

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 8 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24240009

研究課題名(和文) 超多端末モバイルを支える無線資源極限利用アーキテクチャの実証的基礎研究

研究課題名(英文) Wireless Network Architecture based on Experiment towards Ultimate Usage of Wireless Resources

研究代表者

渡辺 尚 (WATANABE, TAKASHI)

大阪大学・情報科学研究科・教授

研究者番号：90201201

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,400,000円

研究成果の概要(和文)：本課題では、高い通信端末密度の超多端末モバイル環境において、無線資源等を効率的に使用する制御技術を開発することを目的とし、(1)無線電波通信の高度化、(2)画像・光・電波連携プロトコル、(3)応用システムをテーマとして推進した。

(1)に関しては、全二重通信、ネットワークMIMO、物理層ネットワーク符号化等の基礎を確立した。(2)に関しては、カメラ情報を用いて端末位置を識別し電波通信を効率化する手法等を設計した。(3)については高度道路交通システムを取り上げ、交通情報共有のための車車間無線通信方式を考案した。その他、学術講演を行いまたホームページを作成し、成果を社会に公開した。

研究成果の概要(英文)：The goal of this project is development of a wireless network architecture towards ultimate usage of wireless resources. More specifically, (1) advanced wireless communication technologies, (2) protocols collaborating image/visual light and electric wave, (3) application systems are research subjects.

For (1), the project developed fundamental bases for access controls of wireless full duplex, network MIMO, physical layer network coding, etc. It includes experiments by a software radio platform. For (2), it designed a protocol by using visual information from cameras to enhance electric wave communications. This project also developed vehicle to vehicle communication protocol for information sharing as for (3). Those results were presented open to the public at conferences and in the dedicated home pages.

研究分野：情報通信工学 情報学 計算機システム・ネットワーク

キーワード：無線ネットワーク 無線資源 無線通信

1. 研究開始当初の背景

本研究課題では、高い通信端末密度の超多端末モバイル環境においても、時間、空間、周波数の無線資源に加えてエネルギーを効率的に使用して通信可能な無線アクセス制御技術、マルチホップ経路制御、フロー制御技術、情報配信技術を開発する。より具体的には、無線通信を、適応指向性通信、複数周波数帯併用、全二重通信、ネットワーク符号化、指向性単位スリープ等で高度化する技術とともに、画像・光無線によって状況を把握して無線通信を支援する画像・光・電波連携方式により高度化する技術を開発する。

2. 研究の目的

高い通信端末密度の超多端末モバイル環境において、無線資源等を効率的に使用する制御技術を開発することを目的とする。より詳細には、(1) 無線電波通信の高度化、(2) 画像・光・電波連携プロトコル(3) 応用システムをサブテーマとして推進した。

3. 研究の方法

以下の3点から研究を行った。

- (1)全二重通信、複数周波数帯域併用等による無線電波通信の高度化
- (2)画像・可視光信号を用いた通信条件の把握を用いた制御(画像・光・電波連携プロトコル(ORCP: Opt-Radio Convergence Protocols)の設計と理論・シミュレーション評価
- (3)応用面の検討

4. 研究成果

(1) 平成24年度の成果

1) 無線電波通信の高度化: 適応指向性電波通信では指向性制御や中継処理のオーバーヘッドを考慮し、指向性通信メディアアクセス制御(MAC)、経路制御、マルチチャンネル制御をベースとし、全二重通信、符号化等の技術を駆使して無線リソース高密度利用が可能な無線通信技術を開発した。特に、【1-a: 適応指向性通信、全二重通信、ネットワーク符号化、スーパーポジション符号化による高度化】のうち、全二重通信メディアアクセス制御、指向性全二重通信メディアアクセス制御、スーパーポジション符号化メディアアクセス制御、ネットワーク符号化ルーティング等の基礎方式を検討した。

2) 画像・光・電波連携プロトコル(ORCP)の設計と評価: ここでは、指向性通信用MAC並びに経路制御プロトコルをベースとして、下記2-aの開発技術で得られる環境情報を元に、制御用パケットを最小限としたMAC制御、干渉防止が可能なMACプロトコル、経路制御技術を開発した。【2-a: 画像・光による状況把握技術の開発】まず固定のマーカや形状の特徴量、機器上のLEDの配置によって、対象物・ノードの移動がない環境で障害物、通信相手、避けるべき通信パスの特定を行う画

