

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 23 日現在

機関番号：32678

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22500073

研究課題名（和文）トラヒック制御の観点からの無線 LAN メッシュネットワーク大規模化に関する研究

研究課題名（英文）Study on large scale wireless mesh networks from the view point of traffic control

研究代表者

山本 尚生（YAMAMOTO HISAO）

東京都市大学・知識工学部・教授

研究者番号：60350229

研究成果の概要（和文）： IEEE802.11 系無線 LAN 技術をベースとして構成される無線メッシュネットワークは、「マルチホップ中継に基づき自己組織的に相互接続を保証」し、伝統的なネットワークがカバーできない新しい通信環境を提供する可能性を秘めている。本研究の目的は、面的な拡大可能性向上をめざしてスケーラビリティのある接続制御およびトラヒック技術を確立し、広域インフラネットワークへの適用の道を開くことにある。

研究成果の概要（英文）： Wireless Mesh Networks which guarantee connection by self-organization scheme have constructions based on IEEE802.11 wireless LAN technology. It has a possibility of offering the new communication environment which cannot be performed by traditional technologies. The purpose of this research is to establish scalable connection and traffic control technologies aiming at opening the way for application to a wide-area infrastructure network.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2011 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2012 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：コンピュータネットワーク

科研費の分科・細目：情報学・計算機システム・ネットワーク

キーワード：モバイルネットワーク技術、無線 LAN、メッシュネットワーク、トラヒック

1. 研究開始当初の背景

将来のユビキタスネットワークを、トラヒックパターンのダイナミズムの観点から眺めれば、その基本構造に柔軟性が大きく要望され、柔軟に対応できる自己組織的、自律分散型のアーキテクチャを持つアクセス網が望ましいと考えて、MANET および無線 LAN メッシュネットワークに関する検討を進めた。広域エリアのカバーを実現するには多くの課題があるが、その中でも、分散管理を徹底

したスケーラビリティのある制御方式の実現と、ノード間の無線干渉を考慮した指向特性を持ったアンテナを利用した新しい無線リンクの導入とそのための制御アルゴリズムの開発が必要と考えた。

2. 研究の目的

本研究では、無線 LAN メッシュネットワークの広域公衆ネットワークへの展開に向け解決すべき重要な課題として以下の 3 課題

を設定し、新技術の提案とその検証を行うことを目的とした。

課題 1. 移動端末の位置管理と経路構築制御におけるスケーラビリティの確保

課題 2. 中継ノード間無線干渉を考慮した迂回拡大型トラフィック制御法

課題 3. QoS およびリソース効率を維持するためのオーバーレイ/バイパス網適用法

3. 研究の方法

課題 1 について: 集中制御ノードを使わず、かつ制御パケットのフラッディングを用いない制御法を確立するために、ハッシュ関数による分散管理技術を導入し、トラフィック交流の変動に適応すると共に制御信号量の観点からのスケーラビリティのある制御アルゴリズムを提案する。

課題 2 について: 無線特有の隠れ端末、さらされ端末問題を回避しつつ有効な迂回経路を構築する制御手法が鍵となる。CSMA-CA の高効率適用を可能とするために各中継ノードのアンテナに指向特性を持たせて、従来の無指向性アンテナ (オムニアンテナ) に加えて指向特性のあるアンテナを備えたノードの導入法を提案し、その制御法を確立する。

課題 3 について: 複数のネットワークが融合して大規模化することに備えて、バイパス網をオーバーレイした複階位化による性能向上を図る。各駅停車のみの網に急行や特急を埋め込むことに似た発想である。

なお、アルゴリズムの開発およびその性能評価は、基本的にはコンピュータシミュレーションをベースに進めた。使用したシミュレータは、OPNET、QualNet、Artisoc である。

