

推薦論文

転送リストを用いた高効率・低負荷 フラディング方式の提案

長谷川 淳^{†1,†2} 板谷 聡子^{†1} 近藤 良久^{†1}
四方 博之^{†1} デイビス ピーター^{†1} 榊原 勝己^{†2}
鈴木 龍太郎^{†1} 小花 貞夫^{†1}

車車間通信のような自律分散ネットワークにおける 1 対多通信において、フラディング方式は広く利用されている。しかしながら、通常のフラディング方式では、全端末が受信パケットの転送を行うため、ネットワーク内のパケット総数が急激に増加してしまう。本論文では、受信したパケットの統計情報を用いて転送先端末を指定することにより、冗長な転送を削減する方式を提案する。そして、提案方式の性能を計算機シミュレーションおよび実装実験により評価する。その結果、固定端末 50 台の環境において、通常のフラディング方式では 70% 前後であったパケット損失率を、提案方式により 16% 以下に低減できることを示す。さらに、提案方式は、既存方式と比較して、端末への負荷の観点での優位性があり、移動端末環境下においても低いパケット損失率を維持できることを明らかにする。

Forwarding List Flooding Using Statistical Information on Received Packets

JUN HASEGAWA,^{†1,†2} SATOKO ITAYA,^{†1}
YOSHIHISA KONDO,^{†1} HIROYUKI YOMO,^{†1} PETER DAVIS,^{†1}
KATSUMI SAKAKIBARA,^{†2} RYUTARO SUZUKI^{†1}
and SADA OOBANA^{†1}

Flooding is widely employed in one-to-many communications in ad-hoc wireless networks such as inter-vehicle networks. However, existing flooding methods have the problem that the total number of forwarded packets in the network drastically increases since every node forwards every received packet. In this paper, we propose a method to suppress unnecessary forwarding of packets by

specifying the forwarding nodes with the aid of statistical information obtained from received packets. The performance of the proposed method is evaluated by extensive computer simulation as well as by field experiments. The results indicate that the proposed method can greatly improve performance by reducing the packet loss ratio down to about 16%, compared to 70% in conventional methods. We also show that the proposed method has lower computational complexity than conventional methods, and keeps low packet loss ratio even under high-mobility scenarios.

1. はじめに

近年、無線 LAN あるいは Bluetooth などの短距離無線通信技術の急速な発展と普及により、これらの無線デバイスを有する端末を用いて、一時的かつ即時的にネットワークを構築する自律分散ネットワークに関する重要性が高まっている。たとえば、大規模被災地向け無線通信や ITS (Intelligent Transport Systems) での車車間・路車間通信などをターゲットとした多様な開発が行われている^{1),2)}。ITS では特に、各車両の位置情報および安全運転支援のための緊急情報などを瞬時に車両間で共有しなければならない。このような複数の無線端末間での情報共有には、一般的にブロードキャスト通信が用いられ、その通信方式としてフラディングを用いたシステムが注目されている³⁾⁻⁷⁾。通常のフラディングでは、パケットを受信したすべての端末が次の中継端末へ転送を行う。このため、同じパケットを複数受信することになり、冗長度は高くなる。しかしながら、端末数の増加にとまらぬ、ネットワーク内に存在するパケット数が急増してしまう。これにより、パケットの衝突が増えるため、パケット損失率が劣化する。

本論文では、この問題を解決するために、受信パケットの統計情報に基づいた転送リストを導入することにより、パケット送信時に転送を行う端末を指定し、ネットワーク内の冗長なパケットを削減する方式を提案する。提案方式は、付加的な制御パケットを用いることなく、転送パケット数を確実に減らすことができる。また、提案方式の性能を計算機シミュレーションと実装実験により評価する。

†1 ATR 適応コミュニケーション研究所

ATR Adaptive Communications Research Laboratories

†2 岡山県立大学

Okayama Prefectural University

本論文の内容は 2008 年 7 月のマルチメディア、分散、協調とモバイル (DICOM2008) シンポジウムにて報告され、同プログラム委員長により情報処理学会論文誌ジャーナルへの掲載が推薦された論文である。

以下, 2章では, フラディングにおける既存の転送数削減方式に関する研究動向を示し, 3章において, 提案方式を説明する. 4章では, 既存方式および提案方式の実装条件およびパラメータについて説明する. 5章では, 固定端末環境における提案方式の性能を, QualNetを用いた計算機シミュレーションにより評価するとともに, 実装実験によっても検証する. 6章では, 移動端末環境での評価を行い, 最後に, 本論文を7章でまとめる.

2. 既存研究

2.1 転送範囲を限定したフラディング

フラディングにおける転送数を削減する最も単純な方式として, IPヘッダ内のTTL (Time-To-Live) フィールドを用いてホップ数を徐々に増加させる方式が提案されている³⁾. Yangらの方式³⁾では, 比較的少ないホップ数に制限したうえでフラディングを開始し, 所望の端末が見つからない場合に, ホップ数を増加させる. ITSでの利用を考えた場合, 緊急情報を必要とするのは, 比較的近隣の端末である. この意味において, Yangらの方式は有効であると考えられる. しかしながら, ホップ数の制限だけでは, 送信端末近傍の端末は必ず受信した全パケットの転送を行うため, 根本的な問題の解決になっているわけではない.

2.2 待ち時間を用いたフラディング

全端末が転送を行うフラディングでは, 複数の端末から同じパケットが送信される. 転送しようとしているパケットを, 次の中継端末がすでに受信しているならば, 転送をキャンセルすることにより, 転送パケット数を削減することができる⁴⁾⁻⁷⁾. 文献7)の方式では, パケットを受信した端末は適切な待ち時間を設けた後に転送を行う. その待ち時間内に同一パケットを受信した場合は, 転送をキャンセルすることにより, 効率化を図っている. さらに, 複数の待ち時間関数を提案し, 待ち時間をランダムに設定する方式と比較を行っている. その結果, 数百台規模の評価では, フラディングの性能は待ち時間の決定方法には影響されないことを示している.

2.3 転送確率を用いたフラディング

受信したパケットを確率的に転送することにより, 転送パケット数を削減する方式が提案されている^{8),9)}. 転送確率を小さくすることにより, 転送パケット数を削減することができるが, 転送確率を極端に小さくした場合, 到達性が低くなってしまふ. 一方, 到達性を維持するためには, 転送確率を大きくする必要があり, 転送パケット数の削減効果が小さくなる¹⁰⁾, このため, 転送確率を適切に設定する必要がある.

2.4 MPRを用いたフラディング

MPR (Multipoint Relay)¹¹⁾は, アドホックネットワーク向けのルーティングプロトコルであるOLSR (Optimized Link State Routing)¹²⁾で用いられているフラディング方式である. MPRでは, 選択された端末 (MPR 端末) のみが転送を行う. 同一パケットを複数の端末から受信する機会を減らしつつ, ネットワーク全体に情報が行き渡るようにMPR 端末が選択される. MPR 端末を適切に選択するためには, 各端末の隣接端末情報を定期的に交換するための制御パケットが多数発生する. このため, MPR 端末が頻繁に切り替わるような環境であれば, 端末における計算処理負荷が増加する. さらに, 適切なMPR 端末の選択が困難になり, 結果的に転送パケット数削減の効果は小さくなる.

