

テクニカルノート

アドホックネットワークにおける ゾーン重複のない複数経路構築手法の提案と評価

江藤 大¹ 油田 健太郎^{1,a)} 岡崎 直宣² 朴 美娘³

受付日 2011年3月29日, 採録日 2011年7月8日

概要: アドホックネットワークでは, バッテリ容量の制限やノードの移動により, 接続が安定しない場合が多いが, 提案されているプロトコルは単一の経路のみを構築するプロトコルが多い. ロバストな通信手段を実現するためには, 複数の経路を構築するプロトコルが求められる. さらに, 一定の範囲で通信障害が起こった場合でも他の経路に影響を与えないことが望ましい. そこで本論文では, ゾーン概念を導入し, ゾーンレベルで重複しない複数経路を簡単な処理のみで構築する ZDMR (Zone Disjoint Multi-path Routing) を提案する. シミュレーションによる評価を行い, 従来の複数経路を構築するプロトコルと比較してネットワークの接続性が高いことを示す.

キーワード: アドホックネットワーク, 複数経路構築, ロバスト性

Proposal and Its Evaluation of Zone Disjoint Multi-path Routing for Ad Hoc Networks

MASARU ETO¹ KENTARO ABURADA^{1,a)} NAONOBU OKAZAKI² MI RANG PARK³

Received: March 29, 2011, Accepted: July 8, 2011

Abstract: Many researches are going on in ad hoc networks and several routing protocols have been proposed. However, these protocols are “single-path” protocols which construct only one route. In ad hoc networks, due to limitation of battery capacity and mobility of nodes, communication links are unstable. Therefore, “multi-path” protocols are desired for constructing “robust” routes. Additionally, in considering the case where interference spreads to a certain area, each path is desired to be away from other paths to some degree. In this paper, we introduce the concept of “zone”, and propose a Zone Disjoint Multi-path Routing Protocol, called ZDMR, for constructing multi-path routes which disjoint each other in a zone level. Our simulations confirm that this protocol has a higher connectivity than existing protocols.

Keywords: ad hoc networks, multi-path routing, robust routing

1. はじめに

アドホックネットワークでは, 端末がマルチホップ通信を行う場合, 各端末は経路情報を獲得するためルーティングを行う. 従来, 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, AODV (Ad hoc On-demand Distance Vector) [1] が提案されている. また, ネットワークの拡大やノードの増加などの拡張性を考慮するために, ゾーンを用いて階層化を行う ZHLS (Zone-based Hierarchical Link State) [2] が提案されている. しかし, これらのルーティングプロトコルでは単一経路しか構築されない. アドホックネットワークでは, 端末の移動やバッテリー切れなどにより通信リンクが頻繁に切断されるため, 単一の経路しか構築されないルーティングでは, 経路上のリンクが切断された場合, 経路再構築に時間がかかるという問題がある. この問題を解決するために, これまで複数経路を構築するプロ

