

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 8 日現在

機関番号：14301

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2013～2014

課題番号：25889035

研究課題名(和文) LEDとカメラで超える無線LAN通信容量の限界

研究課題名(英文) Camera-assisted Wireless Media Access Control toward Future WLAN

研究代表者

西尾 理志 (Nishio, Takayuki)

京都大学・情報学研究科・助教

研究者番号：80711522

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、主に無線LANを対象とし、逼迫する無線通信帯域の効率的な利用を目的として、異なる通信技術、特に、カメラを用いた通信とマイクロ波・ミリ波通信とを組み合わせた無線通信システムを提案した。異なる通信メディアを適材適所に用いることで、スループットを50%以上に向上し、特に、ファイルダウンロード時のスループットを最大で5倍程度向上させることに成功した。

研究成果の概要(英文)：This work focuses on wireless local area networks (WLANs) and proposes novel mechanisms for solving wireless bandwidth shortage problem. We propose wireless media integrations which leverage microwave communications, millimeter-wave communications, and communications using optical camera. The proposed mechanisms increased the WLAN system throughput more than 50% and increased the throughput of a WLAN user fivefold when users download large volume files via the WLAN.

研究分野：無線通信システム

キーワード：無線LAN メディアアクセス制御 可視光通信 異種無線技術融合 ミリ波通信

### 1. 研究開始当初の背景

IEEE 802.11 が推進する無線 LAN 規格では、データ伝送速度の進歩が目覚ましい。最も普及している 802.11n 対応機器では 300 Mbit/s に達し、次世代規格の 11ac 対応機器では Gbit/s の域に達する。しかし、アクセス制御方式には目覚ましい発展はない。無線 LAN は、CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) と呼ばれる方式を採用している。送信データのある端末のみがバックオフと呼ばれる衝突回避制御を含む帯域獲得動作を行い、帯域獲得できた端末のみがデータ伝送を行う。しかしこのバックオフがオーバヘッドとなる。無線 LAN の通信容量は、データ伝送に必要な時間とアクセス制御のオーバヘッドの和から決まるため、データ伝送速度がいくら向上してもシステムの通信容量は頭打ちする。ショートパケットが多い場合や端末数が多い場合、データパケットの結合ができないため、アクセス制御のオーバヘッドが支配的となり 300 Mbit/s では 18%程度、1 Gbit/s では 7%程度のスループットしか得られない。また、CSMA/CA では衝突が少なからず発生し、特に端末数が多い状況では通信容量を大きく減少させる。

従来研究では、CSMA/CA の改良というアプローチが取られてきたが、バックオフのオーバヘッド自体を根本的に解決するには至っていない。一方、異なる伝送媒体を用いた無線 LAN も登場している。その一つが可視光 LAN である。データ伝送には LED と受光器を用いた可視光通信を用い、アクセス制御にはイーサネットなどの有線ネットワークで用いられる CSMA/CD を用いる。可視光 LAN は数十 Mbit/s 程度の通信速度を実現しているが、次世代無線 LAN の目指す Gbit/s には及ばない。

### 2. 研究の目的

本研究では、LED とカメラを用いることで無線 LAN の通信容量を飛躍的に向上させる技術の研究を行う。無線 LAN のアクセス制御は長年に渡りブレイクスルーがなく、それが無線 LAN の通信容量を大きく制限していた。本研究では、異なる通信技術、特に、LED による可視光通信技術とカメラによる多重受信を応用したアクセス制御方式を提案し、無線 LAN の通信容量を従来の 3 倍にする。さらに、本アプローチの応用としてマイクロ波通信とミリ波/テラヘルツ波通信を組み合わせた方式についても検討する。提案方式を IEEE 802.11 規格に基づきプロトコル化し、数学的な理論解析、および計算機シミュレーションによる実現性と性能の評価を行う。

### 3. 研究の方法

研究目的を実現するため、まず文献調査によりプロトコル設計の際の制約条件を明らかにする。調査結果および、IEEE 802.11 標準の CSMA/CA に基づき提案プロトコルの設計を行う。特性解析では、提案プロトコルをモ