3. 提案方式

MPRにおける処理負荷を軽減するとともに, パケットを転送する端末数を確実に減少させるために, 各端末が受信パケットの統計情報を管理するリスト (受信パケット統計リスト) を保持し, これに基づいてパケットを転送する次の転送端末を指定する方式を提案する.

各端末の受信パケット統計リストでは, 送信元端末から2ホップで到達したパケットの受信数を, 送信元端末と中継した隣接端末の組として記録する. 中継回数はIPヘッダのTTL, 中継を行った端末はIPヘッダの送信元IPアドレスにより識別する^{*1)}. また, 送信元端末の識別には, 4.6節で記述する独自のヘッダ情報を用いる. ここで, TTLは, その値を用いてホップ数の制限を行うため, 送信元端末において, ネットワーク内で統一の値に設定されているものとする. パケットを受信した端末は, TTLにより, そのパケットが送信元から2ホップで到達したと識別した場合, 送信元IPアドレスと中継を行った端末を識別し, 受信パケット統計リストの該当項目をインクリメントする. また, パケットが送信元端末から1ホップで到達し, かつ, 送信元端末が受信パケット統計リストの隣接端末に存在しない場合, 隣接端末の項目が追加される. 図1のネットワーク構成における端末A, Bの受信パケット統計リストの一例を表1に示す. 表1の各項目の数値は, 送信元端末から2ホップで受信したパケット数である. たとえば, 端末Dを送信元とするパケットが, 端末Aを経由して端末Bに到達した場合, 端末Bは自局の受信パケット統計リストの該当箇所 (表1(b)では5となっている) をインクリメントする.

*1 提案方式では, 中継端末はパケットを転送する場合, 送信元IPアドレスを自端末のアドレスに変更するものとする. 詳細については4章参照.

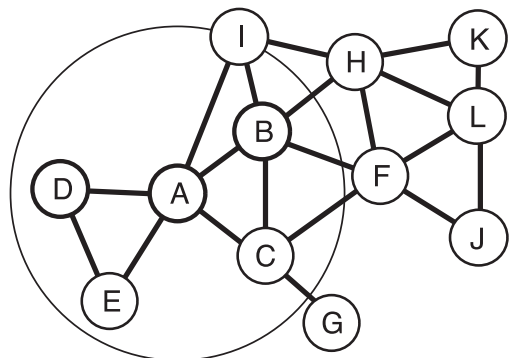


図 1 ネットワーク構成例
Fig. 1 Example of a network.

表 1 転送リスト作成に用いる受信パケット統計リスト

Table 1 Statistical information table used to make forwarding list.

(a) 端末 A における統計リスト

送信元 アドレス	隣接端末 IP アドレス				
	B	C	D	E	I
B	-	0	0	0	0
C	0	-	0	0	0
D	0	0	-	0	0
E	0	0	0	-	0
F	3	4	0	0	0
G	0	7	0	0	0
H	6	0	0	0	1
I	0	0	0	0	-
J	0	0	0	0	0
K	0	0	0	0	0
L	0	0	0	0	0
合計	9	11	0	0	1

(b) 端末 B における統計リスト

送信元 アドレス	隣接端末 IP アドレス				
	A	C	F	H	I
A	-	2	0	0	0
C	1	-	1	0	0
D	5	0	0	0	0
E	4	0	0	0	0
F	0	0	-	0	0
G	0	6	0	0	0
H	0	0	0	-	0
I	0	0	0	0	-
J	0	0	7	0	0
K	0	0	0	6	0
L	0	0	4	3	0
合計	10	8	12	9	0

提案方式では、受信パケット統計リストの情報から、転送端末として適切な端末を、次節で述べる方法により自律的に選択する。そして、転送端末の IP アドレスを記載した転送リストを独自のヘッダに付与する(4.6 節参照)。これにより、不必要な重複するパケット転送を削減する。以下に中継端末の選択に不可欠な技術と選択方法の詳細について記述する。

なお、転送端末の指定に転送リストを使用し実現していることから、提案方式を FLF (Forwarding List Flooding) と呼ぶ。また、端末起動時には、受信パケット統計リストが作成されていないため、初期状態ではピュアフラディングで動作する。

3.1 転送端末の指定

FLF では、ネットワーク内に均一に情報を配信するために、送信元で指定する転送端末(送信元指定端末)と、受信したパケットを転送する端末で指定する転送端末(転送時指定端末)の条件を別に定める。なお、選択する端末数 S はあらかじめ設定するものとし、送信元指定端末および転送時指定端末で共通とする。

3.1.1 送信元端末における転送端末の指定

送信元端末では、可能な限り距離が離れ、通信路状態の良い端末を隣接端末の中から選択する。さらに、パケットをネットワーク全体に配信できるように、より中継を多く行っている端末を転送先として選択する必要がある。たとえば、図 1 において、端末 A がパケットを送信する場合を考える。表 1(a) より、端末 D および E により 2 ホップで中継されたパケットを端末 A は受信していないことが分かる。これは、図 1 に示したように、端末 D および E の先に送信を行う端末が存在しないためである。よって、端末 A は端末 D, E を転

送端末に選択する必要はない。また、表 1(a) より、端末 I は端末 A の隣接端末となっているが、端末 A が端末 I より 1 回目の転送で受信したパケットは、端末 H を送信元とする 1 個のみである。これは、図 1 より分かるように、端末 I が、端末 A の通信可能な限界距離に存在し、パケット損失が多く発生しているためである。したがって、端末 I を転送時指定端末に選択した場合、パケットの転送に失敗する可能性が高い。さらに、表 1(a) から端末 B, C は中継を多く行っていることが分かる。よって、端末 A は、端末 B, C を送信元指定端末とすることが適切である。具体的な送信元指定端末の選択手順を以下に示す(図 2 参照)。

- (1) 隣接端末ごとの受信パケット数の合計を算出する。すなわち、表 1 で列方向の合計を算出する。
- (2) (1) で算出したデータを降べきに並べ替える。このとき、受信パケット数の合計が 0 のものは除外する。
- (3) (2) で並べ替えたデータから上位 S 個の端末を送信元指定端末として指定する。 S 個に満たない場合は、可能な限り冗長性を確保するため、3.3 節で示す信号強度を用

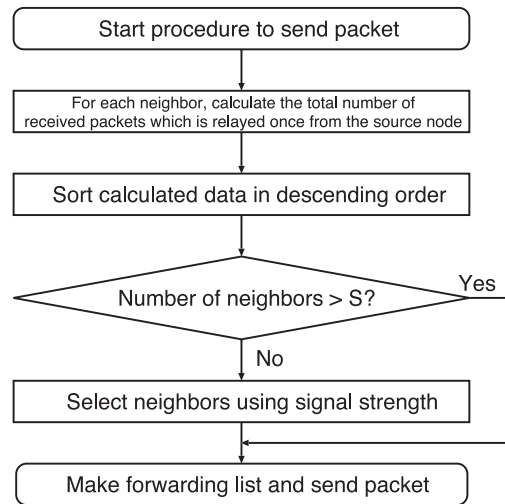


図2 送信端末の処理手順
Fig. 2 Flowchart for source node.