¹ 大分工業高等専門学校
Oita National College of Technology, Oita 870-0152, Japan

² 宮崎大学
University of Miyazaki, Miyazaki 889-2192, Japan

³ 神奈川工科大学
Kanagawa Institute of Technology, Atsugi, Kanagawa 243-0292, Japan

a) aburada@oita-ct.ac.jp

トコルが提案されている。複数経路を構築するプロトコルでは、構築したすべての経路にいっせいにデータを送信し、経路ごとの通信の負荷を低下させる手法 [3], [4] と、構築した経路を切り替えて通信を行うことで、通信の接続性を向上させる手法 [5], [6] がある。経路を切り替えて通信を行う手法では、経路切断時にただちに経路を切り替えることができる。しかし、一定の範囲で断続的に通信障害が発生した場合については考慮されていない。そこで、本論文では、経路を切り替えて通信を行う手法に焦点を当て、ネットワークを重なりのない正方形のゾーンに区切り、ゾーンレベルで重複のない複数経路を構築することができる ZDMR (Zone Disjoint Multi-path Routing) を提案する。提案手法では、ゾーンレベルで重複のない複数経路を構築することにより、一定の広がりを持つ範囲で通信障害が起これば、経路が切断されてしまった場合でも、他の経路はその影響を受けにくいと考えられる。さらに、経路探索の際、1回のフラッディングのみで異なるゾーンの系列を通過するパスの情報を効率的に収集し、複数経路の構築を行う。これまでの、階層化の概念を用いた複雑な処理を行う手法 [2] に対し、提案手法は階層化を行わず、ゾーンの情報は複数経路の構築時のみ利用するため、処理を簡素化することができる。シミュレーションにより一定範囲で通信障害が起こった場合の packets 到着率に関する定量的な評価を行う。

以下、2章では従来手法について述べ、問題点を検討する。3章では提案する ZDMR プロトコルについて述べる。4章では評価と考察を述べ、5章に本論文のまとめを記す。

2. 従来手法

構築した複数経路を切り替えて通信を行う従来手法である、NDMR (Node-Disjoint Multi-path Routing) [5], AOMDV (Ad hoc On-demand Multi-path Distance Vector) [6] について述べる。

2.1 NDMR

NDMR はそれぞれの経路が同じノードを共有しない、node-disjoint な複数経路を構築する。送信元ノードからブロードキャストされた RREQ (route request) を受信した中間ノードは、以前受信した RREQ よりホップ数が多い場合は破棄する。宛先ノードに到着した RREQ からノードを共有しないような複数経路を構築する。図 1 に送信元ノード S から宛先ノード D までの経路構築を示す。図中の細い矢印は RREQ, 太い矢印は RREP (route reply) を示しており、RREP は実線、破線のそれぞれに沿って 2 つ返信される。

2.2 AOMDV

AOMDV は、AODV を拡張して複数経路を構築する手法で、それぞれの経路が同じ中間ノード間のリンクを共

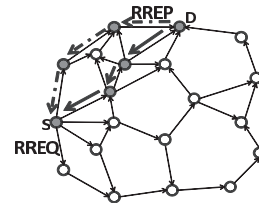


図 1 NDMR における RREQ と RREP の送信
Fig. 1 An example of sending RREQ and RREP (NDMR).

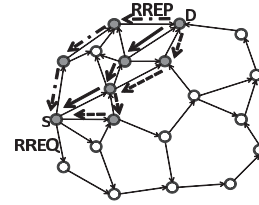


図 2 AOMDV における RREQ と RREP の送信
Fig. 2 An example of sending RREQ and RREP (AOMDV).

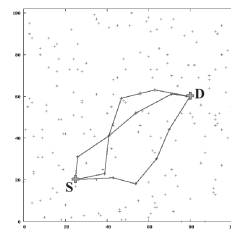


図 3 AOMDV における経路構築例
Fig. 3 An example of AOMDV.

有しない、link-disjoint な複数経路を構築する。AOMDV では、中間ノードは受信した RREQ の情報をすべて保持し、RREP の返信により複数経路の構築を行う。宛先ノードは最初の RREQ を受信した後、一定時間内に受信した RREQ すべてに対し、RREP の返信を行う。中間ノードは RREP により宛先ノードからのホップ数を記憶し、それ以降に送られてきた RREP のホップ数が、記憶している宛先ノードからのホップ数より少なければ経路として登録する。RREP を経路に登録した中間ノードは、RREQ を受信した順に RREP を返信する。これを繰り返すことで複数経路の構築を行う。図 2 に送信元ノード S から宛先ノード D までの経路構築を示す。図中の細い矢印は RREQ, 太い矢印は RREP を示しており、RREP は実線、破線、鎖線のそれぞれに沿って 3 つ返信される。また、図 3 に AOMDV の経路構築例を示す。AOMDV では AODV と同じ RREQ と RREP を使い、必要に応じて RREP を返信することにより複数経路の構築を行うため、AODV と比べてもパケット量がほとんど増加せずに複数経路構築を行うことができる。

