情報処理学会論文誌　Vol. 51　No. 6　1320–1329 (June 2010)

直線状無線マルチホップネットワークにおける指向性アンテナを用いた高スループット化方式

松本直文[†1,*1]　関屋大雄[†1]
阪田史郎[†1]　柳生健吾[†2]

無線 LAN 標準の IEEE 802.11 DCF を用いた直線状無線マルチホップネットワークにおいて，隠れ端末問題によるスループットの低下が問題となる．隠れ端末問題を抑制するために，指向性アンテナによるビームフォーミングを利用した MAC プロトコルが提案されているが，指向性アンテナを用いることによる新たな隠れ端末問題が発生する．本論文では，直線状無線マルチホップネットワークにおける端末に 2 つの指向性アンテナを用いたシステムにおいて，端末の送信を抑制する信号を発生させることで隠れ端末問題を解決するプロトコルを提案する．シミュレーションを行い，提案手法の有効性を示す．また，提案するプロトコルにおける最大スループットを解析的に導出する．解析結果より，提案手法では衝突を削減できるため，最大スループットを決定するボトルネックが衝突ではなくキャリアセンスによる送信待機時間となることが示される．

High Throughput Method for Wireless Multi-hop Networks with String Topology Using Directional Antennas

Naofumi Matsumoto,[†1,*1] Hiroo Sekiya,[†1]
Shiro Sakata[†1] and Kengo Yagyu[†2]

It is one of the problems for the IEEE 802.11 based multi-hop networks that the throughput decreases because of the hidden-terminal problem. There were some proposals of Medium Access Control (MAC) protocols using directional antennas for avoiding the hidden-terminal problem. However, the systems using the directional antennas yield a new type of hidden terminal problem. This paper presents a novel MAC protocol using multiple directional antennas. The proposed protocol uses multiple directional antennas and transmission control signals generated by transmitters. The simulation results and the maximum throughput analysis are shown. The analytical result denotes that the bottleneck for achieving the highest throughput of the proposed protocol is not a collision effect but a carrier-sensing effect because of the collision reduction.

1. はじめに

無線アドホックネットワークは基地局などの中央制御を必要とせず無線端末どうしで構築することができる自律分散型のネットワークである[1)–16)]．無線端末どうしを複数経由する無線マルチホップネットワークを形成できるため，非常時の一時的なネットワーク，無線ホームネットワーク，ITS（Intelligent Transport Systems）などへ利用が期待されている．これらの応用において，直線状のネットワークはアドホックネットワークの基本かつ代表的トポロジである．文献 4)，5) では，直線状のマルチホップネットワークにおける最大スループット解析が行われている．また，文献 8)，9) では車両端末が直線状に配置されている環境下における無線マルチホップネットワーク構築法が議論されている．車両端末間の通信などでは，端末が直線状に配置される環境が想定されるためである．無線アドホックネットワークにおける MAC（Medium Access Control）プロトコルとして無線 LAN（Local Area Network）標準の IEEE 802.11 DCF（Distributed Coordination Function）の利用が検討されている．しかし IEEE 802.11 DCF はシングルホップを想定したプロトコルである．そのため，無線アドホックネットワークにそのまま適用すると隠れ端末問題やさらし端末問題，端末間におけるチャネル内の競合などの問題が生じ，通信品質が低下するという問題がある[2)–16)]．

隠れ端末問題を解決するため，指向性アンテナによるビームフォーミングを用いた MAC プロトコルが提案されている[8)–16)]．文献 8)，9) では，道路上に直線状に配置された車両端末において，指向性アンテナを 2 つ設置するシステムについて検討されている．指向性アンテナを端末に 2 つ設置すると，RTS/CTS を使用することなく IEEE 802.11 DCF における隠れ端末問題が減少することが示されている．一方，指向性アンテナを用いることで，送信方向に対して逆方向に位置する隣接端末は通信を知ることができない．そのため，新た

†1 千葉大学融合科学研究科
Graduate School of Advanced Integration Science, Chiba University
†2 株式会社 NTT ドコモ先進技術研究所
Research Laboratories, NTT DOCOMO, INC.
*1 現在，沖電気工業株式会社
Presently with Oki Electric Industry Co., Ltd.

© 2010 Information Processing Society of Japan

な隠れ端末問題が生じる[11),12)]．この問題を，文献 11) では指向性隠れ端末問題と呼んでいる．文献 11) では，指向性アンテナを 1 つ設置したシステムにおいて，RTS（Request To Send）/CTS（Clear To Send）を用いることで，指向性隠れ端末問題を抑制する MAC プロトコルを提案している．しかし，RTS/CTS を用いることで，オーバヘッドが増加するため，スループットが制限される．

本論文では，指向性アンテナを用いたシステムにおいて，隠れ端末問題の発生を抑制し，直線状無線マルチホップネットワークに対して高スループット化を図るプロトコルを提案する．提案手法では，各端末は 2 つの指向性アンテナを用いる．そして，通信方向と逆方向に情報を持たない信号を同時に送信する．この信号を抑制信号と呼ぶ．抑制信号により指向性隠れ端末の送信を抑制する．提案方式では，アンテナを 2 本用いることで抑制信号を送信信号と同時に送信することができるため，制御パケットを用いずに隠れ端末問題を抑制できる．シミュレーション結果より，提案手法において隠れ端末問題の発生が抑制され，スループットが向上することを示す．さらに，直線状ネットワークにおける提案手法の最大スループットを解析的に導出する．解析結果より，提案手法では衝突を削減するため，最大スループットを決定するボトルネックが衝突ではなくキャリアセンスによる送信待機時間となることが示される．

2. 従 来 手 法

2.1 隠れ端末問題

無線アドホックネットワークにおいてスループットが低下する要因の 1 つに隠れ端末問題がある[3)–7)]．文献 4) では，直線状無線マルチホップネットワークにおける IEEE 802.11 DCF の双方向フローの最大スループット解析を行っている．そして，IEEE 802.11 DCF における最大スループットは，隠れ端末問題に起因する衝突により制限されることを示している．この解析結果は，スループット向上のためには，隠れ端末問題の回避が最も重要であることを示している．