いた方法により中継端末を追加し、 S 個選択する。ただし、隣接端末数が S に満たない場合は、上記方式により選択可能な端末をすべて選択する。

送信元指定端末として選択した S 個の端末の IP アドレスは転送リストとしてパケットに付与する。図 1 において、 $S = 2$ の場合に、送信元端末 A が送信元指定端末として指定するのは、端末 B および C となる。ここで、端末 D, E は端末 A からのパケットを受信するが、転送しないことに注意したい。

3.1.2 中継端末における転送端末の指定

パケットを受信した端末は、パケットに付与されている転送リストを確認し、自端末の IP アドレスがあれば、転送処理を実施する。一方、自端末の IP アドレスがなければ、パケットを転送しない。

受信したパケットの転送リストで指定された端末では、情報の伝達範囲を広げる必要がある。すなわち、受信したパケットの送信元から可能な限り遠ざかる方向にあり、通信路の安定した端末を転送端末として指定すべきである。このため、受信したパケットを転送していない隣接端末、すなわち、送信元端末と反対方向にいと推定される端末の中から、通信路の安定した端末を転送端末として選択する。たとえば、図 1 において、端末 B が端末 A の

パケットを転送する場合を考える。このとき、3.1.1 項で述べたように、端末 B, C が転送リストに記載されている。このため、端末 B から端末 C へ転送すると、重複チェックにより廃棄される可能性が高い。また、表 1 (b) より、端末 B が端末 I から受信したパケット数は 0 となっているため、端末 A に対する端末 D, E と同様、端末 I から先の転送先が少ないと推定される。すなわち、端末 I を経由するとパケットが十分に広まらない可能性が高くなる。端末 F, H はパケット転送を多く行っており、転送時指定端末として適切であると考えられる。転送時指定端末の具体的な選択手順を以下に示す。

- (1) 受信パケット統計リストから受信したパケットの送信元 IP アドレスと一致する行を抽出する。
- (2) (1) で抽出した行から受信パケット数 P (初期値 $P = 0$) が最小となっている隣接端末をすべて抽出する。
- (3) (2) で抽出した各隣接端末に対し、列方向の合計を算出する。
- (4) (3) で算出したデータを降べきに並べ替える。
- (5) (4) で並べ替えたデータの上位から S 個を転送時指定端末として選択する。 S 個に満たない場合は、 P をインクリメントし、(2)~(5) の処理を繰り返し、 S 個選択する。ただし、隣接端末数が S に満たない場合は、上記方式により選択可能な端末をすべて選択する。

また、パケットを受信してからの手順を図 3 に示す。

図 1 で端末 B が、端末 A から送信元指定端末に選択された場合、はじめに、端末 B は表 1 (b) より送信元 IP アドレスが端末 A の行を抽出する。次に、抽出した行のデータから受信パケット数が最小である隣接端末 F, H, I を選択する。そして、各隣接端末の合計受信パケット数を算出し、降べきに並べ替える。最後に、上位 S 個を転送時指定端末として選択する。 $S = 2$ の場合、端末 F, H が端末 B の転送時指定端末として選択される。端末 B では、受信したパケットの転送リストに記載されていた端末 B, C の IP アドレスを削除し、端末 F, H の IP アドレスを転送リストに記載して転送する。

以上の転送処理は、パケットがネットワーク内の全端末によって受信され、重複チェックにより破棄されるか、もしくは TTL 消費により破棄されるまで繰り返される。受信パケット統計リストの対象となる行の中で、統計値が少ない隣接端末は、自端末より先に同じパケットを受信していない可能性が高い。したがって、その隣接端末は、自端末からみてパケットを受信した端末と反対側に存在すると推測できる。また、統計値が少ない隣接端末の中から、より多くパケットを転送している端末を選択することで、通信路の安定した端末へ

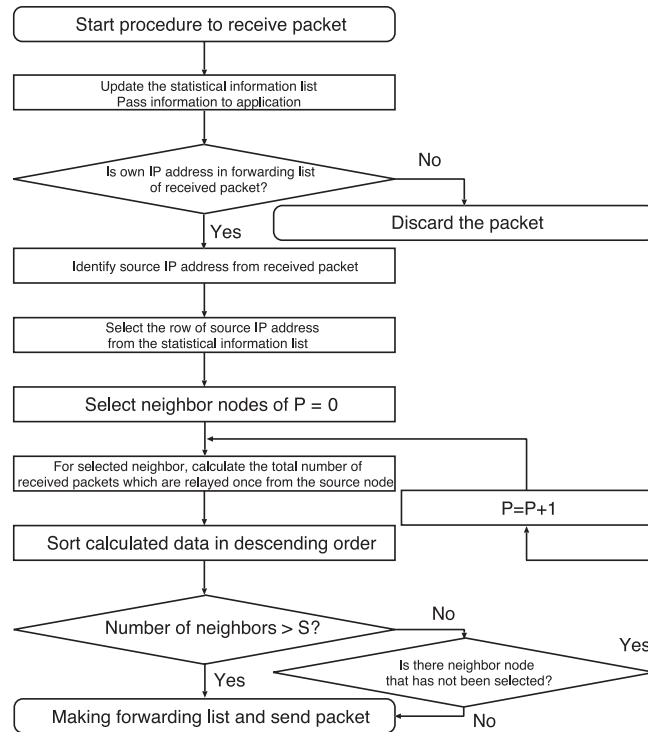


図 3 受信パケットの処理手順
Fig. 3 Flowchart for relay node.

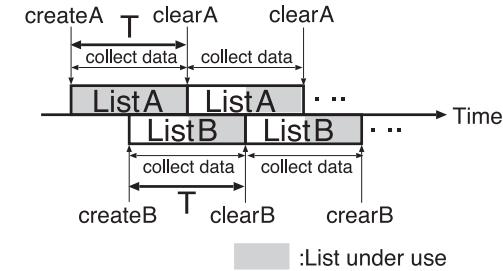


図 4 受信パケット統計リストの作成と使用時間
Fig. 4 Time schedule for making and using statistical information table.