NDMR や AOMDV では、ホップ数を比較して RREQ の破棄や経路の構築を行うため、送信元から宛先までのホップ数が同程度の経路が構築される。そのため、一定の範囲の広がりを持つ通信障害が発生した場合、すべての経路が影響を受けやすいと考えられる。

3. 提案手法

本論文で提案する ZDMR では、ネットワークを重ねた正方形のゾーンに区切り、1 回のフラッディングでパスの情報を効率的に収集する。各ノードは、GPS を用いることにより、自身の位置と属するゾーン ID を知っているものとする。ゾーンに区切ることによって、ゾーンレベルで重複のない複数経路を構築する。これにより、通信中の経路が切断された場合でも、切断箇所を特定する必要がないように、ルーティングテーブルの更新を待たずにただちに経路を切り替えることができる。また、ある一定の広がりを持つ範囲で通信障害が起これば、経路が切断された場合でも、他の経路はその影響を受けにくい。

ZDMR は送信元ノードが経路情報を保持するソースルーティングを用いて複数経路を構築する。送信元ノードがメイン経路、バックアップ経路の経路情報を保持する。また、各中間ノードもルーティングテーブルを持ち、メッセージを受信した際、それぞれの持つ情報を比較し、ルーティングテーブルの更新やパケットの破棄を行う。宛先ノードが RREQ を受信すると、その中からメイン経路、バックアップ経路を決定する。

3.1 複数経路構築

以下に、ZDMR の複数経路構築手順（メイン経路構築、バックアップ経路構築）の詳しい動作を示す。また、図 4 に ZDMR における送信元ノード S から宛先ノード D までの経路構築を示す。

[複数経路構築手順]

[1. メイン経路構築]

- (1) 通信要求が発生すると送信元ノードが RREQ を作成し、ネットワーク全体にブロードキャストする。
- (2) RREQ を受信した中間ノードは RREQ の情報を更新し、フラッディングする。このとき、受信した RREQ が経由してきたゾーンに、それ以前に受信した RREQ の経由したゾーンがすべて含まれている場合か、送信元ノードが属するゾーンと現在いるゾーン以外で同じゾーンが含まれている場合にこのパケットを破棄する。
- (3) 宛先ノードに最初に着いた RREQ の情報をもとに、その RREQ が通過してきた経路をメイン経路とする。

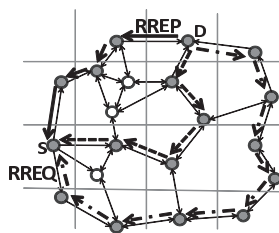


図 4 ZDMR における RREQ と RREP の送信

Fig. 4 An example of sending RREQ and RREP (ZDMR).

- (4) メイン経路情報を書き込んだ RREP をメイン経路に沿って送信元ノードに向けてユニキャストする。
- (5) 送信元ノードに RREP が到着すると、メイン経路情報をソースルーティングテーブルに登録する。
- (6) ソースルーティングテーブルにメイン経路のレコードが追加されると、メイン経路のレコード情報を用いてすぐに通信を開始し、通信中の経路が分かるようにルートフラグを立てる。 □

[2. バックアップ経路構築]