4. 研究成果

(1) ハッシュ関数を利用した STA 位置登録・探索方式の提案と特性評価

IEEE802.11s では無線メッシュネットワークのユーザ端末 (Station :STA) の所属するノード情報の管理・探索方式として RA-OLSR の GAB 共有方式・GAB 集中管理方式と HWMP での探索方式が検討されてきた。GAB は STA 所属ノード情報のデータベースである。しかし、これらの方式では特定のメッシュノード (MN) への制御メッセージの集中やフラッディングの多用がスケーラビリティを確保する上で問題である。そこで、本科研費研究を開始する前に、ハッシュ関数を用いることでこれらの問題を解決する方式を提案してきた。本科研費研究では、これまで提案してきた方式の改良方式の提案 (SSUPH) とその制御メッセージ処理法の詳細設計を行った。

① 提案方式 SSUPH (Station Search Using Plural Hash)

SSUPH は STA に対して、ハッシュ関数を複数用いて、複数の MN を所属情報登録候補とし、

候補の中で一番近い MN に STA 所属情報を送信する方式である。(図 1)

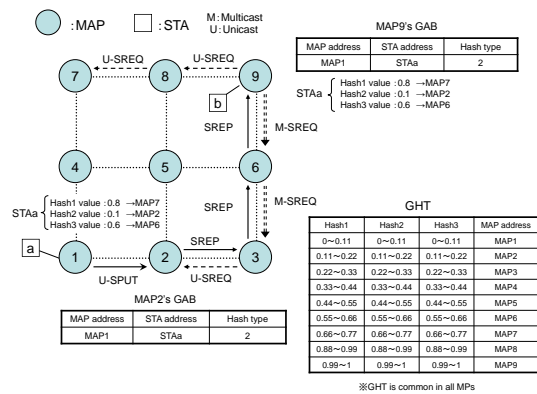


図 1. SSUPH における STA 所属情報管理・探索方式

STA 所属情報の管理について

MAP (STA のためのアクセスノード機能を有する MN) は自身に所属する STA のアドレスから各ハッシュ関数のハッシュ値を計算し、それらのハッシュ値に対応するそれぞれの MN のうちから一番近い MN に所属情報を含む STA 登録メッセージ (SPUT) を送り、受信した MN が所属情報を管理する。

STA 所属情報の探索について

送信元 STA の所属する MAP において宛先 STA のアドレスから各ハッシュ関数のハッシュ値を計算し、それらのハッシュ値に対応した MN 全てに宛先 STA 探索要求メッセージ (SREQ) を送る。SREQ を受信した MN は、自分に探索対象の STA 所属情報があれば、送信元 MAP に宛先 STA 探索応答メッセージ (SREP) を送信し、なければ SREQ を破棄する。送信元 STA の所属する MAP が SREP を受信することで宛先 STA の所属する MAP の情報を得る。

② 制御方式

SREQ 送信のマルチキャスト化

SSUPH では SREQ も複数 (ハッシュ関数分) の MN に送信を行うため SREQ をマルチキャストで送信化することでさらなる制御メッセージ量の削減が可能である。このことから、SREQ 内にも Multi フラグを導入し、Unicast-SREQ (U-SREQ) と Multicast-SREQ (M-SREQ) の二つの制御メッセージを使用し、以下の制御を行う。

M-SREQ を受信した MN において探索されている STA の所属情報が存在した場合、Next Hop への転送をせずに SREQ 送信元 MAP に SREP により STA 所属情報を送信する。

SREQ の送信制御

無線メッシュネットワークの適用領域として、公衆無線 LAN を考えると STA のほとんどが歩行者であると考えられる。したがって、大規模な無線メッシュネットワーク内で考

えると移動距離は短いと考えられることから SSUPH において、その STA の所属情報を管理する MN の変化は少ないと考えられる。このことから、STA 所属情報の探索について以下の制御を行う。

(ア) STA の所属情報の 1 回目の探索を行った後、その STA の所属情報を管理している MN (もしくはハッシュ関数) を GAB に記憶する。

(イ) その STA の 2 回目以降の探索では、記憶している (ハッシュ関数の) 管理 MN に SREQ を送信する。SREQ の宛先 MN に探索している STA 所属情報がない場合、SREQ の宛先 MN は他のハッシュ関数に対応する MN に SREQ を送信する。