転送依頼を行うことが可能になる。

3.2 統計情報収集の効率化

転送端末を選択する際に重要な役割を果たす受信パケット統計リストは、トポロジの経時変化に対応するために、 T 秒間隔で書き換えられるものとする。このとき、各端末が受信パケット統計リストを 1 個しか保持していない場合、書き換え直後のリストからは、十分な信頼度で統計情報を得ることができない。このため、各端末は、受信パケット統計リストを 2 個保持し、各々を $T/2$ 秒ごとに参照するものとする。この様子を図 4 に示す。すなわち、統計リスト A および B は、各々の書き換え周期の前半 $T/2$ 秒間では、統計情報の収集のみが行われ、後半 $T/2$ 秒間では、統計情報の収集・更新が行われると同時に、転送端末の選

択に利用される。

3.3 信号強度を用いた中継端末の指定

ネットワークポロジによっては、端末密度の低い箇所が発生し、 S 個の転送端末の指定が困難となる場合がある。これを補完するために、信号強度を用いた中継端末の選択も追加で行う。しかしながら、信号強度の強い端末を単純に選択すると、自端末に近い端末を選択する可能性が大きくなる。これを回避するために、筆者らが提案したルーティングプロトコルの経路安定化に用いる信号強度閾値の設定方法¹³⁾を利用する。文献 13) では、受信したパケットから信号強度を統計情報として取得し、この情報から適切な閾値を自動的に設定する。設定された閾値は、その端末にとって、安定した通信が可能な最小信号強度となる。この閾値以上の受信信号強度となる端末を小さい順に選択することにより、可能な限り離れた端末を選択することができる。文献 13) で計測した端末間の距離とパケット損失率の関係を図 5 に示す。図 5 より、端末間距離を徐々に広げた場合、パケット損失が多発する状況では受信信号強度の最大値が急激に減少していることが分かる。この特徴を利用し、適切な信号強度閾値を設定している。具体的には、以下の作業を行う。

- (1) 隣接端末 i からのパケットの最大受信信号強度を A_i とする。一般性を失うことなく、 $A_1 < A_2 < \dots < A_N$ とする。ただし、 N は隣接端末数である。
- (2) A_i の差分 Δ_i を以下のように定義する。

$$\Delta_i = A_i - A_{i-1} \quad (i = 2, 3, \dots, N) \quad (1)$$
 Δ_i が最大となる i を i^* として算出する。

$$i^* = \arg \max_i (\Delta_i) \quad (2)$$

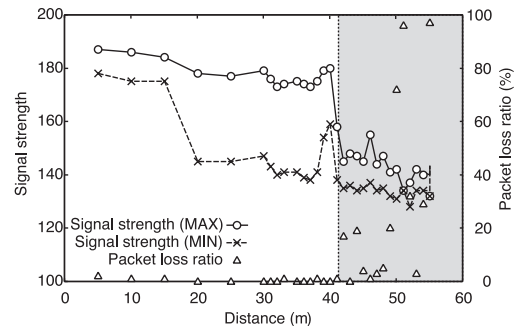


図 5 端末間距離とパケット損失率の関係 (文献 13)

Fig. 5 The dependence of signal strength and packet loss ratio on separation distance.

(3) 転送端末を $i^*, i^* + 1, \dots, N$ の順に設定する.

信号強度閾値を決定するために取得している情報も、受信パケット統計リストと同様に情報収集時間が必要である。そのため、信号強度の閾値設定に用いる統計情報についても、受信パケット統計リストと同様に 2 つのリストを持つことにより、つねに最新の情報を利用できるようにする。

信号強度を用いた方法単独でも、中継端末の選択が可能である。しかしながら、車車間通信のような環境では、電波強度の揺らぎが、固定環境に比べ非常に大きいため、本方式では、受信パケット統計リストを用いた端末選択の補足手段としての利用にとどめるものとする。

4. 既存方式および FLF の実装

QualNet (version 4.0.1) を用いた計算機シミュレーションおよび実装実験により FLF の性能を評価する。ここでは、既存方式および FLF に関する実装のパラメータなどについて述べる。

4.1 フラディングプロトコル

フラディングに関する情報取得および制御を実施するため、IP 上にフラディングプロトコルを実装する。フラディングプロトコルのヘッダを図 6 に示す。すなわち、16 バイトのヘッダが IP ヘッダの後に付与される。2 バイトの情報種別はデータの種別を示すもので、たとえば、通常データ/緊急データの識別を想定している。以下では通常データのみの扱おうものとする。

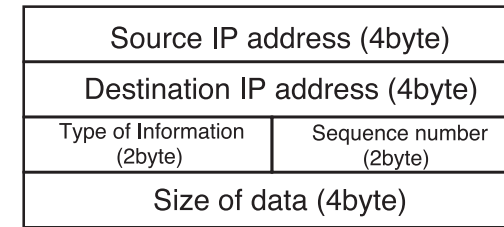


図 6 フラディングプロトコルヘッダ

Fig. 6 Header of packet for flooding protocol.

4.2 ピュアフラディングの実装

改良のないフラディングでは、1 度送信したパケットの再送信を回避するために、重複チェック機能が実装されている。重複チェックでは、フラディングプロトコルヘッダの送信元 IP アドレスとシーケンス番号を用いて判断する。ここでは、重複チェックによる多重送信の回避と、TTL による転送回数制限を実施したものをピュアフラディングとする。

転送回数制限に用いる TTL は IP ヘッダ内にある値¹⁴⁾ を利用し、初期値としてネットワーク全体で統一された最大ホップ数を指定する。QualNet による計算機シミュレーションおよび実験による予備調査により、パケット損失率が最小となる最大ホップ数 5 に設定した (TTL=5)。また、他の既存方式および FLF に対しても、重複チェック機能と TTL による転送回数制限を実装する。

4.3 待ち時間を用いたフラディングの実装

待ち時間を用いたフラディング⁴⁾⁻⁷⁾ では、重複チェックを受信時と待ち時間経過後の転送前の 2 回実施することにより、待ち時間中に同一パケットを受信した場合は転送をキャンセルできるように設定する。各転送端末における待ち時間は、0~10 ミリ秒の範囲でランダムに設定する⁷⁾。

4.4 確率的フラディングの実装

確率的フラディング^{8),9)} では、転送確率を隣接端末数の関数として設定する。予備調査により、パケット損失率が最小となる表 2 に示す転送確率を用いる。

4.5 MPR を用いたフラディングの実装

MPR を用いたフラディング¹¹⁾ では、MPR 端末のみが受信パケットの転送を行う。MPR の設定には、RFC に準拠した OLSR の実装¹⁵⁾ を利用した。MPR 端末の決定に必要な隣接端末間での情報交換に関するパラメータは、OLSR と同一に設定した。そのため、Hello

表 2 確率的フラディングにおける転送確率

Table 2 Forwarding probability in flooding using probability.