デル化し、通信プロトコル理論を用いた理論的解析を行う。さらに、汎用シミュレータ QualNet を用いた計算機シミュレーションによる特性解析を行う。QualNet には IEEE 802.11 規格および物理層から上位レイヤまでが忠実に再現されており、それに組み込む形で実装することで、実利用時に即した評価を行うことができる。

### 4. 研究成果

#### (1) VRMAC: LED とカメラによる可視光通信を用いた無線 LAN MAC プロトコル

従来の無線 LAN では、CSMA/CA と呼ばれるメディアアクセス制御が用いられており、フレーム衝突回避制御がオーバヘッドとなり、システムスループットが頭打ちしていた。さらに、データ送信を行う端末が多い場合、フレーム衝突が避けきれず、衝突が頻発することで無線帯域の大きな損失となっていた。

本研究では、カメラと LED を用いた可視光通信を用いた無線 LAN メディアアクセス制御プロトコル (以下、VRMAC と呼ぶ) について検討した。カメラと LED を用いた可視光通信は容量が小さい一方、同時アクセスが可能という特徴があるが、これまで有効なアプリケーションが検討されていなかった。本プロトコルでは、この可視光通信をアクセス制御に応用し、衝突回避制御のオーバヘッドを削減し、さらにアクセスポイントで送信権を管理することで、衝突が生じないメディアアクセスを実現する。図 1 に提案方式の概要を示す。端末はデータ送信前にアクセス要求を、LED を送信機とした可視光通信によりアクセスポイントに送信する。アクセスポイントはカメラを用いてアクセス要求を受信し、制御信号によりデータ送信権を割り当てる。

提案方式の性能をネットワークシミュレータにより評価した。図 2 に送信端末台数に対するスループット特性を示す。提案方式である VRMAC によりシステムスループットが大

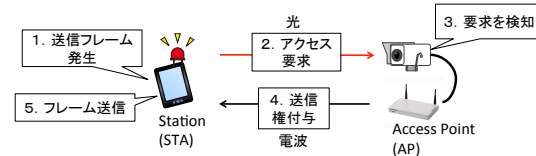


図 1: 提案プロトコル概要

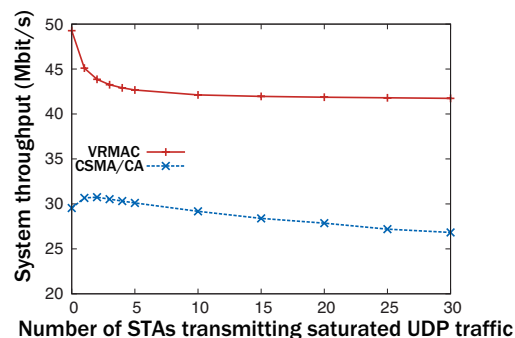


図 2: VRMAC 方式のスループット特性評価

大きく向上していることがわかる。特に上り通信を行う端末台数が少ない時では、1.7 倍のシステムスループットを達成した。

さらに、アプリケーションとしてインターネットトラフィックの大半を占める TCP ファイル転送を想定し、それに適した送信権制御方式を検討した。送信権制御として、TCP ACK に対する送信権の予約割当、および、ファイル要求の先着順による優先制御を検討した。ファイル転送の場合、転送が完了したユーザから順次通信を終了していく。そこで、先に要求を行ったものから優先して送信権を割当て、ファイル転送を完了させていくことで転送時間短縮が期待できる。

図 3, 4 に TCP ファイル転送を想定したシミュレーションにおける平均所要時間及び最小所要時間を示す。横軸はファイルサイズ、縦軸はあるサイズのファイルのダウンロードにかかった所要時間であり、図 3 は全端末の平均所要時間、図 4 は所要時間が最小であったユーザの所要時間を示す。提案方式により平均所要時間を従来のアクセス制御に比べ 30%削減した。さらに、所要時間が最短ユーザにおいては、提案方式により所要時間が 5 分の 1 になった。これはスループットでは 5 倍に相当する。このように実利用を想定した環境においても高い性能を達成した。