③ シミュレーション評価

シミュレーション評価では、総 STA 数を MN 数×10 台として、MAP (MN) 数 225 台までの増加に対する総制御メッセージ量の推移、および MAP (MN) 数を 15×15 台としたモデルでの、STA 数の増加に対する総制御メッセージ量の推移を求めた。評価結果の詳細は 5 章成果リストの [雑誌論文] ⑥にまとめて発表した。ネットワーク規模 (MAP (MN) 数、収容ユーザ数 (STA 数) に対する制御メッセージ量の観点からスケラビリティのある方式であることを確認した。

本成果を、本科研費研究開始前の検討内容と共にまとめて、5 章成果リストの [雑誌論文] ⑥に発表した。

(2) 指向/無指向性双モードノードの導入と制御法

指向性アンテナを用いることで、大規模化によるネットワーク性能の劣化を抑制するだけでなく、空間利用効率の向上も目指した検討が行われている。しかし、IEEE802.11s では無線メッシュネットワークにおける指向性アンテナの使用は考慮されていない。また、指向性アンテナを用いることによって、指向性隠れ・さらし端末問題などが発生するが、具体的な解決策、適用法や性能に関する検討が十分に行われていない。

本研究では指向性/無指向性をパケットレ

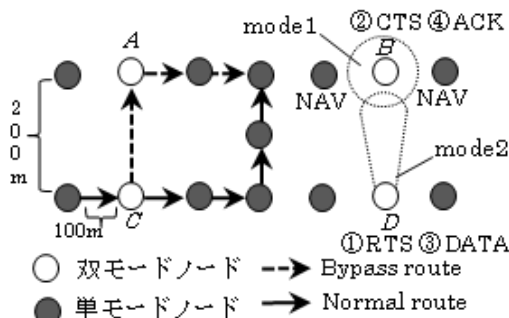


図 2. 双モードノード導入方式の評価モデル

ベルで切り替えられる双モードノードを提案し、無指向性のみで通信する方式 (従来方式) と双モードノードを導入した場合の方式 (提案方式) の比較評価を行った。

① 双モードノードと単モードノード

双モードノードは、セッション或いはパケットレベルで 2 つのモード (mode1: 無指向性状態での送受信, mode2: 固定的な指向性状態での送受信) を使い分けることが出来るノードであり、単モードノードは IEEE802.11s の前提として使用される無指向性状態での送受信 (mode1) 機能のみを有するノードである。双モードノードにおけるパケット転送時には宛先アドレスに応じて、mode1 と mode 2 が選択的に使われる。そのため、経路構築法 (ルーティングテーブルの構築法) やノード導入位置の検討を行う必要がある。

② 提案方式とシミュレーション評価

まず、双モードノードの導入位置の検討として、エリアが比較的幅の広い河川などで分断され、ノード配置に制約を受ける状況を想定したモデル (図 2) を用いて評価を行う。尚、mode2 でのキャリアセンスを前提とし、双モードノードは nodeA~nodeD、他のノードは単モードノードとする。双モードノード同士が通信している際に、その隣接端末から通信が開始されると指向性隠れ端末問題が発生する。そこで、送信側は mode2、受信側は mode1 で通信を行うことにより、隣接端末を NAV に設定させて衝突を回避させる。

図 3 は、ポアソン分布に従ったランダム CBR によるネットワークの負荷を変化させた時の平均スループットと平均遅延時間である。ルーティングプロトコルは RA-OLSR、シミュレーション時間は 1000 秒、SEED 値を 10 回変更し、その平均を QualNet を用いて評価を行った。提案方式は、ネットワークの負荷の増加による平均遅延時間が抑制出来ており、スループットの改善にも繋がっている。しかし、負荷が小さい時のスループットに関しては大きな変化が得られなかった。これは、双