隣接端末数	1-5	6-10	11-20	21-50
転送確率	100%	50%	20%	10%

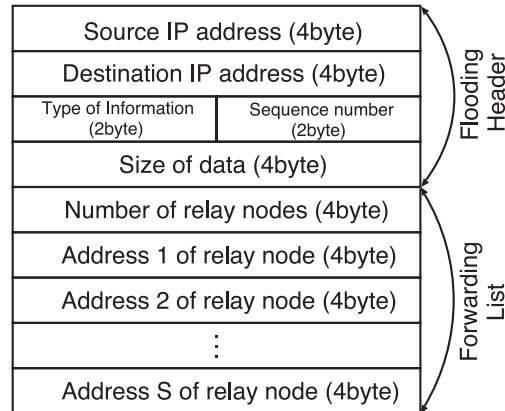


図 7 転送リストを付加したフラディングプロトコルヘッダ

Fig. 7 Header of packet for flooding protocol with forwarding list.

パケットは各端末から 2 秒間隔で送信される。

4.6 FLF の実装

転送リスト作成に用いる受信パケット統計リストは、パケットを受信した際、IP ヘッダから隣接端末 IP アドレスとホップ数 (TTL)、フラディングプロトコルヘッダから送信元 IP アドレスを採取し、対象となる箇所をインクリメントすることにより更新される。

また、提案方式では、転送を依頼する送信元指定端末あるいは転送時指定端末の IP アドレスを転送リストとして、ヘッダに付与する必要がある。このため、図 7 で示すように、フラディングプロトコルヘッダに、転送指定端末数 S と転送を指定する IP アドレスのリストを転送リストとして追加する。

転送端末数 S および統計情報の収集時間 T を定めるために、あらかじめ QualNet による計算機シミュレーションおよび実験による検証を行った。転送端末数 S に関しては、1~3 の範囲で、また、統計情報収集時間 T に関しては、つねに最低 10 パケット分の統計情報を活用する 2 秒を中心に、1~3 秒の範囲で調査を行った。結果として、端末が移動しない

場合においてパケット損失率が最小となった $S = 2$ 台、 $T = 2$ 秒に設定する。すなわち、パケットは指定された 2 台の端末に転送される。また、受信パケット統計リストは、1 秒ごとに新しく作成され、1 秒ごとに新しいリストが参照される。

4.7 評価項目

フラディングでは、ネットワーク全体への配信を確保できる程度に転送パケット数を削減する必要がある。しかしながら、パケット数を必要以上に削減すると、冗長性も失われ、パケットがネットワーク全体に行き渡らなくなる。そのため、評価項目としてネットワーク内で最も距離が離れた端末間のパケット損失率を用いる。ここで、パケット損失率を、

$$\text{パケット損失率} = \frac{\text{未到達パケット数}}{\text{送信パケット数}} \quad (3)$$

と定義する。また、MPR のように、転送パケット数の削減をするために、付加的な制御パケットの交換が必要な場合、各端末における処理量は増加してしまうと考えられる。このため、実装実験では、各端末における CPU 使用率を測定し、評価項目に加える。

5. 固定端末環境における評価

固定端末環境における FLF および既存方式の性能を評価する。ここで、停止している車庫間での定期的な位置情報の交換をアプリケーションとして考える¹⁶⁾。文献 16) に従い、各端末が 100 ミリ秒間隔で位置情報パケットを送信しており、パケット損失率を 20% 以下に抑える必要があるものと想定する。

5.1 評価環境

計算機シミュレーションおよび実験で共通の諸元を表 3 に示す。QualNet による計算機シミュレーションでは、はじめに、400 m × 400 m のフィールドに、最も距離が離れた端末どうしが直接通信できない距離となるように、ランダムに端末を配置した。すなわち、最も離れた端末へパケットを送信するには、少なくとも 2 ホップ必要となる。なお、配置パターンは 10 回の試行を実施し、端末間距離が最も長い 2 点間のパケット損失率の平均値で評価を行う。車庫間通信を考える場合、端末どうしが見通し内であっても、建物による反射などにより、送信信号が複数の経路を通過して受信機に到達する。このため、マルチパスフェージングの影響が大きくなる。また、大型車が障害物となり、シャドウイングの影響も考えられる。そのため、通信路には、マルチパスフェージングのモデルであるライスフェージングおよびシャドウイングモデルを適用し、より実環境に近い環境で評価を実施する。

実装実験においても、最も遠い端末へパケットを転送するには、少なくとも 2 ホップ必要

表 3 シミュレーションおよび実験諸元
Table 3 Simulation and experiment conditions.

端末数	10, 30, 50
データサイズ	100 byte
パケット生成間隔	100 msec
パケット送信数	5,000
無線デバイス	IEEE802.11b
パスロスモデル	2 波モデル
フェージングモデル	ライスフェージング ($K = 4.84$)
シャドウイングモデル	対数正規分布 ($\sigma = 4$ dB)

となるように屋内に端末を配置した。全端末は、Red Hat Linux 9 (kernel 2.4.25) を OS とするノート PC である。無線インタフェースとして、IEEE 802.11b に準拠した PLANEX 製 GW-CF11H (Prism chip 2.5) を使用し、無線ドライバ orinoco_cs 0.15rc2STA によってアドホックモードで駆動させた。また、実装実験では、同一配置で 10 回施行の平均値を評価に用いる。さらに、全端末で CPU 使用率を 1 秒間隔で収集した。

5.2 固定端末環境におけるパケット損失率

端末数 10, 30, 50 台に対する既存方式および提案方式のパケット損失率を図 8 に示す。ここで、棒グラフは QualNet による計算機シミュレーションの結果を示し、プロットは実証実験の結果を示している。

ピュアフラッディング (Pure) では、端末数 30 台で所望のパケット損失率 20% を大きく上まわっている。待ち時間を用いたフラッディング (Wait) では、端末数 50 台でピュアフラッディングと同等のパケット損失率となっている。待ち時間を用いたフラッディングでは、4.3 節で述べたように、待ち時間を 0~10 ミリ秒の範囲でランダムに設定し、待ち時間内に同じパケットを受信した場合、転送をキャンセルしている。しかしながら、端末数の増加により、同程度の待ち時間を選択する端末が増加し、転送パケットの衝突可能性が増す。そのため、転送をキャンセルすることができず、パケット損失率が高くなっている。確率的フラッディング (Probability) では、端末数 30 台でパケット損失率が 20% 以上になっている。表 2 に示す確率により転送を行うため、たとえば、隣接端末数が 10 を超えると、転送されるパケットの割合は 20% 以下となる。このため、パケットがネットワーク全体に配信される可能性が低下し、パケット損失率が高くなっている。MPR を用いたフラッディング (MPR) では、端末数 50 台でパケット損失率は 20% をわずかに超えている。MPR では、台数の増加にとまらぬ、MPR 端末選択のために交換している隣接端末情報の損失も増加す

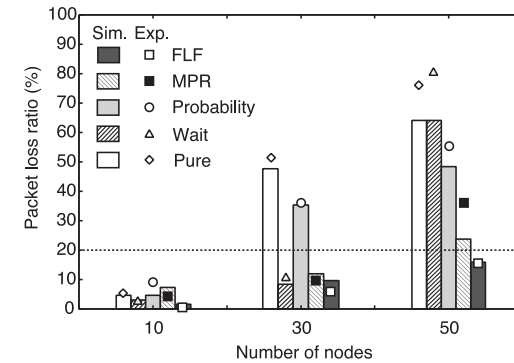


図 8 固定端末環境における計算機シミュレーションおよび実験結果
Fig. 8 Simulation and experiment results for static environment.