- (1) 宛先ノードは最初の RREQ を受信した後、一定時間 RREQ を収集する。RREQ を収集する際、2 番目以降に受信した RREQ の経由してきたゾーン ID とメイン経路が使用しているゾーン ID を比較する。このとき、送信元ノードと宛先ノードが属しているゾーン ID を除き、ゾーン ID が 1 つも重複していなかった場合に、ディスティネーションルーティングテーブルに新たなレコードとして追加する。1 つでも同じゾーン ID が含まれていた場合は RREQ を破棄する。
- (2) RREQ 収集タイムアウト後、ディスティネーションルーティングテーブルに登録されている情報をもとに、 $i = 1$ として i 番目のバックアップ経路を作成する。
- (3) 無効フラグが立っていない経路のゾーン ID を比較し、ゾーンホップ数が一番小さい経路を i 番目のバックアップ経路とする。最小ゾーンホップ数の経路が 2 つ以上あった場合、ノードホップ数が最も小さい経路を次のバックアップ経路とする。最小ノードホップ数の経路が 2 つ以上あった場合、到着時間が早いほうを次のバックアップ経路とする。バックアップ経路が決定すると、その経路のレコードに経路識別番号を登録し、経路に優先順位をつける。
- (4) 決定したバックアップ経路情報を書き込んだ RREP を作成し、そのバックアップ経路に沿って送信元ノードにユニキャストする。RREP の転送については、手順 [1. メイン経路構築] の (2)~(6) と同様である。
- (5) ディスティネーションテーブルにおいて、作成したバックアップ経路で使用されているゾーン ID を経路に含むレコードに無効フラグを立てる。
- (6) まだ作成できるバックアップ経路がある場合は、 $i = i + 1$ として手順 [2. バックアップ経路構築] の (3)~(5) を繰り返す。 □

図 5 に ZDMR の経路構築例を示す。送信元ノード S から宛先ノード D まで、ゾーンが重複しない経路が 4 つ構築されている。

3.2 経路維持・経路切断処理

以下に、ZDMR の経路維持・経路切断処理の詳しい動作を示す。

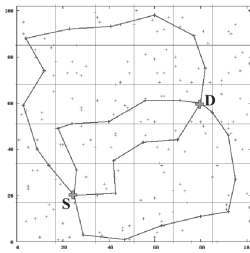


図 5 ZDMR における経路構築例
Fig. 5 An example of ZDMR.

[経路維持・経路切断処理]

- (1) 経路の接続状況を確認するために、送信元ノードが定期的にバックアップ経路に Hello パケットを流す。
- (2) 送信元ノードが Hello パケット（メイン経路の場合はデータパケット）の応答をある一定時間受信しなくなると、経路が切断されたと判断し、通信が切断された経路レコードの disconnected フラグをたてる。
- (3) 通信していた経路が切断された場合、ルートフラグをクリアし、disconnected フラグをたてる。その後、disconnected フラグがたっていない次のバックアップ経路に切り替え、新しく通信を開始した経路のルートフラグをたてる。
- (4) メイン経路が切断された場合、またはメイン経路が通信中でもバックアップ経路が2つ以上切断された場合に、経路更新処理を開始する。もし、経路更新処理中だった場合、新たなメイン経路が確立されるまで待つ。メイン経路確立後は経路更新処理と同様である。 □

3.3 経路更新処理

以下に、ZDMR の経路更新処理の詳しい動作を示す。

[経路更新処理]

- (1) 経路更新時間が経過、メイン経路が切断、バックアップ経路が2つ以上切断された場合に経路更新処理を行う。
- (2) 現在使用中の複数経路の情報をキャッシュに一時的に保持する。
- (3) 送信元ノードが RREQ を作成し、ネットワーク全体にブロードキャストする。
- (4) 複数経路構築手順と同じ処理を行う。
- (5) 新しいメイン経路が決定したら、現在通信中の経路から新しいメイン経路に通信を切り替える。このとき、新たなメイン経路のルートフラグをたてる。
- (6) キャッシュに保持していた複数経路情報を削除する。 □

4. 評価

4.1 ゾーン数を変化させたシミュレーション

提案手法において、ゾーン数を変化させることによって

表 1 シミュレーション環境
Table 1 Simulation parameters.

| | |
|---------|--------------------|
| フィールド | 105 × 105 [m] |
| 通信範囲 | 20 [m] |
| ノード数 | 100, 200 [nodes] |
| ゾーン数 | 25, 36, 49 [zones] |
| 移動度 (v) | 2 [m/cycle] |
| 障害領域 | 0, 5, 10, 15 [m] |