2.2 指向性アンテナを用いた MAC プロトコル

指向性アンテナを用いることで，隠れ端末の送信電波による干渉を回避する取り組みがされている[8)–16)]．指向性アンテナは，アンテナの指向性を向けている方向に対して高いアンテナ利得を持ち，それ以外の方向に対して低いアンテナ利得を持つという特徴がある．したがって，指向性を向けていない方向からの到来電波に対し干渉を受けにくいという性質を持つ．文献 8)，9) では，車両端末に 2 つの指向性アンテナを 180° の角度をつけて設置したシステムについて検討している．文献 8)，9) では，高速道路のように車両端末が直線状に配置される環境を想定している．そのため，2 つの指向性アンテナを設置することで，アンテナの指向性の向きを固定することができ，RTS/CTS を用いることなく通信方向に指向性を向けることができる．**図 1** に文献 8)，9) に示される通信システムの通信例を示す．図 1 (a) では，端末 2 が端末 3 に送信中に，端末 5 が端末 6 に，図 1 (b) では端末 4 に送信している．このとき，端末 3 は端末 2 に指向性を向けているアンテナを用いて受信している．そのため，端末 5 がどちらの方向に送信したとしても，衝突が発生しない．よって，隠れ端末問題を回避することができる．

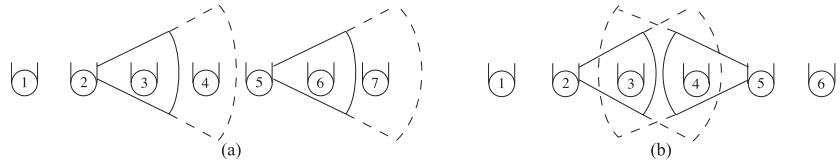

図 1　指向性アンテナを有した直線状ネットワークの通信例．(a) 端末 5 から端末 6 へのデータを送信，(b) 端末 5 から端末 4 へのデータを送信

Fig. 1　Example of transmissions by using directional antennas. (a) Transmissions from the terminal 5 to the terminal 6. (b) Transmissions from the terminal 5 to the terminal 4.

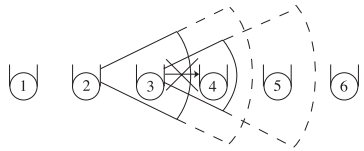

図 2　指向性隠れ端末問題の例

Fig. 2　Example of hidden-terminal problems by using directional antennas.

一方，アンテナの指向性を空間的に制御することで，お互いの通信を知ることができず，指向性アンテナ特有の隠れ端末問題が発生する[11),12)]．**図 2** に，指向性アンテナを用いたときの衝突例を示す．図 2 において，まず端末 3 が端末 4 にデータ送信を開始したとする．このとき，端末 3 は端末 4 に対してアンテナの指向性を向けてデータを送信しているため，端末 2 は端末 3 が送信中であることを知ることができない．ここで，端末 2 が端末 3 にデータ送信を開始すると，端末 4 において端末 2 と端末 3 の送信電波が衝突する．したがって，端末 4 では端末 3 の送信したデータを正常に受信することができない．この衝突は指向性アンテナを用いることにより生じる衝突であり，本論文では，図 2 のような隠れ端末問題

© 2010 Information Processing Society of Japan

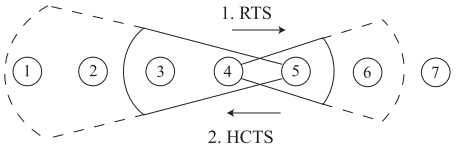

図 3　HCTS 方式の通信例
Fig. 3　Example of transmissions with HCTS method.

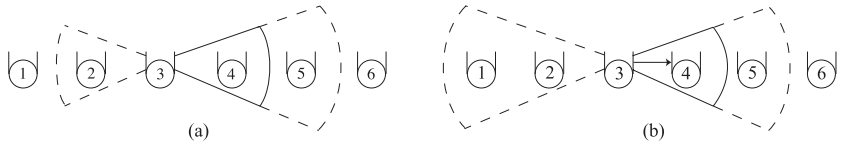

図 4　提案システムにおける通信例．(a) 制御信号の送信電力が適切な場合，(b) 抑制信号の送信電力が大きい場合
Fig. 4　Example of transmissions by using proposed protocol. (a) For proper control-signal transmission power. (b) For high control-signal transmission power.

を，文献 11) に倣って指向性隠れ端末問題と呼ぶこととする．ここで，端末 2 を端末 3 に対する指向性隠れ端末と呼ぶ．さらに図 2 においては，端末 3 が端末 4 に対してデータを送信しているため，端末 2 からのデータを受信することができない．この問題を難聴問題といい[16]，これも指向性隠れ端末に起因する問題である．

文献 11) では端末に指向性アンテナを 1 つ用いた環境で，RTS/CTS を指向性隠れ端末に対して送信し，指向性隠れ端末問題を抑制する MAC プロトコルを提案している．文献 11) で提案されている方式の中で指向性隠れ端末問題に対して最も効果がある手法として，HCTS（High gain CTS）方式がある．**図 3** に，HCTS 方式の通信例を示す．図 3 において，端末 4 が端末 5 に対してデータを送信したいとき，端末 4 はアンテナの指向性を端末 5 に向けて RTS を送信する．端末 5 は RTS を受信すると，端末 4 に対して高利得な指向性ビームを用いて HCTS と呼ばれる制御パケットを送信する．高利得な指向性ビームを用いることで通信範囲が広がり，端末 3 は HCTS を受信することができる．端末 3 は HCTS の到来方向に対して通信を控えるため，衝突を抑制することができる．しかし，RTS と HCTS を送信することで，通信におけるオーバヘッドが増加する．特に VoIP（Voice over IP）のように，データペイロード長が小さく，リアルタイム性が要求されるアプリケーションにおいて，スループットが制限されるという問題がある．

3. 提 案 手 法

本論文では，データ送信時に通信方向と逆方向に抑制信号を同時に送信することで，指向性隠れ端末の送信をキャリアセンスにより抑制する手法を提案する．提案手法では，2 本の指向性アンテナと抑制信号を用いることで，RTS/CTS を使用することなく指向性隠れ端末の送信を抑制することができ，スループットの向上が図られる．

3.1　抑制信号による指向性隠れ端末の制御

提案手法では，文献 4)，5)，8)，9) のように，端末が直線状に配置されている状況を仮定する．また，文献 8)，9) と同様に，指向性アンテナを 2 つ設置し，180° 異なる方向に指向性を向けている端末を仮定する．提案プロトコルで用いる指向性アンテナは抑制信号の発信とデータの送信を同時に行える．また，データの送受信を同時に行うこと，異なる方向から複数のデータを同時に受信することはできないと仮定する[10]．