像処理方法について検討した。検討・設計した手法を、シミュレーションによって評価した。また、Warp等を購入し、テストベッドによる実証に向けた準備を行った。

3) 画像通信、可視光通信補助型指向性通信基礎テストベッドの設計・開発: 【3-a: UNAGI-2の開発】画像認識、可視光通信に対応した基礎テストベッドUNAGI2を設計した。設計では、可視光通信の送信側の装置、光を利用したポインティングデバイスとしてLEDアレイを使用することとした。

4) 応用システムの設計および評価: 電波単体を用いた指向性通信のITS分野、高密度モバイル通信への適用を検討した。

(2) 平成25年度の成果

1) 無線電波通信の高度化: 【1-a: 適応指向性通信、全二重通信、ネットワーク符号化、スーパーポジション符号化による高度化】に関しては、MIMO全二重通信、指向性全二重通信、スーパーポジション符号化等を用いるメディアアクセス制御の開発を進めた。一例を挙げると、MIMO全二重通信メディアアクセス制御では、1対多通信および多対1通信を許容して全二重の適用機会を増やすものであり、シミュレーションで有効性を確認した。また、物理層ネットワークコーディングに関して、空間チャネル予約を行う場合及びセルラセル間干渉を考慮した場合の特性評価を行った。

2) 画像・光・電波連携プロトコル(ORCP)の設計と評価: 【2-a: 画像・光による状況把握技術の開発】および【2-b: ORCPの開発】に関しては、可視光による室内端末位置検出のためのLED出力装置の基礎的設計を行った。また、端末位置、電波の干渉に応じて複数のアクセスポイントが協調して使用する方式等を開発した。

3) 画像通信、可視光通信補助型指向性通信基礎テストベッドの設計・開発: 【3-a: UNAGI-2の開発】に関しては、Warpによる基礎実験を行うとともに専用装置の基本設計を行ったものの経費等の観点から困難であることが分かった。今後は、他の方策を検討する必要がある。

4) 応用システムの設計および評価: 電波単体を用いたITS分野への適用として、車車間通信により、車両間で効率的に情報共有をする方式等を考案し、有効性を検証した。また、映像を無線通信によって収集する方式を検討した。

(3) 平成26年度の成果

1) 無線電波通信の高度化: 全二重通信の逐次干渉除去方式および干渉を考慮したレート適応制御、パケットを部分的に中継する重畳符号化アクセス制御を開発し、特性を明らかにした。また、物理層ネットワーク符号化に関して、他ノードからの干渉信号による受信信号特性への影響や送信電力を考慮した

特性の評価を行った。さらに、無線 LAN 接続ユーザ数とスループット予測を勘案した無線ネットワーク選択およびレート制御手法を開発した。

2) 画像・光・電波連携プロトコル：カメラによって得た移動端末の位置に基づいて、複数の無線 LAN 基地局側のキャリアセンス閾値の動的変更によってスループットを向上させる方法を設計した。また、端末の位置に基づいて複数の基地局を選択的に用いて多くの端末への送信を行ってスループットを向上する方法を開発した。

3) 応用システム：まず、電波単体を用いた ITS 応用について、周辺車両が道路や交通の状況に関する情報を効率的に共有できるように、互いの位置情報に基づいて中継車両の送信優先度を決定する通信制御方式を考案した。また、歩行者事故低減のために歩行者状態などのコンテキスト情報に基づいて危険度の高い歩行者がその存在を優先的に周辺車両に通知可能とする送信制御方式等を考案した。さらに、ビデオストリーミングの無線化に関しても検討を行った。

(4) 平成 27 年度の成果

1) 無線電波通信の高度化に関しては、前年度までに開発した方式を踏まえさらに発展したネットワーク MIMO メディアアクセス制御方式、省電力無線全二重通信方式等を開発した。また、全二重 MIMO のためのメディアアクセス制御方式も開発した。さらに、無線マルチホップネットワークのスループットを向上するために、物理層ネットワークコーディングや重畳符号化方式を開発した。

2) 電波だけでなく光信号を活用して無線通信の効率化を実現するプロトコルを設計した。カメラ映像から得た可視光情報を用いて個々の端末の位置を識別し、電波通信の効率化(スマートアンテナのビーム方向、基地局の選択、キャリアセンス閾値の適応的選択)を実現する手法等を設計した。