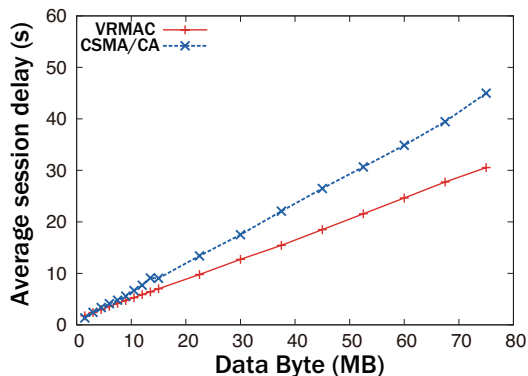


図 3: ダウンロードファイルサイズに対する平均ファイル転送所要時間

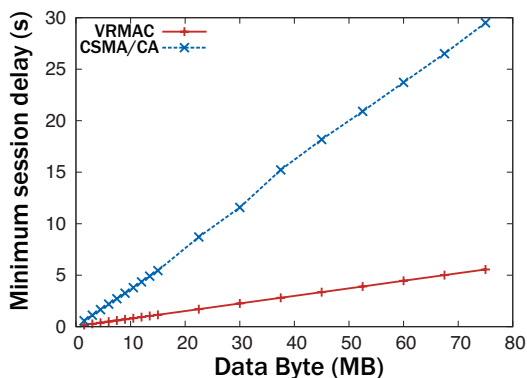


図 4: ダウンロードファイルサイズに対するファイル転送所要時間の最小

## (2) 複数アクセスポイント存在環境における競合回避制御方式

(1) で述べた VRMAC プロトコルでは無線 LAN が単独で存在する場合を想定しており、同一チャネルを利用する VRMAC 無線 LAN が複数存在する場合にはアクセスポイント同士の競合によりスループットが低下する。本成果は、複数の VRMAC 無線 LAN 存在時のアクセスポイント間の競合回避を実現する。提案方式の特徴は複数 アクセスポイント 間を接続する有線 LAN に IEEE 1588 規格を用い、アクセスポイント間の時刻同期を利用することにある。時刻同期がとれたアクセスポイント間で無線 LAN のアクセス制御における優先度を制御するパラメータである AIFSN を調整することで時分割多重アクセスを実現する。本方式を Cyclic AIFSN 方式と呼ぶ。図 5 に本方式の概要を示す。アクセスポイントが異なる値の AIFSN 値を順番に選択することで、データ送信前の待機時間をばらつかせ、フレーム衝突を回避する。

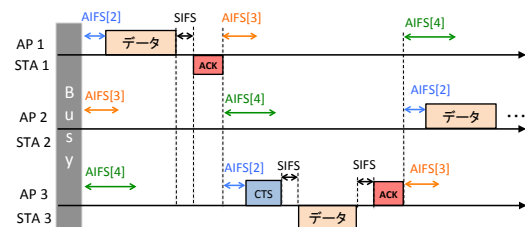


図 5: Cyclic AIFSN 方式

図 6 に近接する無線 LAN 数に対する Cyclic AIFSN 方式適用時のスループット特性を示す。従来の CSMA/CA では無線 LAN 数が増加するとスループットが低下していくが、提案方式では台数が増加してもスループットは低下しないことを確認した。さらに、提案方式により従来の無線 LAN と比較してスループットが 33%改善した。