図 4 に提案するシステムにおける通信例を示す．ここでは端末 3 が端末 4 に対してデータを送信している．送信開始に際し，2 つのアンテナでキャリアセンスを行い，両方ともアイドル状態であるとき送信を開始できる．図 4 (a) において，端末 2 は端末 3 にとって指向性隠れ端末となる．そこで，端末 3 は端末 2 の送信を抑制するために，データの送信開始と同時に，端末 2 の方向に指向性を持つアンテナを用いて，抑制信号を発生する．抑制信号は周辺端末に対しキャリアセンスさせることが目的であり，具体的な信号を送るものではない．データの送信が終了するまで送信し続けることにより，周辺端末に自端末が送信中であることを周知することができる．同じような考え方にビジートーンを用いた手法がある[3),10]．ビジートーンは異なる周波数帯を用いることにより送信と同時に周辺端末への周知を行うことを可能とする．それに対し，提案手法では複数のアンテナを用いること，および指向性アンテナにより電波が空間的に分離できることを利用して同時周知を実現する．端末 2 が端末 3 から送信された抑制信号をキャリアセンスするとき，端末 2 はデータの送信を待機する．したがって，端末 3 が端末 4 に送信中に，端末 2 の送信が抑制されるため，指向性隠れ端末問題を回避することができる．一方，端末 3 の方向からキャリアセンスをしていても，端末 2 は端末 1 から送信されるデータを受信できる．これにより，隠れ端末によるパケットの損失を防ぐことができる．

3.2　抑制信号の送信方法の検討

抑制信号を送信するとき，適切な電力を用いて送信する必要がある．図 4 (b) に抑制信号の送信電力が大きいときの通信例を示す．図 4 (b) では，端末 3 が端末 4 にデータを送信するときに送信した抑制信号を，端末 1 と端末 2 がキャリアセンスしている．このとき，端末

© 2010 Information Processing Society of Japan

1 は端末 3 にとって指向性隠れ端末ではないが，送信が抑制される．この例のように，抑制信号の送信範囲が大きいと抑制信号が周波数を無駄に占有することになり，送信可能であるにもかかわらずデータ送信を待機する端末が増加することによるスループットの低下が生じる．一方，もし抑制信号の送信範囲が小さいと，指向性隠れ端末に抑制電波が届かないことになり，抑制信号を導入する意味を持たない．したがって，隣接端末の位置を考慮し，適切な電力で抑制信号を送信する必要がある．理想的には周辺端末が送信してはならない空間のみに抑制信号が用いられる．このとき周波数の無駄遣いは発生しない．

ここで，抑制信号の送信方法として，2 通りの方法が考えられる．1 つは抑制信号の送信電力を一定値に固定する方法である．この方法は，実装が容易であるという利点がある．しかし，抑制信号の送信範囲と端末間隔の関係で前述の問題を完全に解決することは不可能である．もう 1 つは，抑制信号の送信電力を端末配置に応じて適応的に変化させる方法である．もし各端末が指向性隠れ端末の情報を把握し，かつ抑制信号の送信電力を適切に制御できれば，指向性隠れ端末問題を完全に回避できる．このように，指向性隠れ端末のみに抑制信号を送信できる状態は，提案手法における理想状態であるといえる．しかし，理想状態では，隣接端末の位置情報を正確に把握しなければならない．そのためのプロトコル開発が必要であり，新たなオーバヘッドが生じる．さらに，正確な電力制御の実装にはコストが発生し，理想状態の実装は容易ではない．

4. シミュレーション

本章では計算機シミュレーションを行い，提案手法を評価する．**表 1** にシミュレーションおよび解析で用いるパラメータを示す．これらのパラメータは，VoIP による双方向フロー[17]を想定している．比較対象として，IEEE 802.11 DCF（無指向性アンテナ），HCTS 方式[11]，指向性アンテナを 2 つ設置し抑制信号を発生させない手法（以降 TDA（Two Directional Antenna）方式と呼ぶ）[8),9)] をあげ，検討する．**表 2** に，各手法において使用するアンテナについて示す．IEEE 802.11 DCF のみ無指向性アンテナを用い，HCTS 方式，TDA 方式，提案手法では指向性アンテナを使用する．また，IEEE 802.11 DCF，HCTS 方式では，アンテナを 1 つ使用し，TDA 方式，提案手法においては，アンテナを 2 つ使用する．

図 5 にネットワークトポロジを示す．各端末は直線状に配置され，端末間隔が固定，およびランダムのときにおいて評価する．端末の間隔が固定である場合，端末間の間隔が 50 m とし，20 個の端末を配置する．このとき，となりの端末が通信範囲内に，2 端末先までがキャリアセンス範囲内となる．端末の間隔がランダムである場合，端末間隔が 0 m から 50 m の間で一様分布に従うように配置する．そして，ランダムに配置した場合も，両端の端末の距離は 500 m に固定する．これは，端末間隔を固定したトポロジと比較して，より現実環境に近い端末配置を想定している．本論文では，指向性アンテナと抑制信号を用いることによる隠れ端末問題の改善，空間利用効率の向上を提案している．同電力で送信した場合，

表 1　シミュレーションおよび理論解析で用いるパラメータ
Table 1　System parameters for simulations and analysis.

Packet payload($DATA$)	200 bytes
MAC header	32 bytes
PHY header	2 bytes
PHY Preamble	20 μs
ACK size	14 bytes
Channel bit rate	18 Mbps
ACK bit rate	12 Mbps
Transmission range	60 m
Carrier sensing range	120 m
Slot Time	9 μs
SIFS Time	16 μs
DIFS Time	34 μs
Minimum Contention Window Size	15
Maximum Contention Window Size	1,023
Retransmission limit	7

表 2　各手法において使用するアンテナ
Table 2　Antennas for each method.

	Antenna	Number of Antennas
IEEE 802.11 DCF	Omni Directional	1
HCTS	Directional	1
TDA	Directional	2
Proposed	Directional	2

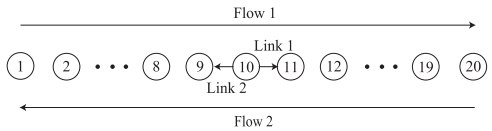

図 5　シミュレーションおよび理論解析で用いるトポロジ
Fig. 5　Network topology for the simulations and analysis.