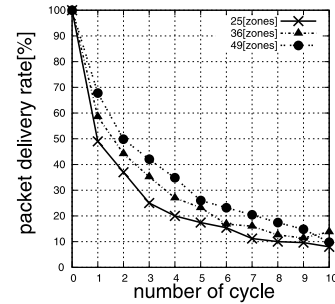


図 6 ゾーン数を変化させたパケット到着率（ノード数：100）
Fig. 6 The packet delivery rate (100 nodes).

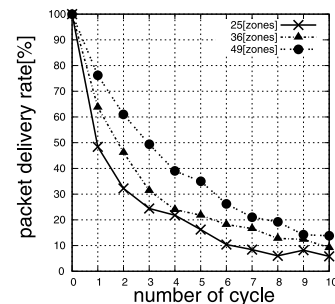


図 7 ゾーン数を変化させたパケット到着率（ノード数：200）
Fig. 7 The packet delivery rate (200 nodes).

パケット到着率に及ぼす影響を調べる。表 1 にシミュレーション環境を示す。なお、これらのパラメータは文献 [2] を参考にした。図 6, 図 7 にゾーン数を変化させたときの ZDMR のパケット到着率を示す。ノード数が 100, 200 のいずれの場合もゾーン数が 25 の場合がパケット到着率が最も低く、ゾーン数が 49 の場合が最も高くなった。これは、ゾーン数が少ないとメイン経路と違うゾーンを経由するような RREQ が少なくなり、構築できる経路の数が減るため、パケット到着率が低下したと考えられる。ゾーン数が多いとメイン経路と違うゾーンを経由するような RREQ が多くなり、構築できる経路の数が増えるため、パケット到着率が向上したと考えられる。また、ゾーン数がある一定以上の数になると、構築できる経路の数に変化がなくなるため、パケット到着率にも変化がなくなったと考えられる。したがって、これ以降のシミュレーションでのゾーン数は、平均的にパケット到着率の高かった 49 とする。

4.2 障害領域を変化させたシミュレーション

提案手法は、一定の範囲の広がりを持つ通信障害が発生

した場合においても接続性が優れていると考えられる。そこで、今回のシミュレーションでは、2章で述べた従来手法のうち、AOMDVが最も構築する経路が多く、NDMRで構築できる経路はAOMDVで構築できると考えられるため、AOMDVを比較対象とする。複数経路を構築する従来手法であるAOMDVと提案手法を、経路構築後に障害領域が発生しノードが移動する状況下でのシミュレーションを行った。

シミュレーションでは、送信元ノードと宛先ノードは固定し、その他のノードはフィールドにランダムに配置した。なお、各ノードは t サイクルのときの座標を (x, y) とすると、 $t+1$ サイクルのときに $(x + \Delta x, y + \Delta y)$ に移動する。 Δx と Δy は、移動度を v とすると $[-v, v]$ の間でランダムに決定する。評価は、送信元ノードから宛先ノードまでの経路構築後に、ノードの移動を10サイクル行い、各サイクルで経路が構築されている場合を成功とする。すべてのシミュレーションは、500回行った平均を結果とした。今回のシミュレーションでは、経路が切断された場合でも経路の修復や再構築を行っていない。

シミュレーションでは、1サイクルから10サイクルの間にネットワークの中央付近に障害領域を発生させた。障害領域は円状であり、障害領域内に存在するノードとは通信することができない。