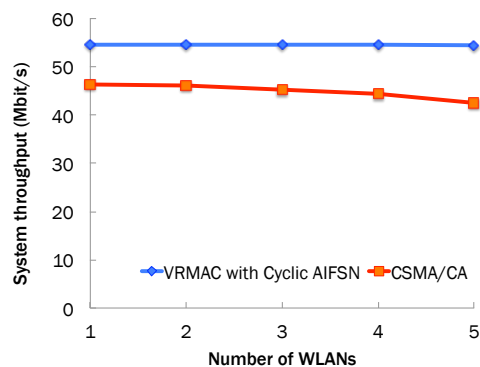


図 6: 無線 LAN 数に対するスループット特性

## (3) 高信頼無線マルチキャスト技術

成果(2)のプロトコルでは有線網による同期を用いたが、必ずしも全てのアクセスポイントが互いに有線網を介して通信できると

は限らない。そのため、無線通信による同期が必要となる。本成果は、無線通信による同期を行う際に必要となるマルチキャストの高信頼化を実現している。本方式では、マルチキャスト時は通常用いられない確認応答フレームを送受信することで高信頼化を行う一方、確認応答フレームの送信タイミングを制御することで、同一チャンネルで伝送されるデータトラフィックを阻害することなく、高信頼なマルチキャストを行う。

図7にシミュレーション結果を示す。本技術によりデータフレームの送信遅延時間が低下している。またこのとき、マルチキャストフレームは確認応答により再送が行われるため、フレーム損失率を低減できており、高信頼化がなされた。本評価では特に端末数の多い環境を想定しているが、本方式の効果は端末数が十数台の環境でも有効である。

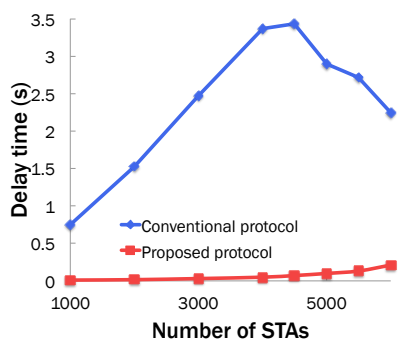


図7: 端末数に対するデータ送信遅延時間

#### (4) ミリ波無線 LAN に向けた RGB-D カメラを用いたプロアクティブ通信制御技術

本成果は、無線 LAN の中でも特にミリ波を用いた無線 LAN (以下、ミリ波無線 LAN と呼ぶ) を対象として、カメラを可視光通信のみならず、画像解析による通信環境解析に用いることで、ミリ波無線 LAN の性能を向上させるものである。ミリ波無線 LAN では、マイクロ波を用いた無線 LAN とは異なり、歩行者が送信局と受信局の間を遮ると通信品質が著しく劣化する。これを人体遮蔽と呼ぶ。人体遮蔽の解消はミリ波無線 LAN の普及に不可欠である。

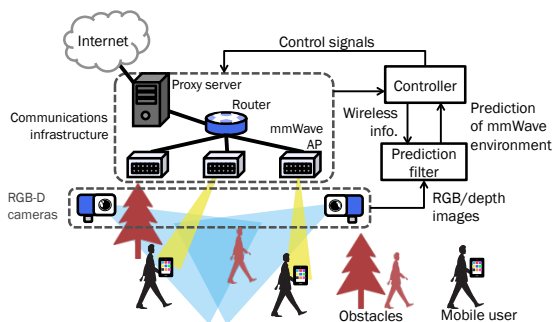


図8: ミリ波無線 LAN に向けた RGB-D カメラを用いたプロアクティブ通信制御システム

本通信制御技術のシステムモデルを図8に示す。アクセスポイントに具備されたカメラにより歩行者を認識することで、人体遮蔽の発生を予測する。この予測に基づきトラフィック流量制御、経路制御、指向性制御を行うことで、人体遮蔽が発生する前に、当該通信路の通信を停止したり、人体遮蔽の影響がない経路に切り替えたりすることで、ミリ波無線 LAN のシステムスループットの向上や安定性を向上する。

図9に人体遮蔽が生じる環境におけるスループットの時間変化を示す。提案方式を用いない場合、Path Bにおいて人体遮蔽が発生した時、Path Bのスループットが大きく低下し、システムスループットが低下した。一方、提案方式では、Path Bの通信は停止するが、その分だけもう一方のスループットが大きく向上し、システムスループットが向上した。本成果により、人体遮蔽時のシステムスループットを最大2倍程度まで向上した。