© 2010 Information Processing Society of Japan

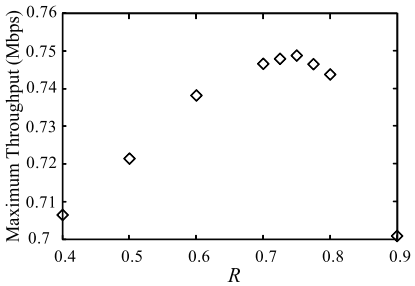

図 6　R に対する最大スループット
Fig. 6　Maximum throughput as a function of the transmission range of R.

指向性アンテナは無指向性アンテナと比較して送信範囲が広くなるが，提案手法における，空間利用効率の改善を評価するため，文献 13)–15) などに倣い，アンテナの送信範囲は指向性，無指向性にかかわらず等しいことを仮定する．シミュレーションでは，両端の端末からトラフィックが発生しているものとし，便宜上端末 1 から端末番号が増える方向をフロー 1，逆方向をフロー 2 とする．VoIP を想定しているため，両端の端末から生じるトラフィック量は等しいと仮定し，スループットは双方向フローの合計とする．

4.1　抑制信号の送信方法の評価

本節では，抑制信号の送信電力を固定した場合における抑制信号の適切な送信電力を評価する．隠れ端末が衝突の要因として影響を及ぼす範囲はキャリアセンス範囲により決まるため，抑制信号の送信範囲をキャリアセンス範囲の比で表現することにより，一般的な議論に帰着できる．ここで，抑制信号の送信範囲をデータ送信のキャリアセンス範囲で正規化したものを R とし，ランダムな端末間隔を有するトポロジにおいて検討する．**図 6** に R に対する最大スループットを示す．ここでの最大スループットとは，各 R に対する送信負荷の変動に対するスループットの最大値を示す．図 6 では各 R について 10 通りのトポロジにおける平均スループット特性を導出し，その最大値を最大スループットとしてプロットしている．R が小さいとき，R の増加とともに最大スループットが増加していることが分かる．これは，R が増加することで指向性隠れ端末が減少するためである．したがって，指向性隠れ端末問題に起因する衝突が減少し，最大スループットが増加する．そして，R が 0.75 付近で最大スループットが最も高くなる．R がさらに大きくなると，最大スループットが低下する．これは，図 4 (b) のようにキャリアセンスする端末が増加し，不必要な送信待機をする端末が増加するためである．したがって，抑制信号の送信電力を固定した場合最適値が存在し，シミュレーション結果より $R = 0.75$ とすることで，必要以上に端末の送信を抑制することなく，指向性隠れ端末問題を抑制することができる．伝搬損失が距離の 2 乗に比例する自由空間伝搬モデルを仮定すると，抑制信号は通常の送信電力と比較して 56%の電力で出力すればよい．

表 3　$R = 0.75$ と理想状態における最大スループット
Table 3　Maximum throughputs for $R = 0.75$ and the ideal case.

Proposed ($R = 0.75$)	Ideal
0.749 Mbps	0.752 Mbps

表 3 に，抑制信号の送信範囲を $R = 0.75$ としたとき，および理想状態における最大スループットを示す．理想状態では，あらかじめ各端末は指向性隠れ端末の情報を取得し，シミュレーション上で理想的に電力制御を行っている．提案手法と理想状態との誤差は，約 0.4%である．以降，本論文では抑制信号の送信出力を固定する場合，$R = 0.75$ として評価する．

4.2　従来手法との比較

4.2.1　端末間距離を一定としたネットワークにおける検討

図 7 に端末間隔を一定としたときの送信負荷に対する特性を示す．このとき，理想状態と $R = 0.75$ としたときの動作および特性はまったく同じである．図 7 (a) に送信負荷に対するスループットを示す．この図において，提案手法，TDA 方式，HCTS 方式，IEEE 802.11 DCF の順に最大スループットが高い．指向性アンテナを用いると空間の利用効率が向上するため，無指向性アンテナを用いている IEEE 802.11 DCF は最もスループットが低くなる．TDA 方式と提案手法を比較すると，TDA 方式では指向性隠れ端末問題に起因する衝突が発生する．しかし，提案手法では抑制信号により衝突が抑制されているため，スループットが向上する．HCTS 方式と提案手法を比較すると，HCTS 方式では RTS/HCTS を使用するため，オーバヘッドが大きい．しかし，提案手法ではアンテナを 2 つ使用することで，RTS/HCTS を用いず衝突を回避することができる．そのため，オーバヘッドが小さくなり，スループットが向上する．したがって，提案手法におけるスループットが最も高くなる．すべての手法において，最大スループットが存在する．そして最大スループット以降，送信負荷が増加するにつれてスループットが減少する．これは，過負荷状態において，両端の端末付近でフロー 1 とフロー 2 の送信機会の不公平性が生じるためである[4)]．

図 7 (b) に送信負荷に対する隠れ端末および指向性隠れ端末問題による衝突率を示す．この図より，IEEE 802.11 DCF と TDA 方式において，送信負荷が図 7 (a) の最大スループッ

© 2010 Information Processing Society of Japan

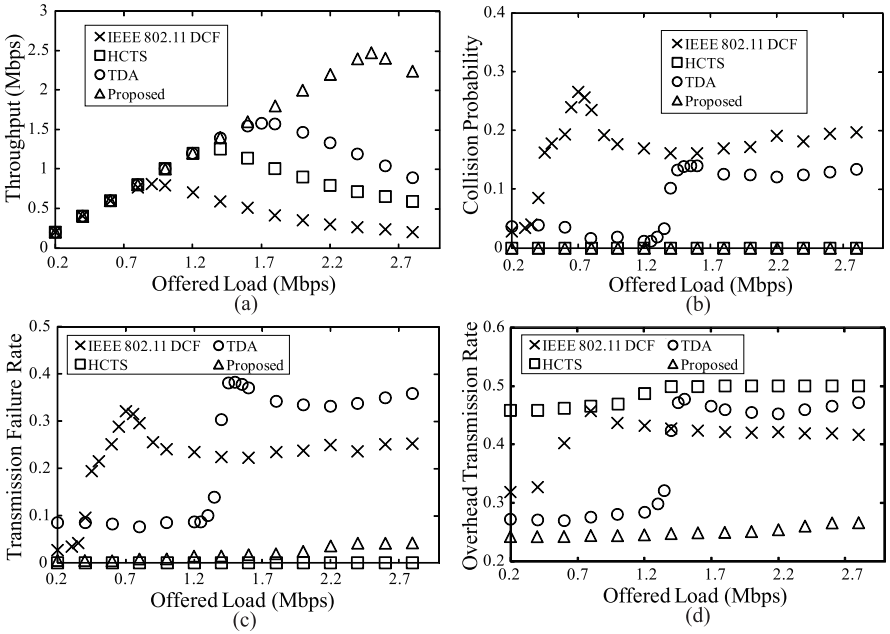

図 7　端末間隔を一定としたときの送信負荷に対する特性．(a) スループット，(b) 隠れ端末問題による衝突率，(c) データパケットの送信失敗率，(d) 全送信時間におけるオーバヘッドの送信時間の割合