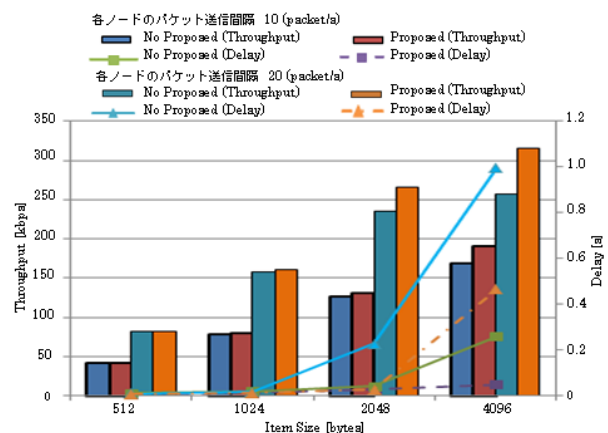


図 3. スループットとエンド・エンド遅延時間特性

モードノード同士が通信する際に、送信側の隣接端末において Deafness 問題などの影響で発生するパケットドロップが原因と考えられる。

本成果を5章成果リストの[雑誌論文]①にまとめて発表し、現在論文投稿中である。

(3) オーバレイ構造の導入と CoS 適応型ルーティングプロトコル

無線 LAN メッシュネットワークの大規模化によるネットワーク性能劣化を抑制するために外部ネットワークを併用したネットワーク構成とその経路選択アルゴリズムを提案した。

① オーバレイ構成と提案方式

大規模な WLAN-MN は MPP (外部ネットワークとのゲートウェイノード) が複数存在する場合が想定される。MPP の先 (外部) には WLAN-MN よりも高速なネットワークが構成されていることが多いと考えられるので、これをバイパスとして併用することにより、設備を増設せずにネットワーク性能を維持・向上させることができる (図 4)。同じ WLAN-MN 内に送信元の Station (以下、S-STA : Source-STA) とあて先 Station (以下、D-STA : Destination-STA) がある場合でも、全ての通信を WLAN-MN 内の経路だけで通信を行うのではなく、MAP から MPP まで WLAN-MN を使用し、S-STA の所属する MAP のゲートウェイとなっている MPP (以下、M-MPP : Master-MPP) から D-STA の所属する MAP の M-MPP まで OSHSN を使用して通信できるようにする。この経路選択の判断を行うためメトリックの扱い方として次の2方式を提案し比較評価する。

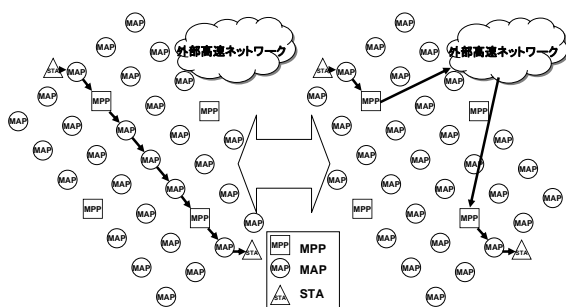


図 4. 外部ネットワークを用いたオーバレイ構成

経路選択にホップ数を用いる方式

S-STA と D-STA の M-MPP が同じか、もしくは WLAN-MN 内だけで通信をしても、経路のホップ数がある値以下の経路になる場合は、WLAN-MN 内に閉じた経路を選択する。S-STA と D-STA の M-MPP が異なりホップ数がホップ数閾値より多い経路になる場合は、OSHSN を併用した経路を選択する。

経路選択にメトリックを用いる方式

S-STA と D-STA の M-MPP が同じ場合、WLAN-MN 内に閉じた経路を選択する。S-STA と D-STA の M-MPP が異なる場合、WLAN-MN 内に閉じた経路のメトリックと SHSN

を併用した経路のメトリックを比較して、低いほうの経路を選択する。

② シミュレーション評価と考察

OSHSN を併用しない WLAN-MN 内に閉じた接続方式 (以下、内部経路方式) と、WLAN-MN と OSHSN を併用した接続方式 (以下、外部経路併用方式) においてホップ数で経路を選択する方式とメトリックで経路を選択する方式 (以下、メトリック型外部経路併用方式) の3つの方式を比較評価した。評価方法として、WLAN-MN の規模 (ノード数) を変化させた場合の各方式における遅延時間を比較した。

内部経路方式に比べ外部経路併用方式が大幅にネットワークの大規模化による遅延時間の増加を抑制でき、メトリック型外部経路併用方式が最も遅延時間の増加を抑制できていることが確認された。