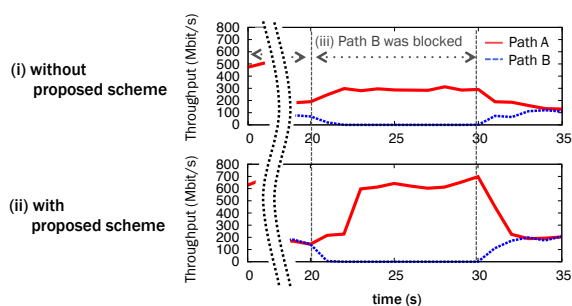


図9: 人体遮蔽が生じる環境下におけるミリ波無線 LAN のスループット特性評価

#### (5) マイクロ波通信を用いたミリ波・テラヘルツ波通信制御技術

本研究は、可視光通信とマイクロ波通信など異なる種類の無線通信を組み合わせることで性能向上を行うものである。本成果では、このアプローチをマイクロ波通信とミリ/テラヘルツ波通信に応用し、メディアアクセス制御においてマイクロ波通信を補助的に用いることでミリ波/テラヘルツ波通信の性能を向上させる技術である。先に述べたようにミリ波やテラヘルツ波は光に近い性質を持ち、歩行者などが通信路を遮ると通信品質が急峻に劣化する。特にテラヘルツ波通信は、大気減衰も大きく受信信号強度が小さいため、少しの遮蔽でもフレーム損失率が大幅に増加するため、制御信号などサイズは小さく通信速度はそれほど必要ないが信頼性が重要な通信を行うには非効率となる。

図10にマイクロ波通信を補助的に用いたテラヘルツ波通信制御を示す。本技術では、テラヘルツ波通信のための制御信号を、マイクロ波を用いた無線 LAN (以下、マイクロ波無線 LAN と呼ぶ) により送信する。マイクロ波無線 LAN は人体遮蔽の影響がなく、比較的安定した通信が可能であるため、テラヘルツ波通

信制御信号を損失することなく送信することができる。一方で、マイクロ波無線 LAN で送受信される他のフレームとの衝突が生じる。本技術では、MAC レイヤでの優先制御により、これらテラヘルツ波通信制御信号と他のフレームの衝突を回避する。具体的にはマイクロ波無線 LAN において、データフレーム送信時に用いられる DIFS と呼ばれる送信待ち時間よりも短い PIFS 時間を使用することでテラヘルツ波通信制御信号が優先的に送信されるようになりデータフレームとの衝突が回避できる。

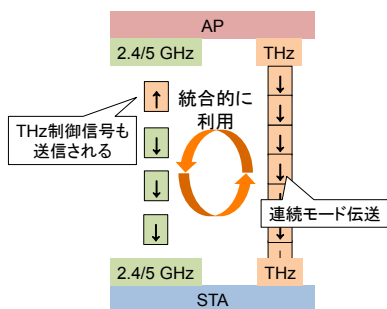


図 10: マイクロ波通信を補助的に用いたテラヘルツ通信制御

本方式の性能を計算機シミュレーションにより評価した。図 11 にマイクロ波無線 LAN における PIFS を用いた場合と DIFS を用いた場合のテラヘルツ波制御信号の衝突率を示す。提案する PIFS を用いた制御では、テラヘルツ波制御信号の衝突をほぼ 0% まで低減でき、保護することができた。

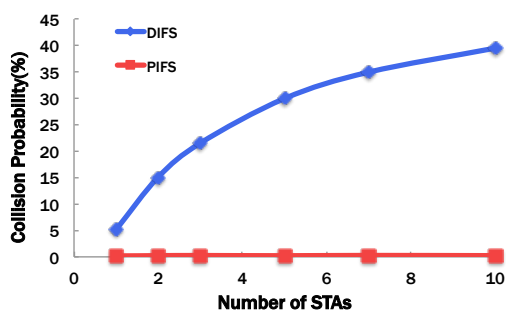


図 11: マイクロ波無線 LAN におけるテラヘルツ波通信制御信号の衝突率

## 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 1 件)

- [1] R. Nishioka, K. Ogawa, T. Nishio, M. Morikura, and K. Yamamoto, "Grouping-Based Reliable Multicast Protocol for Large-Scale WLANs",

Proc. of APWCS, Aug. 2013.