Fig. 7　Characteristics as a function of the offered load on the network with fixed intervals. (a) Throughput. (b) Collision probability caused by the hidden terminal problems. (c) Data-packet-transmission failure rate. (d) Overhead-transmission rate.

トとなる値付近で，衝突率が急激に増加していることが分かる．一方，HCTS 方式，提案手法において，隠れ端末問題が発生していない．本トポロジにおける提案手法では抑制信号を発生させることで，指向性隠れ端末問題を完全に排除できるためである．

図 7 (c) に送信負荷に対するネットワーク全体のデータパケットの送信失敗率を示す．ここで送信失敗とは，隠れ端末問題の衝突に加えて，キャリアセンス範囲内の端末どうしが同じタイミングで送信を開始することによる衝突[6]，そして難聴問題による受信失敗を含める．図 7 (b) と (c) を比較すると，TDA 方式では隠れ端末問題による送信失敗以外の要因による失敗が突出して多いことが分かる．これは，先述したキャリアセンス範囲内の端末の同時通信による衝突に加え，難聴問題が発生しているためである．一方，IEEE 802.11 DCF

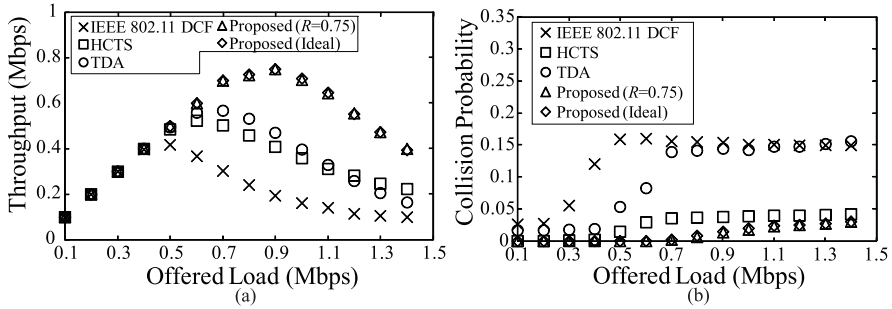

図 8　ランダムな端末間隔における送信負荷に対する特性．(a) スループット，(b) 隠れ端末問題による衝突率

Fig. 8　Characteristics as a function of the offered load for the random intervals. (a) Throughput. (b) Collision rate caused by the hidden terminal problems.

と提案手法においては，隠れ端末問題に起因する衝突以外の送信失敗がわずかながら生じていることが分かる．これは，キャリアセンス範囲内の端末が同時に通信を開始することによる衝突である．HCTS 方式では，データパケットの送信失敗が発生していないことが分かる．これは，RTS/HCTS を用いるため，データパケットの損失が発生しないためである．

図 7 (d) に全送信時間に対するオーバヘッド送信時間の割合を送信負荷の関数として示す．ここで，オーバヘッドの送信時間とは，RTS/HCTS/ACK および送信失敗したデータパケットの送信時間の合計と定義する．図 7 (d) では，IEEE 802.11 DCF，TDA 方式，提案手法において，図 7 (c) と同様の関係を示している．これは，送信失敗となったデータパケットによるオーバヘッドが増加するためである．一方，HCTS 方式では，どの送信負荷においても最も高いオーバヘッドが発生している．これは，RTS/HCTS を使用しているためである．しかし，IEEE 802.11 DCF よりもオーバヘッドが大きいにもかかわらず，スループットが高い．これは，HCTS 方式が指向性アンテナを使用することで，空間利用効率が向上しているためである．一方，提案手法におけるオーバヘッドは最も小さい．IEEE 802.11 DCF，TDA 方式よりオーバヘッドが小さいのは，抑制信号により衝突を回避しているためである．また，HCTS 方式よりオーバヘッドが小さい理由は，アンテナを 2 つ用いるため，データと同時に抑制信号を送信することが可能であり，RTS/HCTS を用いることなく，指向性隠れ端末問題を回避できるためである．

4.2.2　端末間距離がランダムなネットワークにおける検討

図 8 にランダムな端末間隔における送信負荷に対する特性をを示す．図 8 (a) に送信負荷

© 2010 Information Processing Society of Japan

に対するスループットを示す．図 7 (a) と同様に提案手法，TDA 方式，HCTS 方式，IEEE 802.11 DCF の順でスループットが高いことが分かる．しかし，図 7 (a) に比べ全手法においてスループットが低下していることが分かる．ランダムに端末を配置すると，場所によって端末の密度が高い場所と低い場所ができる．そして，端末密度が高い場所において送信待機する端末が増えるため，そこがボトルネックとなり，全体のスループットが低下する．送信負荷が 1.1 Mbps 付近を境に，HCTS 方式のスループットが TDA 方式よりも高くなる．端末密度が高い場所では，指向性隠れ端末が多数存在する．TDA 方式では，衝突および難聴が同時に生じるため，高負荷時におけるスループットの低下が大きくなり，HTCS との関係が逆転すると考えられる．また，提案手法において理想状態と抑制信号の範囲を $R = 0.75$ に固定した場合のスループットはほぼ同一である．理想状態を実現するためには，各端末の位置の把握など別途処理を必要とする．プロトコルによってはそのためのオーバヘッドが生じ，スループットが低下する可能性もある．図 8 (a)，表 3 に示されるスループットの改善度と理想状態を実現するための実装の困難さを総合的に考えると，抑制信号の送信範囲を $R = 0.75$ で固定する方法で十分であると考えられる．