る。そのため、端末が固定されているにもかかわらず MPR 端末が頻繁に切り替わり、適切な選択が困難になっていると考えられる。

提案方式 (FLF) では、計算機シミュレーションおよび実装実験ともに、端末数が 50 台の場合であってもパケット損失率 20% 以下を実現している。端末数 30 台以下では、各方式とも計算機シミュレーションと実装実験の結果はほぼ一致している。しかしながら、50 台では、提案方式以外で、実装実験は計算機シミュレーションより高いパケット損失率を示している。実装実験においては、端末でバッファ溢れが多発した場合、無線 LAN カードのファームウェアがリセットされる。このため、保持しているパケットがすべて破棄され、計算機シミュレーションの結果よりもパケット損失率が高くなっていると考えられる。さらに、端末数 60, 70 台で提案方式に対して、QualNet による計算機シミュレーションのみ実施した。パケット損失率は 60 台で 17.5%, 70 台で 37.8% であった。したがって、FLF が、パケット損失率 20% 以下を維持できるのは、60 台までとなっている。

5.3 各端末における CPU 使用率

端末数が多い場合の MPR に対する計算機シミュレーションでは、他方式に比べ、長い実行時間を要した。この原因として、MPR 端末が頻繁に切り替わるような状況では、計算負荷が高くなることが考えられる。そこで、実装実験により、各端末の CPU 使用率を計測した。各方式に対する測定結果を表 4 に示す。表 4 より、ピュアフラッディングと確率的フラッディングの CPU 使用率は約 45% であり、他の方式に比べ低く、端末数の影響も非常に少ない。一方、待ち時間を用いたフラッディング、MPR を用いたフラッディング、および

表 4 平均 CPU 利用率
Table 4 Average of CPU utilization.

端末数	Pure	Prob.	Wait	MPR	FLF
10	44.5	43.3	47.7	45.1	45.2
30	46.1	45.2	62.9	66.4	49.3
50	47.8	45.3	78.9	98.2	52.3

提案方式の場合、端末数 10 台では、ピュアフラディングと同程度の CPU 利用率となっている。しかしながら、端末数が 30, 50 台と増加すると、CPU 利用率も増加している。待ち時間を用いたフラディングでは、タイマ処理を用いて制御を行っている。端末数の増加にともない、パケット数が増加することにより、この処理が大きな負荷になっていると考えられる。MPR を用いたフラディングの CPU 利用率は、最も高くなっている。MPR では、MPR 選択のために不可欠な制御パケットの損失率が増加することにより、MPR 選択のための計算量が増加し、高負荷となっていると考えられる。FLF においても、端末数の増加にともない、CPU 利用率が増加し、ピュアフラディングや確率的フラディングに比べ、若干高い計算負荷を示している。しかしながら、負荷増加は約 1.15 倍程度であり、また、パケット損失率が同程度の MPR に比べ、負荷をほぼ半減できている。なお、FLF では、端末数増加に対する CPU 利用率の増加の割合が少ないことから、端末数が 50 台よりも増えた場合にも、CPU 利用率の急激な増加はないものと予想される。これらの結果より、FLF は低いパケット損失率を確保しつつ、低負荷な転送を達成していることが分かる。

以上の結果より、端末が固定されている静的な環境においては、提案方式が最も優れたパケット損失率および端末における CPU 利用率を示すことが明らかとなった。

6. 移動端末環境における評価

次に、実環境に近い車車間通信を模擬した構成により、端末が移動をともなう環境における提案方式のパケット損失特性を、QualNet を用いた計算機シミュレーションにより評価する。

6.1 評価環境

計算機シミュレーションで想定した端末の配置と移動方向・速度を図 9 に示す。本構成では、十字路を想定し、10, 20, 30, 40, 50 台の端末を、横方向と縦方向で 3 : 2 の割合で配置した。なお、車両間距離は、交差点の入り口から端（横方向：245 m、縦方向：240 m）までを均等に分割するように設定した。たとえば、端末数が 10 台の場合、右から左に移動

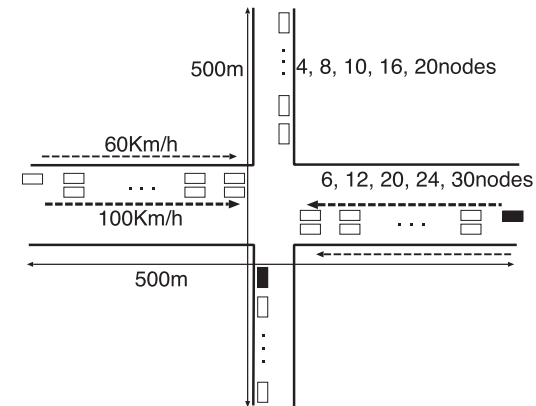


図 9 移動端末環境の計算機シミュレーション構成
Fig. 9 Node arrangement for simulation of dynamic environment.

する端末 3 台を、交差点の入り口から約 80 m 間隔で配置した。横方向に配置する端末は、図 9 で示す方向に移動するものとし、低速車線（進行方向左車線）と追越車線（進行方向右車線）の 2 列で対向している状態にある。縦方向の端末は停止している。低速車線の端末は 60 km/h、追越車線の端末は 100 km/h で移動し、各端末は非同期に 100 ミリ秒間隔でパケットを生成している。この条件の下で、図 9 の黒色で示す端末間のパケット損失率を、初期状態で右端にある端末が左端に移動するまで計測する。また、固定端末環境と同様に、通信路には、ライスフェージングおよびシャドウイングモデルを適用する。

6.2 パケット損失率

移動端末環境におけるパケット損失率を図 10 に示す。ピュアフラディング (Pure)、待ち時間を用いたフラディング (Wait) では、図 8 に示す固定端末環境に比べ、パケット損失率が数%劣化している。確率的フラディング (Probability) の場合、図 8 では端末数 30 でパケット損失率は 30%を超えていたが、図 10 では、22.7%に改善されている。今回の計算機シミュレーションでは、移動にともない、交差点付近での端末密度が高くなる。このため、転送確率が表 2 に従って低下することにより改善されていると考えられる。MPR を用いたフラディング (MPR) では、固定端末環境に比べ、10 台で約 1.5 倍、30, 50 台で約 1.2 倍に劣化している。MPR 端末の選択に用いる隣接端末情報は、2 秒間隔で交換している。しかしながら、端末が移動することにより、隣接端末情報の信頼性が低くなる。そ

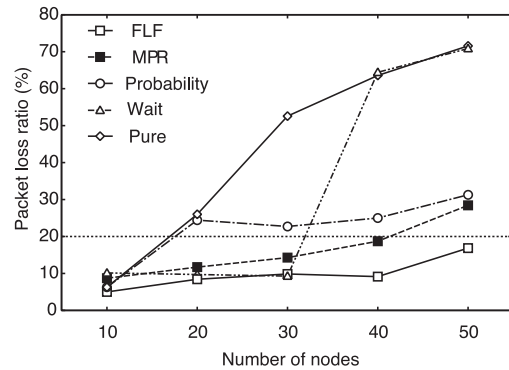


図 10 移動端末環境における計算機シミュレーション結果
Fig. 10 Simulation results of dynamic environment.