3) 応用システムとして、高度道路交通システムを取り上げ、交通情報共有のための車車間無線通信方式を考案した。

(5) 全体の成果まとめ

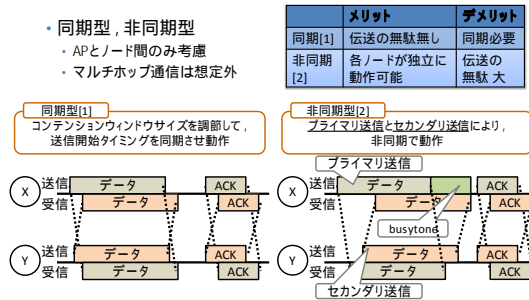
期間全体を通して得られた主な成果を以下にまとめる。

1) 無線全二重通信を有効利用するメディアアクセス制御

物理層では、自ノードが送信した信号を受信信号から削除する必要がある。そこで、まず、アンテナキャンセルを用いた場合のキャンセル量の測定を行ったところ、簡単な装置では、約 12dB のキャンセルが達成できることがわかった。実際には、100dB 以上のキャンセル量が必要であり、2013 年 Stanford 大学が 110dB を達成しているのが現時点での最高値となっている。従って、本格的な実装を行うには経費等の観点から困難であること

がわかった。

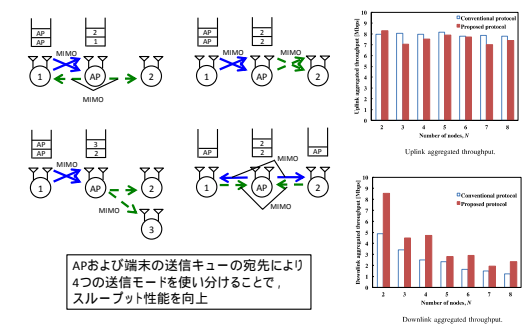
物理層で全二重通信を実現できても、交通整理をしないと効率が上がらない。本研究では、送信と受信をうまく組み合わせる全二重メディアアクセス制御や、全端末が全二重通信できる場合だけでなく一部の端末が半二重通信しかできない場合でも対応できる混在型メディアアクセス制御などを研究した(下図)。



[1] A. Sahai, et al "Pushing the limits of Full-duplex: Design and Real-time Implementation", Rice University Technical Report TREE 1104, 4 July 2011
 [2] M. Jainy, et al "Practical, Real-time, Full Duplex Wireless", MobiCom 2011, p301-312, 2011
 [3] D. Bharadia, et al "Full Duplex Radios", SIGCOMM 2013

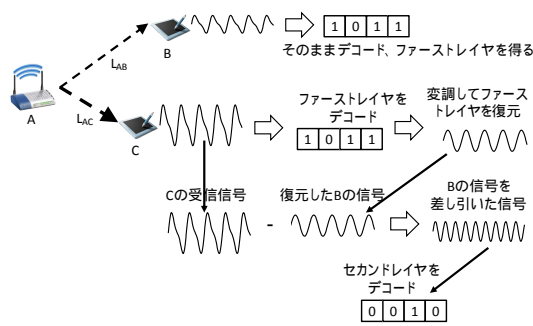
また、無線 LAN 環境におけるメディアアクセス制御プロトコルとして、全二重無線通信が適用される機会を向上させるために、アクセスポイント (AP) におけるコンテンションウィンドウ (CW) を動的に制御する手法を提案した。提案プロトコルでは、AP の送信キューにしきい値を設け、待機フレーム数に応じて、大小二つの CW を適応的に用いる。待機フレーム数がしきい値よりも多い場合、小さな CW が適用することで AP の優先度を向上させる。

さらに、MIMO 全二重通信を無線 LAN 環境で用いるためのメディアアクセス制御プロトコルを提案した。提案 MAC プロトコルは、MIMO 全二重通信の適用機会を増やすために 1 対多通信および多対 1 通信を許容することで無線 LAN 環境でのスループット性能の向上を目指すものである(下図)。



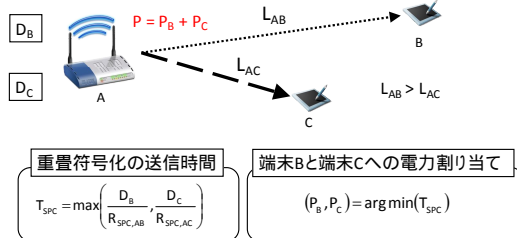
2) 逐次干渉除去と重畳符号化を有効利用するメディアアクセス制御

通常、同時に受信した複数の信号は衝突となり、両方とも受信できない。これに対し、衝突した信号からそれぞれを取り出す技術の一つが、ここで言う逐次干渉除去である。これを用いると複数端末からの信号を同時に受信できる。下図に示すように、同時に複数の信号を重畳符号化によって送信する。