4.3 考察

図8, 図9, 図10, 図11にパケット到着率の結果を示

す。シミュレーション環境は、表1と同様である。ノード数が100, 200のいずれの場合も提案手法のパケット到着率が高くなった。これはAOMDVが最短経路と同じホップ数の複数経路を構築するため、通信範囲内の端にあるノードが選ばれやすく、少しのノードの移動によって切断が多く発生したためであると考えられる。また、ZDMRはノード数が100から200になるとパケット到着率が高くなった。これは、ノード数が100の場合はゾーン重複がない経路を構築するために十分なノード数ではないため、構築できる経路の数が少なくなった。ノード数が200になると構築できる経路の数が増えたため、パケット到着率が高くなったと考えられる。

また、通信障害が発生しない場合と、通信障害の半径を5, 10, 15[m]と変化させ、通信障害の大きさがゾーンよりも小さい場合、ゾーンと同じ場合、ゾーンよりも大きい場合のパケット到着率の比較を行った。通信障害が大きくなるとパケット到着率は両手法において低下している。また、通信障害の大きさにかかわらず、提案手法のパケット到着率が高くなった。これより、ZDMRは障害が発生した場合にも、ゾーンが重複しない複数経路を構築することで、他の経路はその影響を受けにくいと考えられる。

次に、経路構築の際に発生したパケット量の結果を表2に示す。ZDMRの経路構築の際に発生するパケット量はAOMDVより多くなった。この理由として、AOMDVは、各ノードが1度のブロードキャストで複数経路を構築できるのに対して、ZDMRでは、ゾーンが異なっていれば

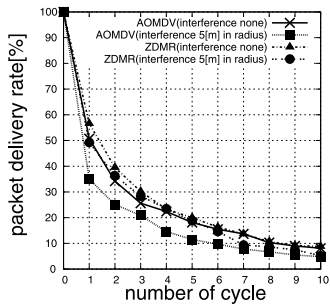


図8 パケット到着率 (ノード数: 100)

Fig. 8 The packet delivery rate (100 nodes).

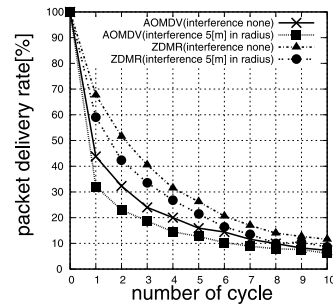


図10 パケット到着率 (ノード数: 200)

Fig. 10 The packet delivery rate (200 nodes).

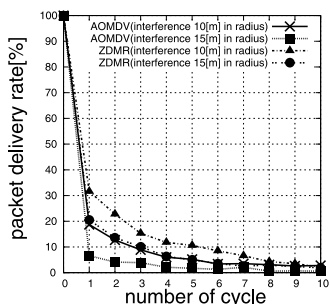


図9 パケット到着率 (ノード数: 100)

Fig. 9 The packet delivery rate (100 nodes).

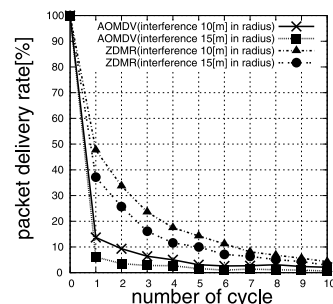


図11 パケット到着率 (ノード数: 200)

Fig. 11 The packet delivery rate (200 nodes).

表 2 図 8-11 におけるパケット量

Table 2 The number of packets (Figs. 8-11).

| ノード数 | AOMDV | ZDMR |
|------|-------|--------|
| 100 | 939 | 1,600 |
| 200 | 3,787 | 10,240 |

RREQ を複数回ブロードキャストする必要があるためである。また、ZDMR ではノード数が増えると、各ノードは異なるゾーン系列を通過した RREQ をより多く受信する。そのため、各ノードが RREQ をブロードキャストする回数が増え、AOMDV と比べてパケット量が急激に増えてしまったと考えられる。