表 5 移動端末環境における情報取得時間 T が異なる場合の packets 損失率
Table 5 Packet loss ratio of FLF in dynamic environment.

情報取得時間 T (秒)	端末数 (台)				
	10	20	30	40	50
1	4.9%	8.5%	9.9%	9.2%	16.9%
2 (固定端末環境と同設定)	6.7%	10.9%	11.8%	12.0%	19.2%

のため、適切な MPR 端末が選択できず、パケット損失率が劣化している。

提案方式 (FLF) も MPR と同様に、統計情報を利用するため、移動の影響を受けると考えられる。端末が移動する場合、情報取得時間 T を 1, 2 秒とした場合の計算機シミュレーション結果を表 5 に示す。表 5 より、 $T = 1$ 秒のパケット損失率は、 $T = 2$ 秒に比べ、20%程度改善されていることが分かる。 $T = 2$ 秒では、古いデータにより転送端末が適切に選択されず、パケット損失率の劣化を招いていると考えられる。図 8 より、固定環境における提案方式のパケット損失率は、30 台で 9.2%、50 台で 15.9%である。したがって、今回の計算機シミュレーション環境では、情報取得時間 T を 1 秒に短縮することで固定環境と同等の結果を得ることができた。以上の結果より、FLF では、GPS や加速度センサなどで、端末の移動を検出した場合、情報収集時間 T を適応的に調整する必要がある。

なお、端末の移動速度 [km/h] を (低速車線, 追越車線) = (30, 60), (60, 60) と変化させて、計測を行ったが、すべての方式について、大きな差異はみられなかった。

以上の評価では、各端末が複数の隣接端末に対して安定したリンクを有する環境を想定し

た。このような環境では提案方式は有効であるが、カーブや交差点が連続的に存在するような環境では、本論文で示したほどの改善が得られない可能性がある。また車両密度がさらに増加し端末数が多くなった場合には、提案方式においても負荷が増大する可能性がある。さらに、ASV (Advanced Safety Vehicle) では、端末数の増加に対応するために、車両速度により、位置情報の送信間隔を変更する方式が検討されている¹⁶⁾。提案方式では、統計情報を活用するため、各端末の送信間隔が異なる場合、適切な転送端末の指定が困難になると考えられる。上記のような、より実環境に近い状況への対応が今後の課題である。

7. おわりに

本論文では、フラッディングにおけるパケット転送数削減方式として、自端末のパケット受信状況から、転送リストを用いて次に転送を行う端末を指定する方式 FLF を提案した。パケット受信状況の確認および転送リストは、新たに追加する独自ヘッダにより実装される。QualNet を用いた計算機シミュレーションと実装実験により、典型的な 4 つの既存方式とパケット損失率に関して比較を行った。その結果、提案方式が最も優れており、50 台の端末が 100 ミリ秒間隔でパケットを生成している環境において、ピュアフラッディングで 70%前後であったパケット損失率を 16%以下に低減できることが明らかになった。また、実装実験において、端末における CPU 使用率を測定した結果、提案方式では、既存方式でパケット損失率が最も低かった MPR に比べ、約半分に軽減することができた。さらに、端末が移動する環境に対しても計算機シミュレーションを用いて評価を行った。その結果、転送端末の決定に用いる統計情報取得時間を調整することにより、パケット損失率を固定環境と同程度に維持できることを示した。提案方式は、受信パケットの統計情報から、パケットを送信した端末と反対方向にいる端末が推定できるため、位置推定の手段としても使うことができる。したがって、GPS が利用できない屋内環境やセンサネットワークでも利用可能である。今後は情報取得時間の動的な変更方法や、さらに台数が増加した際の対策について検討を行う予定である。

謝辞 本研究の一部は NICT 民間基盤技術研究促進精度により実施したものである。

参考文献

- 1) 間瀬憲一, 阪田史郎: アドホック・メッシュネットワーク—ユビキタスネットワーク社会の実現に向けて, コロナ社 (2007).
- 2) 小菅昌克, 板谷聡子, デビスピーター, 梅田英和: アドホックネットワークが開く

- 新しい世界 (後半), 情報処理学会論文誌, Vol.44, No.11, pp.1060–1063 (2003).
- 3) Yang, B. and Garcia-Molina, H.: Improving Search in Peer-to-Peer Networks, *Proc. 22nd International Conference on Distributed Computing Systems*, pp.5–14 (2002).
 - 4) Ni, S., Tseng, Y., Chen, Y. and Sheu, J.: The Broadcast Storm Problem in a Mobile Ad Hoc Network, *Proc. 4th International Conference on Mobile Computing and Networking*, pp.151–162 (1999).
 - 5) 島津義嗣, 村田英一, 吉田 進: ITS 車々間通信における自律的パケット中継制御法, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J82-B, No.11, pp.2018–2025 (1999).
 - 6) Motegi, S. and Horiuchi, H.: Relay Control for Data Dissemination of Spontaneous Vehicular Networks, *International Conference on ITS Telecommunications*, pp.1098–1101 (2006).
 - 7) 小出俊夫, 小菅昌克, 田中信介: マルチホップ無線ネットワークにおけるフラディング方式の転送待ち時間に関する検討, FIT2003, M-146, pp.341–342 (2003).
 - 8) Banaei-Kashani, F and Shahabi, C.: Criticality Based Analysis and Design of Unstructured Peer-to-peer Networks as Complex Systems, *The 3rd International Workshop on Global and Peer-to-Peer Computing*, pp.22–32 (2003).
 - 9) 周防高志, 山本尚生: MANET における受信電力情報を用いた経路安定化のための適応的フラディング制御方式, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J89-B, No.10, pp.1950–1961 (2006).
 - 10) 牧野暢孝, 荒川伸一, 村田正幸: パワー則の性質を有するネットワークにおける経路制御のためのフラディング手法の提案, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.104, No.340, pp.47–52 (2004).
 - 11) Qayyum, A. Yiennot, L. and Laouiti, A.: Multipoint Relaying for Flooding Broadcast Message in Mobile Wireless Networks, *Proc. 35th Hawaii Int'l. Conf. System Sciences (HICSS-35)*, pp.3898–3907 (Jan. 2002).
 - 12) Clausen, T. and Jacquet, P.: Optimized link state routing protocol (OLSR), RFC 3626 (2003).
 - 13) 板谷聡子, 長谷川淳, 長谷川晃朗, デビスピーター, 門脇直人, 小花貞夫: 大規模アドホックネットワークにおける通信の安定化手法の提案と実証, 情報処理学会論文誌, Vol.46, No.12, pp.2848–2856 (2005).
 - 14) Internet protocol DARPA internet program protocol specification, RFC791 (1981).
 - 15) olsrd. <http://www.olsr.org/>
 - 16) 国土交通省: 先進安全自動車 (ASV). <http://www.milt.go.jp/jidosha/anzen/>
 - 17) The QualNet simulator. <http://www.scalable-networks.com/>