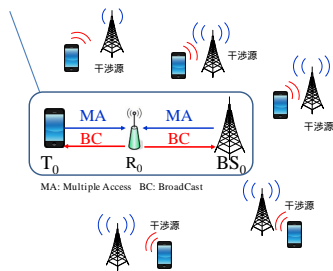


この方式では、遠方端末と近傍端末に対して、別々の情報を同時に送信する。近傍端末では、逐次干渉除去を用いている。これに電力制御、データ量制御を加えて高度化した方式 TSPC-MAC を開発した。(下図)

1. アクセスポイントの動的電力割り当て手法
2. 重畳符号化通信とユニキャスト通信の動的切り替え



また、無線マルチホップネットワークのスループットを向上するために、物理層ネットワークコーディングや重畳符号化方式の研究に取り組んだ。物理層ネットワークコーディングは、ネットワーク符号化と干渉除去を融合しスループットを向上する技術として注目を集めている。本研究では物理層ネットワークコーディングを、より大規模なネットワークに適用し干渉信号を考慮した場合の特性について、確率論的幾何学を用いた理論解析評価を行った(下図)。



また、重畳符号化方式については、USRP2 の実験プラットフォームを用いた実装に取り組み、基礎的な特性評価を行った。

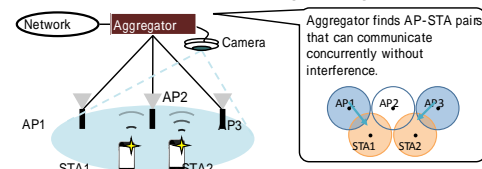
3) 電波に加えて光信号を活用する無線通信の効率化のためのプロトコル

電波だけでなく光信号を活用して無線通信の効率化を実現するプロトコルを設計し

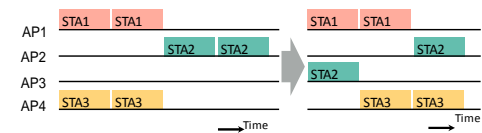
た。具体的にはカメラ映像から得た可視光情報を用いて個々の端末の位置を識別することで、位置検出のために通信に使用する電波通信帯域を消費することなく、端末位置を利用した電波通信の効率化(スマートアンテナのビーム方向、基地局の選択、キャリアセンス閾値の適応的選択)を実現する手法、ならびにその要素技術を設計した。

まず、可視光点滅信号に基づく移動端末の位置検出手法を開発した。このシステムでは、カメラ映像の各フレームを二次元に分割し、ブロック毎に計算した代表値の変化の周波数に基づいて、端末のもつ光源点滅パターンを検出する。

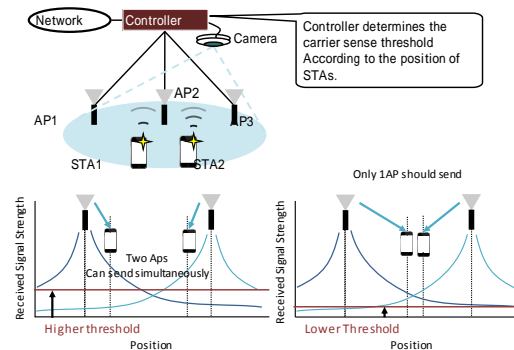
次に、高密度 AP が存在する無線 LAN における動的送信元アクセスポイントの変更とフレーム送信スケジューリングについて検討した。単一チャンネル上で空間利用効率を向上させるために、端末と通信を行う AP を宛先毎に動的に変更し、下り方向のフレームをスケジュールする手法を設計し、ネットワークが飽和した環境でスループットを約 20% 向上できることを確認した(下図)。



Aggregator schedules the order of transmission of packets so that multiple packets can be sent without interference.



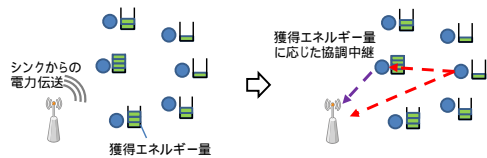
さらに、端末位置に応じて AP が用いるキャリアセンス閾値を変更することで、無線 LAN のスループットを向上する手法を開発し、特に端末位置が AP に近い場合に既存手法に対し、80%以上のスループット向上が得られることを確認した(下図)。