5. まとめ

本論文では、ゾーンレベルで重複しない複数経路を簡単な処理のみで構築する ZDMR プロトコルを提案した。提案手法では、ネットワークを重なりのないゾーンに区切り、ゾーンの重複しない複数経路を 1 回のフラッディングで構築する。経路制御メッセージを受信する際に選別を行い、ゾーンレベルで重複のない経路制御メッセージのみを転送し、その他のメッセージを破棄することで、フラッディングするメッセージ数を抑制することができる。また、1 回のフラッディングで複数経路構築を行うので処理の複雑化を防ぐことができる。シミュレーションによって特性を評価し、従来の複数経路を構築するプロトコルと比較して、提案手法の接続性が優れていることを示した。また、一定の広がりを持つ範囲で通信障害が起こった場合において、従来手法と比較して ZDMR は接続性が優れていることを明らかにした。今後は、パケット量を抑えるために RREQ の選別の条件の検討や増加したパケットが通信に及ぼす影響を考察する。さらに、AOMDV 以外の disjoint マルチパスルーティングとの比較、地理情報を用いないゾーン形成について検討する予定である。

参考文献

- [1] Perkins, C.E., Belding-Royer, E. and Das, S.R.: Ad hoc on-demand distance vector (AODV) routing (July 2003), available from (<http://www.ietf.org/rfc/rfc3561.txt>).
- [2] Joa-Ng, M. and Lu, I.: A peer-to-peer zone-based two-level link state routing for mobile ad hoc networks, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol.17, No.8, pp.1415-1425 (1999).
- [3] Wang, L., Zhang, L.F., Shu, Y.T., Dong, M. and Yang, O.W.W.: Multipath Source Routing in Wireless Ad Hoc Networks, *Proc. IEEE CCECE*, Halifax, Nova Scotia, Canada, pp.479-483 (May 2000).
- [4] Lee, S.J. and Geria, M.: Split Multipath Routing with Maximally Disjoint Paths in Ad hoc Networks, *Proc. IEEE ICC 2001*, Vol.10, pp.3201-3205 (2001).
- [5] Li, X. and Cuthbert, L.: On-demand Node-Disjoint Multipath Routing in Wireless Ad Hoc Networks, *Proc. 29th Annual IEEE International Conference on Local Computer Networks, LCN 2004*, Tampa, Florida, U.S.A.,

pp.419-420 (Nov. 2004).

- [6] Marina, M.K. and Das, S.R.: Ad hoc on-demand multipath distance vector routing, *Wireless Communications and Mobile Computing*, pp.969-988 (June 2006).



江藤 大

2010 年大分工業高等専門学校制御情報工学科卒業。現在、大分工業高等専門学校電気電子情報工学専攻在学中。モバイルネットワークに関する研究に従事。



油田 健太郎 (正会員)

2003 年宮崎大学工学部情報システム工学科卒業。2005 年宮崎大学大学院工学研究科情報工学専攻博士前期課程修了。2006 年熊本県立大学総合管理学部助手。2009 年宮崎大学大学院工学研究科システム工学専攻博士後期課程修了。同年大分工業高等専門学校助教。モバイルネットワークに関する研究に従事。博士 (工学)。電子情報通信学会会員。



岡崎 直宣 (正会員)

1986 年東北大学工学部通信工学科卒業。1991 年東北大学大学院工学研究科電気及び通信工学専攻博士後期課程修了。同年三菱電機株式会社入社。2002 年宮崎大学工学部助教授、2007 年同准教授を経て 2011 年より同教授。通信プロトコル設計、ネットワーク管理、ネットワークセキュリティ、モバイルネットワーク等の研究に従事。博士 (工学)。電子情報通信学会、電気学会、IEEE 各会員。



朴 美娘 (正会員)

1983 年漢陽大学工学部電子工学科卒業。同年漢陽大学工学部助手。1993 年東北大学大学院工学研究科情報工学専攻博士後期課程修了。同年東北大学電気通信研究所助手。1994 年三菱電機株式会社入社。2010 年より神奈川工科大学情報学部教授。通信プロトコル設計、ネットワークセキュリティ等の研究に従事。博士 (工学)。電子情報通信学会会員。