[学会発表] (計 14 件)

- [1] 西尾理志, 荒井亮平, 山本高至, 守倉正博, "RGB-D カメラを用いたミリ波通信環境予測に基づく通信制御," 電子情報通信学会総合大会, B-15-5, p. 533, March 10, 2015.
- [2] 小熊優太, 荒井亮平, 西尾理志, 山本高至, 守倉正博, "RGB-D カメラを用いたミリ波通信人体遮蔽予測に基づくプロアクティブ経路制御の実装," 信学技報, vol. 114, no. 490, RCS2014-311, pp. 59-63, Mar. 2015.
- [3] 西尾理志, 山本高至, 守倉正博, "RGB-D カメラを用いたミリ波通信環境予測に基づくプロアクティブ通信制御の提案," 信学技報, vol. 114, no. 490, RCS2014-310, pp. 53-58, Mar. 2015.
- [4] 小熊優太, 荒井亮平, 西尾理志, 山本高至, 守倉正博, "ミリ波通信における人体遮蔽に対するリアクティブ経路制御の評価実験," 信学技報, vol. 114, no. 418, ASN2014-143, pp. 181-184, Jan. 2015.
- [5] T. Nishio, R. Arai, K. Yamamoto, and M. Morikura, "Proactive Traffic Control Based on Human Blockage Prediction Using RGBD Cameras for Millimeter-wave Communications," Proc. IEEE CCNC 2015, Las Vegas, Nevada, USA, Jan. 9-12, 2015. **査読有**
- [6] T. Nishio, M. Morikura, and K. Yamamoto, "Heterogeneous Media Communications for Future Wireless Local Area Networks," Proc. IEEE ICCE 2015, Las Vegas, Nevada, USA, Jan. 9-12, 2015. **査読有**
- [7] T. Nishio, R. Nishioka, M. Morikura, and K. Yamamoto, "Traffic Separation Using Dual Wi-Fi Interface to Enhance WLAN System Throughput," Proc. IEEE ICSPCS '2014, Gold Coast, Australia, Dec. 15-17, 2014. **査読有**
- [8] 西尾理志, 守倉正博, 山本高至, "マイクロ波帯無線通信とテラヘルツ帯無線通信を併用した無線 LAN の検討," 信学技報, vol. 114, no. 210, MoNA2014-44, pp. 77-80, Sept. 12, 2014.
- [9] 山田太郎, 西尾理志, 守倉正博, 山本高至, "テラヘルツ帯通信を用いた無線 LAN の検討," 信学ソ大, BS-2-7, Sept. 24, 2014.
- [10] 西岡良, 西尾理志, 守倉正博, 山本高至, "VRMAC: 可視光通信を用いた無線メディアアクセス制御 ~ VRMAC 対応 WLAN システム同士の共存に関する検討 ~," 信学技報, vol. 114, no. 160,

MoNA2014-19, pp. 15-20, July 2014.

- [11] 山田太郎, 西尾理志, 守倉正博, 山本高至, “60 GHz 帯無線 LAN を用いた 2.4 GHz 帯無線 LAN スループット改善のための一検討,” 信学技報, vol. 114, no. 31, MoNA2014-2, pp. 7-12, May 2014.
- [12] 西尾理志 “無線 LAN に関する研究アクティビティ紹介,” WLAN-QoS workshop, Feb. 26, 2014.
- [13] 西岡良, 西尾理志, 守倉正博, 山本高至, “可視光通信を用いた WLAN メディアアクセス制御方式の検討,” WLAN-QoS workshop, Feb. 26, 2014.
- [14] 西岡良, 西尾理志, 守倉正博, 山本高至, “LED とカメラを用いた無線 LAN メディアアクセス制御,” 信学技報, vol. 113, no. 209, MoNA2013-36, pp. 61-66, Sept. 2013.

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

西尾 理志 (NISHIO, Takayuki)  
京都大学・大学院情報学研究科・助教  
研究者番号：80711522

### (2) 研究分担者

( )

研究者番号：

### (3) 連携研究者

( )

研究者番号：