図 8 (b) に送信負荷に対する隠れ端末問題による衝突率を示す．HCTS 方式と提案手法において隠れ端末による衝突が発生していることが分かる．提案手法において，抑制信号の範囲を $R = 0.75$ で固定して送信する場合，抑制信号が届かず指向性端末が送信する場合がある．しかし，図 8 (b) において理想状態と比較することにより，その衝突率は十分低いことが分かる．これは，ランダムな端末間隔において，$R = 0.75$ とすることで指向性隠れ端末問題を効果的に抑制できることを示している．

4.3　VoIP 収容呼数

G.711 に準拠した VoIP 通信一呼あたりに必要なスループットは，片方向 50 kbps，双方向で 100.8 kbps である[17]．VoIP にはパケット損失率と遅延の 2 つの評価指標があるが，本論文のシミュレーション諸元においては，パケット損失率が VoIP の収容呼数を決めるボトルネックとなる．このとき，VoIP の収容呼数 C_v は次式で表される．

$$C_v = \max\left\{ N \,\middle|\, \frac{100.8N - T(100.8N)}{100.8N} < E_v \right\} \tag{1}$$

ここで，N は自然数であり，VoIP の呼数を表す．また，$T(x)$ は Offered Load が x のときのスループットで単位は kbps，E_v は VoIP が実現可能な許容できるパケットロス率であり，ここでは ITU-T 勧告 Y.1541[18] に従い $E_v = 10^{-3}$ とする．**表 4** に端末間隔を固定したときの VoIP の収容呼数を示す．この結果より，提案手法はスループットの改善により VoIP の収容呼数が増加することが分かる．

表 4　端末感覚を固定したときの VoIP 収容呼数
Table 4　VoIP capacity on the network with the fixed intervals.

DCF	HCTS	TDA	$R = 0.75$	Ideal
5	11	12	24	24

本章では VoIP を想定したパラメータのみについて評価したが，提案手法の Offered Load に対する諸特性はパケット長に依存せず定性的に同様であることを確認している．さらに，最適な抑制信号の範囲 R もパケット長に依存せず，つねに $R = 0.75$ である．HCTS 方式はパケット長が長くなるにともない，RTS/CTS に起因するオーバヘッドの割合が小さくなる．そのため，HCTS 方式はパケット長の増大にともない，他の方式と比較して相対的にスループット特性が向上する．それでも提案手法のオーバヘッド削減の効果は高く，提案手法が最も高いスループットを達成する．

5.　最大スループットに関する理論解析

最大スループットを解析的に導出することは，ネットワークの挙動を把握するための有効な手段である．本章では，提案手法における最大スループットを解析的に導出し評価する．理論解析のパラメータは，表 1 を用いる．本論文では一例として，シミュレーションと同様に，各端末の間隔を 50 m に固定して配置した場合についての解析例を示す．ここで，隣接端末どうしの接続をリンクと呼ぶ．また，図 5 に示すように，リンクは有向性でありフロー 1，2 に属するリンクをそれぞれリンク 1，2 とする．したがって，双方向フローにおいてそれぞれの端末間にはリンク 1 とリンク 2 の 2 つのリンクが存在することになる．なお，本章で示す解析は最大スループット状態を仮定したうえで解析を進めるものであり，スループットを一般的に表現するものでないことに注意されたい．

端末が通信に使用している時間をエアタイムと定義する．最大スループットを決める端末は，直線状ネットワークの中央付近の端末であり，それらの端末のエアタイムは，十分ホップ数の長い環境下において等しいと仮定でき[4),5)]，S と表す．エアタイムには DIFS（Distributed Inter Frame Space），パケット送信，SIFS（Short Inter Frame Space），受信端末からの ACK 送信の送信時間が含まれ，それぞれに要する時間を $DIFS$，$PACKET$，$SIFS$，ACK とする．エアタイムにはパケットの衝突による再送の時間も含まれるものとする．十分に長い期間 $[0, Time]$ を考える．ここで各端末が双方向に等しい負荷で通信しているとし，各方向に対し，単位時間あたり x だけ通信しているとすると，

© 2010 Information Processing Society of Japan

$$2x = \lim_{Time \to \infty} |S|/Time \tag{2}$$

と表すことができる．このとき，ρ をパケットの衝突率，$d = DATA/(DIFS + PACKET + SIFS + ACK)$，$data_rate$ をデータの伝送速度とすると，スループットは

$$T = 2x \cdot d \cdot data_rate \cdot (1 - \rho) \tag{3}$$

と書ける．

図 7 (b) に示すように，解析対象とする諸元では，提案手法は隠れ端末による衝突が生じない．一方で，図 7 (c) に示されるように，同時に通信を開始することによる衝突を考慮する必要がある．ネットワーク中央付近の各端末において，各端末がアイドル状態であるときの送信確率 $G(\rho)$ は，k 回目の再送のバックオフの平均を b_k とすると，

$$G(\rho) = \frac{1 + \rho + \rho^2 + \cdots + \rho^K}{b_0 + b_1\rho + b_2\rho^2 \cdots + b_K\rho^K} \tag{4}$$

と表すことができる[6]．具体的に表 1 の諸元を用いると，

$$G(\rho) = \frac{1 + \rho + \rho^2 + \cdots + \rho^6}{8 + 16\rho + 32\rho^2 \cdots + 512\rho^6} \tag{5}$$

となる．いま，具体例として，図 5 のトポロジを取り上げ，端末 10 について考察する．端末 10 はボトルネック端末と呼ばれ，ボトルネック端末における最大スループットがネットワークにおける最大スループットと等しくなる[4)–7)]．端末 10 がリンク 1 を用いて送信する状況を考える．このとき，端末 10 と同時に呼を発生させることで衝突を起こす可能性のあるリンクは，端末 9 のリンク 1，端末 11 のリンク 1，2，そして端末 12 のリンク 2 の 4 つである．$G(\rho)$ はアイドル時間における送信確率であり，端末 10 が送信している以外の時間は，衝突を起こす可能性のあるリンク上に他の端末が送信を開始する可能性がある．さらに，端末 10 にとって，リンク 1，2 に対する送信確率が等しいことに注意すると，端末 10 がリンク 1 を用いた送信に対して，他の端末が同時に通信を開始することによる衝突率は

$$\rho_{10\to 11} = \left[1 - \left(1 - \frac{G(\rho)(1 - 2x - y)}{2(1 - 2x)}\right)^2 \left(1 - \frac{G(\rho)(1 - 2x - y)}{1 - 2x}\right)\right] \tag{6}$$