本成果を5章成果リストの[学会発表]⑦(国際会議)で発表した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 20 件)

- ① 笹部 聖也、山本尚生、“無線メッシュネットワークにおけるブリッジトポロジーを対象とした指向性アンテナの導入検討”、電子情報通信学会 技術研究報告、査読無、Vol. 112 No. 494 2013、281-286
- ② 伊藤啓太、長島淳也、宇谷明秀、山本尚生、“無線センサネットワークの高効率化を目指したフラディン送信電力設計・運用法の一検討”、電子情報通信学会論文誌 B、査読有、J95-B No. 06 2012、760-764
- ③ 西元雅明、宇谷明秀、山本尚生、“大規模センサーネットワークのための複数許容解探索型改良 ABC アルゴリズムに基づくシンクノード群の配置手法”、電子情報通信学会論文誌 D、査読有、J95-D No. 6 2012、1321-1333
- ④ J. Nagashima, A. Utani, H. Yamamoto, “Proposal and Evaluation of Network-Robot System with Reinforcement Learning Mechanism”、ICIC Express Letters、査読有、Vol. 6 No. 2 2012、411-416
- ⑤ 長島淳也、宇谷明秀、山本尚生、“複数

許容解探索型粒子群最適化法の無線センサネットワークへの適用 ―フラッディング効率化のための各センサノードの送信電力調整―、知能と情報(日本知能情報ファジィ学会誌)、査読有、Vol23, No. 1 2011、65-77

- ⑥ 門馬玲志、山田拓也、山本尚生、“大規模な無線メッシュネットワークにおけるハッシュ関数を利用したS T A位置登録・探索方式の特性評価” 電子情報通信学会論文誌B、査読有、Vol. J93-B7 2010、1025-1030

[学会発表] (計 11 件)

- ① 笹部聖也、山本尚生、“指向／無指向性双モードノードを用いた無線メッシュネットワークにおける受信側さらし端末問題への対応” 2013 年 電子情報通信学会総合大会、2013 年 03 月 20 日、岐阜大学
- ② 朝比奈啓、笹部聖也、山本尚生、“無線メッシュネットワークにおける送信電力制御と干渉ノード数を考慮した経路構築法の研究” 2013 年 電子情報通信学会総合大会、2013 年 03 月 20 日、岐阜大学
- ③ 高橋佑宗、山本尚生、“大規模無線メッシュネットワークにおける発信元トラフィック規制を用いた特定対地集中過負荷制御方式の提案” 2012 年電子情報通信学会通信ソサイエティ大会、2012 年 09 月 12 日、富山大学
- ④ 笹部聖也、山本尚生、“指向／無指向性双モードノードを用いた無線メッシュネットワークにおけるバイパス通信の研究” 2011 年電子情報通信学会通信ソサイエティ大会、2011 年 9 月 13 日、北海道大学
- ⑤ 西沢浩平、山本尚生、“大規模無線メッシュネットワークのモバイル端末位置情報管理・探索方式における制御信号量削減法の提案” 2011 年電子情報通信学会通信ソサイエティ大会、2011 年 9 月 13 日、北海道大学
- ⑥ 高橋佑宗、山本尚生、“大規模無線メッシュネットワークにおける送信レート制御方式を用いた特定対地集中過負荷制御方式の研究” 2011 年電子情報通信学会通信ソサイエティ大会、2011 年 9 月 13 日、北海道大学
- ⑦ K. Imai, H. Yamamoto “A Study on Large-Scale Wireless Mesh Networks Cooperating with High-Speed External

Networks” CyberC 2010 International Conference on Cyber-Enabled Distributed, Sponsored by: IEEE Computer Society、2010 年 10 月 10 日、Huashan Hotel, No. 3 YanAn Road HuangShan City, AnHui, China

[その他]
ホームページ等
<http://www1.hylab.ec.tcu.ac.jp/member.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山本 尚生 (YAMAMOTO HISAO)
東京都市大学・情報ネットワーク工学科・教授
研究者番号：60350229