4) 電力伝送センサネットワークにおけるデータ中継手法

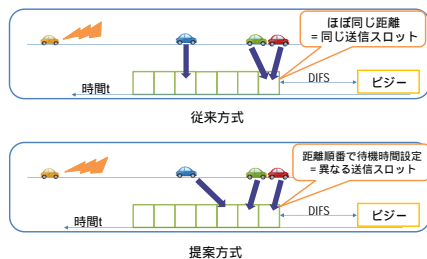
無線電力伝送を用いたセンタネットワークのための、スループット向上協調中継方式の研究に取り組んだ。電力伝送を行うシンクに対する距離により、各ノードの獲得電力量に大きな差が生じる点に着目し、余剰エネルギー

ギーを有するノードを中継ノードとして活用することで、シンクから離れたノードの通信特性を改善し、電力伝送コストを抑制する方式の基礎検討を行った(下図)。

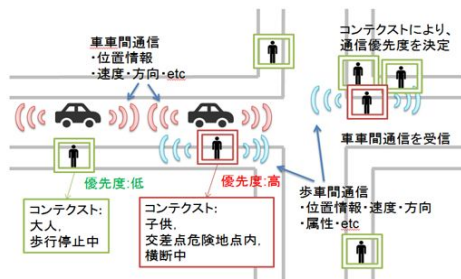


5) ITS(高度道路交通システム)応用に関する検討

交通情報共有のための車車間通信における車両位置情報に基づく中継転送方式を提案した。提案方式では、700MHz帯車車間通信により共有される位置情報から送信車両との距離の明確な順序付けを行い、遠い車両を待ち時間の少ない Slot に割り当てることにより、メディアアクセス制御層のコンテンション機構に基づいて効率的に中継車両を選択する。シミュレーション評価により提案方式が既存方式と比べて、交通情報の拡散率を33%向上させ、また遅延時間を55%低減できることを確認した(下図)。



また、歩車間通信における歩行者端末のコンテキストに基づく送信優先度制御方式を提案した。歩行者事故低減のための歩車間通信において、危険度の高い人が優先的に通信を行えるようにするコンテキストに基づく送信優先度制御方式を提案した。具体的には、1) 歩行者事故の多い交差点と単路での事故モデルの定義、2) その上でコンテキストを使った歩行者の危険度の判定方法、ならびに 3) 通信の送信優先度制御方式を提案した(下図)。



6) その他

国内外での学術会議において講演を行うとともに、専用 HP を作成し成果を社会に公開した。

<http://www-int.ist.osaka-u.ac.jp/research/about/index06.html>

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 6 件)

[H27 年度]

吉川 潤, 湯 素華, 小花 貞夫, “狭域交通情報共有のための車車間通信における車両位置情報に基づく効率的な中継転送方式の提案,” 情報処理学会論文誌, 査読有り, vol. 57, no. 1, pp.43-53, 2016 年

[H26 年度]

小寺志保, 藤橋卓也, 猿渡俊介, 渡辺尚, “カメラ間通信を用いた無線マルチビューストリーミング,” 情報処理学会論文誌, 査読有り, vol. 55, no. 9, pp. 2177-2189, 2014 年

[H25 年度]

杉山 佑介, 玉置 健太, 猿渡 俊介, 渡辺尚, “マルチホップ無線全二重通信における指向性メディアアクセス制御方式,” 電子情報通信学会論文誌, 査読有り, vol. J96-B, no. 07, pp. 753-766, 2013 年

Wuyungerile Li, Shunsuke Saruwatari, Masaki Bandai, Takashi Watanabe, “Discussions on Tradeoffs of Data Aggregation in Wireless Sensor Networks,” International Journal of Computer Systems Science & Engineering, 査読有り, vol. 29, pp. 1-13, 2014 年

Ari Raptino H, Kenta Tamaki, Yusuke Sugiyama, Masaki Bandai, Shunsuke Saruwatari, Takashi Watanabe, “Rate and Relay Diversity in Temporal Spectrum Sharing,” International Journal of Computer Systems Science & Engineering, 査読有り, vol. 29, no. 1, pp. 1-11, 2014 年

〔学会発表〕(計 93 件)

[H27 年度]

Makoto Kobayashi, Bryan Ng, Winston Seah, Shunsuke Saruwatari, Takashi Watanabe, “TARC: Throughput-aware Random Scalable Clustering for Network MIMO,” IEEE Globecom 2015, 2015.12.8, Hilton San Diego Bayfront, San Diego, USA

小林 真,猿渡俊介,渡辺 尚, “ネットワーク MIMO における動的アクセスポイント選択に関する基礎検討,” 電子情報通信学会技術研究報告, RCS2015-245, 2015.12.17, 松山市総合コミュニティセンター(愛媛県松山市)