と表せる．ここで，y は端末 10 が他の端末の送信をキャリアセンスしている時間の割合である．端末 10 から 9 への送信に関しても同様の議論が成り立ち，かつ，それぞれの衝突は同時に起きないことを考慮すれば，

$$\rho = 2\left[1 - \left(1 - \frac{G(\rho)(1 - 2x - y)}{2(1 - 2x)}\right)^2 \left(1 - \frac{G(\rho)(1 - 2x - y)}{1 - 2x}\right)\right] \tag{7}$$

を得られる．以降，y の導出について検討する．

各端末の間隔を 50 m として解析を進めると，端末 10 がキャリアセンスをする端末は端末 8 から 12 までである．端末 10 がキャリアセンスをする端末 8 のリンクは，リンク 1 である．また，端末 10 がキャリアセンスをする端末 12 のリンクは，リンク 2 である．したがって，端末 10 のキャリアセンスに関係する端末 8 と端末 12 のエアタイム $|S_8|$，$|S_{12}|$ は次式で表せる．

$$|S_8| = |S_{12}| = x \cdot Time \tag{8}$$

端末 9，11 に関しては，端末 10 は双方向のリンクをキャリアセンスする．したがって，端末 10 のキャリアセンスに関係する端末 9，端末 11 のエアタイム $|S_9|$，$|S_{11}|$ は

$$|S_9| = |S_{11}| = 2x \cdot Time \tag{9}$$

となる．次に，端末 10 がキャリアセンスをする端末の間で，同時に通信を行う時間を考慮する．これはキャリアセンス外のリンクで生じる場合，およびキャリアセンスするリンク間でも同時に通信を開始した場合に生じる場合が考えられるが，後者は前者に比べて発生確率が小さいため，ここでは無視する．したがって，2 ホップ以上離れた 2 端末どうしについて考える．

端末 8 と端末 10 において，4 通りのリンクの組合せの中で，同時に通信する可能性があるのは，端末 8 のリンク 1，端末 10 のリンク 1 の組合せのみである．この 2 つのリンクが同時にキャリアセンスする共通隣接リンクは端末 9 のリンク 1，2，端末 10 のリンク 2 の計 3 リンクとなる．したがって，$(1 - 3x)$ の間において同時に通信する時間を考える必要がある．さらに，端末 8 がリンク 1 を使って先に送信すると端末 10 はキャリアセンスにより送信を控えるため，端末 10 がリンク 1 を使って先に送信を開始したときのみ同時通信が生じる．端末 10 と端末 12 の間でも同様の議論ができ，それらの同時通信時間，つまりエアタイムの共通部分は

$$|S_8 \cap S_{10}| = |S_{10} \cap S_{12}| = \frac{x^2}{2(1 - 3x)} \cdot Time \tag{10}$$

となる．同様の考察を進めると，他の組合せについて次の関係が成り立つ．

$$|S_9 \cap S_{11}| = \left(\frac{x^2}{1 - 3x} + \frac{x^2}{1 - 4x}\right) \cdot Time \tag{11}$$

© 2010 Information Processing Society of Japan

$$|S_8 \cap S_{11}| = |S_9 \cap S_{12}| = \left(\frac{2x^2}{1-2x}\right) \cdot Time \tag{12}$$

$$|S_8 \cap S_{12}| = x^2 \cdot Time \tag{13}$$

このとき，$[0, Time]$ における y について，

$$y \cdot Time \approx \sum_{i \in \eta(10)} |S_i| - \sum_{m,n \in \eta(10),10} |S_m \cap S_n| \tag{14}$$

と近似できる．ここで，$\eta(10)$ は，端末 10 がキャリアセンスをする端末番号の集合である．式 (14) に式 (8)–(13) を代入すると，y を次式で表すことができる．

$$y = 6x - \left(1 + \frac{4}{1-2x} + \frac{2}{1-3x} + \frac{1}{1-4x}\right) x^2 \tag{15}$$

ここで，x の定義より，$0 \leq x \leq 1$ となる．しかし，双方向通信のランダム性を仮定した場合には，各端末の送信時間が x が増加に対してアイドル時間 $(1-2x-y)$ は減少しなければならない．つまり，$0 \leq x \leq 1$，かつ $d(1-2x-y)/dx \leq 0$ を同時に満足する x が x の定義域となる．このとき，定義域における最大スループット $T(x^*)$ が提案プロトコルを用いたときの最大スループットとなる[7]．表 1 のパラメータを用いると，$x^* = 0.175$ のときに $T(x^*) = 2.52\,\mathrm{Mbps}$ を得られる．このとき，$x = x^* = 0.175$ は $d(1-2x-y)/dx = 0$ を満足する．この結果は，最大スループットは衝突ではなくキャリアセンスによる送信待機時間によって制限されることを解析的に示しており，提案手法の有効性を示す指標となる．同じ条件によるシミュレーションにおいて，最大スループットは 2.47 Mbps となり，2.0%の誤差であることから解析結果の妥当性を確認できる．また，詳細は省略するが端末の間隔，送信範囲とキャリアセンス範囲の比を変えても，同様の手法で最大スループットが解析的に求められることを確認している．

6. ま と め

本論文では，直線状無線マルチホップネットワークにおける，指向性アンテナを用いた高スループット化方式を提案した．提案手法では，データの送信方向と逆の方向に抑制信号を送信することで，指向性隠れ端末問題による衝突の発生を抑制することができる．さらに，アンテナを 2 つ用い抑制信号をデータ送信と同時に送るため，RTS/CTS などの制御パケットの使用に起因するオーバヘッドを削減することができる．直線状のマルチホップネットワークにおいて評価を行い，シミュレーション結果より，提案手法は従来手法と比較してスループットが向上することを明らかにした．さらに，提案手法の最大スループットを解析的に導出し，提案手法では，最大スループットを決定するボトルネックが，衝突ではなくキャリアセンスによる送信待機時間となることを示した．

本論文では直線状のネットワークトポロジに対しての特性評価を行った．ルート形状の変化によって，特にトポロジの直線性が弱いときの評価は重要である[11]．それらに対する評価，検討は今後の課題としたい．

