した. 図より, 動的なマルチホップ通信を実現し, かつ拡張テーブルにより双方向通信への対応も行う提案方式が, 図 5 の結果同様に最も高いスループットを実現することが確認できた.

最後に, 当該試作端末のオートバイ搭載形態の実装例を図 9 に示す. 本図は, 2005 年 1 月に神戸市にて開催された国連防災世界会議[10]での総合防災展にて展示された様子である. オートバイの後部荷台に防水性, 耐振動性を確保するためのボックスを装着し, 試作端末ならびにインターフェース機器を収納している. さらに周辺機器として, PC カメラの実装についても展示している. なお, 情報通信研究所では, 図 9 と同等の構成を用いて走行中のリアルタイム動画像を伝送することに成功している.



図 9 オートバイ搭載例.

## 5 おわりに

本稿では, VHF 帯等を用いる自営用移動無線システムへの適用を前提として, 移動端末同士が無線伝搬路環境の変動に柔軟に対応するため, 各端末が他端末からの受信電力をパラメータとして自律分散的にパケットルーティングを実現する動的マルチホップ通信アルゴリズムを提案し, 諸特性について報告した. 計算機シミュレーションによる考察, ならびに試作機を用いた評価試験のいずれにおいても, 提案アルゴリズムによるパケットルーティングの効果を確認することができた. 今後の課題として, より高効率の動的マルチホップ通

信アルゴリズムの検討や,他のシステムとの接続に対する柔軟性の確立,さらに端末自体の小型化等が挙げられる.

WIRELESS COMMUNICATIONS,” Feher / Prentice Hall, NJ, 1997.

[10]“ 国 連 防 災 世 界 会 議 , ”  
<http://www.bousai.go.jp/wcdr/> .

#### 参 考 文 献

- [1] ARIB STD-T79, “Regional Digital Mobile Telecommunication System”, September 2001.
- [2] C. P. P. Bhagwat, “Highly Dynamic Destination-Sequenced Distance Vector Routing (DSDV) for Mobile Computers,” Proc. of ACM SIGCOMM’94, pp. 234-244, September 1994.
- [3] C. Perkins and E. Royer, “Ad-Hoc On-Demand Vector Routing,” Proc. of 2<sup>nd</sup> IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications, February 1999.
- [4] V. Park and M. Scott Corson, “A Highly Adaptive Distributed Routing Algorithm for Mobile Wireless Network,” Proc. of IEEE INFOCOMM’97, pp. 1405-1413, March 1996.
- [5] K. Ishida, Y. Kakuda, T. Kikuno, and K. Amano, “Distributed Routing Protocol for Finding Two Node-Disjoint Paths in Computer Networks”, IEICE Trans., Commun., Vol. E82-B, No. 6, pp. 851-858, June 1999.
- [6] Y. Zhang and S. Asano, “Routing Algorithm for Asymmetric Multi-Destination Connections in Multicluster Networks”, IEICE Trans., Commun., Vol. E81-B, No. 8, pp. 1582-1589, August 1998.
- [7] 児島史秀, 菅田明則, 藤瀬雅行, 大山卓, 清水聡, 徳田清仁, “高度 VHF 帯自営無線のための自律分散型マルチホップ通信端末の開発”, 情処研報, Vol.2004, No.60 (2004-ITS-017), pp. 45-50, May 2004 .
- [8] F. Kojima, H. Harada, and M. Fujise, “An Autonomous Relay Access Scheme for an Inter-Vehicle Communication Network”, Proc. of IEEE PIMRC2000, pp. 974-978, September 2000.
- [9] S. Sampei, “APPLICATIONS of DIGITAL WIRELESS TECHNOLOGIES to GLOBAL