(平成 20 年 12 月 15 日受付)

(平成 21 年 5 月 13 日採録)

推薦文

本論文は, 車車間通信のような自律分散ネットワークにおいて 1 対多の通信をフラディングを用いて行う場合に, 中継端末を受信パケットの統計情報に基づいて指定することで, 無駄な転送を抑制する方式を提案している. 実験により, 単純なフラディングではパケットロスが 70%発生する状況でも, 提案方式では 20%程度に抑えることが示されている. また, ノードの移動特性などを変化させた場合にも同様のパケットロス率に抑えられていることも示されており, 新規性, 有用性の観点から論文誌の推薦論文としてふさわしい.

(マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2008) シンポジウム
プログラム委員長 串間和彦)



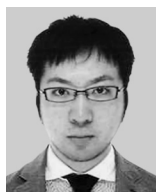
長谷川 淳 (学生会員)

平成 12 年岡山県立大学情報工学部情報通信工学科卒業. 平成 14 年同大学大学院修士課程修了. 同年富士通関西中部ネットテック (株) 入社. 平成 15 年 (株) 国際電気通信基礎技術研究所適応コミュニケーション研究所研究員. 無線アドホックネットワーク, コグニティブ無線に関する研究に従事. 現在, 岡山県立大学大学院博士課程在学中. 平成 19 年電子情報通信学会学術奨励賞受賞, 平成 20 年本会 Dicom 2008 優秀論文賞受賞. 平成 20 年本会関西支部学生奨励賞受賞. IEEE, 電子情報通信学会, 情報理論とその応用学会各学生会員.



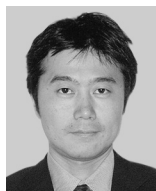
板谷 聡子

平成 8 年奈良女子大学理学部物理学卒業. 平成 10 年同大学大学院修士課程修了. 同年セイコーエプソン (株) 研究開発本部入社. XML に関する研究に従事. 平成 11 年博士課程進学のため退社. 平成 14 年奈良女子大学大学院博士後期課程修了. 理学博士. 同年 (株) 国際電気通信基礎技術研究所適応コミュニケーション研究所研究員. 平成 18 年同上級研究員. アドホックネットワークに関する研究に従事. 平成 20 年日本電気 (株) C&C イノベーション研究所主任. 社会ネットワークダイナミクスに関する研究に従事. 電子情報通信学会会員.



近藤 良久

平成 15 年東京工業大学工学部卒業。平成 17 年同大学大学院修士課程修了。同年日本電気通信システム(株)入社。平成 18(株)国際電気通信基礎技術研究所適応コミュニケーション研究所研究員。アドホック無線通信に関する研究に従事。電子情報通信学会会員。



四方 博之

平成 9 年大阪大学工学部通信工学科卒業。平成 11 年同大学大学院博士前期課程修了。平成 14 年同大学院博士後期課程修了。博士(工学)。同年デンマーク・オールボー大学ポスドク研究員。平成 16 年日本電気(株)入社。同年デンマーク・オールボー大学助手。平成 18 年同大学准教授。平成 20 年(株)国際電気通信基礎技術研究所適応コミュニケーション研究所主任研究員。平成 21 年オールボー大学任命准教授。主としてアドホックネットワーク、セルラネットワーク、コグニティブ無線、リレーネットワーク、無線ネットワークコーディングにおけるアクセス制御技術、無線資源管理、リンク・ネットワーク層技術の研究に従事。IEEE、電子情報通信学会各会員。IEEE Communications Letters 編集委員。



デイビス ピーター

昭和 55 年オーストラリア・クィーンズランド大学物理学科卒業。昭和 62 年同大学大学院博士課程修了。Ph. D. 同年(株)ATR 光電波通信研究所研究員。平成 8 年同環境適応通信研究所研究員。通信デバイス、非線形信号処理、自律分散型通信システムに関する研究に従事。平成 13 年同適応コミュニケーション研究所主任研究員。現在、同適応コミュニケーション研究所客員研究員。自律ネットワークシステム、無線アドホックネットワーク、コグニティブ無線通信技術に関する研究に従事。ATR フェロー。IEEE 会員。



榊原 勝己

昭和 60 年大阪大学工学部通信工学科卒業。昭和 62 年同大学大学院修士課程修了。同年(株)東芝入社。平成 3 年産業技術短期大学情報処理講師。平成 7 年岡山県立大学情報工学部情報通信工学科講師。現在、同教授。符号理論、誤り制御方式、ランダムアクセス方式の研究に従事。工学博士。IEEE、電子情報通信学会、情報理論とその応用学会各会員。



鈴木龍太郎

昭和 52 年電気通信大学電気通信学部物理工学科卒業。昭和 54 年同大学大学院修士課程修了。同年郵政省電波研究所(現、(独)情報通信研究機構)に入所。平成 4 年文部省放送教育開発センター助教授。平成 8 年通信総合研究所通信システム部非常時通信研究室長。平成 9 年通信・放送機構川崎次世代 LEO リサーチセンターサブリーダー。平成 14 年(独)通信総合研究所無線通信部門先進衛星技術実証グループリーダー。平成 16 年同、高速衛星ネットワークグループリーダー。平成 19 年(株)国際電気通信基礎技術研究所適応コミュニケーション研究所スマートネットワーク研究室長。平成 20 年(独)情報通信研究機構新世代ワイヤレス研究センター宇宙通信ネットワークグループリーダーとして、衛星通信システムの研究開発に従事。博士(工学)。IEEE、AIAA、電子情報通信学会各会員。IAF Satellite Communication and Navigation Committee 委員。



小花 貞夫(フェロー)

昭和 51 年慶應義塾大学工学部電気工学科卒業。昭和 53 年同大学大学院修士課程修了。同年国際電信電話(株)(現、KDDI(株))入社。パケット交換方式、ネットワークアーキテクチャ、OSI プロトコル実装、分散処理、ネットワーク管理、ITS の研究・開発に従事。平成 16 年(株)国際電気通信基礎技術研究所適応コミュニケーション研究所所長。アドホックネットワーク、センサネットワーク、コグニティブ無線、ITS の研究・開発に従事。工学博士。平成 13 年文部科学大臣賞(研究功績者)、本会フェロー、電子情報通信学会会員。