参 考 文 献

1) Akyildiz, F. and Wang, X.: A survey on wireless mesh networks, *IEEE Communications Magazine*, Vol.43, pp.23–30 (2005).
2) IEEE Computer Society LAN MAN Standards Committee: Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications, IEEE Std.802.11 (1999).
3) Haas, Z.J. and Deng, J.: Dual busy tone multiple access (DBTMA) – A multiple access control scheme for ad hoc networks, *IEEE Trans. Communications*, Vol.50, No.6, pp.975–985 (2002).
4) Inaba, M., Tsuchiya, Y., Sekiya, H., Sakata, S. and Yagyu, K.: Analysis and experiments of maximum throughput in wireless multi-hop networks for VoIP application, *IEICE Trans. Communications*, Vol.E92-B, No.11, pp.3422–3431 (2009).
5) Ng, P.C. and Liew, S.C.: Throughput analysis of IEEE802.11 multi-hop ad hoc networks, *IEEE/ACM Trans. Networking*, Vol.15, pp.309–322 (2007).
6) 松本真沙樹，稲葉雅彦，関屋大雄，阪田史郎，柳生健吾：様々なトポロジにおける無線マルチホップネットワークに関する UDP スループット，電子情報通信学会技術報告，Vol.108, No.251, AN2007-31, pp.11–16 (2008).
7) Gao, Y., Chiu, D. and Lui, J.C.S.: Determining the end-to-end throughput capacity in multi-hop networks: Methodology and applications, *Proc. SIGMETRICS/Performance 2006*, pp.39–50 (2006).
8) 新宮将久，増渕友裕，上原秀幸，横山光雄：車両間マルチホップ無線ネットワークにおける方向指定ルーチング，電子情報通信学会論文誌，Vol.J88-A, No.2, pp.175–185 (2005).
9) 屋代智之，松下　温：車車間通信を用いた車両ネットワークの構築に関する提案，電子情報通信学会論文誌，Vol.J82-B, No.1, pp.9–18 (1999).
10) 藤原敏秀，関屋大雄，萬代雅希，呂　建明，谷萩隆嗣：送信範囲の異なる端末で構成される無線アドホックネットワークにおけるビジートーンを使用した MAC プロトコル，情報処理学会論文誌，Vol.47, No.9, pp.2815–2829 (2006).
11) 関戸正規，高田昌忠，長島勝城，萬代雅希，渡辺　尚：スマートアンテナを用いるアドホックネットワーク MAC プロトコルの指向性隠れ端末問題とその解決法，情報処理学会論文誌，Vol.46, No.9, pp.2226–2235 (2005).

© 2010 Information Processing Society of Japan

12) Sangiamwong, J., Fujiwara, A. and Ooya, T.: A study on interference-aware beamforming control in CSMA/CA-based wireless mesh networks, Technical Report of IEICE, Vol.106, No.25, RCS2006-11, pp.61–66 (2006).
13) Nasipuri, A., Ye, S., You, J. Hiromoto, R.E.: A MAC protocol for mobile ad hoc networks using directional antennas, *IEEE Wireless Communications and Networking Conference* (*WCNC2000*), Vol.3, pp.1214–1219 (2000).
14) Jain, V., Gupta, A. and Agrawal, D.P.: On-demand medium access in multihop wireless networks with multiple beam smart antennas, *IEEE Trans. Parallel and Distributed Systems*, Vol.19, pp.489–502 (2008).
15) Bazan, O. and Jaseemuddin, M.: An opportunistic directional MAC protocol for multihop wireless networks with switched beam directional antennas, *IEEE International Conference on Communications* (*ICC '08*), pp.2775–2779 (2008).
16) Choudhury, R.R., Yang, X., Ramanathan, R. and Vaidya, N.H.: On designing MAC protocols for wireless network using directional antennas, *IEEE Trans. Mobile Computing*, Vol.5, pp.477–491 (2006).
17) Telecommunication standarization sector of ITU: Pulse code modulation (PCM) of voice frequencies, ITU-T Recommendation G.711.
18) Telecommunication standarization sector of ITU: Internet protocol aspects quality of service and network performance, ITU-T Recommendation Y.1541 (Feb. 2006).

(平成 21 年 8 月 8 日受付)
(平成 22 年 3 月 5 日採録)

松本　直文

2007 年千葉大学工学部情報画像学科卒業．2009 年同大学大学院博士課程修了．現在，沖電気（株）に勤務．在学中，無線アドホックネットワークの MAC プロトコルに関する研究に従事．

関屋　大雄（正会員）

1996 年慶應義塾大学理工学部電気工学科卒業．2001 年同大学大学院博士課程修了．同年千葉大学大学院自然科学研究科助手，現在，同融合科学研究科助教．2008〜2010 年 Wright State University 客員研究員．主として，通信用電源および通信の信号処理に関する研究に従事．博士（工学）．2008 年船井情報科学奨励賞，同年安藤博記念学術奨励賞，同年エリクソン・ヤングサイエンティストアワード受賞．IEEE，電子情報通信学会，信号処理学会各会員．

阪田　史郎（フェロー）

1949 年生．1972 年早稲田大学理工学部電子通信学科卒業．1974 年同大学大学院修士課程修了．同年 NEC 入社．以来同社中央研究所にて，コンピュータネットワーク，インターネット，マルチメディア通信，モバイル・ユビキタスネットワーク等の研究に従事．1996〜1999 年同社パーソナル C&C 研究所所長，1999〜2004 年同社インターネットシステム研究所所長．2004 年千葉大学大学院教授，現在に至る．工学博士．情報処理学会フェロー．電子情報通信学会フェロー．『インターネットプロトコル』（情報処理学会），『組み込みシステム』（同），『センサネットワーク』（オーム社），『情報家電ネットワーク』（電気学会），『アドホック・メッシュネットワーク』（電子情報通信学会），無線通信技術大全（リックテレコム社）ほか著書・共著書 30 余．

柳生　健吾

2001 年早稲田大学理工学部電子・情報通信学科卒業．2003 年同大学大学院修士課程修了．同年株式会社 NTT ドコモ入社．現在，同社先進技術研究所勤務．入社以来，メッシュネットワーク技術，移動通信技術の研究開発に従事．2009 年度電子情報通信学会学術奨励賞受賞．電子情報通信学会会員．

© 2010 Information Processing Society of Japan