國川雅司, 四方博之, “無線電力伝送を用いたセンサネットワークにおける余剰エネルギーを活用した協調中継方式,” 電子情報

通信学会技術研究報告, ネットワークシステム研究会, 2016.3.4, フェニックス・シーガイア・リゾート(宮崎県宮崎市)

村上 遼・小林 真・中川 翔・西田昇平・渡辺 尚, “無線全二重通信の電力消費に関する検討,” 電子情報通信学会 2016 年総合大会, 2016.3.16, 九州大学伊都キャンパス(福岡県福岡市)

[H26 年度]

西田昇平, 山崎景太, 猿渡俊介, 渡辺尚, “無線中継局と干渉除去におけるブロードキャスト通信に関する考察,” マルチメディア、分散、協調とモバイル(DICOMO2014), 2014.7.9, 月岡温泉ホテル泉慶(新潟県新発田市)

中川翔, 杉山佑介, 木崎一廣, 猿渡俊介, 渡辺尚, “無線通信の高速化に向けた中継全二重通信のための全二重無線通信装置の基礎的実装,” マルチメディア、分散、協調とモバイル(DICOMO2014), 2014.7.9, 月岡温泉ホテル泉慶(新潟県新発田市)

Hironori Fukui, Petar Popovski, and Hiroyuki Yomo, “Physical Layer Network Coding: An Outage Analysis in Cellular Network,” The 2014 European Signal Processing Conference (EUSIPCO 2014), 2014.9.1-5, Lisbon, Portugal

Kodai Murakami, Tatsuya Ito, Susumu Ishihara, “Improving the throughput of wireless LAN by tuning carrier sense threshold of access points based on node positions detected by a visible light tag system,” 2014 IEEE 33rd International Symposium on Reliable Distributed Systems (IEEE SRDS2014), 2014.10.7, Nara, Japan
[H25 年度]

Kenta Tamaki, Ari Raptino H., Yusuke Sugiyama, Masaki Bandai, Shunsuke Saruwatari, Takashi Watanabe, “Full Duplex Media Access Control for Wireless Multi-hop Networks,” Proceedings of the IEEE 77th Vehicular Technology Conference (IEEE VTC2013-Spring), 2013.6.2-5, MARITIM Hotel & International Congress Center Dresden, Dresden, Germany

吉川 潤、斎藤 淑、小花貞夫, “車車間通信を利用した局地的交通情報の共有方式に関する一考察,” マルチメディア、分散、協調とモバイル(DICOMO2013), 2013.7.10-12, 十勝川温泉ホテル大平原(北海道河東郡)

山崎景太, 猿渡俊介, 渡辺 尚, “ソフトウェア無線を用いた重畳符号化通信の基礎実装と評価,” マルチメディア、分散、協調とモバイル(DICOMO2013), 2013.7.10-12, 十勝川温泉ホテル大平原(北海道河東郡)

伊藤達哉, 石原 進, “超多数 AP 協調による無線 LAN 機能向上手法の基礎検討,” 情報処理学会モバイルコンピューティングユビキタス通信研究会, 2013.12.19, 国際女性教育会館(埼玉県比企郡)

[H24 年度]

Ken Miura, Masaki Bandai, “Node Architecture and MAC Protocol for Full Duplex Wireless and Directional Antennas”, 23rd IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC '12)2012.9.9-12, Sheraton on the Park Hotel (Sydney, Australia)

[図書](計 2 件)

[産業財産権]

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

渡辺 尚(WATANABE, Takashi)
大阪大学・情報科学研究科・教授
研究者番号: 9 0 2 0 1 2 0 1

(2) 研究分担者

四方 博之(YOMO, Hiroyuki)
関西大学・工学部・教授
研究者番号: 0 0 5 1 0 1 2 4

(3) 研究分担者

石原 進(ISHIHARA, Susumu)
静岡大学・工学部・准教授
研究者番号: 1 0 3 1 3 9 2 5

(4) 連携研究者

猿渡 俊介(SARUWATARI, Shunsuke)
大阪大学・情報学研究科・准教授
研究者番号: 5 0 5 0 7 8 1 1

(5) 連携研究者

小花 貞夫(OBANA, Sadao)
電気通信大学・情報理工学(系)研究科・教授
研究者番号: 6 0 3 9 5 0 4 3

(6) 研究分担者

萬代 雅希(BANDAI, Masaki)
上智大学・理工学部・准教授
研究者番号: 9 0 3 7 7 7 1 3